



Ronaldo Gomes de Castro Medeiros

**Efeito da variação de temperatura
sobre a resistência ao impacto de
compósitos com matriz epóxi
reforçados com fibras de vidro, fibras
de Luffa cylindrica e compósitos
híbridos fibra de vidro/Luffa**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio.

Orientador: Prof. José Roberto Moraes d'Almeida

Rio de Janeiro

Abril de 2023



Ronaldo Gomes de Castro Medeiros

**Efeito da variação de temperatura
sobre a resistência ao impacto de
compósitos com matriz epóxi
reforçados com fibras de vidro, fibras
de Luffa cylindrica e compósitos
híbridos fibra de vidro/Luffa**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. José Roberto Moraes d'Almeida

Orientador

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Profa. Laura Hecker de Carvalho

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Prof. Ricardo Henriques Leal

Universidade Federal Fluminense – UFF

Profa. Fabiane Roberta Freitas da Silva

Universidade Federal Fluminense – UFF

Profa. Ana Lúcia Fampa Seabra d'Almeida

Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras

Rio de Janeiro, 28 de abril de 2023

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, da autora e do orientador

Ronaldo Gomes de Castro Medeiros

Graduou-se em Engenharia Metalúrgica (Universidade Federal Fluminense) em 2017. Licenciado em Matemática (Centro Universitário Unifael) em 2021. Mestre em Engenharia Metalúrgica (Universidade Federal Fluminense) em 2018. Especialista em Educação a distância (Centro Universitário Unifael) em 2021.

Ficha Catalográfica

Medeiros, Ronaldo Gomes de Castro

Efeito da variação de temperatura sobre a resistência ao impacto de compósitos com matriz epóxi reforçados com fibras de vidro, fibras de Luffa cylindrica e compósitos híbridos fibra de vidro/Luffa / Ronaldo Gomes de Castro Medeiros ; orientador: José Roberto Moraes d'Almeida. – 2023.

211 f. : il. color. ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 2023.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Química e de Materiais – Teses. 2. Fibras lignocelulósicas. 3. Envelhecimento. 4. Compósitos. 5. Resistência ao impacto. 6. Absorção de água. I. Almeida, José Roberto Moraes d'. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Química e de Materiais. III. Título.

CDD: 620.11

Aos meus pais, Ronaldo e Rose,
Pela confiança, dedicação e apoio.

Agradecimentos

Aos meus pais e minha irmã, por todo apoio e força durante todo esse tempo. Por terem segurado minha mão quando mais precisei. Por terem abdicado de tantas coisas para que eu pudesse realizar meu sonho. Por terem acreditado em mim nos momentos mais difíceis. Sem vocês eu jamais teria conseguido. Essa conquista é para vocês.

Ao meu orientador Professor José Roberto, pela confiança, incentivo, educação, aprendizado e dedicação em momentos de dificuldade. Por toda parceria na realização deste trabalho. Por ser um profissional exemplo para todos nós.

A CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem o quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus amigos por todo acolhimento e paciência durante todos esses anos. Por terem me acompanhado nos momentos de alegria, tristeza e insegurança. Vocês são minha segunda família.

À minha amiga Patrícia pelo apoio durante todos esses anos de parceria. Por todos os momentos de alegria e insegurança que compartilhamos. Por ter compartilhado esse sonho comigo durante todo esse tempo.

Ao meu amigo Marcel por ter sido minha primeira inspiração no meio acadêmico e por ter me incentivado durante todos esses anos.

Aos colegas de laboratório Bruno, Marcello e Victor por toda contribuição.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Medeiros, Ronaldo Gomes de Castro; D’Almeida, José Roberto Moraes (Orientador); **Efeito da variação de temperatura sobre a resistência ao impacto de compósitos com matriz epóxi reforçados com fibras de vidro, fibras de *Luffa cylindrica* e compósitos híbridos fibra de vidro/Luffa.** Rio de Janeiro, 2023. 211p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras se destacam em diversas aplicações industriais, devido as suas características, como baixo custo, baixa densidade e boa resistência mecânica. Porém, o ambiente ao qual o compósito será exposto e a variação de temperatura a qual o compósito é submetido, irão exercer influência no comportamento do material. Estudos sobre as características microestruturais e o comportamento mecânico de compósitos poliméricos com fibras de luffa (*Luffa cylindrica*) e híbridos (fibra de vidro/luffa) em ambientes úmidos são recentes e, para os compósitos de luffae, principalmente, para os híbridos poucas pesquisas foram realizadas. Assim, com a finalidade de obter materiais com diferentes propriedades e comportamentos, foram fabricados e estudados compósitos com matriz epóxi reforçada com fibras de vidro, fibra de luffae híbridos vidro-luffa. O ensaio de envelhecimento foi realizado em amostras submersas em água destilada em duas temperaturas de envelhecimento (25°C e 60°C). O tempo total de envelhecimento foi de 4 meses (120 dias). Para a avaliação da degradação mecânica foram realizados ensaios não-destrutivos (termografia e ensaio sonoro) e ensaios destrutivos (impacto). O processo de absorção de água nos compósitos também foi avaliado. O presente estudo tem como relevância o preenchimento de lacunas de conhecimento do comportamento de híbridos vidro/luffa, notadamente em ambiente úmido com variação de temperatura. Como resultado, observou-se que o ensaio de envelhecimento indicou que os valores de absorção máxima dos compósitos de fibra de vidro, luffa e híbrido, assim como, seus respectivos coeficientes de difusão mostraram-se condizentes com os valores

encontrados na literatura. Os compósitos de fibra de luffa foram os que apresentaram maior valor de absorção. Já os resultados do ensaio de impacto, permitiram identificar os modos de falha e avaliar o efeito entre as temperaturas de envelhecimento. Os compósitos de fibra de vidro tiveram pouca variação da resistência ao impacto antes e após o envelhecimento a 25°C e a 60°C. Já os compósitos de fibra de luffa e híbrido apresentaram uma variação considerável antes e após o envelhecimento a 25°C e 60°C. O ensaio sonoro permitiu avaliar o efeito do envelhecimento sobre o módulo de elasticidade e o fator de perda. O resultado do ensaio sonoro dos compósitos híbridos mostrou que o módulo de elasticidade e o fator de perda não tiveram diferenças significativas entre os tempos de envelhecimento indicando que a hibridização atuou de modo eficiente para proteger as fibras de luffa. O ensaio de termografia foi usado como uma nova abordagem para avaliar a condutividade térmica dos compósitos. Por fim, concluiu-se que a hibridização foi eficiente, pois os compósitos híbridos apresentaram características em relação a absorção, resistência ao impacto e condutividade térmica, intermediárias aos compósitos de fibra de vidro e fibra de luffa e, principalmente a hibridização reduziu de modo significativo a degradação do compósito de luffa quando exposto a ambiente úmidos, além de proporcionar uma alternativa de projeto mais ambientalmente amigável.

Palavras-chaves

Fibras lignocelulósicas; Envelhecimento; Compósitos; Resistência ao impacto; Absorção de água.

Abstract

Medeiros, Ronaldo Gomes de Castro; D'Almeida, José Roberto Moraes (Advisor); **Effect of temperature variation on the impact strength of epoxy matrix composites reinforced with glass fibers, *Luffa cylindrica* fibers and hybrid fiberglass/*Luffa* composites.** Rio de Janeiro, 2023. 211p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Polymer matrix composites reinforced with fibers stand out in various industrial applications due to their characteristics such as low cost, low density, and good mechanical strength. However, the environment to which the composite will be exposed and the temperature variation to which the composite is subjected will influence the material's behavior. Studies on the microstructural characteristics and mechanical behavior of polymer composites with *Luffa cylindrica* fibers and hybrid fibers (glass/*luffa*) in humid environments are recent, and few studies have been carried out for the *Luffa* and, especially, the hybrid composites. Thus, in order to obtain materials with different properties and behaviors, composites were fabricated and studied with an epoxy matrix reinforced with glass fibers, *Luffa* fibers, and glass-*Luffa* hybrids. The aging test was carried out on samples submerged in distilled water at two aging temperatures (25°C and 60°C). The total aging time was 4 months (120 days). Non-destructive tests (thermography and sound test) and destructive tests (impact) were performed to evaluate mechanical degradation. The water absorption process in the composites was also evaluated. The present study is relevant to filling knowledge gaps in the behavior of glass/*luffa* hybrids, especially in a humid environment with temperature variation. As a result, it was observed that the aging test indicated that the maximum absorption values of the glass, *Luffa*, and hybrid fiber composites, as well as their respective diffusion coefficients, were consistent with the values found in the literature. The *Luffa* fiber composites had the highest absorption value. The results of the impact test allowed for the identification of failure modes and the evaluation of the effect between aging

temperatures. The glass fiber composites had little variation in impact strength before and after aging at 25°C and 60°C. The Luffa and hybrid fiber composites showed considerable variation before and after aging at 25°C and 60°C. The sound test allowed for the evaluation of the aging effect on the modulus of elasticity and loss factor. The sound test results for the hybrid composites showed that the modulus of elasticity and loss factor had no significant differences between aging times, indicating that hybridization efficiently protected the luffafibers. The thermography test was used as a new approach to evaluate the thermal conductivity of the composites. Finally, it is concluded that hybridization was efficient because the hybrid composites had characteristics regarding absorption, impact resistance, and thermal conductivity that were intermediate between glass and Luffa fiber composites, and mainly hybridization significantly reduced the degradation of the Luffa composite when exposed to humid environments, as well as providing a more environmentally friendly design alternative.

Keywords:

Lignocellulosic fibers; Aging; Composites; Impact strength; Water absorption.

Sumário

1. Introdução	22
1.1. Objetivos	24
1.2. Objetivos Específicos	24
2. Revisão bibliográfica	25
2.2. Matriz Polimérica	27
2.2.1. Resina epóxi	27
2.3. Fibras de vidro	30
2.4. Fibra natural	33
2.4.1. Luffa (luffa cylindrica)	34
2.5. Compósito híbrido (fibra de vidro/luffa)	36
2.6. Envelhecimento e degradação de compósitos	37
2.6.1. Difusão de água em materiais compósitos	41
2.6.1.1. Difusão fickiana	42
2.6.1.2. Difusão anômala	47
2.6.2. Envelhecimento compósito polimérico reforçado com fibra de vidro	49
2.6.3. Envelhecimento compósito polimérico reforçado com fibra natural (luffa cylindrica)	50
2.6.4. Envelhecimento compósito polimérico híbrido reforçado com fibra de vidro/luffa	51
2.7. Ensaio de impacto	52
2.7.1. Ensaio charpy	54
2.8. Ensaaios não-destrutivos	59
2.8.1. Ensaio de termografia	59
2.8.1.1. Ensaio de termografia ativa pulsada	60
2.8.2. Ensaio sonoro	68
3. Metodologia experimental	71

3.1. Materiais	71
3.2. Métodos	73
3.2.1. Fabricação	73
3.2.1.1. Processo de laminação do compósito reforçado com fibra de vidro	74
3.2.1.2. Processo de laminação compósito reforçado com fibra de luffa	76
3.2.1.3. Processo de laminação compósito híbrido (vidro/luffa)	78
3.2.2. Descrição geral dos ensaios	79
3.2.2.1. Ensaio de envelhecimento	81
3.2.2.2. Ensaio de absorção	83
3.2.2.3. Ensaio sonoro	83
3.2.2.4. Ensaio de impacto	85
3.2.2.5. Ensaio de termografia	86
4. Resultados e discussão	88
4.1. Ensaio de absorção	88
4.1.1. Comportamento de absorção à temperatura ambiente	89
4.1.1.1. Fibra de vidro	89
4.1.1.2. Fibra de luffa	91
4.1.1.3. Híbrido	94
4.1.1.4. Comparação entre os compósitos	96
4.1.2. Comportamento à temperatura de 60°C	97
4.1.2.1. Fibra de vidro	98
4.1.2.2. Fibra de luffa	100
4.1.2.3. Compósito híbrido	103
4.1.2.4. Comparação entre os compósitos	106
4.2. Ensaio de impacto	108
4.2.1. Ensaio de impacto antes do envelhecimento	108
4.2.2. Ensaio de impacto em compósitos envelhecidos a temperatura ambiente	124
4.2.3. Ensaio de impacto compósito envelhecido a temperatura 60°C	137
4.2.4. Comparação global do comportamento ao impacto	151
4.3. Ensaio sonoro	154

4.3.1. Compósito de fibra de vidro	155
4.3.2. Compósito de fibra de luffa	158
4.3.3. Compósito híbrido	160
4.4. Termografia	164
 5. Conclusões	 166
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	169
 6. Referências bibliográficas	 170
 Apêndice a – curvas e dados de absorção – temperatura ambiente	 194
 Apêndice b – curvas e dados de absorção – temperatura 60°C	 203

Lista de figuras

Figura 1 - Material compósito com arranjo das fibras com boa aderência com a matriz [23].	25
Figura 2 - Material compósito com arranjo das fibras com fraca aderência com a matriz [23].	26
Figura 3 - Estrutura do anel epoxídico [33].	28
Figura 4 - Estrutura química da resina epóxi DGEBA [33].	28
Figura 5 - Estágios da cura nos polímeros termorrígidos: (a) indução, (b) gelificação, (c) vitrificação, (d) cura completa [37].	29
Figura 6 - Estrutura do vidro [41].	31
Figura 7 - Classificação das fibras vegetais - adaptado de [53].	34
Figura 8 - Regiões na <i>Luffa cylindrica</i> [58].	35
Figura 9 - Comparação do comportamento de absorção de umidade entre o modelo de Fick e dados experimentais para amostras envelhecidas em três condições diferentes [80].	45
Figura 10 - (a) Curva típica de absorção Sigmoidal; (b) Curva típica de absorção em dois estágios e (c) Curva típica do modo II de absorção (linha tracejada), comparada a uma curva do modelo de Fick [86].	47
Figura 11 - Posição dos corpos de prova nos ensaios de impacto (a) Charpy e (b) Izod [116].	53
Figura 12 - Ensaio Charpy [115].	54
Figura 13 - Configuração da termografia ativa pulsada pelo método de reflexão e transmissão [138].	61
Figura 14 - Termografia ativa pulsada. Método de reflexão: (a) Peça sem defeito; (b) Peça com defeito [132].	62
Figura 15 - (a) Esquema da Termografia Modulada; (b – d) Imagens das fases com diferentes frequências [140].	63
Figura 16 - Esquema do ensaio de termografia ativa pulsada com os parâmetros analisados [129].	65
Figura 17 - Esquema de termografia ativada pulsada pelo método de transmissão [138].	67

Figura 18 - Molde totalmente revestido de polietileno.	73
Figura 19 - O molde de madeira submetido a uma carga de 4 toneladas na prensa hidráulica.	74
Figura 20 - Processo de laminação compósito reforçado com fibra de vidro. (a) Espalhamento da resina com o rolo de espuma. (b) Compactação da manta de fibra de vidro com rolo metálico.	75
Figura 21 - Laminado de Fibra de Vidro com 35 cm x 35 cm de área ao ser retirado do molde.	76
Figura 22 - a) Fibras recebidas, b) As fibras após serem abertas e ter sido retirada a parede intermediária e as sementes.	76
Figura 23 - a) As mantas de fibra de luffa posicionadas no molde. b) Placa de compósito após retirada do molde.	78
Figura 24 - Processo de laminação compósito híbrido. (a) Manta de fibra de vidro colocada por cima das camadas de Fibra de Luffa. (b) Resina sendo espalhada com ajuda do rolo de espuma.	79
Figura 25 - Placa de compósito híbrido vidro/luffa/vidro obtida após a prensagem.	79
Figura 26 - Fluxograma esquemático da caracterização dos compósitos antes do envelhecimento.	80
Figura 27 - Fluxograma esquemático da caracterização dos compósitos durante e após o envelhecimento.	81
Figura 28 - Amostras em banho maria a 60°C.	82
Figura 29 - Ensaio Sonoro. Microfone (1) e pulsador (2) posicionados sobre o corpo de prova.	84
Figura 30 - Ensaio de Impacto Charpy.	86
Figura 31 - Análise da temperatura dos compósitos com o auxílio da câmera termográfica FLIR.	87
Figura 32 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra V1 envelhecida em temperatura ambiente.	89
Figura 33 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra L1 envelhecida em temperatura ambiente.	92
Figura 34 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra H1 envelhecida em temperatura ambiente.	94

Figura 35 - Curvas de %incremento de massa x hora dos compósitos de fibra de vidro, luffa e híbrido.	97
Figura 36 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra V1 envelhecida em temperatura de 60 graus.	98
Figura 37 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra L1 envelhecida em temperatura de 60 graus.	101
Figura 38 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra H1 envelhecida em temperatura 60 graus.	103
Figura 39 - Curvas de %incremento de massa x hora dos compósitos de fibra de vidro, luffa e híbrido envelhecidos a 60°C.	106
Figura 40 - Curvas de %incremento de massa x hora dos compósitos de fibra de vidro envelhecidos a temperatura ambiente e a 60°C	107
Figura 41 - Curvas de %incremento de massa x hora dos compósitos de fibra de luffa envelhecidos a temperatura ambiente e a 60°C.	108
Figura 42 - Curvas de %incremento de massa x hora dos compósitos de fibra de híbridos envelhecidos a temperatura ambiente e a 60°C.	108
Figura 43 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto dos compósitos de fibra de vidro não envelhecidos.	110
Figura 44 - Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos de fibra de vidro não envelhecidos.	110
Figura 45 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de vidro após sofrerem ensaio de impacto.	112
Figura 46 - Corpo de prova amostra 4 mostrando possível início de delaminação em suas bordas.	113
Figura 47 - Amostras 9 mostrando a inclinação elevada após o ensaio de impacto.	113
Figura 48 - Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos de fibra de luffa não envelhecidos.	115
Figura 49 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto dos compósitos de fibra de luffa não envelhecidos.	115
Figura 50 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de luffa após sofrerem ensaio de impacto.	117
Figura 51 - Corpo de prova amostra 6 de luffa mostrando que foi a única amostra que não rompeu completamente.	118

Figura 52 - Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos híbridos não envelhecidos.	119
Figura 53 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto dos compósitos híbridos não envelhecidos.	119
Figura 54 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de vidro/luffa após sofrerem ensaio de impacto.	121
Figura 55 - Gráfico Bloxplot comparação das resistências ao impacto entre os compósitos de vidro, compósitos de luffa e compósitos híbridos não envelhecidos.	122
Figura 56 - Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos fibra de fibra de vidro envelhecidos a temperatura ambiente.	125
Figura 57 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto dos compósitos de fibra de vidro envelhecidos a temperatura ambiente.	125
Figura 58 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de vidro envelhecidos a temperatura ambiente após sofrerem ensaio de impacto.	126
Figura 59 - Corpo de prova das amostras 1,2 e 4 mostrando formato de U sofrido pelas amostras.	127
Figura 60 - Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos fibra de luffa envelhecidos a temperatura ambiente.	128
Figura 61 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto dos compósitos de fibra de luffa envelhecidos a temperatura ambiente.	129
Figura 62 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de luffa envelhecidos a temperatura ambiente após sofrerem ensaio de impacto.	129
Figura 63 - Corpo de prova amostras 1,2,3 e 5 de luffa envelhecida a temperatura ambiente mostrando a perda de resina.	130
Figura 64 - Corpo de prova amostras 4 de luffa envelhecida a temperatura ambiente mostrando uma trinca de delaminação que percorre a lateral da amostra.	131
Figura 65 - Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos híbridos envelhecidos a temperatura ambiente.	132

Figura 66 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto dos compósitos híbridos envelhecidos a temperatura ambiente.	132
Figura 67 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de vidro/luffaenvelhecidos a temperatura ambiente após sofrerem ensaio de impacto.	134
Figura 68 - Corpo de prova amostras 8 do compósito híbrido envelhecida a temperatura ambiente mostrando uma trinca que percorre a lateral da amostra.	135
Figura 69 - Gráfico Bloxplot comparação entre as resistências ao impacto dos compósitos envelhecidos a temperatura ambiente.	136
Figura 70 - Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos fibra de vidro envelhecidos a 60°C.	139
Figura 71 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto compósito de fibra de vidro envelhecido a 60°C.	139
Figura 72 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de vidro envelhecidos a 60°C após sofrerem ensaio de impacto.	140
Figura 73 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de vidro envelhecidos a 60°C com comportamento em V.	141
Figura 74 - Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos fibra de luffa envelhecidos a 60°C.	143
Figura 75 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto dos compósitos de fibra de luffa envelhecidos a 60°C.	143
Figura 76 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de luffa envelhecidos a temperatura de 60°C após sofrerem ensaio de impacto.	144
Figura 77 - Corpo de prova amostras 5,6,3 e 7 de luffa envelhecida a temperatura 60°C apresentou defeitos (perda de resina e trinca).	145
Figura 78 -Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos híbridos envelhecidos a 60°C.	146
Figura 79 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto dos compósitos híbridos envelhecidos a 60°C.	146
Figura 80 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de vidro/luffaenvelhecidos a temperatura de 60°C.	148

Figura 81 - Corpo de prova das amostras 4, 5 e 9 do compósito híbrido envelhecida a 60°C mostrando uma trinca que percorre a lateral.	149
Figura 82 - Gráfico Bloxplot comparação das resistências ao impacto entre os compósitos de vidro, compósitos de luffa e compósitos híbridos envelhecidos a 60°C.	149
Figura 83 - Gráfico Bloxplot comparação entre as resistências ao impacto dos compósitos de fibra de vidro.	152
Figura 84 - Gráfico Bloxplot comparação entre as resistências ao impacto dos compósitos de fibra de luffa.	153
Figura 85 - Gráfico Bloxplot comparação entre as resistências ao impacto dos compósitos de híbridos.	153
Figura 86 - Evolução módulo de elasticidade compósitos de fibra de vidro envelhecidos a 25°C e 60°C.	156
Figura 87 - Evolução do fator de perda dos compósitos de fibra de vidro envelhecidos a 25°C e 60°C.	158
Figura 88 - Evolução módulo de elasticidade do compósito de fibra de luffa envelhecidos a 25°C e 60°C.	159
Figura 89 - Evolução do fator de perda dos compósitos de fibra de luffa envelhecidos a 25°C e 60°C.	160
Figura 90 - Evolução do módulo de elasticidade dos compósitos híbridos envelhecidos a 25°C e 60°C.	162
Figura 91 - Evolução do fator de perda dos compósitos híbridos envelhecidos a 25°C e 60°C.	163

Lista de tabelas

Tabela 1 - Comparação das propriedades de resinas típicas de Poliéster, Vinil Ester e Epóxi [39].	30
Tabela 2 - Propriedades dos diferentes tipos de vidro [43-44].	32
Tabela 3 - Composição Química Fibra Luffa cylindrica [59].	35
Tabela 4 - Fração volumétrica de laminados compósitos híbridos [126].	58
Tabela 5 - Energia de impacto em compósitos sem/com adição de nano sílica [127].	58
Tabela 6 - Especificações da resina.	71
Tabela 7 - Especificação dos tipos de compósito com matriz epóxi fabricados.	72
Tabela 8 - Quantidade de amostras separadas por recipientes.	82
Tabela 9 - Quantidade de amostras no ensaio sonoro antes do envelhecimento.	85
Tabela 10 - Parâmetros de absorção para os compósitos de fibra de vidro envelhecidos em temperatura ambiente.	90
Tabela 11 - Parâmetros de absorção para os compósitos de fibra de luffa envelhecidos em temperatura ambiente.	92
Tabela 12 - Parâmetros de absorção para os compósitos híbrido envelhecidos em temperatura ambiente.	95
Tabela 13 - Parâmetros de absorção para os compósitos de fibra de vidro envelhecidos em temperatura de 60 °C.	99
Tabela 14 - Parâmetros de absorção para os compósitos de fibra de luffa envelhecidos em temperatura de 60 graus.	101
Tabela 15 - Parâmetros de absorção para os compósitos híbrido envelhecidos em temperatura de 60 graus.	104
Tabela 16 - Resistência ao impacto do compósito de fibra de vidro.	109
Tabela 17 - Resistência ao impacto compósito fibra de vidro encontrados na literatura.	111
Tabela 18 - Resistência ao impacto do compósito de fibra de luffa.	114

Tabela 19 - Resistência ao impacto compósito fibra de luffa encontrados na literatura.	116
Tabela 20 - Resistência ao impacto compósito híbrido.	118
Tabela 21 - Resistência ao impacto compósito híbrido encontrados na literatura.	120
Tabela 22 - Tabela teste de Tukey antes do envelhecimento.	123
Tabela 23 - Resistência ao impacto compósito fibra de vidro envelhecido em temperatura ambiente.	124
Tabela 24 - Resistência ao impacto compósito fibra de luffa envelhecido em temperatura ambiente.	127
Tabela 25 - Resistência ao impacto compósito fibra de luffa envelhecido em temperatura ambiente.	131
Tabela 26 - Tabela teste de Tukey amostras envelhecidas a 25°C.	136
Tabela 27 - Resistência ao impacto compósito fibra de vidro envelhecido a 60°C.	138
Tabela 28 - Resistência ao impacto compósito fibra de luffa envelhecido a 60°C.	142
Tabela 29 - Resistência ao impacto compósito híbrido envelhecido a 60°C.	145
Tabela 30 - Tabela teste de Dunn.	150
Tabela 31 - Evolução do módulo de elasticidade do compósito fibra de vidro em função do tempo e da temperatura de envelhecimento.	155
Tabela 32 - Evolução do módulo de elasticidade compósito fibra de vidro em função do tempo e da temperatura de envelhecimento.	157
Tabela 33 - Evolução do módulo de elasticidade do compósito de fibra de luffa em função do tempo e da temperatura de envelhecimento.	159
Tabela 34 - Evolução do fator de perda dos compósitos de fibra de luffa em função do tempo e da temperatura de envelhecimento.	160
Tabela 35 - Evolução do módulo de elasticidade do compósito híbrido em função do tempo e da temperatura de envelhecimento.	161
Tabela 36 - Evolução do fator de perda dos compósitos híbrido envelhecidos em função do tempo e da temperatura de envelhecimento.	163
Tabela 37 - Tempo para atingir 100°C.	164

Lista de Abreviações

V1: Compósito Fibra de Vidro 1

V2: Compósito Fibra de Vidro 2

V3: Compósito Fibra de Vidro 3

L1: Compósito Fibra de Luffa 1

L2: Compósito Fibra de Luffa 2

L3: Compósito Fibra de Luffa 3

H1: Compósito Híbrido 1

H2: Compósito Híbrido 2

H3: Compósito Híbrido 3

1. Introdução

Ao longo das décadas, com o desenvolvimento industrial, aumentou a demanda pelo desenvolvimento de novos materiais. A procura por materiais mais resistentes, leves e com menor custo se tornou muito importante. Essa busca por materiais com características passíveis de substituir ligas metálicas em diversas aplicações, fez com que os materiais compósitos começassem a ser estudados [1-3].

Os principais compósitos produzidos durante diversos anos foram os compósitos com matriz polimérica reforçados com fibras sintéticas. Porém, avanço tecnológico, aumento da conscientização ambiental e o conhecimento da escassez dos recursos provenientes do petróleo, a pesquisa relacionada aos materiais compósitos reforçados com fibras naturais vem crescendo a cada dia [4-6].

O crescimento da aplicação das fibras naturais como reforço em compósitos poliméricos, propicia diversas vantagens quando os compósitos com fibras naturais são comparados aos materiais compósitos reforçados com fibras sintéticas. Propriedades como baixo custo e menor densidade, são aprimoradas com o uso das fibras naturais [7].

O uso de fibras naturais, apesar dessas fibras apresentarem diversas vantagens quando comparadas com o uso de fibras sintéticas em materiais compósitos poliméricos, porém também apresenta desvantagens como uma maior absorção de umidade e menor adesão fibra/matriz, que podem afetar as propriedades mecânicas dos compósitos. Com a finalidade de solucionar esse problema e melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos usando fibras naturais foram desenvolvidos compósitos poliméricos híbridos, reforçados com fibras naturais e sintéticas [8-9].

A combinação de fibras sintéticas e fibras naturais em compósitos de matriz polimérica faz com que o compósito adquira propriedades das duas fibras, melhorando as suas propriedades mecânicas. A fibra natural devido a sua maior facilidade em absorver água, é utilizada no interior do material, onde fica protegida do meio externo pela fibra sintética [10].

Há uma crescente exigência sobre pesquisas que possam prever o comportamento desses materiais em diferentes aplicações e solicitações mecânicas, assim como prever seu comportamento até o final da sua aplicação [11].

A crescente utilização de materiais compósitos de matriz poliméricas reforçado com fibras implica, inúmeras vezes, em aplicações nas quais esses compósitos acabam sendo expostos a ambientes úmidos, o que pode degradar a sua integridade física. Com a finalidade de entender como é causado o processo de degradação dos compósitos poliméricos reforçados com fibras quando expostos a ambientes de elevada umidade, tanto em ambientes comuns quanto ambientes salinos, faz-se necessário avaliar sob condições laboratoriais os mecanismos de envelhecimento, para que seja possível prever a vida útil desses materiais quando expostos a ambientes úmidos [12].

Um estudo desenvolvido por Srihari et al. [13], mostra que compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro apresentam uma considerável perda das propriedades mecânicas devido a absorção de água. Já um estudo realizado por Espert et al. [14] com fibras naturais, mostrou que as propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais sofreram grande influência da exposição a umidade. A pesquisa realizada por Silva [15], mostra que o compósito polimérico híbrido luffa/vidro, apresenta maior absorção de água quando comparado ao compósito polimérico reforçado com fibra de vidro.

Além do ambiente, a temperatura é um parâmetro que também exerce grande influência na degradação de compósitos poliméricos. O aumento da temperatura acelera o processo de absorção de água, causando degradação no compósito [16-18].

A utilização de compósitos poliméricos reforçados fibras naturais ou a utilização de compósitos híbridos (fibras sintéticas/fibras naturais) tem diversas vantagens, porém devido a facilidade de absorção de água pelas fibras naturais, tem-se problema na previsão da vida útil desses materiais quando expostos a ambientes úmidos. Com a finalidade de prever tempo total de serviço desses materiais compósitos, a utilização de ensaios destrutivos e ensaios não-destrutivos é de extrema importância. Esses ensaios auxiliam entender o comportamento microestrutural e mecânico dos compósitos quando expostos a umidade em diferentes ambientes e temperaturas, permitindo antever e evitar falhas catastróficas [11].

1.1. Objetivos

O objetivo da pesquisa é estudar o comportamento mecânico dos materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de vidro, fibra de *Luffa cylindrica* e compósito híbrido (fibra de vidro/fibra de *Luffa cylindrica*) quando submetidos ao envelhecimento em água destilada sob duas condições de temperatura (25°C e 60°C).

1.2. Objetivos Específicos

- Fabricar com reprodutibilidade os três tipos de compósitos;
- Determinar o percentual de absorção e o tempo de saturação dos compósitos pelo ensaio de envelhecimento;
- Determinar a resistência ao impacto dos compósitos antes e após o envelhecimento pelo ensaio destrutivo de impacto;
- Determinar o módulo de elasticidade (E) e o fator de amortecimento (ζ) antes e após o envelhecimento pelo ensaio não-destrutivo sonoro;
- Determinar a condutividade térmica dos compósitos por termografia;
- Avaliar o efeito da temperatura de envelhecimento sobre o comportamento ao impacto e sobre o módulo de elasticidade e amortecimento;

2. Revisão bibliográfica

2.1. Materiais Compósitos

Materiais compósitos são provenientes de uma combinação entre dois ou mais materiais, onde os mesmos formam fases constituintes com composição química e física distintas. Esses materiais são produzidos com o objetivo de obter propriedades que não seriam obtidas empregando-se somente um único material [19-20].

Os materiais compósitos são compostos por uma fase contínua, chamada matriz, e uma fase descontínua, o reforço, que pode assumir a forma de partículas, tecidos, mantas ou fibras [21-22].

A interface entre o reforço e a matriz do compósito é um fator importante no que concerne as propriedades finais, devido a ser uma região que ocorre o contato entre as fases componentes, podendo ser observado nas Figuras 1 e 2 [23].

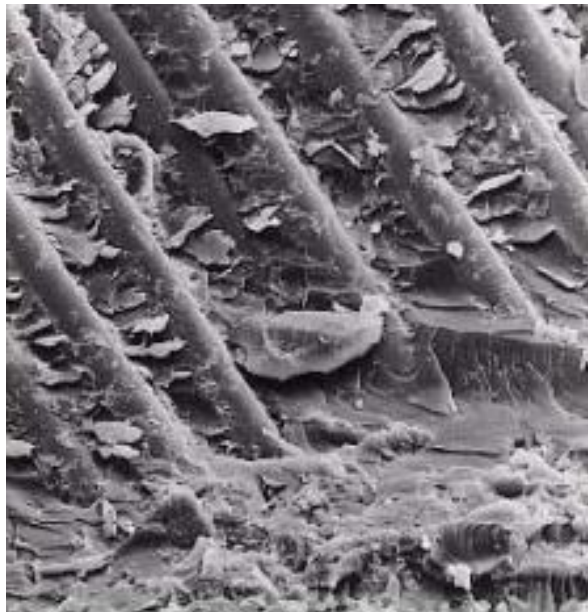


Figura 1- Material compósito com arranjo das fibras com boa aderência com a matriz [23].

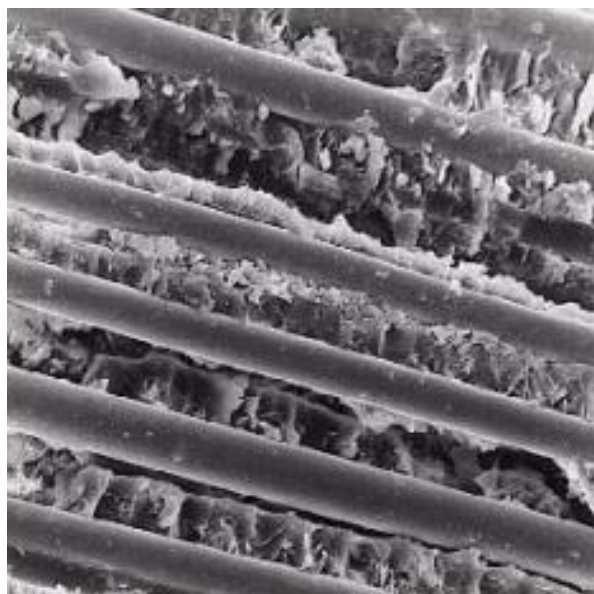


Figura 2 - Material compósito com arranjo das fibras com fraca aderência com a matriz [23].

A partir das Figuras 1 e 2, obtidas em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), observa-se a diferença de adesão entre a fibra e a matriz. Na Figura 1, a matriz está com uma adesão as fibras melhor quando comparada com a Figura 2, onde é possível observar as fibras sem o envolvimento da matriz, praticamente soltas.

As propriedades dos compósitos dependerão diretamente da adesão fibra-matriz. Essa região é responsável direta pela interação mecânica da matriz com o reforço, garantindo ao material diversas propriedades como boa absorção de deformações, resistência à compressão, aumento da resistência ao impacto, dentre outras. Portanto uma adesão não adequada entre as fases na interface irá provocar o início de falhas [24-26].

A alta versatilidade de propriedades é a principal característica dos materiais compósitos, devido à grande variedade de combinações entre reforço e matriz, fazendo com que esses materiais possuam uma ampla combinação de tenacidade, resistência mecânica e módulo de elasticidade, além de uma ótima resistência a corrosão. Porém, como em todas as classes de materiais, os materiais compósitos possuem algumas desvantagens, sendo uma delas a alta absorção de água pelos compósitos de matriz polimérica, que afeta as propriedades mecânicas [25,27].

Com relação a sua classificação, os compósitos podem ser classificados de acordo com a natureza da matriz em: metálicos, poliméricos e cerâmicos.

Além disso, eles podem ser classificados de acordo com a geometria dos reforços [25, 28-29].

O material utilizado no desenvolvimento desse trabalho será composto por uma matriz polimérica e reforçado com fibra, com isso a revisão a partir dos próximos tópicos será focada nesses materiais.

2.2. Matriz Polimérica

Os compósitos de matriz polimérica são muito utilizados em muitos setores, possuindo uma ampla variedade de aplicações. A matriz tem como função manter o espaçamento entre as fibras, além de manter sua orientação e proteger o compósito de influências do exterior. As matrizes poliméricas podem ser classificadas em termoplásticas e termofixas, sendo a matriz termofixa a mais utilizada em compósitos devido a suas propriedades mecânicas e estabilidades química e a temperaturas mais elevadas. As resinas epóxi, vinil éster e poliéster são as matrizes poliméricas mais comuns, sendo utilizadas juntamente com reforços de fibras com alto desempenho [26,30].

Quando se analisa as propriedades das três principais resinas, nota-se que elas apresentam vantagens e desvantagens entre si, sendo necessário analisar qual sua melhor aplicação. Matrizes de vinil éster e epóxi possuem um desempenho semelhante, já a resina poliéster é menos rígida e resistente à tração quando comparada com as anteriores, porém ela apresenta um menor custo [25].

Devido a suas propriedades, a resina epóxi será a matriz polimérica utilizada no presente estudo, sendo feito abaixo uma breve revisão sobre as resinas epóxi. Os outros tipos de resinas poliméricas não serão abordados nesse trabalho.

2.2.1. Resina Epóxi

As resinas epóxi são polímeros amorfos, isto é, são materiais que não possuem ordenação de longa distância em suas cadeias. A presença de ligações covalentes em sua estrutura concede as resinas epóxi uma boa resistência a altas temperaturas, o que ocorre devido ao fato dessas ligações necessitarem de uma alta energia para serem rompidas [31-32].

A estrutura química da resina epóxi é caracterizada pela presença de um grupo químico constituído por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono, conhecido como anel epoxídico, Figura 3 [33].

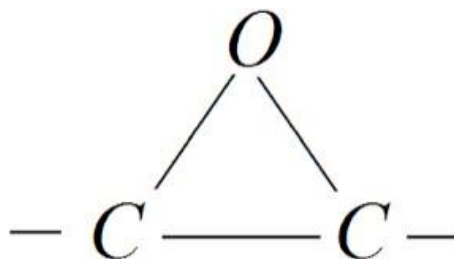


Figura 3 - Estrutura do anel epoxídico [33].

As resinas epóxi mais comuns são formadas por uma reação de bisfenol- A e epicloridrina, e são conhecidas como diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA). Sua molécula apresenta em cada extremidade dois grupos epóxidos, conforme a Figura 4 [33-35].

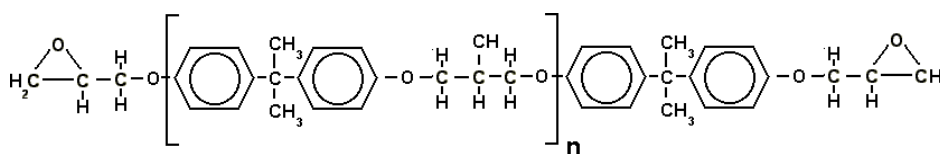


Figura 4 - Estrutura química da resina epóxi DGEBA [33].

A resina epóxi DGEBA possui alta rigidez, ótimo desempenho em altas temperaturas, alta resistência química, boa propriedade adesiva e boa reatividade, ou seja, boa tendência de formar reações químicas, permitindo uma cura mais rápida [34-35].

A cura da resina epóxi é um processo complexo e é caracterizado pela mudança das propriedades físicas e químicas da resina [36]. O processo de cura da resina epóxi é realizado em várias etapas, Figura 5. Primeiramente, ocorre uma reação entre grupos reativos dos endurecedores e grupos reativos epóxi para formar moléculas maiores. Conforme a cura vai acontecendo moléculas maiores são formadas, porém o tamanho dessas moléculas ainda é pequeno. À medida que as moléculas aumentam, são formadas regiões altamente ramificadas. Logo após, ocorre a etapa mais importante no processo de cura, a gelificação e vitrificação. Por

fim, a cura deve continuar até que quase todas as moléculas estejam conectadas à rede tridimensional [36-37].

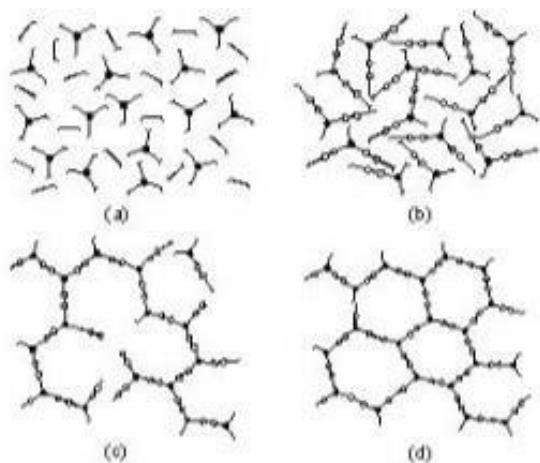


Figura 5 - Estágios da cura nos polímeros termorrígidos: (a) indução, (b) gelificação, (c) vitrificação, (d) cura completa [37].

As transformações de fase que acontecem durante o processo de cura da resina epóxi são a gelificação e a vitrificação. A gelificação é a transição do estado líquido para o estado de borracha, gel, a viscosidade que até o momento era constante, passa a crescer rapidamente. A vitrificação é a transição do estado de borracha para o estado vítreo com um incremento do peso molecular. O ponto de vitrificação é o tempo em que as reações químicas param e o material se torna rígido [37].

As propriedades mecânicas das resinas epóxi podem ser descritas pelo mesmo diagrama que é utilizado para descrever as propriedades dos metais, ou seja, através do diagrama tensão-deformação [38].

As principais vantagens na utilização das resinas epóxi advém do fato delas apresentarem excelentes propriedades mecânicas, excelente resistência química, ótimo comportamento quando expostas a altas temperaturas e baixa absorção de água, quando comparadas com outros tipos de resinas. Uma comparação entre as diversas propriedades mecânicas de matrizes típicas de resina poliéster, vinil éster e epóxi pode ser observado na Tabela 1 [39].

Tabela 1 - Comparação das propriedades de resinas típicas de Poliéster, Vinil Ester e Epóxi [39].

	Unidade	Norma	Poliéster ortoftálica MEK/Co (1)	Viniléster MEK/Co (2)	Epóxi DGEBA Anidrido Ácido (3)
Densidade	g.cm ⁻³	ASTM D792	1,2	1,0	1,2
Resistência à tração	MPa	ASTM D638	60,0	80,0	80,0
Módulo de elasticidade na tração	GPa	ASTM D638	3,0	3,4	3,0
Deformação na fratura	%	ASTM D638	2,0	5,0	2,7
Resistência à compressão	MPa	ASTM D695	145,0	112,0	112,0
Módulo de elasticidade na compressão	GPa	ASTM D695		2,5	3,0
Resistência a flexão	MPa	ASTM D790	115,0	121,0	100,0
Módulo de elasticidade na flexão	GPa	ASTM D790	3,6	3,0	3,0
Temperatura de deflexão térmica (HDT)	°C	ASTM D648	80,0	110,0	110,0
Temperatura de transição vítrea (T _g)	°C	ASTM D3418	65,0	105,0	115,0
Viscosidade (Brookfield)	mPa.s	-	400-500	520-620	500-600
Coefficiente de expansão térmica	10 ⁻⁶ °C ⁻¹	-	100-180	65	80-120

(1) Resina de baixa reatividade

(2) 45% estireno. Cura: 24h a 25°C e pós-cura: 2h a 120°C

(3) Cura a quente

Estudos realizados [40], mostram o uso de resina epóxi como matriz de compósito reforçado com fibra de vidro em sistemas de altas temperaturas no combate a incêndio. Os compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de vidro foram expostos a ensaios de desempenho ao fogo. De acordo com os resultados apontados, o compósito com matriz de resina epóxi reforçado com fibra de vidro apresentou-se apto para ser empregado em sistemas de incêndios, proporcionando assim uma redução de custos, peso e acréscimo da vida útil quando comparado com os aços carbono utilizados atualmente [40].

2.3. Fibras de vidro

O vidro é um material amorfo, devido a não possuir uma periodicidade em sua estrutura atômica. A estrutura típica do vidro pode ser vista na Figura 6.

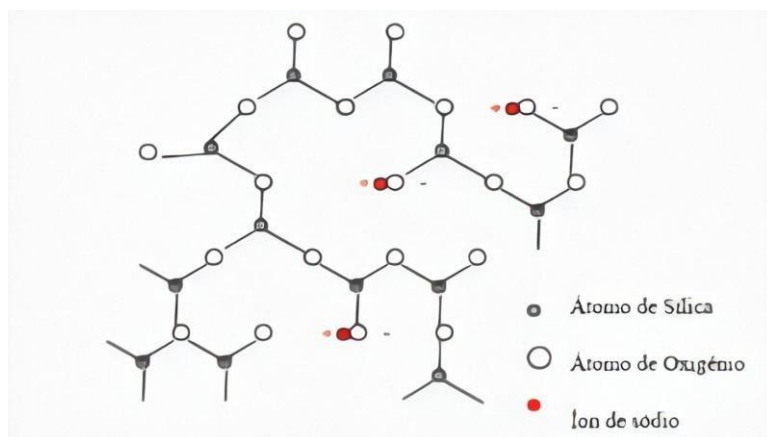


Figura 6 - Estrutura do vidro [41].

A resistência das fibras de vidro quando comparadas com o vidro comum é elevada devido à presença de uma quantidade mínima de defeitos submicroscópicos [41].

A fibra de vidro é um material que é normalmente usado em reforços de vários tipos de materiais compósitos e podem ser classificadas como do tipo C, do tipo R, do tipo E e do tipo S. Essas fibras são formadas por sílica e alguns óxidos como de boro, cálcio, sódio, dentre outros [42].

As propriedades mecânicas dessas fibras dependem do tipo de vidro utilizado. O vidro do tipo C, por exemplo, possui como melhor vantagem sua resistência a corrosão. O vidro do tipo S suporta temperaturas maiores quando comparado com outros tipos de vidro, devido a sua alta quantidade de sílica. Com isso, nota-se que cada tipo de vidro possui sua particularidade e propriedades mecânicas, como pode ser observado na Tabela 2 [43-44].

Tabela 2 - Propriedades dos diferentes tipos de vidro [43-44].

Tipos de vidro	Propriedades
Vidro tipo C	Fácil de usar Baixo custo - Boa resistência química - Boa resistência a ambientes corrosivos ácidos e alcalinos
Vidro tipo S	- Boa resistência química Altas Propriedades mecânicas Alta resistência a temperatura
Vidro tipo E	- Não absorve água - Boa resistência a alguns tipos de ácidos - Boa resistência à tração e flexão - Baixa densidade - Baixo coeficiente de expansão térmica - Baixa condutividade
Vidro tipo R	- Altas propriedades térmicas Altas propriedades mecânicas - Boa adesão Baixa contração durante a cura - Baixa absorção de água

A utilização dessas fibras é muito recorrente devido as suas diversas propriedades mecânicas. São usadas em cerca de 95% de todas as aplicações de fibras como reforço. Sua alta aplicação para reforço se dá devido a facilidade em ser produzida, o aumento elevado de resistência ao compósito, boa resistência à corrosão, pequeno coeficiente de dilatação térmica e baixo custo [25,45].

2.4. Fibra Natural

As fibras naturais estão sendo cada vez mais utilizadas como reforços para materiais compósitos, porém essa prática não é tão nova quanto parece. Durante muitos anos essas fibras eram usadas como forma de reforço. Alguns materiais como capim e milho eram misturados ao barro a fim de reforçá-lo para a fabricação de paredes [46].

De acordo com sua classificação as fibras naturais podem ser divididas em: fibras de origem vegetal, fibras de origem animal e fibras de origem mineral [25]. Uma das principais vantagens da utilização das fibras naturais quando comparadas com as fibras sintéticas é a sua alta oferta devido ao alto número de plantas que fornecem as fibras. Além disso, essas fibras possuem baixo custo em sua produção, em grande maioria não são tóxicas, são recicláveis, possuem baixa massa específica e são menos abrasivas quando comparadas com as fibras sintéticas, desgastando menos as peças dos equipamentos durante a fabricação dos materiais compósitos [47-48].

A aplicação das fibras naturais não é tão simples devido a algumas limitações. Podem ser citadas como desvantagens dessas fibras a grande variabilidade nas propriedades mecânicas, que está relacionada em parte, a variação da porcentagem dos seus principais constituintes, tais como lignina e celulose [49-50].

Quando comparado com as fibras de vidro, as fibras naturais possuem como vantagem sua menor densidade. Porém, as propriedades mecânicas de compósitos reforçados por fibras naturais são geralmente inferiores às dos compósitos reforçados com fibras de vidro [49,51].

As fibras vegetais podem ser divididas em fibras de semente, fibras de caule, fibras de folha e fibras de fruto, sendo classificadas de acordo com a parte da planta da qual a fibra é obtida, Figura 7. No presente trabalho será utilizada a fibra de fruto [52].

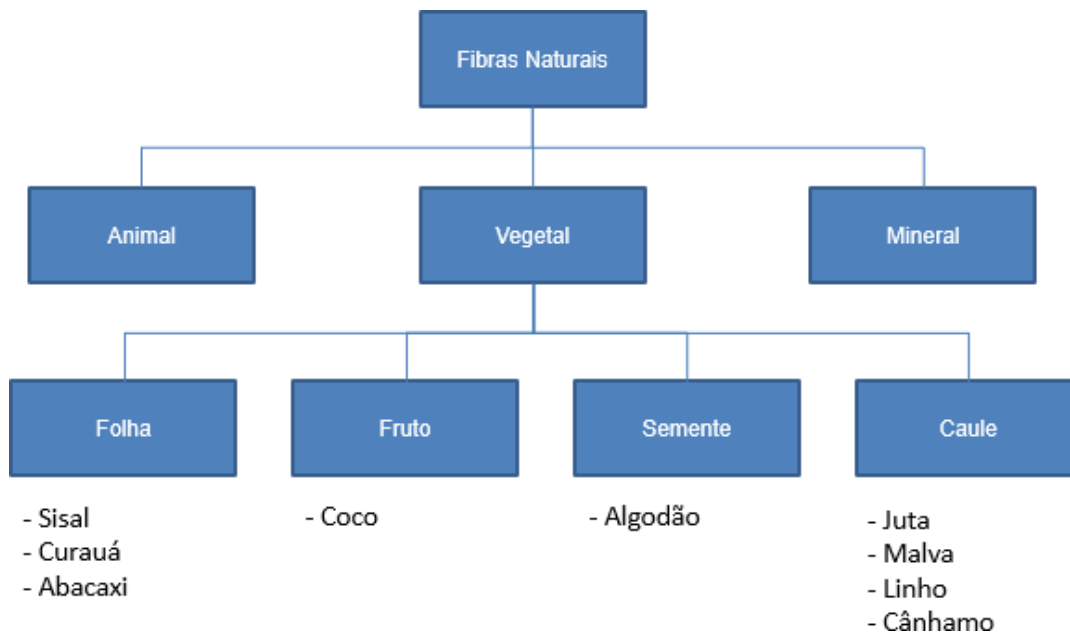


Figura 7 - Classificação das fibras vegetais - adaptado de [53].

2.4.1. Luffa(*Luffa cylindrica*)

A luffa ou esponja vegetal (*Luffa cylindrica*) é uma planta de fácil plantio, muito encontrada na América do sul, Ásia e América Central. A luffa é dividida em 7 espécies, sendo elas: *Luffa astorii*, *Luffa graveolens*, *Luffa quinquefida*, *Luffa acutângula*, *Luffa echinata*, *Luffa operculata* e *Luffa aegyptiaca* (*Luffa cylindrica*) [54-55].

A *Luffa cylindrica* possui um fruto no qual o seu sistema vascular, no estado seco, forma uma espécie de manta ou tapete natural capaz de desviar trincas e aumentar a resistência da matriz polimérica de um compósito. Porém, a resistência máxima dos compósitos não aumenta, devido a fraca adesão entre a fibra e a matriz. Via de regra, os compósitos com fibras naturais possuem menor resistência do que os compósitos com fibras sintéticas [56-57].

A estrutura do sistema vascular seco da *Luffa cylindrica* pode ser dividida em 4 regiões, sendo elas: superfície interna (inner surface), superfície externa (outer surface), núcleo (core region) e parede intermediária (interlayer). Na superfície interna, as fibras de luffa mais grossas crescem na direção longitudinal, enquanto na superfície externa as fibras de Luffa mais grossas crescem circularmente. No

núcleo as fibras mais resistentes estão na direção radial. Já na parede intermediária, as fibras crescem em todas as direções [58].

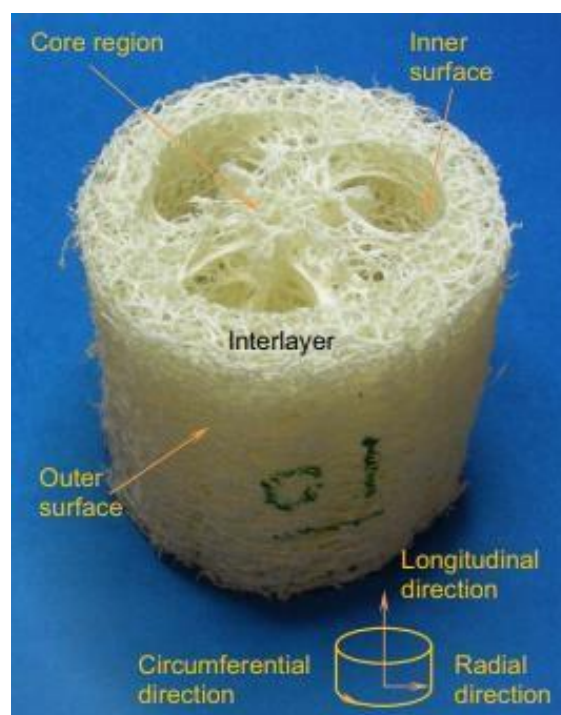


Figura 8 - Regiões na Luffa cylindrica [58].

A composição química da Luffa cylindrica depende de diversos fatores, como sua origem, pré-tratamento, condição climática e o solo onde ela foi plantada. Uma pesquisa realizada mostra um conjunto de valores de referência para composição química da Luffa cylindrica, como pode ser observado na Tabela 3 [59].

Tabela 3 - Composição Química Fibra Luffa cylindrica [59].

Componente	Teor (%)
Cinzas	0.7 ± 0.2
Extrativos	3.1 ± 0.5
Lignina Klason Total	$15,2 \pm 1.0$
Celulose	65.5 ± 0.5
Hemicelulose	17.5 ± 0.5
Holocelulose	83.0 ± 1.0

A realização de tratamentos químicos de superfície nas fibras de *Luffa cylindrica* é uma das principais maneiras de aumentar a resistência mecânica dos compósitos reforçados com essas fibras [56-57].

Uma das principais desvantagens da utilização das fibras de *Luffa cylindrica* como reforço em materiais compósitos é a sua alta capacidade de absorção de água. Ao absorver água, a ligação interfacial entre a fibra e a matriz do compósito é enfraquecida, causando uma redução em suas propriedades mecânicas [60-61].

A fim de melhorar a resistência desses compósitos quando expostos a ambientes sujeitos a umidade, diversos estudos relatam que o uso de fibras sintéticas proporciona um incremento na resistência mecânica dos compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais, formando assim um compósito híbrido formado com fibra natural e fibra sintética [10,61].

2.5. Compósito Híbrido (Fibra de Vidro/Luffa)

As fibras naturais como reforço em compósito de matriz polimérica provocam alguns problemas devido à baixa adesão entre a fibra e a matriz e o alto índice de absorção de umidade. Quando deseja-se minimizar esse problema, a fibra natural é combinada com uma fibra sintética na mesma matriz, dando origem a um compósito híbrido [61-62].

A utilização da combinação de fibras sintéticas e fibras naturais em compósitos de matriz polimérica otimiza o emprego das fibras naturais, com o compósito adquirindo propriedades das duas fibras. A fibra sintética é, normalmente, utilizada em camadas mais externas para evitar o contato da fibra natural com o ambiente externo [10].

Um estudo realizado por Mohanta et al. [61] investiga o efeito da sequência de empilhamento em compósitos híbridos de matriz epóxi reforçados com fibras de vidro e fibras de *Luffa cylindrica*. Os laminados foram fabricados pela técnica de disposição manual (*Hand Lay-up*), processo simples onde a fibra em forma de manta é colocada no molde e a resina é aplicada em cima das fibras, formando camadas alternadas entre as fibras e a resina. Os compósitos foram fabricados alternando as camadas de fibras de vidro e de *Luffa cylindrica*

[61]. Os autores concluíram a partir de ensaios mecânicos de flexão e tração que os compósitos híbridos fabricados possuem ótima resistência mecânica principalmente quando comparados com os compósitos reforçados com fibras de *Luffa cylindrica* [61]. A resistência à tração do laminado híbrido aumentou 100,4% quando comparada com a resistência à tração do compósito reforçado somente com fibra de luffa. Já a resistência a flexão do compósito híbrido obteve uma melhora de 177%. Além disso, eles verificaram que a sequência de empilhamento que obteve melhor desempenho mecânico foi a sequência no qual foram colocadas duas mantas de fibra de *Luffa cylindrica* (L) no meio do compósito suportadas por duas mantas de fibras de vidro (G) nas faces, seguindo a seguinte sequência de empilhamento GLLG [61].

2.6. Envelhecimento e Degradação de Compósitos

Materiais compósitos de matriz polimérica estão sendo cada vez mais utilizados em diversas aplicações e essas aplicações acabam expondo o material a ambientes que comprometem sua durabilidade, fazendo com que o material sofra degradação. A fim de aumentar a vida útil desses materiais quando expostos a ambientes que podem causar degradação, como em ambientes de elevada umidade, faz-se necessário o estudo de materiais compósitos quando expostos a ambientes de umidade [63].

A degradação nos materiais compósitos poliméricos pode ocorrer somente no reforço, na matriz ou até mesmo em todo material. Para que se consiga realizar uma avaliação dos possíveis danos causados pela degradação dos materiais, é necessário a realização de um ensaio de envelhecimento [17,64].

Os ensaios de envelhecimento podem ser classificados como acelerado e natural. No envelhecimento acelerado, as condições ambientais são simuladas de forma mais agressiva, acelerando os danos causados pelo envelhecimento, podendo então se obter resultados da vida útil do material de forma mais rápida [64].

No envelhecimento natural, as condições ambientais simuladas são próximas das condições reais que o material seria submetido quando exposto ao

ambiente. O envelhecimento natural ocorre de maneira mais lenta quando comparado com o envelhecimento acelerado, porém é considerado mais preciso [64].

O envelhecimento de um compósito polimérico pode ocorrer de maneira física e química, podendo gerar modificações nas propriedades do material de forma irreversível [65].

O envelhecimento físico ocorre a uma temperatura de exposição menor que a Tg. O envelhecimento físico causa mudanças moleculares nos polímeros, porém sem alterar a integridade estrutural do material, sendo um processo reversível [65] [66].

O envelhecimento químico causa mudanças permanentes nos polímeros, podendo ocasionar a quebra das cadeias, oxidação, mudança nas ligações cruzadas, ocasionando uma degradação irreversível [66-67].

A degradação nos materiais compósitos poliméricos ocorre com o rompimento das ligações químicas do polímero. A quebra das ligações nos polímeros pode ser facilitada devido a alguns fatores, como a presença de tensões residuais no material e baixo grau de cristalinidade, podendo causar descolamento da interface fibra/matriz, ocasionando danos irreversíveis. Para que haja envelhecimento, é necessário que o material seja exposto a algum tipo de energia, podendo ser na forma de luz, calor, radiação ou tensão [68-70].

Um dos principais mecanismos de degradação dos compósitos poliméricos ocorre devido a absorção de água pelo material. Quando uma pequena quantidade de água consegue penetrar no interior do material, diversos defeitos podem surgir, como plastificação da matriz, comprometimento da interface fibra/matriz, trincas, alteração no peso do material e dilatação, ocasionando em mudanças químicas, mecânicas e termofísicas nas matrizes. Além disso, a existência de regiões preferenciais para absorção de água, pode ocasionar em um material heterogêneo, isto é, com diferentes regiões e propriedades, podendo provocar a redução da resistência interfacial fibra /matriz, levando o material a falhar prematuramente [32,42, 70-71].

A absorção de água nos polímeros é realizada através do fenômeno de difusão. As moléculas de água interagem com as ligações secundárias do polímero, ocasionando uma quebra dessas ligações, facilitando a absorção de

água no material e então provocando falha nas ligações que asseguram a integridade entre a interface fibra/matriz [72-73].

O processo de degradação do compósito polimérico através da absorção de água ocorre inicialmente pela penetração de água no material através dos poros ou vazios existentes, causando tensões internas na matriz. Logo após, irá ocorrer o surgimento de trincas maiores na matriz. Com isso, o compósito conseguirá cada vez absorver mais água de forma mais rápida, causando, então, perda de suas propriedades mecânicas. A penetração de água no material poderá causar o descolamento da interface fibra /matriz podendo causar falha no material [32,42,70].

Uma das maneiras de aumentar a resistência dos materiais compósitos no processo de degradação por absorção de água, é melhorando as ligações químicas entre a interface fibra/matriz, fazendo com que o processo de ataque químico seja atrasado, diminuindo assim as perdas de propriedades do material[74].

A adesão entre a matriz e as fibras é de extrema importância para as propriedades mecânicas dos compósitos, pois para ter uma boa transferência de carga deve existir uma boa adesão. Ao absorver água, a mobilidade das cadeias do compósito poliméricos aumenta e a adesão entre as fibras e a matriz diminui, causando o descolamento das fibras. Com isso, as propriedades mecânicas dos compósitos diminuirão devido a maior parte da carga externa aplicada ser transferida para a matriz, pois as fibras estão soltas [32,75].

A quantidade de volumes livres que a matriz possui é um parâmetro importante no fenômeno de difusão, pois quanto maior a quantidade de volumes livres o polímero possuir, maior a capacidade das moléculas de água migrarem para a matriz [76].

Outro fator importante em relação a degradação por difusão é o inchamento do polímero devido a penetração das moléculas de água. O inchamento da matriz faz com que o polímero se expanda, induzindo tensões residuais entre a matriz e a interface. Como a fibra e matriz possuem coeficiente de expansão térmico diferentes entre si, esse inchamento produz defeitos na interface. Além disso, devido ao inchamento da matriz formam-se microvazios na matriz e esses microvazios acabam gerando um caminho preferencial para difusão de moléculas de água [14,76-77].

Um parâmetro importante a ser analisado é o ambiente onde está ocorrendo a difusão. Em meio salino a difusão ocorre mais lentamente devido a esse meio possuir uma concentração de sal (NaCl). Os íons de Na^+ e Cl^- vão interagir com as ligações secundárias, e a interação do íon com polímero, compete com a interação das moléculas de água com o polímero. Essa competição acaba gerando uma barreira para a penetração da água. Por isso, a absorção de água é mais lenta quando comparada a um meio de água destilada, fazendo com que para ocorrer uma mesma absorção de água demore mais tempo em meio salino [78-80].

Como visto acima, alguns fatores como quantidade de volumes livres, meio de exposição, adesão entre fibra e matriz, dentre outros, são de extrema importância para o entendimento da degradação do polímero ocasionado por absorção de água.

Pode-se destacar também outros fatores que influenciam a degradação dos compósitos de matriz polimérica, como:

- **Natureza do Polímero** - Alguns fatores provenientes da natureza do polímero afetam a degradação do material através do fenômeno de difusão, sendo esses: mobilidade das cadeias, polaridade e o grau de cristalinidade [81].
- **Temperatura** – O fenômeno de difusão é um processo termicamente ativado, isto é, depende da temperatura. Quanto maior a temperatura, maior será a quantidade de massa transportada para o compósito [25].
- **Reforços** - Os tipos de reforços utilizados nos compósitos podem contribuir para a degradação do material, pois a capacidade de interação do reforço com a matriz polimérica é um dos principais fatores que fornecem resistência ao compósito [81].

Em seu trabalho, os autores Alawsi et al. [77] estudam o impacto da exposição à alta umidade (98% de umidade relativa), que simula as condições externas da região do Golfo, na durabilidade de compósitos reforçados com fibra de vidro E (GFR). Os autores relatam que quando as amostras são expostas ao

ar úmido, os compósitos da matriz polimérica absorvem umidade instantaneamente na superfície, seguida de difusão pela matriz [77].

Além disso, Alawsi et al. [77] comprovam por meio de ensaios de flexão que maioria das propriedades de flexão foi perdida ao longo do tempo de exposição. Por fim, mediante análise das micrografias obtidas no MEV, os autores relatam que o principal fator que contribui para a perda de rigidez é a perda de adesão entre as fibras e o polímero devido à absorção de água [77].

Conforme explicitado anteriormente, a difusão é um dos principais fatores para a degradação do compósito de matriz polimérica. Com isso, o próximo tópico irá abordar uma breve revisão sobre o fenômeno de difusão nos materiais compósitos com matriz polimérica.

2.6.1. Difusão de Água em Materiais Compósitos

A difusão é um processo termicamente ativado no qual ocorre o transporte de matéria por movimento atômico. Diversas propriedades dos materiais são afetadas devido ao transporte de massa de um meio externo para o material. Por isso, faz-se necessário o estudo de difusão para entender como os materiais são afetados de acordo com o meio no qual ele é inserido [25].

O transporte de massa nos polímeros ocorre através dos espaços vazios dentro da região amorfa da cadeia polimérica, conhecidos como volumes livres. A presença desses volumes livres promove um caminho preferencial para que a difusão aconteça. Além disso, a difusão de água em materiais compósitos de matriz polimérica pode ocorrer através do transporte capilar, transporte entre as cadeias ou por transporte pelas fissuras formadas no processo de fabricação do material [82-83].

Diversos autores descrevem que a maioria dos casos de difusão de água em materiais compósitos obedecem a Lei de Fick, porém alguns estudos mostram que os materiais compósitos com matriz polimérica podem ter um processo de absorção de água mais complexo, não obedecendo a Lei de Fick. Nesse caso, é denominado de processo de difusão Anômala ou Não-Fickiana [84] [85] [86].

Uma das maneiras de diferenciar se o transporte de massa obedece ou não as Leis de Fick é através da equação 1 [87-88]:

$$\frac{M}{M_m} = kt^n \quad (1)$$

onde:

M_m - Umidade máxima absorvida.

M - Umidade instantânea, isto é, umidade em um determinado instante. k -

Constante cinética

n - Valor que irá determinar o tipo de transporte que ocorre no sistema.

Caso o valor de n seja 0,5 o transporte de massa irá obedecer às Leis de Fick. Já para valores de n entre 0,5 e 1 o tipo de difusão, isto é, o transporte de massa não irá obedecer às leis de Fick, ocorrendo difusão não-fickiana (difusão anômala). Por fim, caso o valor de n seja igual a 1, o tipo de transporte irá obedecer às leis do Caso II, onde a absorção ocorre como resultado do inchamento rápido do compósito devido a uma difusão rápida. A saturação é atingida quase imediatamente após o estágio inicial. Esse comportamento de difusão ocorre somente em placas finas [85-86,89].

Devido ao transporte de massa do Caso II não ocorrer em compósitos poliméricos com matriz epóxi, ele não será abordado nesse texto. Sendo assim, só serão discutidos os modelos de difusão Fickiana e não-Fickiana (difusão anômala) [90].

2.6.1.1. Difusão Fickiana

O modelo de Fick tem sido usado comumente para prever a difusão de umidade em compósitos reforçados com fibras. Os processos de difusão ocorrem no estado estacionário ou no estado não estacionário. No estado estacionário, o fluxo não varia com o tempo. Já a difusão no estado não estacionário, o fluxo varia com o tempo. Esses dois estados são descritos pela primeira e segunda lei de Fick [89].

De acordo com a primeira lei de Fick, a difusão ocorre em estado estacionário, onde o fluxo J é proporcional ao gradiente de concentração e a constante de proporcionalidade é chamada coeficiente de difusão. O modelo é apresentado pela equação 2 [25,89].

$$J = -D \frac{dC}{dX} \quad (2)$$

onde:

D – Coeficiente de Difusão.

dc / dx - Gradiente de concentração.

O sinal negativo da equação significa que fluxo ocorre na direção contrária à do gradiente de concentração [25,89].

A maioria das situações na prática obedece a segunda lei de Fick, na qual a difusão ocorre no estado não-estacionário. A segunda lei de Fick descreve que a concentração em uma determinada posição muda com o tempo e, com isso, o fluxo também muda com o tempo. O modelo é apresentado através da equação 3 [89].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (3)$$

onde:

C – Concentração

x – Posição

A Lei de Fick pode ser utilizada quando a absorção de água ocorrer até a saturação [42].

Um dos modelos obtidos pela resolução da equação 3 e utilizado para calcular o coeficiente de difusão em compósitos é descrito pela equação [42,91,92]:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{4}{h} \left(\frac{Dt}{\pi} \right)^{1/2} \quad (4)$$

onde:

M_t - quantidade de fluido que difundiu em um tempo t;

M_∞ - valor na saturação;

h - espessura da amostra;

D - coeficiente de difusão.

Outro modelo utilizado para o cálculo do coeficiente de difusão em compósitos é descrito por Shen e Springer [93]. Esse modelo determina o coeficiente de difusão pela equação 5 [93]:

$$D = \pi \left(\frac{h}{4M_{\infty}} \right)^2 \left(\frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \left(1 + \frac{h}{l} + \frac{h}{w} \right)^{-2} \quad (5)$$

onde:

M_1 e M_2 são o percentual de peso ganho no tempo t_1 e t_2 ;

l é o comprimento da amostra;

w é a largura da amostra.

Outra maneira de reescrever o modelo de Shen e Springer e calcular o coeficiente de difusão (D), é usando a equação 6 [42]:

$$D = \frac{D_A}{X} \quad (6)$$

onde:

D_A é o coeficiente de difusão aparente;

X é o fator de correlação geométrica.

O valor do fator de correlação geométrica (X) é calculado pela equação 7 [42]:

$$X = 1 + \frac{1}{l} + \frac{1}{w} \quad (7)$$

O valor do coeficiente de difusão aparente (D_A), é calculado através da equação 8 [94]:

$$D_A = \pi \left(\frac{h^2}{16(M_{\infty})^2} \right) \left(\frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (8)$$

Obtendo o valor de correlação geométrica (X) e o valor do coeficiente de difusão aparente (D_A), consegue-se através da equação 6 calcular o valor do

coeficiente de difusão (D).

Caso o percentual de ganho de peso $M(\%)$ não seja especificado, o cálculo dele é realizado a partir da equação 9, descrito na norma ASTM D 5229/D5229M [94]:

$$M\% = \frac{\text{Peso do material úmido} - \text{Peso do material seco}}{\text{Peso do material seco}} \times 100 \quad (9)$$

Então, como citado anteriormente, os modelos descritos através das equações 4 e 5 podem ser utilizados para o cálculo do coeficiente de difusão (D) em compósitos.

A Figura 9 mostra o gráfico característico da curva de absorção de difusão segundo o modelo da Lei de Fick. O gráfico apresenta uma comparação de resposta da absorção de umidade de tubos E-glass/Vinyl em algumas condições de envelhecimento, sendo elas: exposição em água destilada a 25°C, exposição em água destilada a 2°C e exposição em água salina a 25°C [80].

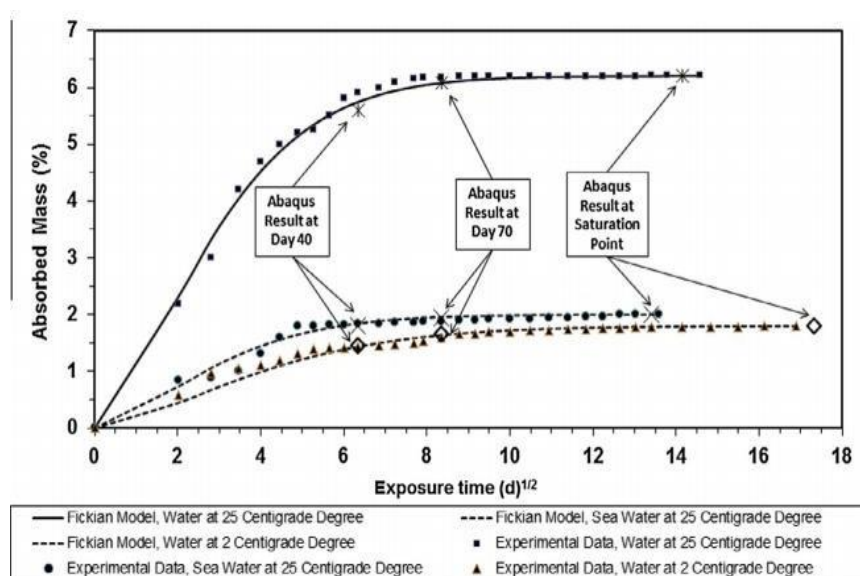


Figura 9 - Comparação do comportamento de absorção de umidade entre o modelo de Fick e dados experimentais para amostras envelhecidas em três condições diferentes [80].

As curvas teóricas da Lei de Fick estão identificadas na Figura 9 por linhas cheias ou pontilhadas e apresentam as seguintes características: uma região linear crescente até o momento no qual a curva se aproxima da saturação e logo após se mantém constante no decorrer do tempo [80].

Para identificar se os tubos E-glass/Vinyl seguiram o modelo de difusão de acordo com a Lei de Fick, os autores traçaram curvas experimentais a fim de compará-las com a curva teórica da Lei de Fick. Devido as curvas experimentais seguirem o mesmo padrão da curva teórica da Lei de Fick, foi possível dizer que a absorção de água nesse tipo de tubo compósito pode ser prevista com boa precisão pela equação de Fick para todos os ambientes estudados [80].

Como citado ao longo do capítulo, um dos fatores que mais afetam a difusão de água nos materiais compósitos poliméricos é a temperatura. A dependência do coeficiente de difusão com a temperatura pode ser descrita pela equação de Arrhenius, de acordo com a equação 10 [25,82]:

$$D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (10)$$

onde,

E_A - Energia de ativação para a difusão (kJ/mol);

D_0 - Constante do material associada ao tipo de líquido usado no envelhecimento;

T - Temperatura;

R - Constante dos gases ideais (J/mol K).

A temperatura é um dos principais fatores responsáveis pela degradação dos compósitos poliméricos. Quando o compósito polimérico é exposto a um aumento de temperatura, o processo de absorção de água ocorre de maneira mais rápida, devido ao processo de difusão ser termicamente ativado. Outro fator importante é que quando o material é exposto a alta temperatura, outros processos de degradação podem atuar facilitando a degradação do polímero [16-18].

Quando há aumento de temperatura em materiais compósito poliméricos deve-se considerar a dilatação térmica pois, a matriz e as fibras possivelmente apresentarão coeficientes de expansão térmica diferentes entre si. Assim, com o aumento da temperatura, essas fases irão dilatar de maneira diferente, causando tensões na região fibra /matriz [25,65].

O aumento da temperatura contribui para a mobilidade das cadeias poliméricas. Aumentando a temperatura, as distâncias entre as cadeias aumentam, o que enfraquece as interações moleculares. Com isso, a estrutura irá se deformar

com maior facilidade, comprometendo o seu desempenho mecânico [95].

2.6.1.2. Difusão Anômala

O comportamento de absorção de umidade nos materiais compósitos nem sempre pode ser bem descrito usando o modelo de difusão de Fick. Em algumas circunstâncias, um comportamento não-Fickiano é observado para certos materiais e determinadas condições em que a difusão não corresponde às características clássicas de absorção. Os perfis de absorção não-Fickiano são descritos de acordo com o comportamento dos gráficos de absorção. Além disso, os gráficos experimentais devem ser obtidos sob as mesmas condições da absorção Fickiana [86].

Os três principais comportamentos referentes a cinética da difusão anômala são mostrados na Figura 10. Sendo classificados em curva de absorção sigmoidal (Figura 10a), curva de absorção em dois estágios (Figura 10b) e curva modo II de absorção (Figura 10c) [42,86].

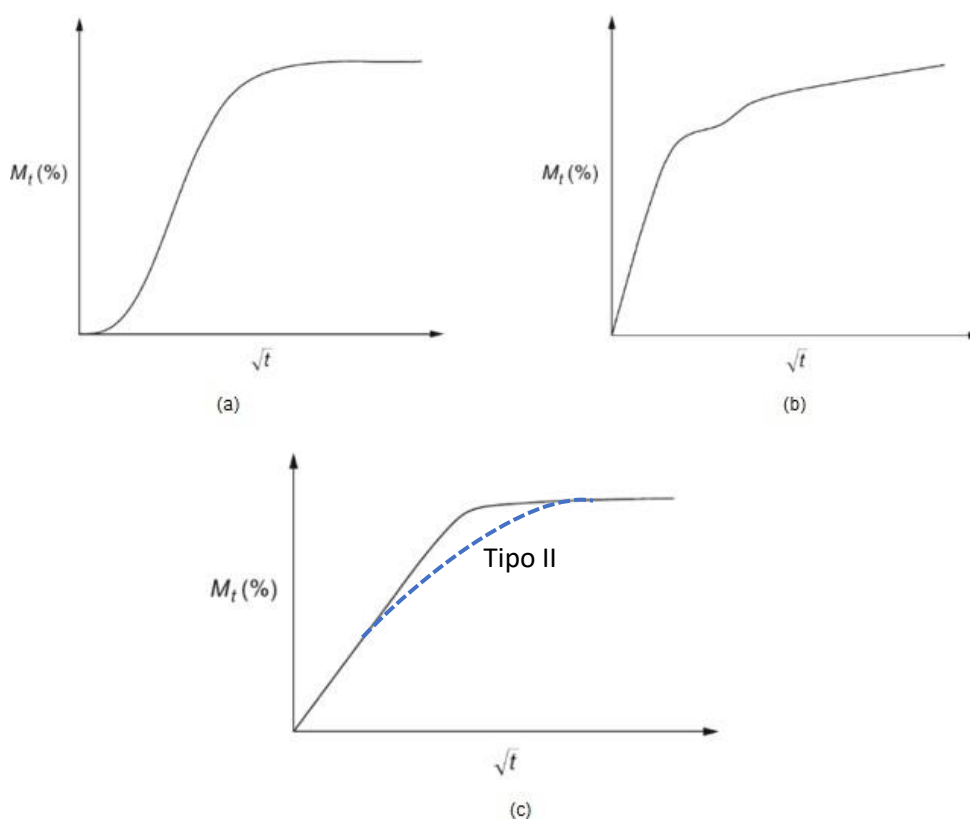


Figura 10 - (a) Curva típica de absorção Sigmoidal; (b) Curva típica de absorção em dois estágios e (c) Curva típica do modo II de absorção (linha tracejada), comparada a uma curva do modelo de Fick [86].

A difusão anômala e seus comportamentos, a princípio não serão detalhados no presente trabalho, pois a difusão em compósitos poliméricos com matriz epóxi em sua grande maioria obedece às leis de Fick. Porém, a seguir será apresentado de forma resumida a principal diferença entre os três tipos de difusão anômala [42,86].

Absorção sigmoidal – A curva do gráfico apresenta o formato de um “S” sendo observado um ponto de inflexão. Esse tipo de comportamento de absorção é atribuído à fase de formação de vazios durante a entrada de água, onde o processo de transporte começa de forma Fickiana e devido à falta de equilíbrio na superfície torna-se não Fickiana. Esses aspectos são altamente dependentes das condições ambientais e dos materiais selecionados para os compósitos [42] [86].

Absorção em dois estágios - Esse tipo de comportamento de absorção é frequentemente encontrado em cenários não fickianos. A curva é composta por dois estágios diferentes. Durante o estágio inicial de absorção, aparentemente é obtida uma saturação do compósito observada pela formação de um primeiro patamar. Porém, com o prolongamento da curva é possível perceber que essa saturação não foi alcançada. Esse segundo estágio é explicado pelo relaxamento estrutural realçado pela umidade, criando essencialmente vazios e bolhas que retêm a água. O nível de saturação real só é alcançado após o segundo estágio [42] [86].

Modo II de absorção - Ocorre como resultado do inchamento rápido do compósito devido a uma difusão rápida. A saturação é atingida quase imediatamente após o estágio inicial. Esse comportamento de difusão ocorre somente em placas finas [42] [86]. A diferença entre a curva típica de absorção do modelo Fickiano e a curva do modelo Não-Fickiano do caso II de absorção está relacionada ao fato da absorção do tipo II ter uma transição mais lenta entre o final da região linear e o patamar de saturação. Assim, no tipo II a região linear é mais curta, conforme mostrado na Figura 10c.

O estudo da difusão e das leis de Fick é de extrema importância para o entendimento de degradação de compósitos poliméricos quando expostos a umidade, pois através desse fenômeno é possível compreender os principais

aspectos que afetam o material. Além disso, como citado anteriormente, o tipo de reforço escolhido para o compósito de matriz polimérica poderá contribuir para a degradação e envelhecimento do compósito. Por isso, será abordado no próximo tópico o envelhecimento em três tipos de reforços, sendo eles: fibra de vidro, fibra vegetal (luffa) e híbrido (luffa / vidro).

2.6.2. Envelhecimento compósito polimérico reforçado com fibra de vidro

A fibra de vidro é um excelente componente de reforço para compósitos de matrizes poliméricas, pelo fato dela possuir uma baixa absorção de umidade quando comparada com outros tipos de fibras. Dentre os tipos de fibra de vidro, o que possui menor absorção de água é o tipo E [96-97].

O processo de degradação dos compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro será comandado pela absorção de água pela matriz, que consequentemente irá influenciar na adesão fibra/matriz, provocando um descolamento das fibras e diminuindo a resistência do material envelhecido [25,98-99].

Bittencourt et al. [100] realizaram um estudo das propriedades mecânicas de três tipos de compósitos com matriz poliéster reforçados com fibras de vidro após a absorção de água. Os compósitos foram produzidos de três formas distintas, sendo elas: infusão, laminação manual e laminação a vácuo. Primeiramente, foi verificado que dentre os três tipos de fabricação, os compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro fabricados pelo método de infusão foram os que possuíam maior resistência mecânica [100].

Um aspecto a ser destacado na pesquisa realizada por Bittencourt et al. [100], é que após as primeiras 24 horas os compósitos fabricados pelo método de laminação manual absorveram mais água que os demais. Isso pode ser explicado pela porosidade existente no compósito fabricado pelo método de laminação manual e pela menor quantidade de fibras de vidro quando comparado com os demais compósitos [100].

Um estudo realizado por Srihari et al. [13] mostra o comportamento da umidade em compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de vidro quando submetidos a dois ambientes, sendo eles: em água do mar e água destilada. Os

resultados mostram que as amostras expostas a água destilada sofreram envelhecimento mais rápido quando comparadas com as que foram expostas a água salina [13-101].

2.6.3. Envelhecimento compósito polimérico reforçado com fibra natural(*Luffa cylindrica*)

Os compósitos reforçados com fibras naturais possuem como principal limitação a sua baixa temperatura de fabricação. Essa limitação faz com que não seja possível o uso de altas temperaturas para a sua fabricação, restringindo assim os tipos de polímeros que podem ser usados para produzir os compósitos reforçados com fibras naturais [102].

Os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra natural possuem alta sensibilidade à umidade. Isso ocorre devido a fibra natural possuir uma baixa adesão com a matriz polimérica, devido a presença de umidade nas fibras, ocasionando uma perda de desempenho mecânico [103].

A absorção de umidade no compósito, leva ao aparecimento de defeitos como porosidade, tensões internas provocadas pelo inchamento das fibras e falha prematura do sistema através da propagação das trincas ou por delaminação das fibras [104-105].

O conhecimento do coeficiente de difusão de água no compósito é de extrema importância, pois assim é possível prever o comportamento e o desempenho mecânico do compósito reforçado com fibra natural [25].

Outra solução para possibilitar o uso das fibras naturais como reforços em compósitos poliméricos é o tratamento químico da superfície das fibras, aumentando a sua molhabilidade, porém aumentando o custo final de fabricação do compósito [15,25,106].

Um estudo realizado por Espert et al. [14] mostrou os efeitos de absorção de água em compósitos reforçados com fibras vegetais de polpa de celulose, luffa e sisal. Através das análises, foi constatado que o fenômeno de difusão nos compósitos reforçados com fibras vegetais obedeceu às leis de Fick. Além disso, os resultados indicaram que as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras vegetais sofreram grande influência da ação da umidade, perdendo resistência [14].

Anbukarasi et al. [107] realizaram um estudo comparativo entre três tipos de

compósitos epóxi reforçados com fibras vegetais de luffa. As fibras foram feitas em três formas diferentes, como partículas, fibras curtas e fibras em forma de manta. Os compósitos foram testados quanto propriedades mecânicas de flexão, tração, compressão e impacto. Os resultados mostram que os compósitos reforçados com fibras de partículas apresentaram melhor desempenho na absorção de água [109].

Por fim, destaca-se que os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais dispõem de alguns aspectos limitantes, sendo eles: maior dificuldade em sua fabricação, alta sensibilidade à umidade e baixa adesão da fibra natural com a matriz polimérica quando comparados com os compósitos poliméricos reforçados com fibras sintéticas.

2.6.4. Envelhecimento compósito polimérico híbrido reforçado com fibra de vidro/luffa

A utilização das fibras naturais em compósitos de matriz poliméricas possui algumas desvantagens, tais como seu processamento e sua alta sensibilidade à umidade. Com isso, uma das formas encontradas para reduzir esses problemas é a fabricação de compósitos poliméricos híbridos reforçados com fibras sintéticas e naturais. Com a junção desses dois tipos de fibras foi verificado que o compósito mostra um acréscimo nas suas propriedades mecânicas, devido a fibra sintética funcionar como uma barreira, evitando o contato da fibra natural com o ambiente externo. Além disso, as fibras sintéticas possuem propriedades superiores às fibras naturais [62,100].

Outro aspecto importante é o fato de estudos relatarem que os compósitos poliméricos híbridos reforçados com fibras de vidro/luffa possuem uma maior resistência à absorção de água sofrendo uma menor degradação quando comparados com compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais [56].

Silva et al. [15] realizaram um estudo que teve como objetivo a comparação de absorção de água em três tipos de compósitos de matriz poliéster ortoftálica, sendo eles: compósito híbrido sisal/vidro, compósito híbrido coco/vidro e compósito híbrido luffa/vidro. Além disso, a pesquisa buscou contrapor a absorção de água dos três tipos de compósitos híbridos de matriz poliéster ortoftálica com os compósitos de matriz poliéster ortoftálica reforçados somente com fibras de vidro [15].

No estado seco, os autores relatam que o compósito híbrido luffa/vidro foi o que apresentou menor resistência mecânica. Esse resultado ocorre possivelmente devido ao fato desse compósito possuir menor interação fibra/matriz. Já no estado saturado, o compósito híbrido luffa/vidro foi o que apresentou maior absorção de água, porém foi o compósito que exibiu menor redução de suas propriedades mecânicas. Tendo em vista que os compósitos híbridos possuíam a mesma quantidade de fibras naturais, a distinção entre os índices de absorção de água ocorreu pela natureza de cada tipo de fibra. Quando comparados com os compósitos reforçados somente com fibras de vidro, os compósitos híbridos luffa/vidro apresentaram uma maior absorção de água devido à natureza hidrófila das fibras naturais. Além disso, entre as fibras vegetais há diferença na capacidade de absorção, exemplo das fibras de madeira que absorvem muita água devido a sua natureza porosa [15].

Por fim, destaca-se que para entender o fenômeno de envelhecimento dos materiais compósitos de matriz polimérica, é necessário o estudo dos processos e fatores que influenciam a difusão. Além disso, é de extrema importância compreender como os tipos de reforços podem influenciar na degradação dos compósitos poliméricos.

2.7. Ensaio de Impacto

Impacto é definido como a aplicação de um esforço súbito em um material. Ou seja, sob uma velocidade de aplicação elevada. O conhecimento da resistência ao impacto é capaz de prever fraturas e falhas prematuras nos materiais. A resistência ao impacto, apesar de ser uma das principais características dos materiais, é uma das propriedades com maior dificuldade de compreensão nos materiais compósitos [108-109].

A resistência ao impacto nos materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras irá depender da disposição, tamanho, forma e orientação das fibras, pois esses fatores irão afetar na isotropia do compósito [110].

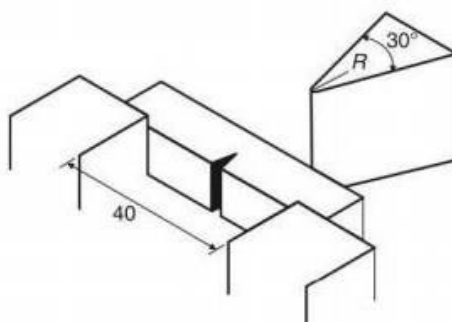
Os danos causados por impacto costumam não ser considerados uma ameaça para as estruturas metálicas, devido à natureza dúctil do metal, isto é, sua capacidade de absorver grandes quantidades de energia de deformação plástica. Por outro lado, nos materiais compósitos o impacto pode prejudicar severamente a integridade estrutural do material, mesmo quando a quantidade de energia

envolvida é baixa [111].

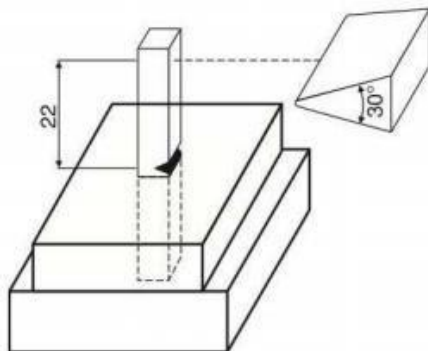
Os efeitos do impacto nos metais são facilmente detectados pois o dano geralmente começa na superfície que sofreu o impacto. Já nos materiais compósitos os danos por impactos podem ser quase invisíveis, pois geralmente afetam a parte interna do compósito, causando, por exemplo, delaminação interna [111].

Os materiais compósitos quando submetidos a tensões minimamente elevadas, embora possam conseguir manter sua integridade estrutural, são permanentemente danificados. Hancox [109], relata que um impacto com uma energia 1J pode causar danos irreversíveis em um laminado compósito.

Existem diversos tipos de ensaios de impacto. Eles são divididos em ensaios de baixa e alta velocidade. Os ensaios de impacto de baixa velocidade são divididos em dois tipos principais, sendo eles o ensaio Izod e o ensaio Charpy. A principal diferença entre os dois tipos de ensaio é a posição do entalhe e da amostra. No ensaio de impacto Izod, o corpo de prova encontra-se na posição vertical. Já no ensaio Charpy o corpo de prova encontra-se na posição horizontal, como pode ser observado na Figura 11 [108, 112-113]:



(a)



(b)

Figura 11 - Posição dos corpos de prova nos ensaios de impacto (a) Charpy e (b) Izod [113].

2.7.1. Ensaio Charpy

O ensaio Charpy é um ensaio clássico desenvolvido durante a Segunda Guerra Mundial. É um ensaio que foi desenvolvido inicialmente para ser utilizado em aços, porém ao longo do tempo passou a ser utilizado em materiais compósitos, devido ao resultado de absorção e dissipação de energia apresentado por ele e devido a sua simplicidade em ser realizado [112,114].

Os corpos de prova utilizados no ensaio Charpy são usualmente na forma geométrica retangular e com entalhe no centro em formato “v”. As amostras são colocadas horizontalmente na máquina e estão bi-apoadas para então serem atingidas por um pêndulo, como pode ser observado na Figura 12 [10]. Os resultados do ensaio são exibidos em função da energia que o corpo de prova absorveu durante o ensaio de impacto [108,112-113].

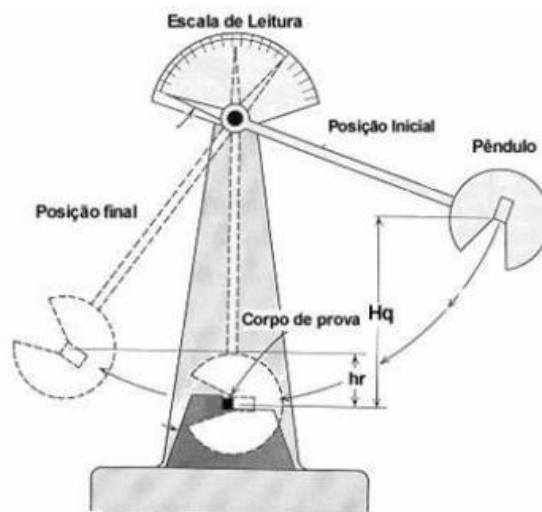


Figura 12 - Ensaio Charpy [112].

A energia potencial da altura do martelo é transformada em energia cinética na descida do pêndulo, devido a velocidade adquirida por ele, e parte dessa energia é transferida para o corpo de prova provocando a fratura e/ou o dano. O cálculo da energia absorvida pelo material no ensaio de impacto é realizado pela Equação 11 [112]:

$$E = m g (H_q - h_r) \quad (11)$$

onde,

E é a energia de impacto;

m é a massa do pêndulo; g é a gravidade;

$(H_q - h_r)$ é a variação de altura.

Quanto maior o valor da energia de impacto (E), isto é, a energia absorvida pelo material, maior será a tenacidade do material [112-113].

Koppula et al [115], realizou ensaio de impacto Charpy em compósitos de resina epóxi reforçado com Fibra de Vidro. Os compósitos foram fabricados no processo Layup manual (as camadas foram enroladas para espremer o ar aprisionado para obter a distribuição uniforme da mistura). O autor relata que a resistência média ao impacto do compósito polimérico reforçado com fibra de vidro foi de 0,129 J/mm² (129kJ/m²) e uma energia de absorção de, aproximadamente, 4J.

Um estudo realizado por Lee et al [116], verificou a resistência ao impacto de compósitos epóxi reforçado com fibra de vidro. As amostras fabricadas possuíam matriz epóxi e 40 camadas de fibra de vidro (fabricação industrial). Os autores relatam que foi possível verificar que compósito epóxi reforçado com fibra de vidro com 60,3% de fração de volume de fibra foram os que tiveram a capacidade máxima de absorção de energia de impacto, aproximadamente de 780 kJ/m², enquanto o compósito com fração de vidro de 54,2% teve energia de impacto de, aproximadamente, 400 kJ/m².

d'Almeida et al [117], realizou um estudo de avaliação do modo de falha de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro, carbono ou aramida. A fabricação dos compósitos de fibra de vidro foi realizada através da prensagem e cura à vácuo de laminas de pré-impregnados, oriundas de um processo de bobinagem. Os compósitos foram submetidos ao ensaio de impacto Charpy em corpos de prova não entalhados.

Em relação ao compósito polimérico reforçado com fibra de vidro com 50% de volume de fração de fibra, os autores obtiveram uma energia absorvida por impacto (U_0) de 319 kJ/m². Além disso, foi possível observar que os valores de energia absorvida foram inversamente proporcionais ao modo de elasticidade (E) das fibras. A Fibra de carbono que possuía o maior módulo de elasticidade de 230 GPa obteve o menor valor de U_0 de 84 kJ/m², enquanto a fibra de vidro que possuía

o menor E, equivalente a 70 GPa obteve o maior Uo. Foi destacado que uma parte importante da energia total consumida está associada a energia de deformação elástica [117].

Os autores também observaram que o compósito reforçado com fibra de vidro apresentou extensiva delaminação e não sofreram ruptura total [117].

Dogan et all [118] fabricou materiais compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro. Os compósitos fabricados possuem matriz polimérica de resina epóxi e 12 camadas de fibra de vidro. Os autores realizaram ensaio de impacto em amostras com e sem entalhe a fim de verificar a sua resistência [118].

Foi encontrado resistência ao impacto de 80,95 kJ/m² para os compósitos com entalhe e houve um aumento da resistência para 98,57 kJ/m² nos compósitos sem entalhe [118].

Saw et al [119] realizou um estudo sobre o comportamento das propriedades térmicas, mecânicas e morfológicas de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibra de Luffa. A resina utilizada foi epóxi bisfenol A (DGEBA). O compósito foi fabricado com a proporção de fibras por resina foi 70:30. A fabricação das amostras foi por Hand lay up seguida de moldagem por compressão e também com tratamento alcalino, onde as fibras *luffa* limpas foram imersas em uma solução de NaOH a 5% e sonicadas por 2 horas a 50 °C em um banho ultrassônico (modelo UD80SH2L) antes de serem utilizadas como reforço no compósito.

Os autores destacam que para todos os compósitos reforçados com fibra de luffa aumentaram a resistência ao impacto quando comparado somente com a matriz epóxi pura. Os compósitos com fibra tiveram melhor capacidade de absorção de energia [119].

A resistência ao impacto do epóxi puro é de, aproximadamente, 1,1 kJ/m². Já o compósito reforçado com fibra de Luffa obteve resistência ao impacto de, aproximadamente, 4,5 kJ/m². Além disso, para as amostras que sofreram tratamento alcalino, os autores acharam 8,0 kJ/m² de resistência ao impacto [119].

Ibrahim et all [120], fabricou compósitos poliméricos (epóxi) reforçado com fibra de luffa pelo processo de Layup manual seguido por moldagem a compressão. Os compósitos foram preparados com 30% e 40% de reforço de luffa. Os compósitos com 30% de fibra de luffa tiveram resistência de impacto de, aproximadamente, 27,77 kJ/m². Já os compósitos com 40% de fibra de luffa

apresentaram resistência impacto de, aproximadamente, 19,44 kJ/m², isso pode ser atribuído ao estilo de reforço, ou seja, fibra aleatória cortada.

Um estudo realizado por Kumar et al [121] foram fabricados compósitos de matriz epóxi reforçados com luffa contendo uma fração de fibra de 40%, onde a resina foi curada utilizando forno micro-ondas. Os autores realizaram um estudo comparativo entre a cura dos compósitos. Os compósitos foram curados de duas maneiras diferentes, sendo elas: a temperatura ambiente e em forno micro-ondas a 90°C.

O compósito curado a temperatura ambiente apresentou resistência de impacto, aproximadamente, 37,5 kJ/m². Já o compósito curado em forno micro-ondas a 90°C apresentou resistência de impacto de 55,55 kJ/m² [121].

Maguteeswarand et al [122] investigaram o comportamento mecânico de compósitos híbridos de matriz epóxi reforçados com 8 camadas de fibra de linho, *luffa* e sisal. Os compósitos foram fabricados pela técnica de hand layup. As seguintes combinações e energias de impacto foram listadas abaixo:

Compósito 1 - Linho/Sisal/Luffa/Epóxi [10%/25%/05%/60%] – 0,8 J;

Compósito 2 - Linho/Sisal/Luffa/Epóxi [10%/20%/10%/60%] – 1,06 J;

Compósito 3 - Linho/Sisal/Luffa/Epóxi [10%/15%/15%/60%] – 1,33 J;

Compósito 4 - Linho/Sisal/Luffa/Epóxi [10%/10%/20%/60%] – 0,93 J;

Compósito 5 - Linho/Sisal/Luffa/Epóxi [10%/05%/25%/60%] – 1,13 J.

O compósito que apresentou maior energia de impacto foi o compósito 3 e o que apresentou menor energia de impacto foi o compósito 1.

Prabhu et al [123] realizou uma pesquisa, onde fabricou compósitos poliméricos de matriz epóxi reforçado com fibra de folha de chá, fibra de vidro e fibra de juta. As fibras de juta e vidro foram utilizadas na forma de tecido e as fibras de chá foram usadas na forma de partículas e foram orientadas aleatoriamente.

Os compósitos híbridos foram preparados pelo processo de moldagem por compressão. O compósito foi fabricado com 4 camadas, sendo elas: vidro, juta, fibra de folha de chá e vidro [123].

A fração volumétrica de cada compósito fabricado está representada na tabela 4:

Tabela 4 - Fração volumétrica de laminados compósitos híbridos [123].

Specimen name	Glass (%)	Jute (%)	Tea leaf fiber (%)	Epoxy (%)
A	10	10	20	60
B	10	20	10	60
C	10	15	15	60
D	10	5	25	60
E	10	25	5	60

Os autores realizam ensaio de impacto charpy e obtiveram os seguintes resultados de resistência ao impacto: O compósito A obteve, aproximadamente, 60 kJ/mm². O compósito B e C, tiveram, aproximadamente, resistência de 80 kJ/mm². Os compósitos D e E tiveram, aproximadamente, resistência e 40 kJ/mm² [123].

Raghul et all, investigou o efeito da adição de nanopartículas de sílica em um compósito de matriz epóxi híbrido (fibra de vidro/sisal-palmeira) fabricado pelo processo de lay-up manual seguido de moldagem por prensa a quente.

Os corpos de prova do ensaio de impacto charpy tiveram dimensões de 65 x 13 x 3 mm. As energias de impacto achadas pelos autores estão na tabela 5.

Tabela 5 - Energia de impacto em compósitos sem/com adição de nano sílica [124].

S.No	Material	Impact energy (J)
1	Specimen (0% Nano sílica)	1.1
2	Specimen (1% Nano sílica)	2.9
3	Specimen (2% Nano sílica)	2.5
4	Specimen (3% Nano sílica)	1.8

Com o tamanho das amostras e com a energia de impacto é possível calcular a resistência de impacto. Com isso, a resistência ao impacto do compósito sem adição de nano sílica é de 28,20 kJ/m². Com adição de 1% de sílica foi de 74,35 kJ/m² [124].

Jarukumjorn et all, estudou o efeito do reforço de fibra de vidro nas propriedades mecânicas dos compósitos sisal-polipropileno. O processo de fabricação ocorreu por moldagem por injeção.

Dentre os compósitos fabricados, destacam-se:

P/20sisal/10GF/PP-g-MA – 70% PP, 20% Sisal, 10% Fibra de Vidro

PP/15sisal/15GF/PP-g-MA - 70% PP, 15% Sisal, 15% Fibra de Vidro

PP/10sisal/20GF/PP-g-MA - 70% PP, 10% Sisal, 20% Fibra de Vidro

Os autores observaram os compósitos com maior porcentagem de fibra de vidro apresentaram maior resistência ao impacto. O compósito com 10% de fibra de vidro apresentou 16,67 kJ/m². Já o compósito reforçado com 15% de fibra de vidro apresentou resistência ao impacto de 18,35 kJ/m². Por fim, o compósito com 20% de fibra de vidro apresentou resistência de 20,01 kJ/m² [125].

2.8. Ensaaios não-destrutivos

Os ensaios não-destrutivos (END's) são técnicas empregadas para inspecionar materiais sem danificá-los. Tratam-se de técnicas utilizadas como ferramentas para o controle de qualidade dos materiais. São amplamente utilizadas em diversos setores indústrias como: naval, mecânico, petróleo, dentre outros [126-128].

Através da análise realizada pelos END's é possível prever possíveis futuras falhas em materiais ou equipamentos. Os END's fornecem informações sobre descontinuidades de um material, fazendo com que seja possível prever e monitorar a degradação desses materiais analisados [126,128-129].

A maior parte dos ensaios não-destrutivos foi desenvolvida para emprego em materiais metálicos. Porém, os END's também podem ser aplicados em materiais compósitos [126].

Os principais ensaios não-destrutivos utilizados em compósitos de matriz polimérica reforçado com fibras são: vibratório, radiográfico, visual, sonoro, termografia ativa pulsada e shearografia. No presente trabalho serão empregados o ensaio de termografia ativa pulsada e o ensaio sonoro, que serão descritos a seguir.

2.8.1. Ensaio de Termografia

A termografia é um dos principais ensaios não-destrutivos utilizados em materiais metálicos e materiais compósitos. A técnica consiste em avaliar perturbações nos corpos de prova através de um fluxo de calor. Essas perturbações geram mudanças na distribuição das temperaturas na superfície do material

analisado, sendo captadas por um receptor de onda e transformadas em imagens [126].

A técnica de termografia possui diversas vantagens, tais como segurança em sua utilização e resultados rápidos e de fácil leitura. Porém, ela apresenta algumas desvantagens como dificuldade de uniformidade em uma superfície grande e custo elevado do equipamento [126-127].

2.8.1.1. Ensaio de Termografia Ativa Pulsada

Os materiais compósitos de matriz polimérica possuem uma baixa difusividade térmica e com isso não necessitam de equipamentos de alta frequência, isto é, com câmeras rápidas. Com isso, foi desenvolvida uma técnica utilizando apenas uma câmera termográfica e uma fonte de calor, denominada termografia ativa pulsada [126-127].

Essa técnica utiliza um pulso de energia curto, na ordem de segundos para materiais com baixa condutividade como compósitos e polímeros. O pulso térmico pode ser gerado através de algumas fontes como: flash fotográfico com alta potência (2000 W), sopradores de ar quente, laser ou lâmpadas acionadas mecanicamente [130-131].

Posteriormente ao pulso de energia, ocorre o aquecimento da superfície provocado pela propagação da onda térmica emitida pelo pulso de energia, que penetra abaixo da superfície do material por difusão. Após o aquecimento da superfície é, então, monitorado o declínio da temperatura do material analisado [130-132].

Ao realizar a análise da distribuição de temperatura do material através de imagens geradas pelo termograma, nota-se que a região que tiver descontinuidade irá gerar um contraste térmico na superfície do material, gerando uma imagem que mostrará a presença das descontinuidades. Isso acontece porque a presença de defeitos ou descontinuidades diminui a taxa de difusão de calor na região com a descontinuidade, fazendo com que haja um acúmulo de energia naquela área [126-127,133].

Essa técnica é utilizada para detectar descontinuidades como: porosidade, vazios, trincas, bolhas, corpos estranhos, delaminação, danos por impacto, além de detectar a absorção de água no compósito [126].

Quando deseja-se detectar defeitos ou descontinuidades próximas a superfície, que será excitada termicamente, deve-se utilizar o método de reflexão. Já para detectar descontinuidades ou defeitos no lado oposto da superfície, que será excitada termicamente, deve-se aplicar a técnica de transmissão. A técnica de reflexão consiste em posicionar o gerador do pulso térmico no mesmo lado da câmera termográfica. Já a técnica de transmissão, consiste em posicionar o gerador do pulso térmico no lado oposto a câmera, Figura 13 [130-131,134-135].

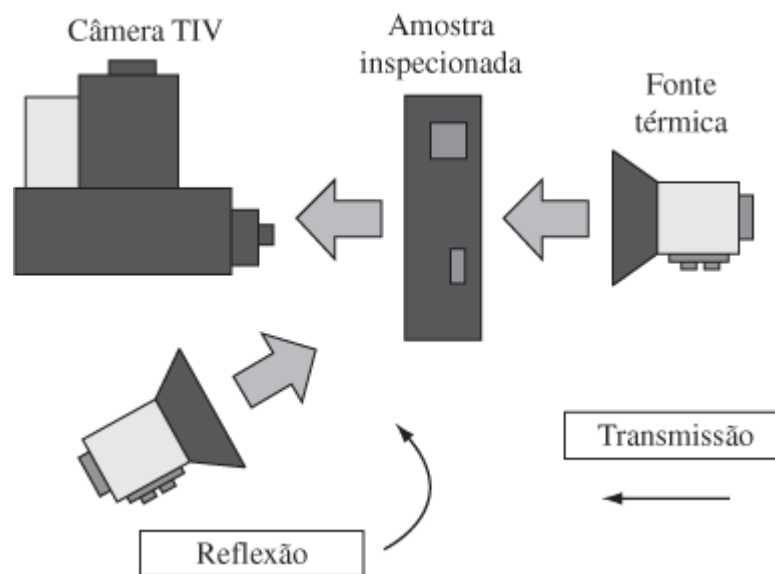


Figura 13 - Configuração da termografia ativa pulsada pelo método de reflexão e transmissão [135].

A técnica de transmissão possui algumas desvantagens como o fato dela não conseguir detectar a profundidade do defeito. Outra desvantagem é que essa técnica não poderá ser utilizada sempre, pois as vezes não será possível ter acesso a superfície oposta [130-132].

A Figura 14 mostra como ocorre o processo de análise/inspeção na técnica de reflexão em dois painéis, sendo o painel (a) sem defeito e o painel (b) com defeito [129].

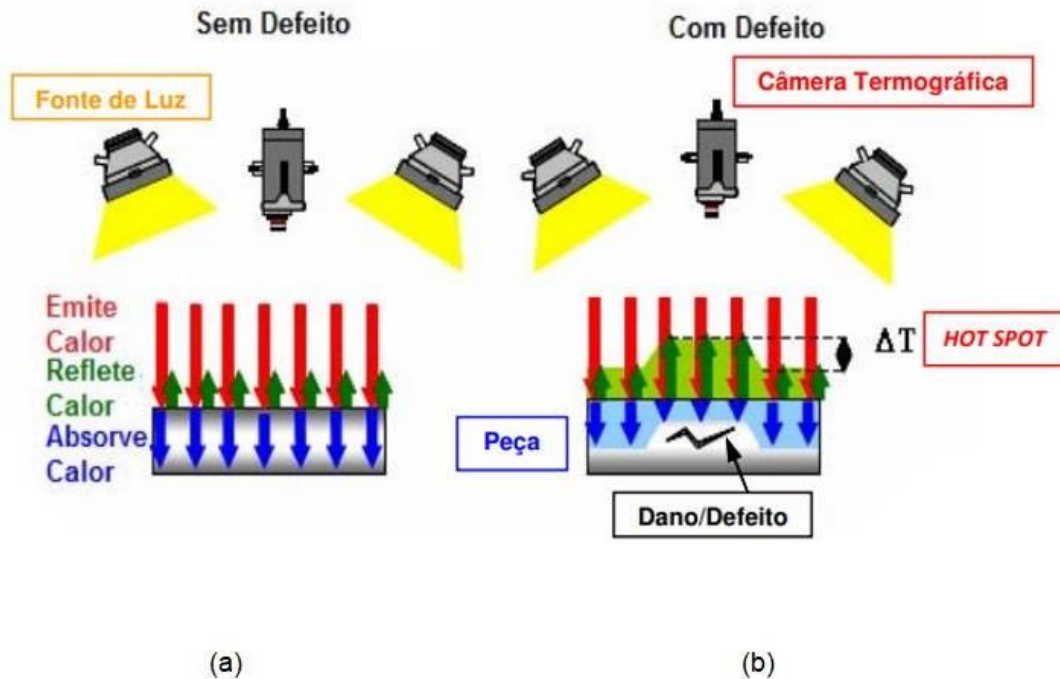


Figura 14 - Termografia ativa pulsada. Método de reflexão: (a) Peça sem defeito; (b) Peça com defeito [129].

A presença do defeito faz com que seja reduzida a capacidade do material transportar e absorver o calor, fazendo com que o material reflita mais calor do que um material sem defeitos. A emissão de calor gerada pelo material irá gerar os chamados *hot spots* (pontos quentes), que são captados pela câmera termográfica. Porém, em alguns casos, essa captação pode ser afetada pelo aquecimento não uniforme na superfície, tornando assim mais difícil uma visualização adequada do defeito [129,131].

Para descobrir a profundidade do defeito são utilizadas as seguintes equações [136]:

$$t = \frac{z^2}{\alpha} \quad (12)$$

$$z = \sqrt{t \alpha} \quad (13)$$

onde:

t = tempo do pico ou tempo de observação [s];

z = profundidade do defeito ou espessura do material [m];

α = difusividade térmica do material [m²/s].

A técnica de termografia ativa pulsada consegue analisar uma área de 0,25 m². Por isso, caso a amostra possua uma área maior, é necessário realizar diferentes ensaios para uma mesma amostra, cobrindo todas as regiões possíveis [127,130].

Um estudo realizado por Georges *et al* [137], em compósito híbrido com matriz epóxi reforçado com fibras de carbono e vidro, teve como função a inspeção de defeitos utilizando diferentes técnicas de termografia. Ele utilizou as técnicas de termografia com lâmpadas de halogênio e termografia ativa pulsada com flash [137].

A técnica de termografia com lâmpadas de halogênio denominada de Termografia Modulada (LOCK-IN) é diretamente dependente da difusividade térmica do material. Os compósitos, por apresentarem menor difusividade quando comparado com os metais, exigem frequências mais baixas na realização da termografia. O autor variou as frequências entre 0,09 Hz, 01 Hz e 0,3 Hz. Para frequências mais altas (0,3 Hz) apenas o defeito maior próximo à superfície (coluna C1), fica visível. As frequências mais baixas (0,09 Hz e 0,1 Hz) permitem uma análise mais profunda, como é mostrado na Figura 15 [137].

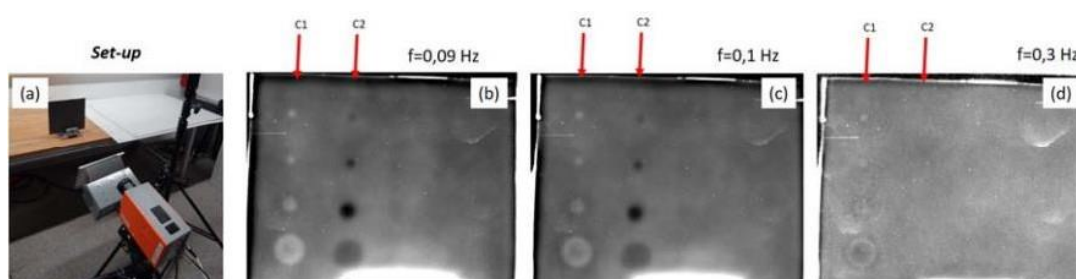


Figura 15 - (a) Esquema da Termografia Modulada; (b – d) Imagens das fases com diferentes frequências [137].

O segundo método utilizado por Georges *et al* [137], é o método de termografia ativa pulsada com flash. Os resultados e as configurações desse ensaio são próximos e comparáveis com os resultados encontrados na termografia com lâmpadas de halogêneo, a única diferença é que foi utilizado uma lâmpada de

flash de 6kJ.

Georges *et al* [137], relata que as técnicas de termografia com lâmpadas de halogênio e termografia ativa com flash apresentaram bons resultados. De acordo com os autores, a termografia com lâmpada de halogênio forneceu resultados onde foi possível observar defeitos em profundidades tipicamente de 2 mm, com diâmetros tão pequenos quanto 6 mm. Já a termografia ativa com flash forneceu os melhores resultados quando comparada com a técnica utilizando lâmpadas de halogênio [137].

Um estudo realizado por Silva [138], utiliza a técnica de termografia ativa pulsada utilizando lâmpadas de halogênio para analisar juntas compósitas poliméricas reforçadas com fibra de carbono (CFRP). O estudo busca obter o tempo de aquecimento que potencializa a visualização dos defeitos em uma junta com defeitos simulados. Foi utilizada uma câmera infravermelha FLIR SC 5600 e duas lâmpadas halógenas. A câmera foi controlada por um software fornecido pela empresa fabricante. No software era possível inserir parâmetros de emissividade do material, de umidade e temperatura do ambiente e parâmetros de frequência. Foi também utilizado um segundo programa no qual foi possível inserir a potência das lâmpadas utilizadas e o tempo de aquecimento [138].

Silva [138] posicionou as lâmpadas a uma distância de 0,4m do compósito. Cada lâmpada de halogênio tinha potência de 3400 W. O fluxo de calor que chega na superfície da amostra compósita é 5000 W/m². Foi utilizado o método de reflexão, onde as lâmpadas ficam do mesmo lado da câmera infravermelha. O autor relata a dificuldade em encontrar parâmetros a serem utilizados no software. Os tempos de aquecimento variaram em 10 segundos, 20 segundos, 30 segundos, 40 segundos e 50 segundos, armazenando 1140 quadros para cada tempo de aquecimento, e o modo de excitação e a posição da fonte foram mantidos constantes. Os resultados foram analisados utilizando o programa *ImagePro*® [138].

Por fim, o autor relata o tempo de aquecimento que obteve melhores resultados na visualização de defeitos, que foi o tempo de 10 segundos e a partir desse tempo de aquecimento, foi realizada uma inspeção por toda a junta compósita, onde foi possível detectar diversos defeitos simulados. Cerca de 70% dos defeitos simulados foram revelados. Os defeitos com geometrias quadradas e circulares

foram detectados com melhor facilidade em comparação com os defeitos retangulares, segundo o autor, comprovando o estudo realizado por Montanini *et al* [138]. Além disso, foi relatado que os defeitos menores foram mais facilmente detectados quando encontravam-se mais próximos a superfície, isto é, em menores profundidades [138-139].

Um estudo realizado por Neto [126], investiga a técnica de termografia ativa pulsada utilizando o método de reflexão, visando detectar defeitos e discontinuidades subsuperficiais presentes em amostras de juntas compósitas com resina epóxi reforçada com fibras de vidro (ERFV) e determinar um método adequado de acordo com a variação de parâmetros [126].

Neto [126], relata que o equipamento utilizado no ensaio foi uma câmera termográfica com as seguintes configurações: campo de visão da lente de 35 cm, sensibilidade térmica de 0,08 até 30°C, frequência de imagem de 50/60 Hz, possuindo uma faixa de temperatura entre -40°C a 500°C, temperatura de trabalho de 40°C a 70°C e umidade de 10 à 95% [126].

O autor relata a utilização dos seguintes materiais e parâmetros utilizados no ensaio: um soprador térmico com potência de 1440 W, com uma saída de ar de 400L por min. Foi realizada a variação de diversos parâmetros como tempo de excitação térmica, distância entre a câmera e a amostra (D_c), distância entre o soprador e a amostra (D_s), dentre outros, a fim de desenvolver um procedimento para este tipo de ensaio [126].

Os principais parâmetros variados pelo autor podem ser vistos na Figura 16.

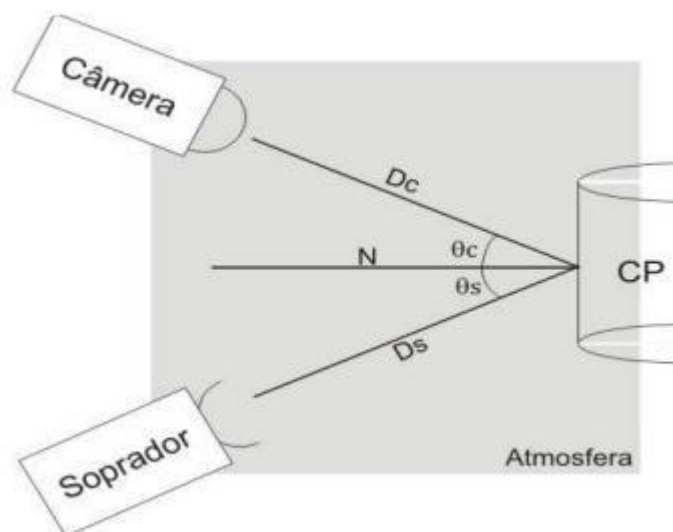


Figura 16 - Esquema do ensaio de termografia ativa pulsada com os parâmetros analisados [126].

A distância entre o soprador e o corpo de prova (CP) foi de 0,02m, 0,15m e 0,30m. A distância entre a câmera termográfica e a amostra variou entre 0,30m, 0,45m, e 0,60m. Os tempos de aquecimento utilizados foram de 10 segundos, 15 segundos, 20 segundos, 30 segundos, 40 segundos e 50 segundos [126].

Após analisar a variação de diversos fatores, o autor chegou à conclusão que a distância entre a câmera termográfica e a amostra que apresentou melhor resultado foi 0,3 m, associado ao soprador a uma distância de 0,02m da amostra e a um tempo de aquecimento de 10 segundos. Foi relatado que o ensaio apresentou melhores resultados quando o soprador foi utilizado realizando movimentos cíclicos iguais (“zigue-zague”) pois, quando o soprador é mantido parado ele gera falsas indicações podendo prejudicar na análise das descontinuidades [126].

Tarpani *et al* [135] realizou um estudo em compósitos laminados com matriz polimérica termorrígida epóxi reforçado com fibras de carbono (EPX-C) e compósitos laminados com matriz polimérica termoplástica reforçada com fibras carbono (PPS-C) em diferentes níveis de energia de impacto. Os danos sofridos pelo material foram analisados através do ensaio não-destrutivo de termografia ativa pulsada [135].

As amostras do estudo apresentavam geometria retangular com dimensões de 100 × 150 mm e com espessura de 5 mm. As amostras foram submetidas ao impacto transversal no centro da sua face, de acordo com a norma ASTM-D7136M. O ensaio de impacto utilizado foi o ensaio Charpy e a energia de impacto utilizada foi entre 5 e 30 J, utilizando um impactador com formato esférico com 16 mm de diâmetro [135].

Após o ensaio de impacto, foi utilizado o ensaio de termografia ativa pulsada utilizando uma lâmpada convencional de filamento incandescente, com potência de 100 W e um soprador de ar quente com volume de 0,1 m³ e utilizando uma câmera Flir® com sensibilidade nominal de 0,1 a 30°C e temperaturas de -20 a 350 °C. A distância entre a amostra e a câmera termográfica foi de 0,5 m. Para as duas fontes de calor foi empregado o modo de transmissão, como pode-se observar na Figura 17 [135].

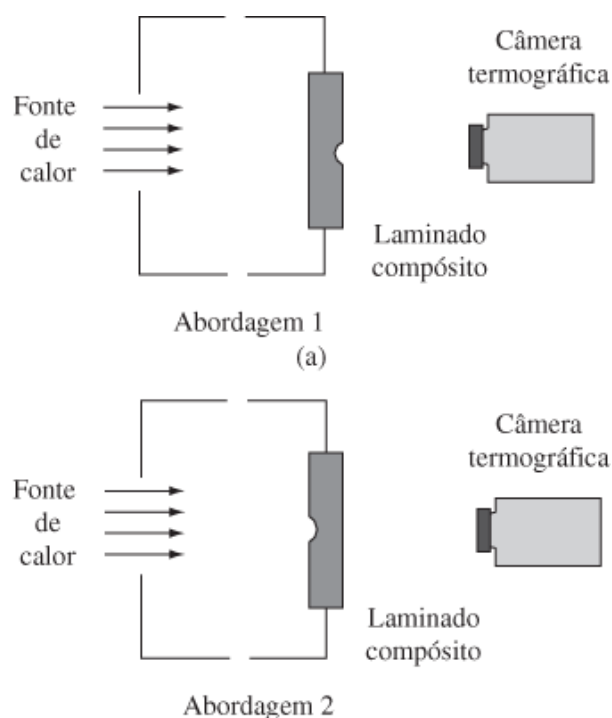


Figura 17 - Esquema de termografia ativada pulsada pelo método de transmissão [135].

Após a realização do ensaio de impacto, foi possível observar que os compósitos com matriz termoplástica possuem um dano mais visível quando comparados com os compósitos termorrígidos, porém não se pode tirar conclusões somente em uma deformação visual [135].

Os resultados da pesquisa mostraram que para o aquecimento por lâmpada, o tempo de 10 segundos foi suficiente para detectar os danos causados por uma energia de impacto de 30J nos dois tipos de compósitos. Porém, para os danos causados por uma energia de impacto de 20J no compósito com matriz termoplástica foi necessário um tempo de 16 segundos [135].

Segundo os autores, a detecção do dano causado pela energia de impacto de 20J no material compósito com matriz polimérica termoplástica e 30J no material compósito com matriz polimérica termorrígida, pode estar relacionada, de modo complexo, com a natureza da matriz e com os danos causados pelo impacto, que afetam diretamente as propriedades térmicas [135].

As dimensões dos danos causados por uma mesma energia de impacto nos compósitos termoplásticos foram maiores do que os danos causados nos compósitos termorrígidos [135].

Os resultados da pesquisa mostram que para o aquecimento por fluxo controlado de ar, o ensaio de termografia em um tempo de 10 segundos foi suficiente para detectar os danos causados por todas as energias de impacto nos compósitos de matriz termoplástica. Já para o compósito com matriz termorrígida, o tempo de 16 segundos apresentou uma leve melhora nos resultados [135].

Os autores também realizaram um ensaio de impacto em três regiões diferentes de um mesmo compósito laminado, a fim de utilizarem a termografia na detecção de danos múltiplos em laminados compósitos com matriz polimérica. De acordo com os resultados encontrados, a termografia ativa pulsada possui enorme potencial para detectar danos causados por impacto em diversas regiões do laminado compósito [135].

Por fim, destaca-se que o aquecimento por fluxo de ar apresentou melhores resultados que o aquecimento realizado por lâmpada incandescente. Foi constatado que apesar do tempo de aquecimento de 16 segundos apresentar resultados melhores, o tempo de 10 segundos também foi eficaz. Destaca-se também que a técnica de reflexão apresentou melhores resultados no compósito com matriz termoplástica. Já para o compósito com matriz termorrígida, as técnicas de reflexão e transmissão apresentaram os mesmos resultados [135].

2.8.2. Ensaio Sonoro

Caracterizar as propriedades elásticas de materiais compósitos possui uma grande importância, pois a seleção correta de materiais permite direcioná-los de maneira certa para cada aplicação, tornando-os materiais compósitos confiáveis para aplicação em diversos setores. Com isso, uma técnica de ensaio não-destrutivo tem se destacado, sendo ela a técnica de excitação por impulso ou também conhecida como ensaio sonoro [140].

A técnica de excitação por impulso consiste na aplicação de um impacto mecânico na amostra do material analisado. De acordo com a norma ASTM E1876, a amostra deve ter geometria cilíndrica, barra, disco ou anel. Esse impacto irá gerar frequências decorrente da vibração da amostra analisada e, então, essa vibração é captada por um sensor. Após a captação do sinal pelo sensor, é realizado um tratamento matemático dos dados através de um software, para obter os espectros de frequência por transformada de Fourier. Logo após é calculado o módulo de

elasticidade (E) do material e o fator de amortecimento (ζ) [140-142].

O valor de E é calculado através de equações que correlacionam as frequências obtidas em conjunto com a geometria, dimensões e massa do corpo de prova analisado [140-142].

Conhecer o módulo de elasticidade de um compósito é de extrema importância pois ele representa o quão rígido é o material, isto é, o quanto esse material pode se deformar no regime elástico. Através do conhecimento do módulo de elasticidade será possível direcionar a aplicação correta para cada tipo de material compósito [143].

Outro aspecto importante para destacar a relevância do módulo de elasticidade é a sua utilização como parâmetro para materiais envelhecidos em água, pois a estabilização da queda do módulo de elasticidade pode significar que os danos causados pela água no material envelhecido estão se estabilizando [140,142].

O fator de amortecimento, ou atrito interno, também é um parâmetro importante de conhecimento quando se trata de materiais compósitos, pois é possível relacioná-lo com os mecanismos de dissipação de energia, como o atrito entre as fibras e a matriz, no interior do material. Quanto maior o fator de amortecimento, maior será o atrito interno do material e logo maior é dano que esse material sofreu. Ele também é um parâmetro muito utilizado para análise de degradação de materiais compósitos, pois o aumento do fator de amortecimento indica que o envelhecimento aumentou o atrito interno entre as fases do compósito, aumentando o dano causado no compósito com decorrer do tempo [142].

Otani [144] realizou um estudo de revisão onde mostra a aplicação da técnica de excitação por impulso na caracterização de compósitos. Os autores relatam que o módulo de elasticidade do material será obtido a partir das frequências de vibração, concebida através de um impacto de duração curta, no corpo de prova. A pesquisa mostra que após obtidas as frequências, o módulo de elasticidade será calculado pelo uso de um tratamento matemático e equações descritas pela norma ASTM E1876.

Um estudo desenvolvido por Luz [145], teve como objetivo avaliar as propriedades elásticas em compósitos com matriz epóxi reforçados com diferentes frações volumétricas de fibras de coco. As propriedades elásticas foram analisadas através da técnica de excitação por impulso. Os autores relatam que foi observado

uma pequena diferença entre os módulos de elasticidade entre compósitos com a mesma quantidade de fibras, porém essa diferença não foi significativa [145].

Para porcentagens de fibras de coco de 10% não houve uma melhora nas propriedades elásticas, pois os compósitos apresentaram módulo de elasticidade semelhante ao epóxi puro. Já para as frações acima de 10%, ou seja, 20% e 30% o módulo de elasticidade variou significativamente. Por fim, o estudo mostra que a técnica de excitação por impulso apresentou resultados mais precisos que os resultados obtidos pelo ensaio de tração, pois a dispersão entre os módulos de elasticidade no ensaio sonoro foi de 7%, enquanto no ensaio de tração foi 16% [145].

3. Metodologia experimental

A metodologia usada nesse trabalho consistiu na exposição de corpos de prova de três tipos de materiais compósitos em dois ambientes de envelhecimento, para avaliação de suas características físicas e mecânicas utilizando técnicas destrutivas e não-destrutivas. As etapas adotadas estão listadas a seguir:

- 1) Fabricação das amostras
- 2) Caracterização das amostras não envelhecidas
- 3) Envelhecimento dos corpos de prova
- 4) Caracterização das amostras ao longo do envelhecimento
- 5) Caracterização das amostras após o envelhecimento

3.1. Materiais

Para a preparação dos materiais compósitos foi utilizada uma resina epóxi (Corel Wood Alta Espessura A + B), sistema epóxi bicomponente rígido e transparente. Para o preparo da resina, foram misturados os componentes A+B na proporção de 100 gramas para o componente A e 25 gramas para o componente B. Em seguida, a resina foi utilizada para a fabricação dos materiais compósitos. Na Tabela 6, são apresentadas algumas especificações da resina fornecidas pelo fabricante.

Tabela 6 - Especificações da resina.

Propriedade	Unidade	
Viscosidade a 25° C	mPas	1350-2000
Equivalente Epoxi	g/Eq	230-233
Teor Epoxi	Eq/kg	4,278
Cor (Gardner)	-	≤ 3
Peso Específico a 20°C	g/cm ³	1,11 – 1,15

Foram fabricados 3 tipos de materiais compósitos, sendo eles:

- **Compósito A** - Compósito com matriz epóxi reforçado com fibra de vidro.
- **Compósito B** - Compósito com matriz epóxi reforçado com fibra de luffa.
- **Compósito C** - Compósito híbrido com matriz epóxi (fibra de vidro/fibra de luffa).

A Tabela 7 resume a especificação geral dos compósitos fabricados.

Tabela 7 - Especificação dos tipos de compósito com matriz epóxi fabricados.

	Compósito A	Compósito B	Compósito C
Reforço	Fibra de Vidro	Fibra de Luffa	Fibra de Vidro-Luffa
V_f	43,80%	22,02%	10,54% vidro e 15,56% luffa

Para a fabricação dos compósitos reforçados com fibra de vidro foi utilizado um tecido bidirecional (0/90) de fibra de vidro RE200P produzido pela Barracuda *Advanced Composite*. Assim, o laminado produzido tem 50% de fibras de vidro orientadas a 0° e 50% de fibras orientadas a 90° e cada camada de tecido possui espessura de 0,21 mm, sendo ideal para laminados de alta resistência e baixo peso com alta qualidade de acabamento superficial.

Para a fabricação do compósito de fibra de luffa foram utilizados tecidos de luffa vegetal, da espécie de *Luffa cylindrica*, provenientes do estado de São Paulo.

Para a fabricação dos compósitos híbridos, foram utilizados os tecidos de fibra de vidro RE200P e fibra de luffa.

3.2. Métodos

3.2.1. Fabricação

Os compósitos foram fabricados utilizando o processo de laminação manual e foram consolidados com o auxílio de uma prensa hidráulica.

Para fabricação dos compósitos e melhor utilização da prensa foi fabricado um molde de madeira com dimensões de 35 cm x 35 cm. Com o objetivo de evitar que o compósito não aderisse no molde de madeira, o molde foi totalmente revestido com um filme de polietileno de 1,3 mm de espessura, conforme a Figura 18.



Figura 18 - Molde totalmente revestido de polietileno.

Na fabricação dos 3 tipos de compósitos, o molde foi colocado na prensa hidráulica, sendo aplicada uma carga de 4 toneladas durante 48 horas, conforme mostrado na Figura 19.



Figura 19 - O molde de madeira submetido a uma carga de 4 toneladas na prensa hidráulica.

O processo de laminação dos 3 tipos de compósitos será detalhado a seguir.

3.2.1.1. Processo de laminação do compósito reforçado com fibra de vidro

Para a fabricação do laminado reforçado com fibra de vidro foram utilizadas 20 camadas de tecido de fibra de vidro. O processo de laminação foi realizado conforme descrito a seguir:

1. Pesagem dos componentes A e B da resina Corel Wood Alta Espessura A + B. Em cada placa de compósito foram utilizados 300g do Componente A e 75g do Componente B.
2. A resina foi misturada manualmente até obter uma mistura homogênea.
3. Aplicação de cera desmoldante no molde (Ingleza)
4. Aplicação de um tecido de fibra de vidro.
5. Aplicação de uma camada de resina como o auxílio do rolo de lã.
6. Compressão da fibra de vidro com o auxílio do rolo metálico.

7. Processo 4 a 6 foi repetido até a vigésima camada de tecido de fibra de vidro.

O processo 4, 5 e 6 de laminação do compósito polimérico reforçado com fibra de vidro pode ser visto na Figura 20.



(a)



(b)



(c)

Figura 20 - Processo de laminação compósito reforçado com fibra de vidro. (a) Tecido fibra de vidro. (b) Espalhamento da resina com o rolo de espuma. (c) Compactação da manta de fibra de vidro com rolo metálico.

Logo após as 48 horas na prensa, as placas de compósito foram retiradas, conforme exemplificado na Figura 21, para o laminado de fibra de vidro.

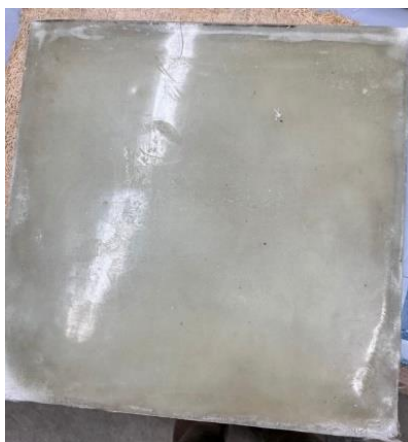


Figura 21 - Laminado de Fibra de Vidro com 35 cm x 35 cm de área ao ser retirado do molde.

3.2.1.2. Processo de laminação compósito reforçado com fibra de luffa

Para a fabricação do laminado reforçado com fibra de luffa foram utilizadas 2 camadas de tecido de fibra de luffa. As fibras de luffa foram recebidas na forma de rolos (Figura 22a). Assim, para a obtenção do tecido, as luffas foram abertas e cortadas para retirada da parede intermediária e das sementes. Com isso, foi possível gerar o formato de manta natural fibrosa, conforme pode ser visto na Figura 22b.



Figura 22 - a) Fibras recebidas, b) As fibras após serem abertas e ter sido retirada a parede intermediária e as sementes.

O processo de laminação foi semelhante ao realizado para o compósito de fibra de vidro. As diferenças foram em relação a quantidade de resina (item 1) e na sequência de colocação das mantas de fibra e da resina (itens 4 a 8), conforme descrito a seguir:

1. Pesagem dos componentes A e B da resina Corel Wood Alta Espessura A + B. Em cada placa de compósito foram utilizados 600g do Componente A e 150g do Componente B.
2. A resina foi misturada até obter uma mistura homogênea.
3. Aplicação de cera desmoldante no molde (Ingleza).
4. Aplicação da primeira camada de tecido de fibra de luffa.
5. Aplicação de 375g de resina com o auxílio do rolo de lã.
6. Compressão da fibra de luffa com o auxílio do rolo metálico.
7. Aplicação da segunda camada de tecido de fibra de luffa.
8. Aplicação de 375g de resina com o auxílio do rolo de lã.

A Figura 23a mostra as mantas de fibra colocadas no molde antes da aplicação da resina (item 4) e a Figura 23b mostra a placa obtida após 48 horas de prensagem.

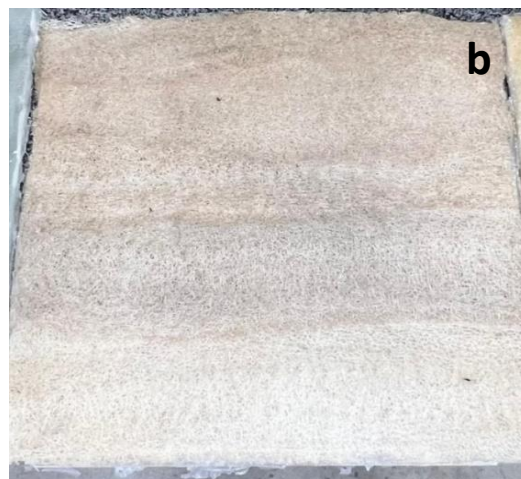


Figura 23 - a) As mantas de fibra de luffa posicionadas no molde. b) Placa de compósito após retirada do molde.

3.2.1.3. Processo de Laminação Compósito Híbrido (Vidro/Luffa)

Para a fabricação do compósito híbrido foram utilizadas 10 camadas de tecido de fibra de vidro e 2 camadas de tecido de luffa. A sequência de empilhamento usada foi de 5 camadas de fibra de vidro/2 camadas de fibra de luffa/5 camadas de fibra de vidro. Ou seja, foi fabricado um compósito laminado simétrico do tipo vidro/luffa/vidro. O processo de laminação foi realizado conforme descrito a seguir:

1. Pesagem dos componentes A e B da resina Corel Wood Alta Espessura A + B. Em cada placa de compósito foram utilizados 750g do Componente A e 187,5g do Componente B.
2. A resina foi misturada até obter uma mistura homogênea;
3. Aplicação de cera inglesa no molde (Ingleza).
4. Aplicação de uma camada de tecido de fibra de vidro.
5. Aplicação de uma camada de resina como o auxílio do rolo de lã.
6. Compressão da fibra de vidro com o auxílio do rolo metálico.
7. Processo 4, 5 e 6 foi repetido até a quinta camada de Fibra de Vidro. Foi utilizado 93,5 gramas de resina até essa etapa.
8. Aplicação de duas camadas de tecido de fibra de luffa.
9. Aplicação de 500g de resina.
10. Aplicação de cinco camadas de tecido de fibra de vidro.
11. Aplicação de 344g de resina para a finalização.

O processo de laminação do compósito polimérico híbrido pode ser visto na Figura 24. Na Figura 25 está mostrado um laminado obtido após a prensagem.

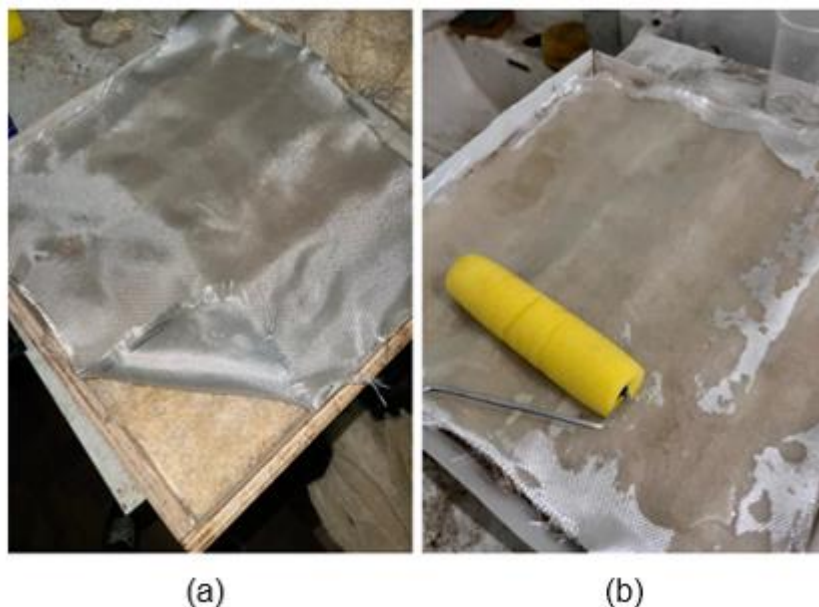


Figura 24 - Processo de laminação compósito híbrido. (a) Manta de fibra de vidro colocada por cima das camadas de Fibra de Luffa. (b) Resina sendo espalhada com ajuda do rolo de espuma.



Figura 25 - Placa de compósito híbrido vidro/luffa/vidro obtida após a prensagem.

3.2.2. Descrição Geral dos ensaios

Os ensaios realizados e o envelhecimento ao qual as amostras dos 3 tipos de compósitos foram submetidas estão apresentados nos fluxogramas das Figuras 26 e Figura 27.

O fluxograma da Figura 26 mostra a fabricação do material dos 3 tipos de compósitos e os ensaios realizados antes do envelhecimento.

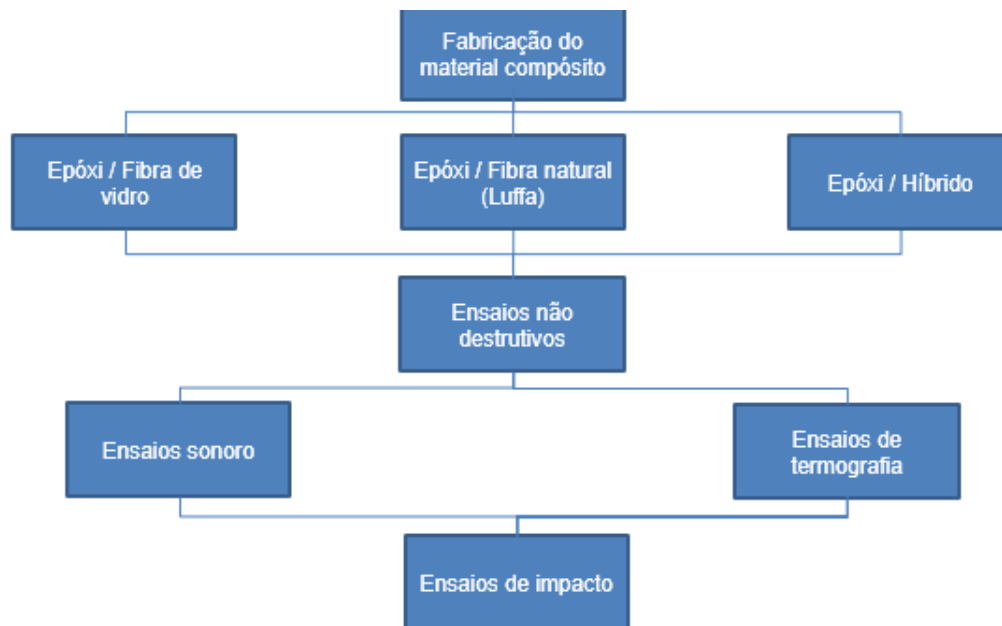


Figura 26 - Fluxograma esquemático da caracterização dos compósitos antes do envelhecimento.

O fluxograma da Figura 27 mostra as duas condições de envelhecimento aos quais os 3 tipos de compósitos foram submetidos. Durante e após o envelhecimento foram realizados os ensaios sonoro e de absorção. Após o envelhecimento, foi realizado também o ensaio destrutivo de impacto.

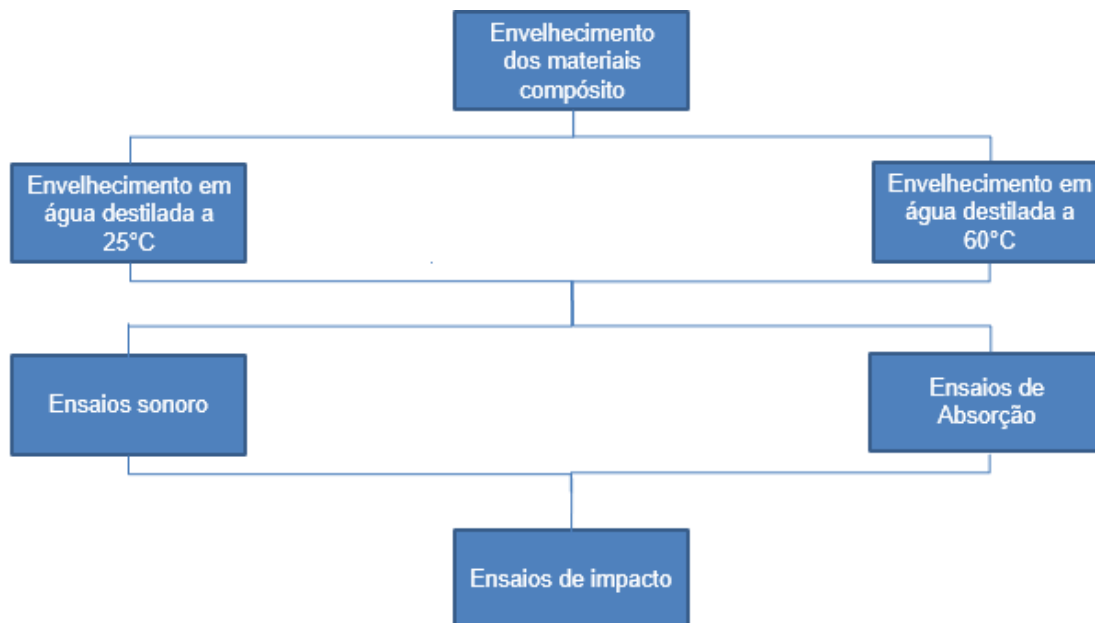


Figura 27 - Fluxograma esquemático da caracterização dos compósitos durante e após o envelhecimento.

3.2.2.1. Ensaio de Envelhecimento

No ensaio de envelhecimento, as amostras dos compósitos com matriz epóxi reforçadas com fibras de vidro, fibra de luffa e híbridos (vidro/luffa), foram imersas em água destilada. As amostras foram envelhecidas em duas temperaturas diferentes (25°C e 60°C), com o intuito da avaliação da aceleração dos mecanismos de degradação.

O ensaio de envelhecimento foi realizado em 72 amostras. As amostras foram divididas por recipientes de acordo com a finalidade de cada ensaio (impacto e sonoro/absorção) e também de acordo com as duas condições de envelhecimento (25°C e 60°C).

Para a realização do ensaio de envelhecimento a 60°C, as amostras foram colocadas em banho maria, conforme mostrado na Figura 28.



Figura 28 - Amostras em banho maria a 60°C.

Os espécimes que foram utilizados durante e após o envelhecimento para a realização da pesagem e do ensaio sonoro, foram colocados em recipientes com 3 amostras. Já os espécimes que foram utilizadas para o ensaio de impacto após o envelhecimento, foram colocados em recipientes com 9 amostras.

A quantidade de amostras que foram submetidas ao envelhecimento está mostrada na Tabela 8.

Tabela 8 - Quantidade de amostras separadas por recipientes.

Compósito	Ensaio Sonoro e Ensaio de Absorção		Ensaio de Impacto	
	Água destilada 25°C	Água destilada 60°C	Água destilada 25°C	Água destilada 60°C
Fibra de Vidro	3 amostras	3 amostras	9 amostras	9 amostras
Fibra de Luffa	3 amostras	3 amostras	9 amostras	9 amostras
Híbrido	3 amostras	3 amostras	9 amostras	9 amostras

3.2.2.2. Ensaio de Absorção

Durante o envelhecimento os corpos de prova foram regularmente pesados para medir a absorção de água nos compósitos. Esse ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D 570 [149]. Os corpos de provas que foram utilizados no ensaio sonoro possuem dimensões (120 mm x 20 mm). As pesagens foram feitas em uma balança com precisão de $\pm 0,001$ mg. A cada pesagem os corpos de prova foram secados de maneira uniforme para que não houvesse interferência nos resultados de absorção.

De acordo com a norma ASTM D570, a variação de massa (M%) ao longo do tempo de envelhecimento foi determinada pela Equação 9. Os corpos de prova foram considerados saturados quando a variação de massa (M%) entre duas pesagens consecutivas for inferior a 1% [142, 149-150]. O tempo total de envelhecimento foi de 4 meses (120 dias).

3.2.2.3. Ensaio Sonoro

Os corpos de provas que foram utilizados no ensaio sonoro possuem dimensões (120 mm x 20 mm) de acordo com a norma ASTM E1876. As espessuras das amostras de fibra de vidro variaram entre 2,84 mm e 3,1 mm, de luffa variaram entre 5,44 mm e 5,79 mm, já as amostras dos compósitos híbridos variaram entre 4,71 mm e 5,07 mm. Além disso, as amostras foram submetidas ao ensaio em temperatura ambiente ao longo do tempo de envelhecimento [141,144].

O objetivo desse ensaio não destrutivo foi avaliar a variação do módulo de elasticidade e do fator de amortecimento durante o envelhecimento dos corpos de prova. Assim, o ensaio sonoro foi realizado posteriormente à fabricação dos compósitos, durante e após o envelhecimento.

Antes da realização do ensaio sonoro, o corpo de prova foi pesado e também foram realizadas 3 medidas da espessura, largura e comprimento. Esses parâmetros são necessários para os cálculos realizados pelo software do equipamento.

Em seguida, o corpo de prova foi posicionado para a realização do ensaio. O microfone e o pulsador foram ajustados de acordo com o comprimento e espessura do corpo de prova, conforme mostrado na Figura 29. Essa configuração

é denominada modo flexional + torsional e permite a avaliação dos módulos de elasticidade (E) e do módulo de cisalhamento (G). Para a determinação do módulo de cisalhamento é preciso, entretanto, informar o valor do coeficiente de Poisson do material.

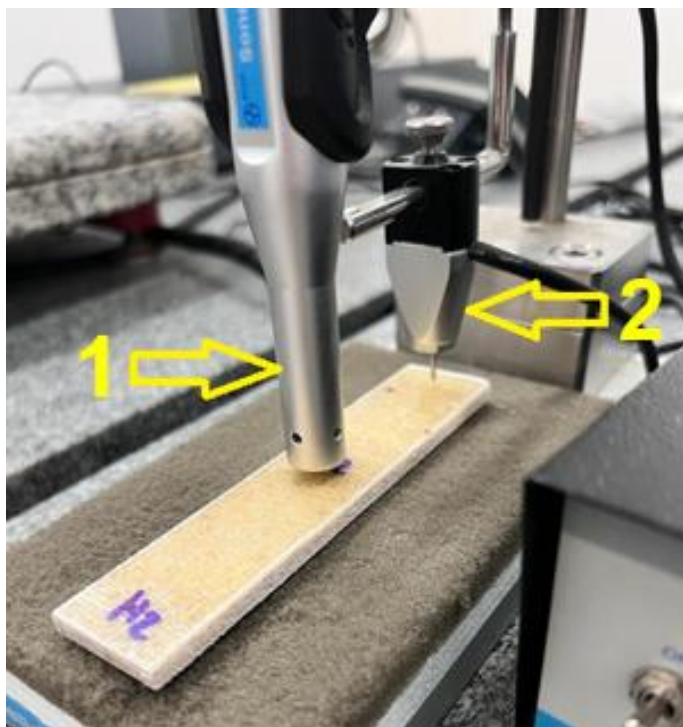


Figura 29 - Ensaio Sonoro. Microfone (1) e pulsador (2) posicionados sobre o corpo de prova.

Ao realizar o ensaio, o pulsador irá produzir uma batida na extremidade da amostra, fazendo-a vibrar. Ao vibrar, a amostra irá gerar uma resposta acústica que será captada pelo microfone. Após a captação do sinal pelo microfone, é realizado um tratamento matemático dos dados através de um software para obtenção das frequências e é calculado o módulo de elasticidade (E) do material e o fator de amortecimento (ζ).

O valor do módulo de elasticidade é calculado através de equações que correlacionam as frequências obtidas em conjunto com a geometria, dimensões e massa do corpo de prova. O módulo de elasticidade será usado para o entendimento do envelhecimento do compósito, pois a estabilização da queda do módulo de elasticidade pode significar que os danos causados pela água no material envelhecido estão se estabilizando.

O fator de amortecimento é calculado pela taxa de atenuação do som e tem como finalidade relacionar o atrito interno entre a fibra e a matriz do compósito com o grau de degradação devido ao envelhecimento.

O ensaio sonoro antes do envelhecimento foi realizado em 6 amostras de cada tipo de compósito, sendo 3 amostras para a primeira condição de envelhecimento (água destilada a 25°C) e 3 para a segunda condição de envelhecimento (água destilada a 60°C), como é possível observar na Tabela 9.

Tabela 9 - Quantidade de amostras no ensaio sonoro antes do envelhecimento.

	Água destilada 25°C	Água destilada 60°C
Compósito de Fibra de Vidro	3 amostras	3 amostras
Compósito de Fibra de Luffa	3 amostras	3 amostras
Compósito Híbrido	3 amostras	3 amostras

A realização do ensaio sonoro, foi feita de acordo com os seguintes intervalos de tempo: 0h (amostra como fabricada), 1863 e 2928 horas.

3.2.2.4. Ensaio de Impacto

Os ensaios de impacto foram realizados em corpos de prova retangulares, com dimensões de 120 mm de comprimento por 20 mm de largura. Foi usada a máquina de ensaio CSI-modelo 137D, usando as configurações do pêndulo do ensaio Charpy, com ponta arredondada, conforme a Figura 30.

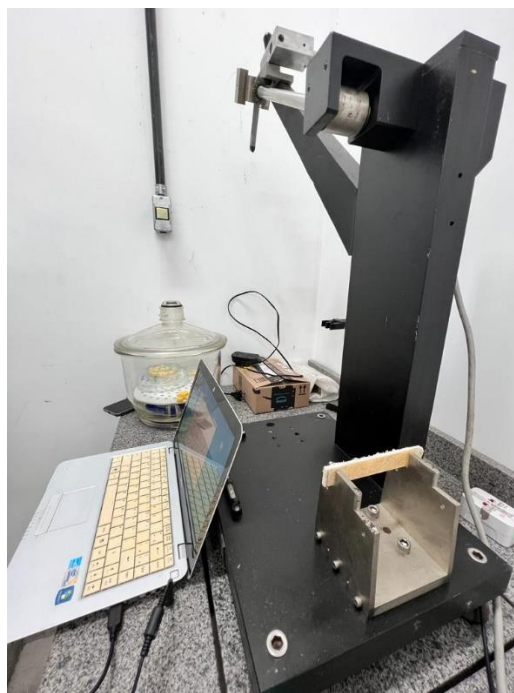


Figura 30 - Ensaio de Impacto Charpy.

A energia de impacto inicial foi de 5,7J. O ensaio de impacto foi realizado em 9 amostras de cada tipo de compósito, sendo realizado antes e após o envelhecimento.

3.2.2.5. Ensaio de Termografia

O ensaio de termografia foi realizado em 3 amostras de cada tipo de compósito com o intuito de determinar de modo aproximado a condutividade térmica dos compósitos.

Os compósitos foram posicionados sobre uma placa de alumínio que, foi posicionada em cima de uma placa aquecedora IKA RCT basic. A placa de alumínio foi utilizada com o objetivo de distribuir o calor de forma uniforme para as amostras. Após a temperatura da placa de alumínio ter a temperatura equilibrada em 100°C, o corpo de prova foi posicionado sobre ela. Então, com a câmera FLIR C5 posicionada acima das amostras um cronometro foi disparado e foi medido o tempo que cada compósito levou para atingir a temperatura de 100°C, conforme mostrado na Figura 31.



Figura 31 - Análise da temperatura dos compósitos com o auxílio da câmera termográfica FLIR C5.

4. Resultados e discussão

4.1 Ensaio de Absorção

O ensaio de absorção teve como principal objetivo obter a curva de ganho de massa ao longo do tempo. Nesta pesquisa, 3 tipos de materiais diferentes foram envelhecidos a temperatura ambiente de 25°C e a 60°C. O processo de envelhecimento abrange os resultados obtidos na pesquisa no período de 07/11/2022 até 10/03/2023.

A Equação 14 foi utilizada para expressar a porcentagem do teor médio de umidade absorvida, que foi calculada a partir da relação entre a massa de umidade absorvida pelo material e a massa da amostra seca. Ou seja:

$$M, \% = \frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100 \quad (14)$$

onde, W_i é o valor atualizado da massa da amostra (g) no tempo i e W_0 o valor inicial da massa da amostra (g), ou seja, quando a amostra estava seca.

Para se compreender melhor o comportamento do material sujeito à umidade, é necessário realizar um ensaio até que se alcance um equilíbrio efetivo da umidade, o que corresponde ao valor de equilíbrio. Esse equilíbrio é alcançado quando a curva de absorção atinge um platô, ou seja, não ocorrem mudanças significativas no teor médio de umidade absorvida, o que indica que o material atingiu a saturação.

Observou-se nos gráficos de evolução da umidade absorvida (em porcentagem de peso) em relação à raiz quadrada do tempo, um aumento de massa com uma região linear inicial evidente.

O processo de absorção e difusão de água pode ser modelado usando a solução da equação de Fick. Para valores de $M\%/M_\infty < 0,5$ foi considerado que os materiais apresentaram comportamento de difusão Fickiano. Observou-se que, para valores de $M\%/M_\infty$ acima de 0,5, as curvas exibiram um outro comportamento. Devido a esses desvios do comportamento Fickiano, não foi possível ajustar os dados aos modelos simplificados convencionais de Fick. Com isso, foi utilizado o modelo proposto por McKague [151] para realizar o ajuste dos dados. O ajuste dos dados com a eq. 15 foi satisfatório já que os valores dos coeficientes de correlação ficaram acima de 0,95, indicando que o modelo foi adequado.

$$\frac{M_{\%}}{M_{\infty}} = \tanh \left[\frac{4}{h} \times \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \right] \quad (15)$$

4.1.1. Comportamento de absorção à temperatura ambiente

A seguir serão analisados os compósitos de matriz epóxi reforçados com fibra de vidro, luffa e híbrido (vidro/luffa) envelhecidos em água destilada a temperatura ambiente.

4.1.1.1. Fibra de Vidro

Os resultados referentes as massas absorvidas por cada corpo de prova do compósito de fibra de vidro (V1, V2 e V3) estão apresentados no Apêndice A, juntamente com as respectivas curvas de ganho de massa por absorção de umidade ao longo do tempo, ajustadas usando a equação 15. A Figura 32 mostra um exemplo dos dados experimentais obtidos e ajustados.

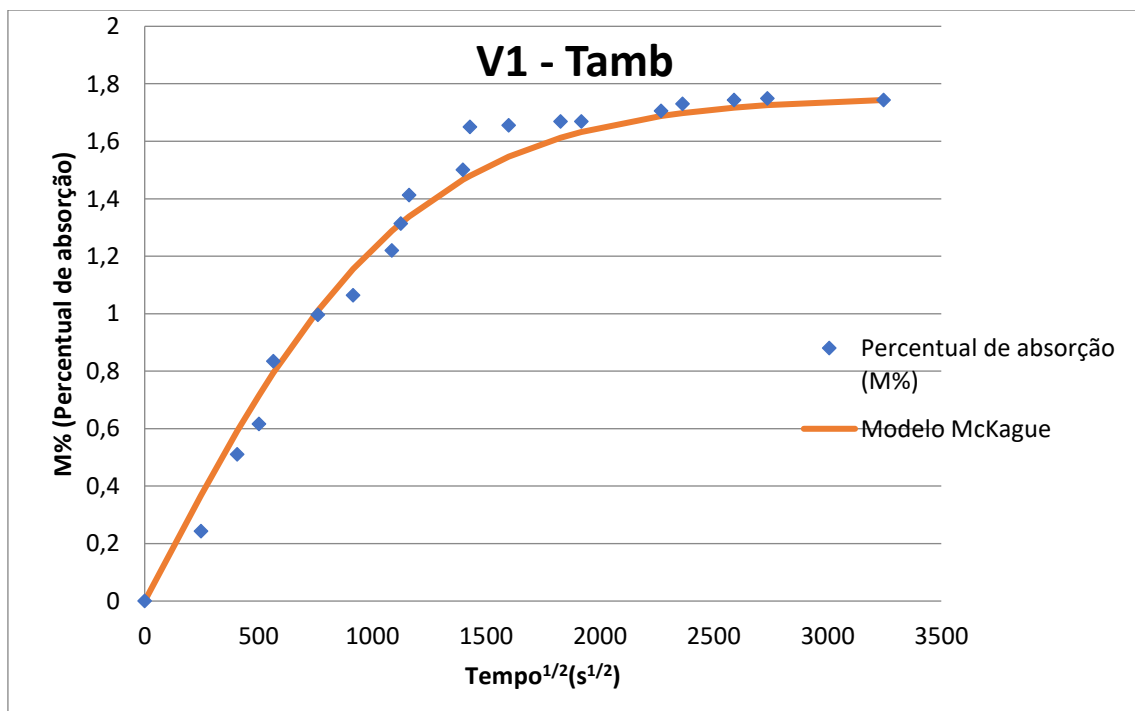


Figura 32 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra V1 envelhecida em temperatura ambiente.

Os parâmetros de absorção obtidos para os compósitos de fibra de vidro imersos na temperatura ambiente estão apresentados na tabela 10. Ao analisar a

tabela 10, é possível observar que os coeficientes de correlação obtidos indicam que os pontos experimentais aderem bem ao modelo de McKague.

Tabela 10 - Parâmetros de absorção para os compósitos de fibra de vidro envelhecidos em temperatura ambiente.

Corpo de prova	M_{∞} (%)	D ($10^{-6}\text{mm}^2/\text{s}$)	r^2
V1	1,74	1,170	0,9822
V2	2,00	0,909	0,9603
V3	1,57	0,727	0,9838
Média	$1,76 \pm 0,18$	$0,909 \pm 0,159$	-

Analisando os dados experimentais mostrados na Figura 32 pode-se destacar que nas primeiras 46 horas ($406 \text{ s}^{1/2}$) o compósito teve incremento de massa de 0,51% e que na primeira semana (161 horas ou $761 \text{ s}^{1/2}$) o compósito absorveu, aproximadamente, 0,99%.

De fato, os compósitos de fibra de vidro geralmente apresentam uma absorção inicial de água rápida, resultando em um aumento significativo de massa nas primeiras horas de exposição. Isso se deve ao fato de que a água penetra facilmente nas camadas superficiais do compósito, onde as fibras de vidro estão mais expostas, gerando uma maior área interfacial e, principalmente, pelo maior gradiente de concentração existente entre o meio de absorção e o interior do compósito. No entanto, com o passar do tempo, a absorção de água tende a se estabilizar à medida que a água penetra mais profundamente no compósito, atingindo as camadas internas, devido à redução do gradiente de concentração. Segundo a literatura o tempo médio para saturação de compósitos de fibra de vidro ocorre entre 2 e 3 meses. É possível ver que o compósito está começando a estabilizar o seu ganho de massa com 1863 horas ($2590 \text{ s}^{1/2}$), ou seja, 2,5 meses [152-156].

Analisando a curva de absorção da Figura 32, observa-se que a curva apresenta comportamento inicial linear até, aproximadamente 1,00%, seguido por um decréscimo contínuo da taxa de absorção até começar atingir um platô, corroborando com o comportamento descrito na literatura [152-154, 157]. É possível observar também que a curva possui uma tendência de atingir um platô, significando que o material atingirá a saturação.

Conforme mostrado na tabela 10, os valores obtidos para todas as amostras ensaiadas ficaram próximos, indicando homogeneidade do material fabricado e do processo de difusão para o compósito de fibra de vidro. Para o corpo de prova V2 a tendência a estabilizar o ganho de massa percentual também ocorreu em, aproximadamente, 1863 horas. Observou-se também que nas primeiras 46 horas o compósito teve incremento de massa de 0,47% e na primeira semana (161 horas) o compósito absorveu, aproximadamente, 0,88%. Valores próximos a esses também foram determinados para o corpo de prova V3. Nas primeiras 46 horas o compósito teve incremento de massa de 0,41% e na primeira semana (161 horas) o compósito absorveu cerca de 0,81%.

Os valores ajustados para o coeficiente de difusão (D) e para o valor de saturação (M_{∞}) apresentados na Tabela 10 são condizentes com os valores reportados na literatura. Os valores ajustados para o coeficiente de difusão (D) na literatura variam entre $0,95 \times 10^{-6} \text{mm}^2/\text{s}$ a $6,63 \times 10^{-6} \text{mm}^2/\text{s}$, sendo condizentes com os valores encontrados nesse trabalho [152-153, 157]. O mesmo pode ser afirmado em relação ao valor de absorção, M_{∞} . Diversos trabalhos de absorção em água destilada à temperatura ambiente de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro apresentaram valores de absorção entre 0,42% e 2,00% [152-153,157, 15].

4.1.1.2. Fibra de Luffa

Os resultados referentes as massas absorvidas por cada corpo de prova do compósito de fibra de luffa (L1, L2 e L3) estão apresentados no Apêndice A, juntamente com as respectivas curvas de ganho de massa por absorção de umidade ao longo do tempo, ajustadas usando a equação 15. A Figura 33 mostra um exemplo dos dados experimentais obtidos e ajustados.

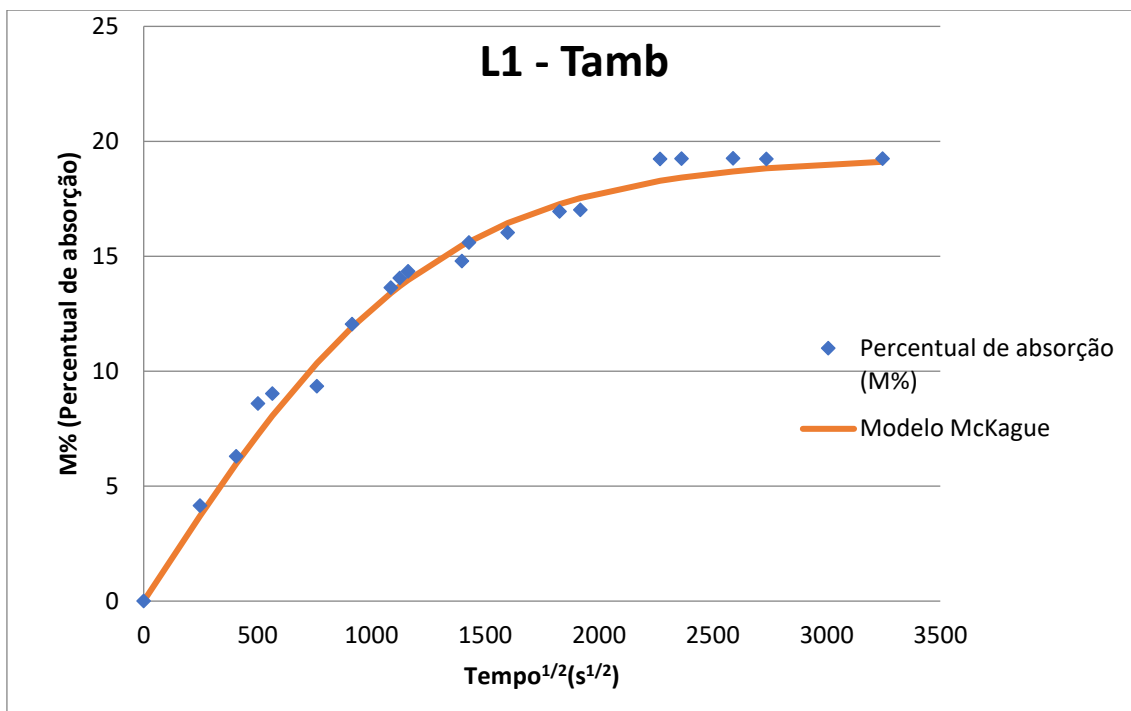


Figura 33 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra L1 envelhecida em temperatura ambiente.

Os parâmetros de absorção obtidos para os compósitos de fibra de luffa à temperatura ambiente estão listados na tabela 11. Pode-se observar que os coeficientes de correlação obtidos indicam que os pontos experimentais aderem bem ao modelo de McKague.

Tabela 11 - Parâmetros de absorção para os compósitos de fibra de luffa envelhecidos em temperatura ambiente.

Compósito	M_{∞} (%)	D ($10^{-6} \text{mm}^2/\text{s}$)	r^2
L1	19,25	3,96	0,9872
L2	18,31	2,88	0,9855
L3	24,24	2,53	0,9730
Média	$20,6 \pm 2,6$	$3,12 \pm 0,61$	-

O comportamento geral observado para o compósito de fibra de luffa foi semelhante ao apresentado para o compósito de fibra de vidro (Figura 33 vs. Figura 32). Porém, como esperado, os valores de absorção foram bastante superiores

quando se analisam os dados para os compósitos de luffa. De fato, devido às suas propriedades intrínsecas, os compósitos feitos com fibra de luffa têm uma notável tendência para absorver grandes quantidades de água, pois a fibra de luffa, sendo uma fibra vegetal altamente hidrofílica e porosa, possui a capacidade de absorver água facilmente [161-163].

Analisando-se a curva de absorção para o corpo de prova L1 (Figura 33) é possível observar que o valor máximo de absorção foi de 19,25%. Destaca-se também que nas primeiras 46 horas ($406 \text{ s}^{1/2}$) o compósito teve incremento de massa de 6,29%. Na primeira semana (161 horas, $761 \text{ s}^{1/2}$) o compósito absorveu, aproximadamente, 9,34%.

Segundo a literatura o tempo médio para saturação de compósitos de fibra vegetal ocorre entre 1 e 2 meses [161-164]. Um trabalho chegou a apresentar tempo de saturação de 8 meses [19]. Na Figura 33, é possível ver que o compósito está começando a estabilizar o seu ganho de massa com 1,9 meses (1431 horas, $2269 \text{ s}^{1/2}$), corroborando com a maioria dos trabalhos encontrados na literatura.

A partir da curva de absorção mostrada na Figura 33, observa-se que há um comportamento inicial linear até, aproximadamente, 10%, seguido por um decréscimo contínuo da taxa de absorção até começar atingir um platô, corroborando com o comportamento de absorção esperado [161-164, 105].

Da mesma forma do que foi observado para o compósito de fibra de vidro, os valores obtidos para todas as amostras ensaiadas ficaram próximos, indicando homogeneidade do material fabricado e do processo de difusão, tabela 8. Para o corpo de prova L2 a tendência a estabilizar o ganho de massa percentual também ocorreu em, aproximadamente, 1431 horas. Observou-se também que nas primeiras 46 horas o compósito teve incremento de massa de 4,85% e na primeira semana (161 horas) o compósito absorveu, aproximadamente, 7,46%. Valores próximos a esses também foram determinados para o corpo de prova L3. Nas primeiras 46 horas o compósito teve incremento de massa de 7,49% e na primeira semana (161 horas) o compósito absorveu cerca de 12,37% e a mesma tendência de estabilização o ganho de massa percentual em, aproximadamente, 1,9 meses (1431 horas).

Os valores determinados para o corpo de prova L3 ficaram próximos, mas um pouco acima dos valores iniciais determinados para L1 e L2. Isso pode ter ocorrido pela maior exposição de fibras nas superfícies laterais do corpo de prova. Esse controle não foi realizado, mas devido ao fato das fibras serem hidrofílicas, a

maior exposição de extremidades de fibras nas laterais dos corpos de prova pode tanto acelerar a absorção de água, quanto aumentar o teor de água absorvido.

Os valores ajustados para o coeficiente de difusão (D) na literatura variam entre $2,07 \times 10^{-6} \text{mm}^2/\text{s}$ a $21,00 \times 10^{-6} \text{mm}^2/\text{s}$ sendo condizentes com os valores encontrados nesse trabalho [105, 161-163,165, 166-167].

Os trabalhos de absorção em água destilada a temperatura ambiente de compósitos poliméricos reforçados com fibra de luffa apresentam valores de absorção máxima entre 12% e 19% [105, 161-163,165, 166-167]. Os corpos de prova analisados nesse trabalho apresentaram absorção máxima de 19,25%, 18,31% e 24,24%, corroborando com os valores encontrados na literatura.

4.1.1.3. Híbrido

Novamente, os resultados referentes as massas absorvidas por cada corpo de prova do compósito híbrido (H1, H2 e H3) estão apresentados no Apêndice A, juntamente com as respectivas curvas de ganho de massa por absorção de umidade ao longo do tempo, ajustadas usando a equação 15. A Figura 34 mostra um exemplo dos dados experimentais obtidos e ajustados.

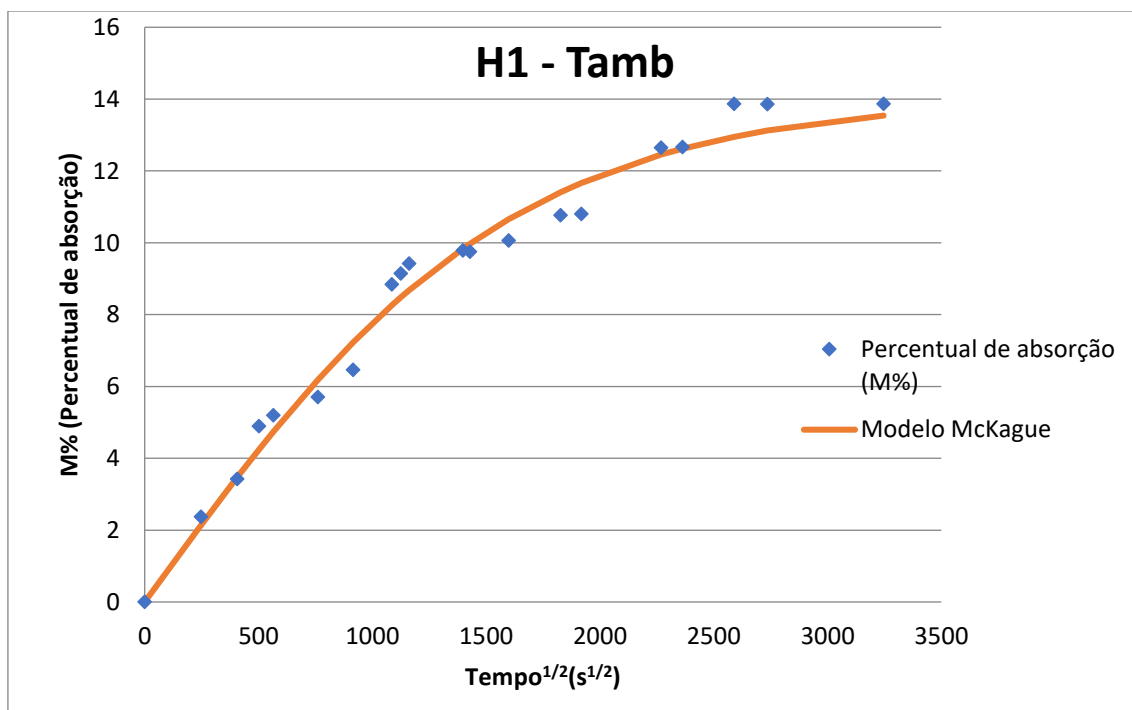


Figura 34 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra H1 envelhecida em temperatura ambiente.

Os parâmetros obtidos pelo ajuste da equação 15 aos pontos experimentais estão apresentados na tabela 12 e, de modo semelhante ao que já foi comentado, ao se analisar a tabela 12, é possível observar que os coeficientes de correlação obtidos indicam que os pontos experimentais aderem bem ao modelo proposto por McKague. Ou seja, todos os compósitos analisados nesse trabalho seguiram o comportamento fickiano. De fato, analisando o comportamento da curva de absorção da Figura 34, observa-se um comportamento inicial linear até, aproximadamente, 7,0%, seguido por um decréscimo contínuo da taxa de absorção até começar a atingir um platô, conforme previsto pelo modelo fickiano.

Tabela 12 - Parâmetros de absorção para os compósitos híbrido envelhecidos em temperatura ambiente.

Compósito	M_{∞} (%)	D ($10^{-6}\text{mm}^2/\text{s}$)	r^2
H1	13,86	1,90	0,9808
H2	12,01	1,23	0,9737
H3	11,85	1,27	0,9806
Média	$12,57 \pm 0,912$	$1,46 \pm 1,46$	-

Para o corpo de prova H1, nas primeiras 46 horas, houve incremento de massa de 3,42%. Na primeira semana (161 horas) o compósito absorveu, aproximadamente, 5,70%.

Segundo a literatura o tempo médio para saturação de compósitos híbridos (fibra de vidro/fibra lignocelulósica) ocorre entre 1 e 5 meses [15, 168-171]. É possível ver que, para a amostra H1, está começando a haver estabilização do ganho de massa em 2,5 meses, corroborando com os trabalhos encontrados na literatura. É preciso destacar, entretanto, que valores diferentes tanto em termos do valor de saturação quanto ao tempo de estabilização da absorção poderiam ser esperados quando se empregam fibras lignocelulósicas diferentes nos compósitos híbridos. Silva [15] achou, aproximadamente, 11% de incremento de massa e tempo de saturação entre 3,47 e 4,16 meses para compósitos híbridos coco/vidro. Além disso, o autor também achou incremento de massa de 6% e saturação a partir de 1,38 meses para compósito híbrido de sisal/vidro.

Conforme observado na Tabela 12, o comportamento dos corpos de prova do compósito híbrido foi semelhante. Para a amostra H2 é possível observar que o

valor máximo de absorção foi de 12,00% e nas primeiras 46 horas houve incremento de massa de 2,88%. Na primeira semana (161 horas) o corpo de prova H2 absorveu, aproximadamente, 4,32%. A amostra H2 também apresentou tendência a estabilizar o ganho de massa percentual em, aproximadamente, 2,5 meses (1863 horas, 2589 s^{1/2}). Para a amostra H3 houve incremento de massa de 2,65% e de 4,59%, respectivamente, para as primeiras 46 horas e após a primeira semana (161 horas). Os valores obtidos por H3 ficaram bem próximos dos valores obtidos por H1 e H2, mostrando assim uma uniformidade na fabricação dos compósitos. A amostra H3 apresentou tendência a estabilizar o ganho de massa percentual em, aproximadamente, 2,15 meses (1551 horas) ficando um pouco abaixo de H1 e H2.

É preciso destacar ainda que ao se analisar a curva de absorção para o compósito híbrido mostrada na Figura 34, e compará-la com as curvas de absorção dos compósitos de fibra de vidro (figura 32) e de luffa (figura 33) percebe-se que o platô de saturação ainda não foi alcançado, diferente do que foi observado para os compósitos com uma única fibra. Esse comportamento indica, claramente, o efeito das camadas de fibra de vidro, no sentido de retardar o processo de difusão.

Os trabalhos que analisam a absorção de água destilada a temperatura ambiente de compósitos poliméricos híbridos (fibra de vidro/fibra lignocelulósica) apresentam valores de absorção máximo entre 6,00% e 16,00% [15, 168-171]. Conforme já destacado anteriormente, diversos fatores podem afetar esse valor, tais como o tipo de fibra empregado, a razão fibra de vidro/fibra lignocelulósica empregada e, ainda, a fração volumétrica de fibras no compósito. Entretanto, é possível comparar a ordem de grandeza dos valores obtidos nesse trabalho com os reportados na literatura e, conforme mostrado na tabela 12, os compósitos híbridos H1, H2 e H3 apresentaram absorção máxima de 13,86%, 12,00% e 11,83%, corroborando com os dados da literatura.

4.1.1.4. Comparação entre os compósitos

A figura 35 mostra um gráfico comparativo entre os três tipos de compósitos, apresentando as curvas de % de incremento de massa x horas. As curvas foram traçadas a partir da média dos resultados de absorção de cada compósito. As curvas indicam uma diminuição contínua na taxa de absorção (determinada pela inclinação da curva), levando à estabilização (saturação). O tempo necessário para atingir a saturação varia de acordo com o tipo de compósito

e, ao se analisar o gráfico, é possível observar que o compósito de luffa absorveu mais água quando comparado com os compósitos híbridos e com os de fibra de vidro, conforme esperado e descrito na literatura [15, 155-156].

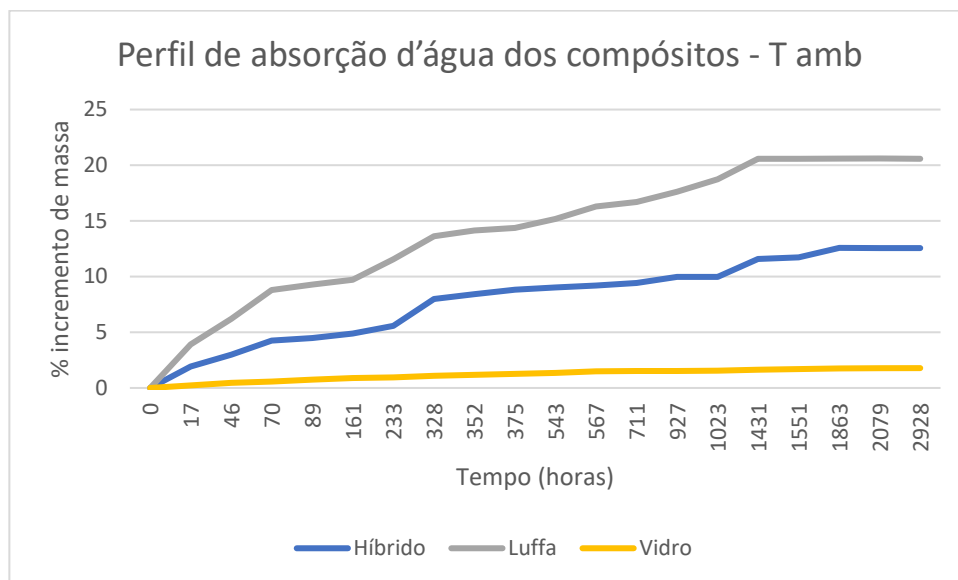


Figura 35 - Curvas de %incremento de massa x hora dos compósitos de fibra de vidro, luffa e híbrido.

Destaca-se que, em termos de proteção quanto a absorção de umidade, a hibridização foi bem sucedida, visto que os compósitos híbridos apresentaram menor porcentagem de absorção quando comparados com os compósitos de luffa. Os compósitos híbridos tiveram média de absorção máxima de 12,56% enquanto os compósitos de luffa tiveram 20,59%. Isso ocorre, pois a fibra de vidro adicionada nas camadas externas protege as fibras naturais (camadas internas) de um contato direto com a água.

Esse comportamento pode vir a causar menor inchamento dos compósitos híbridos, devido a absorção de água, em relação aos de luffa e, portanto, aumentar a estabilidade dimensional desses compósitos híbridos. Em diversas aplicações de compósitos com fibras lignocelulósicas, tais como em painéis, a estabilidade dimensional é um fator relevante.

4.1.2. Comportamento à temperatura de 60°C

A seguir serão analisados os compósitos de matriz epóxi reforçados com fibra de vidro, luffa e híbrido (vidro/luffa) envelhecidos em água destilada a temperatura de 60°C.

Será feito o mesmo procedimento de apresentar apenas uma figura no texto e colocar todos os resultados no Apêndice.

4.1.2.1. Fibra de Vidro

Os resultados referentes as massas absorvidas por cada corpo de prova do compósito de fibra de vidro (V1, V2 e V3) estão apresentados no Apêndice B, juntamente com as respectivas curvas de ganho de massa por absorção de umidade ao longo do tempo, ajustadas usando a equação 15. A Figura 36 mostra um exemplo dos dados experimentais obtidos e ajustados.

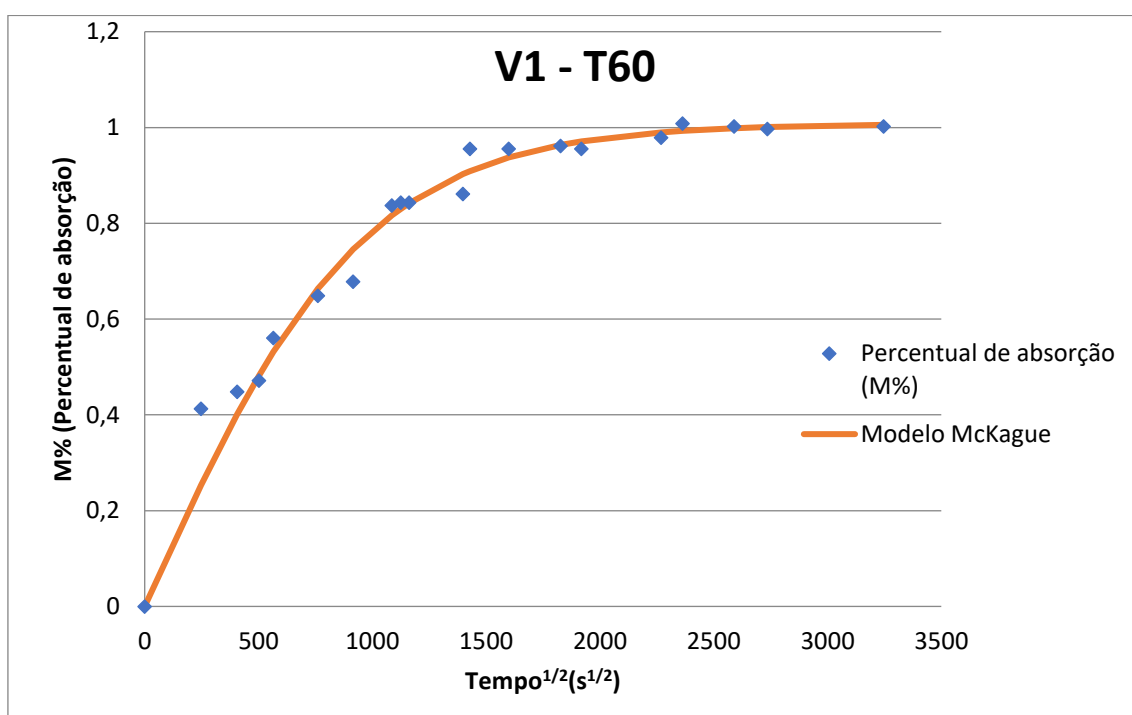


Figura 36 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra V1 envelhecida em temperatura de 60 graus.

Os parâmetros de absorção obtidos para os compósitos de fibra de vidro imersos na temperatura de 60 °C estão apresentados na tabela 13. Ao analisar a tabela 13, é possível observar que os coeficientes de correlação obtidos indicam que os pontos experimentais aderem bem ao modelo de McKague.

Tabela 13 - Parâmetros de absorção para os compósitos de fibra de vidro envelhecidos em temperatura de 60 °C.

Compósito	M_{∞} (%)	D ($10^{-6}\text{mm}^2/\text{s}$)	r^2
V1	1,00	2,16	0,9723
V2	1,16	1,78	0,9666
V3	1,41	1,23	0,9797
Média	$1,19 \pm 0,17$	$1,72 \pm 0,38$	-

Analizando os dados experimentais mostrados na Figura 36 pode-se destacar que nas primeiras 46 horas ($406 \text{ s}^{1/2}$) o compósito teve incremento de massa de 0,44% e que na primeira semana (161 horas ou $761 \text{ s}^{1/2}$) o compósito absorveu, aproximadamente, 0,64%.

Geralmente, os compósitos de fibra de vidro têm uma rápida absorção inicial de água, o que resulta em um aumento significativo de massa nas primeiras horas de exposição. Além disso, vale ressaltar que a absorção de umidade em temperaturas elevadas pode aumentar a velocidade de absorção do compósito. A exposição a altas temperaturas pode levar à degradação das resinas que mantêm as fibras de vidro unidas no compósito, tornando-o mais suscetível à absorção de água. É importante destacar que o aumento da temperatura aumenta a energia cinética das moléculas de água, permitindo que elas se movam mais facilmente através dos poros do material e penetrem mais profundamente na estrutura do compósito de fibra de vidro. No entanto, se o compósito for mantido saturado com água por tempo suficiente, a quantidade de água absorvida pelo material atingirá um estado de equilíbrio, independentemente da temperatura de envelhecimento. [13, 17, 65].

Segundo a literatura o tempo médio para saturação de compósitos de fibra de vidro envelhecido em temperatura elevada ocorre entre 1,25 e 2,22 meses. É possível ver que o compósito está começando a estabilizar o seu ganho de massa com 1551 horas ($2363 \text{ s}^{1/2}$), ou seja, 2,15 meses [13, 172-174].

Analizando a curva de absorção da Figura 36, observa-se que a curva apresenta comportamento inicial linear até, aproximadamente 0,60%, seguido por um decréscimo contínuo da taxa de absorção até começar a atingir um platô, significando que o material atingirá a saturação, corroborando com o comportamento descrito na literatura [13, 172-174].

Conforme mostrado na tabela 13, os valores obtidos para todas as amostras ensaiadas ficaram próximos, indicando homogeneidade do material fabricado e do processo de difusão para o compósito de fibra de vidro. Para o corpo de prova V2 e V3 a tendência a estabilizar o ganho de massa percentual também ocorreu em, aproximadamente, 1551 horas. Observou-se também que nas primeiras 46 horas o compósito teve incremento de massa de 0,45% e na primeira semana (161 horas) o compósito absorveu, aproximadamente, 0,65%. Valores próximos a esses também foram determinados para o corpo de prova V3. Nas primeiras 46 horas o compósito teve incremento de massa de 0,57% e na primeira semana (161 horas) o compósito absorveu cerca de 0,75%.

Os valores ajustados para o coeficiente de difusão (D) e para o valor de saturação (M_{∞}) apresentados na Tabela 13 são condizentes com os valores reportados na literatura. Diversos trabalhos de absorção em água destilada à temperatura elevada de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro apresentaram valores de absorção entre 0,42% e 1,5% [13,173,175,176]. Entretanto, alguns trabalhos relataram absorção de 4,5% e 8,0% [172,174]. Fatores como o tipo da matriz polimérica e a fração de fibras podem causar essa diferença de valores reportados na literatura.

4.1.2.2. Fibra de Luffa

Os resultados referentes as massas absorvidas por cada corpo de prova do compósito de fibra de luffa (L1, L2 e L3) estão apresentados no Apêndice B, juntamente com as respectivas curvas de ganho de massa por absorção de umidade ao longo do tempo, ajustadas usando a equação 15. A Figura 37 mostra um exemplo dos dados experimentais obtidos e ajustados.

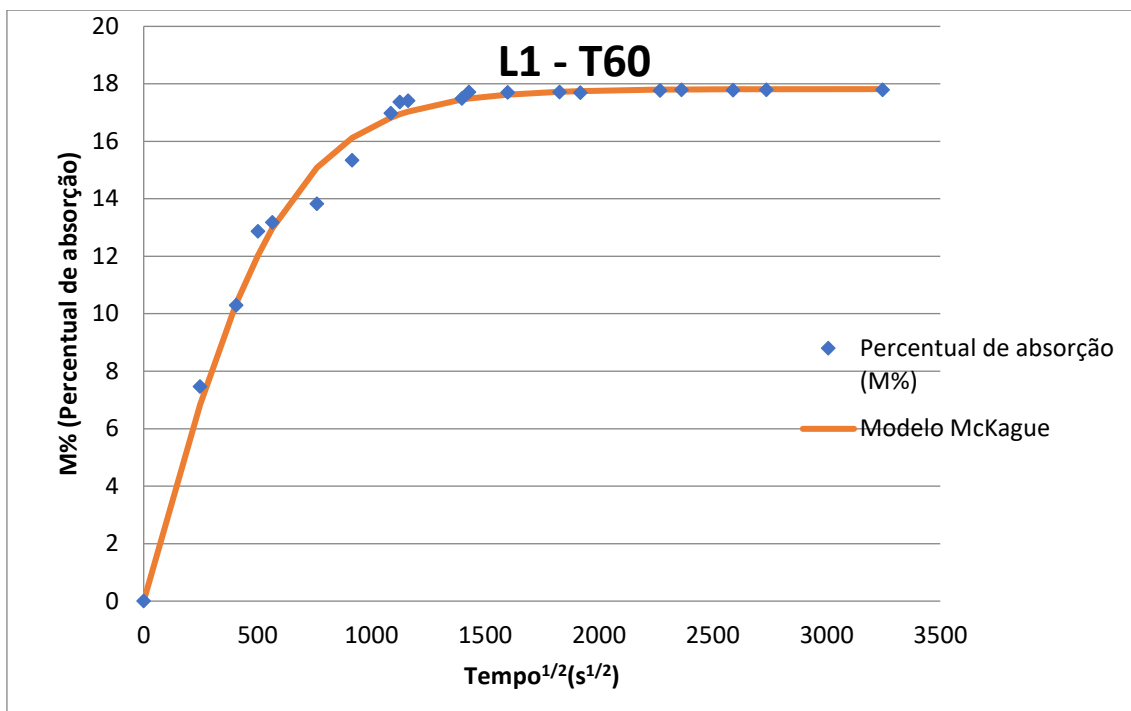


Figura 37 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra L1 envelhecida em temperatura de 60 graus.

Os parâmetros de absorção obtidos para os compósitos de fibra de luffa à temperatura de 60 estão listados na tabela 5. Pode-se observar que os coeficientes de correlação obtidos indicam que os pontos experimentais aderem bem ao modelo de McKague.

Tabela 14 - Parâmetros de absorção para os compósitos de fibra de luffa envelhecidos em temperatura de 60 graus.

Compósito	M_{∞} (%)	D ($10^{-6} \text{mm}^2/\text{s}$)	r^2
L1	17,79	15,3	0,9906
L2	20,43	9,66	0,9935
L3	19,46	6,04	0,9950
Média	$19,22 \pm 1,09$	$10,33 \pm 3,81$	-

O comportamento geral observado para o compósito de fibra de luffa foi semelhante ao apresentado para o compósito de fibra de vidro (Figura 37 vs. Figura 36). Porém, como esperado, os valores de absorção foram bastante superiores quando se analisam os dados para os compósitos de luffa.

Analisando-se a curva de absorção para o corpo de prova L1 (Figura 37) é possível observar que o valor máximo de absorção foi de 17,79%. Destaca-se também que nas primeiras 46 horas ($406 \text{ s}^{1/2}$) o compósito teve incremento de massa de 10,29%. Na primeira semana (161 horas, $761 \text{ s}^{1/2}$) o compósito absorveu, aproximadamente, 13,82%.

Segundo a literatura o tempo médio para saturação de compósitos de fibra vegetal envelhecida a temperatura elevada (acima da temperatura ambiente) ocorre entre 8 e 39 dias [193-196]. Na Figura 2, é possível ver que o compósito está começando a estabilizar o seu ganho de massa em 59 dias (1431 horas, $2269 \text{ s}^{1/2}$). Essa diferença no tempo de saturação pode ser explicada por diversos fatores, tais como o tipo de matriz polimérica, a fração volumétrica de fibras, a temperatura de envelhecimento e, possivelmente também, pela própria espessura das amostras. Nesse trabalho a espessuras das amostras foi superior a 5 mm e os trabalhos da literatura que possuem tempo mais curto de saturação, possuíam amostras de 3 mm e que foram envelhecidas a 70°C. É visto na literatura que a 70 °C há aceleração do processo de absorção de água, fazendo com que o material atinja o platô na curva mais rapidamente.

A partir da curva de absorção mostrada na Figura 37, observa-se que há um comportamento inicial linear até, aproximadamente, 13%, seguido por um decréscimo contínuo da taxa de absorção até começar atingir um platô, corroborando com o comportamento de absorção esperado [103, 162, 177].

Assim como observado no compósito de fibra de vidro, os valores obtidos em todas as amostras testadas foram similares, o que indica a homogeneidade do material produzido e do processo de difusão, conforme apresentado na tabela 14. No caso do corpo de prova L2, a estabilização do ganho de massa percentual também ocorreu em cerca de 1431 horas. Observou-se também que nas primeiras 46 horas o compósito teve incremento de massa de 10,29% e na primeira semana (161 horas) o compósito absorveu, aproximadamente, 13,82%. Valores próximos a esses também foram determinados para o corpo de prova L3. Nas primeiras 46 horas o compósito teve incremento de massa de 8,47% e na primeira semana (161 horas) o compósito absorveu cerca de 13,47% e apresentou a mesma tendência de estabilização do ganho de massa percentual em, aproximadamente, 59 dias (1431 horas).

Os valores ajustados para o coeficiente de difusão (D) na literatura variam entre $2,77 \cdot 10^{-6} \text{mm}^2/\text{s}$ a $21,00 \cdot 10^{-6} \text{mm}^2$ [162,177] sendo condizentes com os valores encontrados nesse trabalho.

Os trabalhos de absorção em água destilada a temperatura ambiente de compósitos poliméricos reforçados com fibra de luffa apresentam valores de absorção máxima entre 12% e 18% [103, 162, 177]. Os corpos de prova analisados nesse trabalho apresentaram absorção máxima de 17,79%, 20,43% e 19,47%, corroborando com os valores encontrados na literatura.

4.1.2.3. Compósito Híbrido

Os resultados das massas absorvidas por cada corpo de prova do compósito híbrido (H1, H2 e H3) foram novamente apresentados no Apêndice B, juntamente com as curvas correspondentes de ganho de massa por absorção de umidade ao longo do tempo, que foram ajustadas utilizando a equação 15. Um exemplo dos dados experimentais obtidos e ajustados é mostrado na Figura 38.

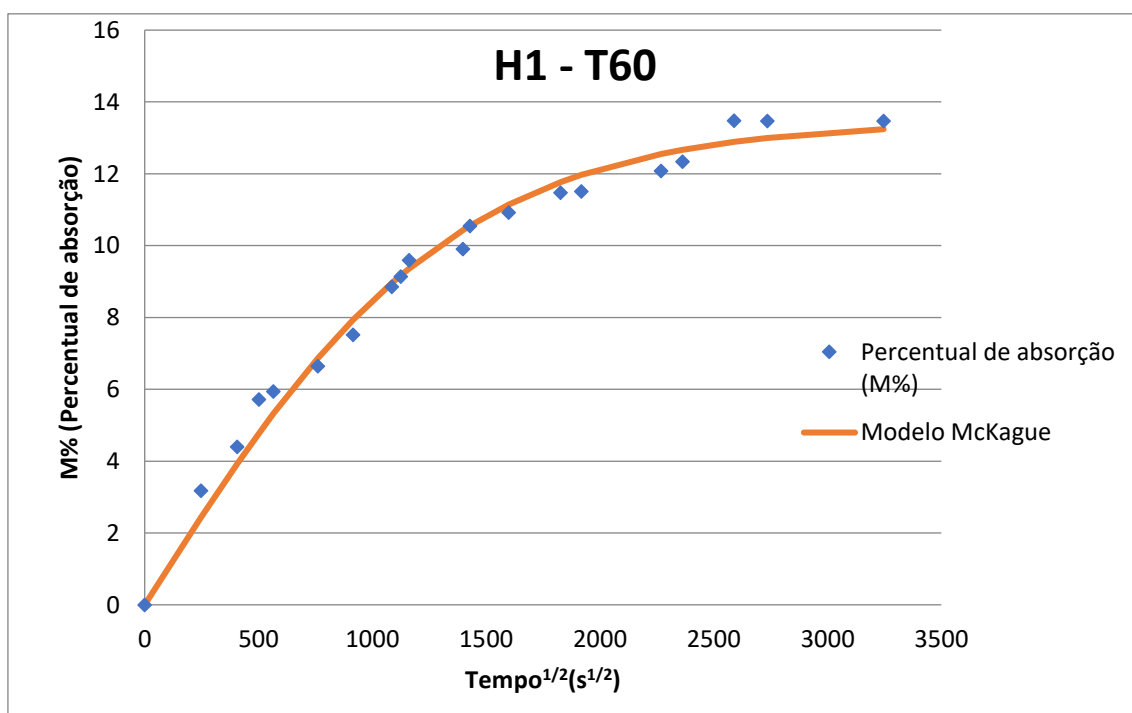


Figura 38 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra H1 envelhecida em temperatura 60 graus.

Os parâmetros resultantes do ajuste da equação 15 aos pontos experimentais estão listados na tabela 15. De maneira similar ao que já foi mencionado, ao

examinar a tabela 15, pode-se perceber que os coeficientes de correlação obtidos sugerem uma boa aderência dos pontos experimentais ao modelo proposto por McKague. Ou seja, todos os compósitos analisados nesse trabalho seguiram o comportamento fickiano. De fato, analisando o comportamento da curva de absorção da Figura 38, observa-se um comportamento inicial linear até, aproximadamente, 8,0%, seguido por um decréscimo contínuo da taxa de absorção até começar a atingir um platô, conforme previsto pelo modelo fickiano.

Tabela 15 - Parâmetros de absorção para os compósitos híbrido envelhecidos em temperatura de 60 graus.

Compósito	M_{∞} (%)	D (10^{-6} mm ² /s)	r^2
H1	13,47	2,54	0,9851
H2	14,35	2,54	0,9801
H3	17,26	3,89	0,9801
Média	$15,02 \pm 1,62$	$2,99 \pm 0,63$	-

Para o corpo de prova H1, nas primeiras 46 horas, houve incremento de massa de 4,39%. Na primeira semana (161 horas) o compósito absorveu, aproximadamente, 6,64%, tendo absorção máxima de 13,47%.

Segundo a literatura o tempo médio para saturação de compósitos híbridos (fibra de vidro/fibra lignocelulósica) envelhecido em temperaturas acima da temperatura ambiente ocorre entre 1 e 3,5 meses [178-179]. Os corpos de prova do compósito híbrido envelhecidos a 60°C (H1 e H2) começaram a estabilizar o ganho de massa em 2,5 meses. Já o corpo de prova H3 começou a estabilizar seu ganho de massa em, aproximadamente, 2,15 meses, corroborando com a literatura.

No entanto, é importante ressaltar que ao utilizar diferentes tipos de fibras lignocelulósicas em compósitos híbridos envelhecidos em temperaturas elevadas, é possível observar valores distintos tanto em relação ao ponto de saturação quanto ao tempo necessário para a absorção se estabilizar. Liaob [178] achou, aproximadamente, tempo de saturação entre 2,2 e 3,5 meses para compósitos híbridos bambu/vidro a 70°C. Já Sain [179], obteve aproximadamente, o tempo de 1 mês de saturação para compósitos cânhamo com 10% de fibra de vidro envelhecidos a 40°C e 60°C.

Conforme observado na Tabela 15, o comportamento dos corpos de prova do compósito híbrido foi semelhante. Para a amostra H2 é possível observar que o valor máximo de absorção foi de 14,35% e nas primeiras 46 horas houve incremento de massa de 4,63%. Na primeira semana (161 horas) o corpo de prova H2 absorveu, aproximadamente, 7,16%. A amostra H2 também apresentou tendência a estabilizar o ganho de massa percentual em, aproximadamente, 2,5 meses (1863 horas, 2589 s^{1/2}). Para a amostra H3 houve incremento de massa de 6,62% e de 9,4%, respectivamente, para as primeiras 46 horas e após a primeira semana (161 horas). Os valores obtidos por H3 ficaram bem próximos dos valores obtidos por H1 e H2, mostrando assim, novamente, uma uniformidade na fabricação dos compósitos. A amostra H3 apresentou tendência a estabilizar o ganho de massa percentual em, aproximadamente, 2,15 meses (1551 horas) ficando um pouco abaixo de H1 e H2.

Ao analisar a curva de absorção do compósito híbrido mostrada na Figura 34 e compará-la com as curvas de absorção dos compósitos de fibra de vidro (Figura 36) e de luffa (Figura 37), é importante ressaltar que o platô de saturação ainda não foi alcançado, assim como, a curva de absorção do compósito híbrido envelhecido a temperatura ambiente. Isso é diferente do que foi observado para os compósitos com uma única fibra. Esse comportamento indica claramente o efeito das camadas de fibra de vidro, que atuam no sentido de retardar o processo de difusão da água. Essa observação sugere que a presença das camadas de fibra de vidro pode influenciar significativamente a absorção de água no compósito híbrido, criando um efeito de barreira que dificulta a penetração da água, mesmo em temperatura mais elevada.

Os trabalhos que analisam a absorção de água destilada a temperatura acima da temperatura ambiente em compósitos poliméricos híbridos (fibra de vidro/fibra lignocelulósica) apresentam valores de absorção máximo entre 3,5% e 11,00% [178-180]. Como já mencionado anteriormente, existem vários fatores que podem influenciar esse valor, incluindo o tipo de fibra utilizado, a proporção de fibra de vidro para a de fibra lignocelulósica e a fração volumétrica de fibras no compósito. No entanto, é possível fazer uma comparação aproximada dos valores obtidos neste estudo com aqueles relatados na literatura e, conforme mostrado na tabela 15, os corpos de prova do compósito híbrido aqui analisado (H1, H2 e H3) apresentaram absorção máxima de 13,47%, 14,35% e 17,26%, corroborando com os dados da literatura.

4.1.2.4. Comparação entre os compósitos

A figura 39 mostra um gráfico comparativo de absorção entre os três tipos de compósitos envelhecidos a 60°C, apresentando as curvas de % de incremento de massa x horas. As curvas foram obtidas a partir da média dos resultados de absorção de cada compósito, revelando uma redução contínua na taxa de absorção ao longo do tempo (indicada pela inclinação da curva), seguida de estabilização (saturação). O período necessário para alcançar a saturação varia em função do tipo de compósito. A análise do gráfico revela que, como previsto e descrito na literatura, a luffa absorveu mais água do que os compósitos híbridos e de fibra de vidro [15, 103, 162, 155-156, 177].

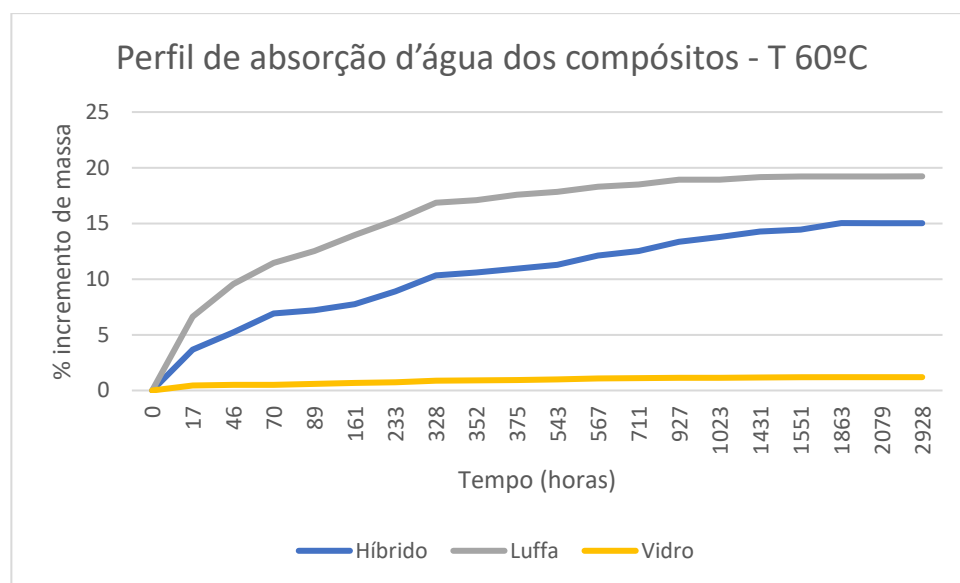


Figura 39 - Curvas de % incremento de massa x hora dos compósitos de fibra de vidro, luffa e híbrido envelhecidos a 60°C.

Assim como observado nos compósitos envelhecidos à temperatura ambiente, é importante ressaltar que a hibridização foi bem sucedida em termos de proteção contra a absorção de umidade, uma vez que os compósitos híbridos exibiram uma menor taxa de absorção em comparação com os compostos de luffa. Os compósitos híbridos apresentaram uma média de absorção máxima de 15,01%, enquanto os compostos de luffa apresentaram 19,22%. Essa redução ocorreu porque

a adição de fibras de vidro nas camadas externas proporcionou proteção às fibras naturais (camadas internas), evitando o contato direto com a água.

Quando o comportamento dos compósitos é avaliado em relação à temperatura, vê-se que os compósitos com fibra de vidro envelhecidos na temperatura de 60°C absorvem mais água nas primeiras horas (Figura 40) e logo após são passados pelos compósitos envelhecidos a temperatura ambiente. O fato dos compósitos envelhecidos a temperatura ambiente absorverem mais água quando comparados com os compósitos envelhecidos a 60°C. A hipótese para esse comportamento está associada a um possível processo de dessorção devido a evaporação. Essa hipótese, entretanto, deve ser investigada. Outra possibilidade é de que o processo de secagem das amostras levou a um erro experimental, tendo em vista que os valores absorvidos são pequenos, mesmo em tempos de envelhecimento maiores.

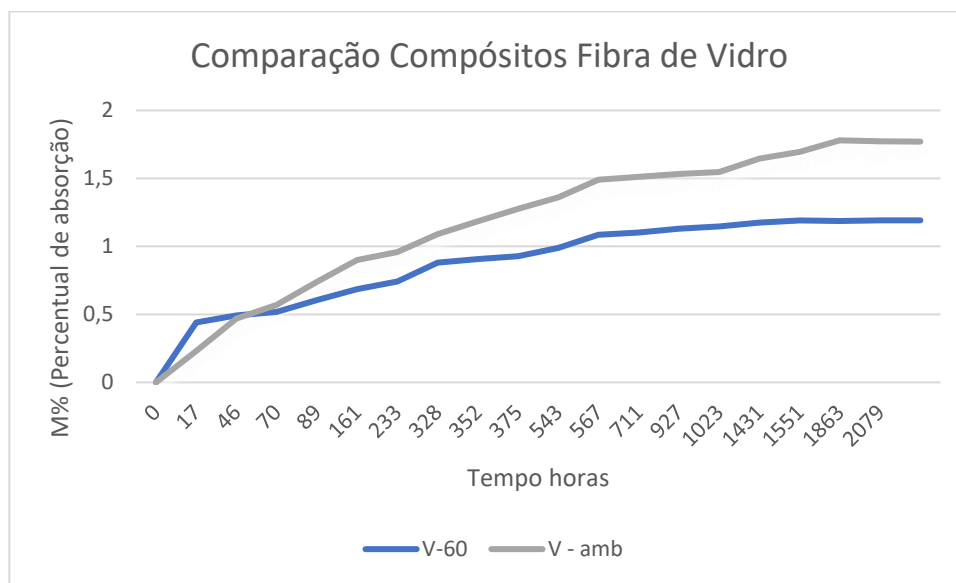


Figura 40 - Curvas de %incremento de massa x hora dos compósitos de fibra de vidro envelhecidos a temperatura ambiente e a 60°C

Quando comparados, os compósitos de luffa (Figura 41) e os compósitos híbridos (Figura 42) apresentam o comportamento esperado, tendo uma maior absorção de água inicialmente quando submetidos a temperatura de 60°C e se estabilizando próximo ao envelhecido a temperatura ambiente na saturação.

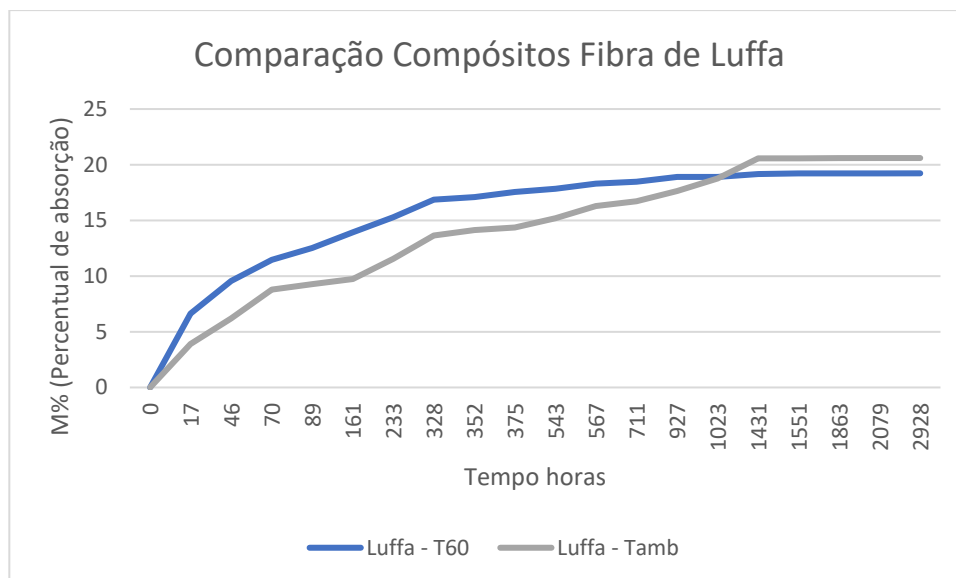


Figura 41 - Curvas de %incremento de massa x hora dos compósitos de fibra de luffa envelhecidos a temperatura ambiente e a 60°C.

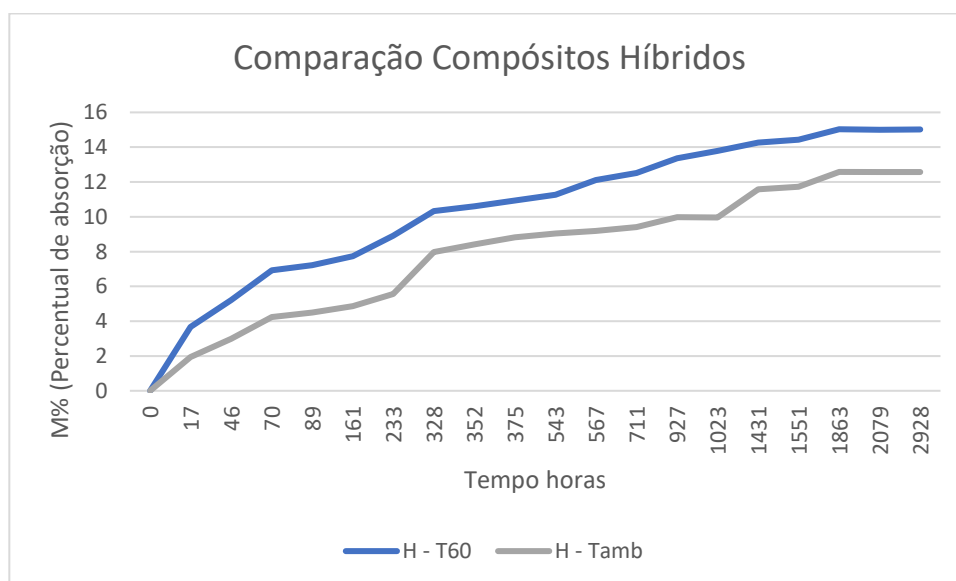


Figura 42 - Curvas de %incremento de massa x hora dos compósitos de fibra de híbridos envelhecidos a temperatura ambiente e a 60°C.

4.2. Ensaio de Impacto

4.2.1. Ensaio de impacto antes do envelhecimento

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy antes do envelhecimento.

Na tabela 16 está apresentada a resistência ao impacto em kJ/m² dos compósitos reforçados com fibra de vidro. A área da seção resistente de cada corpo de prova (largura vs. espessura) também está listada na tabela. É possível ver que os valores de resistência ao impacto variam entre 53,99 kJ/m² e 76,54 kJ/m². Além disso, foi calculada a média e a mediana, cujos valores são, respectivamente, 63,64 kJ/m² e 63,40 kJ/m².

Tabela 16 - Resistência ao impacto do compósito de fibra de vidro.

Compósito Fibra de vidro antes do envelhecimento			
Amostra	Energia de Impacto (10⁻³kJ)	Área da seção resistente (L x e) 10⁻⁶m²	Resistência ao Impacto (kJ/m²)
1	5,29	75,85	69,74
2	5,22	90,21	57,86
3	5,16	92,40	55,84
4	5,45	79,20	68,81
5	4,79	88,70	53,99
6	4,66	81,12	57,45
7	5,32	83,91	63,40
8	5,75	83,16	69,14
9	5,69	74,34	76,54
Média	5,25	83,21	63,64
Desvio Padrão	0,38	6,29	7,79

Nas Figuras 43 e 44 é possível ver que a variação de valores de resistência ao impacto não é grande. A Figura 43 mostra os resultados individuais de cada ensaio, apenas para ilustrar que o espalhamento dos resultados não foi elevado, o que indica homogeneidade do material fabricado e também dos mecanismos de falha.

Na Figura 44, foi utilizado um gráfico do tipo *box-plot*, que possibilita uma análise estatística dos resultados e permite avaliar a variação dos mesmos. É possível observar que a média e a mediana apresentaram valores de, aproximadamente, 63 kJ/m², conforme já referido anteriormente. Além disso, o fato do segundo quartil dividir a caixa ao meio mostra que os dados possuem uma distribuição simétrica.

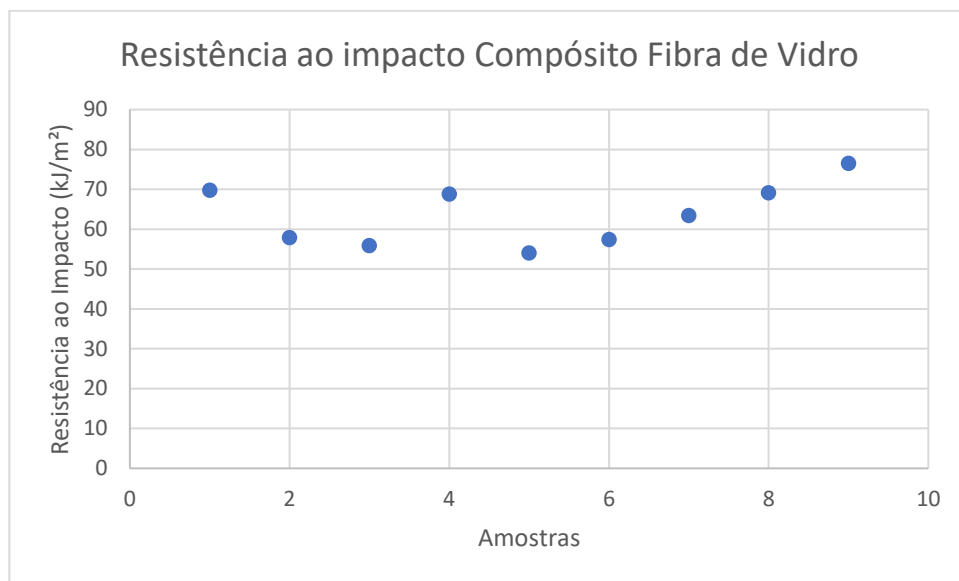


Figura 43 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto dos compósitos de fibra de vidro não envelhecidos.

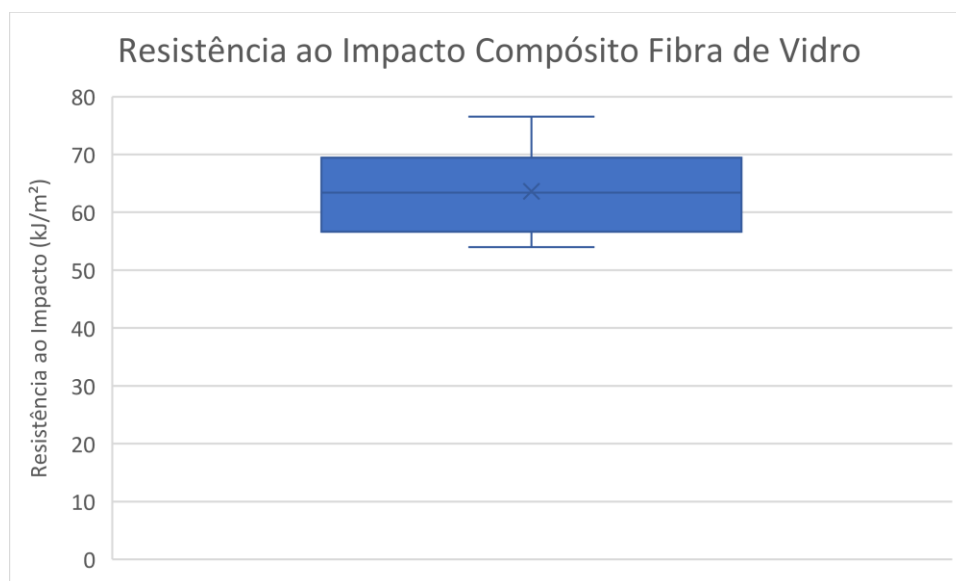


Figura 44 - Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos de fibra de vidro não envelhecidos.

A literatura apresenta valores de resistência ao impacto (U_0) em compósitos epóxi reforçado com fibra de vidro que variam muito. Essa variação se dá por diversos fatores como: distribuição e tamanho das fibras, processo de fabricação do compósito, quantidade de camadas de fibras, quantidade de defeitos, porcentagem de fibra (V_f), dentre outras características. Na tabela 17 são apresentadas

resistências ao impacto encontradas em diversos trabalhos com matriz epóxi [115 - 118].

Tabela 17 - Resistência ao impacto compósito fibra de vidro encontrados na literatura.

Fabricação	V_f	U_o (kJ/m²)	Referência
<i>Lay-up</i> manual	-	129,00	115
<i>Prepregs</i>	53%	400,00	116
Prensagem e cura à vácuo	50%	319	117
<i>Lay-up</i> manual	-	98,57	118

Ao comparar os resultados experimentais obtidos na Tabela 16 com os dados encontrados na Tabela 17 da literatura, pode-se observar que os valores de resistência ao impacto (U_o) obtidos nesse trabalho encontram-se dentro do esperado. É importante destacar que os resultados da literatura apresentam uma variação grande nos valores de resistência ao impacto devido aos diversos fatores já reportados anteriormente.

Na Figura 45, é possível ver como os compósitos se comportaram perante o ensaio de impacto. Está mostrada a face oposta ao ponto de impacto. É possível ver uma área danificada de largura semelhante em todas as amostras e que nenhuma amostra rompeu completamente. Além disso, não se percebe, macroscopicamente, delaminação extensiva. Apenas nas amostras 1, 3 e 4 pode-se observar um possível começo de delaminação na borda (Figura 46). Além disso, foi possível observar que as fibras não foram rompidas e as amostras ficaram dobradas em V.

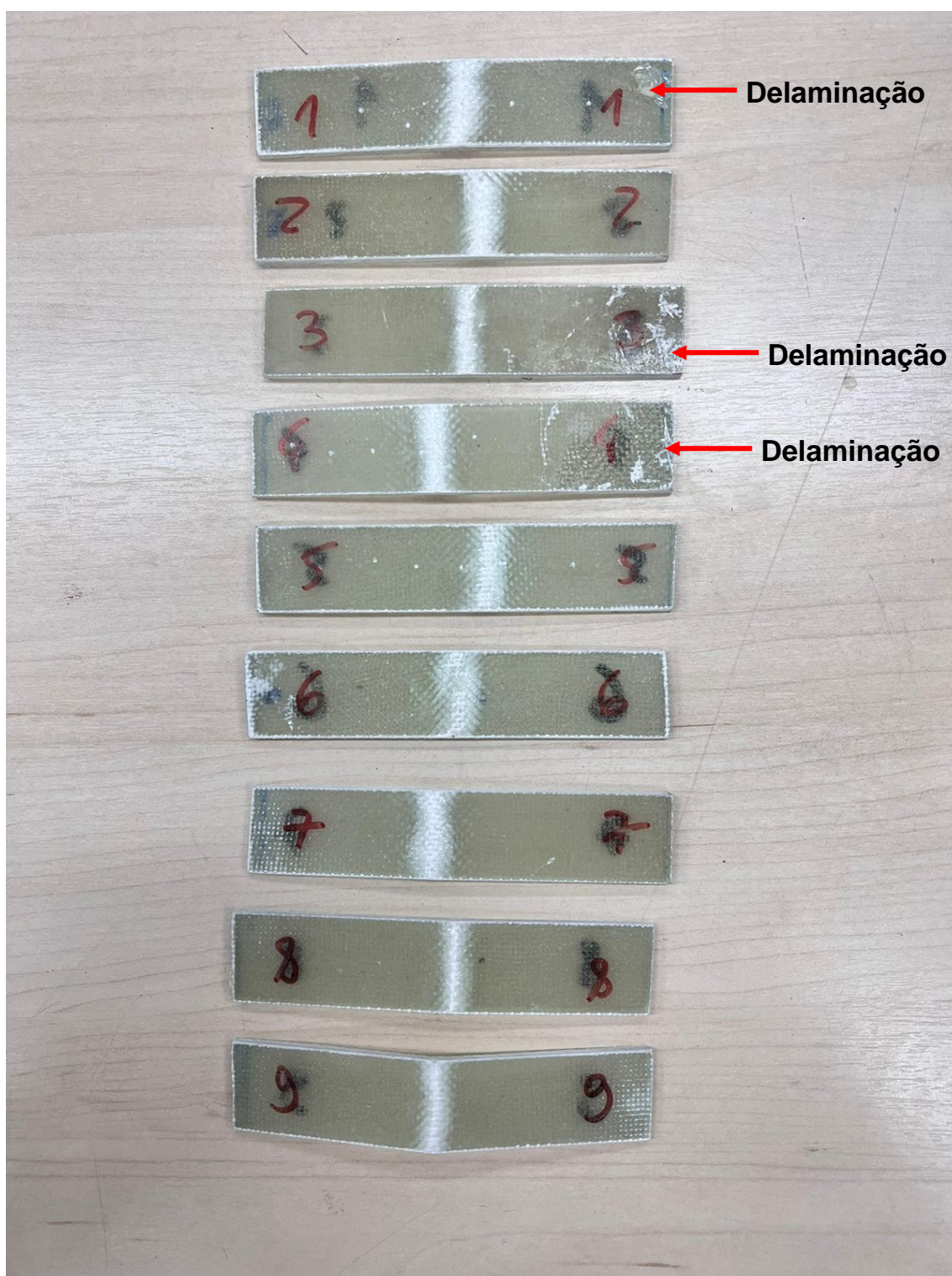


Figura 45 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de vidro após sofrerem ensaio de impacto.



Figura 46 - Corpo de prova amostra 4 mostrando possível início de delaminação em suas bordas.

A amostra 9 foi a que teve maior resistência ao impacto e ao mesmo tempo foi a que apresentou a maior curvatura após a aplicação do impacto, conforme pode ser visto na Figura 47.



Figura 47 - Amostras 9 mostrando a inclinação elevada após o ensaio de impacto.

Na tabela 18 está apresentada a resistência ao impacto em kJ/m^2 dos compósitos reforçados com fibra de *luffa*. É possível ver que os valores de

resistência ao impacto variam de 7,15 kJ/m² até 12,55 kJ/m². A média foi de 9,65 kJ/m² e a mediana foi 9,91 kJ/m².

Tabela 18 - Resistência ao impacto do compósito de fibra de luffa.

Compósito Fibra de luffa antes do envelhecimento			
Amostra	Energia de Impacto (10⁻³kJ)	Área da seção resistente (L x e) 10⁻⁶m²	Resistência ao Impacto (kJ/m²)
1	0,785	103,40	7,59
2	0,85	118,80	7,15
3	0,92	96,36	9,55
4	0,96	90,86	10,57
5	1,06	102,96	10,30
6	0,96	96,80	9,92
7	0,89	121,44	7,33
8	1,21	96,36	12,56
9	1,23	103,40	11,90
Média	0,98	103,37	9,65
Desvio Padrão	0,15	10,38	1,96

Na Figura 48, pode-se notar que houve uma diferença maior entre os valores do 1º e 2º quartil no caso da fibra de luffa em comparação com o compósito de fibra de vidro. Essa disparidade pode ser explicada pelo fato de que as fibras de luffa apresentam uma irregularidade maior do que as fibras de vidro. Na Figura 49, é possível visualizar a variação dos valores experimentais, onde se observa um maior espalhamento dos dados, como já foi observado pela Figura 48.

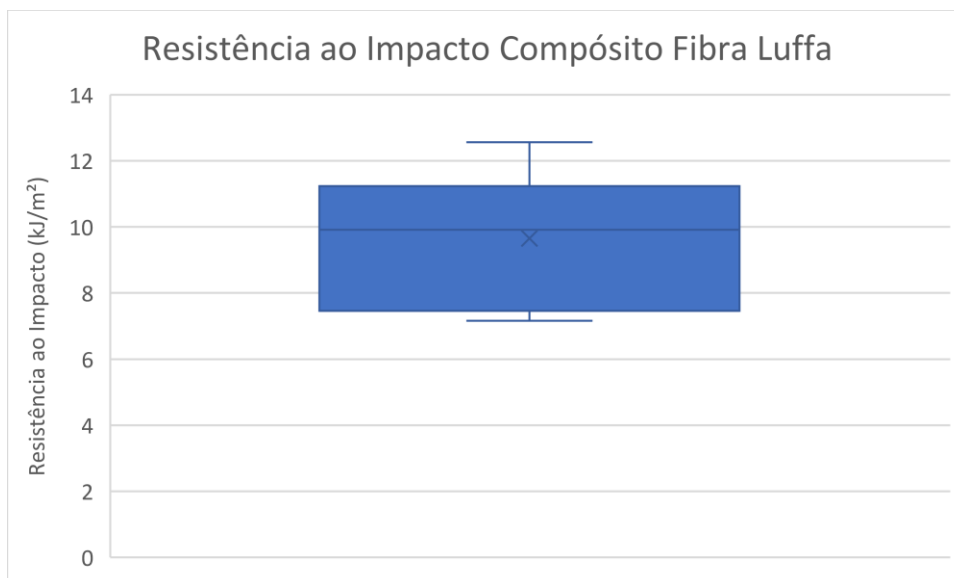


Figura 48 - Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos de fibra de luffa não envelhecidos.

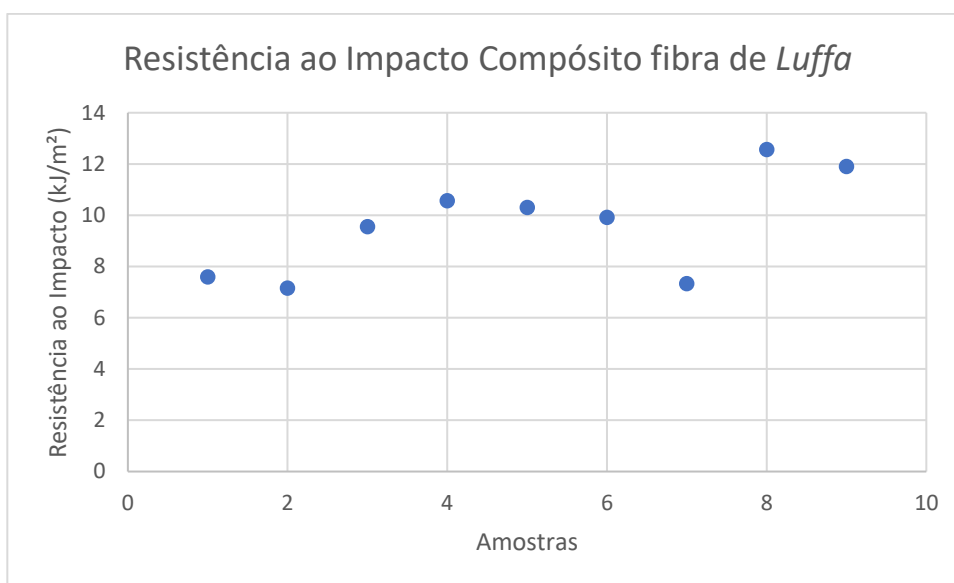


Figura 49 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto dos compósitos de fibra de luffa não envelhecidos.

Na tabela 19 é possível observar os dados de resistência ao impacto encontrados na literatura para os compósitos com matriz epóxi reforçado com fibra de *luffa* [119-121].

Tabela 19 - Resistência ao impacto compósito fibra de luffa encontrados na literatura.

Fabricação	Porcentagem de Fibra	Resistência ao Impacto (kJ/m²)	Referência
<i>Lay-up</i> manual	30%	4,5	119
<i>Lay-up</i> manual*	30%	8	119
<i>Lay-up</i> manual*	40%	19,44	120
<i>Lay-up</i> manual*	30%	27,77	120
Realizada em forno de micro-ondas*	40%	55,5	121

* fibras com tratamento alcalino

Na Figura 50, é possível ver como os compósitos de luffa se comportaram perante o ensaio de impacto. É possível ver que praticamente todas as amostras romperam, tendo apenas a amostra 6 não se rompido completamente. Além disso, apenas pela análise macroscópica, é possível analisar que as amostras de luffa apresentam resistência ao impacto mais baixa quando comparado com os compósitos de fibra de vidro já que as amostras de luffa fraturaram.

A explicação para a menor resistência ao impacto dos compósitos de fibra luffa se deve, em grande parte, à estrutura das fibras vegetais que possuem menor resistência à tração do que as fibras sintéticas (fibra de vidro). Além disso, a adesão entre a matriz e as fibras pode ser mais fraca nos compósitos de fibra vegetal, o que pode influenciar negativamente na resistência ao impacto do material [123, 181].



Figura 50 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de luffa após sofrerem ensaio de impacto.

A amostra que apresentou melhor resistência ao impacto pela análise macroscópica foi a amostra 6, pois não houve o rompimento total. Apesar disso, ao analisar a tabela 18, é possível verificar que a amostra 6 (Figura 51) apresenta resistência ao impacto de 9,92 kJ/m² ficando abaixo da amostra 8 que possui maior resistência, 12,56 kJ/m².



Figura 51 - Corpo de prova amostra 6 de luffa mostrando que foi a única amostra que não rompeu completamente.

Na tabela 20 está apresentada a resistência ao impacto em kJ/m^2 dos compósitos híbridos. É possível ver que os valores de resistência ao impacto variam entre $38,30 \text{ kJ/m}^2$ e $56,08 \text{ kJ/m}^2$. Além disso, foi calculada a média e a mediana. A média foi de $46,23 \text{ kJ/m}^2$ e a mediana foi $45,16 \text{ kJ/m}^2$.

Tabela 20 - Resistência ao impacto compósito híbrido.

Compósito Híbrido antes do envelhecimento			
Amostra	Energia de Impacto (10^{-3}kJ)	Área da seção resistente (L x e) 10^{-6}m^2	Resistência ao Impacto (kJ/m^2)
1	4,22	75,25	56,08
2	4,21	89,50	47,04
3	4,06	96,25	42,18
4	3,16	82,50	38,30
5	3,88	88,00	44,09
6	3,70	84,50	43,79
7	3,52	83,25	42,28
8	3,95	82,50	47,88
9	4,02	73,75	54,51
Média	3,85	83,94	46,23
Desvio Padrão	0,34	6,92	5,85

Na Figura 52 é possível observar que houve maior discrepância entre os valores do 2º e 3º quartil e na Figura 53, é possível visualizar também que a distribuição dos dados de resistência possui uma variação considerável.

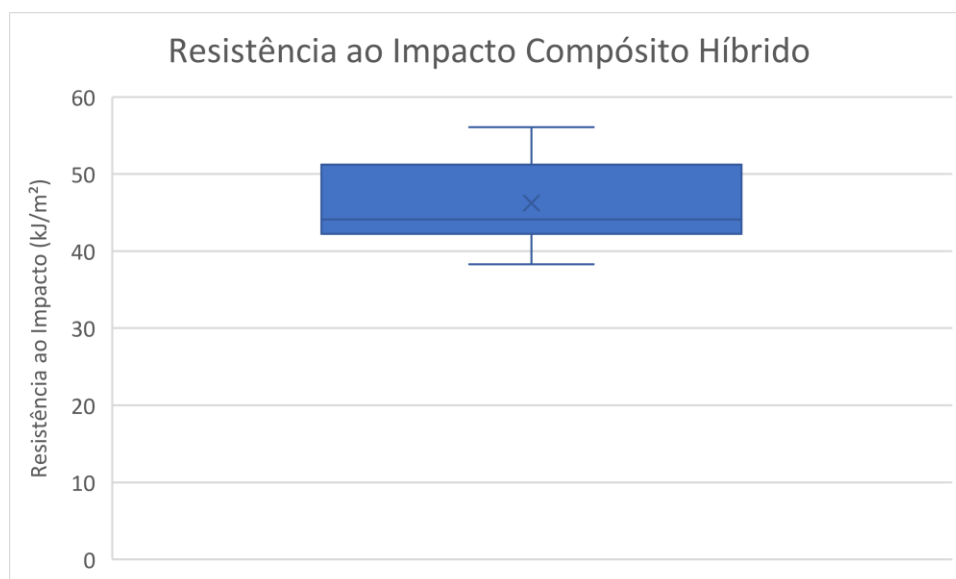


Figura 52 - Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos híbridos não envelhecidos.

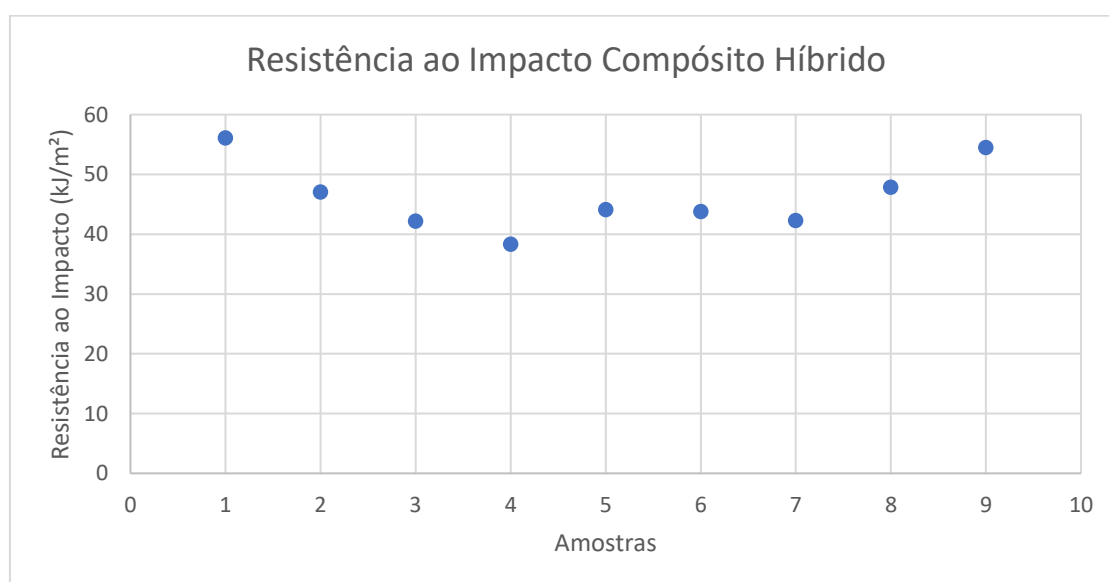


Figura 53 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto dos compósitos híbridos não envelhecidos.

Na tabela 21 são apresentados dados de resistência ao impacto da literatura [182-183].

Tabela 21 - Resistência ao impacto compósito híbrido encontrados na literatura.

Fabricação	Resina	Porcentagem de Fibra	Resistência ao Impacto (kJ/m²)	Referência
<i>Lay-up</i> manual	Epóxi		28,20	182
<i>Lay-up</i> manual	Epóxi		74,35	182
Moldagem por injeção	Polipropileno (PP)	70% PP, 20% Sisal, 10% Fibra de Vidro	16,67 kJ/m ²	182
Moldagem por injeção	Polipropileno (PP)	70% PP, 15% Sisal, 15% Fibra de Vidro	18,35 kJ/m ²	183
Moldagem por injeção	Polipropileno (PP)	70% PP, 10% Sisal, 20% Fibra de Vidro	20,01 kJ/m ²	183

Ao comparar a Tabela 21, de valores encontrados na literatura, com os valores da Tabela 20, nota-se que os valores de resistência dos compósitos híbridos ficaram próximos aos valores obtidos anteriormente por outros autores.

Na Figura 54, é possível ver como os compósitos híbridos se comportaram perante o ensaio de impacto. É possível ver que os compósitos híbridos quase não apresentaram área danificada e também é possível notar que nenhuma amostra rompeu (conforme ocorreu nos compósitos de luffa) e nenhuma amostra teve um comportamento em V conforme os compósitos de fibra de vidro. Além disso, não se percebe, macroscopicamente, delaminação extensiva. Com isso, analisando macroscopicamente, é possível observar que a hibridização foi realizada com sucesso.



Figura 54 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de vidro/luffa após sofrerem ensaio de impacto.

Na Figura 55 estão mostrados os resultados dos 3 tipos de compósito. O compósito híbrido apresenta um valor de resistência ao impacto menor do que o compósito de fibra de vidro, mas foi “eficiente”, conforme será discutido a seguir.

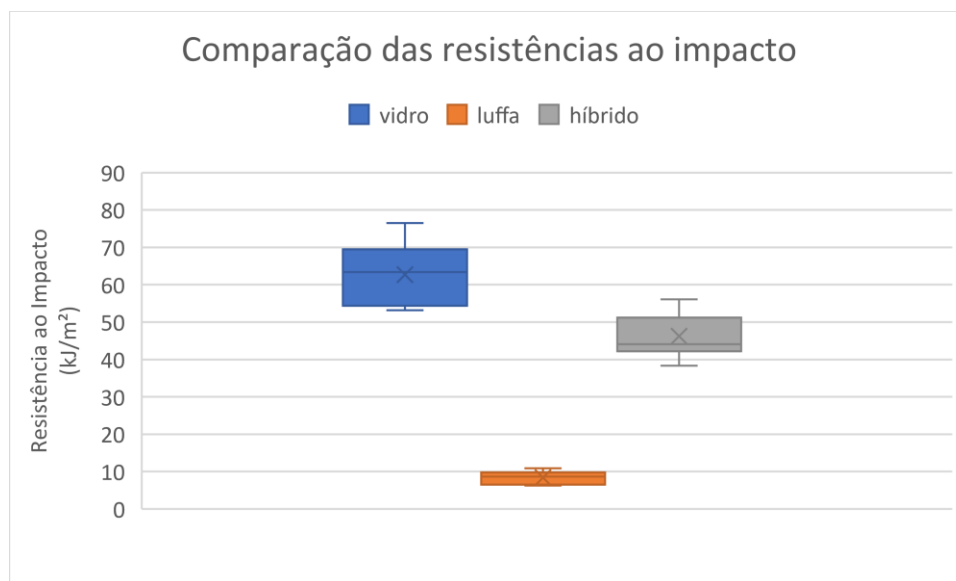


Figura 55 - Gráfico Bloxplot comparação das resistências ao impacto entre os compósitos de vidro, compósitos de luffa e compósitos híbridos não envelhecidos.

Em relação a resistência média do compósito híbrido comparada com a resistência média dos compósitos de vidro e luffa, é possível observar que a resistência do compósito de vidro é 37,65% maior que do híbrido. Já quando comparado com o compósito de luffa o híbrido apresenta um aumento de resistência de 379,07% mostrando que a hibridização foi realizada com sucesso.

A fim de realizar uma análise mais precisa da variação da resistência ao impacto entre os compósitos foram feitas análises estatísticas utilizando o software *Past Statistical* [184].

Inicialmente, foi testada a normalidade dos dados utilizando o teste de Shapiro-Wilk. Foi confirmada a normalidade dos dados ($p > 0,05$) e, a seguir, foi então realizada uma análise de variância (Anova) para testar diferenças entre os grupos com relação a resistência. Foi observada diferença estatisticamente significativa entre os materiais com relação a sua resistência ao impacto ($F=207,3$; $GL=26$; $p < 0,01$).

Finalmente, foi utilizado o teste de Tukey (pós-teste) para identificar quais grupos diferiram entre si com relação à variável testada. Foi considerado o nível de

significância de 5% em todas as análises. Os resultados obtidos estão listados na Tabela 22.

Tabela 22 - Tabela teste de Tukey antes do envelhecimento.

	Vidro	Luffa	Híbrido
Vidro		1,80E-11	3,49E-03
Luffa	28,21		3,03E-09
Híbrido	9,094	19,12	

Foi possível observar maior diferença entre Vidro e Luffa ($Q=28,21$; $p=0,00000000001799$) do que entre Vidro e Híbrido ($Q=9,09$; $p=0,003487$) ou Luffa e Híbrido ($Q=19,12$; $p=0,000000003031$), conforme já podia ser inferido do gráfico *boxplot* (Figura 55).

Após essas análises foi possível se chegar às seguintes observações:

- O grupo dos compósitos reforçados com fibra de vidro apresentou maior resistência ao impacto, como esperado. A baixa variabilidade dos resultados permitiu inferir que o compósito fabricado tinha boa homogeneidade.
- O grupo dos compósitos reforçados com fibra de *luffa* apresentou menor resistência ao impacto e teve falha com ruptura total.
- O grupo dos compósitos híbridos apresentou resistência intermediária quando comparado com os compósitos de vidro e *luffa*.
- A resistência dos compósitos híbridos ficou mais próxima dos compósitos de fibra de vidro.
- O compósito híbrido apresentou boa eficiência, pois foi utilizada uma menor quantidade de fibra de vidro quando comparado com o compósito de fibra de vidro e apesar disso, o compósito híbrido não apresentou uma perda tão significativa de resistência ao impacto. Além disso, o compósito híbrido é mais barato e mais ecologicamente correto.

4.2.2. Ensaio de Impacto em Compósitos Envelhecidos a Temperatura ambiente

Na tabela 23 está apresentada a resistência ao impacto em kJ/m² dos compósitos reforçados com fibra de vidro envelhecidos por imersão em água a temperatura ambiente. A área da seção resistente de cada corpo de prova (largura vs. espessura) também está listada na tabela. É possível ver que os valores de resistência ao impacto variam entre 40,98 kJ/m² e 77,54 kJ/m². Além disso, foi calculada a média e a mediana, cujos valores são, respectivamente, 58,76 kJ/m² e 56,42 kJ/m².

Tabela 23 - Resistência ao impacto compósito fibra de vidro envelhecido em temperatura ambiente.

Compósito fibra de vidro envelhecido a temperatura ambiente			
Amostra	Energia de Impacto (10⁻³kJ)	Área da seção resistente (L x e) 10⁻⁶m²	Resistência ao Impacto (kJ/m²)
1	5,73	77,5	73,93
2	5,33	82	65,00
3	5,23	88,31	59,22
4	5,65	72,86	77,54
5	5,1	93,74	54,40
6	4,01	97,84	40,98
7	4,23	93,74	45,12
8	4,88	86,75	56,25
9	5,09	90,21	56,42
Média	5,02	86,99	58,76
Desvio Padrão	0,58	8,18	12,01

Na Figura 56 é possível observar que houve maior discrepância entre os valores do 2º e 3º quartil mostrando que os valores acima da mediana variam mais entre eles quando comparado com os valores abaixo da mediana. Na Figura 57 é possível ver também que a distribuição dos dados de resistência possui uma variação considerável e bem maior do que aquela observado para o compósito sem envelhecimento (Figura 43).

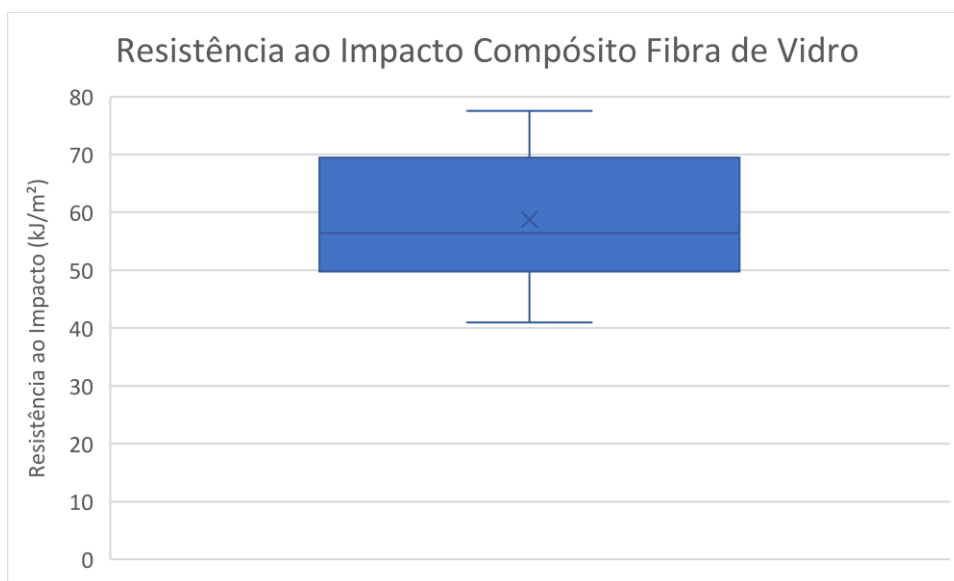


Figura 56 - Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos fibra de fibra de vidro envelhecidos a temperatura ambiente.

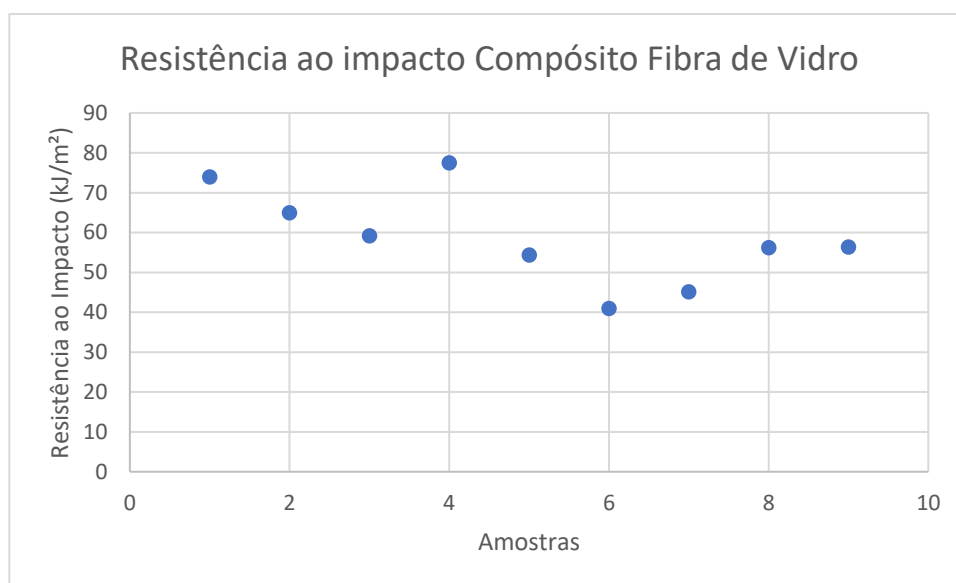


Figura 57 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto dos compósitos de fibra de vidro envelhecidos a temperatura ambiente.

Na Figura 58, é possível ver como os compósitos envelhecidos em temperatura ambiente se comportaram perante o ensaio de impacto. Observa-se uma área danificada de largura semelhante em todas as amostras e que nenhuma amostra rompeu. Além disso, não se percebe, macroscopicamente, delaminação extensiva. Foi possível observar que nas amostras 1,2 e 4 (Figura 59) os compósitos

não foram rompidos, mas sim dobrados em formato de V. Destaca-se que o formato de V coincide com os compósitos com maiores resistência ao impacto.

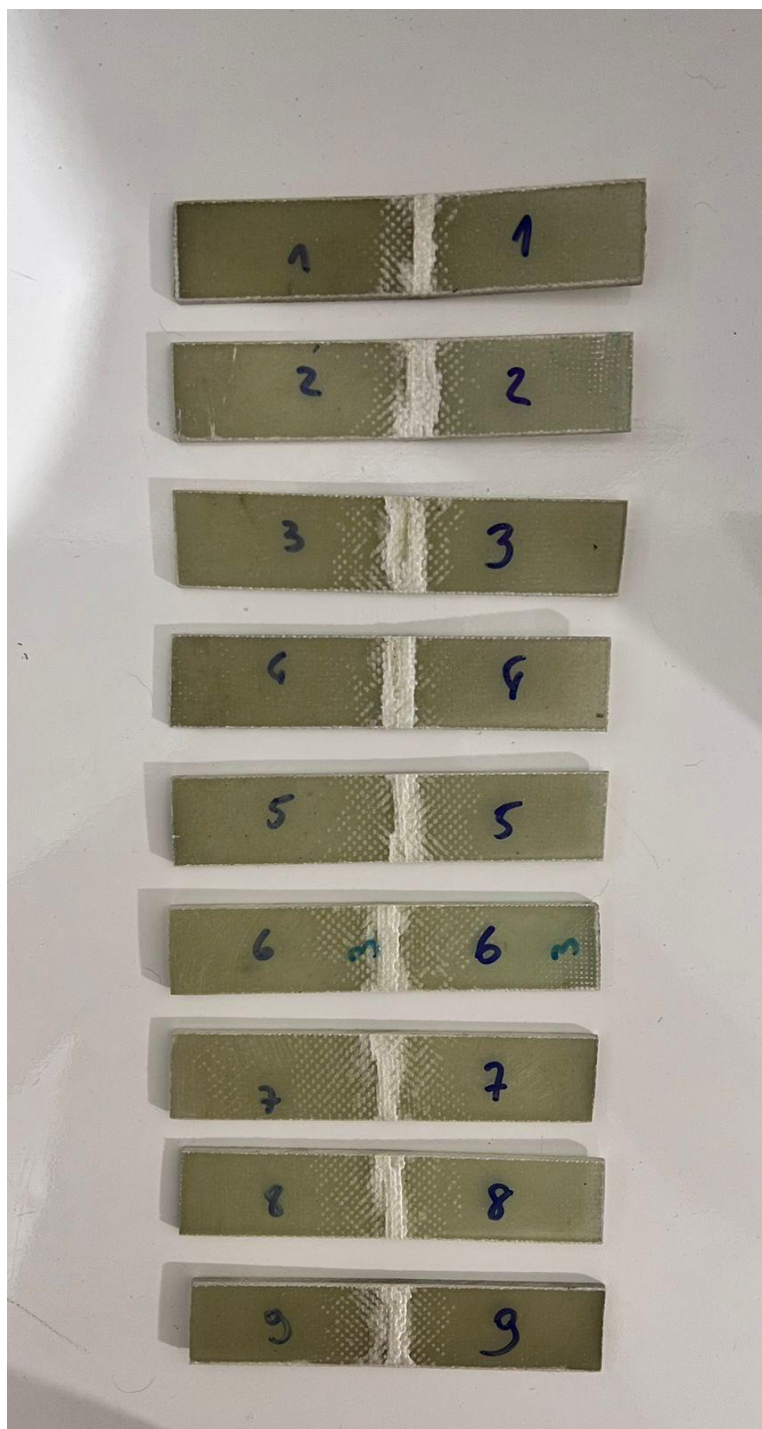


Figura 58 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de vidro envelhecidos a temperatura ambiente após sofrerem ensaio de impacto.



Figura 59 - Corpo de prova das amostras 1,2 e 4 mostrando formato de V sofrido pelas amostras.

Na tabela 24 está apresentada a resistência ao impacto em kJ/m^2 dos compósitos reforçados com fibra de *luffa*. É possível ver que os valores de resistência ao impacto variam de $12,87 \text{ kJ/m}^2$ até $31,65 \text{ kJ/m}^2$. A média foi de $19,45 \text{ kJ/m}^2$ e a mediana foi $16,91 \text{ kJ/m}^2$.

Tabela 24 - Resistência ao impacto compósito fibra de *luffa* envelhecido em temperatura ambiente.

Compósito fibra de <i>luffa</i> envelhecido a temperatura ambiente			
Amostra	Energia de Impacto (10^{-3} kJ)	Área da seção resistente (L x e) 10^{-6} m^2	Resistência ao Impacto (kJ/m^2)
1	2,05	159,28	12,87
2	3,2	132,66	24,12
3	4,54	143,44	31,65
4	2,61	137,28	19,01
5	1,63	114,62	14,22
6	1,98	139,26	14,21
7	2,15	138,16	15,56
8	2,5	147,84	16,91
9	2,75	103,62	26,53
Média	2,60	135,12	19,45
Desvio Padrão	0,86	16,82	6,52

Pela análise da Figura 60 fica claro que houve uma maior discrepância entre os valores do segundo e terceiro quartil, indicando que os valores acima da mediana apresentam uma maior variação entre si, quando comparados com os valores abaixo da mediana. Na Figura 61 é possível ver que também que a distribuição dos dados de resistência possui uma variação considerável, porém de modo semelhante ao compósito sem envelhecimento (Figura 51).

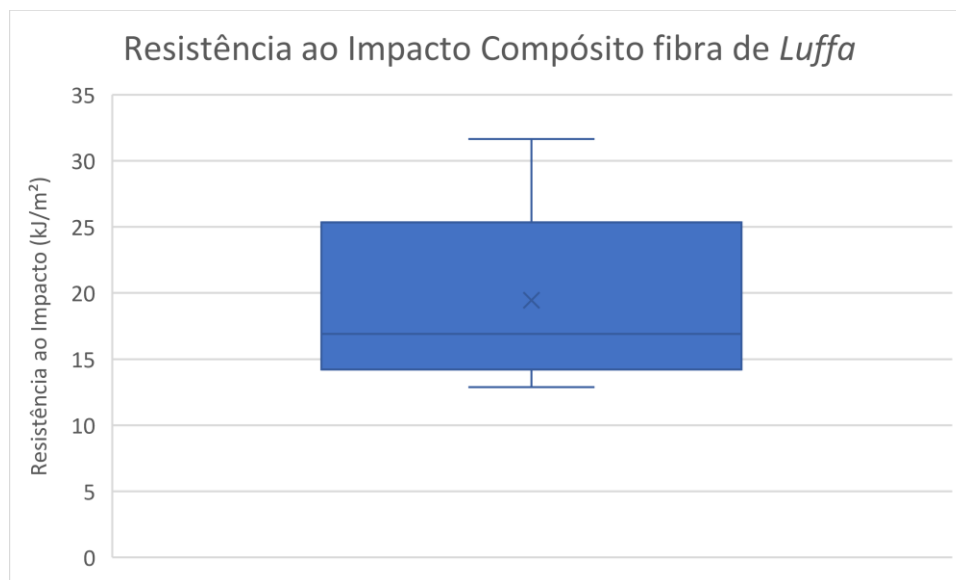


Figura 60 - Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos fibra de luffa envelhecidos a temperatura ambiente.

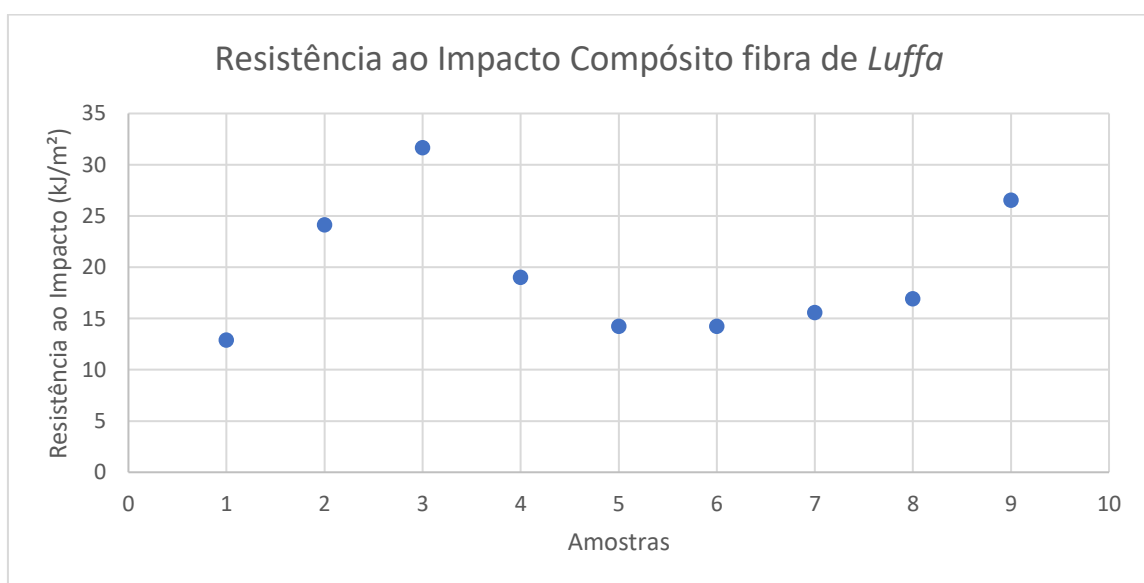


Figura 61 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto dos compósitos de fibra de luffa envelhecidos a temperatura ambiente.

Importante notar, conforme mostrado na Figura 62, que os compósitos envelhecidos não romperam, diferentemente do que foi observado para o compósito sem envelhecimento (Figura 50). As amostras apresentaram deformação permanente, em formato de V, com as fibras unindo as duas metades dos corpos de prova.

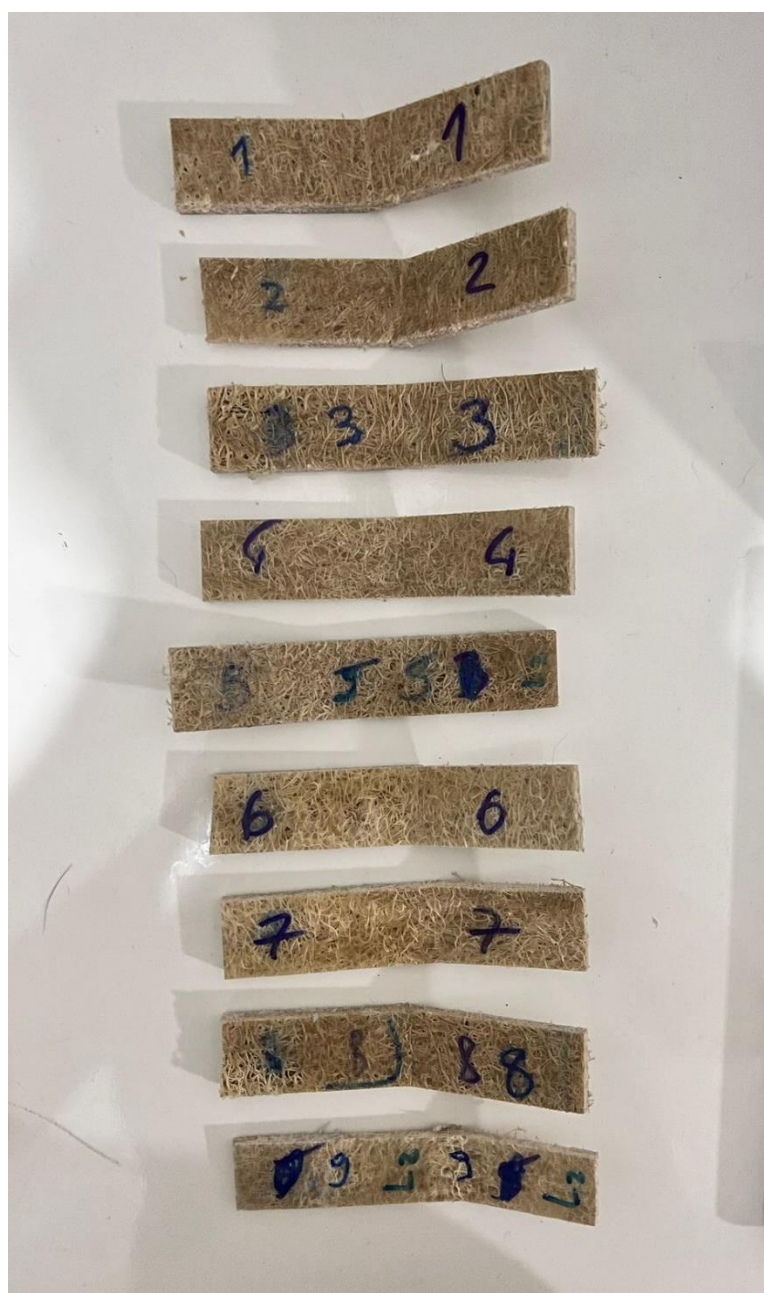


Figura 62 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de luffa envelhecidos a temperatura ambiente após sofrerem ensaio de impacto.

Na Figura 63 é possível ver que as amostras 1,2,3 e 5 perderam parte da resina com o envelhecimento. Apesar disso, não foi possível fazer uma ligação entre a perda de resina e a resistência ao impacto das amostras.

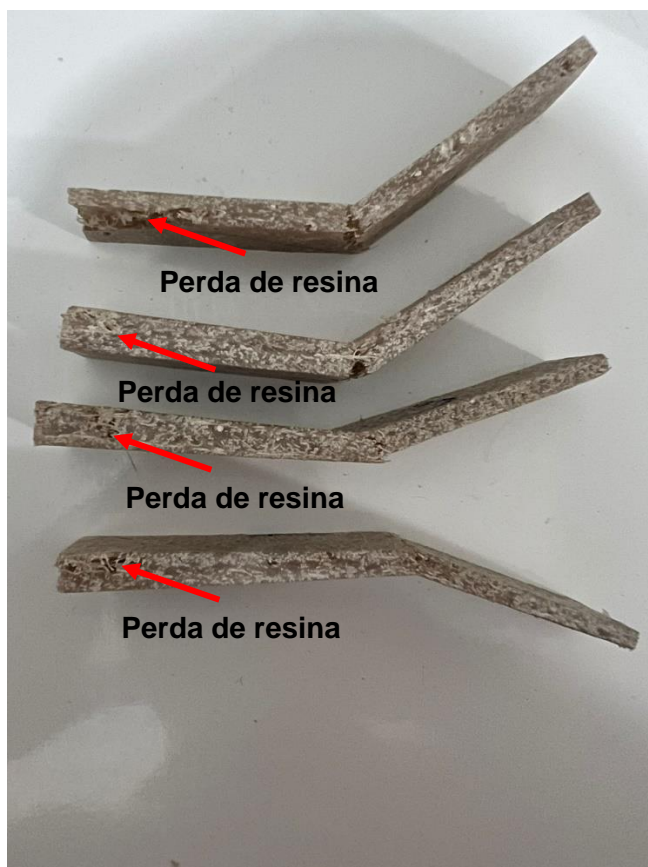


Figura 63 - Corpo de prova amostras 1,2,3 e 5 de luffa envelhecida a temperatura ambiente mostrando a perda de resina.

Um corpo de prova (amostra 4) apresentou delaminação, conforme mostrado na Figura 64. Apesar desse modo de falha, a amostra não foi a que apresentou a menor resistência do grupo.

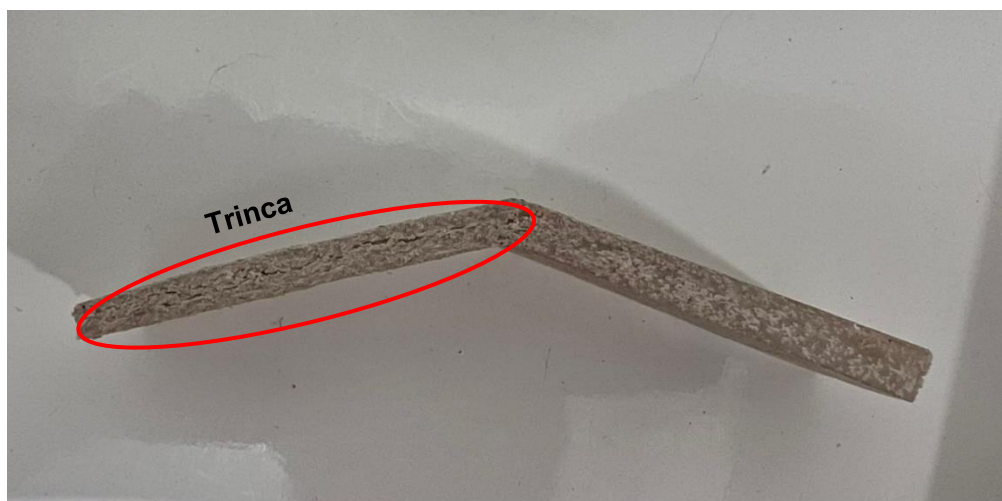


Figura 64 - Corpo de prova amostras 4 de luffa envelhecida a temperatura ambiente mostrando uma trinca de delaminação que percorre a lateral da amostra.

Na tabela 25 está apresentada a resistência ao impacto em kJ/m² dos compósitos híbridos envelhecidos a temperatura ambiente. Os valores de resistência ao impacto variam entre 17,70 kJ/m² e 34,94 kJ/m², tendo uma média de 26,23 kJ/m² e mediana de 25,07 kJ/m².

Tabela 25 - Resistência ao impacto compósito fibra de luffa envelhecido em temperatura ambiente.

Compósito Híbrido envelhecido a temperatura ambiente			
Amostra	Energia de Impacto (10 ⁻³ kJ)	Área da seção resistente (L x e) 10 ⁻⁶ m ²	Resistência ao Impacto (kJ/m ²)
1	3,47	195,25	17,77
2	4,28	164,25	26,05
3	4,7	134,5	34,94
4	3,79	167,5	22,62
5	4,17	182,5	22,84
6	3,82	172,75	22,11
7	4,35	140,5	30,96
8	4,71	139,75	33,70
9	4,4	175,5	25,07
Média	4,18	163,61	26,22
Desvio Padrão	0,42	21,06	5,79

No gráfico mostrado na Figura 65 é possível observar que houve uma maior discrepância entre os valores do segundo e terceiro quartil, assim como, nas amostras de fibra de vidro e fibra de luffa envelhecidos a temperatura ambiente, indicando que os valores acima da mediana apresentam uma maior variação entre si, quando comparados com os valores abaixo da mediana. Na Figura 66, também é possível notar que a distribuição dos dados de resistência apresenta uma variação considerável.

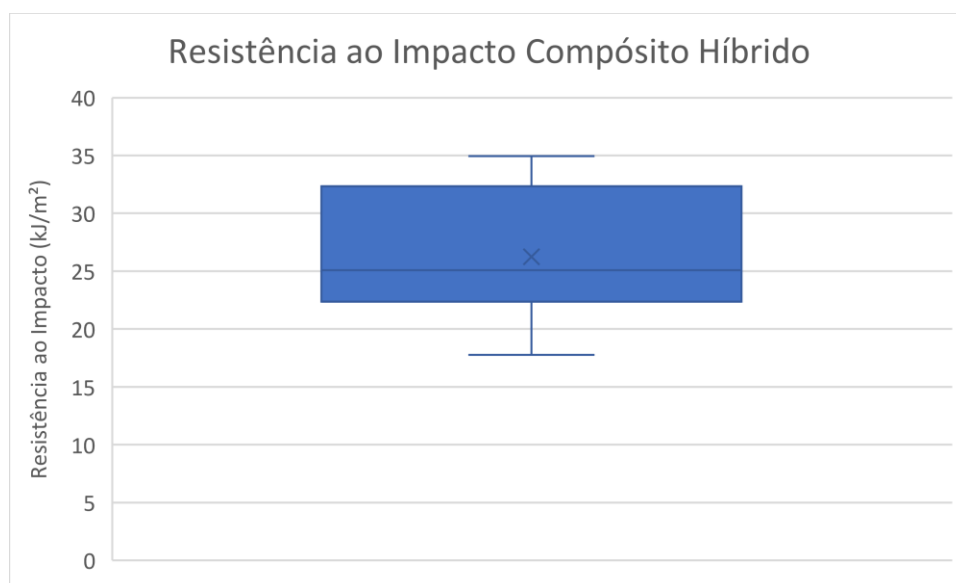


Figura 65 - Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos híbridos envelhecidos a temperatura ambiente.

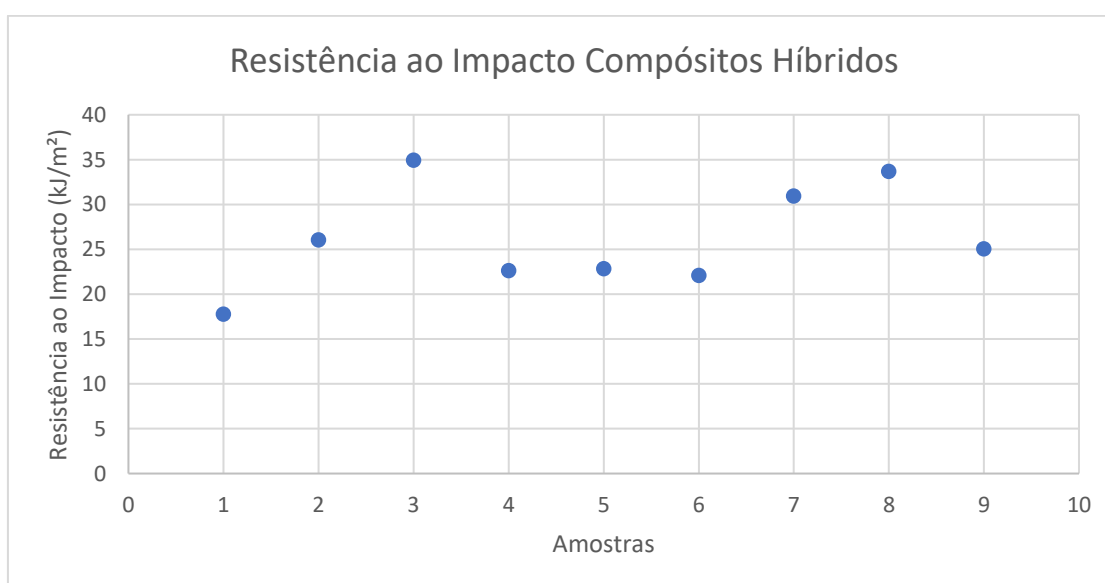


Figura 66 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto dos compósitos híbridos envelhecidos a temperatura ambiente.

Na Figura 67, está mostrado como os compósitos híbridos se comportaram perante o ensaio de impacto. Observa-se que os compósitos híbridos apresentaram área danificada considerável, sendo que apenas uma amostra (amostra 8) apresentou delaminação (Figura 68). Observa-se na análise que nenhuma amostra rompeu e nem apresentou comportamento em V, como ocorreu nos compósitos de fibra de vidro. Como observado, a análise macroscópica indica que a hibridização alterou de modo significativo o comportamento ao impacto do compósito em relação ao compósito de luffa, pois não houve fratura total dos corpos de prova.

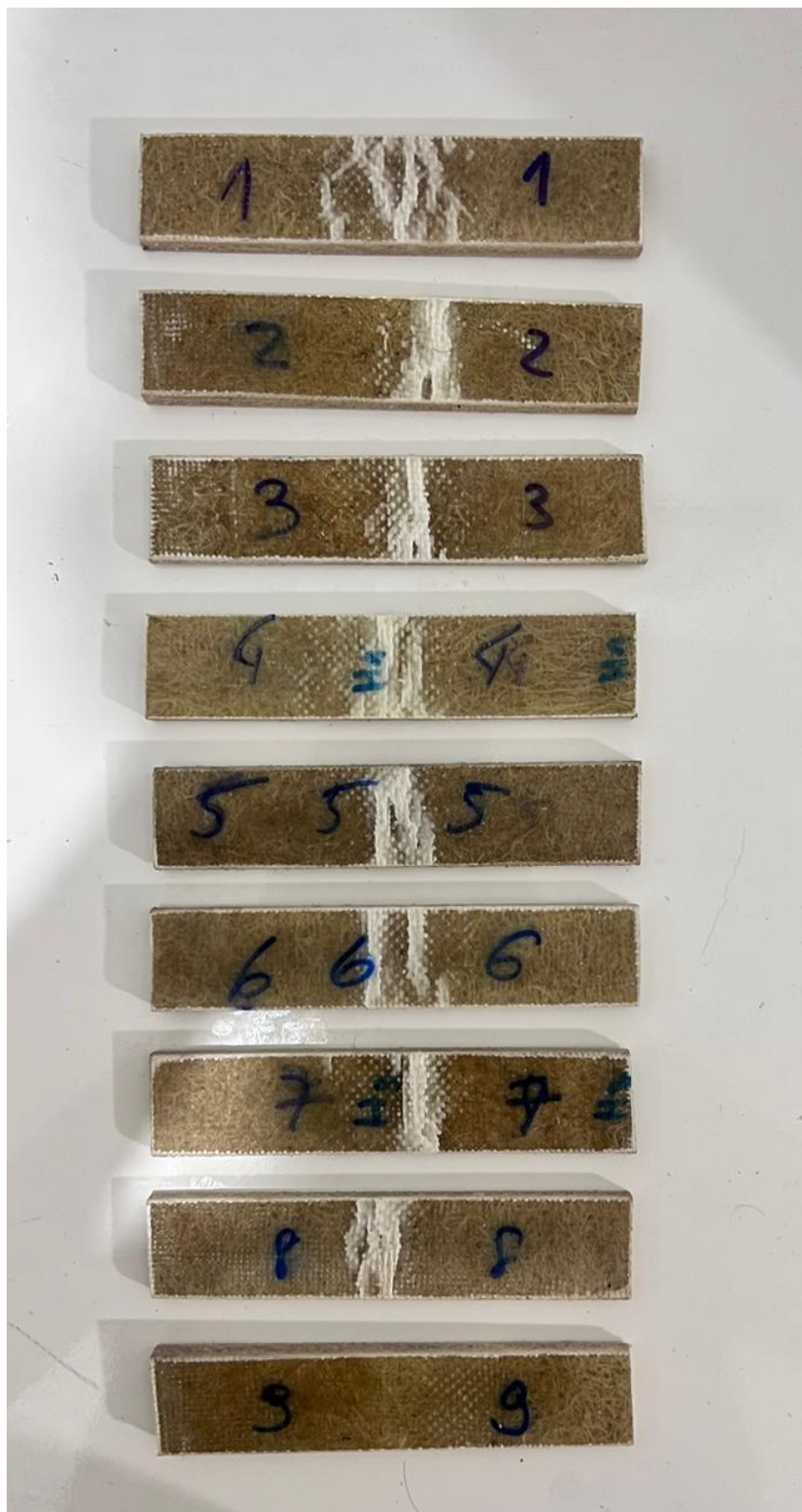


Figura 67 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de vidro/luffa envelhecidos a temperatura ambiente após sofrerem ensaio de impacto.

Conforme descrito anteriormente, a amostra 8 (Figura 68) apresentou delaminação (trinca lateral), sendo a amostra que apresentou maior valor de resistência ao impacto.

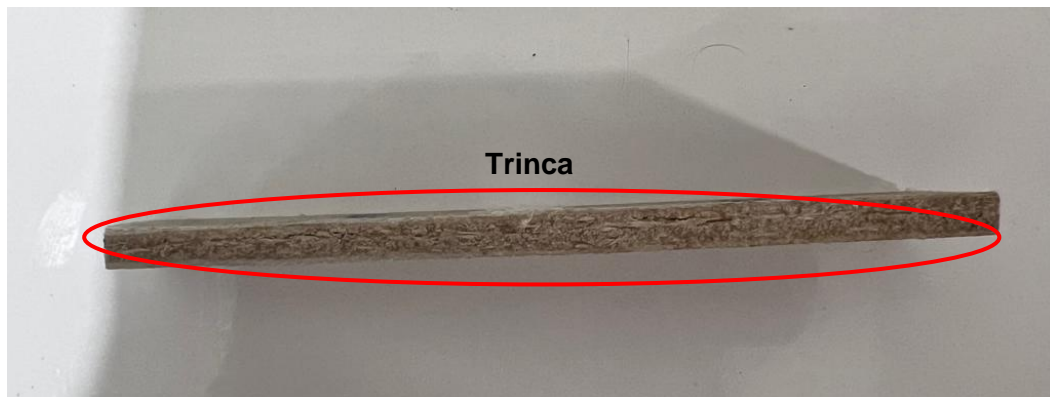


Figura 68 - Corpo de prova amostras 8 do compósito híbrido envelhecida a temperatura ambiente mostrando uma trinca que percorre a lateral da amostra.

Os resultados dos três tipos de compósitos envelhecidos a temperatura ambiente estão apresentados na Figura 69. Observa-se que o compósito híbrido apresenta um valor de resistência ao impacto menor do que o compósito de fibra de vidro, porém maior que o de luffa. Em relação a resistência média dos compósitos, o compósito de vidro apresenta uma resistência média cerca de 124,01% maior do que o híbrido. Por outro lado, quando comparado com o compósito de luffa, o compósito híbrido apresenta um aumento de resistência de 34,86%.

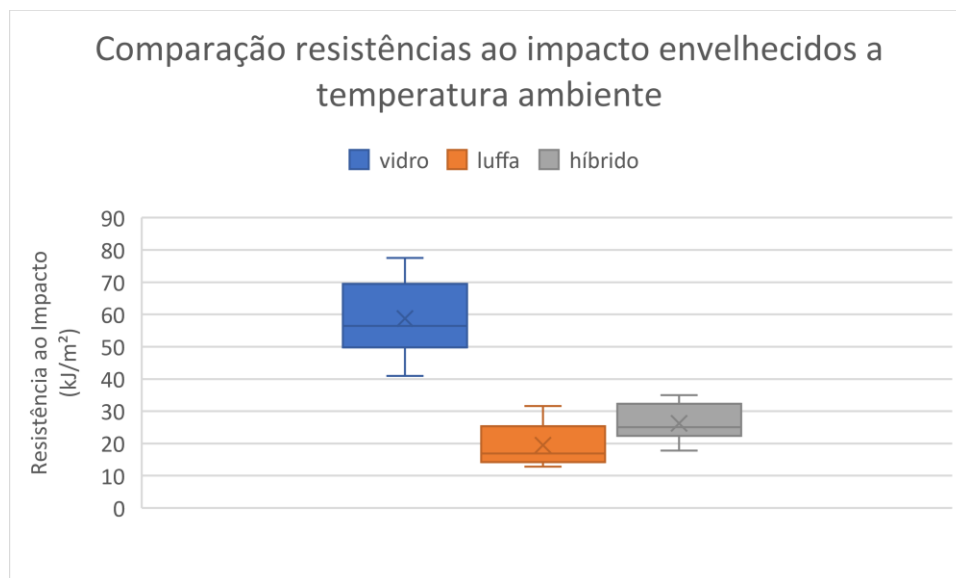


Figura 69 - Gráfico Bloxplot compara o entre as resistências ao impacto dos compósitos envelhecidos a temperatura ambiente.

A diferença entre os resultados foi avaliada mediante testes estatísticos, empregando a mesma metodologia já descrita. Ou seja, inicialmente, foi testada a normalidade dos dados utilizando o teste de Shapiro-Wilk. Foi confirmada a normalidade dos dados ($p > 0,05$) e, a seguir, foi então realizada uma análise de variância (Anova) para testar diferenças entre os grupos com relação a resistência. Foi observada diferença estatisticamente significativa entre os materiais com relação a sua resistência ao impacto ($F=54,07$; $GL=26$; $p < 0,01$).

Finalmente, foi utilizado o teste de Tukey (pós-teste) para identificar quais grupos diferiram entre si com relação   variável testada. Foi considerado o nível de significância de 5% em todas as análises. Os resultados obtidos estão listados na Tabela 26.

Tabela 26 - Tabela teste de Tukey amostras envelhecidas a 25 C.

	Vidro	Luffa	Híbrido
Vidro		2,49E-09	8,319E-08
Luffa	13,75		0,2346
Híbrido	11,38	2,371	

Foi possível observar maior diferença entre Vidro e Luffa ($Q=13,75$; $p = 0,00000000249$) do que entre Vidro e Híbrido ($Q=11,38$; $p=0,00008319$). Contudo, não foi observada diferença estatisticamente significativa entre Luffa e Híbrido ($Q=2,37$; $p=0,2346$), conforme já podia ser inferido do gráfico *boxplot* (Figura 69).

Apesar de não ter sido vista uma diferença estatisticamente significativa entre os compósitos de Luffa e Híbrido, foi observada uma tendência de queda do valor de impacto médio. O elevado desvio dos resultados obtidos (Figuras 61 e 66) podem ter influenciado na análise estatística.

Após essas análises foi possível se chegar às seguintes observações:

- O grupo dos compósitos reforçados com fibra de vidro apresentou maior resistência ao impacto, assim como, observado antes do envelhecimento.
- O grupo dos compósitos reforçados com fibra de *luffa* apresentou menor resistência ao impacto.
- Nenhum dos grupos apresentou falha total.
- O grupo dos compósitos híbridos apresentou resistência intermediária quando comparado com os compósitos de vidro e *luffa*.
- Não foi identificada diferença estatisticamente significativa entre os compósitos de Luffa e Híbrido. Apesar disso, foi observada uma tendência de queda do valor médio.

4.2.3. Ensaio de Impacto Compósito Envelhecido a Temperatura 60°C

A tabela 27 apresenta a resistência ao impacto (kJ/m^2) dos compósitos reforçados com fibra de vidro envelhecidos a 60°C, juntamente com a área da seção transversal de cada corpo de prova (largura x espessura). Os valores de resistência ao impacto variam de 47,32 kJ/m^2 a 73,87 kJ/m^2 , com valores para a média e a mediana de, respectivamente, 60,55 kJ/m^2 e 58,31 kJ/m^2 .

Tabela 27 - Resistência ao impacto compósito fibra de vidro envelhecido a 60°C.

Compósito fibra de vidro envelhecido a 60°C			
Amostra	Energia de Impacto (10⁻³kJ)	Área da seção resistente (L x e) 10⁻⁶m²	Resistência ao Impacto (kJ/m²)
1	5,12	90,50	56,57
2	5,48	98,00	55,91
3	5,27	71,34	73,87
4	5,2	89,16	58,31
5	5,14	93,74	54,83
6	5,71	88,20	64,73
7	4,97	68,29	72,77
8	5,02	82,75	60,66
9	4,89	103,32	47,32
Média	5,20	87,25	60,55
Desvio Padrão	0,25	11,53	8,61

É perceptível na Figura 70 que houve uma maior diferença entre os valores do 2º e 3º quartis, indicando que os valores acima da mediana apresentam uma variação maior entre si em comparação aos valores abaixo da mediana. Já na Figura 71, pode-se observar que a distribuição dos dados de resistência apresenta uma variação considerável.

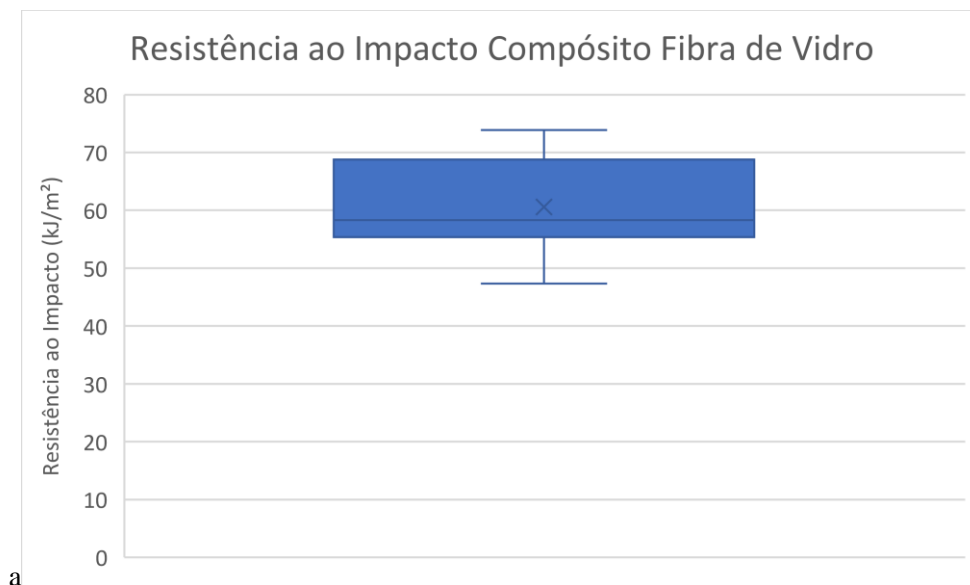


Figura 70 - Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos fibra de vidro envelhecidos a 60°C.

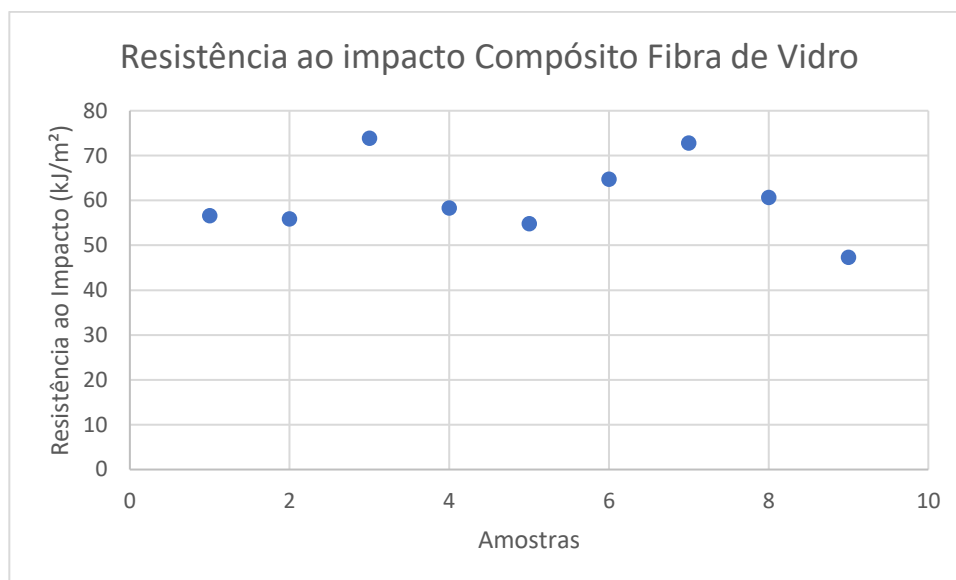


Figura 71 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto compósito de fibra de vidro envelhecido a 60°C.

A Figura 72 mostra o comportamento dos compósitos após o ensaio de impacto. Observa-se que a área danificada apresenta largura semelhante em todas as amostras e que nenhuma delas rompeu completamente. Não foi observada, a olho nu, delaminação extensiva, havendo apenas um início de delaminação nas bordas. Ademais, na Figura 73 é possível notar que os compósitos foram dobrados em forma de V, em vez de serem rompidos.

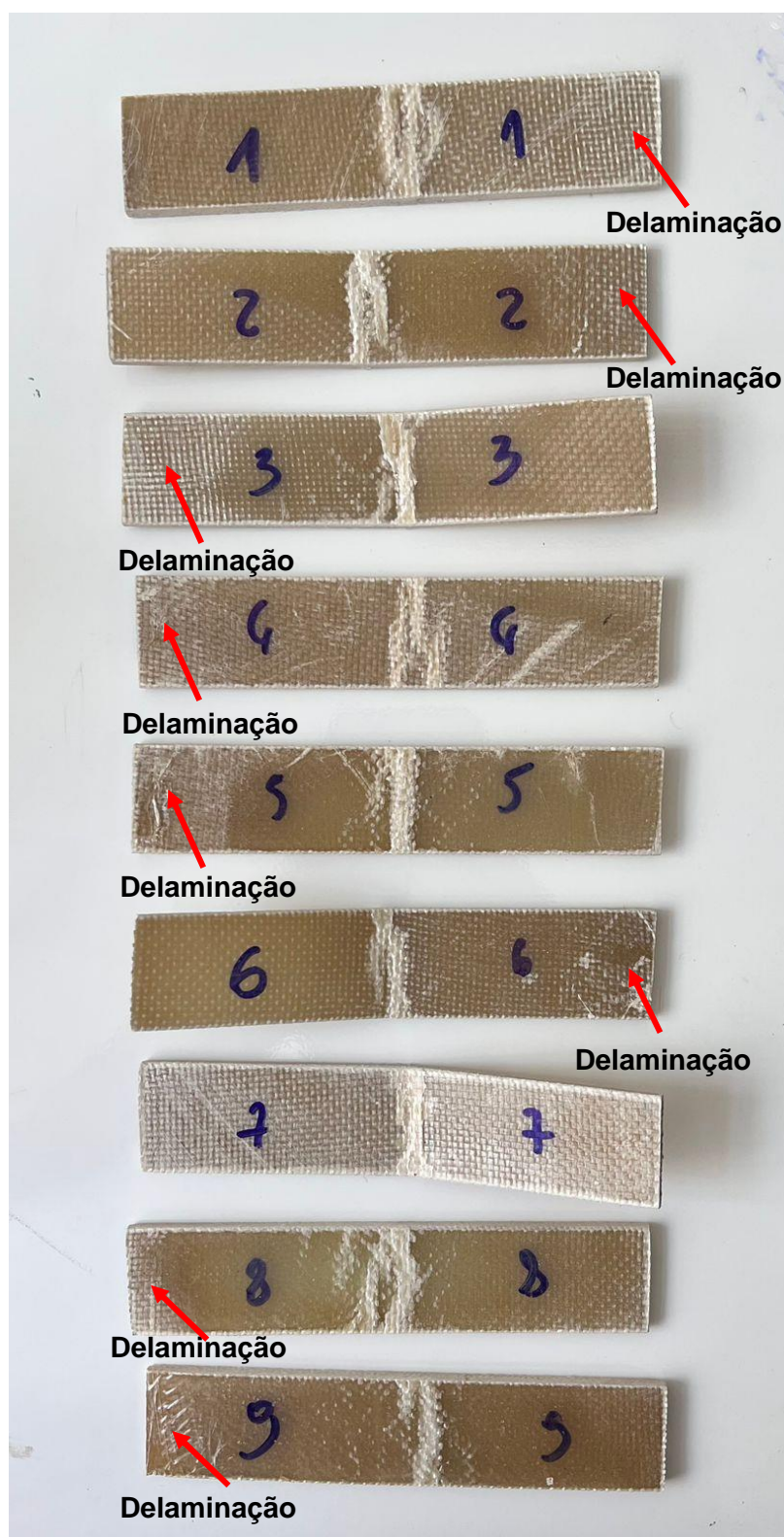


Figura 72 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de vidro envelhecidos a 60°C após sofrerem ensaio de impacto.

Na Figura 73, é possível ver que as amostras 3, 6 e 7 apresentaram formato em V. Destaca-se que, mais uma vez, os compósitos de fibra de vidro que apresentaram esse comportamento foram as amostras com maior resistência ao

impacto. De fato, é possível observar que a amostra 7 apresenta delaminação extensiva, o que é retratado pelo esbranquiçamento da superfície do corpo de prova.

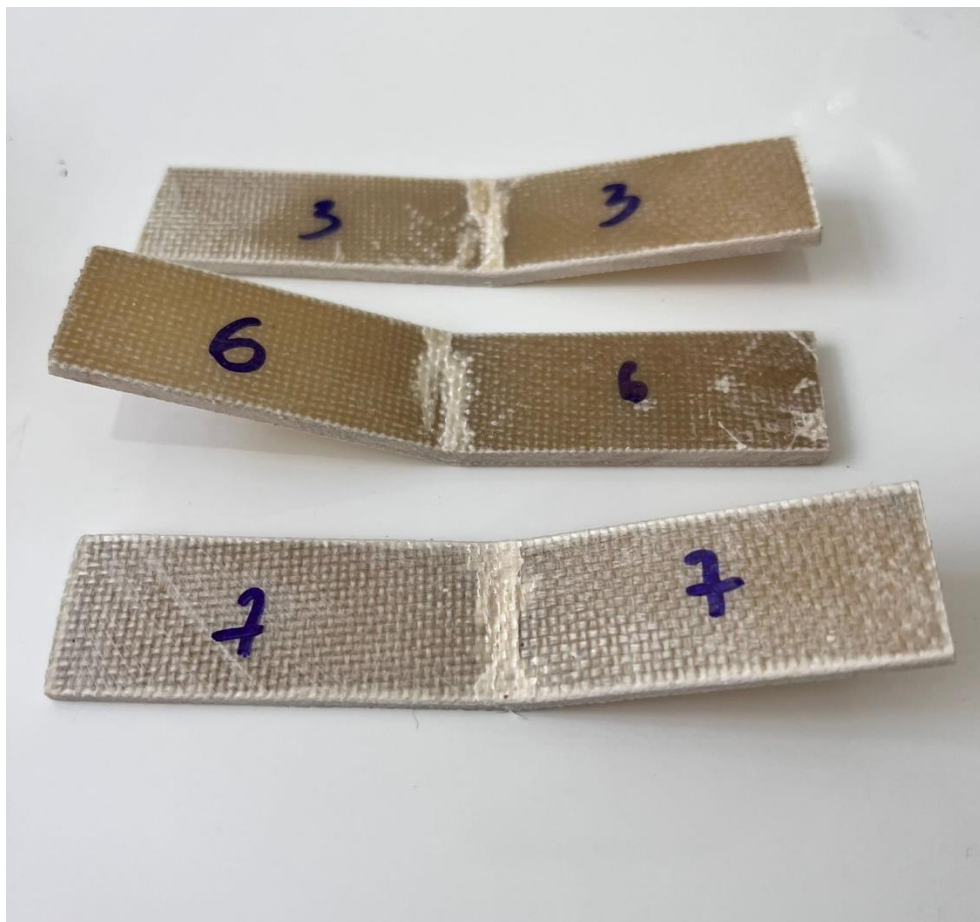


Figura 73 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de vidro envelhecidos a 60°C com comportamento em V.

Na tabela 28 está apresentada a resistência ao impacto (kJ/m^2) dos compósitos reforçados com fibra de *luffa* envelhecidos a temperatura de 60°C. É possível ver que os valores de resistência ao impacto variam de 12,24 kJ/m^2 até 24,86 kJ/m^2 , com média de 15,47 kJ/m^2 e mediana de 13,96 kJ/m^2 . É preciso destacar aqui, que as amostras de *luffa* envelhecidas por imersão em água a 60°C estavam muito flexíveis. Assim, ao serem submetidas ao impacto, as amostras dobraram “elasticamente” e foram lançadas para fora do dispositivo. Portanto, os valores reportados na tabela 28, não são valores de energia gastos para romper e ejetar as amostras, como ocorre em um ensaio Charpy usual e sim, preferencialmente, são valores de energia gasta para ejetar as amostras do

dispositivo. De fato, a maioria das amostras estava intacta após o ensaio, sem qualquer aparência de trincas ou de delaminações.

Tabela 28 - Resistência ao impacto compósito fibra de luffa envelhecido a 60°C.

Compósito fibra de luffa envelhecido a 60°C			
Amostra	Energia de Impacto (10⁻³kJ)	Área da seção resistente (L x e) 10⁻⁶m²	Resistência ao Impacto (kJ/m²)
1	1,43	108,02	13,23
2	2,12	156,2	13,57
3	1,69	121	13,96
4	4,01	161,26	24,86
5	2,16	144,76	14,92
6	2,03	121,44	16,71
7	1,92	156,86	12,24
8	1,8	133,76	13,45
9	2,28	139,7	16,32
Média	2,16	138,11	15,47
Desvio Padrão	0,74	18,56	3,81

A Figura 74 mostra uma maior discrepância entre os valores do segundo e terceiro quartis, indicando novamente que os valores acima da mediana apresentam maior variação entre si do que aqueles abaixo da mediana. Além disso, é possível ver um *outlier* a 24,86 kJ/m², com valor bem acima dos demais. Na Figura 75, ao desconsiderar o outlier, é possível observar que a distribuição dos dados de resistência não apresenta uma variação considerável.

Amostras	Resistência ao Impacto (kJ/m²)
1	13.5
2	13.8
3	14.2
4	25.0
5	15.0
6	16.8
7	12.5
8	13.5
9	16.5

Na Figura 76, é possível ver como os compósitos de luffa se comportaram perante o ensaio de impacto. As amostras não romperam e, além disso, foi possível observar que apresentaram uma coloração mais escura quando comparadas com os espécimes de luffa como fabricados e, também com os envelhecidos a temperatura ambiente. Além disso, as amostras 2, 4 e 7 tiveram perda de resina. Apesar da perda

de resina não foi possível estabelecer uma relação desse fato com a resistência ao impacto.

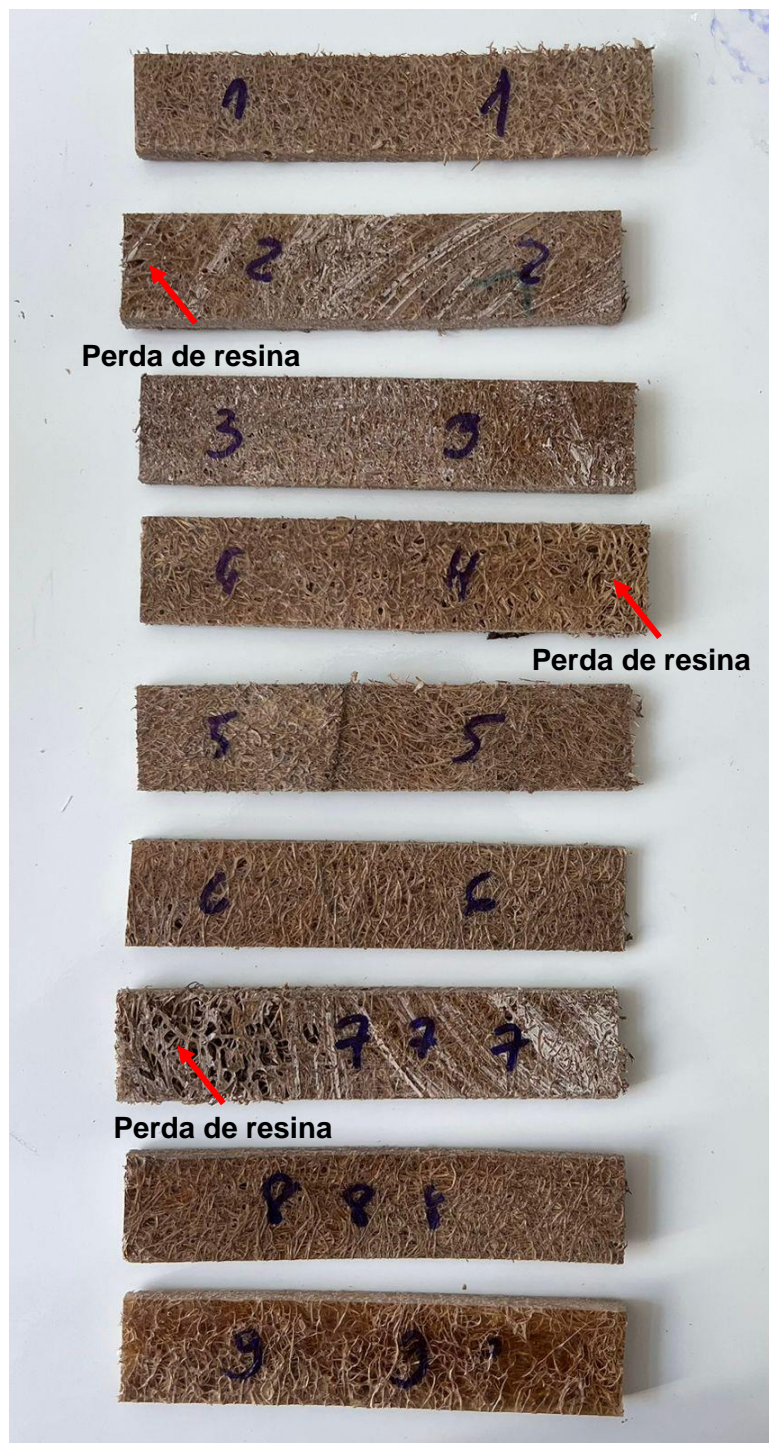


Figura 76 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de luffa envelhecidos a temperatura de 60°C após sofrerem ensaio de impacto.

Nas amostras 5, 6 e 7 observou-se delaminação, Figura 77. Apesar da presença de delaminação, de modo semelhante ao já relatado na análise do

compósito de luffa envelhecido na temperatura ambiente, não foi possível correlacioná-la com a resistência ao impacto.

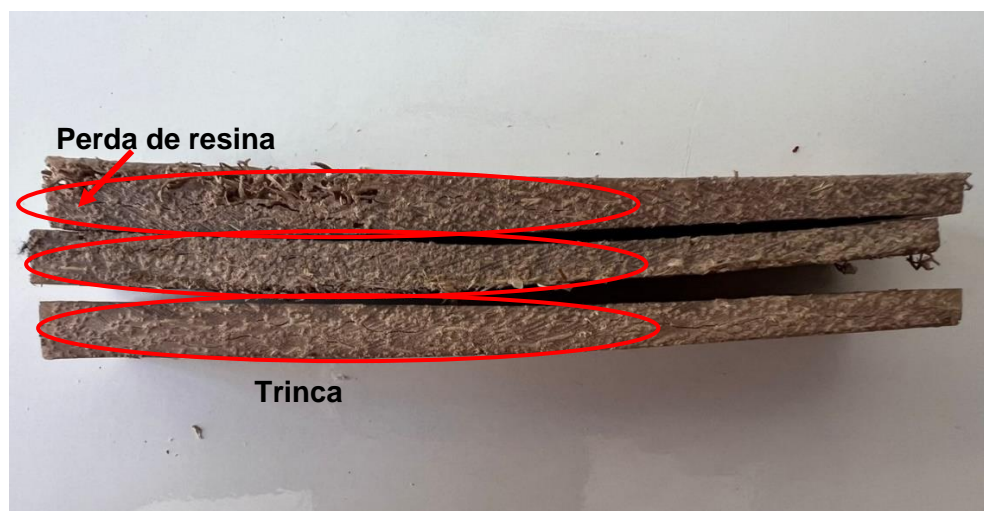


Figura 77 - Corpo de prova amostras 5,6,3 e 7 de luffa envelhecida a temperatura 60°C apresentou defeitos (perda de resina e trinca).

Na tabela 29 está apresentada a resistência ao impacto, em kJ/m², dos compósitos híbridos envelhecidos a 60°C. É possível ver que os valores de resistência ao impacto variam entre 29,21 kJ/m² e 41,50 kJ/m², tendo valores de 34,93 kJ/m² e 34,08 kJ/m², para a média e a mediana, respectivamente.

Tabela 29 - Resistência ao impacto compósito híbrido envelhecido a 60°C.

Compósito Híbrido envelhecido a 60°C			
Amostra	Energia de Impacto (10 ⁻³ kJ)	Área da seção resistente (L x e) 10 ⁻⁶ m ²	Resistência ao Impacto (kJ/m ²)
1	5,07	168	30,17
2	5,21	145,75	35,74
3	5,25	132,75	39,54
4	5,24	126,25	41,50
5	5,3	155,5	34,08
6	5,28	139	37,98
7	5,25	155	33,87
8	5,15	176,25	29,21
9	5,26	162,5	32,36
Média	5,22	151,22	34,93
Desvio Padrão	0,07	16,62	4,15

Na Figura 78 é possível observar que houve uma pequena discrepância entre os valores do segundo e terceiro quartil, indicando que os dados possuem uma distribuição quase simétrica. Na Figura 79, também é possível notar que a distribuição dos dados de resistência apresenta pouca variação.

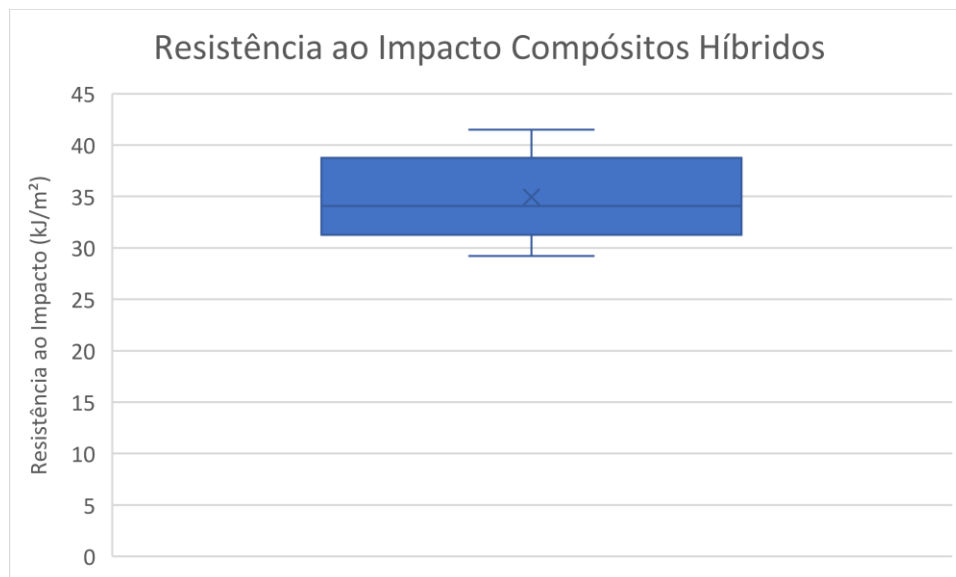


Figura 78 -Gráfico Blox-plot da resistência ao impacto dos compósitos híbridos envelhecidos a 60°C.

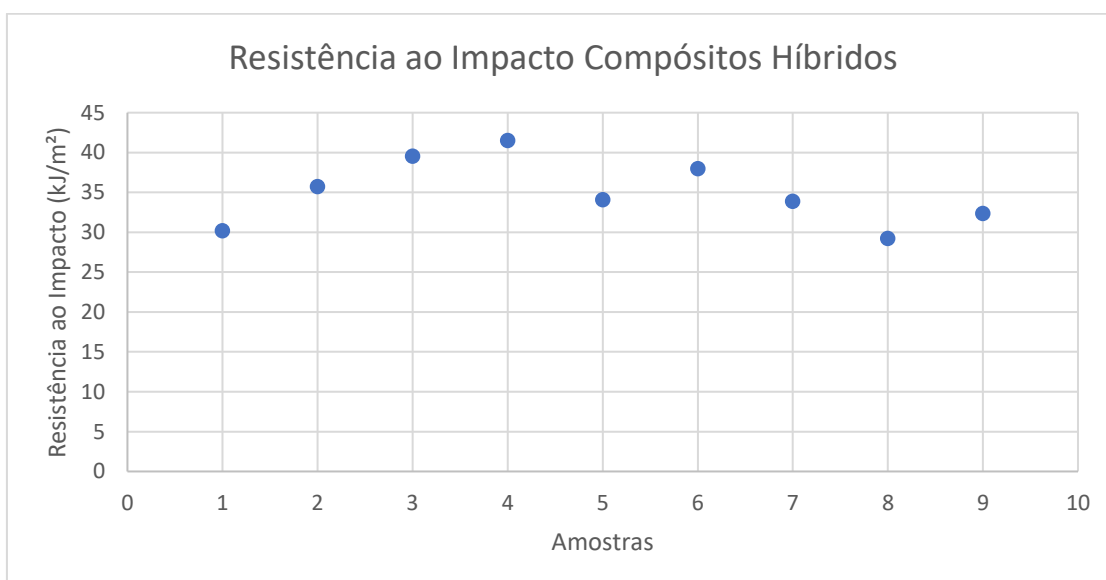


Figura 79 - Gráfico de dispersão da resistência ao impacto dos compósitos híbridos envelhecidos a 60°C.

A Figura 80 mostra, como os compósitos híbridos se comportaram perante o ensaio de impacto. É possível notar que os compósitos híbridos apresentaram área danificada considerável. Além disso, a amostra 9 teve perda da resina em sua superfície e houve princípio de delaminação nas amostras 2, 5, 6, 7 e 8. Observa-se também na análise que nenhuma amostra rompeu e nem apresentou comportamento em V. Vale destacar que as amostras 2, 5 e 6 apresentaram delaminação extensiva.

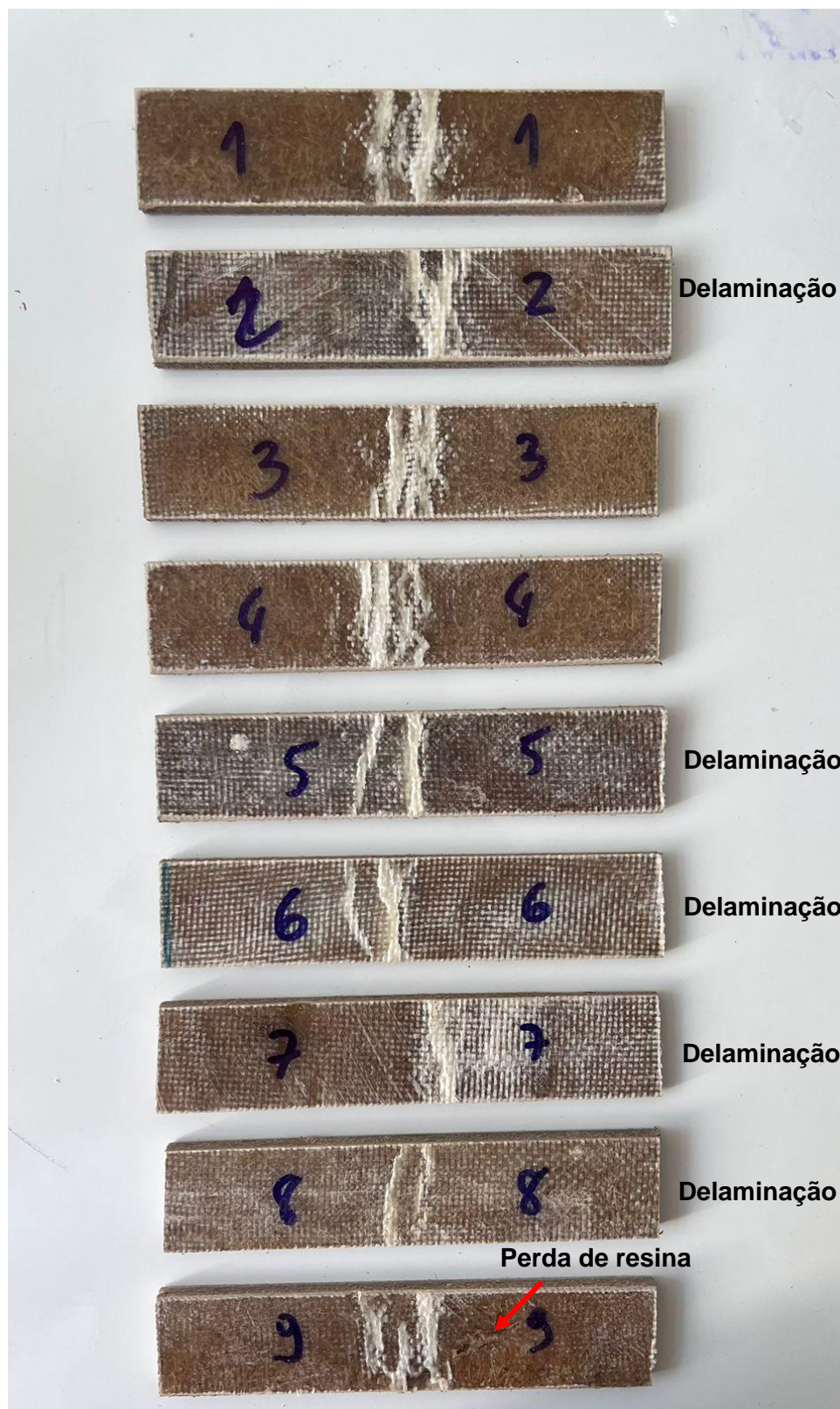


Figura 80 - Corpos de prova de compósitos reforçados com fibra de vidro/luffa envelhecidos a temperatura de 60°C.

Na Figura 81 é possível ver trinca nas amostras 4, 5 e 9. Semelhante ao já observado nas outras análises não foi possível obter uma correção entre delaminação e resistência ao impacto.

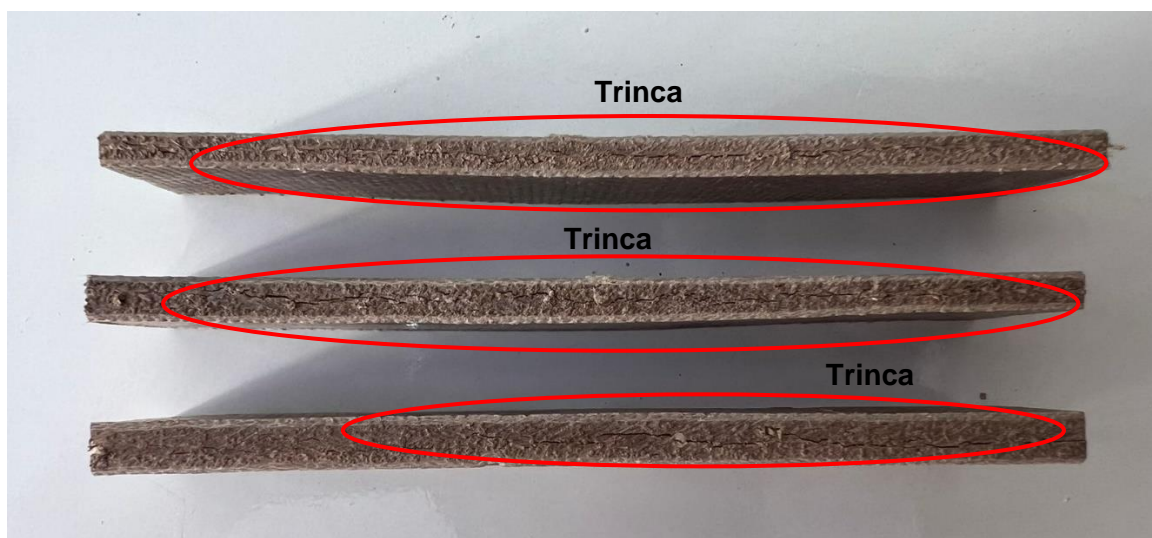


Figura 81 - Corpo de prova das amostras 4, 5 e 9 do compósito híbrido envelhecida a 60°C mostrando uma trinca que percorre a lateral.

Os resultados dos três tipos de compósitos envelhecidos a 60°C estão representados na Figura 82. Como esperado, o compósito híbrido apresenta um valor de resistência ao impacto menor do que o compósito de fibra de vidro, porém superior ao de luffa.

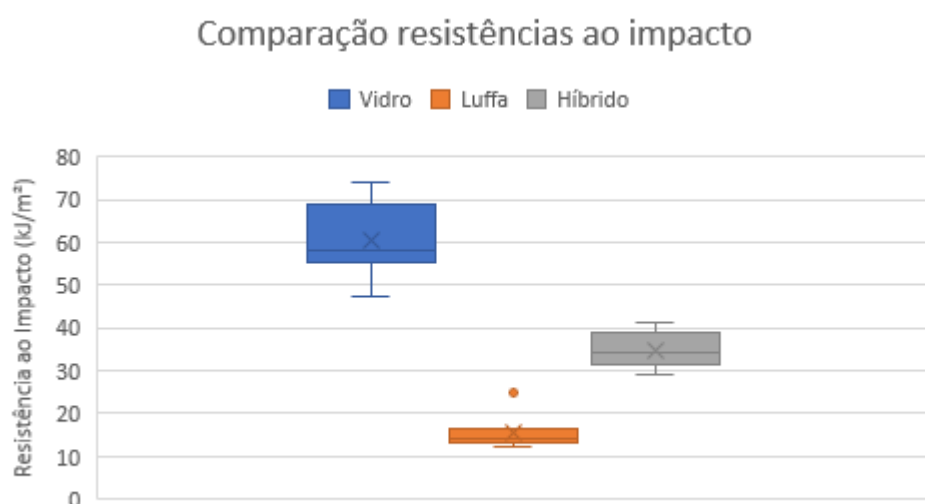


Figura 82 - Gráfico Bloxplot comparação das resistências ao impacto entre os compósitos de vidro, compósitos de luffa e compósitos híbridos envelhecidos a 60°C.

A respeito da resistência média dos compósitos, pode-se notar que o compósito de vidro apresenta uma resistência média de 73,34% maior do que o compósito híbrido. Por outro lado, quando comparado com o compósito de luffa, o compósito híbrido apresenta um aumento de resistência de 125,79%, mostrando que a hibridização é um modo eficiente de emprego das fibras de luffa em um ambiente agressivo.

A análise dos dados foi feita testando sua normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk. Não foi confirmada a normalidade dos dados ($p < 0,05$) devido a presença de um outlier no grupo de Luffa. A seguir, foi então realizada uma análise de Kruskal-Wallis para testar diferenças entre os grupos com relação a resistência de impacto para as amostras envelhecidas a 60°C e foi observada diferença estatisticamente significativa entre os materiais ($H_c = 23,14$; $p < 0,01$). Os resultados obtidos estão listados na Tabela 30.

Tabela 30 - Tabela teste de Dunn.

	Vidro	Luffa	Híbrido
Vidro		4,512E-06	0,04847
Luffa	4,512E-06		0,04847
Híbrido	0,04847	0,04847	

Foi possível observar maior diferença entre Vidro e Luffa ($p = 0,004512$; Dunn's test) do que entre Vidro e Híbrido ($p = 0,04847$; Dunn's test) ou Luffa e Híbrido ($p = 0,04847$; Dunn's test). Não foi encontrada diferença estatisticamente significativa entre vidro e híbrido e híbrido e luffa. Isso possivelmente ocorreu devido a uma dispersão grande dos dados, porém existe uma tendência da resistência ao impacto dos compósitos de luffa ser menor do que a resistência do compósito híbrido.

Após essas análises foi possível se chegar às seguintes observações:

- O grupo dos compósitos reforçados com fibra de vidro apresentou maior resistência ao impacto, como esperado.

- O grupo dos compósitos reforçados com fibra de *luffa* apresentou menor resistência ao impacto e observou-se elevada deterioração das propriedades após o envelhecimento a 60°C.
- Em nenhum dos grupos houve falha total nos compósitos.
- Foi observada uma mudança de coloração nos compósitos.
- O grupo dos compósitos híbridos apresentou resistência intermediária quando comparado com os compósitos de vidro e *luffa*.
- Os compósitos de fibra de vidro apresentaram delaminação. Os compósitos de fibra de *luffa* apresentaram perda de resina e trinca. Já os compósitos híbridos apresentaram trinca.
- O compósito híbrido apresentou boa eficiência, pois foi utilizada uma menor quantidade de fibra de vidro quando comparado com o compósito de fibra de vidro e apesar disso, o compósito híbrido não apresentou uma perda tão significativa de resistência ao impacto.

4.2.4. Comparação global do comportamento ao impacto.

Na Figura 83, está mostrada a resistência ao impacto dos compósitos de fibra de vidro em função do meio de envelhecimento. É possível ver que os valores médios são próximos e, na verdade, são estatisticamente iguais, mostrando que os envelhecimentos não afetaram significativamente a resistência ao impacto desse grupo de compósitos. Foi observado que nas amostras antes do envelhecimento e após envelhecerem a 60°C houve delaminação nas bordas e delaminação extensiva em algumas amostras. Já nas amostras envelhecidas a 25°C não houve delaminação aparente. Destaca-se também que nenhuma das amostras rompeu antes ou após o envelhecimento a 25°C e 60°C.

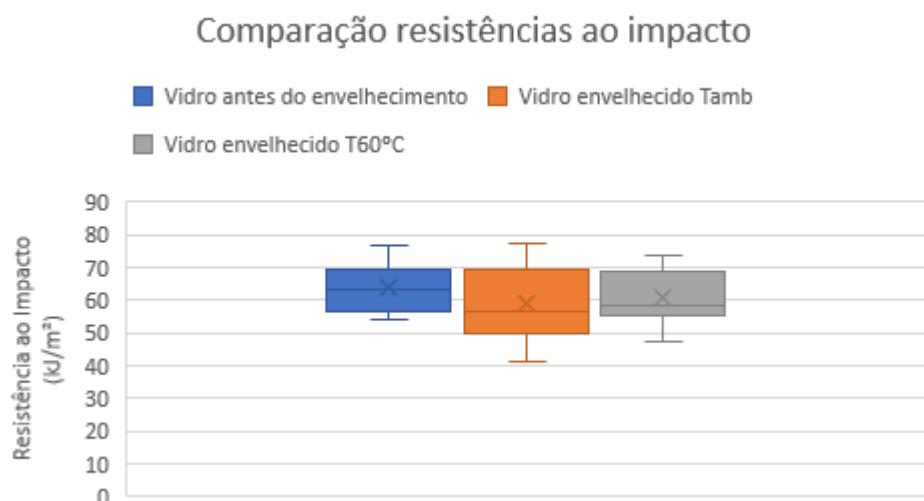


Figura 83 - Gráfico Bloxplot comparação entre as resistências ao impacto dos compósitos de fibra de vidro.

Para os compósitos de luffa, conforme mostrado na Figura 84, é possível ver que a resistência ao impacto cresceu tanto no envelhecimento a temperatura ambiente quanto no envelhecimento a 60°C. Esse comportamento foi associado a possível plastificação da matriz do compósito induzida pela absorção de água. De fato, os compósitos como fabricados romperam em duas partes após o impacto (Figura 50), enquanto nos compósitos envelhecidos não houve ruptura dos corpos de prova (Figuras 62 e 76). Além disso, conforme discutido anteriormente, o compósito envelhecido a 60°C teve um comportamento flexível e a maioria das amostras não apresentou nenhum tipo de defeito macroscopicamente visível. Em relação a perda de resina, foi observado que o fenômeno ocorreu nos compósitos envelhecidos em ambas temperaturas (25°C e 60°C).

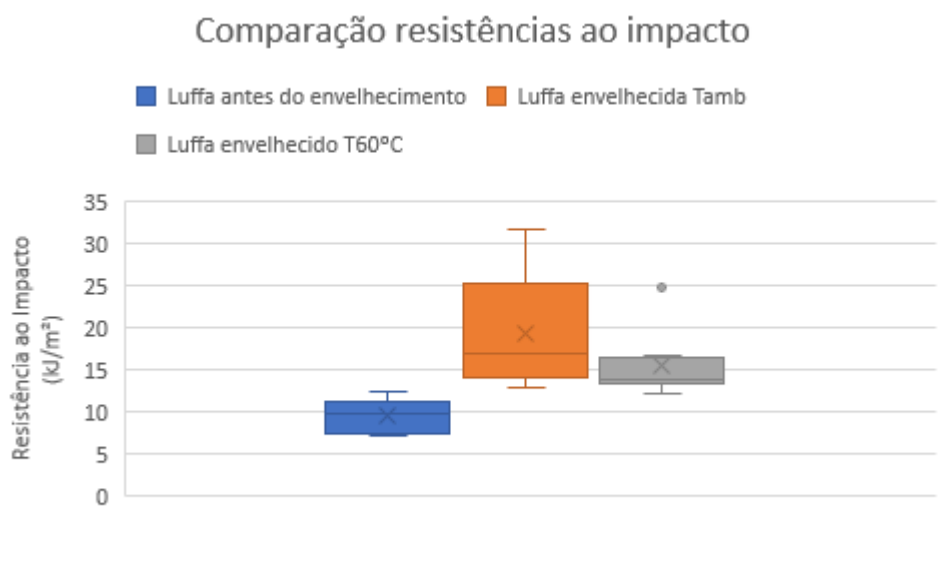


Figura 84 - Gráfico Bloxplot comparação entre as resistências ao impacto dos compósitos de fibra de luffa.

Na Figura 85, é possível ver que a resistência ao impacto do compósito híbrido diminui tanto no envelhecimento a temperatura ambiente quanto no envelhecimento a 60°C. Em relação ao modo de falha nenhum dos três grupos de amostras (antes e após envelhecer a 25°C e 60°C) apresentou rompimento. Foi observado que nos compósitos antes do envelhecimento e nos envelhecidos a 25°C não houve delaminação nas bordas. Já nos compósitos envelhecidos a 60°C, foi possível observar delaminação nas bordas, assim como, perda de resina.

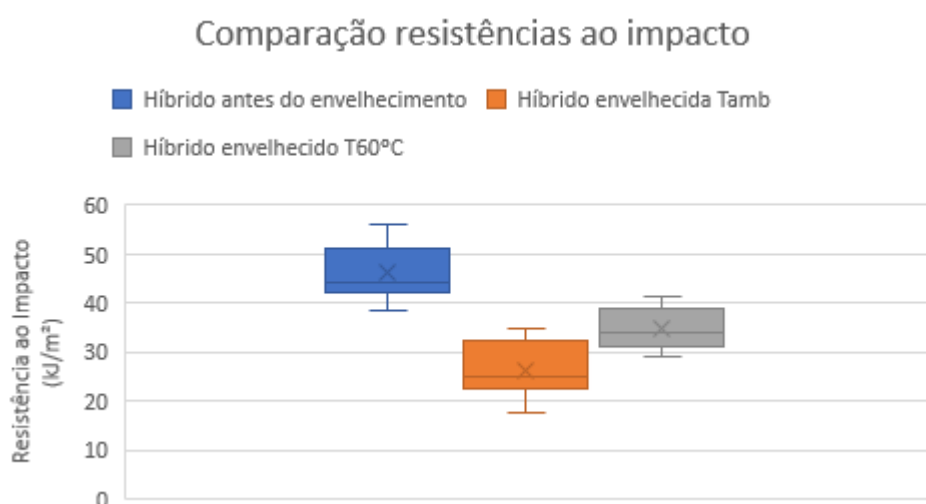


Figura 85 - Gráfico Bloxplot comparação entre as resistências ao impacto dos compósitos de híbridos.

Por fim, ao comparar as resistências ao impacto dos compósitos híbridos com os compósitos de luffa antes e após o envelhecimento é possível observar o seguinte para cada condição:

- Antes do envelhecimento os compósitos híbridos e os compósitos de luffa apresentaram resistência ao impacto de 46,23 kJ/m² e 9,65 kJ/m², respectivamente.
- Envelhecidos a 25°C os compósitos híbridos e os compósitos de luffa apresentaram resistência ao impacto de 26,23 kJ/m² e 19,45 kJ/m².
- Envelhecidos a 60°C os compósitos híbridos e os compósitos de luffa apresentaram resistência ao impacto de 34,93 kJ/m² e 15,47 kJ/m².

Com isso, nota-se que a diferença entre as resistências do híbrido e da luffa são maiores antes do envelhecimento. No envelhecimento a 25°C, a resistência ao impacto dos compósitos híbridos foi afetada pelo envelhecimento. Já a resistência ao impacto dos compósitos de luffa cresceu indicando uma possível plastificação da matriz, fazendo com que a diferença entre a resistência do compósito híbrido e do compósito de luffa diminuísse. No envelhecimento a 60°C, nota-se que a diferença entre as resistências ao impacto dos dois compósitos foi maior quando comparados ao envelhecimento a 25°C. Apesar disso, destaca-se que os valores de energia dos compósitos de luffa não foram valores gastos para romper o material, mas sim para ejetá-los dos dispositivos. Com isso, a resistência ao impacto dos compósitos de luffa pode não estar indicando valores corretos, dificultando a comparação.

4.3. Ensaio Sonoro

Ensaaios não-destrutivos foram usados para a análise do módulo elástico e do amortecimento dos materiais fabricados. Foram analisados 3 corpos de prova de cada tipo de compósito antes e após o envelhecimento nas duas temperaturas de envelhecimento (25°C e 60°C) e em dois tempos de envelhecimento a partir da técnica de pulso sonoro. Para cada corpo de prova foram obtidas 40 medidas.

As médias, desvios padrões e coeficiente de variação do módulo de elasticidade (E) e do fator de perda (Tan δ) obtidas nos ensaios sonoros para o compósito de fibra de vidro, luffa e híbrido serão apresentadas nos itens abaixo.

4.3.1. Compósito de fibra de vidro

A Tabela 31 mostra os valores das médias, desvio padrão e coeficiente de variação do módulo de elasticidade dos corpos de prova do compósito de fibra de vidro antes e após o envelhecimento na temperatura ambiente e a 60°C. É preciso destacar que as amostras testadas ao longo do tempo em cada temperatura de condicionamento foram sempre as mesmas. Por isso, há valores experimentais para $t = 0$ horas.

Ao analisar a tabela 31, percebe-se que as amostras tiveram queda no valor médio do módulo de elasticidade em sua primeira retirada em comparação com o valor referencial (não envelhecido), que em termos percentuais foi de 9,61% para as amostras condicionadas a 25°C e 14,07% para as amostras condicionadas a 60°C. Na segunda retirada houve um aumento nas médias do módulo de elasticidade para os dois envelhecimentos, que em termos percentuais foram de 7,48% para as amostras condicionadas a 25°C e 12,64% para as amostras condicionadas a 60°C.

Tabela 31 - Evolução do módulo de elasticidade do compósito fibra de vidro em função do tempo e da temperatura de envelhecimento.

Tempo (horas)	Envelhecimento	Módulo de elasticidade (GPa)	Desvio Padrão	C.V.
0	Não envelhecido	21,43	0,69	3,22%
1863	25°C	19,37	0,58	2,97%
2928	25 °C	20,82	0,43	2,06%
0	Não envelhecido	20,89	0,51	2,43%
1863	60 °C	17,95	0,77	4,30%
2928	60°C	20,22	1,74	8,59%

Entretanto, ao analisar a Figura 86, percebe-se que em relação as amostras dos compósitos de fibra de vidro envelhecidos a 25°C não há, estatisticamente, queda no módulo de elasticidade. Já nos compósitos envelhecidos a 60°C ocorre queda estatisticamente significativa na primeira retirada, mas não em relação a última retirada. Após 2.928 horas de absorção, o valor obtido não é estatisticamente diferente daquele obtido antes do envelhecimento, devido ao elevado desvio padrão.

De fato, pode-se observar que houve um aumento grande da variação dos resultados das amostras envelhecidas a 60°C em relação a amostra não envelhecida, o que pode indicar que o efeito combinado da temperatura e do tempo de imersão está levando a alterações na estrutura do compósito.

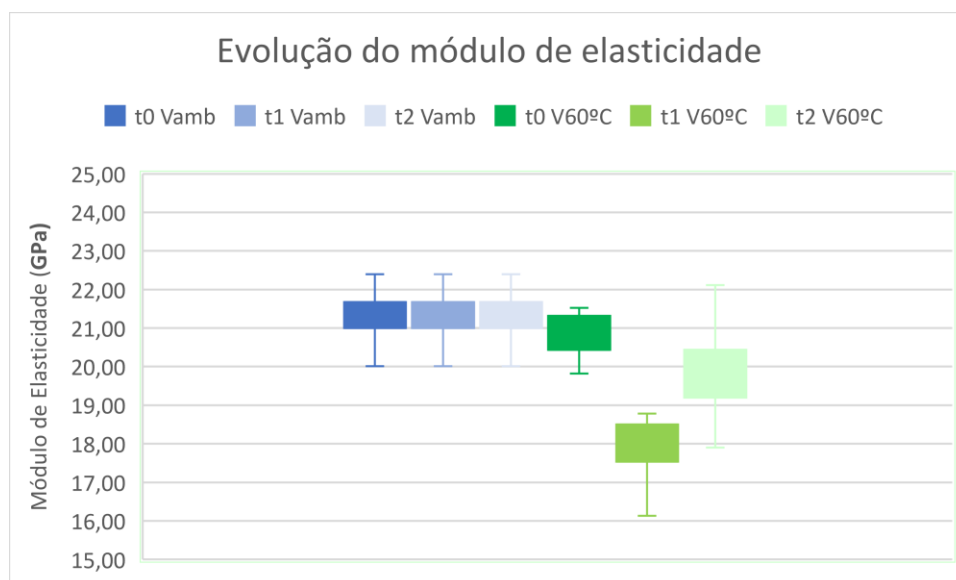


Figura 86 - Evolução módulo de elasticidade compósitos de fibra de vidro envelhecidos a 25°C e 60°C.

Uma possível explicação para isso é o fato de que a água gera plastificação da matriz e ocasiona a queda do módulo de elasticidade. Porém, com o aumento do tempo no qual o compósito permanece submerso na água, pode ocorrer inchamento da matriz [185] provocando o aumento das tensões interfaciais e, consequentemente, aumentando a rigidez do material por haver melhor transferência de tensão e, com isso, do módulo de elasticidade [186-191].

A Tabela 32 mostra os valores das médias, desvio padrão e coeficiente de variação do fator de perda ($\tan \delta$) para os corpos de prova dos compósitos de fibra de vidro antes e após o envelhecimento.

Para o envelhecimento a 60°C o comportamento observado seguiu a mesma tendência que o módulo de elasticidade. Para o primeiro tempo de envelhecimento há queda estatisticamente significativa do valor médio (76,60%), mas após 2.920 horas de envelhecimento o valor médio não é estatisticamente diferente do valor do material sem envelhecimento, Figura 87. Deve-se destacar, novamente, um grande

aumento do desvio padrão, indicando, possivelmente, uma maior heterogeneidade no material devido aos efeitos do envelhecimento.

Para 25°C não há diferença estatisticamente diferente entre o valor após 1.863 horas de envelhecimento e o valor do material não envelhecido (16,31% de queda em termos absolutos). Porém, houve um grande aumento de 113,70% após o segundo tempo de envelhecimento, diferente do que foi encontrado em relação ao módulo de elasticidade. O maior amortecimento pode estar correlacionado a maior quantidade de água absorvida após esse tempo de envelhecimento, que favorece a dissipação da energia.

Uma interação boa entre as fibras e a matriz, com boa adesão entre as fibras e a matriz e com interfaces sem defeitos, resultaria em uma menor variação do fator de amortecimento $\tan \delta$ ao ser comparado antes e após a absorção de água. Já para uma adesão fraca entre as fibras e a matriz e a presença de defeitos na interface, que possivelmente poderiam ser preenchidos por água e poderiam causar inchamento das fibras, levaria a uma variação maior do amortecimento. Seria esperado, então, que quando a quantidade de água absorvida for suficiente para reduzir a adesão interfacial deve haver um aumento do amortecimento quando comparado com o valor medido antes do envelhecimento, mostrando que o envelhecimento afetou mais o compósito [150].

Tabela 32 - Evolução do módulo de elasticidade compósito fibra de vidro em função do tempo e da temperatura de envelhecimento.

Tempo (horas)	Envelhecimento	$\tan \delta (10^{-6})$	Desvio Padrão	C.V.
0	Não envelhecido	12114,77	1051,72	8,68%
1863	25°C	10137,68	2416,38	23,83%
2928	25 °C	25889,75	3924,33	15,15%
0	Não envelhecido	18908,99	3315,67	17,53%
1863	60 °C	5179,88	1596,28	30,81%
2928	60°C	15525,28	26785,74	60,02%

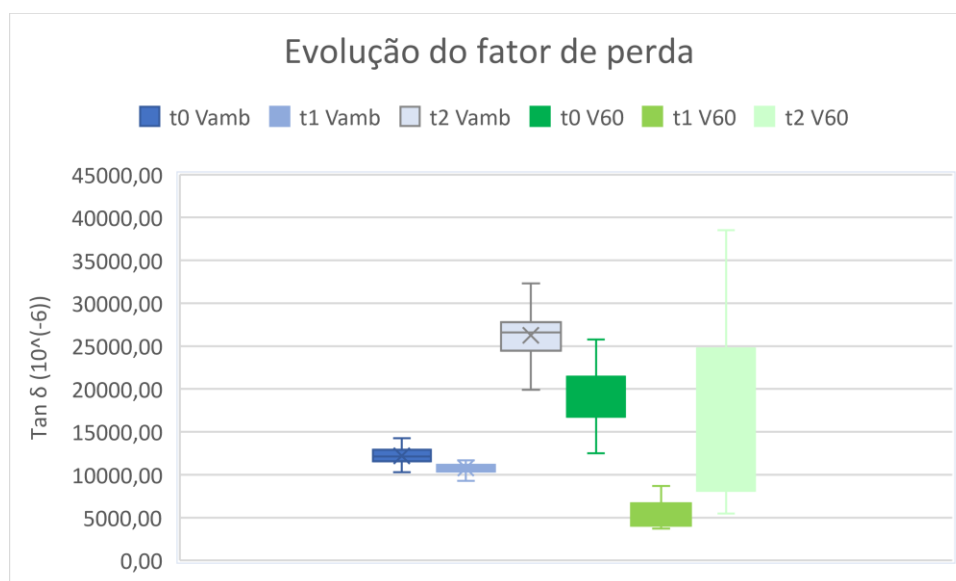


Figura 87 - Evolução do fator de perda dos compósitos de fibra de vidro envelhecidos a 25°C e 60°C.

4.3.2. Compósito de fibra de luffa

A Tabela 33 mostra os valores das médias, desvio padrão e coeficiente de variação do módulo de elasticidade dos corpos de prova dos compósitos de fibra de luffa antes e após o envelhecimento a 25°C e a 60°C. Ao analisar a tabela 33, percebe-se que para os compósitos envelhecidos na temperatura ambiente as amostras tiveram queda no módulo de elasticidade para ambos os tempos de envelhecimento, sendo as quedas de 25,10% e 4,39% respectivamente. Na verdade, conforme mostrado na Figura 88, não há diferença estatisticamente significativa entre os valores após 1.863 e 2.928 horas de imersão em água a 25°C. Já para os compósitos envelhecidos a 60°C as quedas foram de 33,58% e 58,20% na primeira e segunda retirada. Esses resultados concordaram com os resultados da resistência ao impacto que mostraram que há perda da rigidez do compósito devido a imersão em 60°C.

Tabela 33 - Evolução do módulo de elasticidade do compósito de fibra de luffa em função do tempo e da temperatura de envelhecimento.

Tempo (horas)	Envelhecimento	Módulo de elasticidade (GPa)	Desvio Padrão	C.V.
0	Não envelhecido	2,43	0,07	3,06%
1863	25°C	1,82	0,06	3,14%
2928	25 °C	1,74	0,03	1,91%
0	Não envelhecido	2,68	0,05	1,83%
1863	60°C	1,78	0,06	3,50%
2928	60°C	1,21	0,10	7,89%

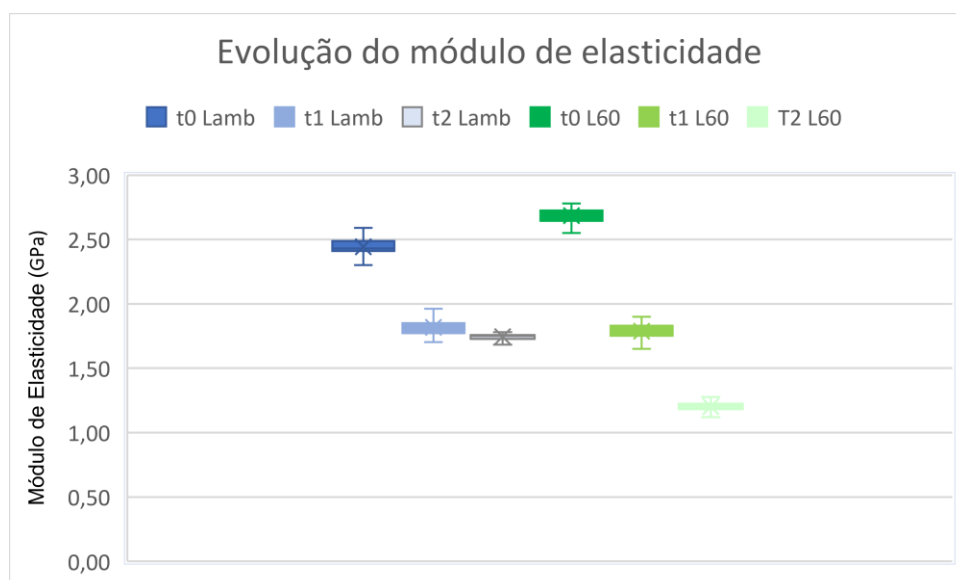


Figura 88 - Evolução módulo de elasticidade do compósito de fibra de luffa envelhecidos a 25°C e 60°C.

De maneira geral em ambos os envelhecimentos, o módulo de elasticidade dos compósitos de fibra de luffa mostrou queda no valor do módulo de elasticidade com o tempo de envelhecimento sugerindo que há plastificação da matriz e, como esperado, havendo maior efeito na maior temperatura de envelhecimento.

A Tabela 34 mostra os valores das médias, desvio padrão e coeficiente de variação do fator de perda ($\tan \delta$) para os corpos de prova dos compósitos de fibra de luffa antes e após o envelhecimento. Ao se analisar a tabela 34, percebe-se que houve aumento do fator de perda das amostras envelhecidas em comparação com o valor referencial (não envelhecido). Fica claro, entretanto, ao se analisar a figura,

que houve uma dispersão muito grande dos resultados. Qualitativamente, porém, os resultados concordam com o esperado, no sentido de que a absorção de água degradou a resistência ao impacto do compósito de fibra de luffa. Assim, é esperado que haja degradação das interfaces fibra/matriz e aumento do amortecimento.

Tabela 34 - Evolução do fator de perda dos compósitos de fibra de luffa em função do tempo e da temperatura de envelhecimento.

Tempo (horas)	Envelhecimento	Tan δ (10^{-6})	Desvio Padrão	C.V.
0	Não envelhecido	18947,39	5415,04	28,57%
1863	25°C	34026,06	4676,11	13,74%
2928	25 °C	76349,49	39964,35	52,34%
0	Não envelhecido	30825,36	5569,37	18,06%
1863	60 °C	48461,61	13934,42	28,75%
2928	60°C	41377,43	15459,09	37,36%

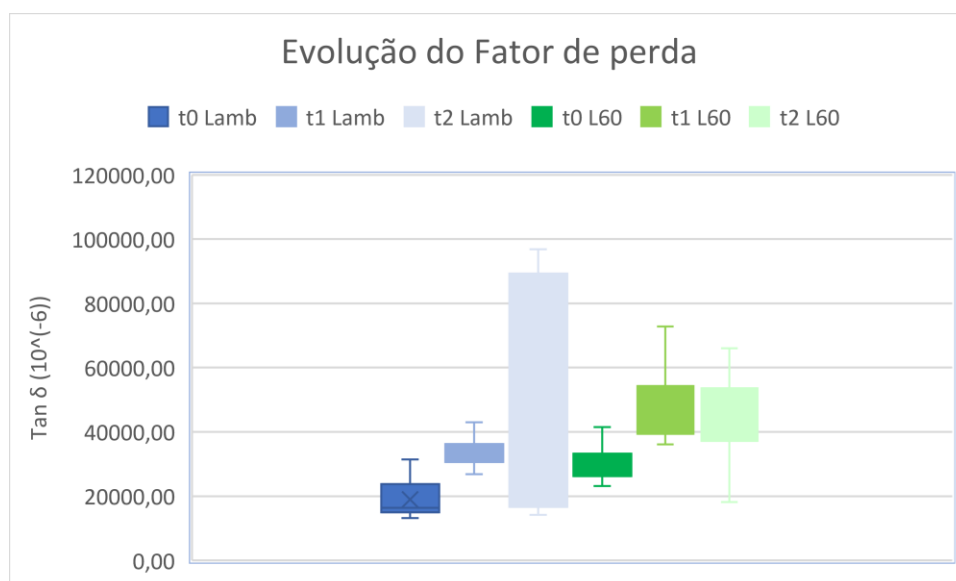


Figura 89 - Evolução do fator de perda dos compósitos de fibra de luffa envelhecidos a 25°C e 60°C.

4.3.3. Compósito híbrido

Os resultados para o compósito híbrido (Tabela 35 e Figura 90) mostraram que a hibridização foi efetiva em estabilizar o módulo de elasticidade do compósito, tanto no envelhecimento a 25°C quanto no realizado a 60°C.

Para os compósitos envelhecidos a 25°C as amostras tiveram, nominalmente, um acréscimo no módulo de elasticidade após 1.863 horas e uma queda após 2.928 horas de 0,95% e 4,26% respectivamente. Entretanto, como mostrado na Figura 90, os valores não são estatisticamente diferentes entre si. Esse comportamento foi semelhante ao observado para os compósitos de fibra de vidro (Figura 86) e indicam que a colocação das fibras de vidro na superfície dos compósitos protegeu de modo eficiente as fibras de luffa.

Já para os compósitos envelhecidos a 60°C houve uma queda inicial de 7,73% após 1.863 horas de imersão, mas há estabilização do valor do módulo entre os tempos de imersão. Ou seja, novamente houve proteção das fibras de luffa pela presença das fibras de vidro. É preciso destacar que a 60°C, o compósito de luffa sofreu degradação acentuada (Figura 88) o que não ocorreu ao haver a hibridização.

Tabela 35 - Evolução do módulo de elasticidade do compósito híbrido em função do tempo e da temperatura de envelhecimento.

Tempo (horas)	Envelhecimento	Módulo de elasticidade (GPa)	Desvio Padrão	C.V.
0	Não envelhecido	15,78	0,34	2,17%
1863	25°C	15,93	0,31	1,92%
2928	25 °C	15,25	0,38	2,48%
0	Não envelhecido	15,12	0,39	2,56%
1863	60°C	13,95	0,55	3,96%
2928	60°C	14,25	0,48	3,39%

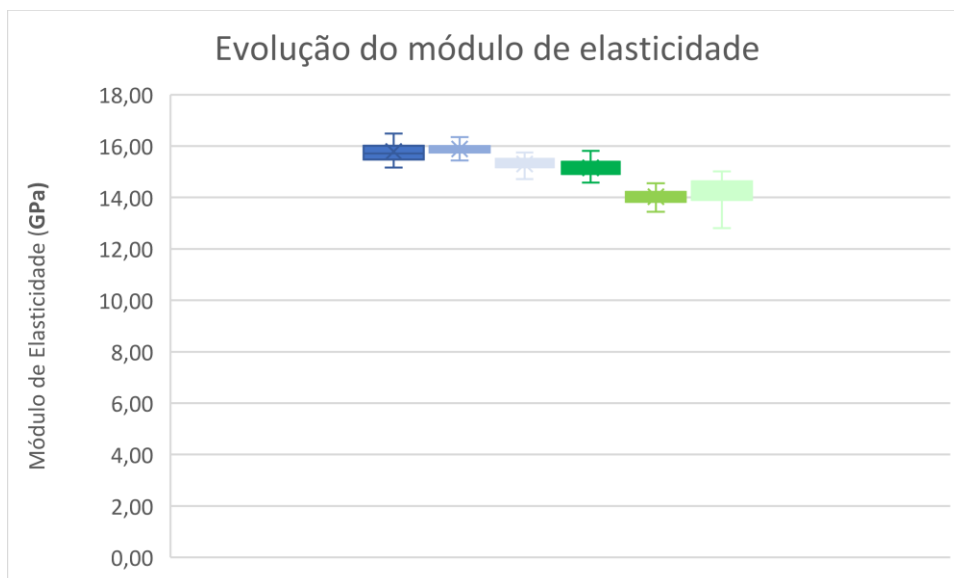


Figura 90 - Evolução do módulo de elasticidade dos compósitos híbridos envelhecidos a 25°C e 60°C.

A Tabela 36 mostra os valores das médias, desvio padrão e coeficiente de variação do fator de perda ($\tan \delta$) para os corpos de prova dos compósitos de híbridos antes e após o envelhecimento e o comportamento observado está mostrado na Figura 91.

Duas características podem ser destacadas. Há, como já observado nos outros gráficos referentes ao amortecimento uma grande dispersão dos dados, levando a obtenção de desvios padrão elevados. E, principalmente, pode-se observar que não há variação estatística entre os resultados, tanto a 25°C quanto a 60°C. Ou seja, embora haja tendência de aumento do valor médio, principalmente a 60°C, o valor do amortecimento, que está associado a evolução de danos no material, permaneceu constante, indicando que a hibridização atuou de modo eficiente para proteger as fibras de luffa.

Tabela 36 - Evolução do fator de perda dos compósitos híbrido envelhecidos em função do tempo e da temperatura de envelhecimento.

Tempo (horas)	Envelhecimento	Tan δ (10^{-6})	Desvio Padrão	C.V.
0	Não envelhecido	30231,71	9821,18	32,48%
1863	25°C	34489,48	6972,09	20,21%
2928	25 °C	32427,46	9567,45	29,50%
0	Não envelhecido	36217,06	5845,12	16,13%
1863	60 °C	37651,96	4941,70	13,12%
2928	60°C	43400,89	13461,32	31,01%

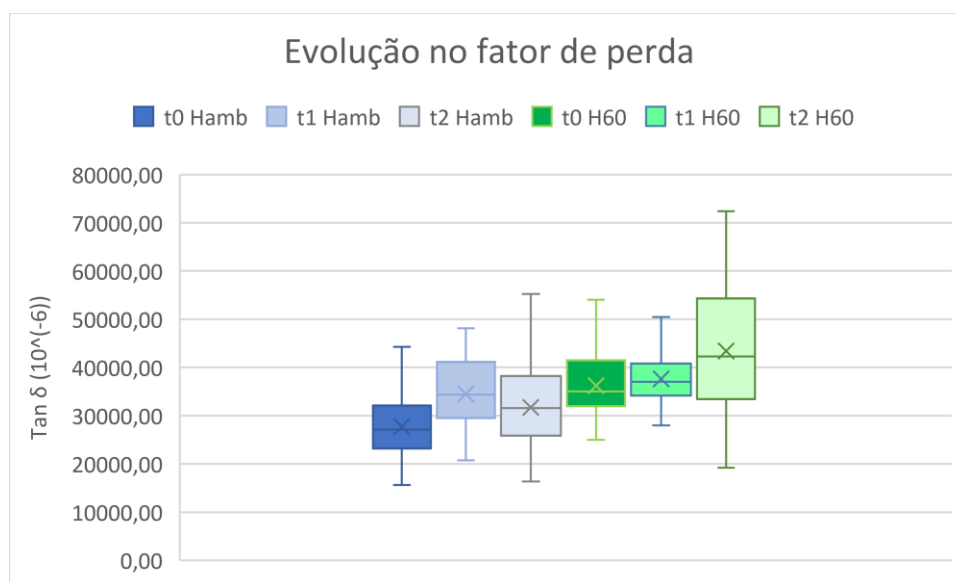


Figura 91 - Evolução do fator de perda dos compósitos híbridos envelhecidos a 25°C e 60°C.

Ao comparar o compósito antes do envelhecimento e o compósito saturado envelhecido a 25°C, nota-se que o fator de perda teve um crescimento de 7,26%, mostrando que o envelhecimento não prejudicou muito a interação entre as fibras e a matriz. Para os compósitos envelhecidos a 60°C, notou-se um acréscimo de 19,83% mostrando que o envelhecimento afetou mais o compósito.

4.4. Termografia

A técnica de termografia foi, tentativamente, utilizada para analisar a condutividade térmica dos compósitos desenvolvidos nesse trabalho.

Para o cálculo da condutividade térmica foi utilizada a equação 16:

$$q = \frac{k \Delta T}{L} \quad (16)$$

Onde:

q é o fluxo de calor (W/m^2)

ΔT é a variação de temperatura (K).

L é a espessura (m)

K é a condutividade térmica ($\frac{W}{mk}$)

Com esse objetivo, conforme descrito no item de materiais e métodos, corpos de prova foram colocados em uma placa quente com potência de 620 W e foi medido o tempo que cada amostra demorou para atingir 100°C, conforme mostrado na Tabela 37. Destaca-se que o tempo está representado pela média de 5 medições.

Tabela 37 - Tempo para atingir 100°C.

Compósito	Tempo (s)	Desvio Padrão	Condutividade Térmica
Vidro	30,00	1,41	0,26
Luffa	123,20	1,16	0,12
Híbrido	91,80	1,06	0,15

Foi possível observar que o compósito de fibra de vidro apresentou maior condutividade térmica e que o compósito de fibra de luffa apresentou menor condutividade térmica. Já o compósito híbrido apresentou condutividade térmica intermediária. Os valores calculados de condutividade térmica são condizentes com os valores encontrados na literatura [192-196]. Os resultados obtidos indicaram que é possível avaliar a condutividade térmica de materiais compósitos de maneira mais

simplificada do que o que é encontrado na literatura. Claramente, a técnica ainda pode ser aprimorada, principalmente em relação aos cuidados experimentais, mas os resultados foram promissores.

5. Conclusões

Os resultados do ensaio de envelhecimento indicaram que as curvas de absorção dos compósitos puderam ser modeladas pelo modelo de McKague. Além disso, os valores de absorção dos compósitos de fibra de vidro, fibra de luffa e híbrido, assim como, seus respectivos coeficientes de difusão mostraram-se condizentes com os valores encontrados na literatura. Os valores de saturação dos três grupos de compósitos também seguiram os valores esperados na literatura com exceção do compósito de fibra de luffa envelhecido a 60°C. Destaca-se que os compósitos de fibra de luffa foram os que apresentaram maior valor de absorção. Já no que se refere a saturação, os compósitos de fibra de vidro e híbrido envelhecidos a temperatura ambiente apresentaram maior tempo de saturação.

No que se refere a proteção e a absorção de umidade, a hibridização foi bem sucedida, visto que os compósitos híbridos apresentaram menor porcentagem de absorção quando comparados com os compósitos de luffa nas duas temperaturas de envelhecimento de 25°C e 60°C. De maneira geral, os compósitos envelhecidos a 60°C apresentaram valores finais de absorção próximos aos compósitos envelhecidos a 25°C.

Os resultados do ensaio destrutivo de impacto para os compósitos de fibra de vidro em função do meio de envelhecimento mostraram as resistências ao impacto possuem valores com pouca variação (63,64 kJ/m², 58,76 kJ/m² e 60,55 kJ/m²) para os compósitos antes e após o envelhecimento a 25°C e a 60°C, respectivamente, indicando que o envelhecimento não afetou significativamente a resistência ao impacto desse grupo de compósitos.

Os resultados do ensaio de impacto para os compósitos de fibra de luffa em função do meio de envelhecimento indicam que os valores de resistência tiveram uma variação significativa de 9,65 kJ/m², 19,45 kJ/m² e 15,47 kJ/m² antes do envelhecimento e após o envelhecimento a 25°C e 60°C, respectivamente. A variação antes e após o envelhecimento a 25°C indica uma possível plastificação da matriz. Já quando comparadas as resistências ao impacto dos compósitos de luffa antes e após o envelhecimento de 60°C, foi percebido que as amostras estavam muito flexíveis, dobrando na realização do ensaio de impacto. Com isso, é possível que os valores de resistência não sejam condizentes com o real, pois os valores de

energia de impacto não foram valores para romper as amostras, mas sim para ejetá-las.

Os resultados do ensaio de impacto para os compósitos híbridos em função do meio de envelhecimento mostraram que a resistência ao impacto teve uma variação significativa de 46,23 kJ/m², 26,22 kJ/m² e 34,93 kJ/m² antes o envelhecimento e após o envelhecimento a 25°C e 60°C respectivamente. Com isso, é possível observar que a resistência foi afetada com o envelhecimento.

Ao analisar o modo de falha dos compósitos, foi possível concluir que apenas as amostras dos compósitos de luffa envelhecidas a 25°C romperam. Em relação a perda de resina, o compósito de fibra de luffa foi o único grupo que apresentou tal defeito nos compósitos envelhecidos a 25°C e a 60°C. No que diz respeito a delaminação nas bordas e delaminação extensiva, foi observado o aparecimento nos compósitos de fibra de vidro e híbrido envelhecidos a 60°C.

Os resultados do ensaio sonoro mostraram que não há queda estatisticamente significativa no módulo de elasticidade em compósitos de fibra de vidro envelhecidos a 25°C. No entanto, houve uma queda estatisticamente significativa na primeira retirada dos compósitos envelhecidos a 60°C, mas não na última retirada. Devido ao aumento substancial na variação dos resultados das amostras envelhecidas a 60°C em relação à amostra não envelhecida, pode-se inferir que o efeito combinado da temperatura e do tempo de imersão está causando alterações na estrutura do compósito. Em relação ao amortecimento, não há diferença estatisticamente significativa entre o valor dos compósitos envelhecidos a 25°C após 1.863 horas de envelhecimento e o valor do material não envelhecido. No entanto, houve um grande aumento após o segundo tempo de envelhecimento, ao contrário do que foi observado em relação ao módulo de elasticidade. O maior amortecimento pode estar relacionado à maior quantidade de água absorvida após esse período de envelhecimento, o que favorece a dissipação da energia. Quanto aos compósitos envelhecidos a 60°C, o amortecimento seguiu a mesma tendência do módulo de elasticidade.

Os resultados do ensaio sonoro para os compósitos de fibra de luffa indicaram que os compósitos envelhecidos a 25°C apresentaram uma queda no módulo de elasticidade na primeira retirada, mas não houve diferença estatisticamente significativa entre os valores na segunda retirada. Já para os compósitos envelhecidos a 60°C, houve quedas consideráveis no módulo de

elasticidade na primeira e segunda retiradas, o que está em concordância com os resultados da resistência ao impacto que mostraram perda de rigidez do compósito devido à imersão em 60°C. Com relação ao amortecimento, houve aumento do fator de perda das amostras envelhecidas em comparação com o valor referencial (não envelhecido). Os resultados do amortecimento estão em concordância com o esperado, no sentido de que a absorção de água degradou a resistência ao impacto do compósito de fibra de luffa. Assim, é esperado que haja degradação das interfaces fibra/matriz e aumento do amortecimento.

Os resultados do ensaio sonoro para os compósitos híbridos mostraram que o módulo de elasticidade dos compósitos envelhecidos a 25°C e a 60°C não apresentaram diferença estatística entre os tempos de envelhecimento, indicando que a colocação das fibras de vidro na superfície dos compósitos protegeu de modo eficiente as fibras de luffa que haviam sofrido degradação acentuada a 60°C, o que não ocorreu ao realizar a hibridização. Com relação ao amortecimento, embora haja tendência de aumento do valor médio, principalmente a 60°C, o valor do amortecimento, que está associado a evolução de danos no material, permaneceu constante, indicando que a hibridização atuou de modo eficiente para proteger as fibras de luffa.

Os resultados da termografia mostraram que o ensaio foi eficaz para determinar a condutividade térmica dos compósitos, pois os valores encontrados dos compósitos de fibra de vidro, fibra de luffa e híbrido mostraram-se condizentes com os padrões encontrados na literatura.

Por fim, foi possível concluir que a hibridização foi eficiente, pois os compósitos híbridos apresentaram absorção e resistência ao impacto intermediárias aos compósitos de fibra de vidro e fibra de luffa. Além disso, a hibridização protegeu as fibras de luffa conforme foi visto pela análise do ensaio sonoro. Finalmente, ressalta-se que os compósitos híbridos ainda apresentam como principais vantagens o fato de serem compósitos mais baratos e mais ecologicamente corretos, pois utilizam menor quantidade de fibra de vidro.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Em relação a trabalhos futuros recomenda-se:

- Aumentar o número de amostras nos ensaios de impacto para evitar que *outliers* possam interferir na análise da resistência ao impacto.
- Ampliar o ambiente de envelhecimento, sendo sugerido envelhecimento em água salina, pois inúmeros compósitos são empregados em ambientes próximos ao mar.
- Realizar o ensaio de termografia para a detecção de defeitos nos compósitos e padronizar os parâmetros do ensaio.

6. Referências Bibliográficas

- [1] K. S. Dunnett, R. M. Mueller, and D. P. Bishop. Development of Al–Ni–Mg–(Cu) aluminum P/M alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.198, pp. 31-40, 2008.
- [2] S. S. Su, I.T.H. Chang, and W. C. H. Kuo. Effects of processing conditionson the sintering response of hypereutectic Al-Si-Cu-Mg P/M alloys. *Materials Chemistry and Physics*, vol. 139, pp. 775-782, 2013.
- [3] Aluminium PM 'is a challenge that industry can overcome, The German Government has sponsored a research project that shows aluminium PM to be a promising area for auto industry component suppliers, 0026- 0657/05, pp. 3237, march 2005.
- [4] CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução*, Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- [5] AZWA, Z. N., YOUSIF, B. F., MANALO, A.C. et al., A Review on the Degradability of Polymeric Composites Based on Natural Fibres, *Materials and Design*, v. 47, pp. 424 – 442, 2013.
- [6] KIM, J. T.; NETRAVALI, A. N. Mercerization of Sisal Fibers: Effect of Tension on Mechanical Properties of Sisal Fiber and Fiber-ReinforcedComposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 41,pp. 1245–1252, 2010
- [7] PAIVA, J. M. F., FROLLINI. E., Natural Fibers Reinforced Thermoset Composites. In: FROLLINI, E., LEÃO, A., MATTOSO, L. H. C. (eds), *Natural Polymers and Agrofibers Based Composites*, 1 ed., chapter 10, São Paulo, Brasil, Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2000.

- [8] SHALWAN, A., YOUSIF, B. F., In State of Art: Mechanical and Tribological Behaviour of Polymeric Composites Based on Natural Fibres, Materials and Design, v. 48, pp. 14 – 24, 2013.
- [9] MOHAN, R., KISHORE, A. J., Reinforced Plastic Composites, v.4, pp. 186-194, 1985.
- [10] BOYNARD, C. A., & D'ALMEIDA, J. R. M. (1999). Water absorption by sponge gourd (*luffa cylindrica*)-polyester composite materials. Journal of Materials Science Letters, 18(21), 1789–1791.
- [11] SOUZA, L.R. Efeitos do envelhecimento em água e óleo lubrificante sobre o comportamento à fluência de material compósito de matriz polimérica reforçada por fibra de vidro. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio.
- [12] AVENA, A., BUNSELL, A. R., 1988, Effect of hydrostatic pressure on the water absorption of glass fibre-reinforced epoxi resin. Composites, v. 19, pp. 355-357
- [13] SRIHARI, S; REVATHI, A.; RAO, R. M. V. G. K. Hygrothermal effects on RT-cured glass-epoxi composites in immersion environments. Part A: Moisture absorption characteritics. Journal of Reinforced Plastics and Composites, v.21, n.11, p. 983-991, 2002.
- [14] ESPERT, A.; VILAPLANA, F.; KARLSSON, S.; Comparison of Water Absorption in Natural Cellulosic fibres from Wood and One-year Crops in Polypropylene Composites and Its Influence on their Mechanical Properties. Composites: Part A 35 (2004), p1267-1276, 2004.
- [15] SILVA, ROSANA & RUPP. (2015). Efeito Da Absorção D'água Na Degradação De Compósitos Híbridos Com Fibras Naturais. 651-659. 70º Congresso Anual da ABM.
- [16] HOUGH J.A, XIANG Z.D, JONES F.R. The effect of thermal spiking and

resultant enhanced moisture absorption on the mechanical and viscoelastic properties of carbon fibre reinforced epoxy laminates. *Composites Science and Technology*. v.65, n.7-8, p.1299-1305,2005

[17] MAXWELL, Antony & Broughton, W. & DEAN, G & Sims, Graham. (2005). Review of Accelerated Ageing Methods and Lifetime Prediction Techniques for Polymeric Materials. NPL Report DEPC MPR 016.

[18] JUNIOR, F.A.F. Efeito do envelhecimento acelerado em compósitos de fibra de vidro/epóxi usados para revestimento de dutos. Trabalho de conclusão de curso Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte

[19] REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. Compósitos estruturais: Tecnologia e prática. São Paulo: Artliber Editora, 2011, p. 22 – 75.

[20] JONES, R. M. *Mechanics of composite materials.*; ed.2, Taylor & Francis, Inc. 1999.

[21] KAW, K. *Mechanics of Composite Materials.*; A CRC title, part of the Taylor & Francis imprint, a member of the Taylor & Francis Group, the academic division of T&F Informa plc. ed 2., Nova Iorque, CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.

[22] HULL, D. *An Introduction to Composite Materials*. UK: Cambridge Univ. Press. Cambridge, ed.1, 1981.

[23] BIANCHI, O; Propriedades de materiais compósitos: Interface entre fases. Disponível em: < <https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/18-07-18-propriedades-compositos-interface-fases.pdf>> Acesso em janeiro de 2020.

- [24] BEQ. Materiais compósitos: um dos maiores avanços. Disponível em: <<https://betaeq.com.br/index.php/2017/05/19/materiais-compositos/>> Acesso em setembro de 2019
- [25] CALLISTER Jr, W.D.; RETHWISCH, D.G. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [26] HAGE, Jr., E.; Compósitos e Blendas Poliméricas, Campinas, Instituto Latino Americano e IBM, 1989.
- [27] PANZERA, T. H.; Rubio, J.C.C. Estudo do Comportamento Mecânico de um Compósitos Particulado de Matriz Polimérica. Disponível em: <www.demec.ufmg/Grupos/Usinagem/composito.html> Acesso em fevereiro de 2020
- [28] SHACKELFORD, J. F. *Materials Science for Engineers*. 6.ed. Pearson Prentice Hall. New Jersey – USA, 2005.
- [29] IST.Materiaiscompósitos.Disponível.em<<http://disciplinas.ist.utl.pt/qgeral/mecanica/MatComp.pdf>> Acesso em set.: 2019
- [30] AGARWAL, B. D.. Analysis and performance of fiber composites. 3.ed., 2006 by John Wiley & Sons, Inc. 2006.
- [31] VAN VLACK, L. H. Princípio de Ciência dos materiais. 13ª edição. São Paulo: Edgard Blücher LTDA., 2000.
- [32] ZHOW, J., LUCAS, J. P., “Hygrothermal Effects of Epoxy Resin. Part I: The Nature of Water in Epoxy”, Polymer, v.40, 1999.
- [33] Encyclopedia Britannica. Major industrial polymers. Disponível em: <<https://www.britannica.com/topic/industrial-polymers-468698>> Acesso em: jun.: 2020

- [34] OZTURK, A., KAYNAK, C., TINCER, T., Effects of Liquid Rubber Modification on The Behaviour of Epoxy Resin, *European Polymer Journal*, v. 37, pp. 2353 – 2363, 2001.
- [35] CARDOSO, P.H.M. Efeito do tratamento alcalino/mecânico de fibras de curauá nas propriedades de laminados compósitos de matriz epóxi. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.
- [36] Costa, M. L., Rezende, M. C., & Pardini, L. C. (1999). Métodos de estudo da cinética de cura de resinas epóxi. *Polímeros*, 9(2), 37–44.
- [37] Mariane M. S. P. de Abreu, Carlos Y. Shigue, Pedro C. de Oliveira, Alain L. M. Robin, Carlos A. Baldan, Ernesto Ruppert Filho (2007). Determinação dos estágios de gelificação e de vitrificação na cura de um sistema epóxi-aminapóxi por análises dielétrica e dinâmico-mecânica. 9º Congresso Brasileiro de Polímeros.
- [38] MARCZAK, R. J. Polímeros como materiais de engenharia. UFSCar, São Carlos - SP, 2004.
- [39] ABDOL, T.R. Recuperação de fibras de carbono presentes em descarte industrial de compósito polimérico. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade de São Paulo. 2016.
- [40] CHEKER, DANIELLA CRISTINA RABELO DA SILVA. Compósitos de matriz polimérica para sistemas de água para combate a incêndio. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- [41] BENTUR, A.; MINDESS, S. - Fiber Reinforced cementitious composites. Londres: Elsevier applied science, Elsevier Applied Science, London, 1990.

- [42] ALBUQUERQUE. R. J. Desenvolvimento De Material Compósito Para Reforço De Dutos De Aço. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2005.
- [43] CHAWLA, K. K., Composite Materials, Science and Engineering, 2 ed. New York, Springer-Verlag, 1998.
- [44] DIPROFIBER. Fibras de vidro. Disponível em<<https://diprofiber.com.br/fibra-de-vidro>> Acesso em: Jun.2020.
- [45] ZSIROS. J. A. Natural Fibers and Fiberglass: A Technical and Economic Comparison. Thesis (Master of Scienc) - School of Technology Brigham Young University. 2010.
- [46] AQUINO, RCMP; Desenvolvimento de compósitos de Fibras de Piaçavada espécie Attalea Funifera e Matriz de Resina., Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) Rio de Janeiro, UENF, Universidade Estadual do Norte Fluminense, (2004). P-13.
- [47] JOHN, M. J.; THOMAS, S. Review-biofibres and biocomposites. Carbohydrate Polymers, n.71, p. 343–364, 2008.
- [48] SATYANARAYANA, K.G.; GUIMARÃES, J.L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. Composites: Part A, v. 38, p. 1694-1709, 2007.
- [49] PAULA, G.P. Formulação E Caracterização De Compósitos Com Fibras Vegetais E Matriz Termoplástica. Dissertação (Ciência dos Materiais) Rio de Janeiro, UENF, Universidade Estadual do Norte Fluminense, (2011). P-9.
- [50] PARK, J.M.; QUANG S. T.; HWANG B.-S.; DEVRIES, K. L.. Interfacial evaluation of modified Jute and Hemp fibers/polypropylene (PP)-maleic anhydride polypropylene copolymers (PP-MAPP) composites using micromechanical technique and nondestructive acoustic emission. Composites Science and Technology 66 (2006).

- [51] VENTURA, A. M. F.M.; Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. Disponível em: <
http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S087083122009000200003 > Acesso em janeiro de 2020.
- [52] SANTOS, C.M.S. Extração e caracterização das fibras do mamoeiro. Dissertação Programa de Pós-graduação em Engenharia Têxtil. Universidade federal do Rio Grande do Norte centro de tecnologia. 2019.
- [53] CÉLINO, A., FRÉOUR, S., JACQUEMIN, F., CASARI, P. The hygroscopic behavior of plant fibers: a review. *Frontiers in chemistry*, v. 1, p. 1-12, 2014.
- [54] M. W. K. P. Silva, R. H. G. RANIL, e R. M. FONSEKA, *Luffa cylindrica* (L.)M . Roemer (Sponge Gourd- Niyan wetakolu): An Emerging High Potential Underutilized Cucurbit, *Trop. Agric. Researc*, vol. 23, no 2, p. 186–191, 2012.
- [55] BISOGNIN, D.A. Origin and evolution of cultivated cucurbits. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.32, n.5, p.715-723, 2002.
- [56] D' ALMEIDA, A. L. F. S., BARRETO, D. W., CALADO, V., & D' ALMEIDA, J. R. M. (2006). Effects of Derivatization on Sponge Gourd (*Luffa cylindrica*) Fibres. *Polymers and Polymer Composites*, 14(1), 73–80.
- [57] BOYNARD, C. A.; MONTEIRO, S. N.; d'ALMEIDA, J. R. M. Aspects of alkali treatment of sponge gourd (*Luffa Cylindrica*) fibers on the flexural properties of polyester matrix composites. *Journal of Applied Polymer Science*, Nova Iorque, v.87, p. 1927-1932, 2003.
- [58] SHEN, J., Min Xie, Y., HUANG, X., ZHOU, S., & RUAN, D. (2012). Mechanical properties of luffa sponge. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 15, 141–152.
- [59] G. Siqueira, J. Bras, and A. Dufresne, *Luffa cylindrica* as a lignocellulosic source of fiber, microfibrillated cellulose, and cellulose nanocrystals. *BioResources*, vol. 5, no. 2, pp. 727–740, 2010.

- [60] Alshaaer, M., Mallouh, S. A., Al-Kafawein, J., Al-Faiyz, Y., Fahmy, T., Kallel, A., & Rocha, F. (2017). Fabrication, microstructural and mechanical characterization of Luffa Cylindrical Fibre - Reinforced geopolymer composite. *Applied Clay Science*, 143, 125–133. doi:10.1016/j.clay.2017.03.030
- [61] MOHANTA, N. A.; ACHARYA, S. K. Investigation of mechanical properties of luffa cylindrica fibre reinforced epoxy hybrid composite. *International Journal of Engineering, Science and Technology* Vol. 7, No. 1, 2015, pp. 1-10.
- [62] SABEEL A, K. VIJAYARANGAN S. 2008. Tensile, flexural and interlaminar shear properties of woven jute and jute-glass fabric reinforced polyester composites. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 207, pp. 330-335.
- [63] MESQUITA, Fausto Nogueira de Almeida. Simulação do comportamento mecânico de tubos em PRFV submetidos à pressão hidrostática. 2008. 124 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas)-Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- [64] RODRIGUES, L.P.S. Efeitos do envelhecimento ambiental acelerado em compósitos poliméricos. Defesa: 12/2007. 127 páginas. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – RN.
- [65] MERDAS, I., THOMINETTE, F., THARKHTCHI, A., VERDU, J., 2002, “Factores governing water absorption by composite matrices”, *Composites Science and Technology*, v. 62, pp. 487-492.
- [66] ODEGARD, G.M, BANDYOPADHYAY, A. Physical aging of epoxy polymers and their composites. *Journal Of Polymer Science Part: Polymer Physics*, 2011;n.49, p.1695-716. Disponível em: < <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/polb.22384>>. Acesso em 12 Jun 2020.
- [67] BARBOSA, A. P. C. et al. Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites. Elsevier, p. 298-306, 2016.

- [68] JENNINGS, C. W., “Surface Preparation for Adhesive Bonding”, Applied Polymer Symposium, nº 19, pp.49-61, 1972.
- [69] BERGERET, A., PIRES, I., FOULC, M. P., ABADIE, B., FERRY, L., CRESPIY, A., “The Hygrothermal Behaviour of Glass Fibre Reinforced Thermoplastic Composite: A Prediction of the Composite Lifetime”, Centre des Matériaux de Grande Diffusion, Ecole des Mines d’Alés, 1995.
- [70] AFONSO, R.C.O. Estudo da adesividade de material compósito em substrato de aço para dutos. Tese - Programa de pós-graduação em engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2004.
- [71] LAWRENCE, S. St., WILLETT, J. L., CARRIERE, C. J., “Effect of Moisture on the Tensile Properties of Poly (Hydroxy Ester Ether)”, Polymer, v.42, pp. 5643-5650, 2001.
- [72] D. SCIDA, Z. ABOURA, M.L. BENZEGGEGH, The effect of aging on the damage events in woven-fiber composite materials under different loading conditions, J. Compos. Sci. Technol. 62 (2002) 551–557.
- [73] K. IMIELINSKA, L. GUILLAUMAT, The effect of water immersion ageing on lowvelocity impact behavior of woven aramid-glass fiber/epoxycomposites, J. Compos. Sci. Technol. 64 (2004) 2271–2278.
- [74] LIAO, K., SCHULTHEISZ, C. R., HUNSTOUN, D. L., “Effects of Environmental Aging on the Properties of Pultruded GFRP”, Composites.PartB:Engineering, v.30, pp.485-493, 1999.
- [75] THOMASON, J. L., The Interface Region in Glass Fibre-Reinforced Epoxy Resin Composites :2. Water Absorption, Voids and the Interface, Composites, v.26, pp. 477- 485, 1995.
- [76] COSTA, M. L. Estudo do conteúdo de vazios no comportamento mecânico de compósitos avançados carbono/epóxi e carbono/bismaleimida. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 200 f., 2002.

- [77] Alawsi, Ghydaa & Aldajah, Saud & Rahmaan, Safa. (2009). Impact of humidity on the durability of E-glass/polymer composites. *Materials & Design*. 30. 2506-2512. 10.1016/j.matdes.2008.10.002.
- [78] Antônio, José & Cunha, P & Costa, Michelle & Rezende, M.C.. (2006). Influência de diferentes condições higrotérmicas na resistência a tração de compósitos de fibra de carbono/Epóxi modificada. *Polímeros*. 2006.
- [79] LEITE. C.G.C.L. Desenvolvimento E Caracterização De Tubos Compósitos Para Aplicação Em Risers Rígidos. Dissertação (Engenharia). Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro (2011).
- [80] - ESLAMI S, HONARBAKHSR-RAOUF A, ESLAMI SH (2015). Effects of moisture absorption on degradation of E-glass fiber reinforced Vinyl Ester composite pipes and modelling of transient moisture diffusion using finite element analysis. *Corrosion Science* 90: 168–175.
- [81] GEORGE SC, Thomas S. Transport phenomena through polymeric systems. *Progress in Polymer Science*. 2001; 26(6): 985-1017
- [82] YAMPOLSKII, Y.; PINNAU, I.; FREEMAN, B. D. *Materials Science of membranes for gas and Vapor Separation*. 1st edition. John Wiley & Sons Ltd. England. 2006.
- [83] BENINI, Kelly Cristina Coelho de Carvalho. Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas: HIPS / fibra de casca do coco verde e bagaço de cana de açúcar. 2011. 125 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/99334>>.
- [84] PERREUX, D., SURI, C., A Study of the Coupling the Phenomena of Water Absorption and Damage in Glass/Epoxy Composite Pipes, *Composites Science and Technology*, v.57, pp. 1403-1413, 1997.
- [85] FRISH HL. Sorption and transport in glassy polymers - A review. *Polymer Engineering and Science*. 1980; 20(1): 2-13.

- [86] JONES, Graham & J. Summerscales. Marine Applications of Advanced Fibre-reinforced Composites. University of Plymouth, UK. 2016
- [87] RITGER PL, PEPPAS NA. A simple equation for description of solute release II. Fickian and anomalous release from swellable devices. Journal of Controlled Release. 1987; 5(1): 37-42.
- [88] FARIA, M. C. M. (2008). Avaliação do efeito higrotérmico nas propriedades mecânicas de compósitos de PPS/fibras contínuas. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.
- [89] KAILAS.S.V.Chapter5.Diffusion.Disponível em:<https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/112108150/pdf/Lecture_Notes/MLN_05.pdf>. Acesso em Abril de 2020.
- [90] BOND DA, Smith PA. Modeling the transport of low-molecular-weight penetrants within polymer matrix composites. Applied Mechanics Reviews. 2006; 59(5): 249-268.
- [91] MARSHALL, J. M., HOPE, P. S., WARD, I. M., Sorption and Diffusion in Highly Oriented Polyethylene, Polymer Reports, v.23, pp. 22-23, 1982.
- [92] SOBRINHO, L., FERREIRA, M., & BASTIAN, F. L. (2009). The effects of water absorption on an ester vinyl resin system. Materials Research, 12(3), 353–361.
- [93] SPRINGER, A., C., SPRINGER, G. S., SANDERS, B. A., Moisture Absorption of Polyester-EGlass Composites, Journal Composite Materials, v.14, pp. 142-153, 1980.
- [94] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 5229/D 5229M: Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials. United States., p. 24. 2004.

- [95] Viviane Gonzalez, Marysilvia Ferreira da Costa, Ilson Paranhos Pasqualino. (2009). Influência da temperatura no comportamento mecânico do polifluoreto de vinilideno. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros.
- [96] SALA, G., Composite Degradation Due to Fluid Absorption, Composites.Part B. Engineering, v.31, pp. 357-373, 2000.
- [97] KAWAGOE, M., TAKESHIMA, M., NOMIYA, M. et al., Microspectroscopic Evaluations of the Interfacial Degradation by Absorbed Water in a Model Composite of an Aramid Fibre and Unsaturated Polyester, Polymer, v.40, pp.1373-1380, 1999.
- [98] BARCELLOS, I. O.; SOUZA, A. C.; SELKE, A. E.; Incorporação de Lodo Industrial em Compósitos de Resina Poliéster. Departamento de Química, Universidade Regional de Blumenau, SC, 2009. Disponível em: Acesso em: 6 de novembro de 2012.
- [99] PIOVESAN, M., BERTOLETTI, L., ALTMAYER. S., VORPAGEL, T et al., Glass Fiber: Characterization, Disposal And Environmental Impact Generated, REGET, v.10, 2013.
- [100] BITTENCOURT, A. P. P., DUTRA, G. B., & TANCREDI, T. P. (2016). Efeitos dos processos de laminação sobre as propriedades físicas e mecânicas de compósitos de resina de poliéster com fibras de vidro. Matéria (Rio de Janeiro), 21(4), 1021–1031.
- [101] TUCKER, W. C. and R. BROWN. 1989. Moisture Absorption of Graphite/Epoxy Polymer Composites Under 2000 Feet of Seawater. J. of Composite Materials, Vol. 23, p. 787.

- [102] ROWELL, R. M.; SANADI, A. R.; CAULFIELD, D.F.; JACOBSON, R.E. Utilization of natural fibers in plastic composites: Problems and opportunities. 1^a International Lignocellulosics Plastics Composites. São Paulo, p.23-51, 1996.
- [103] CRUZ, V. C. A., NOBREGA, M. M. S., SILVA, W. P., CARVALHO, L. H., LIMA, A. G. B. An experimental study of water absorption in polyester composites reinforced with macambira natural fiber. *Mat.-wiss. u.Werkstofftech.* 42, No. 11, 2011.
- [104] ROUISEON, D.; COUTURIER, M.; SAIN, M.; MACMILLAN, B.; BALCON, B. J. Water absorption of hemp fiber/unsaturated polyester composites. *Polymer Composites*, v. 26, n. 4, p.510-524, 2005.
- [105] GASSAN, J. A Study of fibre and interface parameters affecting the fatigue behaviour of natural fibre composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 33, n. 3, p. 369-374, 2002.
- [106] ALBINANTE, S, R. M.; PACHECO, E. B.; VISCONTE, L.L.; Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas. *Química Nova*. vol.36 no.1 São Paulo 2013.
- [107] ANBUKARASI, K., & KALAISELVAM, S. (2015). Study of effect of fibre volume and dimension on mechanical, thermal, and water absorption behaviour of luffa reinforced epoxy composites. *Materials & Design* (1980- 2015), 66, 321–330.
- [108] SILVA, F, A; Tenacidade de materiais compósitos não convencionais, Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil) Rio de Janeiro, PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, (2004).
- [109] HANCOX, N. L. (2000). An overview of the impact behaviour of fibre-reinforced composites. *Impact Behaviour of Fibre-Reinforced Composite Materials and Structures*, 1–32.
- [110] MARINUCCI, G. (2011) *Materiais Compósitos Poliméricos- Fundamentos e tecnologia*. 1. ed. São Paulo: Artliber, 333p.
- [111] RICHARDSON, M. O. W., & Wisheart, M. J. (1996). Review of low-velocity impact properties of composite materials. *Composites Part A: Applied*

Science and Manufacturing, 27(12), 1123–1131.

[112] GARCIA, A; SPIM, J, A; SANTOS, C, A; Ensaios dos Materiais. 2.ed. Rio de Janeiro. LTC. 1999. p 244.

[113] PANDOLFI, A, S; Avaliação Do Efeito Da Rugosidade Na Tenacidade Ao Impacto Em Aço Carbono, Vitória, Universidade Federal Do Espírito Santo Centro Tecnológico, (2006).

[114] FERREIRA, I; TOKIMATSU, R.C. Ensaio Charpy - Limitações e campo de aplicação, 54 Congresso Anual da ABM, 1, 30-32, (1999).

[115] Koppula, S., Kaviti, A. kumar, & Namala, K. kumar. (2018). Experimental Investigation of Fibre Reinforced Composite Materials Under Impact Load. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 330, 012047. doi:10.1088/1757-899x/330/1/012047

[116] Lee, D. G., & Cheon, S. S. (2001). Impact Characteristics of Glass Fiber Composites with Respect to Fiber Volume Fraction. Journal of Composite Materials, 35(1), 27–56. doi:10.1177/002199801772661858

[117] Naglis, Marcelo & d'Almeida, José Roberto. (1998). Avaliação dos modos de falha sob impacto de compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras. Polímeros. 8. 54-60. 10.1590/S0104-14281998000100008.

[118] Erklig, Ahmet & Dogan, Nurettin & Bulut, Mehmet. (2017). Charpy Impact Response of Glass Fiber Reinforced Composite with Nano Graphene Enhanced Epoxy. Periodicals of engineering and natural sciences. 5. 341-346. 10.21533/pen.v5i3.121.

[119] Saw, Sudhir. (2014). Fabrication, characterization and evaluation of luffa cylindrica fiber reinforced epoxy composites. Bioresources. 8. 4805-4826.

[120] Ibrahim, Javed & Kumar, Raj & Panneerdhass, R. & Gnanavelbabu, A.. (2014). Effects of Nano-Graphite Addition on Luffa-Epoxy Natural Fibre Composite.

- [121] Ibrahim SJS, Rajkumar K, Gnanavelbabu A, Panneerdhass R (2014) Mechanical, thermal and microstructural properties of microwave processed luffa-epoxy natural fibre composite. Paper presented at international conference on advances in design and manufacturing, NIT, Tiruchirapalli 2014
- [122] Microstructural analysis and experimental investigation of mechanical properties of epoxy based hybrid composite reinforced with flax, sisal and luffa fibre S. Sridhara,*, S. Nandhakumarb, M. Nallusamyc and R. Maguteeswarand. Journal of Ceramic Processing Research 2022; 23(4): 498-502
- [123] Loganathan, Prabhu & Vijayan, Krishnaraj & S, Sathish & Sivanantham, Gokulkumar & .N, Karthi. (2019). Study of mechanical and morphological properties of jute-tea leaf fiber reinforced hybrid composites: Effect of glass fiber hybridization. Materials Today: Proceedings. 27. 10.1016/j.matpr.2019.09.132.
- [124] K.S. Raghu, M. Logesh, R. Kiran Kisshore, P. Muhila Ramanan, G. Muralitharan, Mechanical behaviour of sisal palm glass fiber reinforced composite with addition of nano silica, Materials Today: Proceedings, Volume 37, Part 2, 2021, Pages 1427-1431, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.063>.
- [125] Kasama Jarukumjorn, Nitinat Suppakarn, Effect of glass fiber hybridization on properties of sisal fiber-polypropylene composites, Composites Part B: Engineering, Volume 40, Issue 7, 2009, Pages 623-627, ISSN 1359-8368. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.007>.
- [126] NETO, C, J; Termografia Aplicada a Detecção e Dimensionamento de Descontinuidades em Tubulações de Material Compósito, Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia De Inspeção de Equipamentos) Porto Alegre, PUC-Rio, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (2009).
- [127] MALDAGUE, X. P.V. Introduction to NDT by Active Infrared Thermography. Materials Evaluation, Setembro/2002, p. 1060-1073, 2002.

- [128] ABENDI. Associação Brasileira de Ensaios Não destrutivos e Inspeção. <<http://www.abende.org.br>> Acesso em 22 de Março de 2009.
- [129] MIRANDA, M; Comparação Entre Métodos de Inspeção Não-Destrutiva Aplicados a Peças Compósitas Laminadas Sólidas Estruturais Aeronáuticas, Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia De Materiais) São Carlos, USP, Universidade de São Paulo, (2011).
- [130] GROSSO, M; Análise Termografia de Defeitos de Corrosão em Aços Revestidos por Materiais Compósitos, Projeto de Graduação Rio de Janeiro,UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, (2011).
- [131] MONTANINI, R. Quantitative determination of subsurface defects in a reference specimen made of Plexiglas by means of lock-in and pulse phaseinfrared thermography. Infrared Physics e echnology. 2010, Vol53.
- [132] CHATTERJEE, K., TULI, S, PICKERING, S.G, ALMONDA, D.P. A comparasion of the pulsed, lock-in and frequency modulated thermography nondestructive evaluation techniques. NDT&E Internacional. 2011.
- [133] SANTULLI C. Impact damage characterization of thermoplastic matrix composites using transmission transient thermography, Nondestructive Testing and Evaluation, V19, n.3, 2004.
- [134] IBARRA-CASTANEDO C. Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase, PhD Thesis, Laval University, Canada, 121p, 2005.
- [135] TARPANI, J. R., ALMEIDA, E. G. R. de, SIMÊNCIO, E. C. A., MOTA, L. P.,PAZ, J. H. A. A., GUALBERTO, A. R. M, GATTI, C. A. (2009). Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados de matriz polimérica reforçados por fibras de carbono. Polímeros, 19(4), 318–328
- [136] MADALGUE, X. P. V. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. 1ed. New York, John Wiley & Sons, 2001.
- [137] GEORGES, M., SRAJBR, C., MENNER, P., KOCH, J., & DILLENZ, A. (2018). Thermography and Shearography Inspection of Composite Hybrid Sandwich Structure Made of CFRP and GFRP Core and Titanium Skins.

Proceedings, 2(8), 484.

[138] SILVA, V, M, A; Termografia Ativa Pulsada Aplicada A Juntas Compósitas Laminadas, Projeto de Graduação Rio de Janeiro, UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, (2014).

[139] MONTANINI, R., FRENI, F. Non-destructive evaluation of thick glass fiber-reinforced composites by means of optically excited lock-in thermography”. Composites: Part A. v. 43, pp. 2075-2082, 2012.

[140] OTANI, L, B. PEREIRA, A, H, A; Caracterização dos Módulos Elásticos de Compósitos Utilizando a Técnica de Excitação por Impulso. ATPC Engenharia, 2014.

[141] ASTM International. Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration. ASTM E1876. 2007. 15 p.

[142] OTTOLINI, L. M; Comportamento Mecânico de uma Tubulação Compósita Reforçada com Fibra de Vidro e Carbono sob Efeito de Envelhecimento Térmico, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) Rio de Janeiro, PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, (2019).

[143] GIBSON, R. F. Principles of composite material mechanics. USA, 1994, 425 p.

[144] OTANI, L, B. PEREIRA, A, H, A; Influência Do Tipo De Suporte Na Caracterização do Módulo De Elasticidade de Amostras Pequenas Pela Técnica De Excitação por Impulso. 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014.

[145] LUZ, F.S; MONTEIRO, S.N. Avaliação das propriedades elásticas em compósitos epoxídicos reforçados com fibras de coco verde. 72º Congresso Anual da ABM. 2017.

[146] JUNIOR. L.C.G.P. Aplicação da mecânica da danificação na análise do comportamento de materiais compósitos poliméricos reciclados reforçados por fibras de coco. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Federal do Ceará Centro de tecnologia. 2015.

- [147] AMARAL, G.A. Estudo da influência da natureza das cargas nas propriedades da madeira plástica. Trabalho de conclusão (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande Do Sul. 2009.
- [148] AMICO, S.C. Desenvolvimento de compósitos com fibras de pan oxidada para utilização em freios automotivos. Dissertação Programa de Pós-Graduação Engenharia Química – Universidade Estadual de Campinas. 1996.
- [149] American Society for Testing and Materials D570-98: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics (2000).
- [150] QUINAYÁ, D, C, P., BUNSELL, A. R; Fabricação e Caracterização de Materiais Compósitos Resina Epóxi/Fibras de Luffa(Luffa cylindrica), Tese (Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais) Rio de Janeiro, PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, (2017).
- [151] E. L. McKague, R. J.D., e Halkias J.E., “Moisture Diffusion in Reinforced Plastics”, J. Eng. Mater. Technol, vol. 98, no 1, p. 92–95, 1976
- [152] Sturm R, Grimberg R and Grum J. Effect of moisture absorption on mechanical properties of polyester composites evaluated with destructive and nondestructive tests. In: The 12th international conference of the slovenian society for non-destructive testing: application of contemporary non-destructive testing in engineering. Portoroz, Slovenia, 4–6 Sept 2013.
- [153] D’ Almeida, J. R. M., de Almeida, R. C., & de Lima, W. R. (2008). Effect of water absorption of the mechanical behavior of fiberglass pipes used for offshore service waters. Composite Structures, 83(2), 221–225. doi:10.1016/j.compstruct.2007.04
- [154] Dantas, C. M., Junior, R. C. S. F., Aquino, M. F., Neto, A. A. Efeito da absorção de água nas propriedades mecânicas de um compósito polimérico híbrido reforçados com mantas de fibra de vidro e tecido de juta. Conem, 2012. ABCM. 2012.
- [155] MARGARIA, G., AQUINO, E. M. F., 1997, “Influence of moisture on the mechanical properties of polyester/fibre glass-E composite”, Second International Congress on Metallurgy and materials, São Paulo.

- [156] Aquino, E. M. F. D. 1996. Estudo da Umidade na resistência e fratura de compósitos tubulares. IV congresso de engenharia mecânica, Recife.
- [157] Olmos, D., López-Morón, R., & González-Benito, J. (2006). The nature of the glass fibre surface and its effect in the water absorption of glass fibre/epoxy composites. The use of fluorescence to obtain information at the interface. *Composites Science and Technology*, 66(15), 2758–2768. doi:10.1016/j.compscitech.2006.03
- [158] Dantas, Camilla de Medeiros. Influência Da Quantidade De Absorção De água Nas Propriedades Mecânicas De Compósitos Poliméricos De Manta De Fibra De Vidro, Híbrido E Tecido Juta. 2011.
- [159] Silva, F. G. S., Junior, R. C. S. F., Aquino, E. M. F. Influence of moisture on E-Glass Fiber Composites. 20th International Congress of Mechanical Engineering. 2009.
- [160] CUNHA, Ricardo Alex Dantas da. Influência da absorção de umidade no comportamento mecânico nos compósitos poliméricos híbridos Kevlar/vidro quando imerso em água do mar e petróleo. 2015. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
- [161] Cruz, V. C. A., Nóbrega, M. M. S., Cavalcanti, W. S., Carvalho, L. H., Lima, A. G. B. Absorção de água em compósitos macambira/poliéster insaturado: um estudo experimental. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 2010.
- [162] SILVA, Carlota Joaquina e. Absorção de água em materiais compósitos de fibra vegetal: modelagem e simulação via CFX. 2014. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2014. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2820>
- [163] NÓBREGA, M. M. S. Compósitos de matriz poliéster com fibras de caroá Neoglaziovia variegata: caracterização mecânica e sorção de água. 2007. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal

de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2007. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1813>.

[164] Cavalcanti WS, Lima AGB de, Carvalho LH de. Sorção de água em compósitos de poliéster insaturado reforçados com tecido de juta e juta/vidro modelagem, simulação e experimentação. *Polímeros* [Internet]. 2010;20(Polímeros, 2010 20(1)):78–83. Available from: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282010005000007>

[165] THWE, M.M., LIAO, K., “Effects of environmental aging on the mechanical properties of bambooglass fibre reinforced polymer matrix hybrid composites”, *Composites Part A*, v. 33, pp. 43-52, 2002.

[166] CAVALCANTI, W. S. Compósitos poliéster/tecidos tramados vegetal-vidro: caracterização mecânica e simulação da sorção de água. 2006. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2006. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2072>

[167] WANG, W., SAIN, M., & COOPER, P. (2006). *Study of moisture absorption in natural fiber plastic composites. Composites Science and Technology*, 66(3-4), 379–386. doi:10.1016/j.compscitech.2005.07

[168] Da Silva, R. V., Aquino, E. M. F., Rodrigues, L. P. S., & Barros, A. R. F.. (2008). Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética. *Matéria (rio De Janeiro)*, 13(Matéria (Rio J.), 2008 13(1)), 154–161. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762008000100019>

[169] Lima, A. G. B., Carvalho, L. H., Cavalcanti W. S. Difusão de Água em Compósitos Poliéster Insaturado Reforçados por Tecido Híbrido de Juta-Vidro: Modelagem e Simulação. *Difusão de Água em Compósitos Poliéster Insaturado Reforçados por Tecido Híbrido de Juta-Vidro: Modelagem e Simulação. Revista*

Matéria, v. 10, n. 1, pp. 14 – 23, 2005.

[170] Júnior., R. C. S. F., DE Aquino., E. M. F. Estudos da Influência da configuração em compósitos poliméricos híbridos. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, agosto de 2017.

[171] Aquino, E. M. F.; Sarmento, L. P. S.; Oliveira, W.; Silva, R. V. (2007). *Moisture Effect on Degradation of Jute/Glass Hybrid Composites*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26(2), 219–233. doi:10.1177/0731684407070030

[172] Panthapulakkal, Suhara & Sain, Mohini. (2007). Studies on the Water Absorption Properties of Short Hemp—Glass Fiber Hybrid Polypropylene Composites. *Journal of Composite Materials - J COMPOS MATER*. 41. 1871–1883. 10.1177/0021998307069900.

[173] Ellyin, F., & Maser, R. (2004). *Environmental effects on the mechanical properties of glass-fiber epoxy composite tubular specimens*. *Composites Science and Technology*, 64(12), 1863–1874. doi:10.1016/j.compscitech.2004.01

[174] Jeffrey, K.J.T. & F., Tarlochan & Rahman, M.M.. (2011). Residual Strength of Chop Strand Mats Glass Fiber/Epoxy Composite Structures: Effect of Temperature and Water Absorption. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 4. 504-519. 10.15282/ijame.4.2011.11.0041.

[175] Nunemaker, J. D., Voth, M. M., Miller, D. A., Samborsky, D. D., Murdy, P., and Cairns, D. S.: Effects of moisture absorption on damage progression and strength of unidirectional and cross-ply fiberglass–epoxy composites, *Wind Energ. Sci.*, 3, 427–438, <https://doi.org/10.5194/wes-3-427-2018>, 2018.

[176] Gopi, S., Loganathan, G. B., Sekar, B. K., Krishnamoorthy, R. K., Sekaran, V., & Mohan, A. R.. (2019). Influence of water absorption on glass fibre reinforced IPN composite pipes. *Polímeros*, 29(Polímeros, 2019 29(3)), e2019038. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.02818>

[177] NÓBREGA, M. M. S. Compósitos de matriz poliéster com fibras de caroá *Neoglaziovia variegata*: caracterização mecânica e sorção de água. 2007. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2007. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1813>

[178] Thwe, M. M., & Liao, K. (2003). *Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites*. *Composites Science and Technology*, 63(3-4), 375–387. doi:10.1016/s0266-3538(02)00225-7

[179] Panthapulakkal S, Sain M. Studies on the Water Absorption Properties of Short Hemp—Glass Fiber Hybrid Polypropylene Composites. *Journal of Composite Materials*. 2007;41(15):1871-1883. doi:10.1177/0021998307069900

[180] Mohamad, N., Hassan, M., Chang, S., Yuhazri, M., Abd Manaf, M., Ab Maulod, H., Razak, J., Munawar, R., & Qumrul, A. (1). HYBRIDIZATION AND THERMAL STABILITY EFFECTS ON PHYSICAL PROPERTIES OF HYBRID GLASS/JUTE FIBER REINFORCED EPOXY COMPOSITES. *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*, 12(1(3)), 35-50. Retrieved from <https://jamt.utem.edu.my/jamt/article/view/4863>

[181] Silva, H. S. P., Amico, S. C., Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de curauá e híbridos com fibras de vidro. Dissertação (mestrado em engenharia). Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. 2010.

[182] K.S. Raghul, M. Logesh, R. Kiran Kisshore, P. Muhila Ramanan, G. Muralitharan, Mechanical behaviour of sisal palm glass fiber reinforced composite with addition of nano silica, *Materials Today: Proceedings*, Volume 37, Part 2, 2021, Pages 1427-1431, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.063>.

[183] Kasama Jarukumjorn, Nitinat Suppakarn, Effect of glass fiber hybridization

on properties of sisal fiber–polypropylene composites, *Composites Part B: Engineering*, Volume 40, Issue 7, 2009, Pages 623-627, ISSN 1359-8368. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.007>.

[184] HAMMER, O.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. PAST - Paleontological Statistics, ver. 1.81 (<http://folk.uio.no/chammer/past>). 2008.

[185] Coussirat, A. C., Amico, S. C., Influência do carregamento em flexão nos efeitos de envelhecimento em vigas de compósito vidro/epóxi. Tese (Doutorado em engenharia). Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. 2017.

[186] Nóbrega, João & Lima, Antonio & Melo, João & De Montreuil Carmona, Charles & Neto, Joao Pinto. (2021). Estudo da absorção de água em compósitos com fibras vegetais: uma prática de gestão ambiental. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*. 12. 294-310. 10.6008/CBPC2179-6858.2021.009.0023.

[187] Tang, X., Whitcomb, J. D., Li, Y., & Sue, H.-J. (2005). *Micromechanics modeling of moisture diffusion in woven composites*. *Composites Science and Technology*, 65(6), 817–826. doi:10.1016/j.compscitech.2004.01

[188] Sobrinho, L. L., Desenvolvimento de matriz polimérica para material compósito visando o reforço de dutos de aço. Tese (Doutorado em engenharia). UFRJ. Rio de Janeiro . 2010.

[189] PINTO, M. V. S. Estudo higrotérmico de compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais juta/algodão manufaturado por RTM: caracterização mecânica e sorção de água. 2018. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2018. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/7078>

[190] Fulco, Ana Paula Pereira. *Mecanismos De Dano Em Laminados De Carbono/epóxi Sob Fadiga E Envelhecimento Higrotérmico*. 2017.

[191] Fogaça, K. O. Avaliação dos efeitos ambientais nas propriedades do

compósito de poliamida 6,6/fibras de carbono. Universidade Estadual Paulista. 2015.

[192] MOTA, Maria Kalionara de Freitas. Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de luffavegetal luffa cylindrica. 2016. 103f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

[193] VIEIRA, Camila de Sousa. Homogeneização térmica e elástica de compósitos periódicos com interfaces. 2018. 158 f. Tese (Doutorado em Materiais) - Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018

[194] Lameiras, Rodrigo & Santos, Tiago & Barros, Joaquim & Azenha, Miguel & Valente, Isabel. (2012). Desenvolvimento de painéis sandwich estruturais constituídos por camadas nervuradas de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço e conectores de compósito polimérico reforçado com fibras de vidro.

[195] Gomes, J. V. P. N., Influência da arquitetura de compósitos laminados de fibras de vidro/PAEK/buckypaper em suas propriedades térmica e elétrica. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2022.

[196] SOUZA, Ricardo Fernandes de. Obtenção, caracterização e aplicação de um compósito de matriz de poliéster e carga de pó de Carnaúba. 2020. 70f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

Apêndice A – Curvas e dados de Absorção – Temperatura ambiente

Tabela A.1 - Resultados do ensaio de absorção do corpo de prova V1.

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100$
16,06	0	0	0	0
16,10	17	61200	247,38	0,24
16,14	46	165600	406,93	0,51
16,16	70	252000	501,99	0,61
16,19	89	320400	566,03	0,83
16,22	161	579600	761,31	0,99
16,23	233	838800	915,86	1,06
16,25	328	1180800	1086,64	1,22
16,27	352	1267200	1125,69	1,31
16,28	375	1350000	1161,89	1,41
16,30	543	1954800	1398,14	1,50
16,32	567	2041200	1428,70	1,64
16,32	711	2559600	1599,87	1,65
16,32	927	3337200	1826,80	1,66
16,32	1023	3682800	1919,06	1,66
16,33	1431	5151600	2269,71	1,70
16,33	1551	5583600	2362,96	1,73
16,34	1863	6706800	2589,74	1,74
16,34	2079	7484400	2735,76	1,74
16,34	2928	10540800	3246,65	1,74

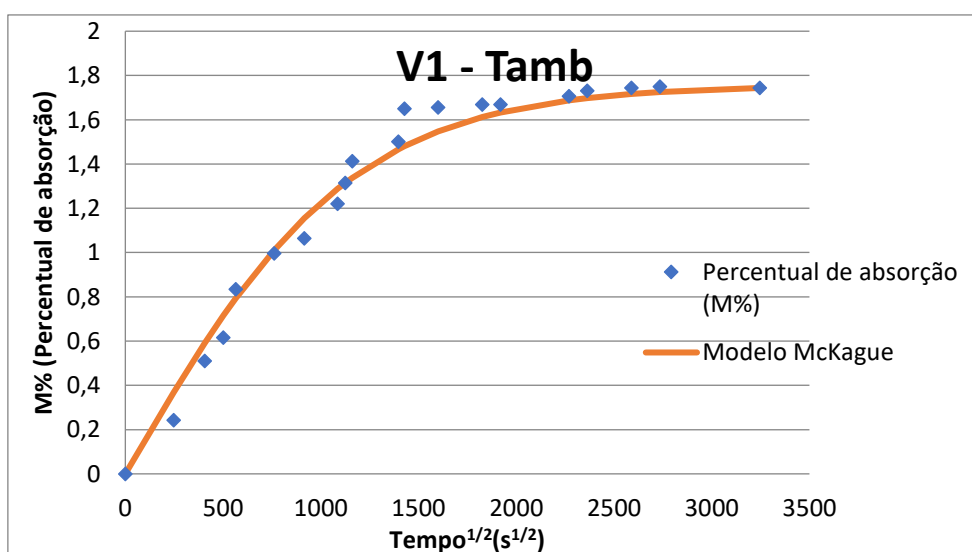


Figura A.1- Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra V1.

Tabela A.2 - Resultados do ensaio de absorção compósito fibra de vidro V2

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100$
17,08	0	0	0	0
17,12	17	61200	247,38	0,23
17,16	46	165600	406,93	0,47
17,18	70	252000	501,99	0,56
17,21	89	320400	566,03	0,72
17,23	161	579600	761,31	0,88
17,24	233	838800	915,86	0,94
17,27	328	1180800	1086,64	1,08
17,29	352	1267200	1125,69	1,21
17,31	375	1350000	1161,89	1,32
17,33	543	1954800	1398,14	1,43
17,36	567	2041200	1428,70	1,60
17,36	711	2559600	1599,87	1,64
17,37	927	3337200	1826,80	1,69
17,38	1023	3682800	1919,062	1,73
17,40	1431	5151600	2269,71	1,87
17,41	1551	5583600	2362,96	1,92
17,43	1863	6706800	2589,74	2,00
17,42	2079	7484400	2735,76	2,00
17,42	2928	10540800	3246,65	2,00

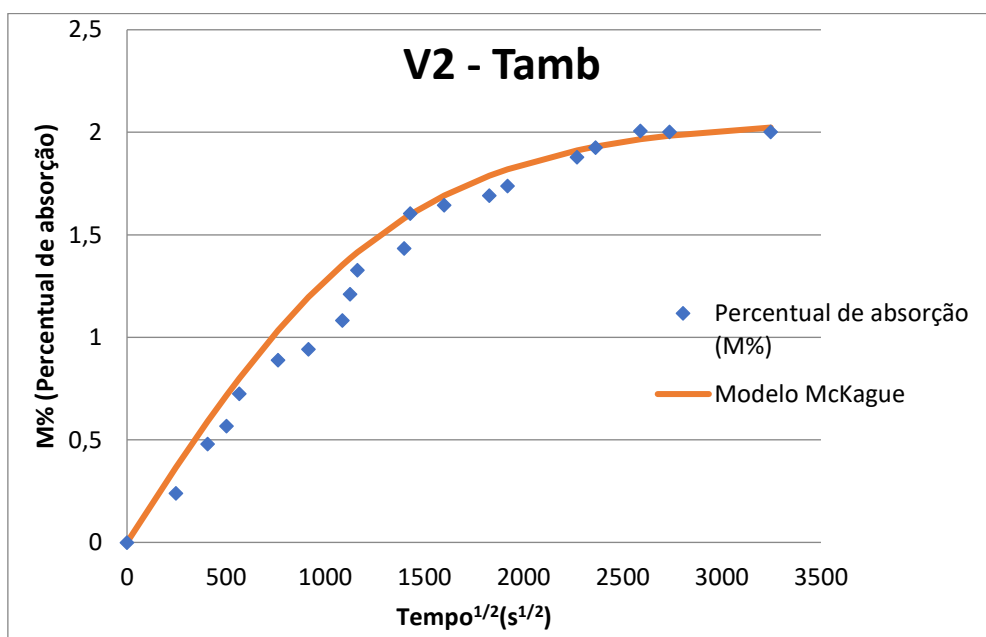
Figura A.2 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra V2.

Tabela A.3 - Resultados do ensaio de absorção compósito fibra de vidro V3

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100$
16,24	0	0	0	0
16,27	17	61200	247,38	0,20
16,30	46	165600	406,93	0,41
16,32	70	252000	501,99	0,52
16,34	89	320400	566,03	0,65
16,37	161	579600	761,31	0,81
16,38	233	838800	915,86	0,86
16,39	328	1180800	1086,64	0,96
16,40	352	1267200	1125,69	1,02
16,41	375	1350000	1161,89	1,08
16,42	543	1954800	1398,14	1,15
16,43	567	2041200	1428,70	1,21
16,44	711	2559600	1599,87	1,23
16,44	927	3337200	1826,80	1,23
16,44	1023	3682800	1919,06	1,23
16,46	1431	5151600	2269,71	1,35
16,473	1551	5583600	2362,96	1,42
16,49	1863	6706800	2589,74	1,53
16,49	2079	7484400	2735,76	1,57
16,49	2928	10540800	3246,65	1,56

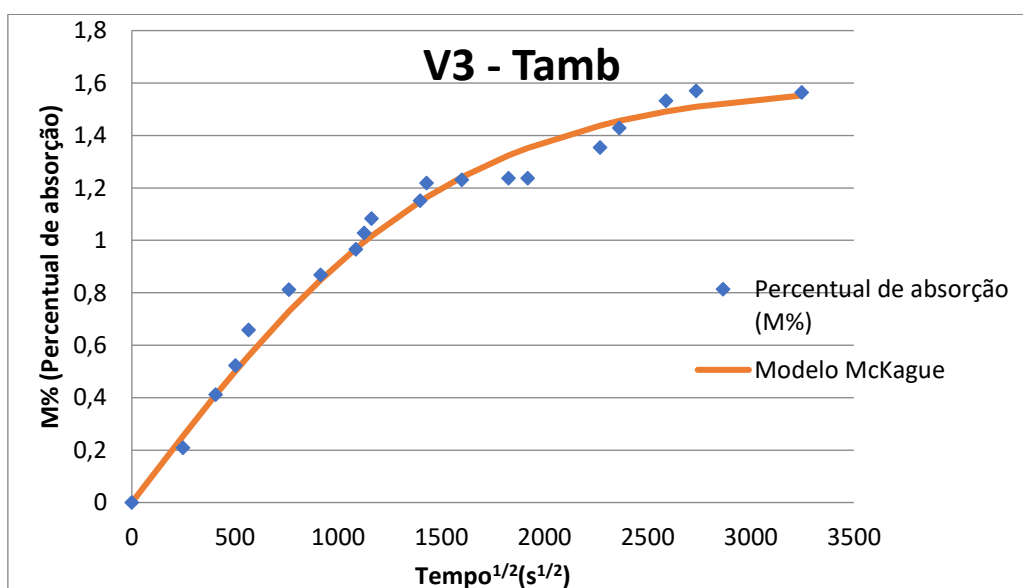
Figura A.3 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra V3.

Tabela A.4 - Resultados do ensaio de absorção compósito fibra de luffa L1

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100$
16,07	0	0	0	0
16,7	17	61200	247,38	4,14
17,08	46	165600	406,93	6,29
17,45	70	252000	501,99	8,59
17,52	89	320400	566,03	9,027
17,57	161	579600	761,31	9,34
18,01	233	838800	915,86	12,05
18,26	328	1180800	1086,64	13,63
18,33	352	1267200	1125,69	14,04
18,379	375	1350000	1161,89	14,34
18,45	543	1954800	1398,14	14,78
18,58	567	2041200	1428,70	15,59
18,65	711	2559600	1599,87	16,03
18,79	927	3337200	1826,80	16,94
18,80	1023	3682800	1919,06	17,01
19,16	1431	5151600	2269,71	19,23
19,16	1551	5583600	2362,96	19,24
19,16	1863	6706800	2589,74	19,25
19,16	2079	7484400	2735,76	19,23
19,16	2928	10540800	3246,65	19,24

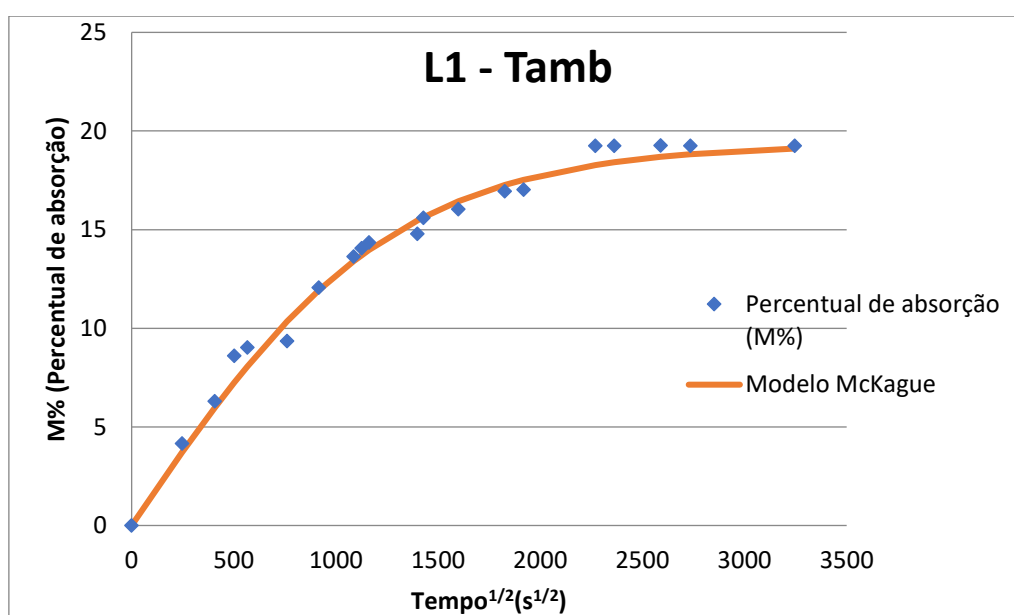
Figura A.4 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra L1.

Tabela A5 - Resultados do ensaio de absorção compósito fibra de luffa L2

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100$
16,48	0	0	0	0
16,96	17	61200	247,38	2,90
17,28	46	165600	406,93	4,85
17,60	70	252000	501,99	6,78
17,69	89	320400	566,03	7,35
17,71	161	579600	761,31	7,46
18,12	233	838800	915,86	9,94
18,49	328	1180800	1086,64	12,18
18,55	352	1267200	1125,69	12,55
18,62	375	1350000	1161,89	12,97
18,74	543	1954800	1398,14	13,73
18,79	567	2041200	1428,70	14,02
18,91	711	2559600	1599,87	14,75
19,01	927	3337200	1826,80	15,33
19,26	1023	3682800	1919,06	16,88
19,49	1431	5151600	2269,71	18,29
19,49	1551	5583600	2362,96	18,30
19,5	1863	6706800	2589,74	18,31
19,49	2079	7484400	2735,76	18,30
19,49	2928	10540800	3246,65	18,29

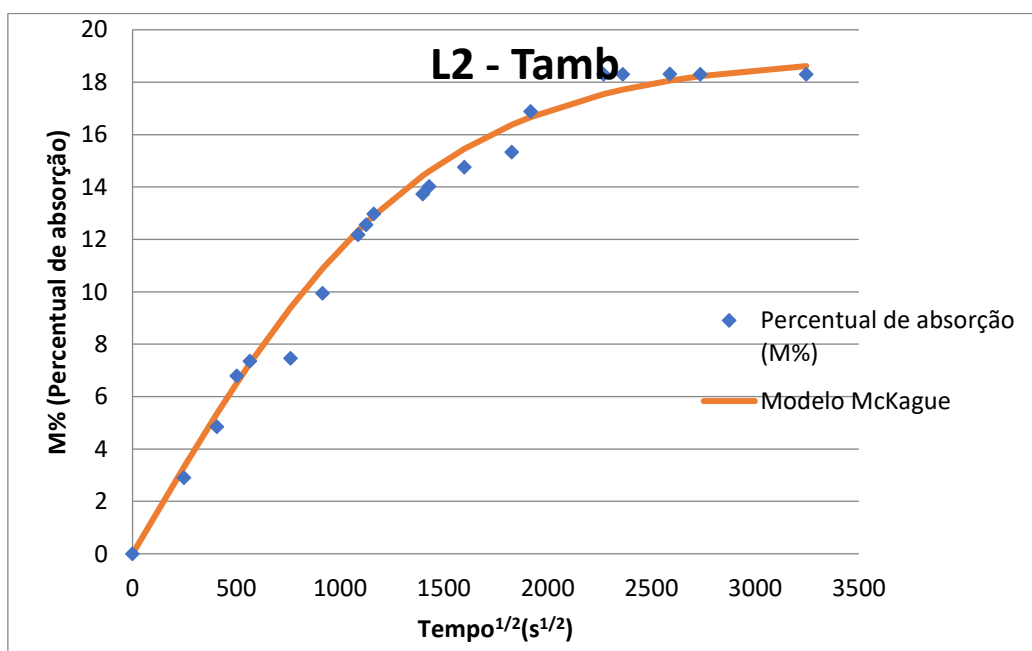
Figura A.5 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra L2.

Tabela A6 - Resultados do ensaio de absorção compósito fibra de luffa L3

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100$
16,74	0	0	0	0
17,52	17	61200	247,38	4,64
18,00	46	165600	406,93	7,49
18,59	70	252000	501,99	11,01
18,66	89	320400	566,03	11,45
18,82	161	579600	761,31	12,37
18,86	233	838800	915,86	12,62
19,27	328	1180800	1086,64	15,09
19,39	352	1267200	1125,69	15,79
19,39	375	1350000	1161,89	15,77
19,60	543	1954800	1398,14	17,04
19,96	567	2041200	1428,70	19,22
19,98	711	2559600	1599,87	19,34
20,19	927	3337200	1826,80	20,59
20,49	1023	3682800	1919,06	22,35
20,79	1431	5151600	2269,71	24,17
20,80	1551	5583600	2362,96	24,18
20,80	1863	6706800	2589,74	24,22
20,80	2079	7484400	2735,76	24,24
20,80	2928	10540800	3246,65	24,23

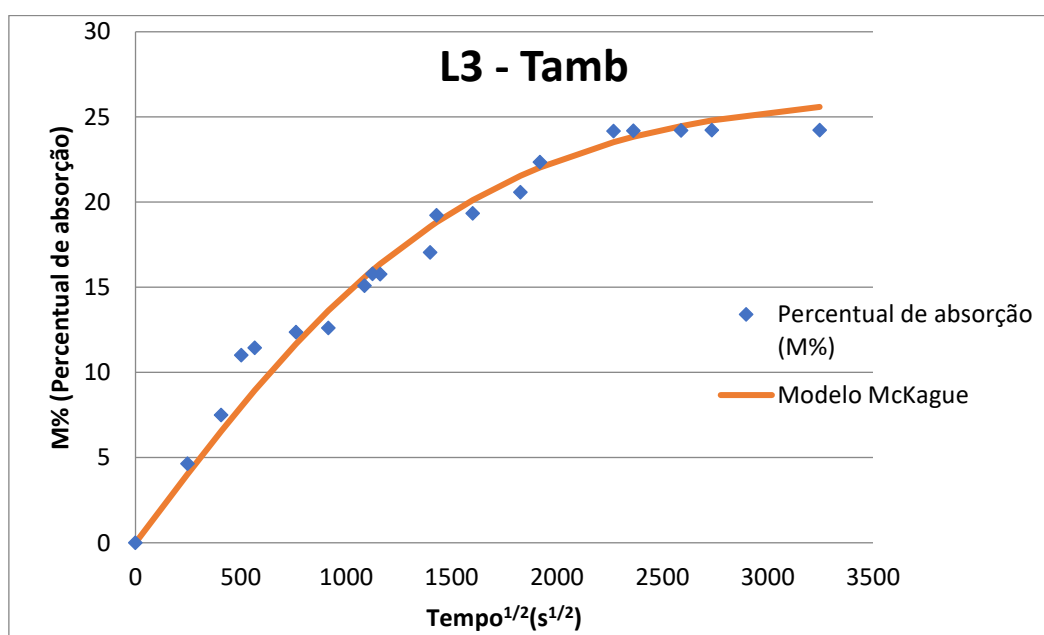
Figura A.6 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra L3.

Tabela A.7 - Resultados do ensaio de absorção compósito híbrido H1

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100$
18,04	0	0	0	0
18,47	17	61200	247,38	2,37
18,66	46	165600	406,93	3,42
18,93	70	252000	501,99	4,89
18,98	89	320400	566,038	5,19
19,07	161	579600	761,31	5,70
19,21	233	838800	915,86	6,46
19,64	328	1180800	1086,64	8,84
19,70	352	1267200	1125,69	9,14
19,74	375	1350000	1161,89	9,41
19,81	543	1954800	1398,14	9,78
19,80	567	2041200	1428,70	9,75
19,86	711	2559600	1599,87	10,06
19,99	927	3337200	1826,80	10,76
19,99	1023	3682800	1919,06	10,79
20,33	1431	5151600	2269,71	12,64
20,33	1551	5583600	2362,96	12,66
20,55	1863	6706800	2589,74	13,86
20,55	2079	7484400	2735,76	13,85
20,55	2928	10540800	3246,65	13,86

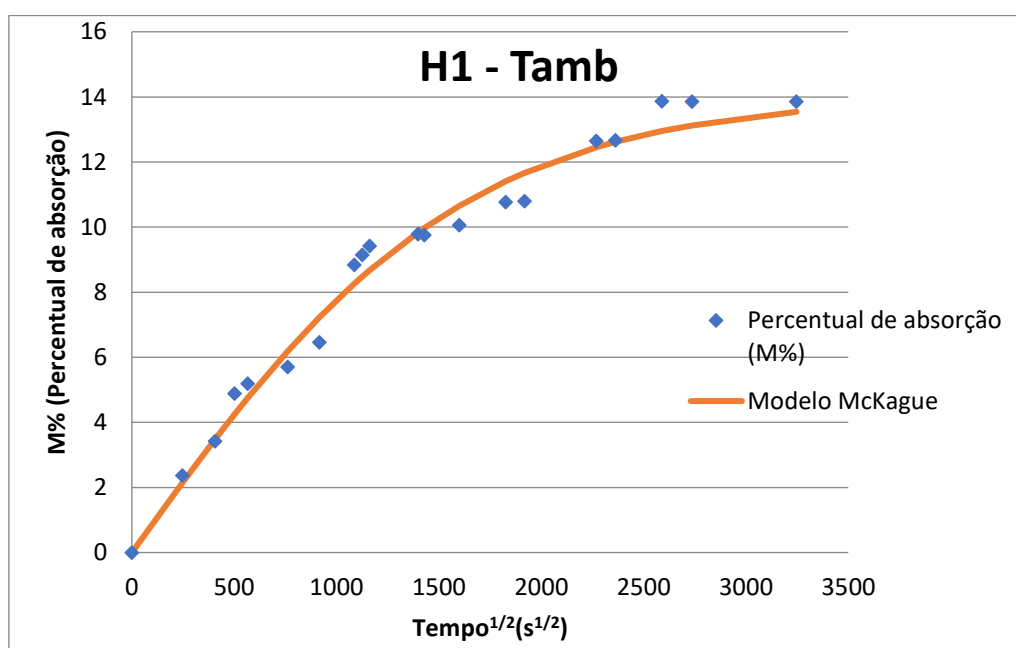
Figura A.7 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra H1.

Tabela A.8 - Resultados do ensaio de absorção compósito híbrido H2

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100$
17,73	0	0	0	0
18,05	17	61200	247,38	1,81
18,24	46	165600	406,93	2,88
18,44	70	252000	501,99	4,02
18,48	89	320400	566,03	4,26
18,49	161	579600	761,31	4,32
18,62	233	838800	915,86	5,01
19,05	328	1180800	1086,64	7,48
19,18	352	1267200	1125,69	8,17
19,27	375	1350000	1161,89	8,69
19,30	543	1954800	1398,14	8,84
19,34	567	2041200	1428,70	9,09
19,34	711	2559600	1599,87	9,11
19,46	927	3337200	1826,80	9,78
19,46	1023	3682800	1919,06	9,77
19,73	1431	5151600	2269,71	11,27
19,74	1551	5583600	2362,96	11,35
19,86	1863	6706800	2589,74	12,012
19,86	2079	7484400	2735,76	12,00
19,86	2928	10540800	3246,65	12,00

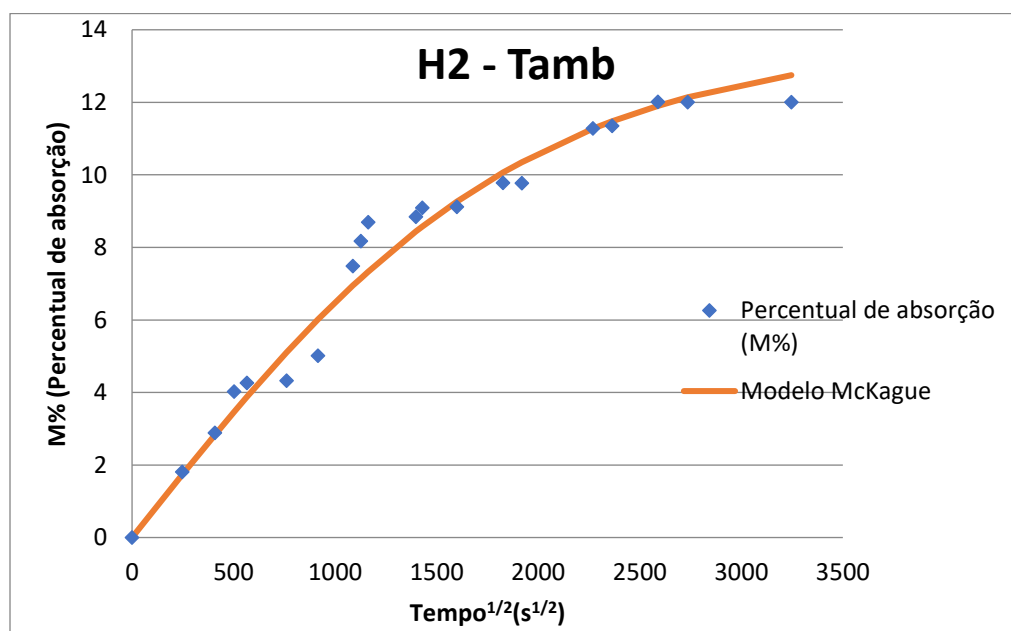
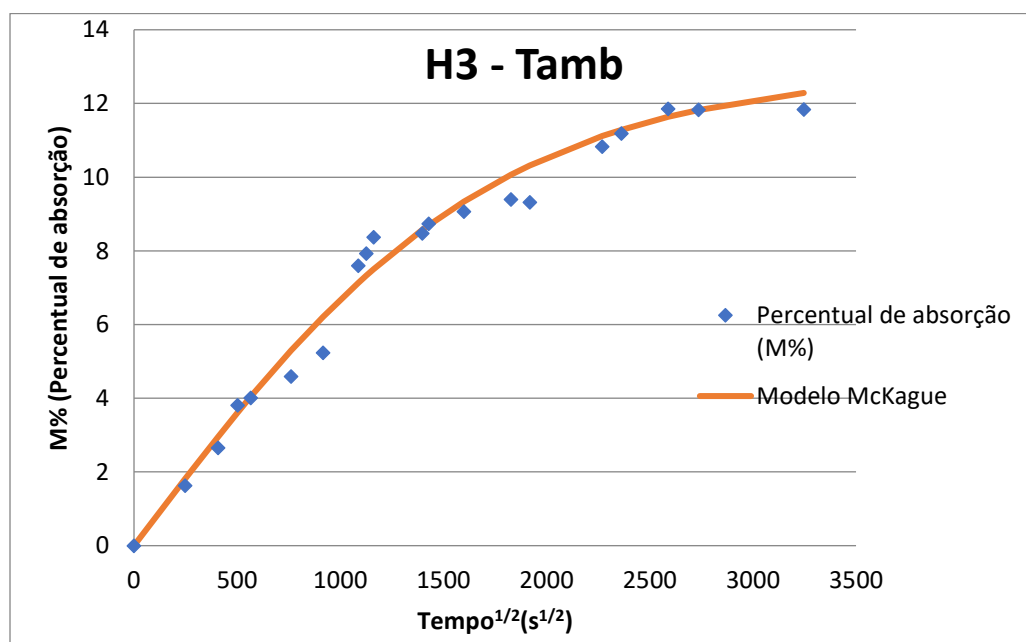
Figura A.8 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra H2.

Tabela A.9 - Resultados do ensaio de absorção compósito híbrido H3

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100$
16,82	0	0	0	0
17,10	17	61200	247,38	1,62
17,27	46	165600	406,93	2,65
17,47	70	252000	501,99	3,80
17,50	89	320400	566,03	4,01
17,60	161	579600	761,31	4,59
17,71	233	838800	915,86	5,23
18,10	328	1180800	1086,64	7,59
18,16	352	1267200	1125,69	7,92
18,23	375	1350000	1161,89	8,37
18,25	543	1954800	1398,14	8,47
18,3	567	2041200	1428,70	8,74
18,35	711	2559600	1599,87	9,06
18,41	927	3337200	1826,80	9,39
18,39	1023	3682800	1919,06	9,32
18,65	1431	5151600	2269,71	10,82
18,71	1551	5583600	2362,96	11,18
18,82	1863	6706800	2589,74	11,85
18,82	2079	7484400	2735,76	11,83
18,82	2928	10540800	3246,65	11,83

Figura A.9 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra H3.

Apêndice B – Curvas e dados de Absorção – Temperatura 60°C

Tabela B.1 - Resultados do ensaio de absorção compósito fibra de vidro V1 – T60

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100$
16,95	0	0	0	0
17,02	17	61200	247,38	0,41
17,03	46	165600	406,93	0,44
17,03	70	252000	501,99	0,47
17,05	89	320400	566,03	0,56
17,06	161	579600	761,31	0,64
17,07	233	838800	915,86	0,67
17,09	328	1180800	1086,64	0,83
17,09	352	1267200	1125,69	0,84
17,09	375	1350000	1161,89	0,84
17,10	543	1954800	1398,14	0,86
17,11	567	2041200	1428,70	0,95
17,11	711	2559600	1599,87	0,95
17,11	927	3337200	1826,80	0,96
17,11	1023	3682800	1919,06	0,95
17,12	1431	5151600	2269,71	0,97
17,12	1551	5583600	2362,96	1,00
17,12	1863	6706800	2589,74	1,00
17,12	2079	7484400	2735,76	0,99
17,12	2928	10540800	3246,65	1,00

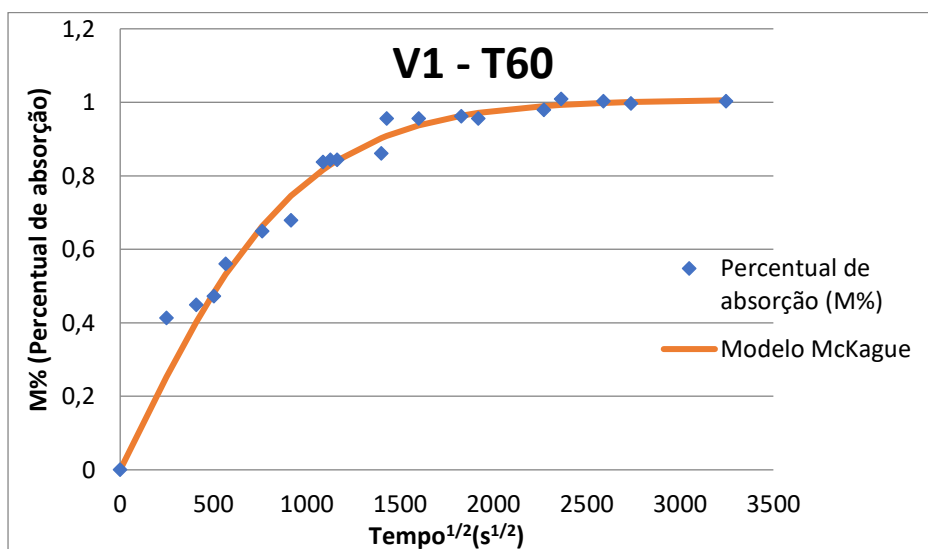


Figura B.1 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra V1-T60.

Tabela B.2 - Resultados do ensaio de absorção compósito fibra de vidro V2 – T60

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100$
17,22	0	0	0	0
17,29	17	61200	247,38	0,42
17,30	46	165600	406,93	0,45
17,29	70	252000	501,99	0,44
17,32	89	320400	566,03	0,58
17,33	161	579600	761,31	0,65
17,34	233	838800	915,86	0,71
17,36	328	1180800	1086,64	0,81
17,36	352	1267200	1125,69	0,85
17,37	375	1350000	1161,89	0,86
17,38	543	1954800	1398,14	0,96
17,41	567	2041200	1428,70	1,09
17,41	711	2559600	1599,87	1,09
17,41	927	3337200	1826,80	1,10
17,41	1023	3682800	1919,06	1,09
17,42	1431	5151600	2269,71	1,15
17,42	1551	5583600	2362,96	1,14
17,42	1863	6706800	2589,74	1,14
17,42	2079	7484400	2735,76	1,16
17,42	2928	10540800	3246,65	1,15

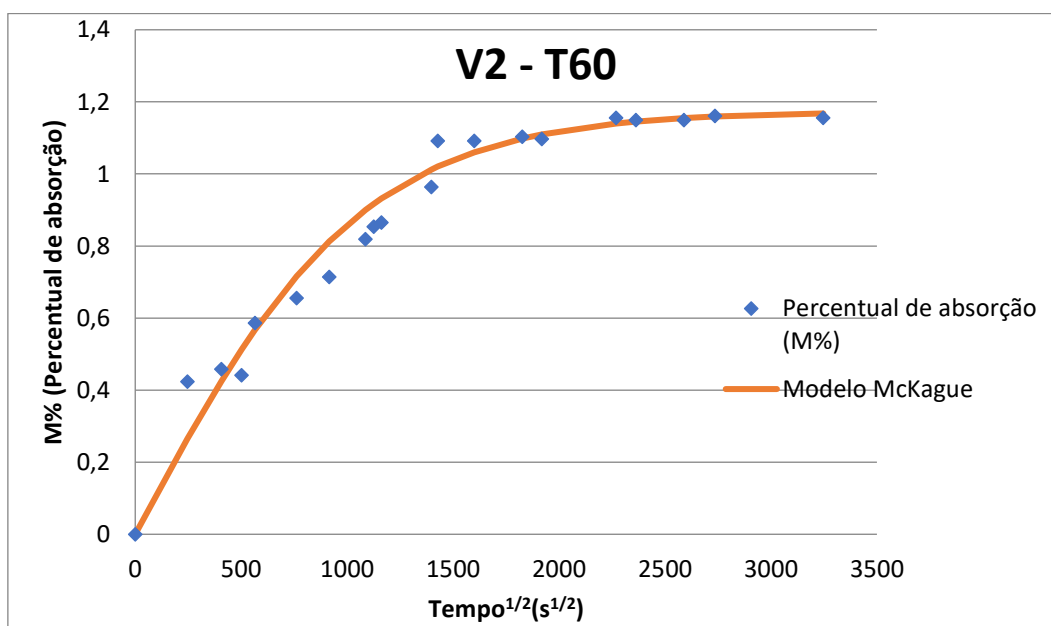
Figura B.2 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra V2-T60.

Tabela B.3 - Resultados do ensaio de absorção compósito fibra de vidro V3 – T60

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100$
16,47	0	0	0	0
16,55	17	61200	247,38	0,48
16,56	46	165600	406,93	0,57
16,57	70	252000	501,99	0,64
16,58	89	320400	566,03	0,66
16,59	161	579600	761,31	0,75
16,60	233	838800	915,86	0,83
16,63	328	1180800	1086,64	0,98
16,63	352	1267200	1125,69	1,01
16,64	375	1350000	1161,89	1,07
16,65	543	1954800	1398,14	1,14
16,67	567	2041200	1428,70	1,20
16,67	711	2559600	1599,87	1,25
16,68	927	3337200	1826,80	1,32
16,70	1023	3682800	1919,06	1,39
16,70	1431	5151600	2269,71	1,39
16,70	1551	5583600	2362,96	1,41
16,70	1863	6706800	2589,74	1,40
16,70	2079	7484400	2735,76	1,41
16,70	2928	10540800	3246,65	1,41

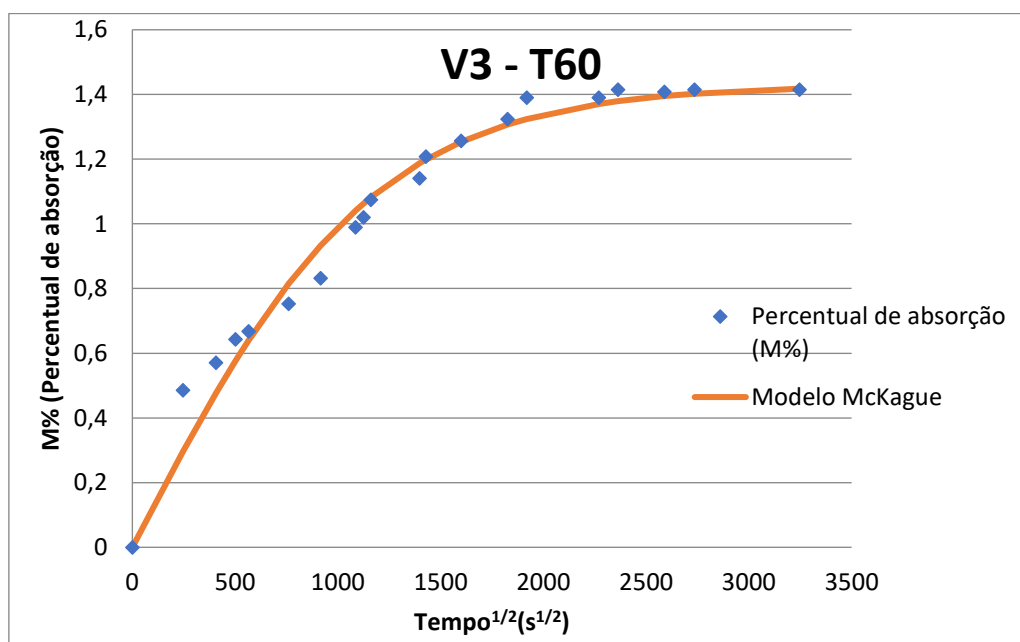
Figura B.3 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra V3-T60.

Tabela B.4 - Resultados do ensaio de absorção compósito fibra de vidro L1 – T60

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100$
15,72	0	0	0	0
16,90	17	61200	247,38	7,46
17,34	46	165600	406,93	10,29
17,75	70	252000	501,99	12,86
17,8	89	320400	566,03	13,18
17,90	161	579600	761,31	13,82
18,14	233	838800	915,86	15,34
18,39	328	1180800	1086,64	16,97
18,45	352	1267200	1125,70	17,37
18,46	375	1350000	1161,89	17,40
18,47	543	1954800	1398,14	17,49
18,51	567	2041200	1428,70	17,71
18,51	711	2559600	1599,87	17,70
18,51	927	3337200	1826,80	17,70
18,50	1023	3682800	1919,06	17,68
18,52	1431	5151600	2269,71	17,77
18,52	1551	5583600	2362,96	17,79
18,52	1863	6706800	2589,74	17,78
18,52	2079	7484400	2735,76	17,79
18,52	2928	10540800	3246,65	17,79

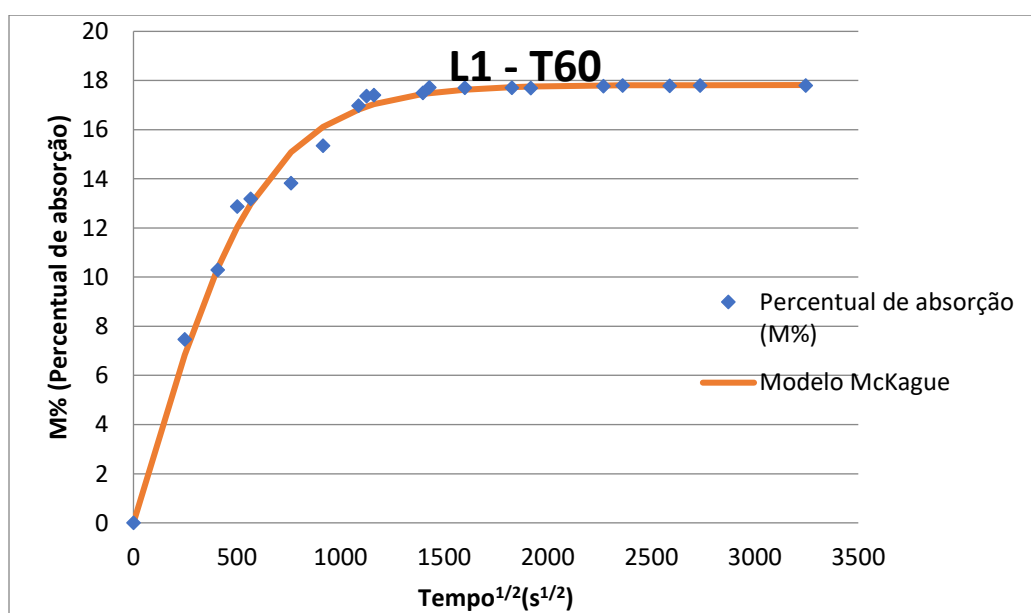
Figura B.4 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra L1-T60.

Tabela B.5 - Resultados do ensaio de absorção compósito fibra de vidro L2 – T60

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100$
16,06	0	0	0	0
17,10	17	61200	247,38	6,46
17,65	46	165600	406,93	9,88
18,05	70	252000	501,99	12,41
18,11	89	320400	566,03	12,77
18,39	161	579600	761,31	14,52
18,56	233	838800	915,86	15,55
18,86	328	1180800	1086,64	17,42
18,87	352	1267200	1125,69	17,49
19,02	375	1350000	1161,89	18,40
19,10	543	1954800	1398,14	18,89
19,13	567	2041200	1428,70	19,10
19,22	711	2559600	1599,87	19,65
19,30	927	3337200	1826,80	20,14
19,30	1023	3682800	1919,06	20,15
19,34	1431	5151600	2269,71	20,43
19,34	1551	5583600	2362,96	20,43
19,34	1863	6706800	2589,74	20,42
19,34	2079	7484400	2735,76	20,42
19,34	2928	10540800	3246,65	20,41

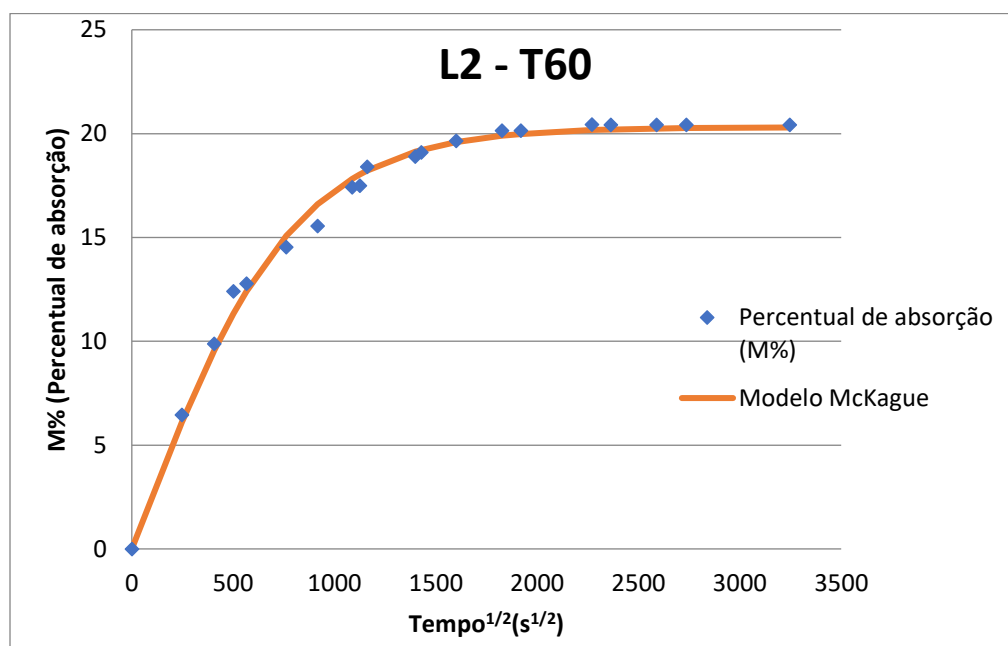
Figura B.5 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra L2-T60.

Tabela B.6 - Resultados do ensaio de absorção compósito fibra de vidro L3 – T60

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100$
15,55	0	0	0	0
16,48	17	61200	247,38	5,93
16,87	46	165600	406,93	8,47
16,97	70	252000	501,99	9,12
17,36	89	320400	566,03	11,58
17,65	161	579600	761,31	13,47
17,88	233	838800	915,86	14,96
18,07	328	1180800	1086,64	16,16
18,11	352	1267200	1125,69	16,40
18,18	375	1350000	1161,89	16,88
18,22	543	1954800	1398,14	17,12
18,36	567	2041200	1428,70	18,05
18,37	711	2559600	1599,87	18,10
18,49	927	3337200	1826,80	18,89
18,50	1023	3682800	1919,06	18,90
18,55	1431	5151600	2269,71	19,25
18,58	1551	5583600	2362,96	19,45
18,58	1863	6706800	2589,74	19,46
18,58	2079	7484400	2735,76	19,46
18,58	2928	10540800	3246,65	19,47

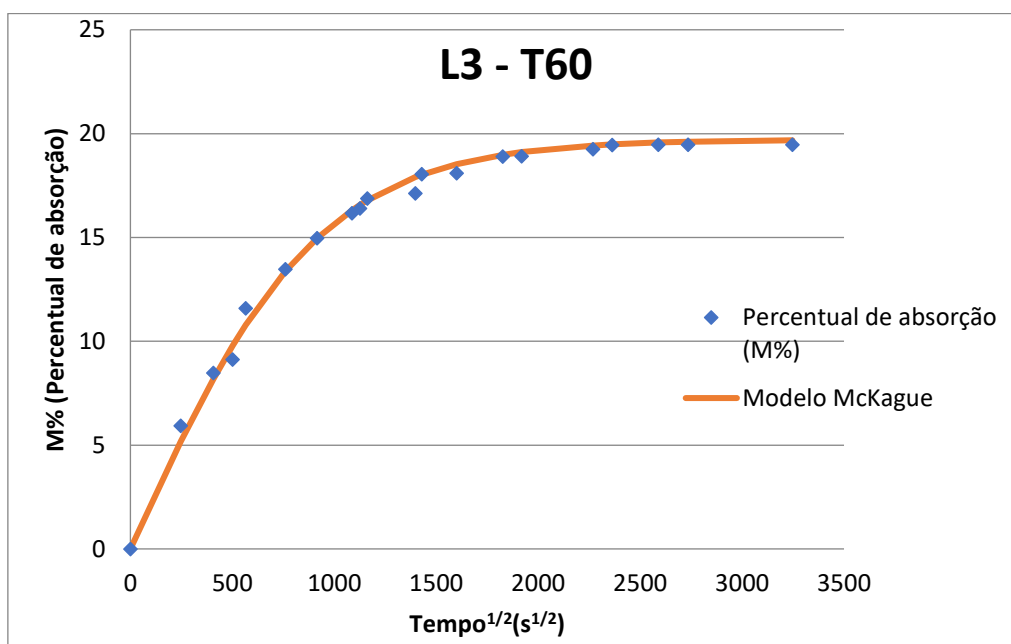
Figura B.6 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra L3-T60.

Tabela B.7 - Resultados do ensaio de absorção compósito fibra de vidro H1 – T60

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100$
17,39	0	0	0	0
17,95	17	61200	247,38	3,17
18,16	46	165600	406,93	4,39
18,39	70	252000	501,99	5,71
18,43	89	320400	566,03	5,94
18,55	161	579600	761,31	6,64
18,70	233	838800	915,86	7,51
18,93	328	1180800	1086,64	8,85
18,98	352	1267200	1125,70	9,13
19,06	375	1350000	1161,89	9,59
19,12	543	1954800	1398,14	9,90
19,23	567	2041200	1428,70	10,54
19,29	711	2559600	1599,87	10,92
19,39	927	3337200	1826,80	11,47
19,40	1023	3682800	1919,06	11,50
19,49	1431	5151600	2269,71	12,07
19,54	1551	5583600	2362,96	12,33
19,74	1863	6706800	2589,74	13,47
19,74	2079	7484400	2735,76	13,46
19,74	2928	10540800	3246,65	13,47

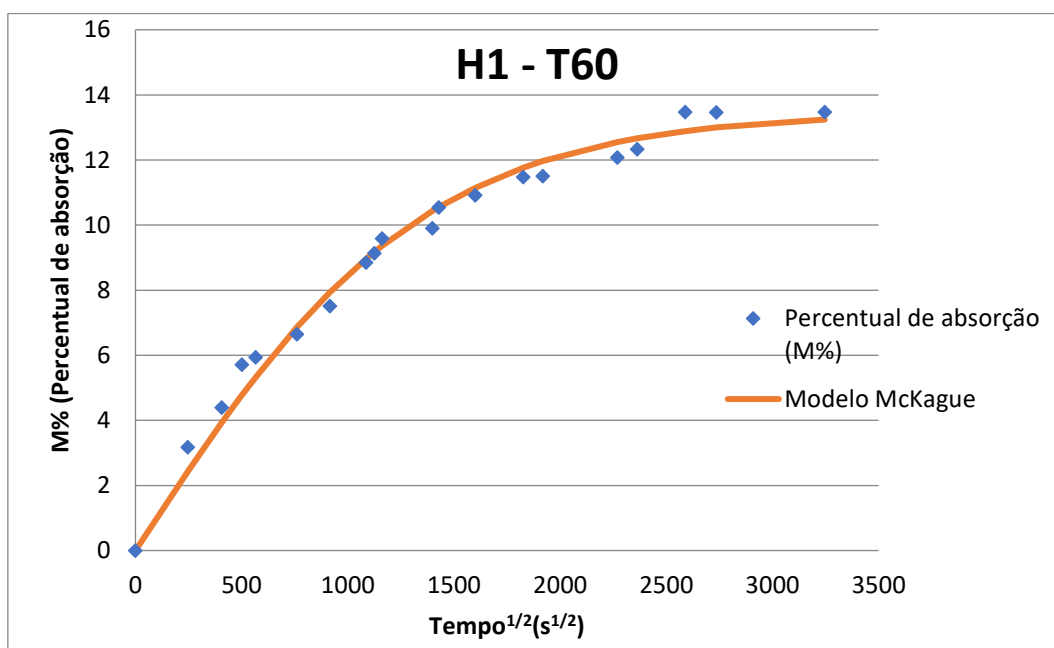
Figura B.7 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra H1-T60.

Tabela B.8 - Resultados do ensaio de absorção compósito fibra de vidro H2 – T60

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100$
18,70	0	0	0	0
19,31	17	61200	247,38	3,27
19,56	46	165600	406,93	4,63
19,84	70	252000	501,99	6,10
19,89	89	320400	566,03	6,40
20,04	161	579600	761,31	7,16
20,21	233	838800	915,86	8,06
20,49	328	1180800	1086,64	9,58
20,53	352	1267200	1125,69	9,78
20,58	375	1350000	1161,89	10,04
20,62	543	1954800	1398,14	10,27
20,79	567	2041200	1428,70	11,21
20,84	711	2559600	1599,87	11,46
21,02	927	3337200	1826,80	12,42
21,15	1023	3682800	1919,06	13,11
21,22	1431	5151600	2269,71	13,49
21,26	1551	5583600	2362,96	13,71
21,38	1863	6706800	2589,74	14,35
21,38	2079	7484400	2735,76	14,32
21,38	2928	10540800	3246,65	14,32

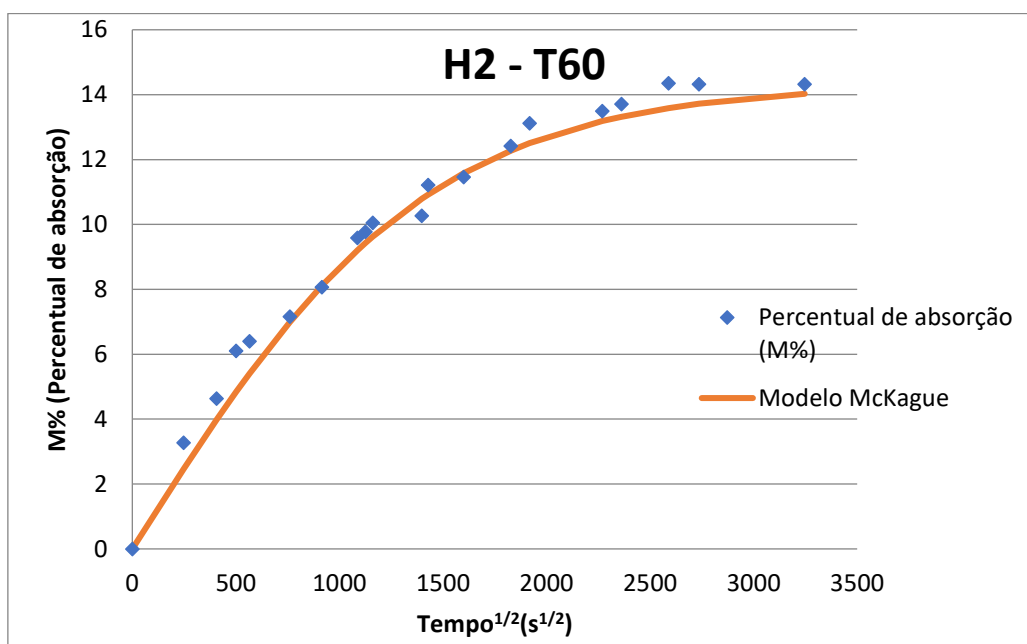
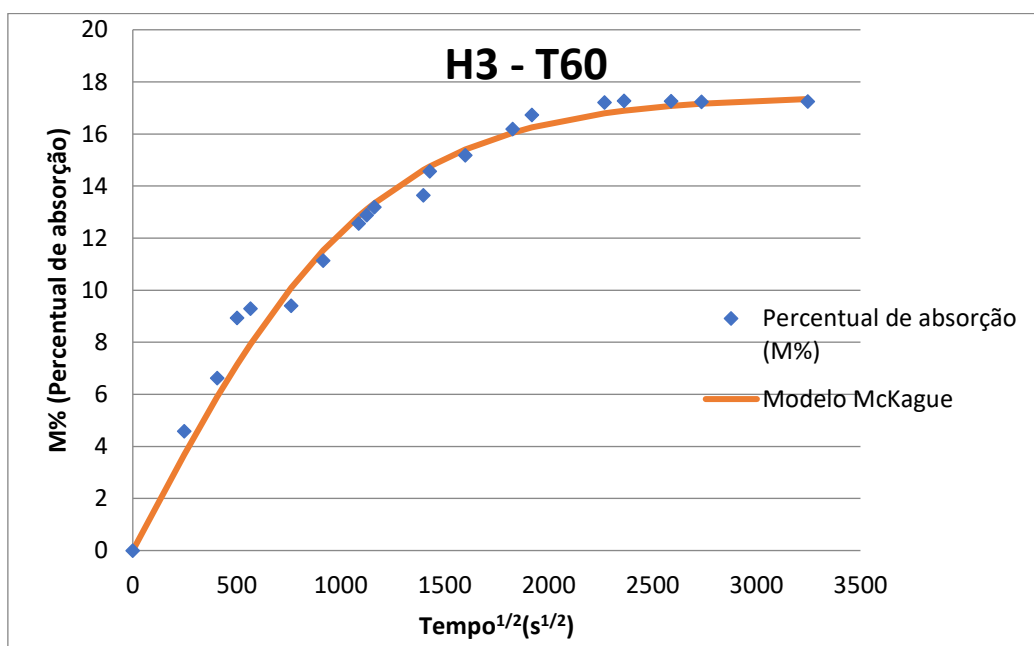
Figura B.8 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra H2-T60.

Tabela B.9 - Resultados do ensaio de absorção compósito fibra de vidro H3 – T60

Massa	Horas	Segundos	Raiz Segundos	$\frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100$
18,08	0	0	0	0
18,91	17	61200	247,38	4,58
19,28	46	165600	406,93	6,62
19,70	70	252000	501,99	8,93
19,76	89	320400	566,03	9,29
19,78	161	579600	761,31	9,40
20,10	233	838800	915,86	11,14
20,35	328	1180800	1086,64	12,56
20,41	352	1267200	1125,70	12,87
20,47	375	1350000	1161,89	13,19
20,55	543	1954800	1398,14	13,64
20,72	567	2041200	1428,70	14,57
20,83	711	2559600	1599,87	15,18
21,01	927	3337200	1826,80	16,18
21,11	1023	3682800	1919,06	16,73
21,19	1431	5151600	2269,71	17,21
21,20	1551	5583600	2362,96	17,26
21,20	1863	6706800	2589,74	17,26
21,20	2079	7484400	2735,76	17,23
21,20	292	10540800	3246,65	17,24

Figura B.9 - Curva de ganho de massa vs. \sqrt{t} da amostra H3-T60.