

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Roney Amarante Braga

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E TÉRMICAS  
DA FIBRA DE JUTA COMO REFORÇO EM COMPÓSITOS HÍBRIDOS DE  
MATRIZES POLIMÉRICAS DE EPÓXI, POLIÉSTER E POLIPROPILENO.**

Belo Horizonte

2015

Roney Amarante Braga

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E TÉRMICAS  
DA FIBRA DE JUTA COMO REFORÇO EM COMPÓSITOS HÍBRIDOS DE  
MATRIZES POLIMÉRICAS DE EPÓXI, POLIÉSTER E POLIPROPILENO.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior

Belo Horizonte

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

B813c Braga, Roney Amarante  
Caracterização das propriedades físicas, mecânicas e térmicas da fibra de juta como reforço em compósitos híbridos de matrizes poliméricas de epóxi, poliéster e polipropileno / Roney Amarante Braga. Belo Horizonte, 2015.  
227 f. : il.

Orientador: Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior  
Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Compósitos poliméricos. 2. Polipropileno. 3. Fibras. 4. Juta. 5. Sisal - Indústria. 6. Desenvolvimento sustentável. I. Magalhães Júnior, Pedro Américo Almeida. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 677.13

**Roney Amarante Braga**

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E TÉRMICAS  
DA FIBRA DE JUTA COMO REFORÇO EM COMPÓSITOS HÍBRIDOS DE  
MATRIZES POLIMÉRICAS DE EPÓXI, POLIÉSTER E POLIPROPILENO.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

---

Prof. Dr. Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior  
Orientador - PUC Minas

---

Prof. Dr. Jánes Landre Júnior  
PUC Minas

---

Prof. Dr. Pedro Paiva Brito  
PUC Minas

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Marivalda de Magalhães Pereira  
UFMG

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Cristina Almeida Magalhães  
CEFET-MG

---

Prof. Dr. Hermano Nascimento Júnior  
FCA (Fiat Chrysler Automobiles)

Belo Horizonte, 26 de Junho de 2015

Aos meus pais, Edgard e Marlene, minha esposa Luciene e meus filhos, Marina e Mateus, pelo incentivo e carinho dedicados. Sem eles, nada disto seria possível e teria importância.

## AGRADECIMENTOS

Ao grande arquiteto do universo, Deus, por me dar saúde, paz e inteligência para que este sonho se tornasse realidade.

À FCA (Fiat Chrysler Automobiles) pela oportunidade de realização do curso de Doutorado.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo incentivo financeiro o qual gerou a oportunidade de realização do curso de Doutorado.

À PUC-Minas, pela oportunidade de realização do curso de Doutorado.

Ao Sr. Natal Colli, supervisor da Engenharia do Produto/Estandarização e Benchmarking da FCA (Fiat Chrysler Automobiles), pelo incentivo e disponibilidade de tempo para a realização dessa tese.

Ao meu orientador, Professor Dr. Eng. Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior, pela disponibilidade, incentivo e orientação os quais proporcionaram grandes aprendizados.

Aos profissionais do Engenharia do Produto/ Estandarização e Benchmarking da FCA (Fiat Chrysler Automobiles), em destaque para os Srs. Evaldo Ferreira, Ítalo Rosa, Ronan Balbino e Victor Melo, que de diversas formas ajudaram na realização dessa tese.

A Engenharia de Materiais e Aplicações da FCA (Fiat Chrysler Automobiles) e de modo especial ao profissional Célio Santos, que de várias formas participou na laminação das peças em fibra de Juta e aglutinadas com resina epóxi e poliéster.

Ao Laboratório de Materiais da FCA (Fiat Chrysler Automobiles) e de modo especial aos profissionais Dênio Oliveira e Lucas Melo, os quais de várias formas participaram nos testes laboratoriais.

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais pelos aprendizados proporcionados.

Aos funcionários do laboratório de materiais da PUC-MG e de modo especial às estudantes Larissa Alves e Ana Paula Oliveira, as quais de várias formas participaram nos testes laboratoriais.

Aos funcionários da PUC-MG, que sempre deram o suporte necessário, em especial a Sra. Valéria Gomes, pela colaboração e presteza.

Aos meus pais Edgard e Marlene, os quais sempre estiveram presentes e contribuíram de forma importante durante toda a minha formação pessoal e profissional, dando-me apoio incondicional em todas as decisões que tomei em minha vida.

Em especial à minha esposa Luciene e meus filhos Marina e Mateus, pelo tempo de convívio furtado e pela total paciência, carinho, companheirismo, apoio e amor dedicados durante todo o decorrer desta importante etapa de formação da minha vida.

A todos aqueles que de uma forma direta ou indireta contribuíram de alguma maneira para a realização desta obra.

A todos,

Meus sinceros agradecimentos.

"Se a primeira vista a ideia não for absurda,  
não há esperança para ela."

Albert Einstein



## RESUMO

Hodiernamente, o conceito do design ecológico ou desenvolvimento sustentável ganhou uma importância vital, principalmente devido à escassez de matéria-prima e aos problemas resultantes da degradação ambiental, o que resulta cada vez mais na tentativa de incorporar nos novos produtos presentes no mercado, materiais de baixo impacto ambiental e de grande abundância na natureza. Assim, o uso de recursos vegetais para produção de materiais é uma alternativa renovável, biodegradável, de baixo custo e ainda, as fibras vegetais não são abrasivas a equipamentos de processo e geram compósitos com boa reciclabilidade. A presente Tese de Doutorado obteve e caracterizou três novos tipos de compósitos poliméricos: O primeiro deles é um compósito termoformado (PP50-JU50) a partir de termoplásticos de polipropileno >PP<, reforçados com fibras curtas de juta. O segundo tipo são compósitos laminados de fibras naturais de juta em forma de tecido, aglutinado com resina epóxi (EP69-JU31) e um outro aglutinado com resina poliéster (PO77-JU23). Foram feitas as seguintes análises destes materiais: físicas (microscopia óptica, densidade aparente, absorção de água, perda de umidade, absorção acústica e termogravimetria - TGA); mecânicas (tração, flexão e impacto por queda de dardo) e avaliação morfológica (microscopia eletrônica de varredura - MEV) e por fim foram comparados estes resultados com Polipropileno (PP-TD40) e com o Woodstock (PP50-MA50), que são dois materiais já existentes e muito utilizados no mercado. Após os ensaios, constatou-se que os compósitos laminados manualmente e o termoformado apresentaram boa constituição geométrica e sem alterações dimensionais após a cura. O PP50-JU50 obteve os melhores resultados em absorção acústica e densidade. Já o PP50-MA50 obteve melhores resultados no ensaio de tração a 23°C nos sentidos longitudinal e transversal. E o PO77-JU23 obteve melhores resultados no ensaio de tração a 80°C nos sentidos longitudinal e transversal. A adição de fibra de juta no polipropileno fez com que sua densidade diminuísse 51,7%, sua absorção de água aumentasse 68,4%, sua absorção acústica a 6.400 Hertz aumentasse 53,0%, sua energia absorvida no impacto aumentasse 6,2%, sua resistência a tração a 23°C diminuísse 2,8% e 23,9% nos sentidos longitudinal e transversal e a 80°C aumentasse 64,5% e 6,4% respectivamente, sua carga máxima de flexão a 23°C diminuísse 61,4% e 74,4% nos sentidos longitudinal e transversal e a 80°C diminuísse 54,6% e 61,4% respectivamente. Por fim, todas as condições experimentais, sucessão dos testes, procedimentos e instrumentos utilizados no experimento são relatados.

**Palavras chave:** compósito, polipropileno, fibra natural, juta, sisal, rami, coco, banana.

## ABSTRACT

Currently, the concept of ecological design and sustainable development has gained a vital importance, mainly due to shortage of raw material and the problems resulting from environmental degradation, which increasingly results in the attempt to incorporate the new products on the market, materials low environmental impact and great abundance in nature. The use of plant resources to produce renewable alternative material is biodegradable, low cost, and also vegetable fibers are not abrasive to process in the equipment and produce composites with good recyclability. This thesis consists in obtaining and characterizing three types of new polymer composites: the first one is a thermoformed composite (PP50-JU50) from thermoplastic polypropylene >PP< reinforced with short jute fibers. The second type are laminated composites, natural fibers in the form of jute fabric, bonded with epoxy resin (EP69-JU31) and another bonded with polyester resin (PO77-JU23). The following analysis were performed on these materials: physical (bulk density, water absorption, moisture loss, optical microscope, sound absorption), mechanical (tensile, flexural and impact were made by dart drop), thermal (thermogravimetric - TGA), and morphological assessment (scanning electron microscope - SEM); finally these results were compared with Polypropylene (PP-TD40) and Woodstock (PP50-MA50), which are already widely used in the market. After the tests, it was found that the composite manually rolled and thermoformed had good geometrical constitution and without dimensional changes after curing. The PP50-JU50 obtained the best results in sound absorption and density. The PP50-MA50 obtained the best results in traction at 23°C in the longitudinal and transverse directions. The PO77-JU23 obtained the best results in traction at 80°C in the longitudinal and transverse directions. The addition of the jute fiber in polypropylene made its density decreased 51.7%, its water absorption increased 68.4%, its sound absorption to 6,400 Hertz increased 53.0%, its energy absorbed during impact increased 6.2%, its tensile strength at 23°C decreased 2.8% and 23.9% in the longitudinal and transverse directions and at 80°C increased 64.5% and 6.4% respectively, their maximum bending load at 23°C decreased 61.4% and 74.4% in the longitudinal and transverse directions and at 80°C decreased 54.6% and 61.4% respectively. Finally, all the experimental conditions, succession of tests, procedures and instruments used in the experiment are reported.

**Key words:** composite, polypropylene, natural fiber, jute, sisal, ramie, coco, banana.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Locais de aplicação de fibras naturais em automóveis.....	39
Figura 02 – Mercedes-Benz classe A tem 27 peças produzidas com fibras vegetais.....	40
Figura 03 – Ford Ka Beauty.....	40
Figura 04 – Chevrolet Cruze.....	41
Figura 05 – Patentes depositadas sobre “Fibras Naturais” no mundo por país.....	43
Figura 06 – Carrapicho.....	46
Figura 07 – Fokker dr 1 da Alemanha, 1917, o avião do Barão Vermelho.....	49
Figura 08 – Caça britânico Spitfire da 2ª Guerra Mundial (1939-194.....	49
Figura 09 – Avião F-15 da força aérea americana.....	52
Figura 10 – Representação das combinações possíveis em compósitos.....	54
Figura 11 – Desempenho estrutural em compósitos utilizados em diversos ramos.....	56
Figura 12 – Lâminas com reforço.....	57
Figura 13 – Formas comuns de reforço de fibra.....	58
Figura 14 – Classificação dos materiais compósitos.....	58
Figura 15 – Representação de uma lâmina de compósito e seus esforços/tensões.....	60
Figura 16 – Representação de uma lâmina e seus esforços/tensões.....	61
Figura 17 – Macromolécula de uma resina sintética.....	64
Figura 18 – Macromolécula de uma resina poliéster.....	66
Figura 19 – Resina epóxi à base de Bisfenol A.....	67
Figura 20 – Dietileno triamina (DETA). ....	69
Figura 21 – Aduto de amina com DETA.....	69
Figura 22 – Classificação das fibras e alguns exemplos.....	75
Figura 23 – Classificação das fibras vegetais.....	76
Figura 24 – Representação esquemática de uma microfibrila.....	78
Figura 25 – Unidade básica da celulose.....	79
Figura 26 – Cultivo de juta na Amazônia.....	81
Figura 27 – Planta de sisal.....	83
Figura 28 – Planta de rami.....	84
Figura 29 – Fruto do coqueiro.....	86
Figura 30 – Planta da Bananeira.....	87
Figura 31 – Operações básicas para a obtenção da peça final têm a seguinte sequência....	89
Figura 32 – Processo de moldagem manual de compósito em molde aberto.....	90

Figura 33 – Processo de moldagem manual por aspersão de compósito em molde aberto.	91
Figura 34 – Processo de moldagem a vácuo de compósito em molde aberto.....	91
Figura 35 – Esquematização do processo de bobinamento.....	92
Figura 36 – Tipos de bobinamento.....	93
Figura 37 – Esquematização do processo de pultrusão.....	94
Figura 38 – Diagrama das etapas envolvidas durante o precessamento por compressão.	95
Figura 39 – Esquema dos principais itens no processo de moldagem em autoclave.....	96
Figura 40 – Diagrama esquemático de uma injetora para moldagem de termoplásticos....	97
Figura 41 – Esquema do processo de manufatura de prepregs.....	98
Figura 42 – Moldagem por compressão usando bloco e chapa pré-formados.....	98
Figura 43 – Processo de termoformagem.....	99
Figura 44 – Representação esquemática da superfície de uma fibra de reforço.....	101
Figura 45 – Diagrama de forças envolvidas na medida do ângulo de contato.....	102
Figura 46 – Mecanismos de falha em compósitos.....	103
Figura 47 – Mecanismos de falha em compósitos.....	104
Figura 48 – Mecanismos de falha em compósitos.....	105
Figura 49 – Deformação térmica em: (a) material isotrópico e (b) material anisotrópico..	109
Figura 50 – Forças suportadas pelas fibras ( $F_f$ ), pela resina ( $F_m$ ) e pelo compósito ( $F_1$ )..	110
Figura 51 – Modelo para predição de propriedades transversais.....	111
Figura 52 – Bamgoo car, trançagem do bambu.....	114
Figura 53 – Bamgoo car, início da colocação do bambu trançado.....	114
Figura 54 – Bamgoo car, carroceria feita em bambu.....	115
Figura 55 – Tecido híbrido de juta e algodão.....	116
Figura 56 – Compósito em tecido híbrido de juta e algodão e resina fenólica.....	116
Figura 57 – Corpos de prova de tração.....	117
Figura 58 – Corpos de prova em tecido de sisal no molde.....	118
Figura 59 – Corpos de prova com diferentes falhas verificadas no processo de injeção....	119
Figura 60 – Corpos de prova com 30,0% de sisal e 70,0% de resina renovável.....	119
Figura 61 – Fluxograma macro dos experimentos.....	126
Figura 62 – Tela de juta 100,0% natural T10.....	131
Figura 63 – Gramatura da tela de juta 100,0% natural T10.....	131
Figura 64 – Corte da Tela de juta 100,0% natural T10.....	132
Figura 65 – Tela de juta 100,0% natural T10, cortada para o experimento.....	132
Figura 66 – Símbolo do polipropileno.....	138

Figura 67 – Detalhe dos fios da fibra de juta.....	140
Figura 68 – Detalhe dos fios da fibra de sisal.....	140
Figura 69 – Detalhe dos fios da fibra de rami.....	141
Figura 70 – Detalhe dos fios da fibra de coco.....	141
Figura 71 – Detalhe dos fios da fibra de banana.....	142
Figura 72 – Aplicação de resina epóxi misturada com o endurecedor na placa.....	144
Figura 73 – Eliminação de bolhas de ar utilizando-se o rolete sobre o molde.....	145
Figura 74 – Placa em fibra de juta e resina epóxi.....	145
Figura 75 – Placa mostrando os sentidos longitudinal e transversal de laminação.....	146
Figura 76 – Corpos de prova sendo cortados em uma máquina de serra fita Dremel.....	146
Figura 77 – Corpos de prova para tração em fibra de juta com polipropileno.....	147
Figura 78 – Microscópio óptico Zeiss Scope A.1 modelo AX10.....	148
Figura 79 – Balança digital da marca Ohaus, modelo Adventurer Pro.....	149
Figura 80 – Corpos de prova imersos em água.....	150
Figura 81 – Corpos de prova dentro do forno a 100°C.....	152
Figura 82 – Balança digital da marca Sartorius, modelo BP221S.....	152
Figura 83 – Esquema do experimento montado, tubo de impedância.....	153
Figura 84 – Corpos de prova para o ensaio de absorção acústica.....	153
Figura 85 – Corpo de prova para baixas frequências inserido no tubo de impedância.....	154
Figura 86 – Equipamento para análise termogravimétrica TGA.....	155
Figura 87 – Ensaio de tração em fio único de fibra a 23°C.....	156
Figura 88 – Ensaio de tração em corpos de prova a 23°C.....	156
Figura 89 – Ensaio de tração em corpos de prova a 80°C.....	157
Figura 90 – Ensaio de flexão em corpos de prova a 23°C.....	158
Figura 91 – Equipamento CEAST para o teste de impacto por queda de dardo a 23°C.....	159
Figura 92 – MEV Philips, modelo New XL30 139-2.5.....	160
Figura 93 – Corpo de prova já metalizado fixado no MEV Philips.....	160
Figura 94 – Detalhe do corpo de prova já metalizado fixado no MEV Philips.....	161
Figura 95 – Detalhe do fio de fibra natural fixado no MEV Philips.....	161
Figura 96 – Detalhe do compósito EP69-JU31.....	162
Figura 97 – Detalhe do compósito PO77-JU23.....	163
Figura 98 – Detalhe do compósito PP50-JU50.....	163
Figura 99 – Detalhe do fio de fibra de juta com um aumento de 200x.....	166
Figura 100 – Detalhe do fio de fibra de sisal com um aumento de 200x.....	166

Figura 101 – Detalhe do fio de fibra de rami com um aumento de 200x.....	167
Figura 102 – Detalhe do fio de fibra de coco com um aumento de 200x.....	167
Figura 103 – Detalhe do fio de fibra de banana com um aumento de 200x.....	168
Figura 104 – MEV do fio da fibra de juta fraturado.....	191
Figura 105 – MEV do fio da fibra de sisal fraturado.....	192
Figura 106 – MEV do fio da fibra de rami fraturado.....	192
Figura 107 – MEV do fio da fibra de coco fraturado.....	193
Figura 108 – MEV do fio da fibra de banana fraturado.....	193
Figura 109 – MEV do compósito EP69-JU31 com aumento de 15x.....	194
Figura 110 – MEV do compósito EP69-JU31 com aumento de 200x.....	195
Figura 111 – MEV do compósito EP69-JU31 com aumento de 250x.....	195
Figura 112 – MEV do compósito PO77-JU23 com aumento de 11x.....	196
Figura 113 – MEV do compósito PO77-JU23 com aumento de 80x.....	196
Figura 114 – MEV do compósito PO77-JU23 com aumento de 200x.....	197
Figura 115 – MEV do compósito PP50-JU50 com aumento de 20x.....	197
Figura 116 – MEV do compósito PP50-JU50 com aumento de 65x.....	198
Figura 117 – MEV do compósito PP50-JU50 com aumento de 66x.....	198

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Patentes sobre fibras naturais x patentes sobre polímeros.....	41
Gráfico 02 – Patentes depositadas sobre “Fibras Naturais” no mundo por ano.....	42
Gráfico 03 – Patentes sobre fibras naturais x tipos de fibra.....	43
Gráfico 04 – Patentes sobre plásticos x tipos plásticos.....	44
Gráfico 05 – Tensão x Módulo de elasticidade.....	53
Gráfico 06 – Comparativo do CSFV x CSH ensaiados à tração.....	120
Gráfico 07 – Comparativo do CSFV x CSH ensaiados à compressão.....	121
Gráfico 08 – Largura do fio único de fibra natural.....	165
Gráfico 09 – Espessura dos compósitos analisados.....	169
Gráfico 10 – Densidade aparente dos compósitos analisados.....	170
Gráfico 11 – Absorção de água por tempo de imersão.....	173
Gráfico 12 – Absorção de água em 1172 horas.....	174
Gráfico 13 – Perda de umidade dos compósitos.....	174
Gráfico 14 – Perda de umidade em 1080 horas.....	175
Gráfico 15 – Absorção acústica dos compósitos.....	176
Gráfico 16 – Termograma TGA dos compósitos.....	177
Gráfico 17 – Curvas do ensaio de tração a 23°C dos fios únicos de fibra natural.....	178
Gráfico 18 – Curvas do ensaio de tração a 23°C no sentido longitudinal de laminação.....	180
Gráfico 19 – Curvas do ensaio de tração a 23°C no sentido transversal de laminação.....	181
Gráfico 20 – Curvas do ensaio de tração a 80°C no sentido longitudinal de laminação.....	182
Gráfico 21 – Curvas do ensaio de tração a 80°C no sentido transversal de laminação.....	183
Gráfico 22 – Média da máxima tensão de tração a 23°C e a 80°C.....	184
Gráfico 23 – Curvas do ensaio de flexão a 23°C no sentido longitudinal de laminação.....	185
Gráfico 24 – Curvas do ensaio de flexão a 23°C no sentido transversal de laminação.....	186
Gráfico 25 – Curvas do ensaio de flexão a 80°C no sentido longitudinal de laminação.....	187
Gráfico 26 – Curvas do ensaio de flexão a 80°C no sentido transversal de laminação.....	188
Gráfico 27 – Média da máxima carga de flexão a 23°C e a 80°C.....	189
Gráfico 28 – Energia absorvida no teste de impacto pelos compósitos.....	190
Gráfico 29 – Radar com notas de 1 a 5 por experimento.....	201

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Práticas associadas ao consumo consciente no âmbito ambiental.....	28
Tabela 02 – Práticas associadas ao consumo consciente no âmbito econômico.....	29
Tabela 03 – Práticas associadas ao consumo consciente no âmbito social.....	29
Tabela 04 – Poder calorífico das biomassas.....	33
Tabela 05 – Oferta interna de energia no Brasil por fonte.....	34
Tabela 06 – Resumo da 1ª ocorrência e 1ª produção de polímeros comerciais.....	51
Tabela 07 - Propriedades e comportamentos desenvolvidos para resinas.....	55
Tabela 08 – Propriedades típicas de alguns polímeros.....	65
Tabela 09 – Desmoldante correto em função do material das peças e dos moldes.....	74
Tabela 10 – Composição química de algumas fibras naturais.....	79
Tabela 11 – Propriedades físicas de algumas fibras naturais.....	80
Tabela 12 – Propriedades mecânicas de algumas fibras naturais.....	80
Tabela 13 – Características e propriedades da fibra de juta.....	82
Tabela 14 – Características e propriedades da fibra de sisal.....	83
Tabela 15 – Características e propriedades da fibra de rami.....	85
Tabela 16 – Características e propriedades da fibra de coco.....	86
Tabela 17 – Características e propriedades da fibra de banana.....	87
Tabela 18 – Controle de experimentos I.....	127
Tabela 19 – Controle de experimentos II.....	128
Tabela 20 – Controle de experimentos III.....	129
Tabela 21 – Tipo de fabricação, nomenclatura e percentagem das amostras testadas.....	130
Tabela 22 – Propriedades da resina epóxi RenLam M e do endurecedor Ren Hy 951.....	134
Tabela 23 – Propriedades após a cura da resina epóxi e do endurecedor.....	135
Tabela 24 – Propriedades da resina poliéster ortoftálica rígida.....	136
Tabela 25 – Propriedades da resina poliéster ortoftálica rígida na aplicação.....	137
Tabela 26 – Propriedades da resina poliéster ortoftálica flexível.....	138
Tabela 27 – Largura dos fios das fibras naturais.....	164
Tabela 28 – Comparativo de valores de largura desta tese com a literatura.....	165
Tabela 29 – Peso, espessura, volume e densidade para o compósito EP69-JU31.....	170
Tabela 30 – Peso, espessura, volume e densidade para o compósito PO77-JU23.....	171
Tabela 31 – Peso, espessura, volume e densidade para o compósito PP50-JU50.....	171
Tabela 32 – Peso, espessura, volume e densidade para o compósito PP50-MA50.....	172



Tabela 33 – Peso, espessura, volume e densidade para o compósito PP-TD40.....	172
Tabela 34 – Valores do ensaio de tração a 23°C dos fios únicos de fibra natural.....	178
Tabela 35 – Valores do ensaio de tração a 23°C no sentido longitudinal de laminação.....	179
Tabela 36 – Valores do ensaio de tração a 23°C no sentido transversal de laminação.....	180
Tabela 37 – Valores do ensaio de tração a 80°C no sentido longitudinal de laminação.....	182
Tabela 38 – Valores do ensaio de tração a 80°C no sentido transversal de laminação.....	183
Tabela 39 – Valores do ensaio de flexão a 23°C no sentido longitudinal de laminação.....	184
Tabela 40 – Valores do ensaio de flexão a 23°C no sentido transversal de laminação.....	186
Tabela 41 – Valores do ensaio de flexão a 80°C no sentido longitudinal de laminação.....	187
Tabela 42 – Valores do ensaio de flexão a 80°C no sentido transversal de laminação.....	188
Tabela 43 – Energia absorvida no teste de impacto pelos compósitos.....	190
Tabela 44 – Notas de 1 a 5 por experimento para todos materiais testados.....	201

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	Acrilonitrila-Butadieno-eStireno
ASM	American Society of Metals
BEN	Balanco Energético Nacional
CSFV	Compósitos Sanduíches de Fibra de Vidro
CSH	Compósito Sanduíche Híbrido
CTC	Companhia Têxtil de Castanhal
DADS	Diaminodifenil Sulfona
DETA	Dietileno Triamina
EDA	Etileno Diamina
EP69-JU31	Compósito com 69,0% de Resina Epóxi e 31,0% de Fibra de Juta
EPDM	Borracha de Etileno-Propileno-Monômero Diênico
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPR	Borracha de Etileno-Propileno
EUA	Estados Unidos da América
FCA	Fiat Chrysler Automobiles
GM	General Motors
HET	Anidrido Clorêndrico
HPHA	Anidrido Hexahidroftálico
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Intelectual
MDA	P-p'metileno Dianilina
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MME	Ministério de Minas e Energia
MPDA	Metafenileno Diamina
MU	Modelo de Utilidade
NMA	Anidrido Metil Nádic
OMC	Combinação Orgânico Matriz
ONU	Organizações das Nações Unidas
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PEEK	Poli-Éter-Éter-Cetona
PI	Patente de Invenção
PO77-JU23	Compósito com 77,0% de Resina Poliéster e 23,0% de Fibra de Juta

PP	Polipropileno
PP50-JU50	Compósito com 50,0% de Polipropileno e 50,0% de Fibra de Juta
PP50-MA50	Compósito com 50,0% de Polipropileno e 50,0% de Pó de Madeira
PP-TD40	Polipropileno com carga
PRFV	Plásticos Reforçados com Fibra de Vidro
PS	Poliestireno
SBR	Butadieno-Estireno
TEPA	Tetraetileno Pentamina
TETA	Trietileno Tetramina
TGA	Análises Térmicas de Termogravimétrica
THPA	Anidrido Tetrahidroftálico

## LISTA DE SIGLAS

$E$	Módulo de elasticidade
$E_c$	Módulo de elasticidade do compósito
$E_f$	Módulo de elasticidade da fibra
$M_c$	Massa total do compósito;
$M_f$	Massa da fibra
$M_m$	Massa da matriz
$V_f$	Volume de fibras
$V_m$	Volume da matriz
$V_v$	Volume de vazios
$V_c$	Volume total do compósito
$\rho_f$	Densidade da fibra
$\rho_m$	Densidade da matriz
$\rho_c$	Densidade do compósito
$\alpha$	Coefficiente de dilatação térmica
$\alpha_1$	Coefficiente de dilatação térmica na direção 1
$\varepsilon^T$	Deformação provocada apenas pela variação de temperatura
$\varepsilon_1^U$	Deformações de origem higrométrica.
$G_{12}$	Módulo de cisalhamento
$G_f$	Módulo de cisalhamento da fibra
$G_m$	Módulo de cisalhamento da matriz
$\beta_1$	Coefficiente de dilatação por umidade na direção 1
$U$	Concentração de umidade na lâmina do compósito
$\delta_2$	Elongamento
$\nu_{12}$	Coefficiente de Poisson de uma lâmina

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>24</b>
1.1 Histórico.....	24
1.2 Problema.....	34
1.3 Objetivo Geral.....	36
1.4 Objetivos Específicos.....	37
1.5 Justificativa.....	38
1.6 Escopo.....	45
1.7 Tópicos.....	46
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>48</b>
2.1 Revisão Bibliográfica.....	48
2.1.1 <i>Breve história de materiais compósitos</i> .....	48
2.1.2 <i>Materiais compósitos</i> .....	53
2.1.2.1 <u>Definições e classificação</u> .....	56
2.1.2.1.1 Compósitos particulados.....	59
2.1.2.1.2 Compósitos fibrosos.....	59
2.1.2.1.2.1 <b>Compósitos fibrosos laminados</b> .....	59
2.1.2.1.3 Compósitos para fins estruturais.....	60
2.1.3 <i>Matrizes para compósitos</i> .....	61
2.1.3.1 <u>Tipos de matrizes/resinas</u> .....	62
2.1.3.1.1 Matrizes vegetais ou naturais.....	63
2.1.3.1.2 Matrizes sintéticas.....	63
2.1.3.1.2.1 <b>Resina poliéster</b> .....	65
2.1.3.1.2.2 <b>Resina epóxi</b> .....	66
2.1.3.2 <u>Aditivos</u> .....	67
2.1.3.2.1 Agentes de cura (Endurecedores).....	68
2.1.3.2.1.1 <b>Aminas alifáticas</b> .....	68
2.1.3.2.1.2 <b>Adutos de aminas</b> .....	69
2.1.3.2.1.3 <b>Poliamidas</b> .....	69
2.1.3.2.1.4 <b>Aminas cicloalifáticas</b> .....	70
2.1.3.2.1.5 <b>Anidridos</b> .....	70
2.1.3.2.1.6 <b>Poliaminoamidas ou poliamidoaminas</b> .....	71

2.1.3.2.1.7 Aminas aromáticas.....	72
2.1.3.2.1.8 Polissulfetos.....	72
2.1.3.2.1.9 Polioxipropilaminas.....	72
2.1.3.3 <u>Desmoldantes</u> .....	72
2.1.3.3.1 Funcionamento dos desmoldantes.....	72
2.1.3.3.2 Tipos de desmoldantes.....	73
2.1.4 <i>Reforços para compósitos</i> .....	75
2.1.4.1 <u>Fibras sintéticas</u> .....	76
2.1.4.2 <u>Fibras naturais</u> .....	76
2.1.4.2.1 Fibra de juta.....	80
2.1.4.2.2 Fibra de sisal.....	82
2.1.4.2.3 Fibra de rami.....	84
2.1.4.2.4 Fibra de coco.....	85
2.1.4.2.5 Fibra de banana.....	86
2.1.5 <i>Processos de fabricação de materiais compósitos poliméricos</i> .....	88
2.1.5.1 <u>Processo de laminação manual</u> .....	89
2.1.5.2 <u>Processo de laminação manual por aspersão</u> .....	90
2.1.5.3 <u>Processo por moldagem a vácuo</u> .....	91
2.1.5.4 <u>Processo por bobinamento</u> .....	92
2.1.5.5 <u>Processo por trefilação de perfis estruturais (Pultrusão)</u> .....	93
2.1.5.6 <u>Processo por moldagem por compressão a quente</u> .....	94
2.1.5.7 <u>Processo por moldagem por membrana autoclave</u> .....	95
2.1.5.8 <u>Processo por injeção</u> .....	96
2.1.5.9 <u>Processo com pré-formados</u> .....	97
2.1.5.10 <u>Processo por termoformagem</u> .....	99
2.1.6 <i>Adesão e interface reforço/matriz</i> .....	100
2.1.6.1 <u>Teorias de adesão</u> .....	100
2.1.6.2 <u>Ângulo de contato</u> .....	102
2.1.6.3 <u>Mecanismos de falha</u> .....	103
2.1.7 <i>Micromecânica de uma lâmina</i> .....	104
2.1.7.1 <u>Definições gerais</u> .....	104
2.1.7.2 <u>Hipóteses simplificadoras</u> .....	105
2.1.7.3 <u>Frações de massa, volume e densidade</u> .....	106
2.1.7.4 <u>Coefficientes de dilatação térmica e de umidade</u> .....	108

2.1.7.5 <u>Módulo de resistência longitudinal à tração (Regra das misturas)</u> .....	109
2.1.7.6 <u>Módulo de resistência transversal à tração (Regra das misturas)</u> .....	111
2.1.7.7 <u>Módulo de elasticidade cisalhante</u> .....	112
2.1.7.8 <u>Coefficiente de Poisson</u> .....	112
2.2 Estado da Arte.....	113
<b>3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>126</b>
3.1 Etapas do Trabalho.....	126
3.2 Controle dos experimentos.....	127
3.3 Materiais.....	129
3.3.1 <i>Tecido de fibra de juta</i> .....	130
3.3.2 <i>Resina epóxi</i> .....	132
3.3.3 <i>Resina poliéster</i> .....	135
3.3.3.1 <u>Resina Policron 10-116</u> .....	136
3.3.3.2 <u>Resina Resapol 10-255</u> .....	137
3.3.4 <i>Polipropileno</i> .....	138
3.3.5 <i>Fios das fibras</i> .....	139
3.4 Descrição do experimento.....	142
3.4.1 <i>Laminação das placas</i> .....	143
3.5 Preparação das amostras.....	146
3.6 Caracterização das amostras.....	147
3.6.1 <i>Microscopia óptica</i> .....	147
3.6.2 <i>Densidade aparente</i> .....	148
3.6.3 <i>Absorção de água</i> .....	149
3.6.4 <i>Perda de umidade</i> .....	151
3.6.5 <i>Absorção Acústica</i> .....	153
3.6.6 <i>Análise termogravimétrica (TGA)</i> .....	154
3.6.7 <i>Tração</i> .....	155
3.6.8 <i>Flexão</i> .....	157
3.6.9 <i>Impacto por queda de dardo</i> .....	158
3.6.10 <i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i> .....	159
<b>4 RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....	<b>162</b>

<b>4.1 Análise visual dos compósitos.....</b>	<b>162</b>
<b>4.2 Propriedades físicas.....</b>	<b>164</b>
4.2.1 <i>Largura do fio único de fibra natural.....</i>	<i>164</i>
4.2.2 <i>Espessura dos compósitos.....</i>	<i>168</i>
4.2.3 <i>Densidade aparente.....</i>	<i>169</i>
4.2.4 <i>Absorção de água.....</i>	<i>173</i>
4.2.5 <i>Perda de umidade.....</i>	<i>174</i>
4.2.6 <i>Absorção acústica.....</i>	<i>175</i>
4.2.7 <i>Análise termogravimétrica (TGA).....</i>	<i>176</i>
<b>4.3 Propriedades mecânicas.....</b>	<b>177</b>
4.3.1 <i>Tração.....</i>	<i>177</i>
4.3.2 <i>Flexão.....</i>	<i>184</i>
4.3.3 <i>Impacto por queda de dardo.....</i>	<i>189</i>
<b>4.4 Propriedades morfológicas.....</b>	<b>191</b>
4.4.1 <i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....</i>	<i>191</i>
<b>4.5 Comparativo entre os compósitos.....</b>	<b>199</b>
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>202</b>
5.1 <i>Conclusões.....</i>	<i>202</i>
5.2 <i>Sugestões para trabalhos futuros.....</i>	<i>205</i>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>207</b>
<b>GLOSSÁRIO.....</b>	<b>219</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Embora a associação do termo compósito esteja ligada às chamadas tecnologias de ponta, cujas peças e dispositivos oriundos desse material são empregados em componentes utilizados em satélites, aeronaves, helicópteros, implantes ortopédicos e dentários, plataformas marítimas e até instrumentos musicais, em geral, a origem desta importante classe de materiais remonta a incontáveis milhares de anos, uma vez que as madeiras, os ossos e os tecidos musculares são exemplos notáveis em termos de eficiência estrutural dos chamados compósitos estruturais (HULL; CLYNE, 1996).

### 1.1 Histórico

O início da preocupação da comunidade internacional com os limites do desenvolvimento do planeta data da década de 60, quando começaram as discussões sobre os riscos da degradação do meio ambiente. Tais discussões ganharam tanta intensidade que levaram a ONU (Organizações das Nações Unidas) a promover uma Conferência sobre o Meio Ambiente em Estocolmo na Suécia em 1972. No mesmo ano, Dennis Meadows<sup>1</sup> e alguns pesquisadores, publicaram o estudo Limites do Crescimento. O estudo concluía que, mantidos os níveis de industrialização, poluição, produção de alimentos e exploração dos recursos naturais, o limite de desenvolvimento do planeta seria atingido, no máximo, em 100 anos, provocando uma repentina diminuição da população mundial e da capacidade industrial. As reações vieram de intelectuais do Primeiro Mundo, para quem a tese de Meadows representaria o fim do crescimento da sociedade industrial, e dos países subdesenvolvidos. Já que os países desenvolvidos queriam "fechar as portas" do desenvolvimento aos países pobres, com uma justificativa ecológica. Em 1973, o canadense Maurice Strong<sup>2</sup> lançou o conceito de eco desenvolvimento, cujos princípios foram formulados por Ignacy Sachs<sup>3</sup>. (MARTINS, 2003).

---

<sup>1</sup> Dennis L. Meadows, nascido em 7 de Junho de 1942, é um cientista norte-americano. Atualmente, é o presidente do Laboratório de Ensino Interativo na Universidade de New Hampshire.

<sup>2</sup> Maurice F. Strong, nascido em 29 de Abril de 1929, empresário e ambientalista. Nos dias de hoje, é presidente do Conselho da Organização das Nações Unidas para a Paz.

<sup>3</sup> Ignacy Sachs, nascido em Varsóvia no ano de 1927, é um economista polonês, naturalizado francês. Refugiou-se no Brasil em 1941 em virtude da Segunda guerra mundial. Na atualidade, é co-diretor do Centro de Pesquisas sobre o Brasil Contemporâneo na École des Hautes Études en Sciences Sociales (EHESS).

Desde então as vozes defensoras do meio ambiente e vários alertas vêm sendo dados sistematicamente quanto à produção, consumo e descarte em massa, reforçados pelos fenômenos meteorológicos a que assistimos ou vivenciamos cada vez mais assoladores e de magnitudes crescentes. (MEADOWS e outros, 2004).

Segundo Ignacy Sachs, os caminhos do desenvolvimento seriam seis:

- 1) Satisfação das necessidades básicas;
- 2) Solidariedade com as gerações futuras;
- 3) Participação da população envolvida;
- 4) Preservação dos recursos naturais e do meio ambiente;
- 5) Elaboração de um sistema social que garanta emprego, segurança social e respeito a outras culturas;
- 6) Programas de educação.

Em 1962, Rachel Carson<sup>4</sup>, escritora e ecologista americana, publicou o livro *Primavera Silenciosa*, o qual é considerado o maior desafio à indústria química. Seu livro é a primeira indicação do impacto criado pelas indústrias químicas, ao abordar as consequências ambientais de agrotóxicos na contaminação do solo e da água, o que ameaçava toda a cadeia alimentar dos seres vivos (MOL, 1995; PASSOS, 2009).

Em 1987, foi divulgado um estudo no qual a indústria química identificou na Antuérpia (Bélgica), entre 1500 e 1800, uma enorme quantidade de poluição e riscos provocados por esse tipo de atividade. Isso deixou evidente que as indústrias químicas já vinham monitorando, há um bom tempo, seus resíduos industriais. (MOL, 1995).

Em 1992, ocorreu no Brasil a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento no Rio de Janeiro, evento que ficou conhecido como ECO 92. Na ocasião foram realizados novos balanços ambientais e estabelecidas duas convenções: uma sobre mudanças climáticas e outra sobre biodiversidade. Assinou-se a Agenda 21 (um plano com metas para melhorias ambientais) e em 2002, em Johannesburgo (África do Sul), realizou-se a Cúpula Mundial sobre o Desenvolvimento Sustentável, conhecida como Rio+10. (ALMANAQUE ABRIL, 2010).

---

<sup>4</sup> Rachel Louise Carson nasceu em maio de 1907. Posteriormente, em depoimento ao Congresso Americano em 1963, Carson pede novas políticas de proteção à saúde humana e ao meio ambiente (LEAR, 1998).

Paralelamente, foram realizadas diversas outras convenções internacionais entre 1985 e 2001, o que revela a existência da intenção de governos, estudiosos e pesquisadores globais de encontrar alternativas conciliatórias entre o meio ambiente e o crescimento econômico, necessário para sustentar nossa geometricamente crescente humanidade com seus anseios de qualidade de vida e bem estar, ou seja, o de um desenvolvimento sustentável que paradoxalmente permita a coexistência do homem em seu próprio planeta, o que deveria ser um pressuposto da humanidade. (MORAES, 2012).

O desenvolvimento sustentável não se refere especificamente a um problema limitado de adequações ecológicas de um processo social, mas a uma estratégia ou modelo múltiplo para a sociedade, que deve levar em conta tanto a viabilidade econômica como ecológica. Num sentido abrangente, a noção de desenvolvimento sustentável leva à necessária redefinição das relações sociedade humana/natureza e, portanto, a uma mudança substancial do próprio processo civilizatório. (JACOBI, 2002).

Nos dias que correm, o grau de conscientização da humanidade, quanto às questões ambientais não é tão restrito. A instauração de novas leis, nacionais e internacionais, e algumas iniciativas privadas com e sem fins lucrativos, começam a surtir resultados positivos em questões ambientais, bem como o advento das normas ISO 14001 e ISO 50001.

A própria Agenda 21 Brasileira já incluiu em seu texto:

8.31. Reconhecendo que os países irão desenvolver suas próprias prioridades, em conformidade com suas necessidades e planos, políticas e programas nacionais, o desafio é realizar um progresso significativo nos anos vindouros para atingir três objetivos fundamentais:

- a) Incorporar os custos ambientais às decisões de produtores e consumidores e com isso inverter a tendência a tratar o meio ambiente como um "bem gratuito", repassando esses custos a outros setores da sociedade, outros países, ou às gerações futuras;
- b) Avançar mais para a integração dos custos sociais e ambientais às atividades econômicas, de modo que os preços reflitam adequadamente a relativa escassez e o valor total dos recursos e contribuam para evitar a degradação ambiental;
- c) Incluir, quando apropriado, o uso de princípios do mercado à configuração de políticas e instrumentos econômicos que busquem o desenvolvimento sustentável. (AGENDA 21 BRASILEIRA, 2002).

O aquecimento global não é mais uma teoria e sim uma realidade mensurável e com estimativas pouco animadoras para as próximas décadas, caso a relação que o ser humano tem com o meio ambiente não mude. As emissões de carbono continuam em níveis crescentes, particularmente por parte dos países desenvolvidos e em desenvolvimento. O lixo oriundo dos

rejeitos e descartes humanos hoje são alvo de inúmeras pesquisas, interesses governamentais e de particulares, para se encontrar as possibilidades de destino, reaproveitamento ou reciclagem. A demanda por produtos derivados do petróleo, uma fonte de matérias-primas não renováveis, continua em níveis crescentes; algo tem de ser feito para que esta realidade seja mudada. (HEINBERG, 2011).

Existem vários órgãos não governamentais (ONG's) os quais se preocupam tão somente com a degradação do meio ambiente. Por exemplo, a Global Footprint Network (GFN) é uma organização sem fins lucrativos criada em 2003, focada em "permitir a existência de um futuro sustentável, onde todas as pessoas tenham a oportunidade de viver satisfatoriamente dentro da capacidade ecológica da Terra". Dentre inúmeras iniciativas, pesquisas e projetos envolvendo governos, comunidades e empresas, a entidade está permanentemente aperfeiçoando os métodos e cálculos sobre o impacto ecológico que países, estados, cidades e até indivíduos causam na natureza. Esses dados são alimentados no software "Pegada Ecológica", uma ferramenta criada em 1993 por Mathis Wackernagel e Rees William o qual quantifica a demanda humana sobre a natureza e a capacidade desta para atender a essa demanda. Para ilustrar, fez-se um mapeamento global em função de densidades populacionais e/ou hábitos de consumo. Projetou-se que em 1961 a intensidade do consumo humano exigia a exploração de 49,0% da capacidade regenerativa de determinadas regiões; já em 2001, alcançaram-se níveis de 121,0% desta capacidade. Ou seja, a demanda da humanidade sobre a natureza está excedendo a oferta da biosfera ou sua capacidade regenerativa (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2014).

Outra organização semelhante é a WWF (World Wild Fund), uma organização mundial já com 50 anos de atividade, a qual é apoiada por mais de 5 milhões de pessoas. Ela trabalha de forma unificada e com alcance global, oferecendo soluções inovadoras e com bases científicas para que sejam atendidas tanto as necessidades humanas quanto as da natureza. O foco do seu trabalho é promover a redução das emissões globais das emissões dos gases do efeito estufa, e tem despendido esforços junto a diversos governos em todo o mundo para que adotem medidas que promovam a redução dos níveis de CO<sub>2</sub>, pelo menos abaixo dos 80,0% dos níveis de 1990, até 2050 (WWF, 2014).

A GREENPEACE é uma organização mundial fundada em 1971 no Canadá por imigrantes americanos e tem, atualmente, cerca de três milhões de colaboradores em todo o mundo (quarenta mil no Brasil), os quais doam quantias mensais que variam de acordo com o país. Entre os primeiros ativistas que ajudaram a fundar a organização na década de 1970, havia pessoas com estilo de vida hippie e membros de comunidades americanas, as quais

migraram para o Canadá por não concordarem com a Guerra do Vietnã. Como também, atua internacionalmente em questões relacionadas à preservação do meio ambiente e desenvolvimento sustentável, com campanhas dedicadas às áreas de florestas (Amazônia no Brasil), clima, nuclear, oceanos, engenharia genética, substâncias tóxicas, transgênicos e energia renovável. A organização busca sensibilizar a opinião pública através de atos de publicidade e outros meios. Sua atuação é baseada nos pilares filosófico-morais da desobediência civil e tem como princípio básico a ação direta. (GREENPEACE, 2014).

Porém, mesmo com tantos órgãos preocupados com a conscientização da humanidade sobre o meio ambiente e mesmo com uma enorme exposição na imprensa sobre o assunto, uma pesquisa recente da revista Consumidor Moderno concluiu que o consumidor brasileiro ainda não tem esta percepção afluída e continua relacionando consumo consciente muito mais a ações voltadas ao meio ambiente do que a âmbitos social e econômico, o que converte esta consciência do consumidor em “consciente por conveniência”. (CONSUMIDOR MODERNO, 2014).

A Tabela 01 mostra o que o consumidor considera como práticas associadas ao consumo consciente no âmbito ambiental.

**Tabela 01 – Práticas associadas ao consumo consciente no âmbito ambiental.**

Ítem	Pessoas entrevistadas	%
Não desperdício de água	974	64,08
Reciclagem e separação de lixo	924	60,79
Economia e energia elétrica	899	59,14
Comprar produtos de empresas que respeitem o meio ambiente	792	52,11
Evitar o descarte de comida	673	44,28
Comprar produtos orgânicos ou de material reciclado	650	42,76
Utilizar transporte público ao invés de carro	624	41,05
Utilizar bicicleta ao invés de carro	590	38,82
Não utilizar produtos testados em animais	456	30,00

**Fonte: Adaptado de CONSUMIDOR MODERNO, 2014.**

A Tabela 02 mostra o que o consumidor considera como práticas associadas ao consumo consciente no âmbito econômico.

**Tabela 02 – Práticas associadas ao consumo consciente no âmbito econômico.**

<b>Ítem</b>	<b>Pessoas entrevistadas</b>	<b>%</b>
Evitar compras de impulso	875	57,57
Não acúmulo / controle de dívidas	749	49,28
Uso consciente do crédito	744	48,95
Alocação consciente do orçamento familiar	732	48,16
Poupar parte dos ganhos	728	47,89
Pedir nota fiscal	563	37,04
Fazer previdência privada	364	23,95

**Fonte: Adaptado de CONSUMIDOR MODERNO, 2014.**

A Tabela 03 mostra o que o consumidor considera como práticas associadas ao consumo consciente no âmbito social.

**Tabela 03 – Práticas associadas ao consumo consciente no âmbito social.**

<b>Ítem</b>	<b>Pessoas entrevistadas</b>	<b>%</b>
Evitar comprar produtos de empresas com exploração infantil	841	55,33
Doar bens não utilizados para instituições de caridade	836	55,00
Realizar trabalho voluntário	732	48,16
Participar de algum projeto social	696	45,79
Doar dinheiro para instituições de caridade	278	18,29
Participar de manifestações nas ruas	178	11,71

**Fonte: Adaptado de CONSUMIDOR MODERNO, 2014.**

É visível o crescimento de consumidores conscientes, mas os jovens e as crianças tem um nível de consciência maior que a geração adulta. No caso dos adultos, estão mais conscientes por conveniência, até porque esta convicção está mais ligada a valores e exemplos. (CONSUMIDOR MODERNO, 2014).

Com isso, a preservação do meio ambiente tem sido tema de estudos em centros de pesquisa de todo o mundo, e já é de conhecimento na literatura o uso de compósitos poliméricos em aplicações estruturais de médio e grande porte, desde que a leveza acompanhada de alto desempenho seja possível. As fibras utilizadas como reforços nesses

materiais são geralmente de origem sintética (vidro, carbono, boro, etc.) e, portanto, trazendo com elas preocupações de caráter ambiental. Assim, tem-se buscado uma melhoria na tecnologia voltada para a utilização de matéria-prima proveniente de fontes renováveis, como a utilização de fibras naturais como reforço para matrizes poliméricas. (JOSEPH, 2002; RANA; MANDAL; BANDYOPADHYAY, 2003; GHOSH; SAMANTA; DEV, 1997).

O desenvolvimento de materiais corretos ecologicamente e uma melhor adequação dos processos para uso destes materiais, são ferramentas fundamentais na busca de alternativas para minimizar os problemas ambientais no mundo. O uso de matérias-primas de fontes renováveis vem sendo objeto de diversos estudos e pesquisas, devido ao seu potencial na substituição de derivados petroquímicos. (BRAGA, 2006).

As fibras naturais como juta, algodão, sisal e coco são abundantes em países com potencial agrícola como o Brasil; entretanto, esses recursos naturais ainda não são explorados adequadamente (MEDEIROS, 2002), pois, além de gerar empregos diretos, é uma forma de evitar o êxodo rural. Hoje, a maior parte do uso das fibras naturais ainda é em aplicações convencionais como, por exemplo, na produção de fios para cordoalhas, sacarias, artesanatos e tecidos. (MEDEIROS, 2002).

O Desenvolvimento Sustentável, definido pela Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento da ONU, visa orientar os políticos e líderes dos países a usar os recursos ambientais de maneira a atender às necessidades das populações atuais e das gerações futuras.

A definição mais aceita para desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro. (WWF, 2014).

As fibras vegetais, por serem compostas principalmente de celulose, são também chamadas de fibras celulósicas ou lignocelulósicas, e são abundantes e disponíveis em todo mundo. No passado, eram empregadas basicamente na fabricação de cordas, fios, carpetes, e outros produtos decorativos. (ARAÚJO; CASTRO, 1984), (POTTER; CORBMAN, 1967). Porém, com o avanço no desenvolvimento das fibras sintéticas, houve um decréscimo no consumo dessas fibras. Com a diminuição rápida das reservas de petróleo, e uma consciência crescente de preservação do meio ambiente, e controle de poluição, tem-se dado grande importância à utilização de recursos renováveis na fabricação de diversos produtos. (ROWELL e outros, 1996). Estas possuem grande importância no desenvolvimento econômico dos países sub-desenvolvidos e em desenvolvimento, como também são recursos

naturais renováveis e biodegradáveis, leves, fortes, duráveis, de fácil secagem, baixo custo e apresentam um bom conjunto de propriedades mecânicas, adequadas a várias aplicações.

Neste contexto, existe hoje um interesse crescente na utilização de materiais lignocelulósicos (fibras de juta, sisal, coco, rami e banana), como reforço em compósitos de matrizes termofixas ou termoplásticas. O interesse de utilização das fibras vegetais como agente de reforço está relacionado ao seu baixo custo, densidade menor do que as fibras de vidro, além de serem fontes renováveis, não abrasivas, biodegradáveis e amplamente disponíveis em território nacional. (PIRES, 2009).

Lignocelulósicos são materiais fibrosos, que formam matrizes complexas constituídas de celulose, um rígido polímero de glicose, hemiceluloses, pectinas e outras gomas. Adicionalmente, essa matriz é impregnada com lignina, a qual pode ser considerada como uma cobertura de resina plástica. Os materiais lignocelulósicos são encontrados na biomassa vegetal, termo usualmente empregado para designar matéria orgânica produzida, tanto pelas espécies vegetais, como por seus resíduos. Biomassa vegetal: Florestas, produtos agrícolas, gramíneas com alto rendimento em fibras (bambu, sisal, juta, rami), resíduos agroindustriais (bagaço de cana de açúcar, palha de milho, palha de arroz). (CASTRO, 2001).

Uma das áreas de aplicação de compósitos poliméricos que tem crescido significativamente é a indústria automotiva, devido aos fatores relacionados à: redução de peso, flexibilidade na forma (desenho), tenacidade, alta resistência específica e resistência à corrosão, entre outros. (BRAHMAKUMAR; PAVITHRAN; PILLAI, 2005). A matriz proporciona a forma final do compósito e governa os parâmetros do processo de manufatura e é responsável pela transferência e distribuição da tensão ao reforço, pela separação das partículas ou fibras (reforço) funcionando como uma barreira à propagação de trincas, e pela proteção do material do reforço contra danos ambientais (umidade, radiação UV, corrosão química). (VASILIEV; MOROZOV, 2001). Como matriz tem-se utilizado tanto polímeros termoplásticos como termorrígidos, além de blendas e copolímeros, dependendo da aplicação do material, ou seja, das propriedades requeridas. (PIGATTO, 2009).

Mas alguns problemas relacionados com o baixo desempenho mecânico de algumas fibras naturais tem dificultado o uso direto delas em elementos estruturais. Nesse sentido, o aparecimento de novos materiais alternativos, buscando-se melhorar o desempenho estrutural dos compósitos à base de fibras naturais, vem sendo incentivado.

Algumas vantagens no emprego de fibras mistas na indústria automobilística são. (BRAGA, 2006):



- a) Durante o crescimento, as fibras naturais acumulam gás carbônico contribuindo para redução da concentração do gás na atmosfera (protocolo de Kioto);
- b) Alta capacidade de absorção de impactos;
- c) Baixo consumo de energia para a obtenção das fibras naturais;
- d) Boas propriedades mecânicas;
- e) Custo atraente;
- f) Material ecologicamente correto;
- g) Possibilidade de reciclagem;

Uma outra vantagem no uso de fibras naturais é a melhoria do balanço energético nacional:

O Balanço Energético Nacional – BEN é o documento tradicional do setor energético brasileiro que divulga, anualmente, extensa pesquisa e a contabilidade relativas à oferta e consumo de energia no Brasil, contemplando as atividades de exploração e produção de recursos energéticos primários, sua conversão em formas secundárias, a importação e exportação, a distribuição e o uso final da energia. Uma das mais completas e sistematizadas bases continuadas de dados e estatísticas energéticas disponível no país, o BEN constitui-se em uma referência fundamental para qualquer estudo do planejamento do setor energético brasileiro. (BEN, 2013).

O BEN foi criado em 1976 com o objetivo de expor estatísticas de energia do Brasil, já que o país não possuía dados gerais sobre energia, apenas estatísticas setoriais. A motivação para sua criação ocorreu após o mundo enfrentar a primeira crise do petróleo, em 1973. O BEN é publicado regularmente há mais de 30 anos pelo Ministério de Minas e Energia – MME e, desde 2005, a execução operacional das atividades relacionadas à sua elaboração são de responsabilidade integral da Empresa de Pesquisa Energética – EPE. (BEN, 2013).

A matriz energética brasileira apresentou em 2009 uma proporção de energia renovável ainda maior do que nos anos recentes, atingindo 47,3%. Esta é a maior proporção observada desde 1992, quando o uso da lenha e do carvão vegetal, nem sempre proveniente de reflorestamento, era muito mais intenso (correspondia a mais de 17,0% de toda a energia consumida no país; em 2009 essa proporção esteve em torno de 10,0%). Em 2009, o total de energia consumida no país atingiu 243,9 milhões de toneladas equivalentes de petróleo, significando uma redução de 3,4% em relação a 2008. (BEN, 2013).

A utilização de fibras naturais, como juta, sisal, coco, rami e banana na coogeração de energia elétrica nas usinas de açúcar e álcool, ainda nem aparece no relatório emitido pela

EPE. Hodiernamente, é mais usado o bagaço de cana como combustível, uma prática em todo o mundo. Assim sendo, com a escassez do petróleo e fontes de energia não renováveis, existe uma tendência para a utilização de outros combustíveis. (BEN, 2013). Com esta grande demanda de biocombustível no futuro, o que diferenciará o seu uso será a eficiência com que o potencial do bagaço será aproveitado como poder calorífico na incineração. (TAB. 04).

**Tabela 04 – Poder calorífico das biomassas.**

<b>Tipo de biomassa</b>	<b>Poder calorífico (kcal/kg)</b>
Aparas de Polipropileno	11.000
Aparas de Polietileno	10.000
Carvão Vegetal	6.400
Casca de Castanha	5.500
Casca de Cacau	3.900
Fibra de Juta	3.800
Aparas de Papelão	3.700
Casca Arroz – IN NATURA	3.300
Bagaço Cana – Enfardado	3.250
Casca de Café	3.000
Casca de Amendoin	3.000
Bagaço Cana – IN NATURA	1.820

**Fonte: Adaptado de CARRETEIO E BORGES, 2008.**

Sendo assim, ainda existe muito mercado para estas fibras se firmarem com fontes de energia renováveis do futuro. (TAB. 05).

**Tabela 05 – Oferta interna de energia no Brasil por fonte.**

<b>Energia</b>	<b>2009 (%)</b>	<b>2010 (%)</b>	<b>2011 (%)</b>	<b>2012 (%)</b>	<b>2013 (%)</b>
Biomassa da cana de açúcar	5,4	5,6	5,7	6,8	7,5
Hidráulica	85	81,2	74,7	76,8	74,8
Eólica	0,2	0,4	0,5	0,9	1,0
Carvão e derivados	1,4	1,3	9,7	1,6	1,7
Gás Natural	2,6	5,8	4,1	7,9	9,2
Derivados de Petróleo	2,9	3,1	3,8	3,3	3,5
Nuclear	2,5	2,6	1,5	2,7	2,5

Fonte: BEN, 2011, 2012, 2013, 2014.

O Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável, sendo que a geração hidráulica tem respondido nos últimos anos por uma média de 78,5% da oferta interna. Somando-se as importações, que essencialmente também são de origem renovável, pode-se afirmar que 85,0% da eletricidade no Brasil é originada de fontes renováveis (Biomassa, hidráulica e eólica). Porém, o cultivo de fibras naturais não aparece neste contexto, sendo então uma matriz ainda a ser implantada no Brasil.

## 1.2 Problema

O primeiro problema é que quanto se trata de compósitos, não se consegue garantir a obtenção dos mesmos em fibras 100,0% naturais, pois fibras vegetais dependem de sazonalidade climática e de incentivos à sua produção, isto é, da demanda. Como exemplo, segundo o diretor comercial da Companhia Têxtil de Castanhal (CTC), Ilton Sagioro, somente o mercado interno, particularmente o setor de café, já consome toda a produção nacional de fibra de juta e malva, havendo ainda a necessidade de importação para complementar as necessidades nacionais. "Não temos mais produto hoje. Precisamos importar fibra de Bangladesh. E aí entram todos os custos de importação que, querendo ou não, são repassados para os nossos clientes". (SOARES, 2010).

O segundo problema é que lotes de peças elaboradas com 100,0% de fibras naturais sofrem mudanças na gramatura da trama em função da disponibilidade de matéria-prima. Ou seja, quando há redução na produção de determinada fibra natural, ou entressafra, impõe-se a

necessidade de diminuir a espessura dos fios e aumentar o intervalo entre eles, causando queda na gramatura (redução mássica de fibra por metro quadrado). Por isto, de lote para lote, podem ocorrer variações de gramatura para um mesmo produto. Mas isto não é fator impeditivo para o emprego desta fibra, contanto que haja planejamentos governamentais e empresariais que garantam tanto sua oferta quanto demanda. (MORAES, 2012).

O terceiro problema são as variáveis ambientais (condições climáticas, chuvas, irrigação, radiação fotossintética ativa, presença de minerais do solo) tudo isto pode afetar a quantidade, dimensões e a qualidade dos feixes fibrosos presentes nas plantas, acarretando em influências nas propriedades mecânicas, no comprimento e na espessura da fibra natural. (OLIVEIRA, 2008; LUZ, 1997).

O quarto problema é o conhecimento das propriedades mecânicas das resinas epóxi e poliéster empregadas como matriz no compósito. Informações de suas propriedades químicas e mecânicas são disponibilizadas pelos fabricantes, porém para cada aplicação, poderão haver mudanças comportamentais que afetarão produto final. (ZURSTRASSEN, 2008).

O quinto problema diz respeito ao comportamento mecânico de cada compósito feito a partir de fibras naturais como reforços, o que dependerá:

- a) do tipo de fibra natural a ser utilizado;
- b) do tipo de matriz a ser utilizada no compósito;
- c) da forma de dispersão e concentração das fibras dentro da matriz;
- d) da orientação, tipo e número de camadas de tramas das fibras em relação às direções dos esforços atuantes (quando se lança mão de telas de fibras);
- e) da opção pelo uso ou não de aditivos e/ou cargas;
- f) do processo produtivo adotado;
- g) da força de interação da interface fibra-matriz.

O sexto problema se dá na elaboração de corpos de prova propriamente ditos. As normas atuais falam de definições e condições específicas tangíveis em matérias-primas que dispõem de processo produtivo controlado, com repetibilidade, amparados por expressivo número de normas internacionais, técnicas e know-how dos fabricantes. Entretanto quando se trata de adoção de fibras 100,0% naturais como reforço, fica-se diante das variações presentes já citadas. Com isso os corpos de prova podem não apresentar contornos e superfícies totalmente uniformes, gerando assim falhas estruturais e afetando suas propriedades mecânicas finais. O acabamento superficial de corpos de prova deverá prover sua integridade

de superfície, evitando determinados graus de rugosidade, cujos vales poderão constituir-se em pontos de concentração de tensões. Caso isto seja feito, haverá a inserção de danos superficiais que afetarão os resultados experimentais, pela fragilização superficial do corpo de prova. (CHIAVERINI, 1986).

Por fim, o sétimo problema refere-se às normas as quais estes compósitos terão seus corpos de prova avaliados e testados. O emprego de normas de ensaio em compósitos reforçados por mantas de fibras de reforço encontram-se disponíveis em número expressivo, assim como para ensaios exclusivamente em fibras, mas significativamente relacionados a fibras sintéticas e suas associações e não para fibras naturais em seu estado puro e compósitos com fibras naturais como reforço estrutural. Somente nos últimos anos é que se pode ver algumas publicações de normas para testes em fibras naturais. Isto mostra-se nas recentes publicações de normas para este fim, com exemplo as normas ASTM C1557 de 2013 e ASTM D3822 de 2014.

### 1.3 Objetivo Geral

O objetivo principal desta tese foi obter e caracterizar três tipos de novos compósitos poliméricos: O primeiro deles foi um compósito termoformado a partir de termoplásticos de polipropileno >PP<, reforçados com fibras curtas de juta. O segundo tipo foram compósitos laminados de fibras naturais de juta em forma de tecido, um aglutinado com resina epóxi e outro aglutinado com resina poliéster. Foram então fabricadas amostras (corpos de prova) para realização da caracterização destes materiais. Foram também avaliados um compósito de polipropileno<sup>5</sup> >PP-TD40< homopolímero com 40,0% de carga mineral, desenvolvido para o processo de extrusão e um outro compósito de woodstock, composto de polipropileno >PP< com pó de madeira utilizado em processo de termoformagem.

---

<sup>5</sup> Polipropileno ou Polipropeno é um polímero ou plástico derivado do propeno ou propileno. A sua forma molecular é (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>). O Polipropileno >PP< é um tipo de plástico o qual pode ser moldado usando apenas aquecimento, ou seja, é um termoplástico. Possui baixo custo, elevada resistência química e a solventes, fácil moldagem, alta resistência à fratura por flexão ou fadiga e boa resistência ao impacto acima de 15 °C. As marcas que estampam as peças >PP<, >PP-TD20<, >PP-TD10< são marcas que facilitam uma futura reciclagem.

## 1.4 Objetivos Específicos

Obter dados experimentais dos novos compósitos testados para fazer uma avaliação comparativa entre os resultados práticos dos diversos tipos de ensaios realizados nos novos materiais e no compósito de polipropileno >PP-TD40< (polipropileno com uma carga de 40,0% de carga mineral) e do compósito de woodstock (polipropileno com 50,0% de pó de madeira), os quais hoje em dia são muito utilizados na indústria automobilística. Verificar e comparar se estes novos materiais tem propriedades físicas, mecânicas e térmicas melhores ou piores que os corpos de prova em >PP-TD40< e também o material em woodstock,

Ampliar os conhecimentos sobre o comportamento mecânico de compósitos de matriz polimérica e fibras naturais como reforço, para poder assim aumentar a gama de informações destes tipos de materiais compósitos na literatura, principalmente as fibras, onde não se tem muitas informações/artigos disponíveis.

## 1.5 Justificativa

Hoje em dia, um rápido crescimento é observado no consumo de compósitos poliméricos reforçados com fibras, devido à combinação do bom desempenho e versatilidade com a vantagem de processamento simples e de baixo custo. Os compósitos poliméricos, devido às propriedades dos polímeros combinadas com as da fase dispersa, têm substituído gradualmente materiais tradicionais, como: madeira, metais, cerâmicos, entre outros. (JOSEPH e outros, 2003), (GEORGOPOULOS e outros, 2005).

Por serem fonte de recurso natural renovável as fibras naturais apresentam baixo custo, são biodegradáveis, recicláveis, não tóxicas e podem ser incineradas.

As fibras naturais geram um balanço energético positivo, pois quando crescem, retiram gás carbônico do ar ambiente e ao final do ciclo de vida as peças feitas com fibras naturais, as mesmas podem ainda serem incineradas, gerando assim energia para fornos e outros mais. (BRAGA, 2010)

O enorme potencial brasileiro para a produção de fibras naturais entre elas a juta, tem possibilitado que o segmento industrial brasileiro olhe com atenção para as vantagens de uso destes materiais. Fibras vegetais podem ser incorporadas aos plásticos nas mais variadas formas: fibras longas ou curtas, mantas, tecidos etc., porém o uso de tecidos tem se tornado bastante atraente. Em especial os tecidos híbridos, aqueles formados por mais de um tipo de

fibra, está sendo amplamente difundido nas indústrias aeroespacial e automobilística. (MATTOSO; FERREIRA e CURVELO, 1996).

Hodiernamente, uma exclusiva tecnologia chamada Ecoproject utilizada pela montadora de automóveis Ford, utiliza plástico reciclado e sisal na composição de peças internas.

O Ecoproject propiciará redução do custo de produção por utilizar material natural e reciclado. Além disso, as peças são mais resistentes e leves, diminuindo o peso total do veículo em aproximadamente 10,0%, influenciando positivamente no consumo de combustível. (FORD BRASIL, 2014).

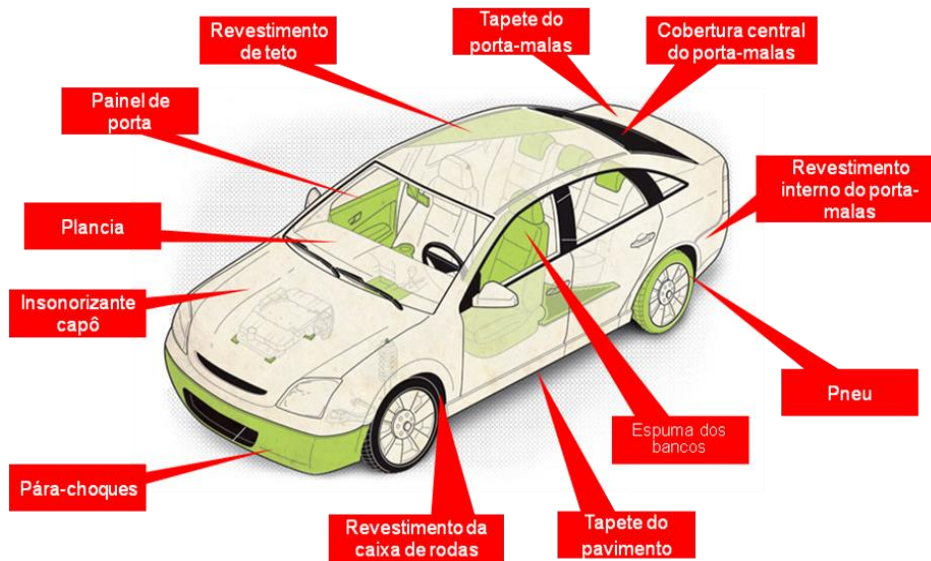
O Brasil é o maior produtor mundial de sisal. Segundo a Ford, a Europa e os EUA já demonstraram interesse na tecnologia. Por ser um projeto 100,0% brasileiro e inédito, abre possibilidades de licenciamento e exportação de peças.

Se 20,0% do acabamento dos carros utilizasse a fibra natural, 45,0% de toda a produção nacional seria absorvida pela indústria automobilística, obrigando os sisaleiros a aumentarem a oferta, criando um ciclo virtuoso de aumento de renda e sustentabilidade. Na Bahia 140 mil hectares existem de plantação de Sisal. Com a demanda da Ford, que seria de cerca de 60 kg por carro, precisaríamos de pelo menos 300 mil hectares. A Ford já tem propostas com o governo do Estado para incentivar esse aumento. Uma iniciativa interessante para a montadora, para o consumidor e para o semi-árido nordestino. (REVISTA MOTORSHOW, 2014).

A perspectiva futura para o uso de fibras naturais é muito boa também em outras áreas como, por exemplo, a indústria têxtil atualmente com o seu mercado em expansão. Nos últimos anos, o uso de fibras naturais como curauá, coco, sisal, rami, bagaço de cana-de-açúcar, juta e abacaxi como reforço em materiais poliméricos teve um acelerado crescimento. (PIRES, 2009).

Porém na indústria automobilística, a fibra vegetal pode ser encontrada no preenchimento de bancos e apoio de cabeça, painéis laterais e medalhões de portas, painel de instrumentos, canal de ar, revestimento do teto, caixa de rodas, cobertura central do portamalas, entre outros itens (FIG. 01).

**Figura 01 – Locais de aplicação de fibras naturais em automóveis.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015

Algumas grandes montadoras de automóveis já estão testando e em alguns casos já estão utilizando em escala industrial as fibras vegetais, conforme abaixo:

- Revestimento do teto: VW Fox, Ford Ecosport
- Tapete do porta-malas: Mercedes Bens Classe A
- Cobertura central do porta-malas: Honda Fit
- Revestimento interno do porta-malas: Chevrolet Cruze
- Painel: GM Astra, Mercedes Bens Classe A
- Espuma dos bancos: Ford Ecosport
- Tapete do pavimento: Mercedes Bens Classe A
- Revestimento da caixa de rodas: Chevrolet Cruze
- Insonorizante capô: Mercedes Bens Classe A

Segundo Pires (2009), para cada Mercedes Classe A fabricado, há 27 peças produzidas com fibras naturais, totalizando uma massa de 11,9 quilos (FIG. 02).



**Figura 02 – Mercedes-Benz classe A tem 27 peças produzidas com fibras vegetais.**



Fonte: MORAES, 2012.

Apresentado no estande da Ford durante o 25º Salão do Automóvel de São Paulo em 2008, o Ford Ka Beauty foi o primeiro no Brasil a receber peças plásticas feitas com material reciclado e fibra de sisal (FIG. 03).

**Figura 03 – Ford Ka Beauty.**



Fonte: REVISTA MECÂNICA ON LINE, 2008.

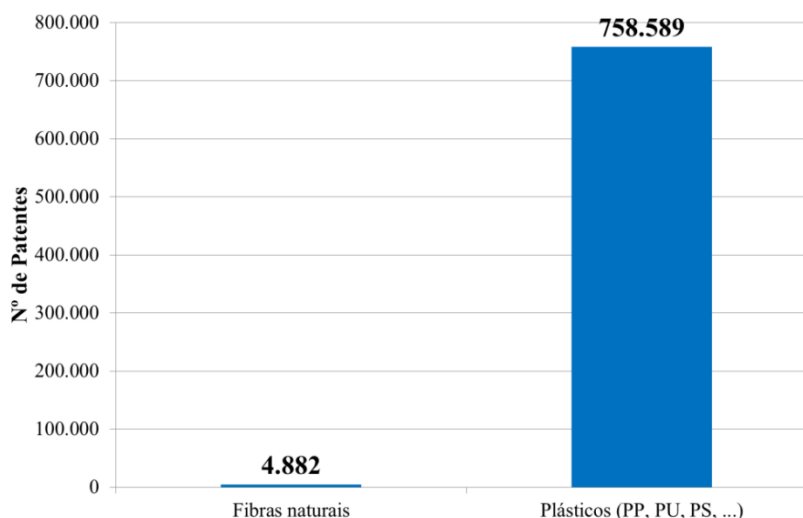
Outro exemplo foi lançado em Setembro de 2011, o Chevrolet Cruze tem 8,4 kg de fibras naturais, madeira, coco e cana, usados na forração do porta-malas e no revestimento das caixas de roda (FIG. 04).

**Figura 04 – Chevrolet Cruze.**

Fonte – ARTECOLA, 2014.

Mesmo com esses fatos citados, ao verificarmos o número de patentes depositadas no mundo, utilizando o software ORBIT, um site de buscas mundial de patentes, verificamos que nos últimos 100 anos, o depósito de patentes sobre fibras naturais foi muito baixo em relação, por exemplo, à quantidade de patentes depositadas sobre polímeros, o que justifica seu estudo. (GRAF. 01).

Patente é um título de propriedade temporária sobre uma invenção ou modelo de utilidade, outorgado pelo Estado aos inventores ou autores ou outras pessoas físicas ou jurídicas detentoras de direitos sobre a criação. Em contrapartida, o inventor se obriga a revelar detalhadamente todo o conteúdo técnico da matéria protegida pela patente. (INPI, 2014).

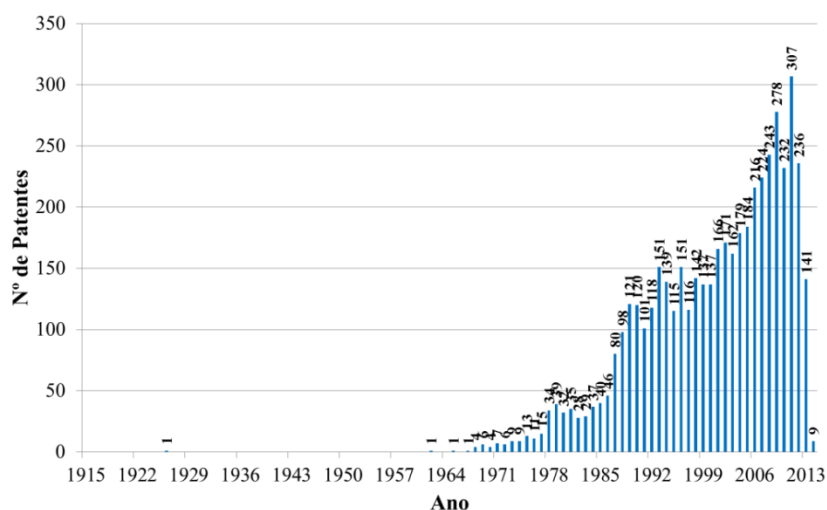
**Gráfico 01 – Patentes sobre fibras naturais x patentes sobre polímeros.**

Fonte: ORBIT, 2014.

Podemos dizer que para cada 155 patentes depositadas no mundo sobre polímeros (plásticos) em geral, tem-se apenas 1 patente depositada sobre fibras naturais. Isto é, ainda não é muito estudado este tipo de material.

O primeiro depósito de uma patente sobre fibras naturais foi no ano de 1926 nos Estados Unidos da América, cujo título é “*Dyeing and printing natural fiber with sulphur and vat dyestuffs*” que em uma tradução livre fica: Tinturaria a estamparia de fibras naturais com enxofre e corantes. Depois disto, somente em 1962 houve outra patente depositada sobre fibras naturais, mas somente a partir da década de 70 que começaram realmente os depósitos de patentes sobre fibras naturais, houve então um aumento ano a ano até 2011, onde foram depositadas 307 patentes sobre fibras naturais naquele ano. (GRAF. 02).

**Gráfico 02 – Patentes depositadas sobre “Fibras Naturais” no mundo por ano.**



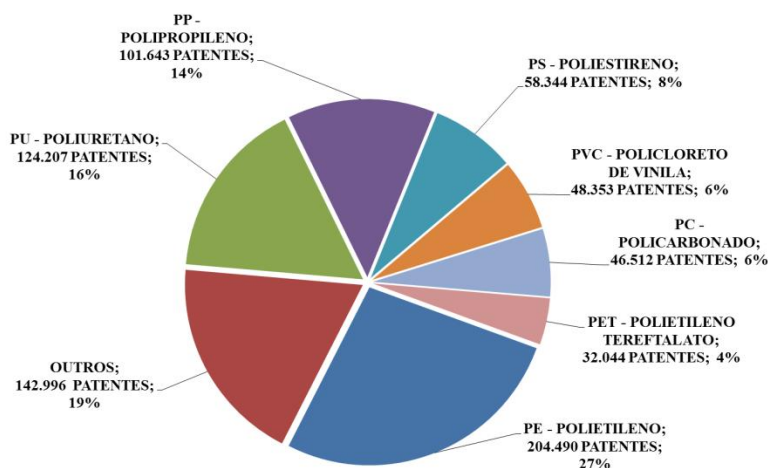
Fonte: ORBIT, 2014.

O Brasil, apesar de ser um país com suas dimensões continentais, ser o 7º produtor mundial de juta, o terceiro produtor mundial de banana, tem um clima tropical propício para o cultivo de diversas fibras naturais, tem somente 12 patentes depositadas sobre fibras naturais até hoje e países muito menores territorialmente e com climas não muito propícios à plantação deste tipo de cultivo tem diversas patentes depositadas. Nota-se o Japão com 2244 patentes, tem o maior número de patentes sobre fibras naturais depositada, já a China com 797 patentes, os EUA com 559 patentes e países com clima frio como a Rússia com 22 patentes e Canadá com 14 patentes são exemplos desta distorção em relação ao Brasil (FIG. 05).



já o >PP< Polipropileno, também objeto de estudo desta pesquisa teve 101.643 patentes já depositadas, cerca de 14,0% do total de patentes. (GRAF. 04)

**Gráfico 04 – Patentes sobre plásticos x tipos plásticos.**



**Fonte: ORBIT, 2014.**

As fibras são usadas normalmente como agente sustentador de tensões e visam conferir as elevadas propriedades mecânicas dos compósitos. Os aspectos mais relevantes na decisão da escolha da fibra de juta a ser testada nesta tese são: o custo atraente, a facilidade de se encontrar este tipo de fibra natural disponível no mercado, é também muito utilizada na indústria têxtil.

Estes tipos de materiais compósitos ainda não foram amplamente estudados em sua composição microscópica e relevância do tema, pois na literatura nacional e mundial não se encontram muitas informações sobre estes compósitos e suas matrizes de fibras naturais.

A originalidade desta tese está em sua caracterização tanto dos fios únicos das diversas fibras naturais (juta, sisal, rami, coco e banana) bem como a caracterização em diversos tipos de ensaios dos três compósitos aqui criados.

Por tudo isto, nota-se uma importância muito grande estudar estes tipos de fibras e compósitos aqui no Brasil e não deixar que outros países o façam. O que justamente aconteceu com o Velcro, que foi inventado em 1948 por Georges de Mestral, um engenheiro Suíço. Ele inspirou-se após analisar atentamente as sementes de Carrapicho (FIG. 06) que grudavam constantemente em sua roupa e no pelo de seu cão durante suas caminhadas diárias pelos Alpes. Georges examinou o material através de um microscópio e distinguiu diversos filamentos entrelaçados terminando em pequenos ganchos, causando a potente aderência dos

carrapichos nos tecidos. Por fim, concluiu ser possível a criação de um material para unir dois materiais de maneira reversível e simples. Desenvolveu o produto e submeteu a ideia para patente em 1951. O pedido suíço foi seguido por outras patentes nacionais, desta vez através de sua companhia Velcro S.A. O nome VELCRO é uma referência às palavras em francês velours (que significa veludo) e crochet (que significa gancho). No momento atual, o uso e aplicação do produto são vários, e a palavra velcro tornou-se um termo genérico para referir-se ao material.

**Figura 06 – Carrapicho.**



**Fonte: NOTÍCIAS NATURAIS, 2015.**

- **Nome Científico:** Bidens pilosa.
- **Nomes Populares:** Picão-preto, Amor-de-burro, Amor-seco, Carrapicho-agulha, e outros.

Por fim, o Brasil é o maior produtor mundial de carrapicho e não é o dono da patente do Velcro e como o Brasil também é um dos maiores produtores mundiais de juta, é nosso dever estudar este tipo de material.

## **1.6 Escopo**

Como escopo da pesquisa, pretende-se estudar apenas estes três novos tipos de compósitos poliméricos com fibras naturais, não ultrapassando estes limites de

materiais/compósitos e comparar suas propriedades com os dois materiais/compósitos já existentes e em uso no mercado automobilístico:

As definições de composições de cada compósito foram baseadas na Tabela 21, que apresenta o tipo de fabricação, a nomenclatura e as percentagens de cada material obtidas de acordo com as formulações descritas no Capítulo 2, item 2.1.7.

- compósitos novos:
  - 1) EP69-J31 – 69,0% de resina epóxi + 31,0% fibra de juta em forma de tecido;
  - 2) PO77-J23 – 77,0% de resina poliéster + 23,0% fibra de juta em forma de tecido;
  - 3) PP50-J50 – 50,0% de polipropileno + 50,0% de fibra curta de juta;
  
- compósitos já existentes no mercado:
  - 4) PP-TD40 – 100,0% de polipropileno com 40,0% de carga mineral;
  - 5) PP50-M50 – 50,0% de woodstock + 50,0% de pó de madeira.

Como dito, para as amostras/corpos de prova, pretende-se fazer os seguintes testes/análises laboratoriais:

- a) ensaios microscopia óptica;
- b) ensaios densidade aparente;
- c) ensaios de absorção de água;
- d) ensaios de perda de umidade;
- e) análises de absorção acústica;
- f) análises térmicas de termogravimétrica (TGA);
- g) ensaios de tração a 23°C e 80°C;
- h) ensaios de flexão a 23°C e 80°C;
- i) ensaios de impacto por queda de dardo;
- j) ensaios microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Assim, os resultados aqui encontrados são para os tipos de fibras (lote do fornecedor) e resinas aqui testados, sabendo que podem haver pequenas alterações nas dimensões e propriedades das fibras de acordo com as diversas variáveis e problemas já descritas no tópico 1.2.

## **1.7 Tópicos**

O capítulo 1 refere-se à introdução do tema e um histórico do uso e estudo das fibras naturais em compósitos, bem como algumas vantagens no emprego das mesmas na indústria automobilística.

O capítulo 2 trata da revisão bibliográfica, onde foram abordados os assuntos referentes aos objetivos da tese. São apresentados os principais tipos de fibras naturais e resinas atualmente existentes e suas aplicações. Juntamente com uma explanação sobre compósitos e resumo de artigos recentes sobre o tema da pesquisa.

O capítulo 3 descreve a metodologia experimental, as etapas do trabalho, o controle dos experimentos, os materiais e métodos das etapas de laminação e termoformagem, assim como os ensaios mecânicos, térmicos e físicos realizados nos fios de fibra natural e nos corpos de prova a partir de compósitos de fibra natural de juta em forma de tecido, aglutinadas com resina epóxi e resina poliéster, também compósitos em polipropileno com fibras curtas de juta, bem como os procedimentos e equipamentos utilizados na experiência.

O capítulo 4 apresenta os resultados e análises das laminações e da termoformagem das placas de compósitos e de dos testes nos fios de fibras naturais e corpos de prova em laboratório.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e comparações acerca dos resultados experimentais em laboratório, além de sugerir pesquisas futuras as quais possam agregar e proporcionar avanços na compreensão sobre o tema abordado.

Ao final, são apresentadas as referências bibliográficas que foram utilizadas e pesquisadas. Bem como um glossário em ordem alfabética de termos poliméricos e ambientais, citados ou não na tese e suas definições.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico está organizado para apresentar os fundamentos necessários básicos para a compreensão da presente tese e por mostrar estudos de diversos profissionais e resultados recentes de pesquisas correlatas.

### 2.1 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica divide-se em uma breve história dos compósitos, tipos de materiais compósitos, tipos de resinas (matrizes), tipos de fibras (reforços), bem como suas definições e classificações.

#### 2.1.1 Breve história de materiais compósitos

Os materiais compósitos, da forma em que são conhecidos hoje, devem sua gênese às estruturas em fibra de vidro com resina poliéster, desenvolvidos na década de 1940. Porém, ao se observar a expressão materiais compósitos, ou o termo correspondente em inglês, “*composites*”, que em seu sentido lato significa dois ou mais materiais combinados em escala macroscópica para formar um novo material, nota-se que este tipo de material não tem apenas cerca de 75 anos de estudos. (AL-QURESHI, 2002).

A arqueologia tem em seus registros o encontro de artefatos elaborados com resinas vegetais (âmbar) evidenciados em cavernas da Inglaterra, peças que remontam à era de 11.000 A.C a 9.000 A.C, período pertencente à Idade da Pedra Antiga. Sua origem suposta é a de terem sido trazidas de regiões bálticas. (LANGENHEIM, 2003).

Já no século XX, Henry Ford, associado a Thomas Edison, desenvolveu em 1938 a primeira autopeça do mundo em compósito: uma tampa de um motor elaborada pela associação de uma bioresina à base de proteína de soja reforçada por fibra de vidro. (WOOL, 2005).

Durante a primeira guerra mundial, os alemães já empregavam madeira e tecidos associados em estruturas de aeronaves; um exemplo disto é o lendário Fokker Dr 1 da Força aérea alemã, um avião militar da 1ª Guerra Mundial projetado por Reinhold Platz e construído pela Fokker-Flugzeugwerke em 1917, o avião do Barão Vermelho<sup>6</sup> (FIG. 07), que utilizava madeira em sua estrutura. (AL-QURESHI, 2002).

**Figura 07 – Fokker dr 1 da Alemanha, 1917, o avião do Barão Vermelho<sup>6</sup>.**



**Fonte: RED BARON ORIGINAL, 2014.**

A chegada da 2ª Guerra Mundial impulsiona ainda mais estes estudos. Um dos desenvolvimentos citáveis é o da borracha sintética (SBR) pela Alemanha, dada a interrupção do fornecimento de borracha natural pelas suas fronteiras. Nesta época, também surgem os primeiros plásticos reforçados com fibra de vidro (PRFV) e tem-se a referência do primeiro emprego deste material em substituição a peças de alumínio do avião britânico Spitfire (FIG. 08). (CANEVAROLO, 2002).

**Figura 08 – Caça britânico Spitfire da 2ª Guerra Mundial (1939-1945).**



**Fonte: WIKIPEDIA, 2014.**

<sup>6</sup> O Barão Manfred Albrecht Von Richthofen (2 de maio de 1892 - 21 de abril de 1918) conhecido como Barão Vermelho, foi um piloto alemão. É considerado ainda hoje como o "ás dos ases". Foi um piloto de combate bem sucedido, um líder militar e um ás do voo que venceu 80 combates aéreos durante a Primeira Guerra Mundial.

Como visto, o emprego de materiais compósitos não é recente, uma vez que as primeiras aeronaves tinham em grande parte de sua estrutura um material compósito natural, a madeira. Entre os numerosos materiais compósitos encontrados na natureza, a madeira desempenhou um papel relevante nos primórdios da aviação, através da sua eficiência estrutural obtida com as construções sanduíche e reduzido arrasto de atrito, devido a possibilidade de se eliminar as rugosidades superficiais no acabamento final. Por outro lado, com o aumento da umidade, a madeira diminui a rigidez e a resistência. Na aviação isto se agrava, pois a estrutura fica exposta a este tipo de atmosfera por períodos prolongados de tempo.

Começam então as pesquisas em polímeros, e tanto resinas quanto reforços sintéticos passam a ser desenvolvidos de modo mais significativo, deixando em segundo plano as pesquisas em resinas e fibras naturais. Materiais compósitos com plásticos reforçados por fibras, inicialmente voltados para o emprego na indústria aeroespacial e militar, diversificaram-se a ponto de se tornarem comuns como artigos consumíveis de nosso dia a dia. (MENDONÇA, 2005).

O alemão Karl Ziegler desenvolveu na década de 50, catalisadores organometálicos, as quais foram utilizados na Itália por Giulio Natta para a produção de polímeros estereorregulares (ou estereoespecíficos), o que lhe permitiu produzir polipropileno isostático. Inicialmente é obtido sob estado viscoso, o que lhe confere pouca aplicação comercial, mas a seguir consegue-se produzi-lo na forma sólida, denominada plástico, o que abre uma imensa gama de estruturas químicas de forma controlada, na área da síntese estereoespecífica. Isto lhes confere o compartilhamento do Prêmio Nobel de Química de 1963. (CANEVAROLO, 2002).

Começaram então as primeiras ocorrências e produção de alguns polímeros comerciais. (TAB. 06).

**Tabela 06 – Resumo da 1ª ocorrência e 1ª produção de polímeros comerciais.**

<b>Polímero</b>	<b>1ª ocorrência</b>	<b>1ª produção mundial</b>
PVC - Policloreto de Vinila	1915	1933
PS - Poliestireno	1900	1936
PEBD - Polietileno de Baixa Densidade	1933	1939
PEAD - Polietileno de Alta Densidade	1953	1955
PC - Policarbonato	1953	1958
PP - Polipropileno	1954	1959

**Fonte: CANEVAROLO, 2002**

Percebe-se então que somente no início do século XX começaram a viabilização de processos poliméricos que têm estado em permanente atualização até os dias de hoje. Isso tem permitido a obtenção progressiva e diferenciada de plásticos<sup>7</sup>, borrachas e resinas<sup>8</sup> pelos avanços da engenharia molecular, cada vez mais complexa.

Já a fibra de vidro com resina poliéster foi intensamente utilizada nas aeronaves da Força Aérea Americana, durante a segunda guerra mundial. As motivações para esse uso devem-se à redução de custos em potencial, da facilidade de fabricação e a durabilidade maior contra corrosão e as condições atmosféricas em relação à madeira a qual antes era utilizada. Enquanto que algumas estruturas primárias foram apenas construídas e testadas, muitas estruturas secundárias, como portas e carenagens, tiveram sua produção iniciada. (ASM, 2001).

<sup>7</sup> Plástico [do grego plastikós, relativo às dobras de argila', pelo latim plasticu, que modela''] Adjetivo. 2. Que tem a propriedade de adquirir determinadas formas sensíveis, por efeito de uma ação exterior. Substantivo masculino. Matéria plástica - Matéria sintética de constituição macrocelular, dotada de grande maleabilidade, facilmente transformável mediante o emprego de calor e pressão, e que serve de matéria-prima para a fabricação dos mais variados objetos: vasos, toalhas, cortinas, bijuterias, carrocerias, roupas, sapatos etc.

<sup>8</sup> Resina: [do grego rhetíne, pelo latim resine] Substantivo feminino. Secreção viscosa que exsuda do caule e de outros órgãos de certas plantas, e que contém substâncias odoríferas, anti-sépticas etc., as quais cicatrizam rapidamente quaisquer feridas em tais órgãos, assumindo aspecto vítreo. 2. Produto extraído da resina (1). 3. Por extensão, designação comum a certos produtos sintéticos de características análogas às da resina (1). [Cf. rezina e rizina.].

Combinações Orgânicos Matriz ou OMCs, são compósitos originados por esforços da comunidade aeroespacial durante a Segunda Guerra Mundial para produzir materiais com valores de dureza as quais eram significativamente mais altos que os atuais materiais existentes. Ao final da guerra, plásticos reforçados com fibras tinham sido prosperamente usados em motores de foguete de filamento e tinham sido demonstrados em vários outros protótipos e aplicações em estruturas de aeronaves. (ASM, 2001). Estes materiais foram postos em uso mais tarde nos anos cinquenta, dando melhorias em resposta estrutural e resistência de corrosão. Durante os últimos 30 anos, o uso de OMCs teve um aumento crescente no uso em estruturas de aeronaves. Isto é demonstrado pelo fato de que nos anos 70, a aplicação de OMCs na aeronave de Caça F15 (FIG. 09) da força aérea americana era limitada a ítems secundários ou não críticos da aeronave. Foram incluídas somente 2,0% de OMCs no F-15. (ASM, 2001).

**Figura 09 – Avião F-15 da força aérea americana.**



**Fonte: ASM, 2001.**

Durante os anos subseqüentes, foram feitos pelo governo americano significativos investimentos para pesquisa, desenvolvimento, fabricação, prova, e demonstração em serviço de vôo de materiais compósitos e estruturas. (ASM, 2001).

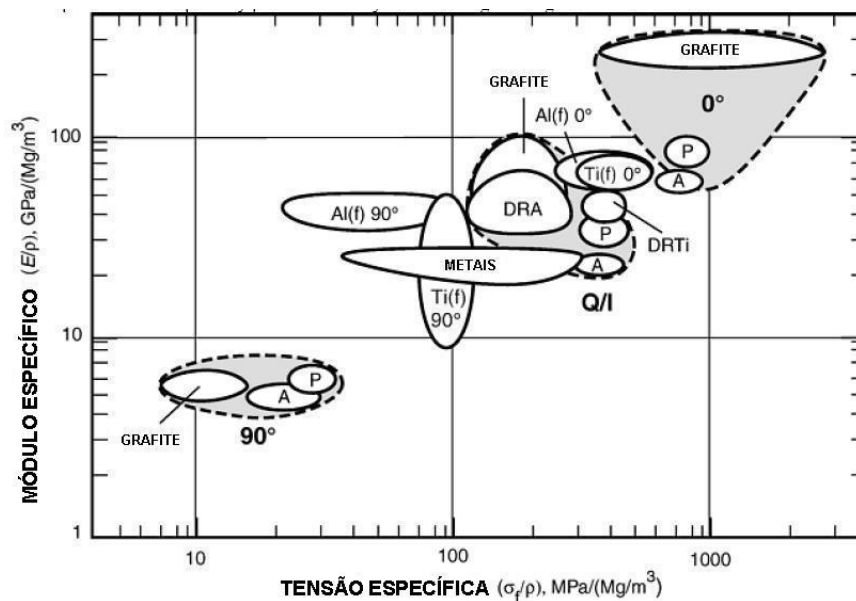
São alcançados os níveis mais altos de propriedades quando todas as fibras estão alinhadas na mesma direção dentro do compósito. Porém, isto produz um material simultaneamente com as mais baixas propriedades específicas para cargas perpendiculares à direção de fibra. (ASM, 2001).

O Gráfico 05 mostra a tensão específica e o módulo de elasticidade específico de uma gama extensiva de materiais estruturais de engenharia. O mais alto grau de eficiência

estrutural é obtida com fibra de grafite uniaxial reforçada com matriz epóxi (Grafite 0°), e isso provê parte da motivação para o uso difundido destes materiais. Porém, este material também provê a mais baixa eficiência estrutural para cargas que são normais ao eixo de fibra (Grafite 90°). (ASM, 2001).

A alta anisotropia (ou dependência direcional) em materiais compósitos pode ser explorada para criar estruturas extremamente leves.

**Gráfico 05 – Tensão x Módulo de elasticidade.**



Fonte: ASM, 2001.

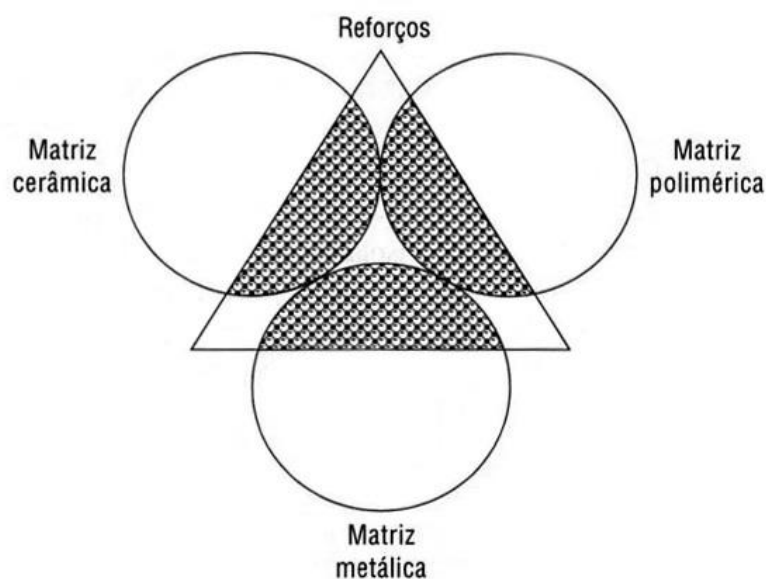
### 2.1.2 Materiais compósitos

Inúmeras conquistas tecnológicas recentes, principalmente as relacionadas com aplicações relevantes em diversas áreas, tais como aeronáutica, aeroespacial, petroquímica, naval bioengenharia, automobilística, construção civil, entre outras, somente se tornaram viáveis após o advento dos materiais compósitos. Trata-se de uma classe de materiais bastante ampla e abrangente, compreendendo desde os polímeros reforçados com fibras, os materiais híbridos metal/compósito e os concretos estruturais até outros compósitos os quais incorporam matriz polimérica ou matriz cerâmica. (NETO; PARDINI, 2006).

Em muitos casos é possível se obter ótimas características mecânicas ao se combinar diferentes materiais para criar compósitos, os quais, via de regra, apresentam propriedades especiais que nenhum de seus constituintes possui isoladamente. Materiais poliméricos, cerâmicos ou metálicos, tipicamente usados como matriz não apresentam, isoladamente,

desempenho estrutural elevado em dois ou mais aspectos distintos. Por exemplo, não apresentam simultaneamente resistência mecânica e a corrosão, ou rigidez e tenacidade a fratura aliada a baixa massa específica. Isto posto, existem inúmeras maneiras e combinações possíveis com compósitos (FIG. 10), com matriz cerâmica, metálica ou polimérica. (NETO; PARDINI, 2006).

**Figura 10 – Representação das combinações possíveis em compósitos.**



**Fonte: NETO; PARDINI, 2006.**

Como particularidade em compósitos, segundo Mendonça (2005) verifica-se que:

- suas propriedades mecânicas são diferentes das do aço e subentendem formas de determinação mais complexas;
- são fabricados por processos próprios;
- ferramentas simples da resistência dos materiais normalmente não são aplicáveis neste tipo de material.

Observa-se também que é possível obter melhorias através de associações em compósitos: elevações da resistência e/ou rigidez, facilitação da moldagem de formas complexas, aumento de resistência ao meio ambiente, maior leveza e redução de custos.

De maneira geral, as propriedades dos compósitos relacionam-se com:

- as propriedades das fibras;

- as propriedades das resinas (TAB. 07);
- o teor de fibras no compósito (volumétrico);
- a orientação ou geometria das fibras no compósito.

**Tabela 07 - Propriedades e comportamentos desenvolvidos para resinas.**

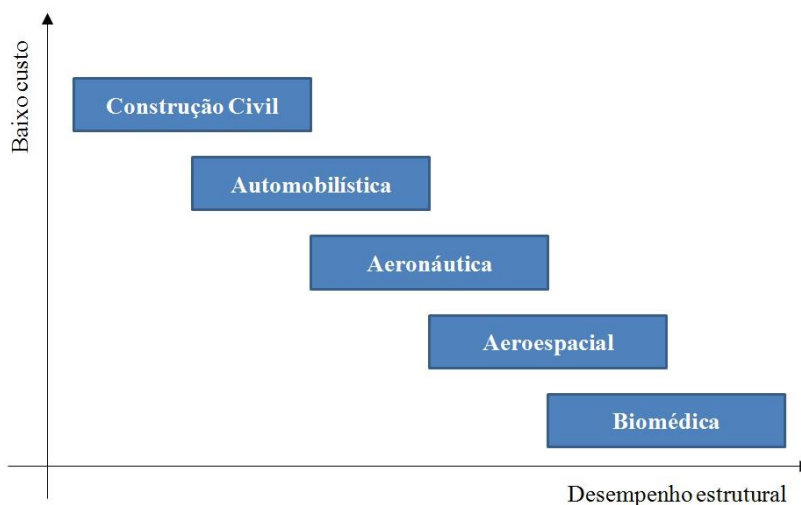
Comportamento viscoelástico	Mecânicas		Físicas	
	Tensão / deformação	Outros fatores	Térmicas	Outras
Fluência	Propriedades de tensão	Linhas de soldagem	Deflexão	Resistência a arco
Relaxamento de tensões	Resistência a ruptura	Tensão residual	Flexão	Flamabilidade
Recuperação	Propriedades de flexão			Absorção de água
Taxa de carregamento	Resistência a compressão			Intemperismo
	Resistência a impacto			Exposição química
	Dureza			

Fonte: LESKO, 2004

Os diferentes tipos de compósitos apresentam características bem diversas entre si e, seus usos, em diferentes aplicações, dependem de fatores tais como desempenho estrutural, preço e principalmente da disponibilidade das matérias primas. Atualmente, o desempenho dos compósitos sintéticos, em muitos aspectos, supera o dos compósitos naturais. Contudo, com a necessidade crescente de se resguardar o meio ambiente das inúmeras agressões oriundas dos processos industriais, bem como minimizar a dependência de recursos não renováveis como o petróleo e assim promover efetivamente o desenvolvimento sustentável, o uso de materiais de origem vegetal e, assim renováveis, vem crescendo nos últimos anos. Nas aplicações aeronáuticas, aeroespaciais e biomédicas, o desempenho estrutural dos componentes manufaturados em compósitos é de vital importância, ao passo que os fatores econômicos envolvidos em sua utilização têm menor relevância (FIG. 11). Já na indústria automobilística e na construção civil, esta situação se inverte e o baixo custo passa a ser um parâmetro preponderante. (NETO; PARDINI, 2006)



**Figura 11 – Desempenho estrutural em compósitos utilizados em diversos ramos.**



Fonte: NETO; PARDINI, 2006.

### 2.1.2.1 Definições e classificação

Primeiramente, é importante estabelecer com uma definição formal, o que se entende por materiais compósitos.

Materiais compósitos podem ser definidos como materiais formados de dois ou mais constituintes com distintas composições, estruturas e propriedades e que estão separados por uma interface. O objetivo principal em se produzir compósitos é de combinar diferentes materiais para produzir um único dispositivo com propriedades superiores às dos componentes unitários. (AL-QURESHI, 2002).

Um material compósito é um conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem como uma unidade, visando obter um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresenta. (MENDONÇA, 2005).

O conceito de material compósito é uma ferramenta filosófica poderosa no sentido de que permite, até certo ponto, criar um novo material, enfatizando certas características desejáveis, enquanto minimiza outras características indesejáveis, por meio da combinação dos componentes. Sendo assim, uma gama bastante grande de aspectos e propriedades, podem ser manipuladas para o novo material, sendo elas. (MENDONÇA, 2005):

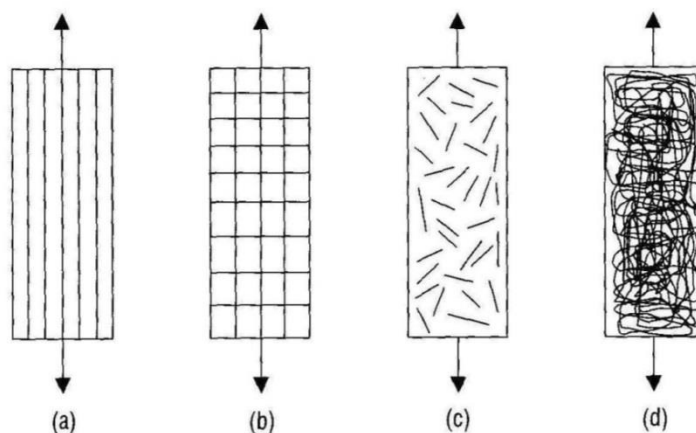
- resistência à fadiga;
- rigidez;

- redução de peso;
- capacidade para trabalhos em alta e baixa temperatura;
- aparência estética.

As propriedades dos compósitos são controladas principalmente pelas propriedades de seus constituintes, sua distribuição, dispersão, interação destas com a matriz bem como sua forma e tamanho. Quando se conhecem as propriedades individuais e a maneira como os componentes interagem entre si, o projetista pode produzir um material sob medida para uma dada aplicação. Além de possuir diversas aplicações por suas propriedades estruturais, os compósitos são projetados também para atender aplicações que necessitem de um conjunto de propriedades específicas, sejam elas térmicas, elétricas, tribológicas, ópticas entre outras. Ainda, é desejável que o projeto estrutural promova uma sinergia para as características almejadas, ou seja, a ocorrência de um somatório de esforços em prol de um mesmo fim entre os componentes, tornando as propriedades finais do compósito superiores aos dos constituintes separados. (ASM, 2001).

Os compósitos obtidos com fibras contínuas podem apresentar reforço unidirecional ou reforço bidirecional (FIG. 12). Nesses casos, o material é moldado de forma que em cada camada do compósito, a fase de reforço é contínua e dotada de uma orientação preferencial. (NETO; PARDINI, 2006).

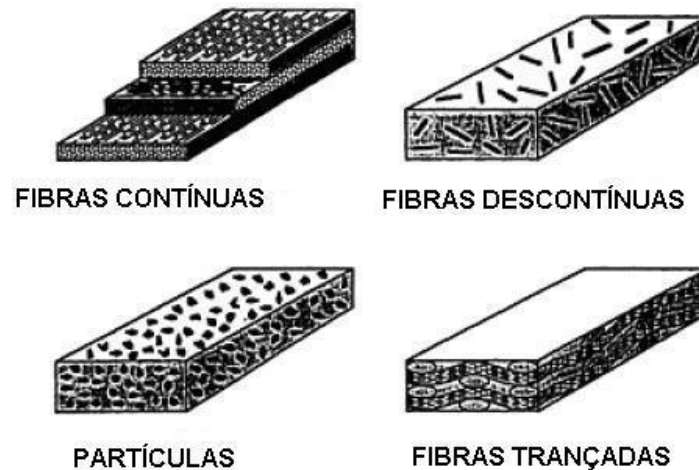
**Figura 12 – Lâminas com reforço tipo: a) unidirecional; b) tecido bidirecional; c) fibras picadas; d) manta contínua.**



Fonte: NETO; PARDINI, 2006.

Como mostrado na Figura 13, cada camada de uma fibra contínua composta tem uma direção de orientação de fibra específica. Em geral, os reforços podem ser fibras contínuas diretas, descontínuo, partículas ou flocos. (ASM, 2001).

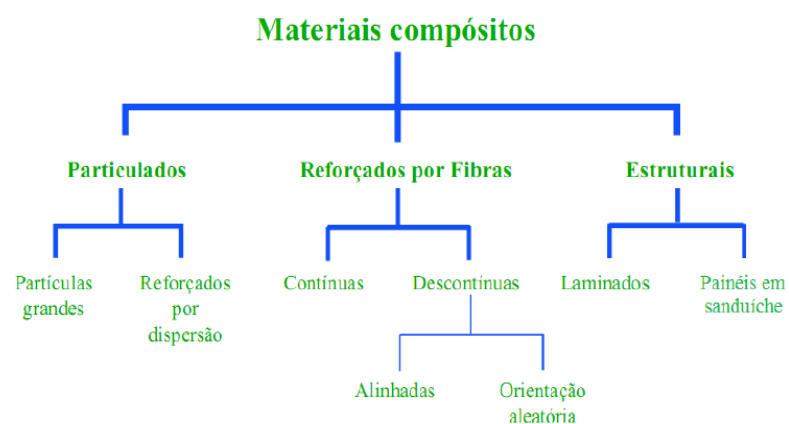
**Figura 13 – Formas comuns de reforço de fibra.**



Fonte: ASM, 2001.

Comumente, dividem-se os materiais compósitos em particulados, fibrosos e estruturais (FIG. 14) os quais serão descritos a seguir :

**Figura 14 – Classificação dos materiais compósitos.**



Fonte: PIRES, 2009.

#### **2.1.2.1.1 Compósitos particulados**

Compósitos particulados compõem-se de partículas de um ou mais materiais suspensos na matriz de outro material. As partículas, assim como a matriz, podem ser tanto de materiais metálicos, como não metálicos. Um exemplo deste tipo de material compósito é o concreto. (AL-QURESHI, 2002).

#### **2.1.2.1.2 Compósitos fibrosos**

Compósitos Fibrosos são caracterizados por fibras em uma matriz. Apesar de a princípio parecer paradoxal, as fibras longas de certos materiais são muito mais resistentes e fortes do que um corpo de prova construído com o material na sua forma natural. (AL-QURESHI, 2002).

##### **2.1.2.1.2.1 Compósitos fibrosos laminados**

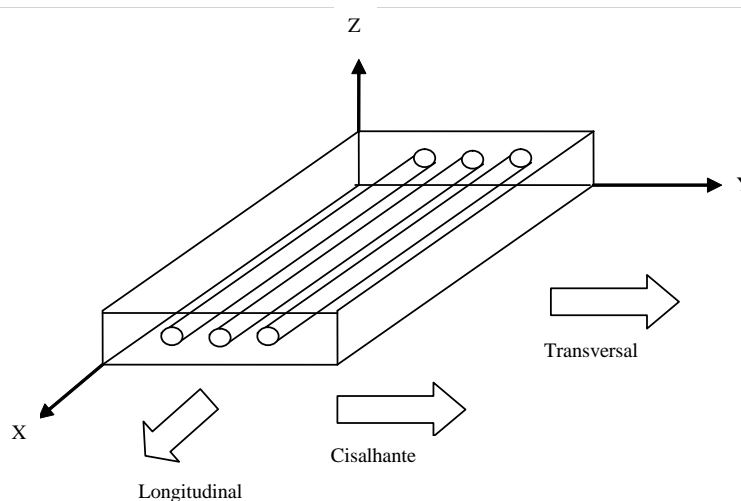
Existe ainda uma classe que envolve os materiais fibrosos e as técnicas de laminação, a qual é denominada, compósitos fibrosos laminados ou, como é mais comumente conhecido internacionalmente, “*laminated fiber reinforced composites*”. Neste grupo, as camadas de fibra reforçada com uma matriz são combinadas de forma que as direções das fibras de cada camada são orientadas para fornecer uma peça com rigidez e resistência diferentes em cada direção, dando assim ótimos resultados na redução de peso com a otimização do projeto estrutural. Esta característica vai ao encontro com os anseios mais imediatos de todos os projetistas aeroespaciais, como por exemplo, os mísseis, os satélites e a aviação, onde uma redução no peso estrutural representa um acréscimo na carga paga. (AL-QURESHI, 2002).

Compósitos laminados consistem de camadas com pelo menos dois materiais diferentes, ligados por intermédio de uma matriz. A razão pela qual se usa o processo de laminação é a combinação dos melhores aspectos das camadas constituintes com o intuito de obter um material com determinadas características não encontradas em um único material. Entre as propriedades que se pode citar, como aperfeiçoadas pela laminação estão a resistência, a rigidez, a redução de peso, a resistência a corrosão, a estética e o isolamento térmico e acústico. Como exemplo deste tipo de material, pode-se citar o vidro laminado dos automóveis. (AL-QURESHI, 2002).

Compósitos laminados são compósitos formados através do empilhamento de várias finas camadas de fibras impregnadas com resina, também denominadas de lâminas. Laminados oferecem a oportunidade de terem suas propriedades modificadas através do empilhamento de lâminas com fibras orientadas em diferentes direções. (AL-QURESHI, 2002).

A Figura 15 mostra a representação de uma lâmina, a qual pode também ser aplicada em compósitos fabricados de várias camadas distintas, empregando-se fibras contínuas e que apresentam as mesmas propriedades e orientações. (AL-QURESHI, 2002).

**Figura 15 – Representação de uma lâmina de compósito e seus esforços/tensões.**

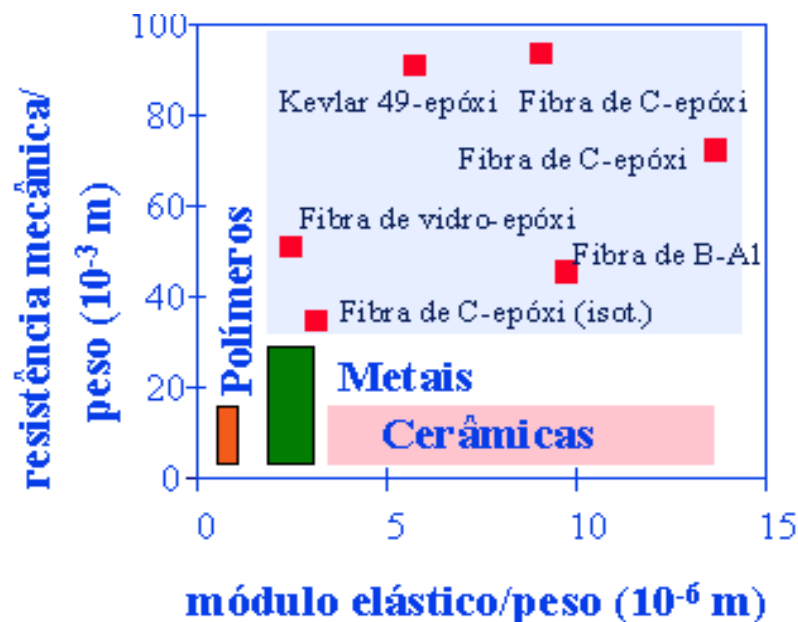


Fonte: AL-QURESHI, 2002.

### 2.1.2.1.3 Compósitos para fins estruturais

Durante os últimos 20 anos, um substancial desenvolvimento de compósitos para aplicações estruturais foi observado. A principal motivação desta grande evolução foi a possibilidade de se produzir compósitos com altas propriedades mecânicas e baixas densidades que potencialmente poderiam substituir materiais usualmente utilizados como o aço e a madeira. A combinação de polímeros de alto desempenho com fibras cerâmicas ou poliméricas de alto módulo elástico e resistência mecânica permitiu a produção de novos compósitos com um grupo de propriedades específicas (por unidade de peso) superiores ao aço, alumínio e outros (FIG. 16). Esses compósitos apresentam em geral altas razões módulo/peso e resistência/peso, superiores a de materiais cerâmicos, poliméricos e metálicos. (AL-QURESHI, 2002).

Figura 16 – Representação de uma lâmina e seus esforços/tensões.



Fonte: BRAGA, 2006.

### 2.1.3 Matrizes para compósitos

Para fabricação de compósitos, três tipos principais de matrizes são usadas. (MENDONÇA, 2005):

- matrizes metálicas;
- matrizes cerâmicas;
- matrizes poliméricas.

Matrizes têm como principal propósito transferir as tensões impostas ao material compósito para as fibras, além de servir como suporte e proteção das mesmas. Geralmente, em compósitos são utilizadas matrizes de resinas termofixas, pois possuem boas propriedades mecânicas e estabilidade dimensional, além de serem facilmente processáveis. Elas são ainda resistentes a ataques químicos e possuem elevada resistência térmica. (PIRES, 2009).

Quando forças ou cargas de impacto são aplicadas em resinas poliméricas, as relaxações da estrutura molecular não acompanham o processo, resultando em fratura, ocasionada pela quebra da cadeia e/ou separação das interfaces. Isto acontece especialmente em resinas termofixas, devido à baixa resistência ao impacto promovida pela rede de ligações cruzadas, formadas sob a influência do calor ou de agentes de cura. Sendo assim, há necessidade de se empregar reforços nestas matrizes poliméricas. (PIRES, 2009).

Segundo Bento. (2006), a matriz possui três funções principais que são:

- proteger a superfície da fibra de danos por abrasão, os quais levariam a fratura;
- aderir à superfície da fibra de tal forma que a força aplicada seja transferida a mesma;
- separar as fibras entre si de maneira que as trincas transversais não possam se propagar de uma fibra a sua vizinha.

Para Mendonça (2005), as matrizes poliméricas possuem vantagens e desvantagens em relação às matrizes metálicas e outros materiais:

Algumas vantagens:

- facilidade de fabricação;
- baixo peso, baixa densidade;
- resistência a ataques químicos;
- isolamento térmico e elétrico;
- aparência decorativa.

Algumas desvantagens:

- baixa resistência;
- rigidez inferior a dos metais;
- mais frágil que muitos metais e madeira;
- dureza baixa, risca com facilidade;
- inflamabilidade alta;
- temperatura máxima de serviço baixa;
- expansão térmica superior à dos metais.

### **2.1.3.1 Tipos de matrizes/resinas**

As matrizes/resinas se dividem em resinas vegetais ou naturais e sintéticas, descritas a seguir:

### 2.1.3.1.1 Matrizes vegetais ou naturais

São resinas obtidas na natureza, de proveniência vegetal. Estes podem estar em estado de fósseis, semifósseis ou recente. As fossilizadas são extraídas diretamente do subsolo e as recentes diretamente do vegetal. Estas resinas naturais são complexas estruturas orgânicas, que podem ser formados por derivados fenólicos, álcoois, ésteres, óleos essenciais e ácidos terpênicos. Podem ser classificadas como de baixa acidez, alta acidez, goma laca, goma elemi, bem como por suas características físico-químicas. Há também resinas de origem animal, como a resina conhecida como Shellac, que é a exudação de um inseto. (ASM, 2001).

Desde 1996, uma larga gama de resinas vegetais estão sendo desenvolvidos para compósitos. Estes materiais tem vantagens econômicas e ambientais em cima de materiais derivados do petróleo, lhes fazendo uma alternativa atraente. Óleos naturais, que pode ser derivados de planta e fontes animais, são achados abundantemente em todas as partes do mundo. As resinas vegetais podem ser extraídas de: (ASM, 2001).

- canola;
- milho;
- linho;
- oliva;
- óleo de soja.

Uma vantagem destas resinas em relação às sintéticas, é que elas podem ser recicladas, porém, são de difícil obtenção, por serem produtos de demanda inexpressível, com pouca procura no mercado e ainda estarem em fase de desenvolvimento. (MORAES, 2012).

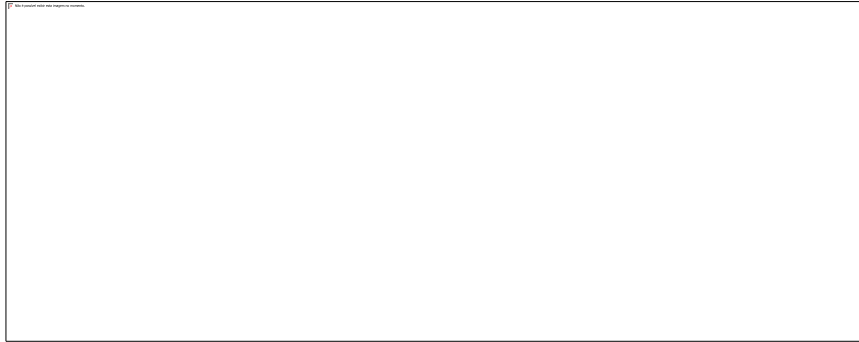
### 2.1.3.1.2 Matrizes sintéticas

As mais conhecidas resinas sintéticas são poliéster, epóxi, alquídicas, vinílicas, acrílicas, poliuretânicas, fenólicas, amínicas, entre outras. A macromolécula de uma resina sintética (FIG. 17) é mostrada abaixo. (Anon, 1997).

Resinas sintéticas são resinas largamente utilizadas em escala industrial. São macromoléculas obtidas através de reações químicas em reatores utilizando-se os monômeros adequados. Dependendo da resina, a sua obtenção pode ser por reações de condensação ou adição. (Anon, 1997).



**Figura 17 – Macromolécula de uma resina sintética.**



**Fonte: BRAGA, 2006.**

As resinas sintéticas se dividem em termofixas ou termoplásticas:

**Resinas termofixas:** São resinas que sob o efeito do calor se polimerizam, ocorrendo um processo irreversível, porque sua estrutura molecular é interligada. Suas cadeias carbônicas possuem uma geometria tridimensional. (RODRIGUEZ, 1996).

Compara-se a resina termofixa a um ovo. Uma vez cozido, essencialmente, permanece no mesmo estado. Como exemplo de resinas termofixas para compósitos, temos as resinas poliéster insaturadas, éster-vinílicas, epóxis, uretânicas e fenólicas. (RODRIGUEZ, 1996).

Alguns tipos de termofixos são. (Mendonça, 2005):

- poliéster;
- epóxi;
- poliamidas;
- fenólicos;
- silicones.

**Resinas termoplásticas:** São resinas que sofrem fácil alteração em seu estado físico quando sob o efeito de calor ou pressão. Ao contrário das termofixas, sua secagem é reversível. São compósitos com cadeias carbônicas lineares, que amolecem repetidamente quando aquecidas em direção ao seu ponto de fusão e endurecem quando resfriadas. Em

termos simples, pode-se comparar um termoplástico à parafina, a qual flui quando aquecida e endurece tomando sua forma quando resfriada. (RODRIGUEZ, 1996).

Alguns tipos de termoplásticos são. (Mendonça, 2005):

- polietileno (PE);
- polipropileno (PP);
- poliestireno (PS);
- acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS);
- policarbonato (PC);
- poli-éter-éter-cetona (peek).

Algumas destas vantagens e desvantagens listadas são referentes a propriedades mecânicas cujos valores típicos são mostrados na tabela 08.

**Tabela 08 – Propriedades típicas de alguns polímeros.**

Material	Unidade	Termofixos					Termoplásticos	
		Poliéster	Epóxi	Poliamidas	Fenólicos	Silicone	Peek	Polisufone
Densidade	(kg/m <sup>3</sup> )	1.100-1.400	1.213	1.460	1.320-1.450	1.850-2.810	1.300	1.250
Módulo de elasticidade à tração	MPa	2.100-4.400	2.700-3.380	3.500-4.500	-	-	4.000	2.800
Módulo à compressão	MPa	-	3.860	-	-	-	-	-
Ruptura à tração	MPa	34-100	29-130	120	50-55	17-34	92	75
Ruptura à compressão	MPa	90-250	158	-	190-250	60-100	-	-
Alongamento	(%)	2,0	-	-	0,4-0,8	-	-	-
Temperatura de transição	(°C)	140-200	150-200	-	-	-	143	225
Temperatura de trabalho contínuo	(°C)	250	-	260-460	150-320	260	310	175-190
Temperatura de cura para uso em geral	(°C)	-	120	-	-	175-230	-	-
Coefficiente de dilatação térmica	-	55-100	45-65	90	45-110	-	-	94-100
Absorção de água em 24 horas em volume	-	0,15-0,6	0,08-0,15	0,3	0,1-0,2	-	0,1	0,2

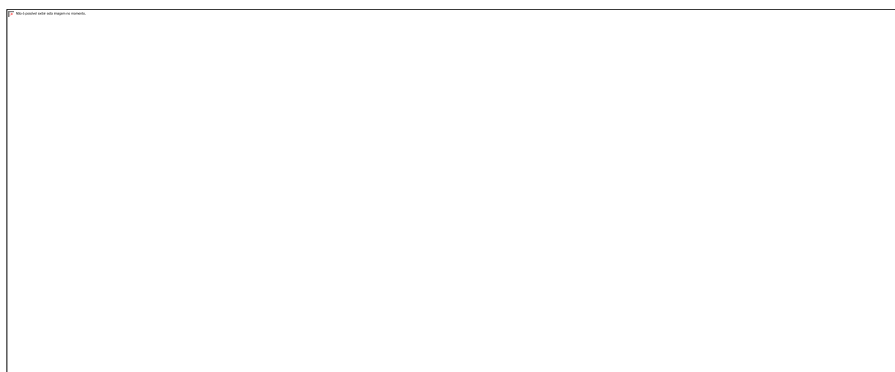
Fonte: MENDONÇA, 2005.

### 2.1.3.1.2.1 Resina poliéster

Constituem uma família de polímeros de alto peso molecular, resultantes da condensação de ácidos carboxílicos com glicóis, classificando-se como resinas saturadas ou insaturadas, dependendo especificamente dos tipos de ácidos utilizados, as quais irão caracterizar o tipo de ligação entre os átomos de carbono da cadeia molecular.

Poliéster é um termo que significa: poli (muitos, portanto muitos grupos ésteres); éster. (é uma função química; um éster é obtido através da seguinte reação: ácido + álcool = éster + água). Desta maneira, moléculas de biácido e de biálcool originarão várias moléculas (FIG. 18) formando o poliéster. (RODRIGUEZ, 1996).

**Figura 18 – Macromolécula de uma resina poliéster.**



**Fonte: RODRIGUEZ, 1996.**

Os poliésteres resultam da condensação de poliácidos (ou também seus anidridos e ésteres) com poliálcoois. Um dos poliésteres mais simples e mais importantes é obtido pela reação do éster metílico do ácido tereftálico com etileno-glicol. É usado como fibra têxtil e recebe os nomes de terilene ou dacron. Em mistura com outras fibras (algodão, lã, seda etc) constitui o tergal. (RODRIGUEZ, 1996).

#### **2.1.3.1.2.2 Resina epóxi**

As resinas epóxi são termorrígidos de alto desempenho que contém pelo menos dois grupos epóxi terminais, conhecidos também como grupos oxirano ou etoxilina, por molécula. Estas resinas são matérias primas em vários setores industriais.

A palavra epóxi vem do grego "EP" (sobre ou entre) e do inglês "OXI"(oxigênio), literalmente o termo significa oxigênio entre carbonos. Em um sentido geral, o termo refere-se a um grupo constituído por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono. (SILAEX, 2014).

O óxido de etileno é um exemplo desse tipo (FIG. 19).

**Figura 19 – Resina epóxi à base de Bisfenol A.**



Fonte: SILAEX, 2014.

Não existe nenhum acordo universal sobre a nomenclatura do anel epoxídico. Existem mesmo, uma divisão no próprio termo epóxi, os europeus geralmente preferem o termo "EPOXIDE", o qual é sem menor dúvida o mais correto do que "EPOXY" utilizado pelos americanos. Os epóxios podem ser designados óxidos, como no caso do óxido de etileno (epoxietano) ou óxido de ciclohexano. O termo oxirano é um nome trivial para o óxido de etileno e também usado em referência ao grupo epóxi; muitos dos mais comuns monoepóxi possuem nomes triviais como epícloridrina, ácido glicídico, glicidol e grupo glicidil. (SILAEX, 2014).

### 2.1.3.2 Aditivos

A produção de materiais compósitos reforçados por fibras envolve a polimerização da resina básica em conjunto com as fibras, onde é comum a adição de outros componentes químicos com diversos propósitos. (MENDONÇA, 2005):

- **agentes de cura:** no caso de plásticos termofixos, a cura só é desencadeada com a adição de um agente de cura que promova a formação das ligações cruzadas entre as cadeias;
- **catalisadores:** são substâncias que aceleram ou retardam as reações. Ao contrário dos agentes de cura, os catalisadores não compõem o produto final da reação. As quantidades utilizadas são mínimas;
- **cargas:** são aditivos usados com a finalidade de alterar as propriedades ou custos; materiais como serragem ou outros são adicionados simplesmente para manter volume e reduzir os custos;

- **corantes e pigmentos:** dão cor e melhoram a aparência dos polímeros. Corantes são compostos orgânicos que se agregam às cadeias do polímero e os pigmentos são compostos inorgânicos que permanecem meramente dispersos pelo polímero;
- **estabilizadores:** compreendem uma gama de aditivos, uns como antioxidantes, outros como absorvedores de radiação ultravioleta os quais evitam a ação degradante.

#### 2.1.3.2.1 Agentes de cura (Endurecedores)

As resinas epóxi podem ser curadas com vários agentes de cura, também chamados de endurecedores, conforme as necessidades de cura e produto final, são eles: (SILAEX, 2014).

##### 2.1.3.2.1.1 Aminas alifáticas

São em sua maioria, líquidos de baixa viscosidade com odor característico e irritante. Alguns tipos mais usados são o etileno diamina (EDA), dietileno triamina (DETA) (FIG. 20), trietileno tetramina (TETA), tetraetileno pentamina (TEPA) etc. Em geral são moléculas pequenas e muito voláteis que, basicamente reagem através dos seus radicais hidrogênio livre. (SILAEX, 2014).

Vantagens:

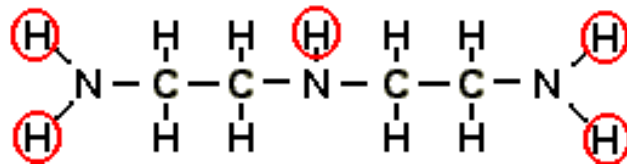
- Rápida cura a temperatura ambiente;
- Baixo custo;
- Baixa viscosidade;
- Boa resistência química;
- Fácil mistura com a resina.

Desvantagens:

- Curto tempo de trabalho;
- Alta exotermia;
- Alta toxicidade;

- Relação crítica de mistura;

**Figura 20 – Dietileno triamina (DETA).**

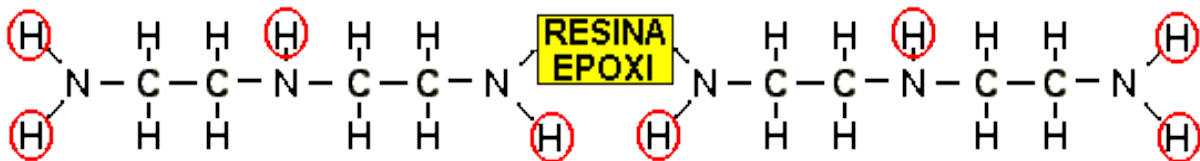


Fonte: SILAEX, 2014.

#### 2.1.3.2.1.2 Adutos de aminas

Os adutos de aminas (FIG. 21) são resultante da mistura de resina epóxi ou diluente reativo com um excesso de amina. Com isso se obtém uma cadeia maior e menos voláteis, com seus radicais de hidrogênio parcialmente reagidos e, conseqüentemente, possuem uma relação de mistura menos crítica, geram menor exotermia, curam mais completamente e possuem menor toxicidade. (SILAEX, 2014).

**Figura 21 – Aduto de amina com DETA.**



Fonte: SILAEX, 2014.

#### 2.1.3.2.1.3 Poliamidas

As poliamidas são obtidos através da reação de dimerização de aminas alifáticas como o dietileno triamina (DETA) com diácidos ou ácidos graxos de cadeia longa, resultando em polímeros de alto peso molecular que variam de um líquido até a sólidos. (SILAEX, 2014).

Vantagens:

- Baixa toxicidade;
- Bom poder de adesão;
- Boa flexibilidade;
- Longo tempo de trabalho.

Desvantagens:

- Alta viscosidade;
- Baixa resistência térmica;
- Baixa resistência química;
- Longo tempo de cura.

#### **2.1.3.2.1.4 Aminas cicloalifáticas**

As aminas cicloalifáticas, diferentemente das alifáticas, possuem anéis cíclicos fazendo com que apresentem menor volatilidade, maior estabilidade à luz, menor reatividade e melhor retenção de cores. Em estado puro encontram grande dificuldade de cura a temperatura ambiente, devido a sua baixa reatividade. Uma das mais usadas é a isofofonadiamina (IPDA), porém normalmente com algumas modificações, como por exemplo o uso de aceleradores de reação. (SILAEX, 2014).

Vantagens:

- Baixa viscosidade;
- Excelente estabilidade de cor;
- Alto brilho;
- Boa resistência química;
- Fácil mistura com a resina.

Desvantagens:

- Alto custo;
- Cristalização;
- Baixa reatividade;
- Média resistência térmica.

#### **2.1.3.2.1.5 Anidridos**

Os anidridos são usados principalmente em sistemas de cura a quente, pois dificilmente reagem a temperatura ambiente. Possuem grande tempo de latência quando incorporado a resina e propiciam uma excelente resistência térmica. Os principais usados são o anidrido hexahidroftálico (HHPA), anidrido tetrahidroftálico (THPA), anidrido metil náutico (NMA), anidrido clorêndrico (HET). (SILAEX, 2014).

Vantagens:

- Longo tempo de trabalho;
- Baixa viscosidade;
- Alta resistência térmica;
- Boa resistência química;
- Fácil mistura com a resina.

Desvantagens:

- Alto custo;
- Grande relação de mistura;
- Necessidade de cura a quente;
- Cores escuras;
- Necessidade de pós-cura;
- Necessidade de um acelerador.

Esses endurecedores comentados acima são os mais utilizados comercialmente, perfazendo aproximadamente 90,0% do total. Porém existem outros tipos de uso mais específico comentados rapidamente abaixo.

#### **2.1.3.2.1.6 Poliaminoamidas ou poliamidoaminas**

São provenientes de uma reação de poliamida com excesso estequiométrico de amina. Com isso obtém-se um produto que terá características intermediárias entre uma



poliamida e uma amina alifática. Adequadas em casos onde se queira maior tenacidade e adesividade com melhor fluidez e maior reatividade. (SILAEX, 2014).

#### **2.1.3.2.1.7 Aminas aromáticas**

As aminas aromáticas estão sendo pouco usadas devido ao seu grau toxicidade e sua cor escura. Geralmente são aminas sólidas que necessitam ser fundidas e misturadas a quente com a resina e posteriormente curadas a altas temperaturas. Devido a todo este processo, são emitidos muitos vapores amínicos corrosivos e tóxicos. Quando curado, este sistema propicia boa resistência química, elétrica, excelente resistência a hidrólise, boa resistência térmica. Alguns tipos são o p-p'metileno dianilina (MDA), metafenileno diamina (MPDA), diaminodifenil sulfona (DADS). (SILAEX, 2014).

#### **2.1.3.2.1.8 Polissulfetos**

São produtos pouco usados pois possuem alta toxicidade, difícil aquisição e alto custo. Suas principais características são flexibilidade, impermeabilidade e excelente adesão ao vidro, todavia podem ser substituídos por outros endurecedores que conferem característica semelhante com menos toxicidade. (SILAEX, 2014).

#### **2.1.3.2.1.9 Polioxipropilaminas**

As polioxipropilaminas são endurecedores que aliam a flexibilidade e adesividade das poliamidas com a boa retenção de cor e estabilidade à luz e transparência das aminas cicloalifáticas. Contudo possuem baixa reatividade e alto custo. (SILAEX, 2014).

### **2.1.3.3 Desmoldantes**

Os desmoldantes são agentes que, aplicados na superfície de moldes, evitam que a peça moldada tenha aderência. (SILAEX, 2014).

#### **2.1.3.3.1 Funcionamento dos desmoldantes**

- Como desmoldante de sacrifício, onde a película do produto forma um filme que sai junto com a peça retirada;
- Como desmoldante fixo ou semi-fixo, onde a superfície é tratada para ter uma baixa tensão e baixa porosidade evitando assim que haja "agarre" da peça no molde.

Os desmoldantes são os componentes que não deixam que um material "grude em outro", ou seja, não se pode tentar fazer um molde ou um positivo de uma peça, sem antes passar um ou mais desmoldantes garantindo assim a separação de ambos no final do trabalho. Os desmoldantes são muito variados, pois cada tipo de material usado na moldagem e cada tipo de material usado na produção da peça moldada exigem que o desmoldante esteja de acordo com suas características físicas e reações químicas. Os desmoldantes protegem os moldes, reduzem os custos de limpeza, conferem um excelente acabamento às peças fabricadas, permitem cadências de produção. (SILAEX, 2014).

#### 2.1.3.3.2 Tipos de desmoldantes

Alguns tipos de desmoldantes são descritos abaixo: (SILAEX, 2014):

- **DMS Spray:** É o fluido de silicone puro que serve como lubrificante, desmoldante e hidro-repelente. Muito usado em lubrificação de equipamentos de fitness como esteiras, partes plásticas e metálicas além da desmoldagem em processos de injeção e extrusão;
- **Polidesmo Pva :** Desmoldante à base de álcool polivinílico com alto teor de sólidos, que forma filme uniforme e transparente, o qual após seco pode até ser retirado com as mãos. Vantagens: aplicável com pistola ou esponja, seca à temperatura ambiente, insolúvel em solventes orgânicos, totalmente solúvel em água;
- **Polidesmo 05:** desmoldante concentrado líquido à base de resinas especiais de silicone, desenvolvido para aplicações onde se necessite um formador de filme que não carbonize e tenha lubricidade, além de proporcionar múltiplas moldagens em cada aplicação. Especialmente indicado para altas temperaturas e as desmoldagens mais difíceis;

- **Polidesmo 11:** Desmoldante à base de cera polimérica de alto ponto de fusão em meio solvente de alta volatilidade. Após aplicado, deixa em poucos segundos uma camada seca e uniforme, podendo ser usado com ou sem polimento posterior. Usado principalmente para sistemas de resinas epóxi, poliéster e outras moldadas por envaze em sistemas de cura à temperatura abaixo de 80° C;
- **Polidesmo 20:** Desmoldante concentrado para as mais difíceis desmoldagens. Após devidamente curado, forma uma duradoura película semi-permanente, propiciando múltiplas desmoldagens com uma única aplicação;
- **Polidesmo 55:** Derivado do Polidesmo 05 pronto para uso sem necessidade de manipulação para sua preparação;
- **SQL 193:** Desmoldante em emulsão para uso em argilas, cimento e concreto. Promove uma película desmoldante, não agressiva ao manipulador nem ao ambiente;
- **Emulsão em silicone SQL 100:** Desmoldantes à base de óleos minerais e/ou vegetais emulsionados. Utilizado onde o silicone é indesejado;
- **Emulsões de Silicone:** Desmoldantes à base de fluidos de silicones emulsionados contendo de 35,0% a 87,0% de ativos. Utilizadas nas indústrias de fundição, plásticos e artefatos de borracha.

A Tabela 09 mostra o desmoldante correto em função do material das peças e dos quais serão feitos os moldes.

**Tabela 09 – Desmoldante correto em função do material das peças e dos moldes.**

Material	Gesso	Poliéster ou epóxi com fibra	Poliéster ou epóxi fundido	Borracha de poliuretano	Resina poliuretano	Espuma poliuretano
Gesso	água com sabão em barra diluído	cera de desmoldar	cera de desmoldar	cera de desmoldar	não precisa	cera de desmoldar
Resina poliéster ou epóxi	álcool polivinílico	cera de desmoldar	cera de desmoldar	cera de desmoldar	cera de desmoldar	cera de desmoldar
Borracha de poliuretano	óleo silicone	cera de desmoldar	cera de desmoldar	cera de desmoldar	cera de desmoldar	cera de desmoldar
Resina poliuretano	álcool polivinílico óleo silicone	não precisa	cera de desmoldar	cera de desmoldar	cera de desmoldar	cera de desmoldar

Fonte: FAZFÁCIL, 2010.

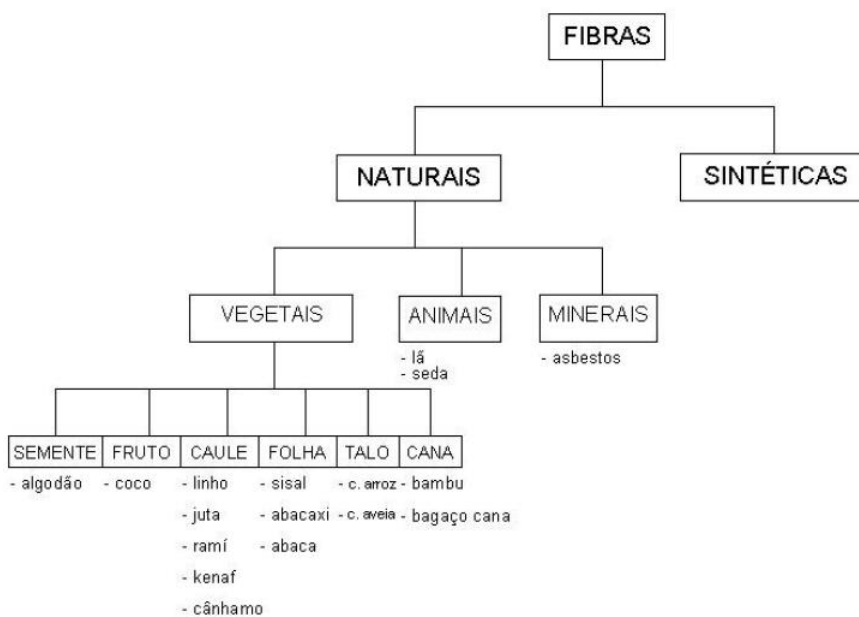
### 2.1.4 Reforços para compósitos

A fim de se aumentar o uso de polímeros utiliza-se a adição de outros elementos ao material original, visando melhorias de processamento e/ou de propriedades desejadas. (RABELLO, 2000).

Quando o agente de reforço é contínuo e longo, ao ser incorporado ao polímero gera regularidade geométrica e por isso classifica-se este sistema como de elevado desempenho. Já quando o agente de reforço é classificado como pequeno, por exemplo, fibras com comprimento menor que 3 cm, este sistema é denominado como de baixo desempenho em relação aos reforçados com fibra contínuas, pois o agente está disperso aleatoriamente na matriz. (XANTHOS, 2005).

Existem algumas formas distintas de se classificar as fibras (FIG. 22). A primeira distinção que se faz é entre fibras sintéticas e naturais. Em seguida, as fibras naturais são divididas em vegetais, animais e minerais. Por último, as fibras vegetais são separadas de acordo com a sua origem na planta, fibras de semente, de fruto, de caule, de folha, de talo e de cana. Exemplos de cada tipo de fibra também estão demonstrados. (MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2002).

**Figura 22 – Classificação das fibras e alguns exemplos.**



**Fonte: MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2005.**

### 2.1.4.1 Fibras sintéticas

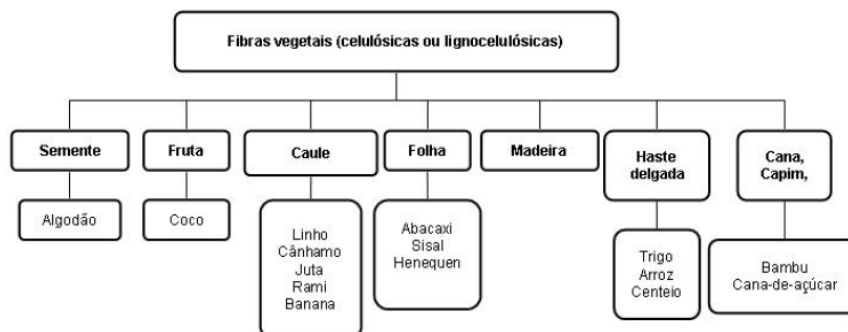
Fibras sintéticas são fibras obtidas a partir de polímeros sintéticos: a poliamida (náilon), poliacrílicos, elastômeros, derivados do polivinilo, poliolefina e poliuretano. Outros polímeros com interesse industrial são as fibras sintéticas como o nylon, utilizado nas redes e o fios de pesca, e o terylene, utilizado como fio na indústria têxtil. Ela é utilizada principalmente para fazer roupa e outros materiais como lençóis de cama, almofadas, echarpes entre outros. Alguns exemplos são. (BENTO, 2006):

- **Polipropileno:** Constituídas de um material polimérico termoplástico, conferindo grande flexibilidade e tenacidade;
- **Poliéster:** São resistentes a temperaturas de até 220°C. São utilizadas em misturas asfálticas geralmente em comprimentos que variam da ordem de 0,6mm a 1,2mm, podendo ser utilizadas em tamanhos maiores a fim de melhorar o efeito de reforço;
- **Polietileno:** Apresentam pouca resistência a altas temperaturas.

### 2.1.4.2 Fibras naturais

Primeiramente, as fibras vegetais podem ser classificadas segundo a parte do vegetal da qual são extraídas, conforme mostra a Figura 23. As fibras oriundas do caule ou das folhas da planta são as mais usadas como fase dispersa em compósitos poliméricos. (PIGATTO, 2009).

**Figura 23 – Classificação das fibras vegetais.**



Fonte: PIGATTO, 2009.

Diversas fibras vegetais tais como rami, cânhamo, juta, sisal, bambu e banana são usadas como reforços substituindo fibras convencionais, como as fibras de vidro. Linho, kenaf, cânhamo e farinha de madeira são relatados como adequados para aplicação em situações de carregamento e componentes de absorção de impacto em veículos.

Porém, propriedades físicas, mecânicas e químicas destas fibras vegetais dependem fortemente da colheita, influenciadas pelo clima, localização, características do solo, condições do tempo, entre outros fatores. As propriedades também são afetadas pelo processamento das fibras e pela sua incorporação em compósitos, com relação ao manuseio, à impregnação e à consolidação. Além disso, as fibras naturais apresentam algumas desvantagens como pouca molhabilidade pelo polímero, incompatibilidade com algumas matrizes poliméricas e alta absorção de umidade. (PIGATTO, 2009), (MARCONCINI; ITO; MATTOSO, 2007), (CAVALCANTE; CARVALHO, 2007).

Como uma das funções da matriz em compósitos reforçados com fibra é transferir a carga para as fibras através do cisalhamento da interface, este processo requer uma boa ligação entre a matriz polimérica e as fibras. Uma pobre adesão na interface significa que a capacidade total do compósito não pode ser explorada, tornando-o vulnerável a ataques ambientais e reduzindo seu tempo de uso. A pobre adesão está relacionada com o caráter hidrofílico da fibra fazendo com que ocorra uma baixa compatibilidade com a matriz polimérica hidrofóbica, além da tendência de formar agregados durante o processamento e uma baixa resistência à umidade, reduzindo as propriedades mecânicas em geral. (ARAÚJO; WALDMAN; DE PAOLI, 2008).

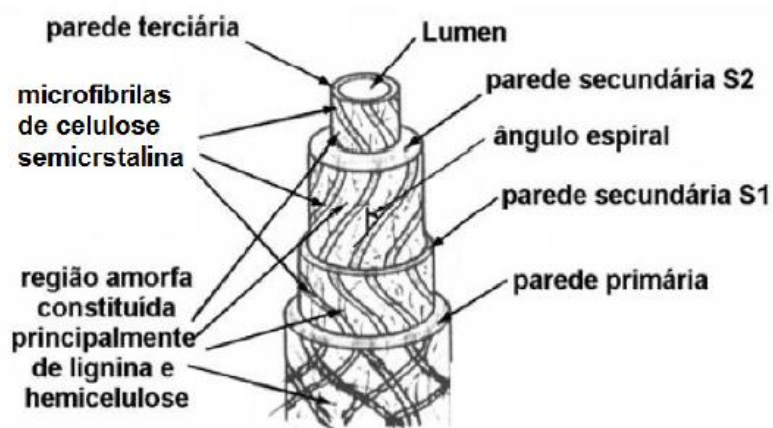
As fibras vegetais são estruturas alongadas de secção transversal vazada e arredondadas, distribuídas por todo vegetal podendo ser classificadas de acordo com a origem anatômica como fibras de talo, de folha, de lenho e de superfície. As fibras de talo ocorrem no floema que fica na entrecasca do talo, por exemplo, as fibras de juta, rami, linho, algodão e piaçava. As fibras de folha são extraídas das folhas dos vegetais, podendo-se citar as de sisal, curauá, abacaxi, banana e palma. As fibras de lenho são obtidas do lenho como no caso as fibras de bambu e as fibras de bagaço de cana. As fibras de superfície formam uma camada protetora de caules, folhas, frutos e sementes das plantas, como as fibras de açaí, coco e as fibras de algodão. (FAGURY, 2005).

As principais vantagens das fibras vegetais em relação às sintéticas tradicionais são: abundância, baixo custo, baixa densidade, boas propriedades específicas, facilidade de obtenção e manuseio, não-tóxicas, baixa abrasão de equipamentos e moldes, absorção de dióxido de carbono do meio-ambiente, biodegradabilidade e o aspecto ecológico e renovável.

Por outro lado, também possuem desvantagens que prejudicam a sua aplicação em muitas situações e ambientes, como por exemplo: baixa resistência a microorganismos e baixa estabilidade térmica. Apesar das propriedades mecânicas das fibras vegetais serem muito inferiores às de fibras sintéticas, sua densidade é aproximadamente metade da fibra de vidro. (SILVA, 2003).

Fibras de plantas, também chamadas de fibras técnicas, possuem comprimento longo, de até um metro, e diâmetro aproximado de 50-100  $\mu\text{m}$ . Estas fibras são formadas por feixes de células mortas de planta, também conhecidas por fibras individuais, que possuem formato tubular, parede espessa e no centro uma cavidade, chamada de lúmen. Essas células, ou fibras individuais, têm comprimento aproximado de 1 a 50 mm e diâmetro aproximado de 10 a 50  $\mu\text{m}$ . Cada camada das células ou fibras individuais é formada basicamente por microfibrilas de celulose semicristalina, circundadas por uma matriz de hemicelulose e lignina. As microfibrilas têm diâmetro de cerca de 10 a 30 nm e são responsáveis por dar a resistência mecânica às fibras. A matriz de hemicelulose é ligada por pontes de hidrogênio com as microfibrilas de celulose formando uma rede tridimensional. Já a lignina forma outra rede que se intercala tridimensionalmente com a rede de hemicelulose e microfibrilas (FIG. 24) e ajuda na rigidez da parede da célula. (SILVA, 2003).

**Figura 24 – Representação esquemática de uma microfibrila.**



Fonte: SILVA, 2003.

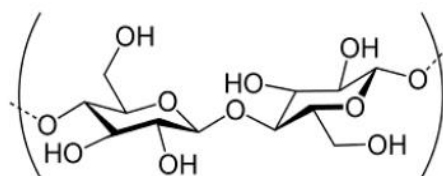
As composições químicas de algumas fibras naturais são mostradas na Tabela 10.

**Tabela 10 – Composição química de algumas fibras naturais.**

Fibra	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Pectina (%)	Cera (%)	Teor de Umidade (%)	Ângulo Microfibrilar (%)
Bambú	26-43	30	1-31	-	-	9,16	-
Banana	83	-	5	-	-	10,71	11-12
Coco	36-53	0,15 - 0,25	39	49	-	-	41-45
Curauá	73,6	9,9	7,5	-	-	-	-
Juta	61-71,5	17,9-22,4	11,8-13	0,2	0,5	12,5-13,7	8
Piassava	28,6	25,8	45	-	-	-	-
Rami	68,6-91	5-16,7	0,6-0,7	1,9	-	-	69-83
Sisal	78	10	8	-	2	11	20-25

Fonte: SATHISHKUMAR e outros, 2013.

A celulose é um polímero hidrofílico que contém seis grupos hidroxila em sua estrutura básica (FIG. 25). Estes grupos de hidroxila fazem ligações do tipo ponte de hidrogênio intra e intermoleculares. Nas ligações intramoleculares, as hidroxilas da própria molécula ligam-se entre si e, nas intermoleculares ligam-se com outras moléculas de celulose ou moléculas polares presentes no ambiente. Por este motivo, as fibras vegetais não modificadas apresentam grande afinidade com a umidade ambiente (hidrofilia) e pouca afinidade com matrizes poliméricas hidrofóbicas, como é o caso da maioria das resinas empregadas em compósitos. A exposição excessiva dos compósitos à umidade pode provocar inchamento, perda de propriedades mecânicas e falta de estabilidade dimensional. (PIRES, 2009).

**Figura 25 – Unidade básica da celulose.**

Fonte: PIRES, 2009.

As fibras naturais, quando incorporadas aos polímeros, podem usar praticamente todos os métodos convencionais de fabricação, tais como: extrusão, calandragem, laminação, prensagem, entre outros. (GASSAN; BLEDZK, 1999).

As propriedades físicas de algumas fibras naturais são mostradas na Tabela 11.



**Tabela 11 – Propriedades físicas de algumas fibras naturais.**

<b>Fibra</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Diâmetro (µm)</b>
Bambú	0,6-1,1	240-330
Banana	1,35	60-80, 50-250
Coco	1,15	100-160, 100-450
Curauá	1,4	170
Juta	1,3-1,46	40-350
Piassava	1,4	-
Rami	1,5	50
Sisal	1,45	50-300

**Fonte: SATHISHKUMAR e outros, 2013.**

As propriedades mecânicas de algumas fibras naturais são mostradas na Tabela 12.

**Tabela 12 – Propriedades mecânicas de algumas fibras naturais.**

<b>Fibra</b>	<b>Comprimento de medida (mm)</b>	<b>Resistência a ruptura (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>	<b>Alongamento à ruptura (%)</b>
Bambú	100	503	35,91	1,4
Banana	150	600	17,85	3,36
Coco	100	500	2,5	20
Curauá	10	158-729	-	5
Juta	60	393-773	10-30	1,5-1,8
Piassava	-	134-143	1,07-4,59	2,9-7,8
Rami	-	220-938	44-128	2-3,8
Sisal	50	530-640	9,4-22	3-7

**Fonte: SATHISHKUMAR e outros, 2013.**

#### **2.1.4.2.1 Fibra de juta**

As fibras de juta são extraídas das hastes da juta. O tipo “*corchorus capsularis*” (FIG. 26) é cultivado em zonas de inundação e o tipo “*corchorus olitorius*” é cultivado em zonas mais altas. A juta é conhecida desde a antiguidade nas regiões tropicais. Ela conseguiu importância na Europa durante a guerra anglo-russa de 1853-1856 (Guerra da Criméia). A

Inglaterra não conseguiu mais adquirir cânhamo russo e procurou então um substituto que encontrou na juta. As primeiras fiações de juta ergueram-se em solo europeu em Dundee, Escócia. Ainda hoje a fibra de juta ocupa, depois do algodão, o segundo lugar entre as fibras naturais em consumo. A zona principal de cultura da juta situa-se nas regiões baixas e inundadas do curso inferior do rio Ganges e Brahmaputra, Índia e Bangladesh, respectivamente. Áreas que também cultivam este tipo de fibra são: Brasil, Rússia, Nepal, Birmânia, Vietnam e Taiwan. A estrutura do caule é semelhante à do linho; fato interessante é que os caules compridos fornecem fibras elementares fortemente lignificadas de apenas 1,5 a 4 mm de comprimento. Esta particularidade reduz a resistência das fibras quando elas estão sob a ação de luz, calor e umidade. Seu plantio dura 1 ano e a semeadura é feita de março a abril e a colheita quatro meses mais tarde. Seu caule com diâmetro de 15 a 25 mm atinge uma altura de 3,5 m. Suas fibras são obtidas colocando os caules em água não corrente ou de fraca correnteza, ficando assim expostos à maceração em água fria. A separação das fibras é feita em estado de molhado, sem secagem prévia, nos tanques de maceração. Por fim, seu uso se dá em tecidos para embalagem, sacos de arroz, café, batata e açúcar, bem como em artigos de cordoaria, tecidos para revestimentos, cintas e também na indústria têxtil. Na Tabela 13, são mostradas algumas de suas características e propriedades. (ERHARDT e outros, 2006).

**Figura 26 – Cultivo de juta na Amazônia.**



Fonte: PIRES, 2009.

**Tabela 13 – Características e propriedades da fibra de juta.**

<b>Fibra de juta</b>	
Comprimento da fibra	Fibra técnica: 1,2 a 3,0 m, Fibra singela: 1,5 a 4,0 mm
Superfície da fibra	lisa
Cor	Cinza para marrom-avermelhado
Toque	Fibra média
Densidade	1,5 g/cm <sup>3</sup>
Higroscopicidade	Muito alta, até 35 % do peso seco

Fonte: Adaptado de ERHARDT e outros, 2006.

#### 2.1.4.2.2 Fibra de sisal

As fibras de sisal são extraídas das folhas da planta “*agave sisalana*” (FIG. 27). No comércio, encontram-se com o nome de sisal. Esta fibra alcançou uma importância econômica somente no começo do século XIX; sua origem e campo econômico se encontra no México, em especial na península de Iucatã e em 1892 se começou a plantar sisal na África. O sisal floresce em clima tropical e subtropical e a planta exige calor e umidade para crescer, suporta períodos de seca, mas não de aridez. Atualmente, as maiores plantações de sisal estão na Tanzânia, Quênia e Uganda, mas países como Brasil, Angola, México e Moçambique também já estão plantando o sisal. A planta é como o rami, resistente e pronta para a colheita após 5 a 6 anos. Suas folhas tem um comprimento aproximado de 1,0 a 1,5 metros. Uma folha pesa em media 1 kg e contem de 3,0% a 5,0% de fibras. A planta dura quase 25 anos, de acordo com o solo e neste tempo a planta fornece cerca de 200 folhas. Seu uso se dá em fios para atar as colheitas, cordéis, barbantes e tapetes que são resistentes, pois a fibra possui alta resistência ao desgaste. Na Tabela 14, são mostradas algumas de suas características e propriedades. (ERHARDT e outros, 2006).

**Figura 27 – Planta de sisal.**

Fonte: PIRES, 2009.

**Tabela 14 – Características e propriedades da fibra de sisal.**

<b>Fibra de sisal</b>	
Comprimento da fibra	Fibra técnica: 60,0 a 120,0 cm, Fibra singela: 2,5 a 3,0 mm
Superfície da fibra	-
Cor	Branca-creme até quase amarela, brilhante, quanto mais clara, mais valiosa
Toque	Fibra dura
Densidade	1,5 g/cm <sup>3</sup>
Higroscopicidade	Média, cerca de 14 % do peso seco

Fonte: Adaptado de ERHARDT e outros, 2006.

### 2.1.4.2.3 Fibra de rami

As fibras do rami são retiradas do caule da planta de rami (FIG. 28), que fazem parte da família das urticáceas. Existe mais de uma dúzia de tipos que fornecem fibras. O rami, juntamente com a seda, pertence às fibras mais conhecida da antiguidade. Antes de iniciar-se a cultura do algodão, o rami era a fibra têxtil mais importante na China. Na Ásia oriental ele tinha a mesma importância que o linho na Europa. As grandes áreas de cultura do rami situam-se principalmente na China e nos EUA (Califórnia e Flórida). Outros países de plantio são: Filipinas, Índia, Japão, Brasil e Argentina. A planta do rami é duradora e de uma raiz com vida de 5 a 30 anos, brotam 20 a 30 caules com 1,2 a 2,0 m de comprimento e depois do corte continuam a brotar e podem atingir seu comprimento total após 60 a 752 dias apenas; este crescimento rápido permite que se cortem os caules várias vezes ao ano.

O caule do rami é cortado com facas manuais e pode ser feito com máquinas avançadas. As fibras não podem ser obtidas pelo processo da maceração, pois a cola vegetal não pode ser destruída por bactérias de maceração; a camada de filação deve ser retirada dos caules logo depois do corte, enquanto ainda estão frescos e verdes. A resistência contra as bactérias de putrefação e formação de cogumelos é ótima, porque não há cola vegetal como substrato para elas; possui também boa resistência a umidade, calor e desgaste. O rami pode ser usado em todos os ramos da indústria, principalmente na têxtil, onde é utilizado na fabricação de roupas, chapéus, cintos, tecidos diversos, além de velas de navios entre outros. Na Tabela 15, são mostradas algumas de suas características e propriedades. (ERHARDT e outros, 2006).

**Figura 28 – Planta de rami.**



Fonte: RURAL NEWS, 2014

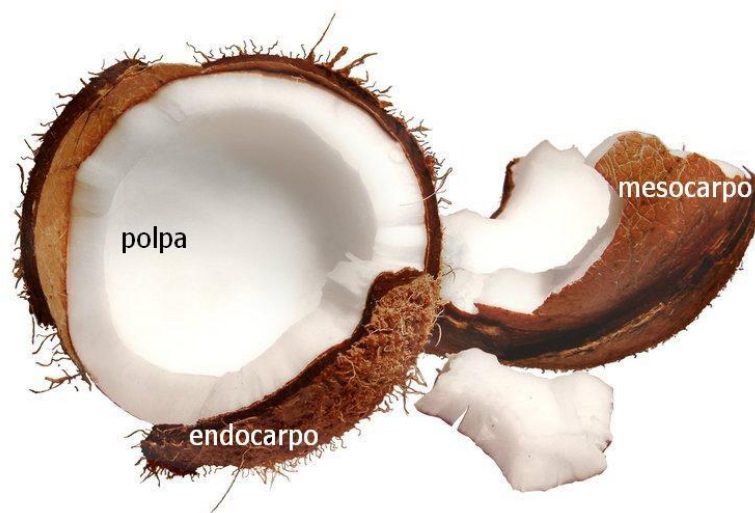
**Tabela 15 – Características e propriedades da fibra de rami.**

<b>Fibra de rami</b>	
Comprimento da fibra	Fibra singela: 60,0 a 150,0 mm
Superfície da fibra	lisa, sedosa
Cor	ligeiramente cinza-prateada
Toque	Insinuante, macio
Densidade	1,51 a 1,55 g/cm <sup>3</sup>
Higroscopicidade	Muito alta, até 31 % do peso seco

Fonte: Adaptado de ERHARDT e outros, 2006.

#### **2.1.4.2.4 Fibra de coco**

As fibras de coco provem do coqueiro comum “cocos nucifera”, é a única fibra de fruto (FIG. 29) deste estudo. Começou na Índia sua plantação, onde é chamado de “Árvore do bem estar” e desde 1840 o plantio é feito em grande escala. A fruta do coqueiro fornece inúmeros itens importantes mas o principal deles é a água de coco. A parte interna, rica em albumina e gordura é picada e ralada, depois vendida sob o nome de copra. O coqueiro existe em todos os países tropicais, em inúmeras variedades. Na Índia, Índonésia, cuida-se mais da extração das fibras, enquanto que nos outros países, como Brasil, Porto Rico, China e Filipinas, procura-se mais a obtenção da parte comestível do coco. O tronco atinge um diâmetro de 30 a 70 cm e uma altura de até 30 metros; o coqueiro cresce relativamente depressa e atinge uma idade de quase 100 anos. O coco leva sete meses para amadurecer e sua colheita é feita de 4 a 5 vezes ao ano. O fruto inteiro do coco está envolto em uma casca externa (endocarpo). Cerca de 13 a 15 cocos fornecem mais ou menos 1 kg de fibra. São fibras curtas e com uma elasticidade maior que outras fibras vegetais. Sua capacidade de resistir à umidade é também grande e possui uma resistência ao desgaste enorme. Sua fibra é usado na fabricação de colchões, tapetes, cordames para navios, escovas e vassouras. Na Tabela 16, são mostradas algumas de suas características e propriedades. (ERHARDT e outros, 2006).

**Figura 29 – Fruto do coqueiro.**

Fonte: COCO, 2011.

**Tabela 16 – Características e propriedades da fibra de coco.**

<b>Fibra de coco</b>	
Comprimento da fibra	Fibra singela: 15 a 33 cm
Superfície da fibra	Lisa, sedosa
Cor	ligeiramente cinza-prateada
Toque	Fibra dura, um pouco áspero
Densidade	-
Higroscopicidade	Média, até 13 % do peso seco

Fonte: Adaptado de ERHARDT e outros, 2006.

#### **2.1.4.2.5 Fibra de banana**

A fibra de banana, manilha ou abacá, obtém-se de um tronco aparente de um tipo de bananeira (FIG. 30), que não produz fruto. Começou a ser conhecida na Europa pela metade do século XIX, somente depois de existir em grandes quantidades e de possuir máquinas de processamento. As Filipinas apresentam a principal área de cultivo. O porto de Manilha, que deu nome a fibra, é o porto exportador mais importante. Outros países como Guatemala e Honduras também tem grandes plantações. A fibra é resistente como o rami. O tronco da

planta alcança até 6 metros de altura e até 50 cm de diâmetro. Após 3 anos é cortado pela primeira vez rente ao solo, Porém depois de 6 a 8 meses, outro tronco cresce e está pronto para ser cortado. Estes troncos depois de serem cortados são desmanchados e classificados de acordo com a posição no tronco, pois os rebentos da parte interna fornecem a fibra mais clara e mais valiosa. Sua extração é feita pelo mesmo processo usado no sisal. Seu uso se dá em fios grossos de cordame, redes, capachos, material de embalagem e cordas duradouras. Na Tabela 17, são mostradas algumas de suas características e propriedades. (ERHARDT e outros, 2006).

**Figura 30 – Planta da Bananeira.**



Fonte: BANANEIRA, 2014.

**Tabela 17 – Características e propriedades da fibra de banana.**

<b>Fibra de banana</b>	
Comprimento da fibra	Fibra técnica: 120 a 250 cm
Superfície da fibra	-
Cor	Marrom escuro
Toque	Fibra dura
Densidade	1,5 g/cm <sup>3</sup>
Higroscopicidade	Média, até 14 % do peso seco

Fonte: Adaptado de ERHARDT e outros, 2006.



### 2.1.5 Processos de fabricação de materiais compósitos poliméricos

Existe uma série de métodos de fabricação de materiais compósitos, ao mesmo tempo que, a pesquisa em busca de novos processos e variações continua de forma intensa.

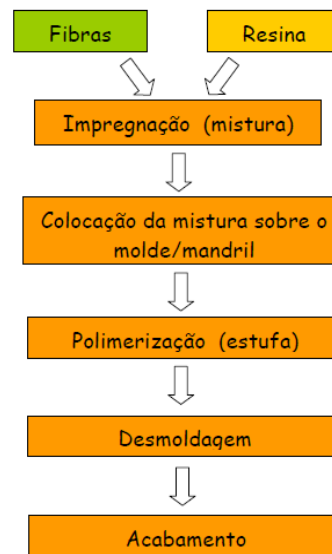
Cada um dos diversos métodos já estabelecidos são adequados sob determinados aspectos como. (MENDONÇA, 2005):

- **Custo do processo:** envolve o custo do equipamento, do treinamento, da mão de obra e da matéria-prima;
- **Escala de produção:** existem diferentes situações, alta produção em série, como na indústria automobilística, ou baixa escala, como na indústria aeronáutica e naval;
- **Dimensão física do componente:** peças grandes como cascos de barcos, carrocerias de ônibus, necessitam de processos de produção distintos;
- **Volume relativo de fibra:** certos métodos são mais adequados a produção de peças com baixa porcentagem de fibras, como nos processos manuais com mantas/tecidos, enquanto outros processos conseguirão naturalmente altas proporções, como o bobinamento, por exemplo;
- **Repetibilidade:** processos manuais tenderão a baixa repetibilidade e alta variação nas dimensões e qualidade geral dos itens produzidos, em oposição aos métodos automatizados.

Muitas peças ou estruturas em material compósito são geralmente produzidas por uma composição de lâminas sucessivas, chamadas de estruturas estratificadas. Os processos de fabricação são inúmeros e devem ser selecionadas segundo requisitos já descritos como: dimensões, forma, qualidade, produtividade (capacidade de produção).

As operações básicas para a obtenção da peça final (FIG. 31) têm a seguinte sequência. (PEREIRA, 2005).

**Figura 31 – Operações básicas para a obtenção da peça final têm a seguinte sequência.**



**Fonte: PEREIRA, 2005.**

Abaixo, serão listados os principais tipos de processos de fabricação de materiais compósitos poliméricos.

### **2.1.5.1 Processo de laminação manual**

Esta técnica é a mais antiga e se caracteriza pela simplicidade de procedimentos para a manufatura de compósitos, não envolvendo nenhum investimento em equipamentos e processo para a manufatura. Camadas de fibras de reforço em forma unidirecional, tecido, manta etc, são colocadas manualmente sobre a superfície de um molde. O processo se inicia pelo tratamento da superfície do molde pela aplicação de um produto desmoldante, para a remoção da peça após a cura. Após a colocação da manta de fibra, a resina é aplicada sobre a camada com um pincel ou uma espátula (FIG. 32). A espessura do componente moldado é obtida pelo número de camadas sobrepostas e a cura se processa à temperatura ambiente ou em estufa, dependendo do tipo de resina, mas esta técnica só é permitida para moldes abertos, ou seja, somente uma superfície da peça terá contato com o molde; esta superfície terá um acabamento superficial tão bom ou ruim quanto o acabamento da superfície do molde. (NETO; PARDINI, 2006), (MENDONÇA, 2005).

As principais vantagens desta técnica são: (MENDONÇA, 2005):

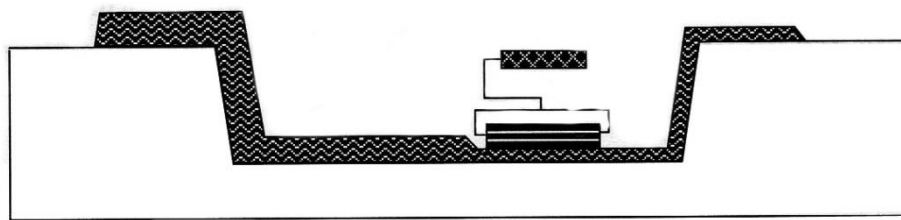
- é uma técnica perfeita em situações de baixo volume de produção;

- em relação a peças de grandes dimensões, esta técnica apresenta uma vantagem excepcional, pois permite a produção de peças muito grandes de forma contínua, sem emendas ou uniões, o que reduz o custo de fabricação e contribui para a melhoria da resistência da unidade;
- possui um baixo investimento inicial, pois praticamente não requer equipamento, exceto na construção do molde;
- necessita de baixa qualificação da mão de obra, porque todo o processo é quase que artesanal;
- facilidade de construção de painéis-sanduíche; esses painéis estão entre os componentes estruturais mais eficientes que existem.

Como desvantagens desta técnica, pode-se apontar. (MENDONÇA, 2005):

- requer muita mão de obra, sendo difícil de automatizar ou mecanizar a maioria de suas etapas;
- é uma técnica limitada a baixos volumes de produção;
- a qualidade da peça pode depender da habilidade do operador.

**Figura 32 – Processo de moldagem manual de compósito em molde aberto.**



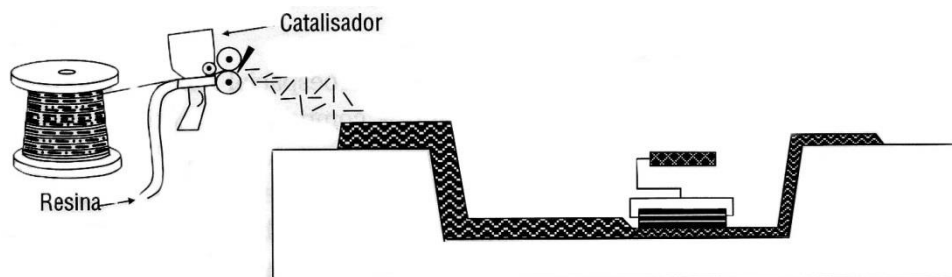
Fonte: NETO; PARDINI, 2006.

### 2.1.5.2 Processo de laminação manual por aspersão

Este processo é uma variação da técnica descrita no item anterior. A diferença básica reside na etapa de deposição das camadas de fibra e resina sobre o molde, utilizando-se uma forma automatizada da técnica manual. Nesta técnica, a fibra picotada e a resina são depositados simultaneamente sobre o molde por meio de um jato contínuo produzido por um compressor através de uma pistola (FIG. 33). De um lado, resina e acelerador são

precisamente misturados num recipiente, e em outro recipiente, resina e catalisador. Ambos os conteúdos são succionados pelo tubo pressurizado, formando um jato que passa pela pistola. Este processo é mais rápido que o manual e apresenta basicamente as mesmas vantagens e desvantagens. (MENDONÇA, 2005).

**Figura 33 – Processo de moldagem manual por aspersão de compósito em molde aberto.**

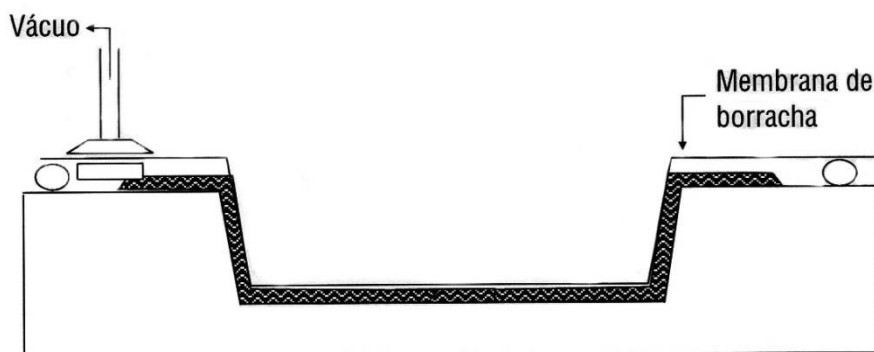


Fonte: NETO; PARDINI, 2006.

### 2.1.5.3 Processo por moldagem a vácuo

O processo de moldagem de compósitos a vácuo (FIG. 34) é um melhoramento dos processos de moldagem manual e moldagem por aspersão; nesse processo, a qualidade do componente melhora, devido a uma maior eficiência na retirada do excesso de resina que porventura seja adicionada durante o processo de moldagem manual e pela retirada de bolhas de ar do processo de moldagem por aspersão, que podem comprometer as propriedades mecânicas do compósito. Com este processo, pode-se obter compósitos com frações volumétricas de fibra de até 50,0% e frações volumétricas de vazios inferiores a 5,0%. (NETO; PARDINI, 2006).

**Figura 34 – Processo de moldagem a vácuo de compósito em molde aberto.**

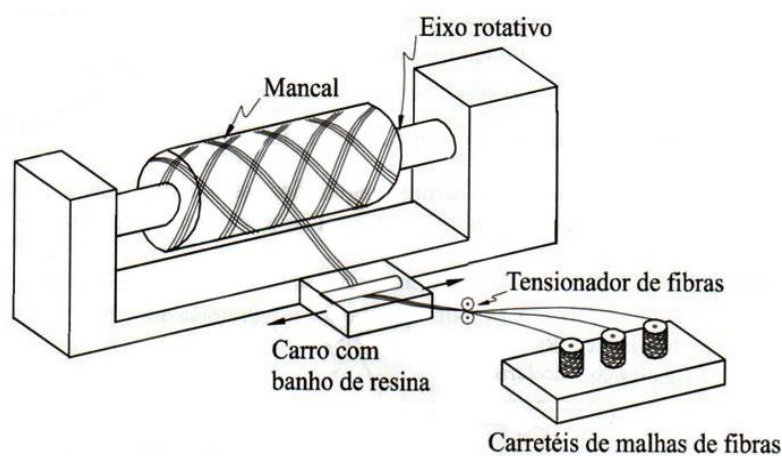


Fonte: NETO; PARDINI, 2006.

#### 2.1.5.4 Processo por bobinamento

O bobinamento é um processo usado para a produção de componentes de superfície de revolução como tubos, cilindros e esferas. É bastante usado na produção de vasos de pressão e grandes tanques para a indústria química. A máquina usada possui basicamente as mesmas características de um torno mecânico de usinagem (FIG. 35). Um mandril, que faz a vez de molde sobre o qual serão enroladas as fibras, é posicionado nos pontos rotativos da máquina. Fibras de diversos carretéis são bobinadas conforme o mandril gira e o posicionamento e o ângulo da fibra são definidos pelo controle das velocidades do mandril e do carro. As fibras são pré-impregnadas com resina e o volume relativo de fibras é controlado pelo seu tensionamento. Após o bobinamento, o mandril bobinado pode ser levado a um forno para a cura, ou o compósito pode ser curado fazendo circular líquido aquecido pelo interior do mandril. (MENDONÇA, 2005).

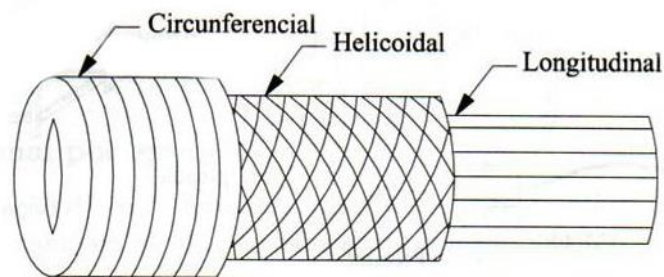
**Figura 35 – Esquemática do processo de bobinamento.**



Fonte: MENDONÇA, 2005.

Uma das principais vantagens deste método é o de produzir peças com alta porcentagem de fibras uniformemente distribuídas e de forma bastante rápida. Volumes de fibras altos de até 70,0% são facilmente obtidos. O nível de resistência do compósito obtido não depende apenas do volume de fibras, mas também da orientação das fibras (FIG. 36) em cada lâmina. (MENDONÇA, 2005).

**Figura 36 – Tipos de bobinamento.**



Fonte: MENDONÇA, 2005.

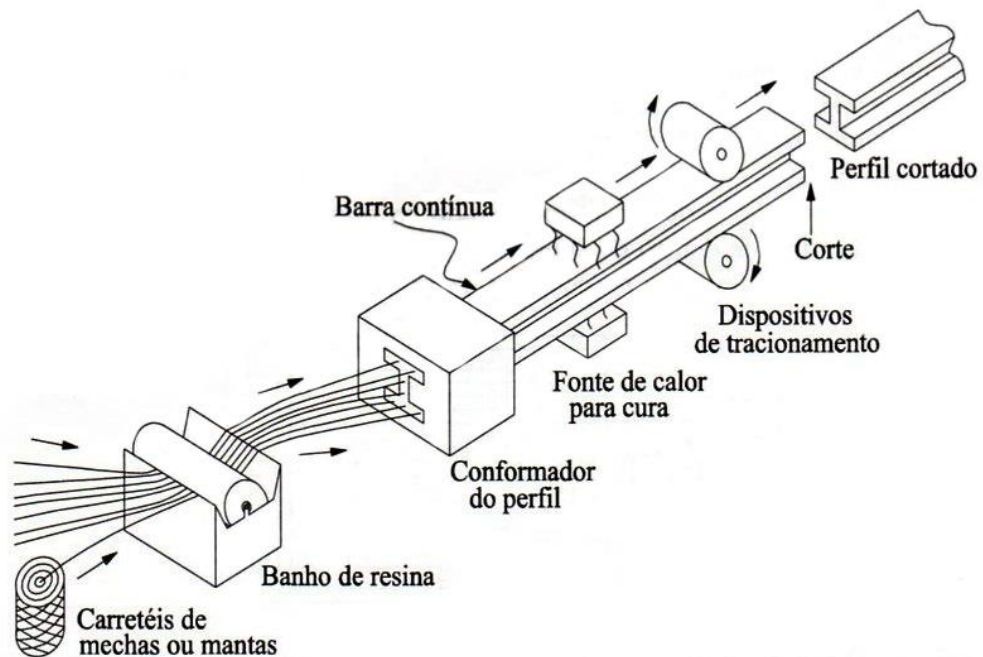
#### **2.1.5.5 Processo por trefilação de perfis estruturais (Pultrusão)**

O processo de trefilação (pultrusão) é uma técnica de processamento de compósitos introduzido no início da década de 1950, e caracteriza-se por ser um processo contínuo de alto grau de automação. A pultrusão pode utilizar reforços na forma de filamentos contínuos, fitas, mantas ou véus de baixa gramatura. (NETO; PARDINI, 2006).

Uma vantagem desse processo é o alto volume relativo de fibras que ele permite, de 60,0% a 65,0% do volume total do compósito; por outro lado, uma desvantagem é o fato de não permitir a obtenção de componentes os quais possam apresentar variação na seção transversal, ao longo do comprimento, ou seja, o componente tem que ser prismático na forma de barras maciças e tubulares, perfis L, I, U, T etc. (MENDONÇA, 2005).

A Figura 37 mostra um diagrama esquemático exemplificando o processo de pultrusão pela utilização de mechas de filamento contínuo. O reforço na forma de mechas de fibras contínuas é impregnado em uma cuba, onde a resina está previamente formulada e com viscosidade adequada para impregnação. O molde nada mais é que um bocal com uma geometria definida aquecido por uma fonte externa. (NETO; PARDINI, 2006).

**Figura 37 – Esquemática do processo de pultrusão.**

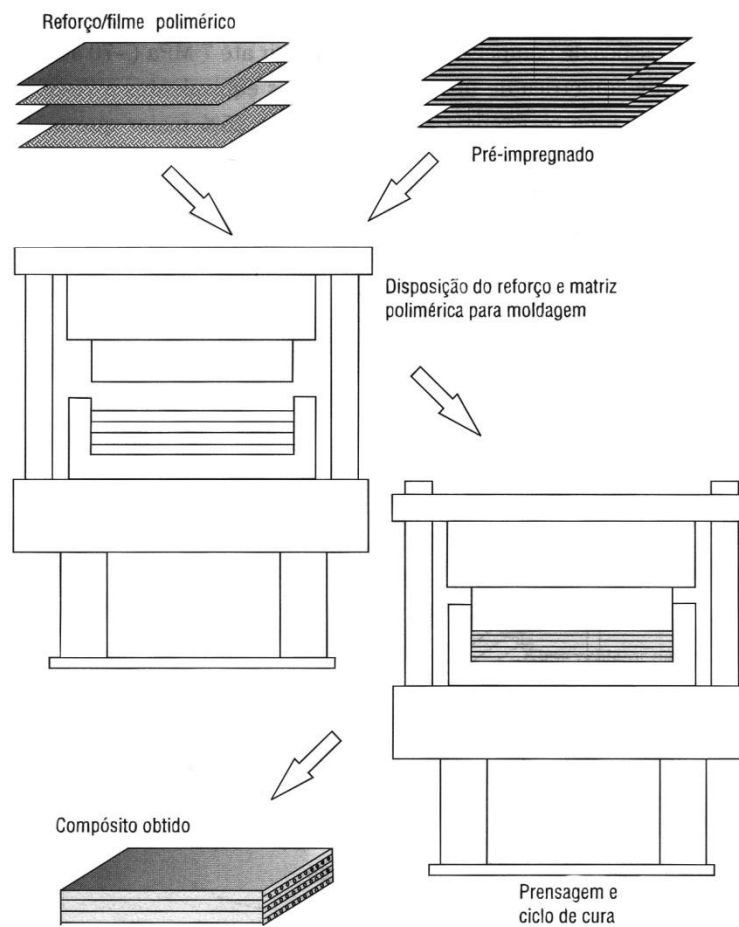


Fonte: MENDONÇA, 2005.

#### 2.1.5.6 Processo por moldagem por compressão a quente

A moldagem por compressão a quente de compósitos (FIG. 38) é um processo que teve sua origem derivada do processo de estampagem de chapas metálicas, esse processo pode ser utilizado tanto para processamento de compósitos formados com polímeros termoplásticos ou com polímeros termorrígidos. Estes compósitos podem ser obtidos pelo empilhamento de camadas intercaladas de reforço e polímero na forma de filmes. (NETO; PARDINI, 2006).

**Figura 38 – Diagrama das etapas envolvidas durante o processamento por compressão.**



Fonte: NETO; PARDINI, 2006.

### 2.1.5.7 Processo por moldagem por membrana autoclave

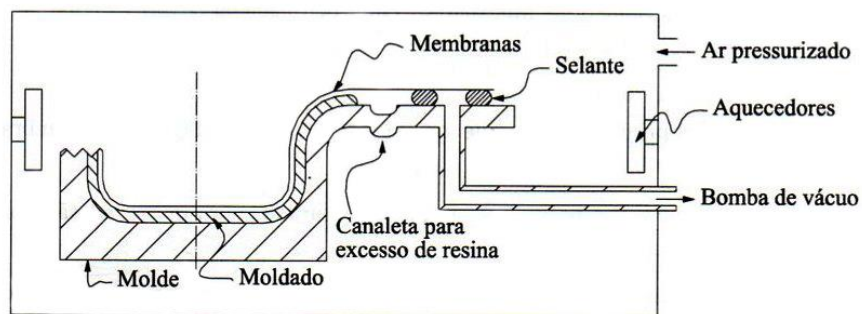
O processo de moldagem por membrana autoclave (FIG. 39) constitui um refino do processo manual no qual a superfície externa do compósito é recoberta por uma membrana e com o uso de vácuo ou pressão externa se consegue. (MENDONÇA, 2005):

- a melhoria da qualidade da superfície externa;
- a remoção do excesso de resina, isso representa um aumento na resistência do compósito, pelo aumento do volume relativo de fibras;
- a expulsão de bolhas de ar aprisionadas.



O processo autoclave é usado na fabricação com pré-impregnados, embora, possa ser usado com qualquer tipo de fibras nos processos molhados. Autoclave é simplesmente um vaso de pressão aquecido, no qual todo o conjunto, o molde, o moldado e as membranas, são colocados e submetidos a um ciclo especificado de temperatura e pressão para a cura. Autoclaves existem em uma larga faixa de tamanhos, desde modelos de bancada para laboratórios até unidades de 5 metros de diâmetro. (MENDONÇA, 2005).

**Figura 39 – Esquema dos principais itens no processo de moldagem em autoclave.**



Fonte: MENDONÇA, 2005.

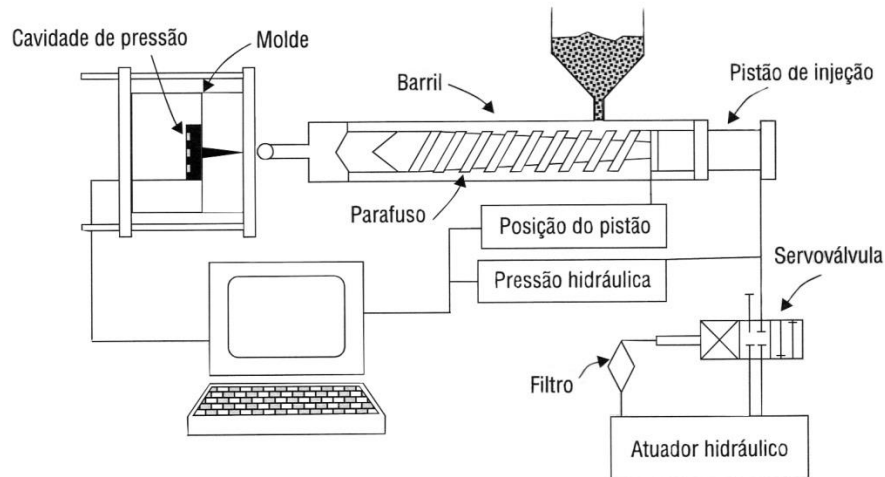
#### 2.1.5.8 Processo por injeção

A moldagem por injeção é um processo clássico de manufatura de componentes poliméricos o qual se caracteriza por etapas cíclicas. O polímero passa por uma etapa de transporte até o molde fechado onde é injetado e posteriormente solidificado tomando a forma interna do molde. Esse processo pode ser tanto utilizado para polímeros termoplásticos, quanto para termorrígidos. A incorporação de reforço ao polímero no processo de moldagem por injeção pode ocorrer de duas maneiras. (NETO; PARDINI, 2006):

- o reforço na forma de fibras curtas adicionado ao polímero, antes do processo de injeção;
- a pré-forma é previamente acondicionada no molde e o polímero é injetado posteriormente, após o fechamento do molde.

O sistema clássico de injeção é mostrado na Figura 40:

**Figura 40 – Diagrama esquemático de uma injetora para moldagem de termoplásticos reforçados.**



Fonte: MENDONÇA, 2005.

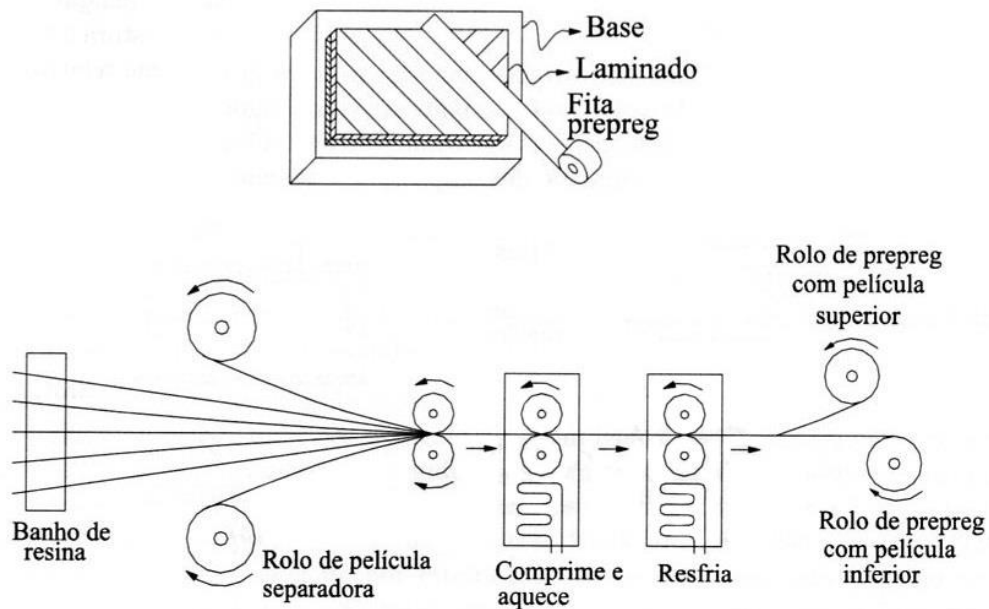
### 2.1.5.9 Processo com pré-formados

Em geral, os processos de produção de compósitos vistos anteriormente, especialmente os processos manuais, constituem os chamados processos úmidos ou molhados, isto é, a moldagem é feita trabalhando com a resina em sua forma líquida, para permitir sua impregnação no reforço. Porém existe toda uma outra classe de processos, chamados processos pré-formados (também denominados pré-mixes ou pré-impregnados). Esses pré-formados são disponíveis comercialmente para a fabricação de peças. Eles vem com as fibras impregnadas por resina já parcialmente curada. Isso permite métodos de produção de moldados de forma mais limpa, rápida e uniforme. Geralmente são classificados em: (MENDONÇA, 2005):

- preregs (FIG. 41), as fibras são tracionadas através de um banho de resina e são colocadas entre duas folhas de papel impregnado de silicone ou película de polietileno, essas folhas tem a função de evitar aderência e são removidas no momento de uso do prepeg;
- chapa pré-formada;
- blocos pré-formados (FIG. 42, são “tijolos” constituídos por uma mistura de resina, reforço, cargas e eventualmente pigmentos e outros aditivos, este reforço pode ser vidro, algodão ou qualquer outro material adequado. Como a mistura é

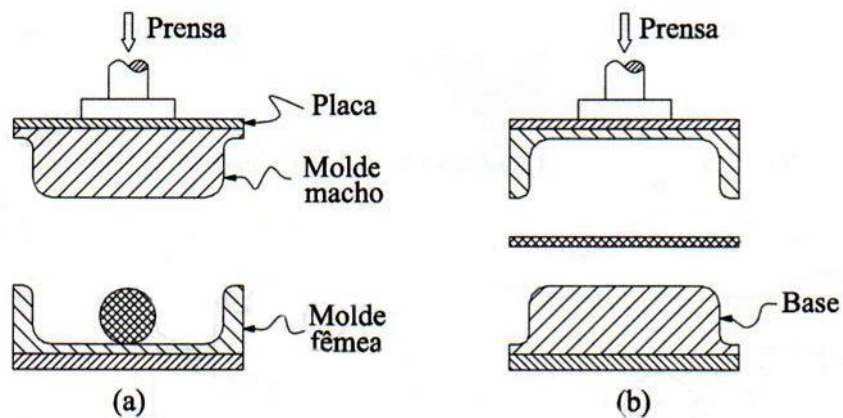
feita na forma líquida, em tanque, até atingir uniformidade de composição, o máximo volume relativo de fibras não passa de 20,0%.

**Figura 41 – Esquema do processo de manufatura de preregs.**



Fonte: MENDONÇA, 2005.

**Figura 42 – Moldagem por compressão usando bloco e chapa pré-formados, nas figuras (a) e (b) respectivamente, em moldes de encaixe.**



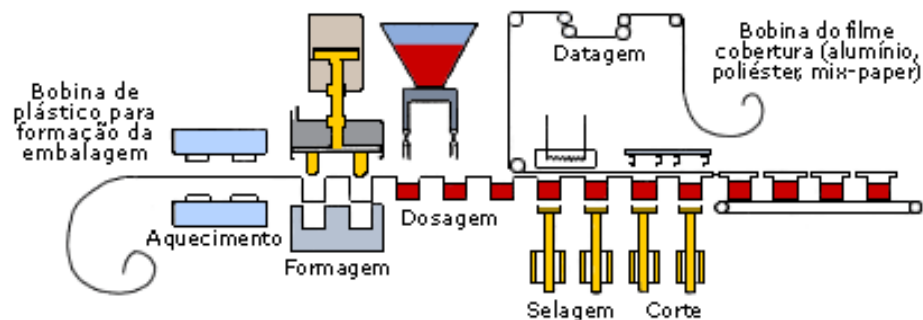
Fonte: MENDONÇA, 2005.

### 2.1.5.10 Processo por termoformagem

Na termoformagem (FIG. 43) uma lâmina seca é aquecida a uma temperatura pré-determinada na qual o material plástico amolece. A mesma é esticada para cobrir o contorno do molde e logo é refrigerada na temperatura na qual o termoplástico passa a ser rígido, retendo assim a forma do molde, sendo possível fabricar peças de grande área, inclusão de compósitos em fibras curtas ou até mesmo em tecidos. Hoje, é possível projetar produtos com boa complexidade, pode substituir muitos produtos que hoje são feitos em equipamentos caros e pesados que é necessário pelo método de injeção, quanto maior a área do produto a ser injetado, maior será o custo e a dificuldade. No caso da termoformagem isso é uma grande vantagem, pode ser utilizado para grandes produções devido à possibilidade de muitas cavidades moldando em um único ciclo. (LEÃO, 2009).

O mercado de termoformados é bastante amplo e responde por 5,9% de todo material termoplástico consumido no Brasil, o principal consumo e produção dos termoformados é o de produtos como copos e pratos descartáveis que chega a consumir 80 mil toneladas de polímeros ao ano e faturamento de 400 milhões de reais, utiliza 22,0% da demanda total de (Poliestireno) e 4,8% de PP (Polipropileno) no Brasil. Os termoformados já estão consolidados nos produtos de parede fina, mas ainda existe um grande mercado de novos produtos com paredes mais espessas e com novos materiais para termoformagem a ser explorado. (LEÃO, 2009).

**Figura 43 – Processo de termoformagem.**



Fonte: DINIEPER, 2014.

### 2.1.6 Adesão e interface reforço/matriz

O termo adesão é geralmente utilizado para se referir à atração entre substâncias, sendo portando uma manifestação de forças atrativas entre os átomos. A natureza da adesão, em compósitos, depende de alguns fatores. (NETO; PARDINI, 2006):

- superfície das fibras;
- orientação, arranjo atômico, cristalinidade e propriedades químicas;
- conformação molecular e constituição química da raiz;
- difusividade dos elementos de cada constituinte;
- arranjo geométrico das fibras.

A estrutura e as propriedades da interface matriz/fibra influenciam significativamente nas propriedades finais do material compósito. A boa adesão interfacial aumenta a transmissão de tensão da matriz para a fibra, aumentando o desempenho mecânico do compósito. Caso não haja esta interação, o material estará sujeito a falhas diversas, como por exemplo, propagação de trincas em maiores escalas. Este fato influencia diretamente na escolha dos materiais a serem empregados na composição do compósito, porque a combinação de quaisquer fases nem sempre resultará na boa interação da matriz/fibra. (AL-QURESHI, 1988).

#### 2.1.6.1 Teorias de adesão

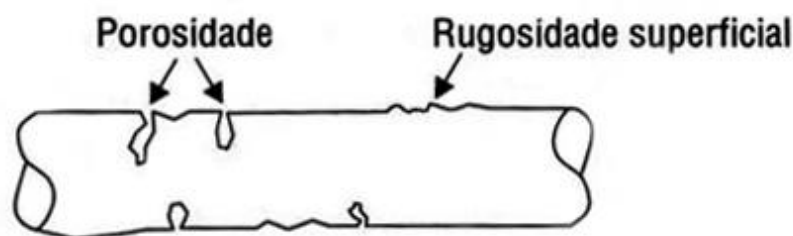
Existem modelos que tentam descrever o mecanismo de adesão considerando-se a microestrutura dos materiais envolvidos. Os mecanismos de adesão entre os constituintes de um compósito são basicamente os seguintes: (ASHBEE, 1993), (NETO; PARDINI, 2006):

- **Interdifusão:** Para que haja adesão, segundo esta teoria, os parâmetros de solubilidade dos dois componentes devem ser próximos. Isto ocorre porque se formam entrelaçamentos e ligações secundárias entre as moléculas interfaciais das duas superfícies adjacentes em completa molhabilidade, resultado da difusão de segmentos de cadeia ou cadeias terminais presentes nas duas superfícies. Dessa

maneira, a adesão em sistemas poliméricos vai depender da semelhança de polaridade, peso molecular, ramificações e temperatura;

- **Atração eletrostática:** Teoria aplicável a sistemas com componentes polares. O mecanismo de adesão na interface se dá inicialmente por forças de atração eletrostática. A difusão entre as fases ocorre com o tempo sob ação da temperatura;
- **Ligação química:** É a forma mais eficiente de adesão em compósitos. Ocorre geralmente com a aplicação de agentes de acoplamento na superfície da carga, que serve como ponte entre o polímero e a fibra. Estes materiais devem conter uma parte de sua estrutura que interage com a superfície da fibra e outra deve conter grupos orgânicos semelhantes às cadeias da matriz polimérica. A resistência mecânica da interface depende do número e tipo de ligações químicas presentes;
- **Adesão mecânica:** É o mecanismo de adesão mais comum. Não há ligações químicas entre o substrato e aderente. A junção ocorre através da penetração do adesivo em forma líquida nos poros, rugosidades e fissuras do substrato. Após a evaporação do solvente ou reação química, a resina solidifica, promovendo maior adesão naqueles pontos onde a ancoragem foi mais acentuada (FIG. 44);
- **Absorção e molhamento:** O molhamento eficiente da fibra pela matriz remove o ar e recobre toda a superfície da fibra com material polimérico. Este mecanismo dependerá das tensões superficiais dos componentes. Quando uma gota de um líquido é colocada sobre uma superfície sólida, dois fenômenos são observados: ou o líquido espalha-se inteiramente sobre a superfície, ou permanece na forma de gota possuindo um ângulo de contato definido entre a fase líquida e a fase sólida.

**Figura 44 – Representação esquemática da superfície de uma fibra de reforço.**

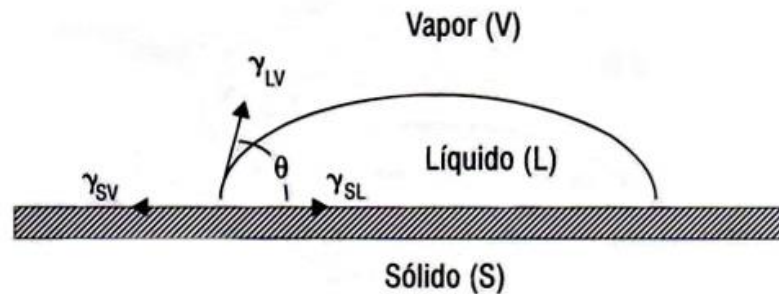


Fonte: NETO; PARDINI, 2006.

### 2.1.6.2 Ângulo de contato

Quando um líquido é sobreposto em uma superfície sólida, podem ocorrer dois fenômenos, o líquido se espalha na superfície ou tende a formar uma gota esférica. O ângulo formado entre o líquido e o sólido, considerando estas duas situações opostas, vai indicar o grau de interação entre os dois materiais, o líquido e a superfície sólida, e a magnitude desse ângulo vai depender do tipo de líquido e do tipo do sólido. Este equilíbrio de forças na interface líquido/sólido é balanceado conforme a Figura 45. (NETO; PARDINI, 2006).

**Figura 45 – Diagrama de forças envolvidas na medida do ângulo de contato.**



Fonte: NETO; PARDINI, 2006.

Onde:

- $\gamma_{LV}$  – tensão superficial líquido/vapor
- $\gamma_{SV}$  – tensão superficial sólido/vapor
- $\gamma_{SL}$  – tensão superficial sólido/líquido

Estas forças tendem a minimizar a área superficial do líquido pela formação de uma gota ou tendem a se espalhar, aumentando a extensão do contato interfacial. Este balanço de forças é caracterizado como a molhabilidade de um sólido por um líquido, expressa pelo ângulo de contato o qual se forma entre o líquido e o sólido. O critério para molhabilidade implica em que o ângulo de contato ( $\theta$ ) seja menor que  $90^\circ$ .

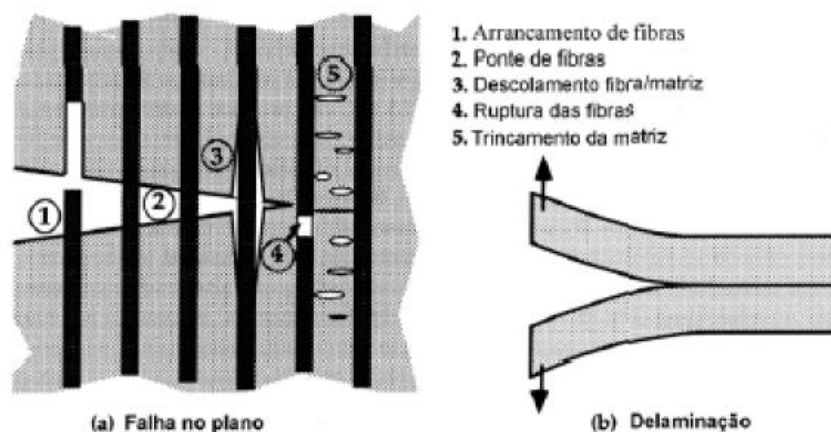
### 2.1.6.3 Mecanismos de falha

Um dos métodos de se caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais compósitos é a análise dos mecanismos de falha. Usualmente, a fratura não ocorre de forma catastrófica, tendendo a ser progressiva, com falhas subcríticas dispersas ao longo do material, constituindo-se assim numa vantagem. A caracterização das propriedades mecânicas de materiais compósitos não é uma tarefa simples. Os mecanismos de falha local que podem ocorrer durante a fratura de um compósito com fibras são: (PIRES, 2009):

- arrancamento das fibras;
- efeito denominado como ponte de fibras, em que as superfícies de uma trinca são interligadas por fibras;
- deslocamento interfacial matriz/fibras, seguido da ruptura das fibras;
- ruptura das fibras;
- trincamento da matriz.

Na Figura 46 são demonstrados os vários mecanismos de falha que podem ocorrer de modo catastrófico em compósitos reforçados com fibras contínuas e orientadas.

**Figura 46 – Mecanismos de falha em compósitos.**



Fonte: SILVA, AL-QURESHI, 1999.



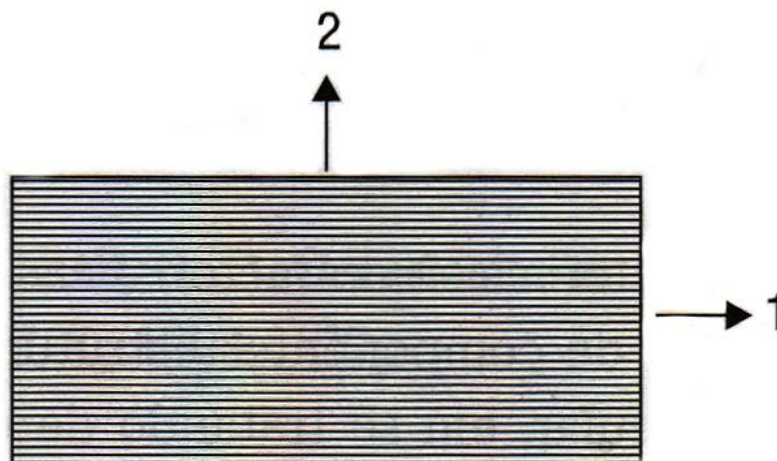
### 2.1.7 Micromecânica de uma lâmina

Um laminado típico é constituído por várias lâminas, variando suas orientações para melhor atender a requisitos de projetos ou de fabricação. As propriedades macroscópicas do laminado, como resistência e comportamento elástico, dependem das propriedades das lâminas que o compõem, além da ordem e orientação das fibras. (MENDONÇA, 2005).

#### 2.1.7.1 Definições gerais

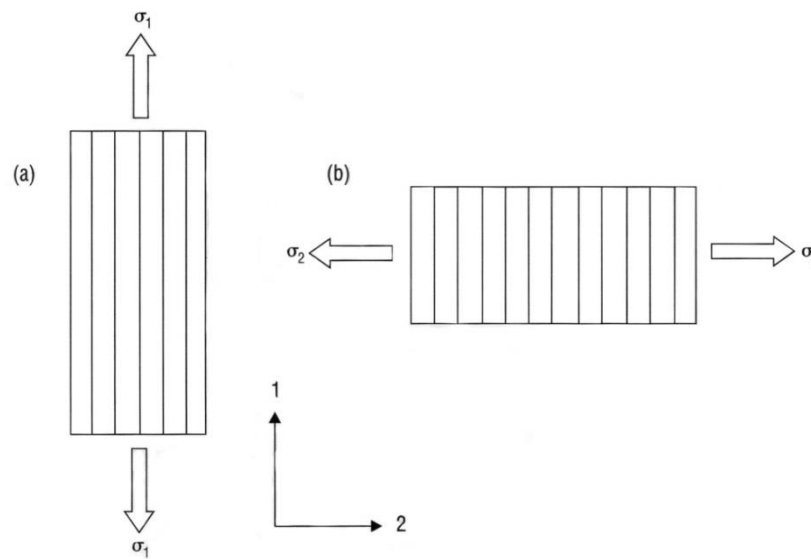
As propriedades elásticas dos materiais são características essenciais para a análise de tensões; através destas propriedades, é possível se relacionar as tensões mecânicas e as deformações que ocorrem no material. Um compósito por definição é constituído por uma matriz (M) reforçada por um ou mais tipos de fibras (F). Uma lâmina de compósito com reforço unidirecional (FIG. 47), define-se como direção 1 o eixo coordenado paralelo às fibras e como direção 2 o eixo coordenado perpendicular às fibras. Como normalmente as fibras são bem mais rígidas que a matriz, a lamina possui um módulo de elasticidade mais elevado ( $E_1$ ), na direção 1 e um segundo módulo de menor valor ( $E_2$ ) na direção 2. Quando se aplica um esforço mecânico na direção 1, as fibras e a matriz trabalham de forma análoga a um arranjo de molas em paralelo (FIG. 48a), assim a contribuição das fibras na rigidez da lâmina é a maior possível. Com o carregamento na direção 2, as fibras e a matriz atuarão como se fossem um arranjo de molas em série (FIG. 48b). (NETO; PARDINI, 2006).

**Figura 47 – Mecanismos de falha em compósitos.**



Fonte: NETO; PARDINI, 2006.

**Figura 48 – Mecanismos de falha em compósitos.**



Fonte: NETO; PARDINI, 2006.

### 2.1.7.2 Hipóteses simplificadoras

Em uma análise micromecânica de um compósito, algumas simplificações têm que ser feitas para se reduzir a complexidade das equações. Assim, a matriz é considerada. (NETO; PARDINI, 2006):

- homogênea;
- de comportamento mecânico linear e elástico;
- isotrópica (comporta-se sempre da mesma maneira, independente da direção da sollicitação).

Já as fibras, além de homogêneas, lineares elásticas e isotrópicas, são consideradas. (NETO; PARDINI, 2006):

- perfeitamente alinhadas;
- igualmente espaçadas entre si.

Assim, podemos utilizar a Lei de Hooke nas relações entre tensões e deformações, envolvendo fibras e matriz.

As lâminas do compósito, apesar de serem heterogêneas, do ponto de vista macroscópico, são assumidas como sendo homogêneas, para se obter relações entre tensões e deformações, e também são consideradas. (NETO; PARDINI, 2006):

- lineares e elásticas;
- ortotrópicas (apresentam propriedades distintas ao longo de 2 direções perpendiculares entre si);
- inicialmente livres de tensões residuais.

### 2.1.7.3 Frações de massa, volume e densidade

Nas equações da micro-mecânica, as propriedades elásticas são estimadas em função das frações volumétricas dos constituintes. Porém, o que se mede em laboratórios são os pesos ou as massas dos mesmos. Uma vez sendo conhecido estes pesos ou massas, pode-se facilmente obter os volumes do compósito, onde: (NETO; PARDINI, 2006):

- $M_c$  = massa total do compósito;
- $M_f$  = massa da fibra;
- $M_m$  = massa da matriz.

$$M_c = M_f + M_m \quad (01)$$

As frações de massa das fibras ( $M_f$ ) e da matriz ( $M_m$ ) são obtidas por:

$$M_f = \frac{m_f}{m_c} \quad (02)$$

$$M_m = \frac{m_m}{m_c} \quad (03)$$

O principal parâmetro indicativo da constituição de uma lâmina é a proporção relativa entre fibra e matriz. Em uma lâmina de compósitos, o volume ( $V$ ) do total do material ( $V_c$ ) divide-se e pode ser calculado da seguinte maneira. (NETO; PARDINI, 2006), (MENDONÇA, 2005):

- $V_f$  = volume de fibras;
- $V_m$  = volume da matriz;
- $V_v$  = volume de vazios;
- $V_c$  = volume total do compósito.

$$V_c = V_f + V_m + V_v \quad (04)$$

Onde o volume de vazios ( $V_v$ ) corresponde ao volume de bolhas de ar e de gases que emanam da resina durante a cura. Podendo ser escrito assim. (MENDONÇA, 2005):

$$V_v = \frac{V_v}{V_c} \quad \text{ou} \quad V_v = 1 - V_f - V_m \quad (05)$$

E o volume de fibras ( $V_f$ ) e o volume de matriz ( $V_m$ ) são calculados da seguinte maneira, onde:

- $\rho_f$  = densidade da fibra;
- $\rho_m$  = densidade da matriz;
- $\rho_c$  = densidade do compósito.

$$V_f = \frac{V_f}{V_c} \quad \text{ou} \quad V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} M_f \quad (06)$$

$$V_m = \frac{V_m}{V_c} \quad \text{ou} \quad V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} M_m \quad (07)$$

Combinando as equações (04), (05), (06), (07), obtem-se a seguintes relações:

$$V_f + V_m + V_v = 1 \quad (08)$$

Onde, o volume de vazios pode ser melhor calculado da seguinte maneira:

$$V_v = 1 - \frac{m_f/\rho_f + m_c - m_f/\rho_m}{m_c/\rho_c} \quad (09)$$

E a densidade do compósito pode ser calculada do modo abaixo:

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (10)$$

#### 2.1.7.4 Coeficientes de dilatação térmica e de umidade

Sabendo que uma mudança de temperatura em um corpo, pode causar variações proporcionais à variação de temperatura, considere um elemento de um corpo constituído por um material isotrópico (FIG. 49a), submetido a uma variação de temperatura  $\Delta T = T_2 - T_1$ . Considere então dois segmentos de comprimentos idênticos A e B, orientados em diferentes ângulos. Como o material é isotrópico, a variação de comprimento sofrida por estes segmentos deve ser idêntica  $\Delta l_A = \Delta l_B$ . Assim, as deformações também serão idênticas em A e B, então podemos gerar a seguinte equação. (MENDONÇA, 2005):

$$\varepsilon^T = \alpha \Delta T \quad (11)$$

Onde:

- $\alpha$  = coeficiente de dilatação térmica;
- $\varepsilon^T$  = deformação provocada apenas pela variação de temperatura.

Para o caso de materiais anisotrópicos (FIG. 49b), as deformações são diferentes em cada direção e as variações  $\Delta l_A$  e  $\Delta l_B$  são dadas por:

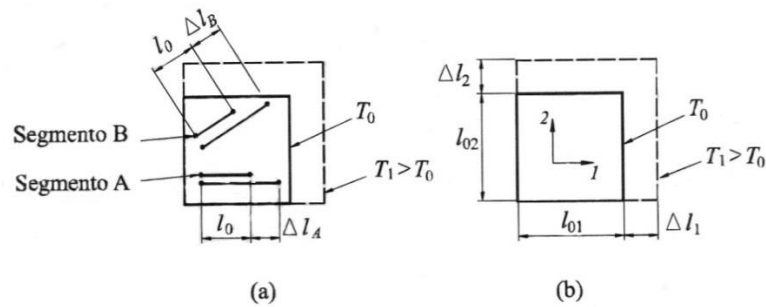
$$\varepsilon_1^T = \alpha_1 \Delta T \quad (12)$$

$$\varepsilon_2^T = \alpha_2 \Delta T \quad (13)$$

Onde:

- $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  = coeficientes de dilatação térmica nas direção 1 e 2;

**Figura 49 – Deformação térmica em: (a) um material isotrópico e (b) um material anisotrópico.**



Fonte: MENDONÇA, 2005.

Do mesmo modo a umidade absorvida pelo ar, que também provoca uma dilatação nas dimensões da lâmina do compósito, pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\varepsilon_1^U = \beta_1 \Delta U \quad (13)$$

$$\varepsilon_2^U = \beta_2 \Delta U \quad (14)$$

Onde:

- $\beta_1$  e  $\beta_2$  = coeficientes de dilatação por umidade nas direção 1 e 2;
- $U$  = concentração de umidade na lâmina do compósito;
- $\varepsilon_1^U$  e  $\varepsilon_2^U$  = deformações de origem higrométrica.

E  $U$  pode ser calculado conforme abaixo:

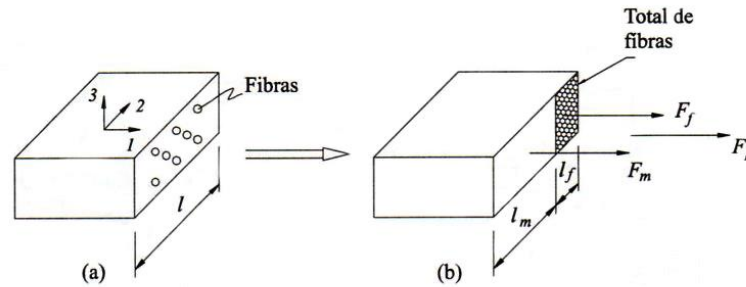
$$U = \frac{\text{massa do material úmido} - \text{massa do material seco}}{\text{massa do material seco}} \quad (15)$$

### 2.1.7.5 Módulo de resistência longitudinal à tração (Regra das misturas)

Os módulos de elasticidade e as frações volumétricas das fibras e da matriz são (FIG. 50):  $E_f$ ,  $V_f$ ,  $E_m$  e  $V_m$ . Sendo  $F_1$  a força que provoca a tensão longitudinal  $\sigma_1$ , dado que as

molas e a matriz atuarão de forma análoga a molas em paralelo, aplicando a equação de equilíbrio de forças na direção 1, temos. (NETO; PARDINI, 2006), (MENDONÇA, 2005):

**Figura 50 – Forças suportadas pelas fibras ( $F_f$ ), pela resina ( $F_m$ ) e pelo compósito ( $F_1$ ).**



Fonte: MENDONÇA, 2005.

$$F_1 = F_m + F_f \quad (16)$$

Como uma força normal em um corpo elástico é produto da tensão normal multiplicada pela área resistente, podemos reescrever a Equação 16 da seguinte forma:

$$\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (17)$$

Esta fórmula é a regra da mistura aplicada às tensões longitudinais, uma vez que não há deslizamento entre fibra e resina, as deformações da fibra, da matriz e do compósito são idênticas. (NETO; PARDINI, 2006). E de acordo com a Lei de Hooke,  $\sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_1$  e assim por diante, substituindo na Equação 17, temos: (MENDONÇA, 2005):

$$E_1 \varepsilon_1 = E_f \varepsilon_f V_f + E_m \varepsilon_m V_m \quad (18)$$

Como as deformações do compósito ( $\varepsilon_c$ ), das fibras ( $\varepsilon_f$ ), e da matriz ( $\varepsilon_m$ ) são idênticas, temos:

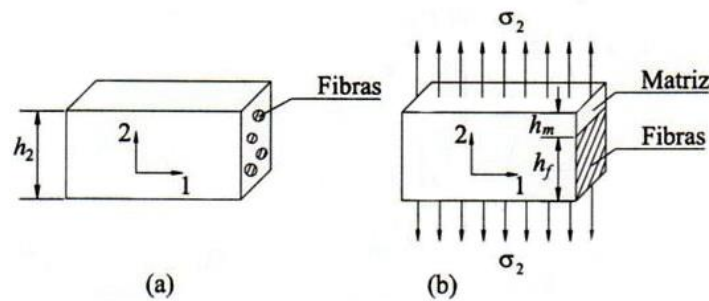
$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (19)$$

Esta equação é conhecida como Regra das Misturas e permite que se estime o módulo de elasticidade na direção longitudinal das fibras, de uma lâmina com reforço unidirecional.

### 2.1.7.6 Módulo de resistência transversal à tração (Regra das misturas)

O modelo descrito (FIG. 51) é o mais simplificado para mostrar um carregamento na direção transversal 2, perpendicular à fibra. Cada camada é perpendicular à direção da carga e oferece a mesma área para suportá-la. O alongamento total na direção 2,  $\delta_2$  será a soma dos alongamentos da camada de matriz e da fibra, ou seja. (MENDONÇA, 2005):

**Figura 51 – Modelo para predição de propriedades transversais dos materiais compósitos unidirecionais.**



Fonte: MENDONÇA, 2005.

$$\delta_2 = \delta_f + \delta_m \quad (20)$$

Se as espessuras do compósito, da fibra e da matriz são  $h_2$ ,  $h_f$  e  $h_m$ , e as deformações são  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_f$  e  $\varepsilon_m$  respectivamente, os alongamentos são  $\delta_2 = \varepsilon_2 h_2$  e por conseguinte, temos então. (MENDONÇA, 2005):

$$\varepsilon_2 h_2 = \varepsilon_f h_f + \varepsilon_m h_m \quad (21)$$

Se considerarmos que a fibra e a matriz, se comportem de forma linear, podemos fazer:

$$\frac{\sigma_2}{E_2} = \frac{\sigma_m}{E_m} V_m + \frac{\sigma_f}{E_f} V_f \quad (22)$$

Logo, uma vez que as tensões são idênticas, obtemos finalmente. (MENDONÇA, 2005):



$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \quad (23)$$

Esta equação também é conhecida como Regra das Misturas e permite que se estime o módulo de elasticidade, porém desta vez na direção perpendicular das fibras, de uma lâmina com reforço unidirecional.

#### 2.1.7.7 Módulo de elasticidade cisalhante

Uma outra propriedade elástica de uma lâmina de compósito é o módulo de cisalhamento  $G_{12}$ , o qual relaciona as tensões de cisalhamento,  $\tau_{12}$  no plano da lâmina (1,2), com as deformações angulares,  $\gamma_{12}$  neste mesmo plano. De acordo com. (NETO; PARDINI, 2006). A variação de  $G_{12}$  em função de  $V_f$  é não linear e dada pela equação:

$$\frac{1}{G_{12}} = \left( \frac{V_f}{G_f} \right) + \left( \frac{V_m}{G_m} \right) \quad (24)$$

Onde  $G_f$  e  $G_m$  são os módulos de cisalhamento das fibras e da matriz respectivamente, assim a equação acima pode ser descrita na forma:

$$G_{12} = \frac{(G_f G_m)}{(V_f G_m + V_m G_f)} \quad (25)$$

#### 2.1.7.8 Coeficiente de Poisson

Conforme (NETO; PARDINI, 2006), a variação do coeficiente de Poisson de uma lâmina  $\nu_{12}$ , com fração volumétrica de fibras  $V_f$ , é linear e ocorre na mesma forma análoga ao previsto na equação da regra da mistura (Equação 19), ou seja:

$$\nu_{12} = V_f \nu_f + V_m \nu_m \quad (26)$$

Na equação acima  $\nu_f$  e  $\nu_m$  são os coeficientes de Poisson das fibras e da matriz respectivamente. O coeficiente de Poisson menor  $\nu_{21}$  é normalmente obtido através de cálculo, utilizando a equação abaixo. (NETO; PARDINI, 2006), (MENDONÇA, 2005):

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{\nu_{21}} \quad (27)$$

## 2.2 Estado da Arte

Termoplásticos reforçados com fibras vegetais vêm sendo bastante estudados nas duas últimas décadas com algumas aplicações já bem estabelecidas, principalmente no setor automotivo. No entanto, suas aplicações são limitadas pelo seu desempenho mecânico e alta absorção de umidade, comparado aos compósitos de fibras sintéticas. (DA SILVA e outros, 2008).

A importância das fibras naturais como reforço para plásticos vem aumentando consideravelmente nas últimas décadas devido a fatores como o alto preço das fibras sintéticas e a busca crescente por materiais de baixo custo, provenientes de fontes renováveis de matérias-primas, que não causem danos ao meio ambiente e possam competir com os materiais tradicionais. As fibras naturais estão sendo bastante estudadas para substituir parcialmente e até totalmente as fibras sintéticas em muitas aplicações, especialmente aquelas cujas condições de uso são menos severas. (LEE, 1989) e (SILVA; BELTRÃO, 1999).

Quando incorporadas aos plásticos, as fibras naturais podem ser processadas por praticamente todos os métodos convencionais de processamento de plásticos (extrusão, injeção, calandragem, termoformagem e prensagem) e possuem menor densidade que as fibras inorgânicas tais como as fibras de vidro. Em termos nacionais, o Brasil é sem dúvida um dos países que possuem uma das maiores biomassas vegetal do mundo e a maior extensão territorial cultivável, cujo potencial deve ser melhor explorado. Além disso, o interesse crescente da sociedade pelo uso de materiais “ecologicamente corretos” faz com que as fibras vegetais retomem o espaço perdido para os materiais sintéticos em vários setores. (MEDINA, 1989).

A busca de novos materiais que atendam as tendências mundiais as quais objetivam a viabilidade econômica e ao mesmo tempo a preocupação com o meio ambiente leva à alternativa de se fazer uso dos recursos naturais renováveis. Devido a isto, vários pesquisadores têm demonstrado interesse na utilização de materiais poliméricos reforçados com fibras naturais. (MATHUR, 2006) e (KHALID e outros, 2008).

Para resolver o problema da reciclabilidade dos materiais, os designers da Universidade de Kioto no Japão utilizaram o bambu que é leve, forte e cresce rápido e criaram o BamGoo (Carro elétrico feito de bambu), usando uma técnica de tecelagem de bambu local,

o corpo do carro foi criado a partir de bambu sustentável, renovável e ecológico. Trata-se de um carro elétrico de um passageiro e que pesa apenas 59 kg e com apenas uma carga de bateria, tem uma autonomia de 48 km (FIG. 52), (FIG. 53) e (FIG. 54).

**Figura 52 – Bamgoo car, trançagem do bambu.**



Fonte: BAMBOOYA, 2014.

**Figura 53 – Bamgoo car, início da colocação do bambu trançado.**



Fonte: BAMBOOYA, 2014.

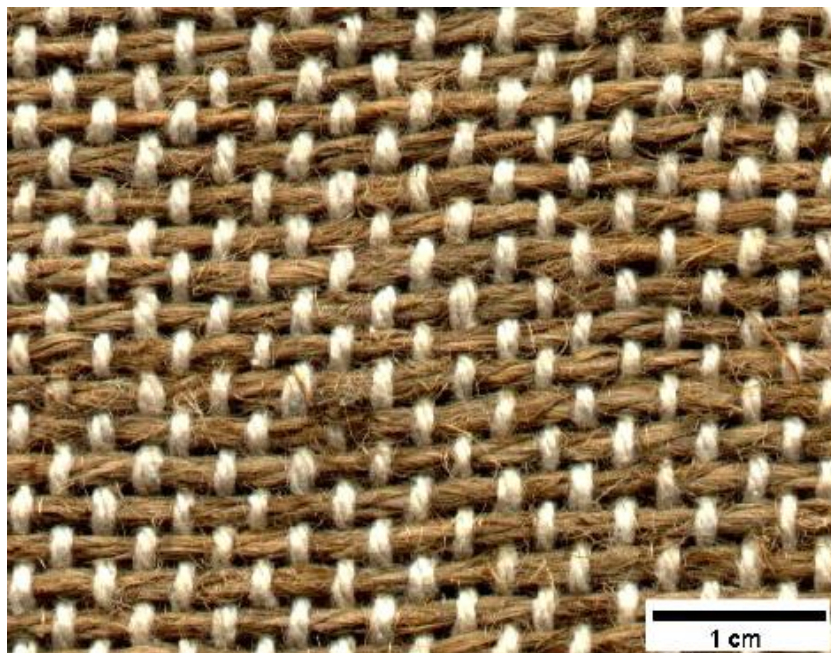
**Figura 54 – Bamgoo car, carroceria feita em bambu.**



**Fonte: BAMBOOYA, 2014.**

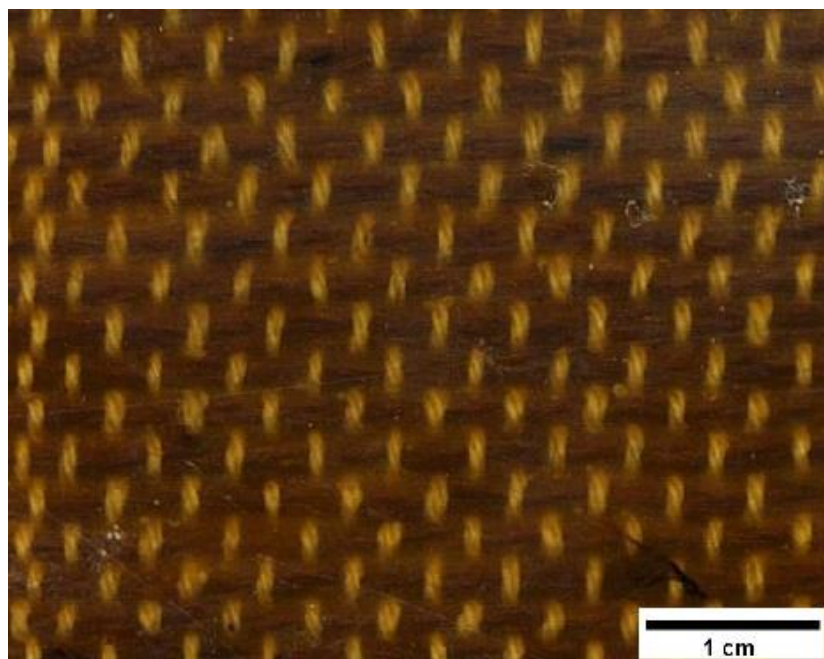
Medeiros (2002) estudou o uso de tecidos de fibras vegetais para melhoria das propriedades de materiais plásticos, onde fez um estudo de plásticos reforçados (compósitos) a base de resina fenólica reforçada por tecidos híbridos de juta e algodão utilizando a técnica de moldagem por compressão (FIG. 55) e (FIG. 56). O desempenho final do material produzido foi medido por técnicas que possibilitam a avaliação da resistência mecânica (tração, flexão, impacto) e suas propriedades foram bastante dependentes da direção de teste, ou seja, da orientação das fibras e das características dos tecidos utilizados. Foi possível produzir compósitos com propriedades mecânicas mais homogêneas através da fabricação de compósitos com camadas alternadas em forma de sanduíche. O compósito produzido com apenas uma camada apresentou uma queda de 75,0% na resistência mecânica, medida a 90° (direção das fibras de algodão) em relação à direção de orientação das fibras de juta, enquanto que o compósito com três camadas alternadas, com orientação de 90° entre si, apresentou uma queda de apenas 32,0% na resistência a tração, reduzindo significativamente a heterogeneidade (anisotropia) das propriedades.

**Figura 55 – Tecido híbrido de juta e algodão.**



Fonte: MEDEIROS, 2002.

**Figura 56 – Compósito em tecido híbrido de juta e algodão e resina fenólica.**

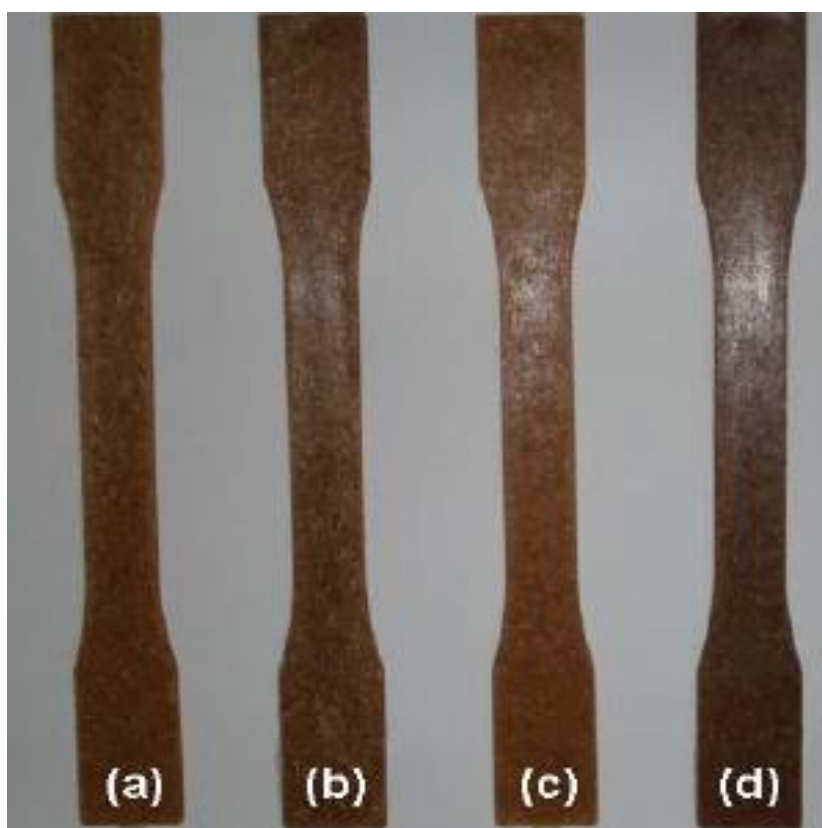


Fonte: MEDEIROS, 2002.

Pigatto (2009) estudou o uso de polipropileno e blendas de PP e EPDM reforçadas com fibras curtas de sisal, onde teve como objetivo produzir termoplásticos elastoméricos de blendas reforçados com fibras de sisal, tratadas ou não com solução de hidróxido de sódio (NaOH), e avaliar as características físicas, mecânicas, termomecânicas e morfológicas destes materiais tricomponente (FIG. 57). Os resultados indicaram que o índice de fluidez diminui

em maiores teores de fibras, pois as fibras dificultam o escoamento aumentando a viscosidade. A inclusão da fibra provocou em geral um aumento no módulo de elasticidade e na resistência, especialmente em flexão, atuando como um agente de reforço. O aumento do teor de fibra provocou o aumento da absorção de água com valores mais significativos em maiores tempos de imersão.

**Figura 57 – Corpos de prova de tração: (a) PP com 15,0% de sisal lavado com água; (b) PP com 30,0% de fibras de sisal lavadas com água; (c) PP com 15,0% de fibras de sisal tratadas com NaOH; (d) PP com 15,0% de fibras de sisal tratadas com NaOH.**

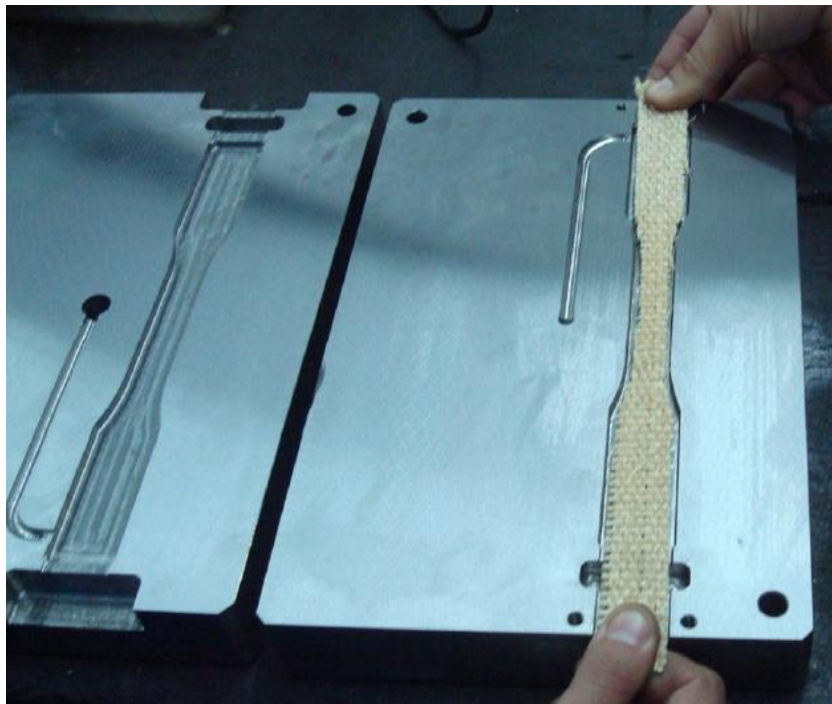


Fonte: PIGATTO, 2009.

Moraes (2012) estudou a caracterização mecânica de compósitos injetados em molde com resinas de fontes renováveis reforçadas por fibras naturais de sisal, onde foi realizada primeiramente a injeção da resina em corpos de prova feitos de tecido de sisal (FIG. 58), porém os resultados não foram satisfatórios e constatou-se que a ideia original para reter as telas alinhadas dentro do molde não alcançara o êxito esperado, devido a diferentes falhas no processo de injeção (FIG. 59). Optou-se então por realizar a fragmentação manual das fibras de sisal e homogeneizá-las às resinas em proporções definidas (FIG. 60), as fibras foram picadas e classificadas no comprimento máximo de 10 mm, tentou-se então promover a

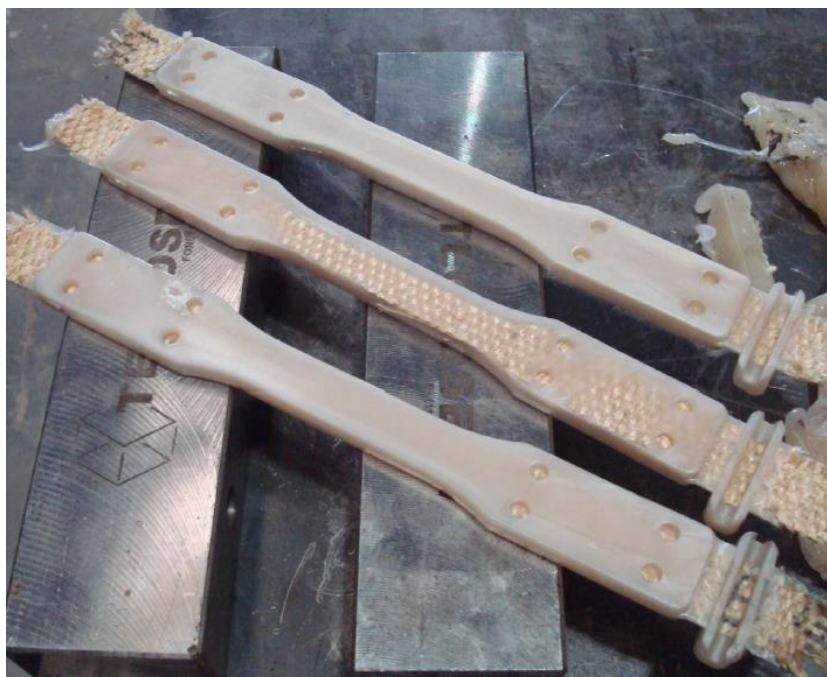
homogeneização das fibras com a resina na proporção de 30,0% de fibras para 70,0% de resina. Onde foram gerados corpos de prova isotrópicos e os resultados demonstraram possibilidades de aplicação destes compósitos em diversos segmentos industriais, dedicadas ou afins a materiais compósitos. Porém o maior problema encontrado por Moraes foi na obtenção destas resinas com características ou aplicações especiais, tais como as de fontes renováveis. Constatou-se que resinas diferenciadas não estão de fato disponíveis para pronta entrega junto aos distribuidores ou ainda encontram-se em fase de desenvolvimento, apesar de constarem em sites como produtos disponíveis. Restou ainda a dificuldade de se obter a pequena quantia necessária para o trabalho, estando disponíveis, em tese, com compras superiores a 1370 kg.

**Figura 58 – Corpos de prova em tecido de sisal no molde.**



Fonte: MORAES, 2012.

**Figura 59 – Corpos de prova com diferentes falhas verificadas no processo de injeção.**



Fonte: MORAES, 2012.

**Figura 60 – Corpos de prova com 30,0% de sisal e 70,0% de resina renovável.**



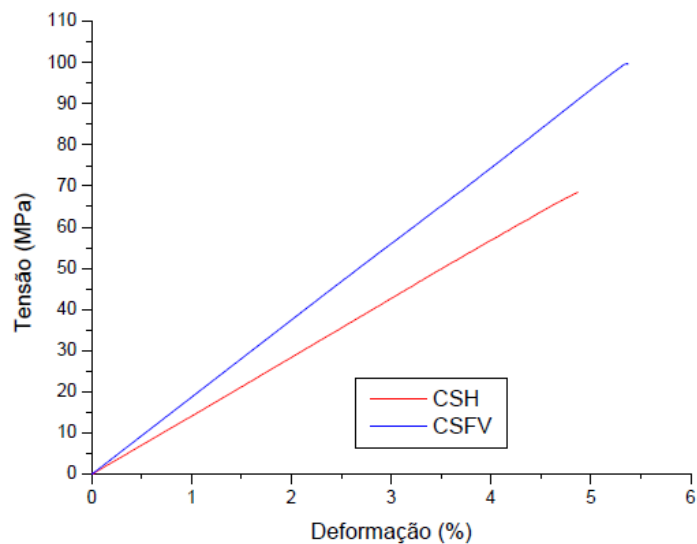
Fonte: MORAES, 2012.

Freire, Silva e Aquino (2013) estudaram a influência da presença de fibras naturais em compósitos híbridos, tipo sanduíche. E fizeram um estudo do desenvolvimento de compósitos laminares híbridos do tipo sanduíche. Os mesmos são constituídos de resina poliéster ortoftálica, sendo que, um dos compósitos tem como reforço camadas de fibras de vidro,



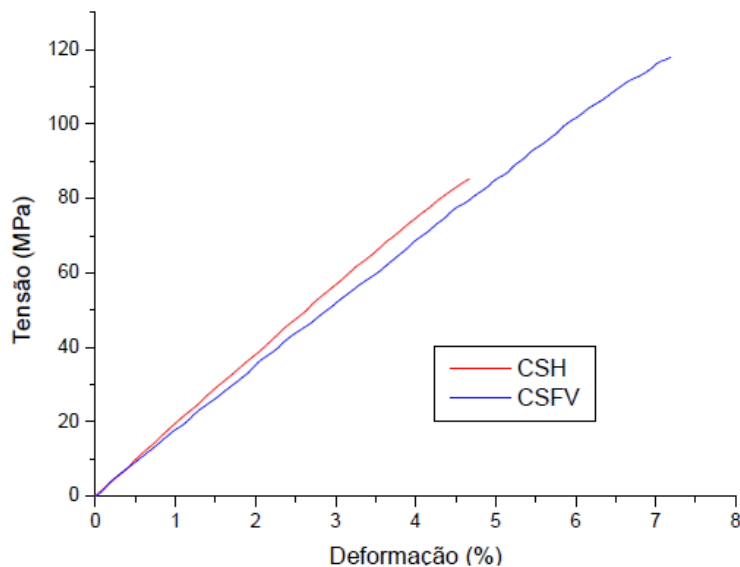
compósitos sanduíches de fibra de vidro (CSFV) nas formas de manta e tecido bidirecional. O outro compósito apresenta uma hibridização caracterizada pelo uso de reforços de fibras de juta e fibras de vidro, compósito sanduíche híbrido (CSH) nas formas de tecidos. Ambos possuem camadas de recheio constituídas de um tecido de polietileno. As propriedades mecânicas foram estudadas, inicialmente, para os ensaios de tração e compressão uniaxiais nos dois materiais. Estudos comparativos foram realizados nos CSFV e CSH com o objetivo de se conhecer tanto a influência do tipo de carga aplicada em cada laminado, bem como da presença de fibras naturais. Onde os resultados obtidos para os ensaios de compressão e de tração (GRAF. 06 e GRAF. 07) uniaxiais demonstraram que as configurações CSFV e CSH possuem um comportamento linear até a fratura final, possibilitando a utilização da Lei de Hooke em qualquer formulação teórica envolvendo os dois materiais. As duas configurações mostraram superioridade na resistência mecânica à compressão quando comparada à tração. O compósito híbrido mostrou, também, superioridade na rigidez sobre cargas compressivas. A utilização do CSH em aplicações estruturais torna-se viável em elementos onde a rigidez compressiva é fundamental.

**Gráfico 06 – Comparativo do CSFV x CSH ensaiados à tração.**



**Fonte: FREIRE, SILVA E AQUINO (2013).**

**Gráfico 07 – Comparativo do CSFV x CSH ensaiados à compressão.**



Fonte: FREIRE, SILVA E AQUINO (2013).

Diversos outros artigos podem ser encontrados sobre pesquisas de fibras naturais em compósitos:

Ahmed e outros (2013) estudaram o comportamento estático e de fadiga à tração de fibras de sisal, onde compararam o diâmetro, o módulo de elasticidade, a força e tensão em mais de 15 amostras diferentes. Compararam estes valores aos dados em literatura aberta. Os resultados para tração de carga a fadiga cíclica em oito níveis de carga (de 0,6 a 0,95) foram satisfatórios em relação à literatura, já as forças máximas envolvidos (entre 9 N e 22 N) foram consideravelmente mais elevadas do que os usados anteriormente na literatura aberta. Os resultados obtidos podem ser usados para prever a partir de um ponto de fadiga e integridade estrutural, o comportamento de compósitos reforçados com base em sisal, para capacidade de suporte de carga alta e estender a concepção desta classe de materiais naturais reforçados.

Sabeel e Vijayarangan (2008) estudaram a tração, a flexão e o cisalhamento interlaminar das propriedades de juta em tecido e tecido de juta com vidro reforçado em compósitos de poliéster, onde laminados foram fabricados à mão, em um molde e curada sob uma ligeira pressão durante 1 hora, seguido por cura à temperatura ambiente durante 48 h. Os laminados foram feitos com um total de 10 camadas, por variação do número e posição das camadas de vidro, de modo a obter seis sequências diferentes de empilhamento. A fração de peso total de fibra foi mantida a 42,0%. A preparação e os ensaios nas amostras foram realizados de acordo com as normas ASTM. Os resultados indicaram que as propriedades de

dos compósitos podem ser consideravelmente melhoradas pela incorporação de fibra de vidro. A sequência de camadas teve um efeito maior sobre as propriedades de flexão e de cisalhamento interlaminar. Uma comparação global entre as propriedades de todos os laminados revelou que o laminado híbrido, com duas camadas de vidro em ambos os lados extremos é o ideal para uma combinação com um bom equilíbrio entre as propriedades e custo.

Mubarak, Johannes e Hans-Peter (2009) estudaram os compósitos híbridos de juta e fibras de celulose feitas com polipropileno em moldagem por injeção. Onde uma série de compósitos híbridos foram feitos com juta, por um processo de pultrusão e injeção, com 25,0% de fibras naturais de juta. Propriedades mecânicas como resistência à tração, flexão, resistência ao impacto Charpy e calor a temperatura de distorção foram determinados. Alta resistência ( $> 70$  MPa) e excelente impacto propriedades ( $> 80$  kJ/m<sup>2</sup>) foram alcançados com reforço puro de Cordenka. A substituição parcial de juta no lugar de Cordenka aumentou propriedades de rigidez do material compósito, bem como um aumento de distorção ao calor. Por outro lado, a força de impacto decresce com o aumento fração de juta para 22 kJ/m<sup>2</sup> para juta pura. Um equilíbrio das propriedades foi conseguido por um compósito com 25,0% de juta e 75,0% de cordenka, mantendo a força de impacto de 79 kJ/m<sup>2</sup>.

Boopalan, Niranjanaa e Umapathy (2013) fizeram um estudo sobre as propriedades mecânicas e propriedades térmicas de juta e fibra de bananeira em compósitos híbridos epóxi. O objetivo do estudo foi investigar e comparar as propriedades mecânicas e térmicas da matéria juta e fibra de bananeira em compósitos híbridos de epóxi. Para melhorar as propriedades mecânicas, fibras de juta foram juntadas com fibras de banana. As fibras de juta e banana foram preparadas com vários pesos e proporções (100/0, 75/25, 50/50, 25/75 e 0/100) e, em seguida, incorporado na matriz de epóxi por moldagem para formar os compósitos. A tração, flexão, impacto, ensaios de absorção térmica e de água foram realizadas utilizando amostras compostas híbridas. O resultado mostrou que a adição de fibra de banana em juta/epóxi em compósitos de até 50,0% por peso resulta em aumento das propriedades mecânicas e térmicas e diminui a absorção de umidade.

Das e Banerjee (2013) estudaram a interface e compatibilidade de juta com asfalto. Amostras de asfalto puro, como também de fibra de asfalto, fios e tecidos de asfalto-asfalto em compósitos foram preparadas e submetidas a testes de tração. A natureza da interface foi estudada para ser compreendida através de mudanças nas propriedades de tração de compósitos de fibra de asfalto, enquanto o papel desempenhado pelo material de reforço foi revelado pelo comportamento à tração de fios de asfalto e compósitos tecido de asfalto. Como

resultado, observa-se que a amplitude e uniformidade de encaixe como também o grau de penetração do substrato pelo material de asfalto são instrumentais para determinar as propriedades de tração do compósito. Com base nos resultados, a possibilidade de empregar o asfalto em conjuntamente com tecido de juta na construção de estradas parece ser um proposição viável.

Borri, Corradi e Speranzini (2013) fizeram um estudo sobre o reforço de madeira com fibras naturais e descreveram um programa experimental que examina o reforço na flexão de vigas de madeira com materiais compósitos à base de fibras naturais, sob a forma de tecidos feitos a partir de cânhamo, linho, basalto e fibras de bambu. A técnica permite o reforço das vigas, evitando o desmantelamento da parte que cobre a estrutura. O programa de testes consistiu em três fases incorporando 45 vigas. Com os testes de flexão foi possível medir o aumento da capacidade e da rigidez resultante. Isto foi aplicado a feixes, criando arranjos diferentes e utilizando diferentes quantidades (número de camadas). Apesar da diversidade dos vários testes realizados, os resultados obtidos em alguns casos apresentaram aumentos significativos em termos de capacidade de transporte de carga e de deflexão.

Santulli e outros (2013) estudaram o comportamento mecânico da juta e lã em feltros laminados híbridos e visavam a caracterização de uma nova fibra de compósitos reforçados com base em resina epóxi. Foram desenvolvidos compósitos à base de lã e híbrido (lã/juta) com duas sequências diferentes de empilhamento (intercalados e sanduíche). Sua microestrutura foi investigada por meio de microscopia óptica e eletrônica de varredura, e seu comportamento mecânico quasi-estático foi avaliado em tensão e flexão. Além disso, o comportamento impacto sob impacto de baixa velocidade em três energias de impacto diferentes, ou seja, 6 J, 8 J e 9 J foram abordadas. Os ensaios de tração e flexão foram monitorados através de emissão acústica, para se obter mais informações sobre mecanismos de falha. A monitorização mostrou que o desenvolvimento do dano foi devido à nucleação de microfissuras em matriz e descolamento. Os resultados confirmaram o papel positivo da hibridização com fibras de juta em melhorar tanto a resistência à tração e à flexão comportamento de compósitos à base de lã, embora realçando a necessidade de uma melhor adesão entre as fibras de lã e de matriz de epóxi.

Ramesh, Palanikumar e Reddy (2013) fizeram uma avaliação da propriedade mecânica de fibra de sisal-juta-vidro reforçando compósitos de poliéster, onde avaliaram as propriedades mecânicas, tais como resistência à tração, resistência à flexão e a resistência ao impacto. As propriedades superficiais, rachaduras internas e estrutura interna das superfícies fraturadas foram avaliadas usando Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Os

resultados indicaram que a incorporação de fibras de sisal e juta com fibra de vidro pode melhorar as propriedades.

Hachemane e outros (2013) estudaram o comportamento dos compósitos-sanduíches de impacto de juta/cortiça com resina epóxi, onde avaliaram a influência da densidade de energia de impacto e cortiça sobre os comportamentos de uma placa sanduíche instrumentada em testes estáticos e dinâmicos. Os resultados mostraram que a força máxima e o tamanho dos danos são influenciados pela densidade da cortiça e da energia de impacto. O material de sanduíche, com a construção de cortiça aglomerada tem uma densidade de  $310 \text{ kg/m}^3$  e é caracterizada por uma dissipação de energia com capacidade mais fraca, em cerca de 3,7% para o teste de impacto, do que o sanduíche com cortiça mais leve ( $160 \text{ kg/m}^3$ ). Esta diferença é uma consequência do processo de infusão. A resina infiltrada nos poros de cortiça aglomerada muda a rigidez local do material.

Milanese, Cioffi e Jacobus (2011) estudaram o comportamento mecânico de compósitos de fibra natural e verificaram que existe um grande interesse na aplicação de fibras de sisal, como substitutos para fibras de vidro, motivados por vantagens potenciais de economia de peso, menor preço de matérias-primas e vantagens ecológicas do uso de recursos verdes que são renováveis e biodegradáveis. Fibras de sisal em tecidos foram usadas sem tratamento térmico e tratadas a  $60^\circ\text{C}$  em 72h e os compósitos foram processados por moldagem por compressão. Fizeram ensaios de tração em quatro tipos de compósitos: sisal seco/poliuretano, sisal úmido/poliuretano, sisal seco/resina fenólica e sisal úmido/resina fenólica. As influências do teor de umidade das fibras de sisal foram analisados e os resultados experimentais mostraram uma resistência à tração mais elevada para os compósitos de sisal/fenólicos, seguido por sisal/poliuretano, respectivamente.

Demarchi (2010) estudou a aplicabilidade de placas de fibra de bananeira, sua caracterização, produção e absorção sonora, desenvolvendo uma placa de revestimento visando à absorção acústica a partir da fibra do pseudocaule da bananeira. Após a colheita da banana, o ciclo da bananeira finda e novos rebentos surgem a partir do rizoma, o qual permanece no solo. O pseudocaule, uma vez extraído, caso não tenha uma destinação, serve de hospedeiro para o bicudo, que pode depositar os ovos no rizoma e contaminar a nova planta. Foram então produzidas placas utilizando as fibras em diferentes concentrações e o estudo permitiu concluir que as placas apresentaram excelente desempenho para absorção acústica, após ensaio feito no tubo de impedância. O desempenho apresentado pelos protótipos foi melhor do que o desempenho de outras placas, como lã de vidro e lã de rocha.

Moraes (2013) estudou a Avaliação de propriedades de fadiga de compósitos de polipropileno reforçado com fibras de coco, onde propôs o estudo da influência da variação da frequência da sollicitação mecânica na resistência e na vida em fadiga de compósitos de polipropileno (PP) reforçado com fibra de coco e utilizou para análise desta influência, ensaios de fadiga por flexão alternada com diferentes frequências de ensaio (entre 5 e 35 Hz). Após a realização dos ensaios de tração e flexão, verificou-se que a adição dos 40,0% de fibras de coco, propiciou ganhos nas propriedades mecânicas, tornando o compósito mais rígido e resistente do que o PP puro, tanto em tração quanto em flexão. Estes ganhos foram obtidos graças à devida transferência de cargas da matriz para as fibras, fato garantido pela efetiva aderência das fibras na matriz devido ao uso do agente compatibilizante. Para as propriedades cíclicas, observou-se que a frequência influi na vida em fadiga do compósito, já que ao aumentar a frequência de ensaio de 5Hz até 35 Hz, reduziu-se a vida do material nas diferentes amplitudes de deformações estudadas, devido à maior geração de calor por histerese, podendo até mudar o tipo de falha por fadiga predominante.

Salazar e Leão (2006) fizeram um estudo da biodegradação das fibras de coco e de sisal, visando às aplicações na indústria automotiva, onde discutiram os resultados referentes aos ensaios de biodegradabilidade de fibras naturais utilizadas pela indústria automobilística: fibra de coco, de coco com látex e de sisal, onde fizeram a determinação de extrativos totais, de lignina, de hemicelulose e do teor de cinzas das fibras em estudo para se conhecer o teor real de lignina, celulose e hemiceluloses presentes e compreender os resultados obtidos nos testes de biodegradação. A partir do teste de biodegradabilidade, observou-se uma taxa de biodegradação de cerca de 10,0% para todos os materiais em estudo após 45 dias de ensaio, demonstrando difícil degradação, no qual nenhum dos materiais inibiu a degradação da glicose. No entanto, a porcentagem de degradação da fibra de sisal foi superior a da fibra de coco com látex, considerando-se o mesmo intervalo de tempo de cultivo. E, analisando-se os teores de lignina, celulose e hemiceluloses determinados neste estudo, verificou que a fibra de sisal apresenta em média 7,0% de lignina enquanto a fibra de coco apresenta 31,0%, justificando a degradação mais rápida da fibra de sisal. A partir da avaliação dos materiais aos 90 dias de ensaio, verificou-se a quebra das fibras, principalmente de sisal e de coco sem látex, indicando o ataque por fungos e processos de biodegradação.

As fibras naturais vem sendo estudadas por vários autores ao longo dos últimos anos, sejam estas fibras puras ou misturadas com polipropilenos ou diversos tipos de resinas, epóxi, fenólicas e poliésteres.

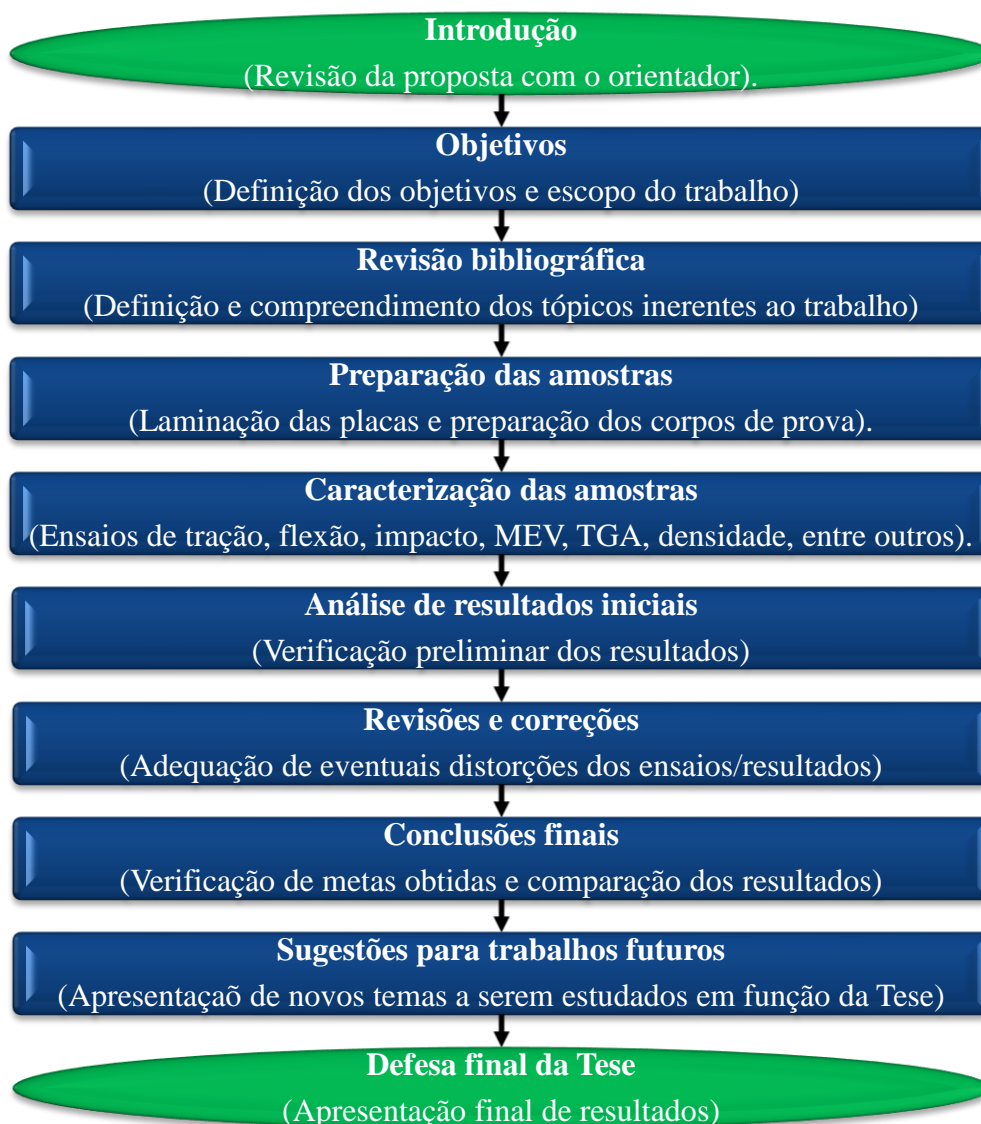
### 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Na metodologia experimental estão citadas as etapas do trabalho, os materiais utilizados, o método de laminação e termoformagem dos compósitos, a preparação das amostras dos compósitos e as técnicas utilizadas na caracterização destes materiais.

#### 3.1 Etapas do Trabalho

Para a realização dos propósitos aqui estabelecidos, foram seguidas as seguintes etapas do fluxograma macro (FIG. 61) para a redação final da tese.

**Figura 61 – Fluxograma macro dos experimentos.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

### 3.2 Controle dos experimentos

Para os experimentos laboratoriais nos fios de fibras naturais e nos corpos de prova, foram feitos 643 experimentos divididos em diversos tipos de ensaios. Foram gastas aproximadamente 348 horas de laboratório, o que daria cerca de 44 dias com 8 horas de experimentos, ou seja, praticamente um mês e meio ininterrupto de testes.

As quantidades de ensaios de tração nas direções longitudinal e transversal por tipo de fibra e compósito são mostradas na Tabela 18.

**Tabela 18 – Controle de experimentos I.**

Nº	Material	Tipo	Nomenclatura	Extrusão	Laminação	Termoformagem	Tração				
							1,0 mm/min (23 °C)	50,0 mm/min (23 °C) Longitudinal	50,0 mm/min (80 °C) Longitudinal	50,0 mm/min (23 °C) Transversal	50,0 mm/min (80 °C) Transversal
<b>Local dos experimentos</b>				<b>FIAT</b>	<b>DPA</b>	<b>FIAT</b>	<b>FIAT</b>	<b>FIAT</b>	<b>FIAT</b>	<b>FIAT</b>	
1	Juta	Fio					10				
2	Sisal	Fio					10				
3	Côco	Fio					10				
4	Banana	Fio					10				
5	Rami	Fio					10				
6	Composto - Epóxi (Juta + Juta + Juta)	Corpo de prova	EP69-JU31		1			10	10	10	10
7	Composto - Poliéster (Juta + Juta + Juta)	Corpo de prova	PO77-JU23		1			10	10	10	10
8	Composto (Juta + Polipropileno)	Corpo de prova	PP50-JU50			1		10	10	10	10
9	Polipropileno com 40% de carga mineral	Corpo de prova	PP-TD40	1				10	10	10	10
10	Composto de Woodstock	Corpo de prova	PP50-MA50			1		10	10	10	10
<b>Total de experimentos por tipo de ensaio</b>				<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>50</b>
<b>Total de horas de laboratório por experimento</b>				<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>	<b>0,5</b>
<b>Total de horas de laboratório</b>				<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>25</b>	<b>15</b>	<b>25</b>

**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**



As quantidades de ensaios de flexão nas direções longitudinal e transversal, bem como os ensaios de impacto, microscópio óptico e MEV por tipo de fibra e compósito são mostradas na Tabela 19.

**Tabela 19 – Controle de experimentos II.**

Nº	Material	Tipo	Nomenclatura	Flexão				Impacto por queda de dardo	Microscópio óptico	MEV
				2,0 mm/min (23 °C)	2,0 mm/min (80 °C)	2,0 mm/min (23 °C)	2,0 mm/min (80 °C)			
				Longitudinal	Longitudinal	Transversal	Transversal			
<b>Local dos experimentos</b>				<b>FIAT</b>	<b>FIAT</b>	<b>FIAT</b>	<b>FIAT</b>	<b>FIAT</b>	<b>PUC</b>	<b>FIAT</b>
1	Juta	Fio							5	1
2	Sisal	Fio							5	1
3	Côco	Fio							5	1
4	Banana	Fio							5	1
5	Rami	Fio							5	1
6	Composto - Epóxi (Juta + Juta + Juta)	Corpo de prova	EP69-JU31	10	10	10	10	7		1
7	Composto - Poliéster (Juta + Juta + Juta)	Corpo de prova	PO77-JU23	10	10	10	10	7		1
8	Composto (Juta + Polipropileno)	Corpo de prova	PP50-JU50	10	10	10	10	7		1
9	Polipropileno com 40% de carga mineral	Corpo de prova	PP-TD40	10	10	10	10	7		
10	Composto de Woodstock	Corpo de prova	PP50-MA50	10	10	10	10	7		
<b>Total de experimentos por tipo de ensaio</b>				<b>50</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>35</b>	<b>25</b>	<b>8</b>
<b>Total de horas de laboratório por experimento</b>				<b>0,3</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>
<b>Total de horas de laboratório</b>				<b>15</b>	<b>25</b>	<b>15</b>	<b>25</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>1,6</b>

**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

As quantidades de ensaios de densidade aparente, absorção de água, perda de umidade, TGA e absorção acústica por tipo de fibra e compósito são mostradas na Tabela 20.

**Tabela 20 – Controle de experimentos III.**

Nº	Material	Tipo	Nomencla- tura	Densidade aparente	Absorção de água	Perda de umidade	TGA	Absorção acústica
Local dos experimentos				FIAT	FIAT	FIAT	FIAT	FIAT
1	Juta	Fio						
2	Sisal	Fio						
3	Côco	Fio						
4	Banana	Fio						
5	Rami	Fio						
6	Composto - Epóxi (Juta + Juta + Juta)	Corpo de prova	EP69-JU31	8	4	4	3	5
7	Composto - Poliéster (Juta + Juta + Juta)	Corpo de prova	PO77-JU23	8	4	4	3	5
8	Composto (Juta + Polipropileno)	Corpo de prova	PP50-JU50	8	4	4	3	5
9	Polipropileno com 40% de carga mineral	Corpo de prova	PP-TD40	8	4	4	3	5
10	Composto de Woodstock	Corpo de prova	PP50- MA50	8	4	4	3	5
<b>Total de experimentos por tipo de ensaio</b>				<b>40</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>15</b>	<b>25</b>
<b>Total de horas de laboratório por experimento</b>				<b>0,2</b>	<b>4,8</b>	<b>1,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>
<b>Total de horas de laboratório</b>				<b>8</b>	<b>96</b>	<b>30</b>	<b>7,5</b>	<b>12,5</b>

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

### 3.3 Materiais

Foram utilizados como matéria-prima para a construção dos compósitos abaixo descritos e utilizados nos experimentos, diversos tipos de materiais, como: Resina epóxi, resina poliéster, polipropileno, pó de madeira e juta.

A Tabela 21 apresenta o tipo de fabricação, a nomenclatura e as percentagens de cada material obtidas de acordo com as formulações descritas no Capítulo 2, item 2.1.7.

**Tabela 21 – Tipo de fabricação, nomenclatura e percentagem das amostras testadas.**

Tipo de fabricação	Nomenclatura	Amostras				
		Resina Epóxi (% em massa)	Resina Poliéster (% em massa)	PP (% em massa)	Pó de Madeira (% em massa)	Juta (% em massa)
Amostra extrudada	PP-TD40			100		0
Amostras laminadas	EP69-JU31	69				31
	PO77-JU23		77			23
Amostras termoformadas	PP50-JU50			50		50
	PP50-MA50			50	50	

**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

As amostras em placa de PP-TD40 e PP50-MA50 foram obtidas no mercado, pois são compósitos já em uso na indústria automobilística. Para a laminação dos compósitos em placas de EP69-JU31, PO77-JU23 e termoformagem do compósito em placa PP50-JU50, foram utilizados os seguintes materiais abaixo descritos:

### 3.3.1 Tecido de fibra de juta

O tecido de fibra de juta foi adquirido junto à Empresa Sisalsul Fibras Naturais em São Paulo, SP, e identificado da seguinte forma pelo fornecedor:

- Juta: **Tela de juta 100,0% natural T10**

Foi adquirido uma peça de Tela de juta 100,0% natural T10 de 1,0 x 3,0 metros, junto ao fornecedor (FIG. 62).

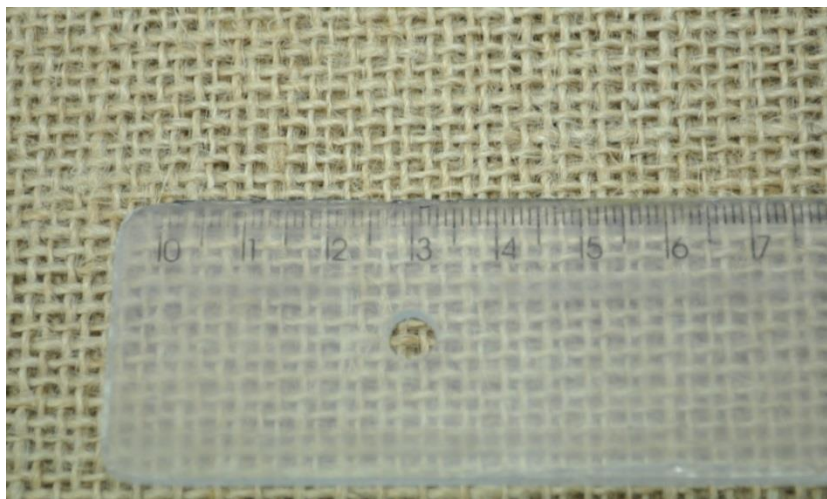
**Figura 62 – Tela de juta 100,0% natural T10.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

Cuja gramatura da peça de Tela de juta 100,0% natural T10 no detalhe é mostrada na Figura 63.

**Figura 63 – Gramatura da tela de juta 100,0% natural T10.**



**Fonte – DADOS DA PESQUISA, 2015.**

Para o experimento de laminação, foram utilizadas três mantas de Juta. Cada manta foi aplicada como peça única (placas), sem cortes, para obter as melhores características estruturais possíveis. Estas telas foram cortadas (FIG. 64) nos tamanhos de 260,0 x 560,0 milímetros.

**Figura 64 – Corte da Tela de juta 100,0% natural T10.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

Depois, estas placas (FIG. 65) foram colocadas sobre o molde, para então adicionar a resina com o endurecedor.

**Figura 65 – Tela de juta 100,0% natural T10, cortada para o experimento.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

### 3.3.2 Resina epóxi

A resina epóxi e o endurecedor da resina, também conhecido como agente de cura, utilizados no experimento, foram adquiridos do revendedor Mundo da Resina e Fibras em Belo Horizonte, MG e são identificados da seguinte forma pelo fornecedor:

- Resina epóxi: **RenLam M (Araldite M)**;
- Agente de cura para resina epóxi: **Ren HY 951**.

O processo indicado segundo o fornecedor da resina, para a polimerização é uma mistura manual de 10 (dez) partes de resina para 1 (uma) de agente de cura, por um tempo aproximado de cinco minutos, o que daria um tempo de trabalho com a mistura de 20 a 30 minutos, até que a mistura começasse seu processo de polimerização, a uma temperatura ambiente de aproximadamente 25°C.

Para garantir esta mistura foi utilizado um becker graduado, 600 mililitros, para a medição da resina epóxi e uma proveta graduada, 50 mililitros, para a medição do endurecedor.

Os tipos de aplicações, métodos e características principais da resina epóxi RenLam M e do endurecedor Ren Hy 951, são basicamente os seguintes. (MAXEPOXI, 2014):

- **Aplicações:** Reforços estruturais, enchimentos, encapsulamentos, forrações, colagem e reparos para modelos, moldes, ferramentas, peças protótipo e construções dos mais diversos tipos e tamanhos, utilizados nas indústrias aeronáutica, automobilística, fundições, metalúrgicas, cerâmicas, naval etc;
- **Métodos de aplicações:** Laminação manual com pincéis e roletes, ou por outros métodos de impregnação sob pressão ou vácuo, prensagem mecânica com ou sem calor etc. Com adição de cargas, fundição simples ou frontal, ou compactadas em camadas;

- **Características especiais:** Sistemas com boas propriedades mecânicas, aderência e estabilidade dimensional que podem preencher maiores volumes após adição de cargas especiais que aumentam a dissipação térmica. Proporcionam ótima molhabilidade, ótimas propriedades químicas, térmicas e mecânicas, conferindo ao laminado estabilidade dimensional e excelente coesão.

As propriedades da resina epóxi RenLam M e do endurecedor Ren Hy 951, sem nenhum reforço estrutural, apenas a resina e o endurecedor, são mostrados na Tabela 22.

**Tabela 22 – Propriedades da resina epóxi RenLam M e do endurecedor Ren Hy 951.**

Características Iniciais	Produto / °C	Dados	Unidade
Cor	Resina:	Incolor	-
	Endurecedor:	Amarelo Transparente	-
Viscosidade a 25°C	Resina:	1.000 - 2.000	cPs
	Endurecedor:	350 - 640	cPs
Densidade (peso por volume)	Mistura:	800 - 1.000	cPs
	Resina:	1,10 - 1,15	G / cm <sup>3</sup>
Proporção de Mistura	Endurecedor:	1,00 - 1,05	G / cm <sup>3</sup>
	Resina:	10	-
Temperatura de Trabalho	Endurecedor:	1	-
	Mistura:	20 - 25	°C
Tempo de uso	Mistura:	20 - 30 (3)	Minutos
Tempo de Endurecimento a 25°C	Mistura:	(10 - 14)	Horas
	25°C:	(3 - 5)	Dias
	50°C:	(4 - 6)	Horas
	80°C:	-	Horas
Tempo de Cura a	100°C:	-	Horas
	120°C:	-	Horas

Fonte: MAXEPOXI, 2014.

As propriedades após a cura da resina epóxi RenLam M e do endurecedor Ren Hy 951, sem nenhum reforço estrutural, ou seja, apenas a resina e o endurecedor, são mostrados na Tabela 23.

**Tabela 23 – Propriedades após a cura da resina epóxi e do endurecedor.**

<b>Propriedade após cura</b>	<b>Norma</b>	<b>Após Cura de 7 dias a 25°C</b>	<b>Unidade</b>
Resistência a Tração	VSM - 77101	1,5-2,5	Kg / mm <sup>2</sup>
Resistência a Pressão	VSM - 77102	7-8	Kg / mm <sup>2</sup>
Resistência a Flexão	VSM - 77103	3,0-3,5	Kg / mm <sup>2</sup>
Resistência ao Impacto	ISO 179	1,5-2,5	KJ / m <sup>2</sup>
Densidade	VSM - 77109	1,60-1,65	g / cm <sup>3</sup>
Coefic. de Dilatação Térmica Linear	VSM - 77110	60-65	10 <sup>-6</sup> °C
Retração Linear (Objeto: 28x1x3cm)	-	0,02-0,04	%
Condutividade Térmica	DIN 52612	-	KCAL / MH °C
Módulo de Elasticidade	VSM - 77111	350-550	Kg / mm <sup>2</sup>
Estabilidade Dimensional	DIN - 53458	45-55	°C

Fonte: MAXEPOXI, 2010.

### 3.3.3 Resina poliéster

A resina poliéster e o catalizador da resina, utilizados no experimento, foram adquiridos do revendedor Mundo da Resina e Fibras em Belo Horizonte, MG e são identificados da seguinte forma pelo fornecedor:

- Resina poliéster rígida: **Policron 10-116**;
- Resina poliéster flexível: **Resapol 10-255**;
- Catalisador: **1,0% de Peróxido de Metil Etil Cetona**.



O processo indicado segundo o fornecedor da resina, para a polimerização é uma mistura manual de 80,0% de Resina Ortoftálica Rígida e 20,0% de Resina Ortoftálica Flexível e para cada 100 gramas de mistura de resina, colocar 50 gotas do catalisador. O que daria um tempo de trabalho com a mistura de 20 a 30 minutos, até que a mistura começasse seu processo de polimerização, a uma temperatura ambiente de aproximadamente 25°C.

Para garantir esta mistura foi utilizado dois beakers graduados de 600 mililitros cada, para a medição da resina poliéster rígida e flexível.

### 3.3.3.1 Resina Policron 10-116

Resina poliéster insaturado, ortoftálico, rígido, totalmente polimerizável, baixa reatividade, baixa viscosidade, tixotrópico, pré-acelerado. Aplicação em piscinas, banheiras, peças automotivas, náuticas e acessórios reforçados com fibras de vidros, moldados em processo aberto, laminação manual ou à pistola. (REICHHOLD, 2002) .

Algumas propriedades da resina poliéster ortoftálica rígida, conforme dados do fornecedor Reichhold são mostradas na Tabela 24.

**Tabela 24 – Propriedades da resina poliéster ortoftálica rígida.**

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ANÁLISE	ESPECIFICAÇÃO
Viscosidade Brookfield à 25°C	PP 01 - 124	250 - 350
Índice de Tixotropia	PP 01 - 124	1,15 - 1,30
Materia Seca à 105°C (%)	PP 01 - 035	57 - 59
Índice de Acidez (mgKOH/g)	PP 01 - 003	30 máximo
Viscosidade Gardner	PP 01 - 077	H - J
Cor Visual	PP 01 - 297	A determinar

**Fonte: REICHHOLD, 2002.**

As propriedades da resina poliéster ortoftálica rígida na aplicação, conforme dados do fornecedor Reichhold são mostradas na Tabela 25.

**Tabela 25 – Propriedades da resina poliéster ortoftálica rígida na aplicação.**

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>MÉTODO DE ANÁLISE</b>	<b>VALORES TÍPICOS</b>
Resistência Máxima à Tração (MPa)	PP 09 - 035	50
Módulo de Elasticidade em Tração (MPa)	PP 09 - 035	3.500
Elongação Máxima (%)	PP 09 - 035	2
Resistência Máxima à Flexão (MPa)	PP 09 - 039	80
Módulo de Elasticidade em Flexão (MPa)	PP 09 - 039	4.500
Deformação Máxima (%)	PP 09 - 039	2
Dureza Barcol	PP 09 - 034	40
Contração Linear (%)	PP 09 - 050	2
Temperatura de Termodistorção (°C)	PP 09 - 030	75
Resistência ao Impacto	PP 09 - 078	18

Fonte: REICHHOLD, 2002.

### 3.3.3.2 Resina Resapol 10-255

Resina poliéster insaturado, totalmente polimerizável, baixa reatividade, baixa viscosidade, flexível, pré-acelerada. Utilizada em mistura com tipos rígidos, na fabricação de botões, bijuterias e peças encapsuladas, gel e compósitos de poliéster com elevadas características de absorção ao impacto e possui as seguintes características. (REICHHOLD, 2001).

- Reduz a contração das resinas do tipo rígido devido ao seu baixo pico exotérmico;
- Excepcional característica de flexibilização mesmo com adição de níveis reduzidos;
- Aumenta consideravelmente a porcentagem de elongação máxima de sistemas rígidos acomodando tensões internas.

Algumas propriedades da resina poliéster ortoftálica flexível, conforme dados do fornecedor Reichhold são mostradas na Tabela 26.

**Tabela 26 – Propriedades da resina poliéster ortoftálica flexível.**

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>MÉTODO DE ANÁLISE</b>	<b>ESPECIFICAÇÃO</b>
Viscosidade Gardner	PP 01 - 077	L - N
Matéria Seca à 105°C (%)	PP 01 - 075	68 - 70
Índice de Acidez (mgKOH/g)	PP 01 - 003	28 máx.
Cor Apha	PP 01 - 078	50 máx.
Estabilidade à 105°C (horas)	PP 01 - 467	2 mín.

Fonte: REICHHOLD, 2001.

### 3.3.4 Polipropileno

O Polipropileno >PP< ou polipropeno é um polímero, mais precisamente um termoplástico, derivado do propeno ou propileno e reciclável. Ele pode ser identificado em materiais através do símbolo triangular de reciclável, com um número "5" por dentro e as letras "PP" por baixo (FIG. 66) e sua forma molecular é (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>). (RECICLA BRASIL, 2014).

**Figura 66 – Símbolo do polipropileno.**



Fonte: RECICLA BRASIL, 2014.

O polipropileno é um tipo de plástico que pode ser moldado usando apenas aquecimento, ou seja, é um termoplástico. Possui propriedades muito semelhantes às do polietileno >PE<, mas com ponto de amolecimento mais elevado. (RECICLA BRASIL, 2014).

Suas principais propriedades são:

- Baixo custo;
- Elevada resistência química e a solventes;
- Fácil moldagem;
- Fácil coloração;
- Boa resistência ao impacto acima de 15 °C;
- Boa estabilidade térmica.

Suas principais aplicações são:

- Embalagens flexíveis;
- Cadeiras plásticas, brinquedos;
- Copos plásticos;
- Embalagens e recipientes para alimentos, remédios e produtos químicos;
- Corpo de eletrodomésticos (ferro de passar, liquidificador, batedeira);
- Tampas em geral, tampas para bebidas carbonatadas (água, refrigerantes);
- Material hospitalar esterilizável;
- Autopeças (para-choques, pedais, carcaças de baterias, lanternas, ventoinhas, ventiladores, peças diversas no habitáculo).
- Cabos para ferramentas manuais.

No momento atual, há uma tendência no sentido de se utilizar exclusivamente o >PP< no interior dos automóveis. Isso facilitaria a reciclagem do material por ocasião do sucateamento do veículo, pois se saberia com qual material se estaria lidando, além de menor custo.

### **3.3.5 Fios das fibras**

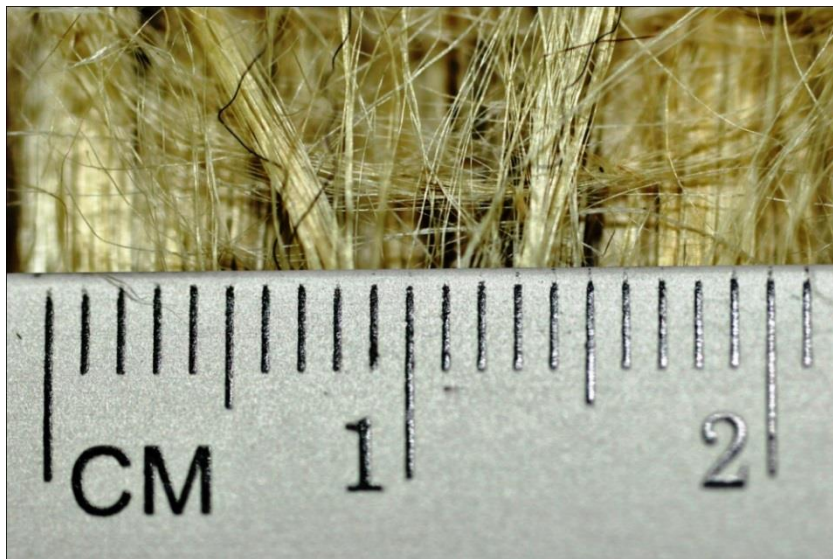
Os fios das diversas fibras de juta, sisal, rami, coco e banana, para o ensaio de tração, foram adquiridos junto à Empresa Ober S/A Indústria e Comércio em São Paulo, SP, que cedeu gratuitamente uma amostra de cada fibra.

A câmera utilizada para fazer as fotos dos detalhes dos fios (FIG. 71 a 75) foi uma Nikon D90 (18-105 mm) digital e o tipo de lente usada foi uma Nikon 105 mm 1/2.8 VR que tem uma objetiva com praticamente zero de distorção/vibração e oferece alta resolução e alta

performance óptica para fotografias de pequenos detalhes. Sobre os fios de fibra, foi colocada uma régua graduada em centímetros para visualização/escala do tamanho das fibras.

A Figura 67 mostra no detalhe os fios da fibra de juta em relação à escala.

**Figura 67 – Detalhe dos fios da fibra de juta.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

A Figura 68 mostra no detalhe os fios da fibra de sisal em relação à escala.

**Figura 68 – Detalhe dos fios da fibra de sisal.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

A Figura 69 mostra no detalhe os fios da fibra de rami em relação à escala.

**Figura 69 – Detalhe dos fios da fibra de rami.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

A Figura 70 mostra no detalhe os fios da fibra de coco em relação à escala.

**Figura 70 – Detalhe dos fios da fibra de coco.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

A Figura 71 mostra no detalhe os fios da fibra de banana em relação à escala.

**Figura 71 – Detalhe dos fios da fibra de banana.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

### **3.4 Descrição do experimento**

Foram laminados e termoformado três tipos de novos compósitos poliméricos, em formas de placas:

1. Um compósito laminado com três camadas de fibra natural de juta em forma de tecido, aglutinado com resina epóxi;
2. Um compósito laminado com três camadas de fibra natural de juta em forma de tecido, aglutinado com resina poliéster;
3. Um compósito termoformado a partir do termoplástico de polipropileno >PP<, reforçado com fibras curtas de juta.

O compósito PP50-JU50 em placas foi termoformado pela empresa DPA Moldados, utilizando matéria-prima da empresa Ober S/A Indústria e Comércio. O compósito utilizado nestes experimentos de caracterização é uma manta agulhada de 50,0% de polipropileno e 50,0% de fibra de juta.

Foram então fabricadas amostras (corpos de prova) para realização da caracterização destes compósitos em diversos tipos de ensaios laboratoriais, além de ensaios em fios únicos das fibras, como:

- a) ensaios de tração em temperatura ambiente (23°C), em fios únicos de fibra de juta, sisal, rami, coco e banana, para caracterizar mecanicamente cada fibra natural conforme (NORMA ASTM C1557, 2013), (NORMA ASTM D3822, 2014);
- b) ensaios de tração em temperaturas de 23°C (longitudinal e transversal) e 80°C (longitudinal) nas amostras/corpos de prova, em uma máquina Universal Instron 4467 conforme (NORMA ASTM D638, 2010);
- c) ensaios de flexão em temperaturas de 23°C e 80°C nas amostras/corpos de prova, em uma máquina Universal Instron 4467 conforme (NORMA ASTM D790, 2010);
- d) ensaios de impacto por queda de dardo nas amostras/corpos de prova, em uma máquina Ceast conforme (NORMA FIATAUTO 50424, 2011);
- e) ensaios de microscopia óptica nos corpos de prova e nos fios únicos de fibra, para caracterizar o tipo de fio e cada tipo de compósito;
- f) ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) na região de fratura do ensaio de tração de cada tipo de corpo de prova testado e dos fios únicos de fibra tracionados, para caracterizar o tipo de fratura nos fios e nos compósitos;
- g) análises de densidade aparente nas amostras/corpos de prova;
- h) análises de absorção de água nas amostras/corpos de prova conforme (NORMA ABNT NBR NM 30, 2001);
- i) análises de perda de umidade nas amostras/corpos de prova;
- j) análises térmicas de termogravimétrica (TGA) nas amostras/corpos de prova;;
- k) análises de absorção acústica nas amostras/corpos de prova;

### **3.4.1 Laminação das placas**

Para uma perfeita laminação da placa e para também garantir um melhor acabamento e evitar locais na peça em que a resina não impregnasse totalmente. Foi utilizado como base (molde) uma placa plana de vidro e foram estabelecidas e seguidas as mesmas 10 (dez) etapas para a laminação tanto do compósito com fibra natural de juta com resina epóxi, quanto para o compósito com fibra natural e resina poliéster:



1. Aplicação da primeira camada de resina com pincel sobre o vidro previamente preparado, ou seja, limpo e com o desmoldante já aplicado;
2. Posicionamento da primeira manta de fibra de juta sobre a resina;
3. Aplicação de resina sobre a manta de fibra de juta, utilizando-se pincel (FIG. 72);
4. Eliminação de bolhas de ar utilizando-se o rolete na superfície da placa (FIG. 73);
5. Posicionamento da segunda manta de fibra de juta sobre a resina;
6. Aplicação de resina sobre a manta de fibra de juta, utilizando-se pincel;
7. Eliminação de bolhas de ar utilizando-se o rolete na superfície da placa;
8. Posicionamento da terceira manta de fibra de juta sobre a resina;
9. Aplicação de resina sobre a manta de fibra de juta, utilizando-se pincel;
10. Eliminação de bolhas de ar utilizando-se o rolete na superfície da placa.

**Figura 72 – Aplicação de resina epóxi misturada com o endurecedor na placa.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

Após essas etapas, as placas permaneceram por 5 (cinco) dias em total descanso para a etapa de polimerização e cura, realizada ao ar livre e em temperatura ambiente de aproximadamente 25°C, tempo este que está de acordo com as especificações do fornecedor.

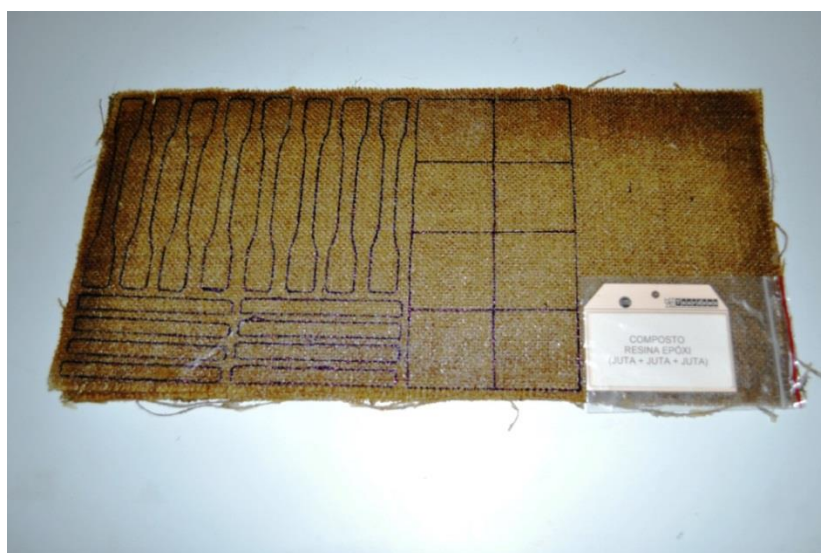
**Figura 73 – Eliminação de bolhas de ar utilizando-se o rolete sobre o molde.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

Foram então laminadas duas placas com três camadas de tecido de fibra de juta aglutinadas com resina epóxi, com as dimensões de 260 x 560 milímetros (FIG 74) e duas placas com três camadas de tecido de fibra de juta aglutinadas com resina poliéster, com as mesmas dimensões.

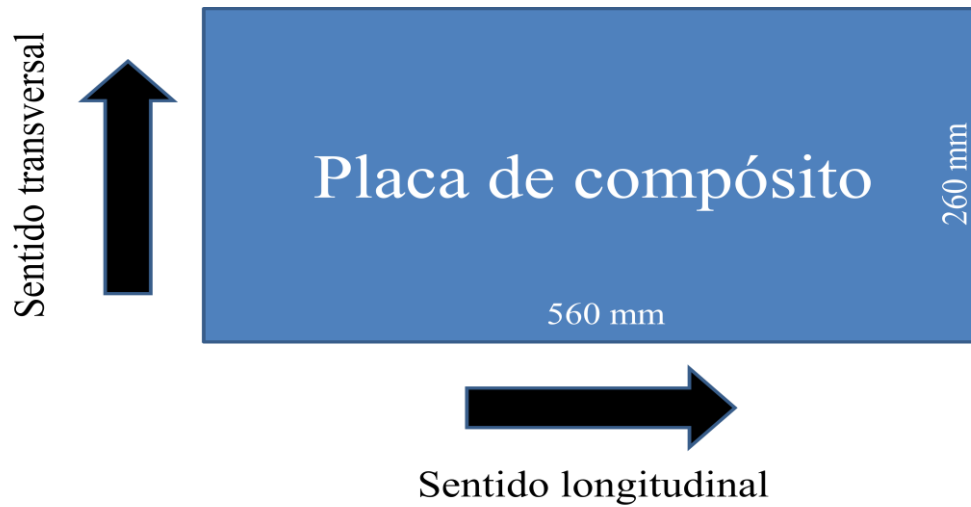
**Figura 74 – Placa em fibra de juta e resina epóxi.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

Nestas placas foram cortados os corpos de prova nos sentidos longitudinal e transversal de laminação, conforme mostrado na Figura 75.

**Figura 75 – Placa mostrando os sentidos longitudinal e transversal de laminação.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

### 3.5 Preparação das amostras

As amostras para os ensaios de tração, flexão e impacto por queda de dardo foram elaboradas no Laboratório de Materiais da FCA (Fiat Chrysler Automobiles) e foram cortadas em uma máquina de serra fita Dremel modelo 1680 (FIG. 76).

**Figura 76 – Corpos de prova sendo cortados em uma máquina de serra fita Dremel.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

Foram obtidas assim corpos de prova (FIG. 77) para os diversos ensaios que foram realizados.

**Figura 77 – Corpos de prova para tração em fibra de juta com polipropileno.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

Após o corte dos corpos de prova, foi feito um acabamento nas laterais para retirada das rebarbas utilizando uma lima chata murça 8 polegadas e uma lima redonda murça 8” nos raios.

### **3.6 Caracterização das amostras**

As amostras foram avaliadas em análises físicas: microscopia óptica, densidade aparente, absorção de água, perda de umidade, absorção acústica e análise termogravimétrica (TGA); análises mecânicas: tração, flexão e impacto por queda de dardo; além da avaliação morfológica: microscopia eletrônica de varredura (MEV). Essas técnicas estão descritas em detalhes a seguir:

#### **3.6.1 Microscopia óptica**

Utilizando um microscópio óptico Zeiss Scope A.1 modelo AX10 (FIG. 78), foram analisadas a largura e área transversal dos fios das fibras naturais, nas condições de aumentos de 20 a 50 vezes.

As amostras foram cortadas em pequenos pedaços de fios de aproximadamente 10 mm de comprimento e analisadas no microscópio sem nenhum tipo de tratamento anterior.

**Figura 78 – Microscópio óptico Zeiss Scope A.1 modelo AX10.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

As medidas foram realizadas na temperatura ambiente de 23°C e uma umidade relativa do ar de 50,0%. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da PUC Minas.

### 3.6.2 Densidade aparente

A densidade (peso específico) das amostras foi determinada utilizando-se uma balança digital da marca Ohaus, modelo Adventurer Pro (FIG. 79), com uma faixa de medição de 0,0 g a 8100,0 g e uma precisão de 0,1 g para a determinação da massa das amostras e um micrômetro digital com uma precisão de 0,001 mm para a medição das espessuras, para cálculo do volume das amostras. O método baseia-se simplesmente na divisão da massa (g) pelo volume ( $\text{cm}^3$ ), gerando assim uma densidade aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

**Figura 79 – Balança digital da marca Ohaus, modelo Adventurer Pro.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

As medidas foram realizadas na temperatura ambiente de 23°C e uma umidade relativa do ar de 50,0%. O resultado gerado foi a média de 8 (oito) medidas de massa e volume. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da FCA (Fiat Chrysler Automobiles).

### **3.6.3 Absorção de água**

Para o ensaio de absorção de água, primeiramente as amostras/corpos de prova foram pesadas no estado seco e foram então imersas totalmente em água (FIG. 80) e após 1 hora, as amostras foram secas levemente com um papel toalha, pesadas e novamente imersas em água por um período de teste subsequente, conforme (NORMA ABNT NBR NM 30, 2001). Após isso, foram removidas da água e novamente pesadas. O teste parou no momento em que os corpos de prova atingiram um estado de equilíbrio, ou seja, até que não absorviam mais água e não ganhavam mais massa. Que resultou em um período de 1172 horas, divididos em:

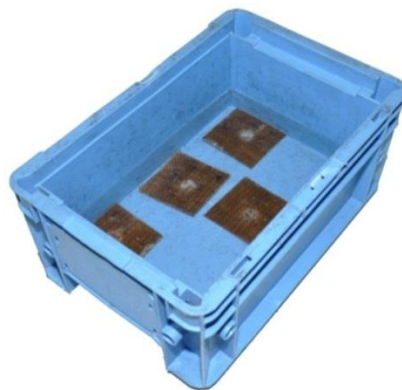
- 1 hora de imersão;
- 2 horas de imersão;
- 3 horas de imersão;
- 4 horas de imersão;
- 5 horas de imersão;
- 6 horas de imersão;
- 7 horas de imersão;
- 8 horas de imersão;

- 9 horas de imersão;
- 10 horas de imersão;
- 24 horas de imersão;
- 48 horas de imersão;
- 72 horas de imersão;
- 96 horas de imersão;
- 164 horas de imersão;
- 236 horas de imersão;
- 332 horas de imersão;
- 500 horas de imersão;
- 668 horas de imersão;
- 836 horas de imersão;
- 1004 horas de imersão;
- 1172 horas de imersão.

O teor de água absorvida (TA%) das amostras foi calculado através da relação entre a massa da amostra seca ( $M_s$ ) e a massa da amostra após imersa ( $M_i$ ) a partir da Equação 28, para os diferentes tempos de experimento.

$$TA (\%) = \left( \frac{M_i - M_s}{M_s} \right) \times 100 \quad (28)$$

**Figura 80 – Corpos de prova imersos em água.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

O ensaio de absorção de água das amostras foi realizado a 23°C de temperatura da água/ambiente e uma umidade relativa do ar de 50,0%. O resultado gerado foi a média de 4 medidas de massa, utilizando-se uma balança digital da marca Ohaus, modelo Adventurer Pro (FIG. 79). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da FCA (Fiat Chrysler Automobiles).

### 3.6.4 Perda de umidade

Para o ensaio de perda de umidade, as amostras/corpos de prova foram pesadas no estado seco e colocadas em um forno (FIG. 81) para retirada da umidade, à uma temperatura de 100°C. Após 5 horas, as amostras foram retiradas do forno e pesadas em sequencia e novamente colocadas no forno imediatamente, para um período de teste subsequente. Após isso, foram retiradas do forno e novamente pesadas. O teste parou no momento em que os corpos de prova atingiram um estado de equilíbrio, ou seja, até que não perdessem mais umidade, não perdessem mais massa. Que resultou em um período de 1080 horas, divididos em:

- 5 horas de forno;
- 10 horas de forno;
- 24 horas de forno;
- 48 horas de forno;
- 72 horas de forno
- 144 horas de forno;
- 240 horas de forno;
- 408 horas de forno;
- 576 horas de forno;
- 744 horas de forno;
- 912 horas de forno;
- 1080 horas de forno.

O teor de perda de umidade (TU%) das amostras foi calculado através da relação entre a massa da amostra seca ( $M_s$ ) e a massa da amostra após forno ( $M_f$ ) a partir da Equação 29, para os diferentes tempos de experimento.



$$TU (\%) = \left( \frac{M_f - M_s}{M_s} \right) \times 100 \quad (29)$$

**Figura 81 – Corpos de prova dentro do forno a 100°C.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

O ensaio de perda de umidade das amostras foi realizado a 23°C e uma umidade relativa do ar de 50,0%. O resultado gerado foi a média de 4 (quatro) medidas de massa, utilizando-se uma balança digital da marca Sartorius, modelo BP221S (FIG. 82), com uma faixa de medição de 0,0 g a 220,0 g e uma precisão de 0,0001 g. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da FCA (Fiat Chrysler Automobiles).

**Figura 82 – Balança digital da marca Sartorius, modelo BP221S.**

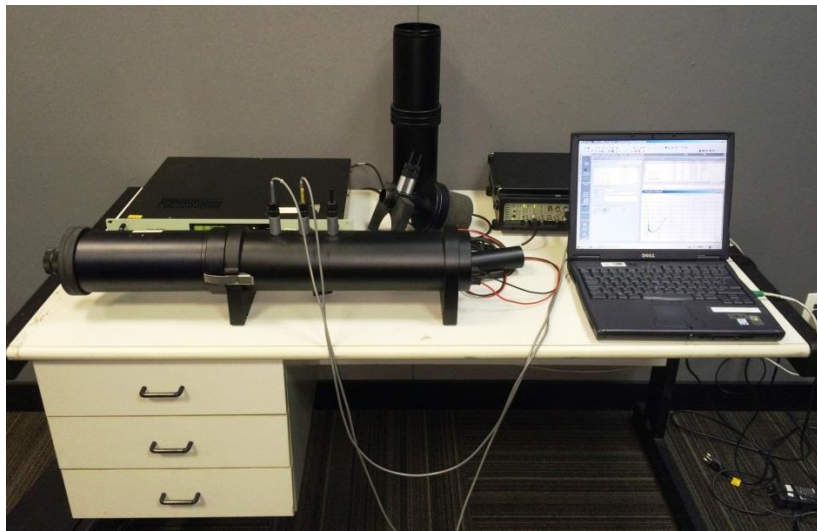


**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

### 3.6.5 Absorção Acústica

Para medir o coeficiente de absorção acústica dos compósitos novos, foi utilizando um tubo de impedância ou tubo de Kundt, modelo 4206 da Bruel Kjaer para medições de 50 a 6400 Hz (FIG. 83).

**Figura 83 – Esquema do experimento montado, tubo de impedância.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

Foram utilizados corpos de prova em forma de discos dos tipos de compósitos testados nos diâmetros de 100,0 mm para medições de baixas frequências (50 a 800 Hz) e compósitos nos diâmetros de 30,0 mm para medições de altas frequências (800 a 6400 Hz) (FIG. 84).

**Figura 84 – Corpos de prova para o ensaio de absorção acústica.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

Estes corpos de prova foram inseridos no interior do tubo de impedância e nas suas bordas foi utilizada uma massa de calafetar para eliminar qualquer passagem de onda entre a borda do compósito e as paredes internas do tubo (FIG. 85).

**Figura 85 – Corpo de prova para baixas frequências inserido no tubo de impedância.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

As medidas foram realizadas na temperatura ambiente de 23°C e uma umidade relativa do ar de 50,0%. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Acústica da FCA (Fiat Chrysler Automobiles).

### **3.6.6 Análise termogravimétrica (TGA)**

A análise termogravimétrica permite acompanhar a perda de massa que ocorre em uma amostra devido à elevação da temperatura ou do tempo de análise. Variações na massa ocorrem devido a transformações químicas ou físicas, como perda de material por volatilização, decomposição ou vaporização. As análises de TGA foram feitas em um aparelho da TA Instruments, modelo Discovery TGA (FIG. 86), sob atmosfera de N<sub>2</sub>. As análises foram realizadas no intervalo de temperatura de 35°C a 1000°C com taxa de aquecimento de 20°C/min. A quantidade de amostra utilizada foi de aproximadamente 10,0 mg para cada corpo de prova.

**Figura 86 – Equipamento para análise termogravimétrica TGA.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

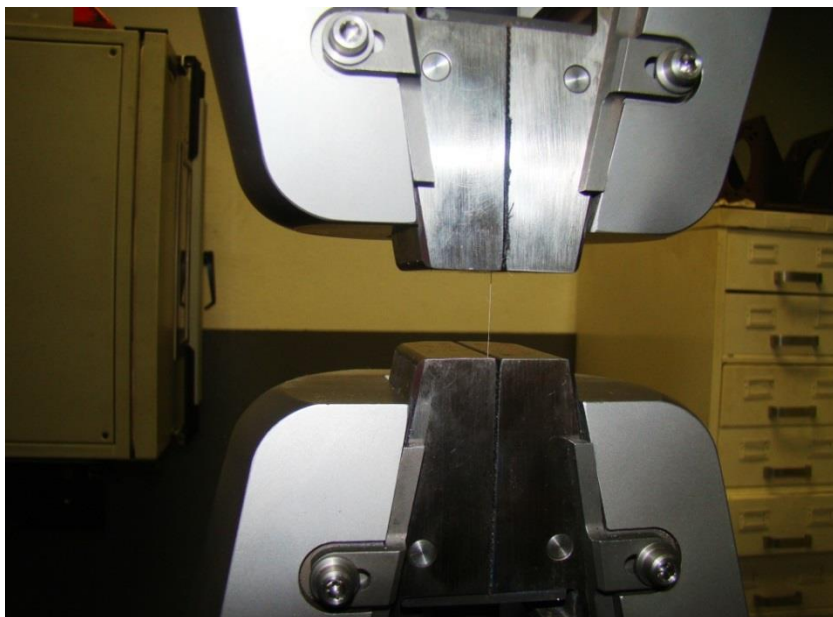
As medidas foram realizadas na temperatura ambiente de 23°C e uma umidade relativa do ar de 50,0%. O resultado gerado foi a média de 3 (três) medidas. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da FCA (Fiat Chrysler Automobiles).

### **3.6.7 Tração**

Os ensaios de tração foram realizados na temperatura ambiente (23°C) e uma umidade relativa do ar de 50,0%, em fios únicos (FIG. 87) de fibra de juta, sisal, rami, coco e banana, com um comprimento útil de 150,0 mm, conforme (NORMA ASTM C1557, 2013) e (NORMA ASTM D3822, 2014) a uma velocidade de 1,0 mm/min e a célula de carga utilizada foi de 1,0 kN, em uma máquina Universal Instron 4467.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da FCA (Fiat Chrysler Automobiles).

**Figura 87 – Ensaio de tração em fio único de fibra a 23°C.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

Os ensaios de tração também foram realizados em temperaturas de 23°C (FIG. 88) no sentido longitudinal e transversal de laminação e 80°C (FIG. 89) no sentido longitudinal e transversal de laminação nas amostras/corpos de prova e uma umidade relativa do ar de 50,0%, conforme (NORMA ASTM D638, 2010), a uma velocidade de 50,0 mm/min e a célula de carga utilizada foi de 30,0 kN, em uma máquina Universal Instron 4467.

**Figura 88 – Ensaio de tração em corpos de prova a 23°C.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da FCA (Fiat Chrysler Automobiles).

**Figura 89 – Ensaio de tração em corpos de prova a 80°C.**



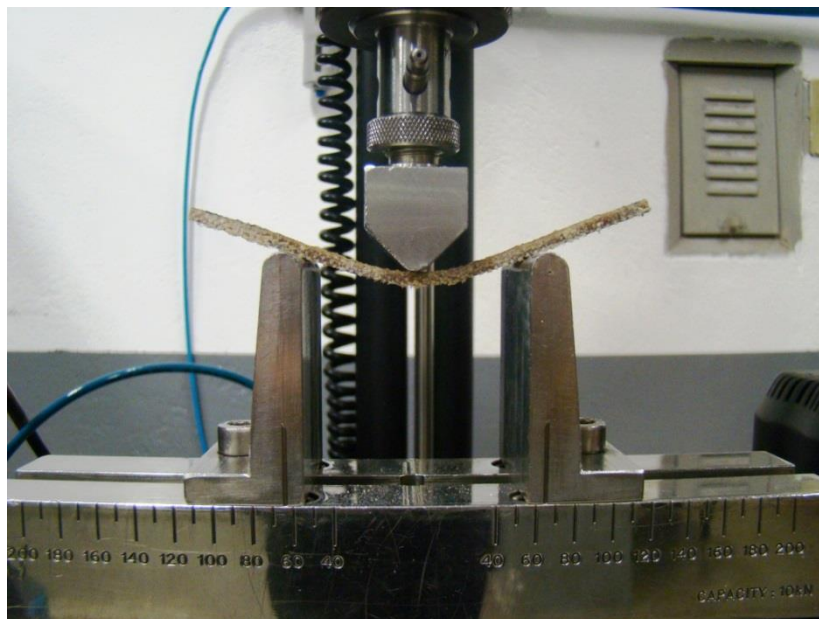
Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da FCA (Fiat Chrysler Automobiles).

### **3.6.8 Flexão**

O teste de flexão (FIG. 90) foi realizado em temperaturas de 23°C e 80°C ) no sentido longitudinal e transversal de laminação nas amostras/corpos de prova e uma umidade relativa do ar de 50,0%, conforme (NORMA ASTM D790, 2010), à uma velocidade de 2,0 mm/min e a célula de carga utilizada foi de 30,0 kN, em uma máquina Universal Instron 4467.

**Figura 90 – Ensaio de flexão em corpos de prova a 23°C.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da FCA (Fiat Chrysler Automobiles).

### **3.6.9 Impacto por queda de dardo**

O teste de impacto por queda de dardo das amostras foi realizado conforme (NORMA FIATAUTO 50424, 2011), em um equipamento CEAST (FIG. 91) modelo 6545 à temperatura ambiente de 23°C e uma umidade relativa do ar de 50,0%.

O ensaio consiste em utilizar um dardo constituído por um percussor hemisférico de aço temperado de  $12,7 \pm 0,2$  mm de diâmetro, equipado com um transdutor de força ligado a um registrador que permite durante o impacto a determinação da força  $F$  em função do tempo  $t$ . Este dardo é levantado a uma altura de 1,0 metro e liberado para o impacto no corpo de prova, sob a ação da gravidade apenas.

O resultado da prova é a energia absorvida em Joules (J), que significa o quanto o material absorve de impacto no momento da queda do dardo, quanto maior a absorção, mais dúctil será o material.

Estes corpos de prova, para o ensaio de impacto por queda de dardo, têm dimensões de 60 x 60 mm.

**Figura 91 – Equipamento CEAST para o teste de impacto por queda de dardo a 23°C.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da FCA (Fiat Chrysler Automobiles).

### **3.6.10 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

A morfologia de fratura das amostras foi estudada em amostras a partir dos testes de tração, visando verificar a adesão fibra-matriz na região da fratura. O equipamento utilizado foi um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Philips (FIG. 92), modelo New XL30 139-2.5, com aumentos de 9 até 20000 vezes.

Por se tratar de um material compósito e isolante, foi necessário recobrir as amostras, utilizando um processo chamado de Metalização, o qual é um método utilizado para preparação de amostras através da deposição por evaporação de um filme de (ouro, platina, carbono etc.) de material condutor em uma determinada região. Nos materiais aqui estudados foram aplicados um filme de ouro que permite a visualização da topografia do material no Microscópio Eletrônico de Varredura. Somente após esta Metalização é que os corpos de prova foram analisados no MEV (FIG. 93 e FIG. 94).

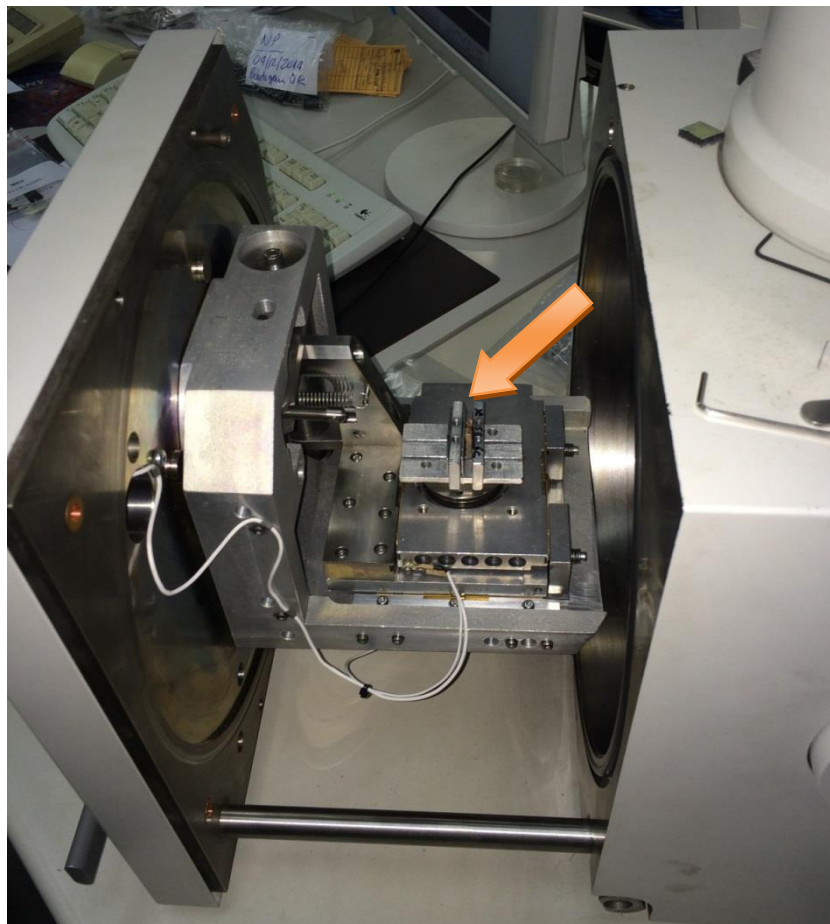


**Figura 92 – MEV Philips, modelo New XL30 139-2.5.**



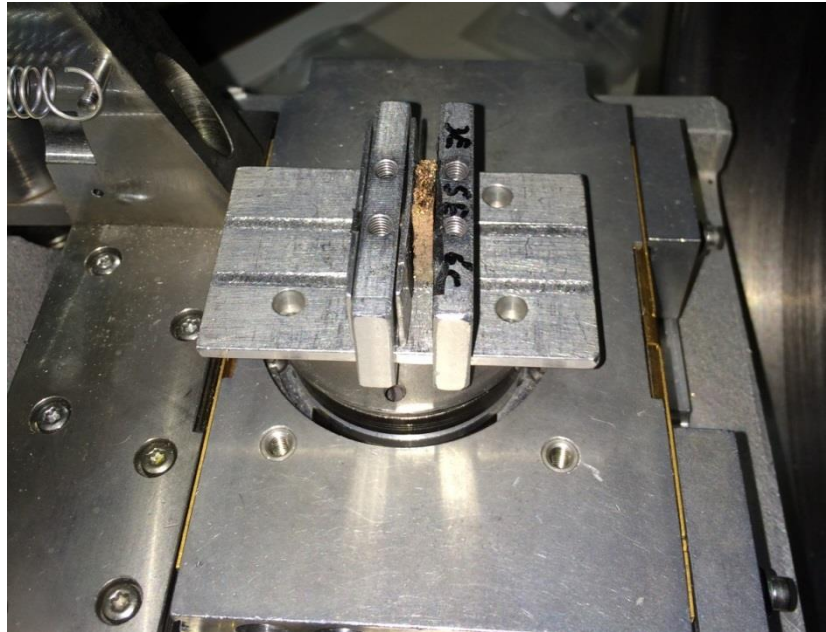
**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

**Figura 93 – Corpo de prova já metalizado fixado no MEV Philips.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

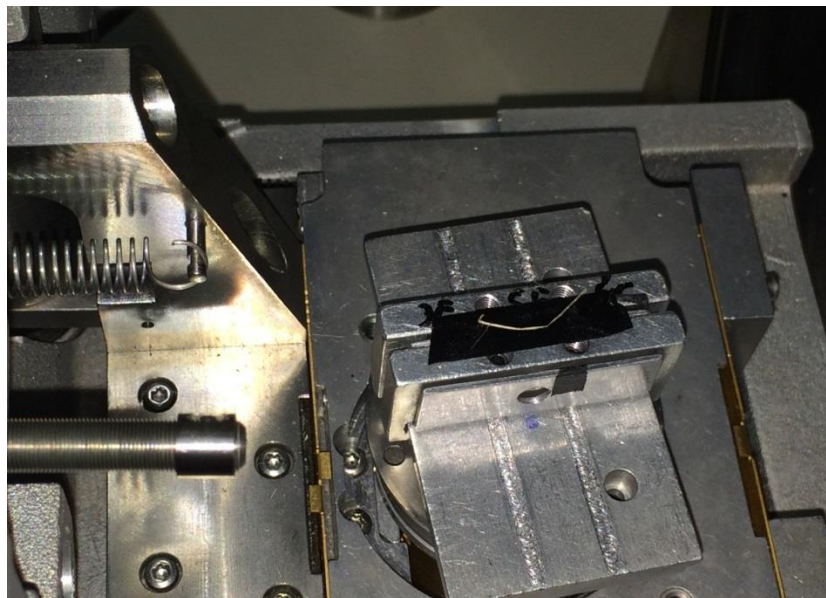
**Figura 94 – Detalhe do corpo de prova já metalizado fixado no MEV Philips.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

Para realizar as análises nos fios de fibras naturais, os fios foram colocados em uma fita adesiva escura para assim poderem ser analisados no MEV (FIG. 95).

**Figura 95 – Detalhe do fio de fibra natural fixado no MEV Philips.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da FCA (Fiat Chrysler Automobiles).

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Aqui são apresentados os resultados obtidos neste trabalho e suas respectivas análises e discussões para cada uma das etapas descritas nas metodologias. Os resultados obtidos nesta tese foram divididos em análise visual dos compósitos, propriedades físicas, mecânicas e morfológicas de cada compósito testado, comparando estas propriedades entre eles.

### 4.1 Análise visual dos compósitos

O compósito EP69-JU31 (69,0% de resina epóxi e 31,0% de fibra de juta em forma de tecido) apresentou boa constituição geométrica, sem alterações dimensionais, estando as mantas de fibra de juta perfeitamente envolvidas pela resina epóxi, porém, é possível notar a presença de vazios ou bolhas de forma muito aparente (FIG. 96).

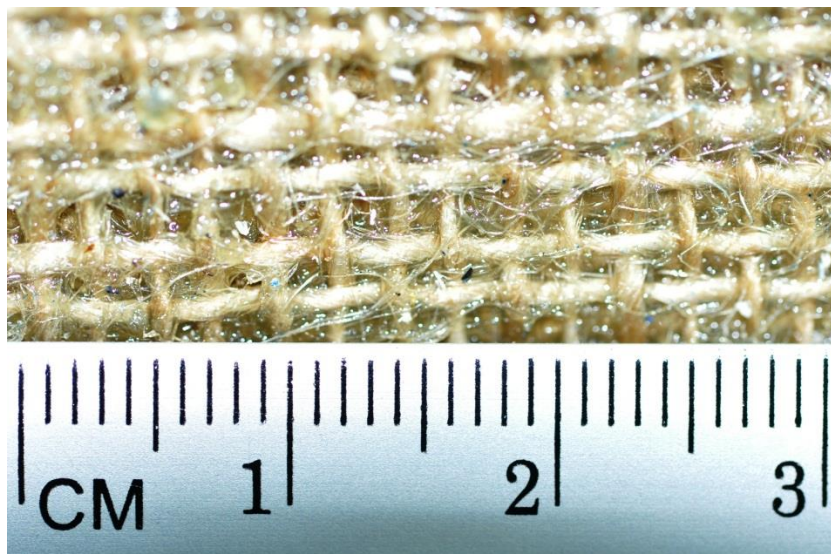
**Figura 96 – Detalhe do compósito EP69-JU31.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

O compósito PO77-JU23 (77,0% de resina poliéster e 23,0% de fibra de juta em forma de tecido) apresentou boa constituição geométrica, sem alterações dimensionais, estando as mantas de fibra de juta perfeitamente envolvidas pela resina poliéster e não é possível notar a presença de vazios ou bolhas de forma aparente (FIG. 97).

**Figura 97 – Detalhe do compósito PO77-JU23.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

O compósito PP50-JU50 (50,0% de polipropileno e 50,0% de fibra de juta em forma de fibras curtas) apresentou boa constituição geométrica, sem alterações dimensionais, estando os fios da fibra de juta perfeitamente envolvidos e inseridos em meio ao polipropileno. Por ter sido um compósito termoformado industrialmente, apresenta um melhor acabamento dentre os compósitos aqui testados e não é possível notar a presença de vazios ou bolhas de forma aparente (FIG. 98).

**Figura 98 – Detalhe do compósito PP50-JU50.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

## 4.2 Propriedades físicas

As propriedades físicas foram analisadas através dos ensaios de microscopia óptica, densidade aparente, absorção de água, perda de umidade, absorção acústica e análise termogravimétrica (TGA).

### 4.2.1 Largura do fio único de fibra natural

Não se pode dizer que o fio da fibra tenha um diâmetro de forma definida, pois em muitos casos as fibras podem assumir formas diversas, totalmente amorfas, isto justifica a necessidade de chamar o valor do comprimento transversal dos fios, colhidos nesta tese, de largura e não de diâmetro.

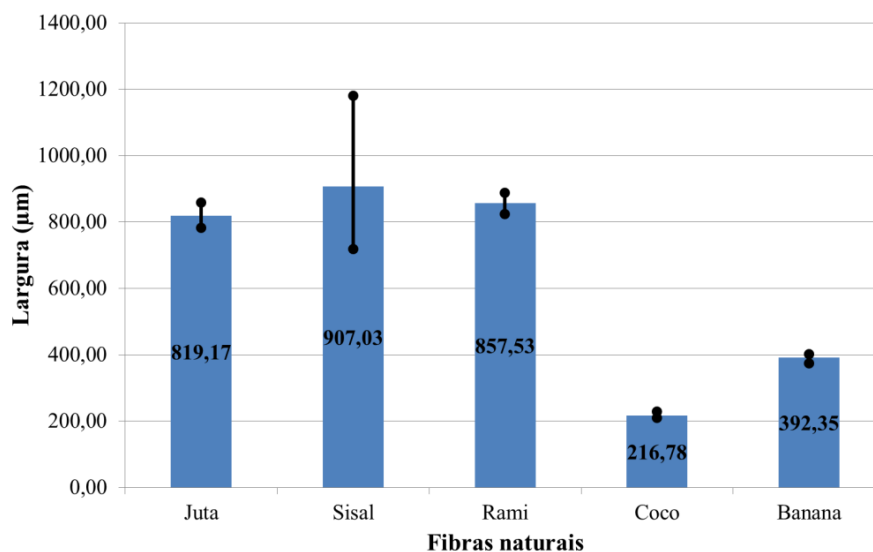
A Tabela 27 apresenta os valores das larguras dos fios das fibras naturais analisados no ensaio de microscopia óptica. Inicialmente, constatou-se que os valores de largura de uma fibra natural tem uma variabilidade muito grande, provavelmente devido a diversos fatores, como local de plantio, tempo de colheita, clima e características do solo, dentre outras.

Foram feitas 5 (cinco) medidas da largura do fio único de fibra natural e constatou-se que o fio de sisal foi o que teve uma maior variação da largura, dentre os testados, já o fio de coco foi o que obteve a menor variabilidade de largura, dentre todos testados. O fio de rami foi o mais homogêneo (GRAF. 08).

**Tabela 27 – Largura dos fios das fibras naturais.**

Medida	Largura ( $\mu\text{m}$ )				
	Juta	Sisal	Rami	Coco	Banana
1	793,07	1180,06	888,09	227,63	401,10
2	782,50	973,55	858,49	222,08	398,81
3	843,23	807,58	871,32	213,47	374,52
4	819,51	855,54	846,65	211,58	389,64
5	857,53	718,44	823,10	209,14	397,66
Mínimo	<b>782,50</b>	<b>718,44</b>	<b>823,10</b>	<b>209,14</b>	<b>374,52</b>
Máximo	<b>857,53</b>	<b>1180,06</b>	<b>888,09</b>	<b>227,63</b>	<b>401,10</b>
Média	<b>819,17</b>	<b>907,03</b>	<b>857,53</b>	<b>216,78</b>	<b>392,35</b>
Desvio Padrão	<b>31,92</b>	<b>178,24</b>	<b>24,64</b>	<b>7,78</b>	<b>10,86</b>
Coefficiente de Variação	<b>3,90%</b>	<b>19,65%</b>	<b>2,87%</b>	<b>3,59%</b>	<b>2,77%</b>

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

**Gráfico 08 – Largura do fio único de fibra natural.**

**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

Comparando os valores encontrados nesta tese com os valores de artigos recentes da literatura (TAB. 28), nota-se que os valores aqui encontrados divergem em muito dos valores da literatura, apesar de não haver muitos dados/artigos do tema na própria literatura para serem comparados. Isto vem confirmar que fios de fibra sofrem muitas variações de região para região e até mesmo dentro da própria região do plantio.

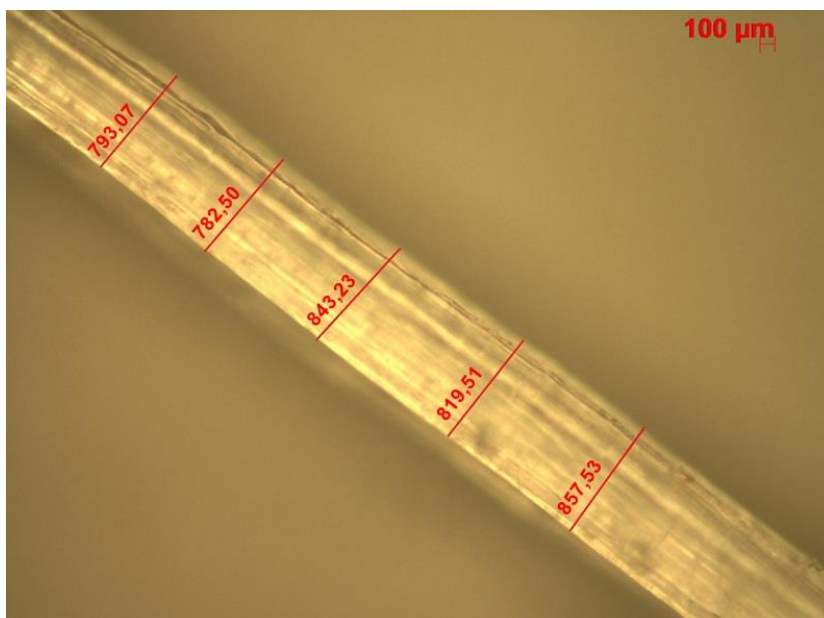
**Tabela 28 – Comparativo de valores de largura desta tese com a literatura.**

Fibra	Diâmetro (µm)	
	SATHISHKUMAR e outros, 2013.	Esta tese
Banana	60-80, 50-250	392,35
Coco	100-160, 100-450	216,78
Juta	40-350	817,53
Rami	50	857,53
Sisal	50-300	907,03

**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

Os valores das larguras do fio de juta analisado, bem como uma imagem de microscopia óptica com um aumento de 200 vezes, é mostrado na Figura 99.

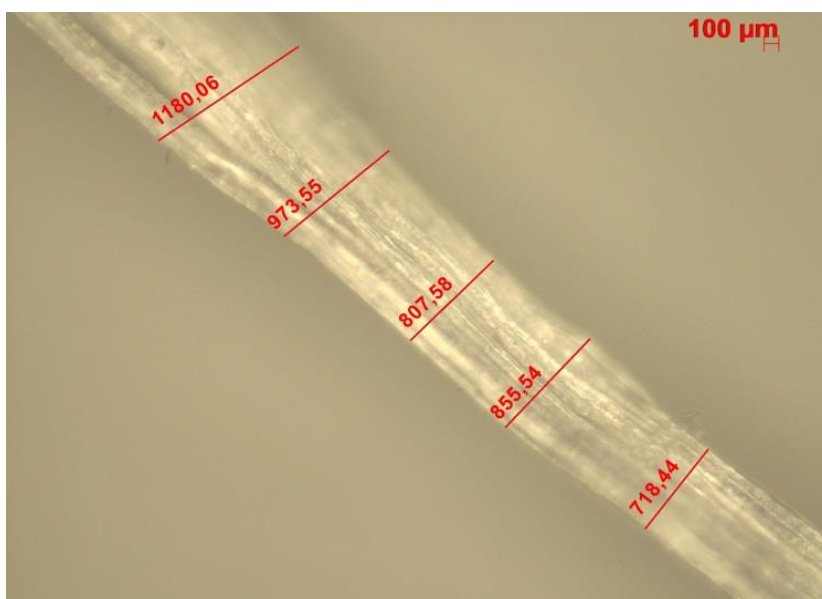
**Figura 99 – Detalhe do fio de fibra de juta com um aumento de 200x.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

Os valores das larguras do fio de sisal analisado, bem como uma imagem de microscopia óptica com um aumento de 200 vezes, é mostrado na Figura 100.

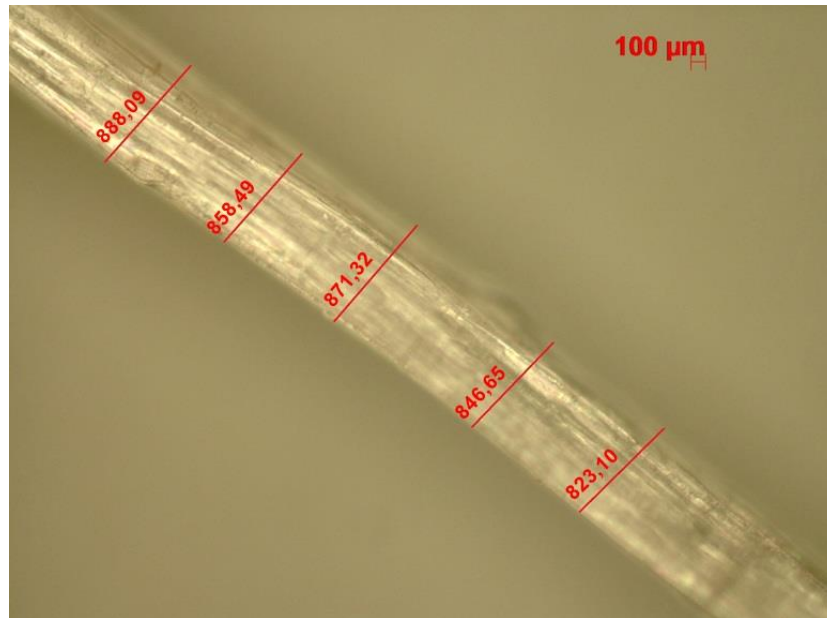
**Figura 100 – Detalhe do fio de fibra de sisal com um aumento de 200x.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

Os valores das larguras do fio de rami analisado, bem como uma imagem de microscopia óptica com um aumento de 200 vezes, é mostrado na Figura 101.

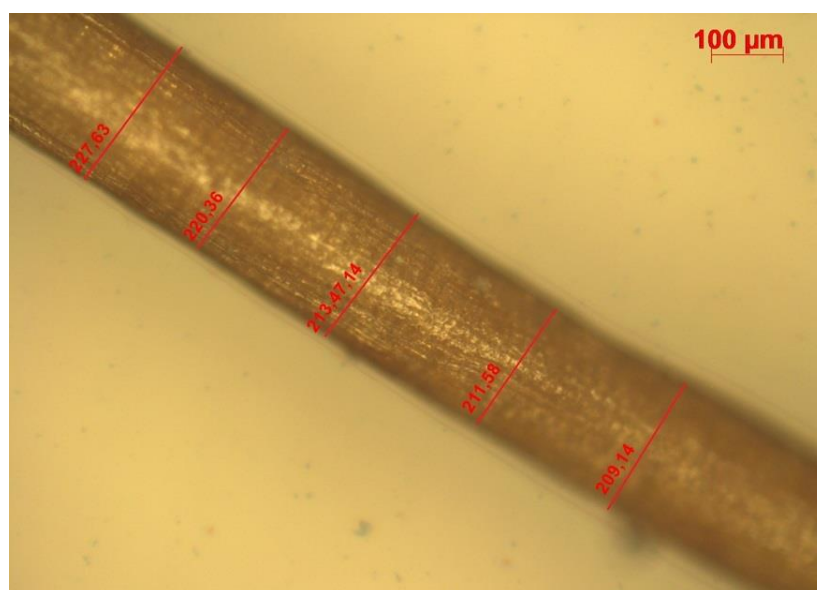
**Figura 101 – Detalhe do fio de fibra de rami com um aumento de 200x.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

Os valores das larguras do fio de coco analisado, bem como uma imagem de microscopia óptica com um aumento de 200 vezes, é mostrado na Figura 102.

**Figura 102 – Detalhe do fio de fibra de coco com um aumento de 200x.**

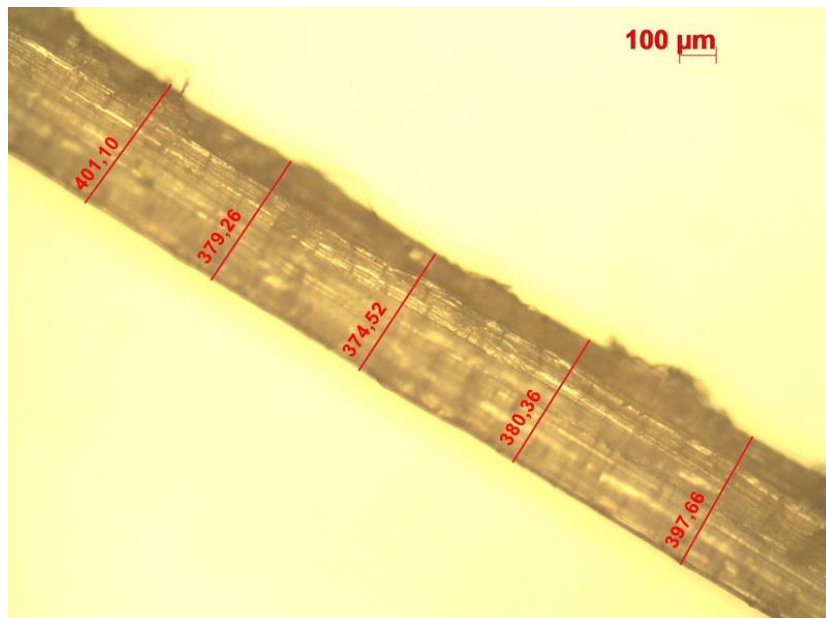


Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.



Os valores das larguras do fio de banana analisado, bem como uma imagem de microscopia óptica com um aumento de 200 vezes, é mostrado na Figura 103.

**Figura 103 – Detalhe do fio de fibra de banana com um aumento de 200x.**

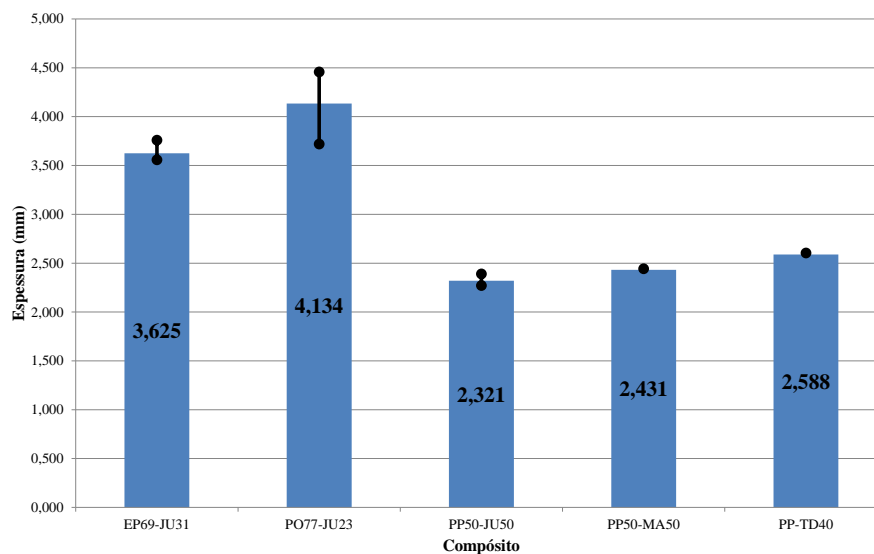


**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

#### **4.2.2 Espessura dos compósitos**

Para cada corpo de prova, foram feitas 5 (cinco) medições de espessura. Foram eliminadas a maior e a menor medição, para evitar erros grosseiros, ficando assim 3 espessuras para cada corpo de prova, sendo 8 amostras de cada compósito. Ou seja, foram feitas 24 medições consideradas válidas de espessura para cada tipo de compósito.

O compósito com maior variação de espessura dentre as amostras foi o PO77-JU23 e o compósito com menor variação foi o PP50-JU50, isto devido ao fato deste último compósito ter sido termoformado industrialmente, enquanto os outros dois EP69-JU31 e PO77-JU23 foram laminadas manualmente (GRAF. 09). Porém, a espessura do compósito PP50-JU50 foi 10,3% menor que o PP-TD40 e 4,5% menor que o PP50-MA50, que são dois materiais já existentes e muito utilizados no mercado.

**Gráfico 09 – Espessura dos compósitos analisados.**

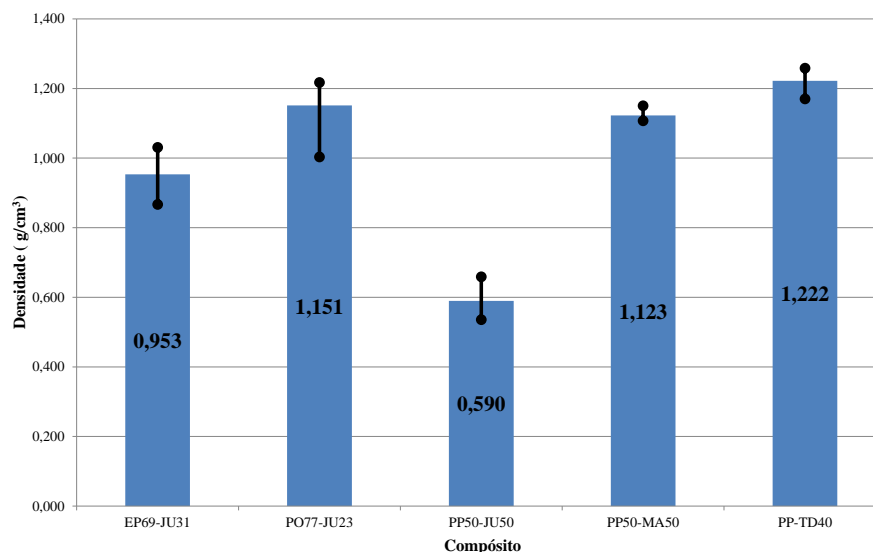
**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

#### 4.2.3 Densidade aparente

O cálculo da densidade aparente foi feito utilizando a média das espessuras dos corpos de prova e a média dos volumes dos mesmos. O Gráfico 09 apresenta os valores de densidade aparente para todos os compósitos analisados. Constatou-se que os valores de densidade medidos foram baixos, quando comparados aos materiais metálicos, cerâmicos, entre outros.

O compósito com maior variação de densidade dentre as amostras foi o PO77-JU23 e o compósito com menor variação foi o PP50-MA50, este último, obtendo uma variação até mesmo menor que o PP-TD40. Nota-se ainda, que o compósito PP50-JU50 apresentou uma densidade 51,7% menor que o PP-TD40 e 47,5% menor que o PP50-MA50. Até mesmo os compósitos de EP69-JU31 e PO77-JU23 que foram laminados manualmente, obtiveram uma densidade menor que os materiais já utilizados na indústria (GRAF. 10).

Isto justifica o crescimento da utilização desses materiais em diversos setores, principalmente na indústria automotiva, pois compósitos reforçados com fibras vegetais tendem a apresentar baixa densidade.

**Gráfico 10 – Densidade aparente dos compósitos analisados.**

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

Os valores de peso, espessura, volume e densidade para os corpos de prova do compósito EP69-JU31 são mostrados na Tabela 29.

**Tabela 29 – Peso, espessura, volume e densidade para o compósito EP69-JU31.**

EP69-JU31				
Corpo de prova	Peso (g)	Espessura (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	13,000	3,710	13,355	0,973
2	11,200	3,589	12,919	0,867
3	12,700	3,579	12,884	0,986
4	12,100	3,759	13,532	0,894
5	12,900	3,662	13,183	0,979
6	11,300	3,566	12,838	0,880
7	13,200	3,558	12,809	1,031
8	13,100	3,574	12,868	1,018
Mínimo	<b>11,200</b>	<b>3,558</b>	<b>12,809</b>	<b>0,867</b>
Máximo	<b>13,200</b>	<b>3,759</b>	<b>13,532</b>	<b>1,031</b>
Média	<b>12,438</b>	<b>3,625</b>	<b>13,049</b>	<b>0,953</b>
Desvio Padrão	<b>0,822</b>	<b>0,079</b>	<b>0,285</b>	<b>0,063</b>
Coefficiente de Variação	<b>6,61%</b>	<b>2,18%</b>	<b>2,18%</b>	<b>6,60%</b>

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

Os valores de peso, espessura, volume e densidade para os corpos de prova do compósito PO77-JU23 são mostrados na Tabela 30.

**Tabela 30 – Peso, espessura, volume e densidade para o compósito PO77-JU23.**

PO77-JU23				
Corpo de prova	Peso (g)	Espessura (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	16,900	4,205	15,138	1,116
2	17,500	4,230	15,229	1,149
3	16,100	4,459	16,051	1,003
4	16,100	3,807	13,704	1,175
5	16,800	4,011	14,441	1,163
6	16,300	3,719	13,390	1,217
7	19,000	4,458	16,050	1,184
8	18,100	4,182	15,056	1,202
Mínimo	<b>16,100</b>	<b>3,719</b>	<b>13,390</b>	<b>1,003</b>
Máximo	<b>19,000</b>	<b>4,459</b>	<b>16,051</b>	<b>1,217</b>
Média	<b>17,100</b>	<b>4,134</b>	<b>14,882</b>	<b>1,151</b>
Desvio Padrão	<b>1,033</b>	<b>0,294</b>	<b>1,059</b>	<b>0,069</b>
Coefficiente de Variação	<b>6,04%</b>	<b>7,11%</b>	<b>7,11%</b>	<b>6,03%</b>

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

Os valores de peso, espessura, volume e densidade para os corpos de prova do compósito PP50-JU50 são mostrados na Tabela 31.

**Tabela 31 – Peso, espessura, volume e densidade para o compósito PP50-JU50.**

PP50-JU50				
Corpo de prova	Peso (g)	Espessura (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	5,500	2,318	8,346	0,659
2	4,700	2,285	8,226	0,571
3	4,500	2,333	8,400	0,536
4	5,100	2,390	8,605	0,593
5	5,200	2,290	8,243	0,631
6	4,600	2,379	8,563	0,537
7	4,700	2,301	8,284	0,567
8	5,100	2,271	8,177	0,624
Mínimo	<b>4,500</b>	<b>2,271</b>	<b>8,177</b>	<b>0,536</b>
Máximo	<b>5,500</b>	<b>2,390</b>	<b>8,605</b>	<b>0,659</b>
Média	<b>4,925</b>	<b>2,321</b>	<b>8,355</b>	<b>0,590</b>
Desvio Padrão	<b>0,370</b>	<b>0,042</b>	<b>0,151</b>	<b>0,046</b>
Coefficiente de Variação	<b>7,51%</b>	<b>1,81%</b>	<b>1,81%</b>	<b>7,85%</b>

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

Os valores de peso, espessura, volume e densidade para os corpos de prova do compósito PP50-MA50 são mostrados na Tabela 32

**Tabela 32 – Peso, espessura, volume e densidade para o compósito PP50-MA50.**

PP50-MA50				
Corpo de prova	Peso (g)	Espessura (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	ρ (g/cm <sup>3</sup> )
1	9,800	2,433	8,760	1,119
2	9,700	2,420	8,711	1,114
3	9,700	2,434	8,761	1,107
4	10,000	2,443	8,795	1,137
5	9,800	2,420	8,711	1,125
6	9,700	2,434	8,761	1,107
7	10,100	2,439	8,782	1,150
8	9,800	2,427	8,736	1,122
Mínimo	<b>9,700</b>	<b>2,420</b>	<b>8,711</b>	<b>1,107</b>
Máximo	<b>10,100</b>	<b>2,443</b>	<b>8,795</b>	<b>1,150</b>
Média	<b>9,825</b>	<b>2,431</b>	<b>8,752</b>	<b>1,123</b>
Desvio Padrão	<b>0,160</b>	<b>0,009</b>	<b>0,032</b>	<b>0,016</b>
Coefficiente de Variação	<b>1,63%</b>	<b>0,37%</b>	<b>0,37%</b>	<b>1,43%</b>

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

Os valores de peso, espessura, volume e densidade para os corpos de prova do compósito PP-TD40 são mostrados na Tabela 33.

**Tabela 33 – Peso, espessura, volume e densidade para o compósito PP-TD40.**

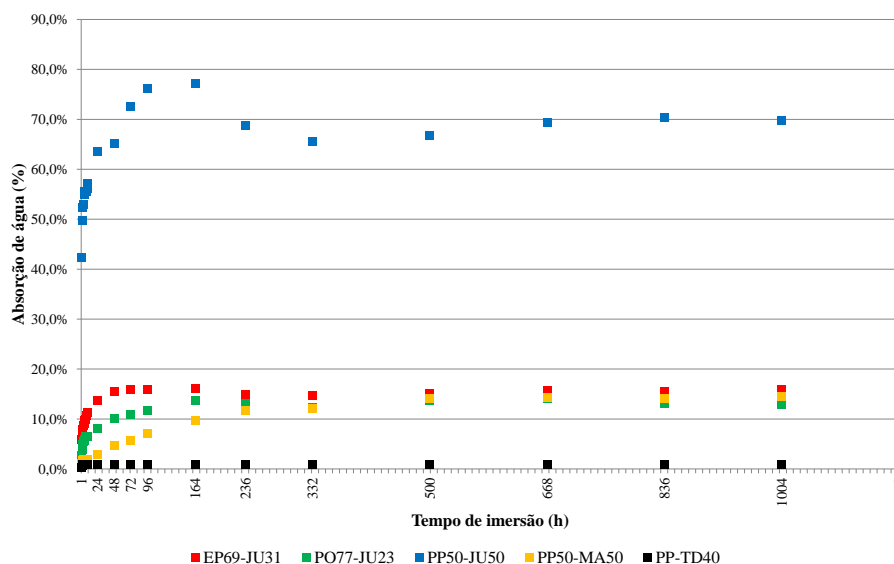
PP-TD40				
Corpo de prova	Peso (g)	Espessura (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	ρ (g/cm <sup>3</sup> )
1	11,700	2,582	9,296	1,259
2	11,700	2,605	9,377	1,248
3	11,300	2,577	9,277	1,218
4	10,900	2,588	9,317	1,170
5	11,500	2,589	9,320	1,234
6	11,600	2,594	9,337	1,242
7	11,000	2,579	9,283	1,185
8	11,400	2,593	9,334	1,221
Mínimo	<b>10,900</b>	<b>2,577</b>	<b>9,277</b>	<b>1,170</b>
Máximo	<b>11,700</b>	<b>2,605</b>	<b>9,377</b>	<b>1,259</b>
Média	<b>11,388</b>	<b>2,588</b>	<b>9,318</b>	<b>1,222</b>
Desvio Padrão	<b>0,329</b>	<b>0,010</b>	<b>0,034</b>	<b>0,033</b>
Coefficiente de Variação	<b>2,89%</b>	<b>0,37%</b>	<b>0,37%</b>	<b>2,73%</b>

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

#### 4.2.4 Absorção de água

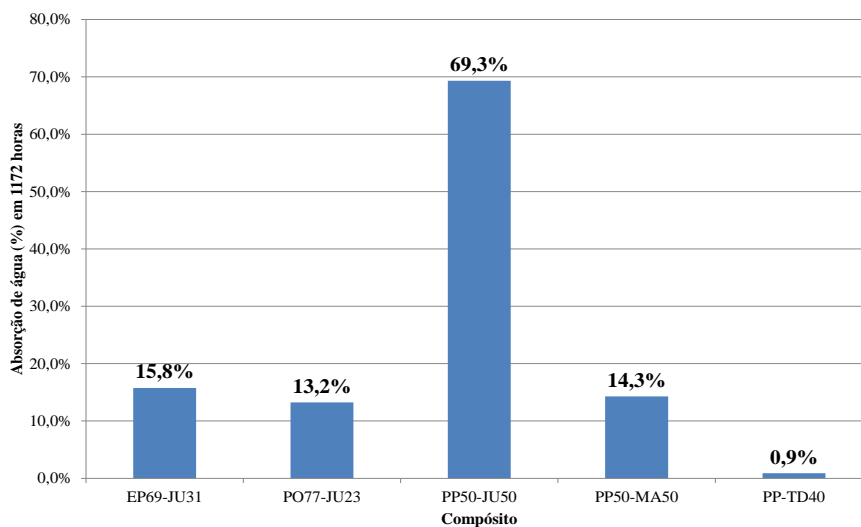
O Gráfico 11 apresenta o percentual de água absorvida em função do tempo de imersão. Nota-se que a absorção de água aumenta bastante com o teor de fibras vegetais, as quais têm natureza hidrofílica. O aumento do percentual de fibra provocou o aumento da absorção de água, pois o compósito PP50-JU50 que possui a maior percentagem de fibra de juta, com 50,0%, tem os valores de absorção de água mais significativos para diversos tempos de imersão, chegando a um pico de 77,2% de absorção a 164 horas de imersão, seguido pelos compósitos de EP69-JU31, com 31,0% de fibra e o compósito PO77-JU23 com 23,0% de fibra respectivamente.

**Gráfico 11 – Absorção de água por tempo de imersão.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

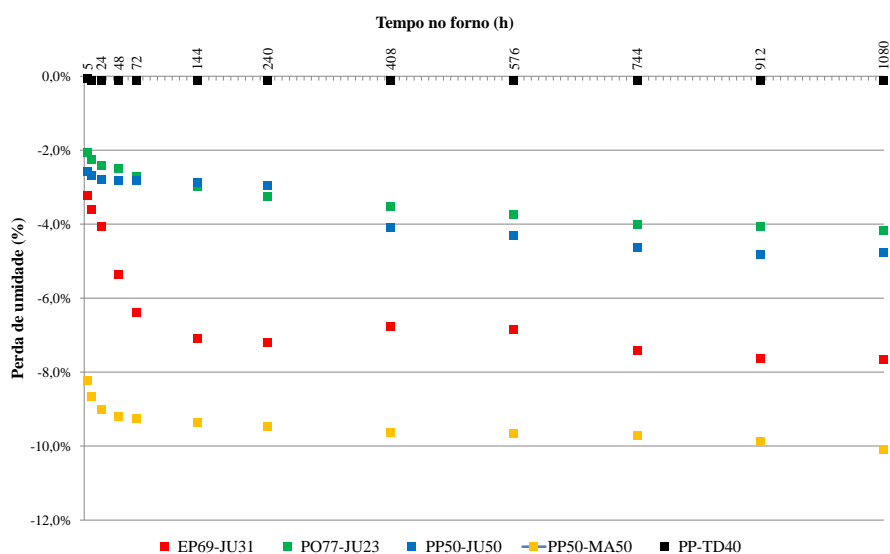
Após 1172 horas de imersão, já com o material em equilíbrio sem absorver mais água em função do tempo, o material que apresentou maior absorção de água foi o PP50-JU50 com uma absorção de 69,3% de água (GRÁF. 12). Já o PP-TD40 absorveu apenas 0,9% de água e se estabilizou após apenas 3 horas de imersão, o que ocorreu pelo fato deste material não possuir nenhuma percentagem de fibra de juta. Segundo Pigatto (2009), realizar um tratamento alcalino nas fibras diminui a absorção de água dos compósitos em tempos curtos de imersão. Entre os componentes principais das fibras vegetais a hemicelulose é a principal responsável pela absorção de água da fibra. O tratamento alcalino extrai ao menos parte da hemicelulose e desta maneira espera-se uma redução no nível de absorção da fibra.

**Gráfico 12 – Absorção de água em 1172 horas.**

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

#### 4.2.5 Perda de umidade

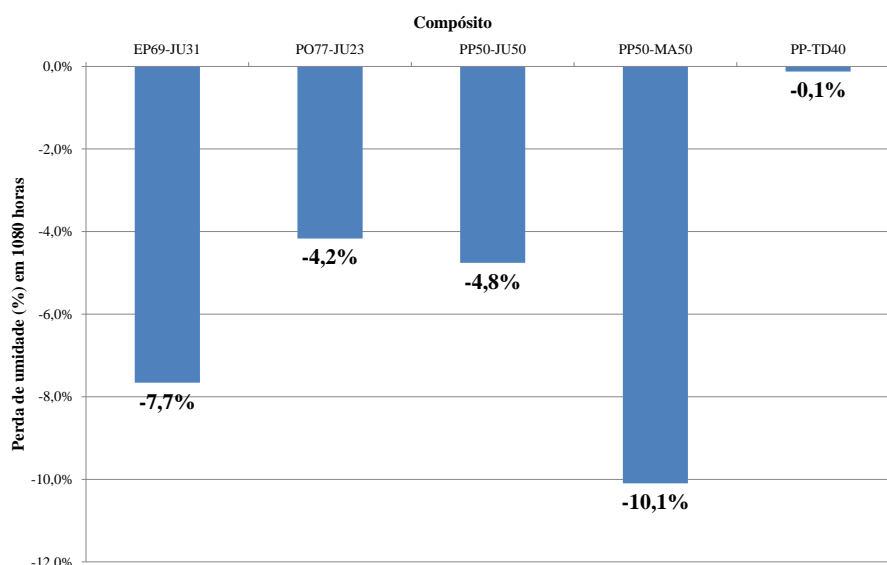
O Gráfico 13 apresenta o percentual de perda de umidade em função do tempo de forno. Observa-se que a perda de umidade não teve uma alteração em função do aumento do teor de fibras vegetais, pois o compósito PP50-JU50 que possui a maior percentagem de fibra de juta, com 50,0%, teve apenas a terceira maior perda entre todos os materiais testados.

**Gráfico 13 – Perda de umidade dos compósitos.**

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

Após 1080 horas de forno, já com o material em equilíbrio sem perder mais umidade em função do tempo, o material que apresentou maior perda de umidade foi o PP50-MA50 com uma perda de 10,1% de umidade (GRÁF. 14). Este compósito possui 50,0% de madeira em sua composição e a madeira é um material orgânico, sólido, de composição complexa, onde predominam as fibras de celulose e hemicelulose.

**Gráfico 14 – Perda de umidade em 1080 horas.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

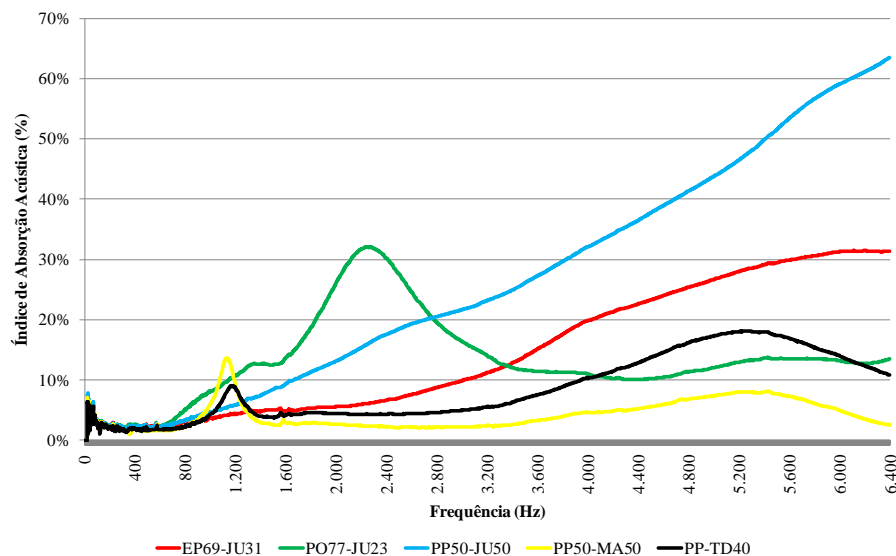
#### 4.2.6 Absorção acústica

A curva de absorção acústica de cada compósito foi obtida através da média de 5 corpos de prova testados e foi feita uma combinação/interpolação das curvas de baixa com as curvas de alta frequência para obtenção de uma única curva com uma faixa de 0 a 6400 Hz para cada compósito (GRÁF. 15).

Os resultados obtidos foram extremamente interessantes, pois os compósitos PP50-JU50 e EP69-JU31 obtiveram uma melhor absorção acústica em relação aos compósitos PP-TD40 e PP50-MA50 em frequências de 1250 até 6400 Hz onde obtiveram absorções de 64,0 e 31,0% respectivamente, mostrando que compósitos com maior percentagens de fibra natural tiveram maiores taxas de absorção acústica.

Já o compósito PO77-JU23 obteve o melhor resultado dentre todos os testados na frequência de 2250 Hz, com 32,0% de absorção.



**Gráfico 15 – Absorção acústica dos compósitos.**

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

#### 4.2.7 Análise termogravimétrica (TGA)

As curvas do percentual de massa em função da temperatura dos compósitos testados estão apresentadas no Gráfico 16, onde se observam claramente diferentes estágios na perda de massa para os materiais testados. Porém no compósito EP69-JU31 ocorreu uma degradação mais cedo em relação aos outros compósitos e no material PP50-JU50 obteve-se uma estabilidade térmica maior, iniciando sua degradação mais tarde em relação aos outros compósitos.

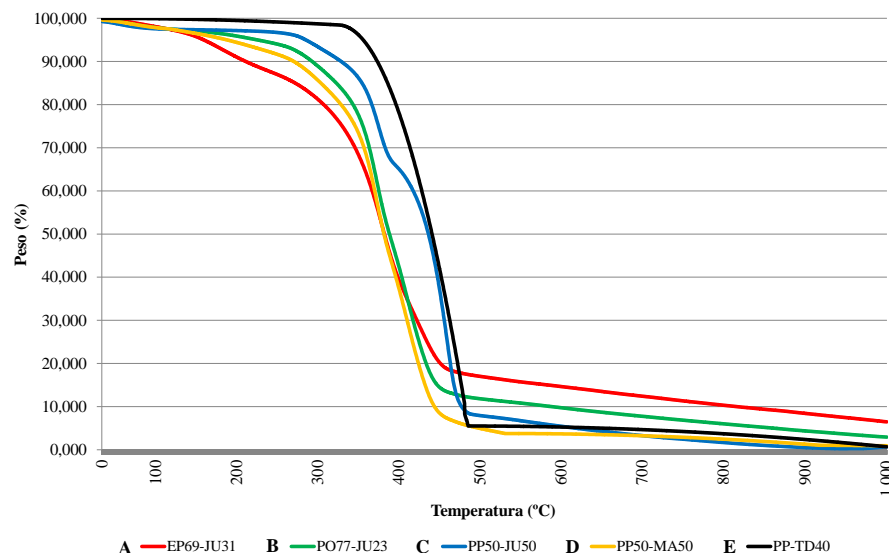
O resultado da curva TGA para o compósito com 31,0% de fibras de juta reforçada com resina epóxi (EP69-JU31) foi ilustrado no Gráfico 16A. Até a temperatura de 100 °C o compósito perde apenas 1,9% do peso inicial. A 200 °C a perda de peso já é 9,0% de massa corresponde à remoção de solvente na matriz polimérica. Entre 200 °C e 450 °C, a perda de peso foi aproximadamente 70,7%, devido à degradação e volatilização das fibras de juta e resina epóxi presentes na composição. Depois de 450 °C o compósito mantém uma perda de massa linear até 1000 °C, onde o resíduo final é apenas 6,5% da massa inicial.

O resultado da curva TGA para o compósito com 23,0% de fibras de juta reforçada com resina poliéster (PO77-JU23) foi ilustrado no Gráfico 16B. Até a temperatura de 100 °C o compósito perde apenas 2,2% do peso inicial. A 200 °C a perda de peso passa para 4,1% de massa corresponde à remoção de solvente na matriz polimérica. Entre 200 °C e 450 °C, a perda de peso foi aproximadamente 81,3%, devido à degradação e volatilização das fibras de

juta e resina poliéster presentes na composição. Depois de 450 °C o compósito mantém uma perda de massa linear até 1000 °C, onde o resíduo final é apenas 2,9% da massa inicial.

O resultado da curva TGA para o compósito com 50,0% de fibras de juta reforçada com polipropileno (PP50-JU50) foi ilustrado no Gráfico 16C. Até à temperatura de 100 °C o compósito perde apenas 2,4% do peso inicial. A 200 °C a perda de peso ainda é baixa com apenas 2,8% de massa e a 260 °C a perda de peso continua baixa com 3,5% da massa inicial. Entre 260 °C e 450 °C, a perda de peso foi aproximadamente 86,9%, devido à degradação e volatilização das fibras de juta e polipropileno presentes na composição. Depois de 450 °C o compósito mantém uma perda de massa linear até 1000 °C, onde o resíduo final é apenas 6,5% da massa inicial.

**Gráfico 16 – Termograma TGA dos compósitos.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

### 4.3 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas foram analisadas através dos ensaios de tração, flexão e impacto por queda de dardo.

#### 4.3.1 Tração

A Tabela 34 mostra os valores para a carga de ruptura (N) e deslocamento (mm) obtidos no ensaio de tração em fios únicos de fibra de juta, sisal, rami, coco e banana a 23°C.

Foram feitas medições em 10 corpos de prova e eliminadas as 5 medições de carga mais discrepantes da média global.

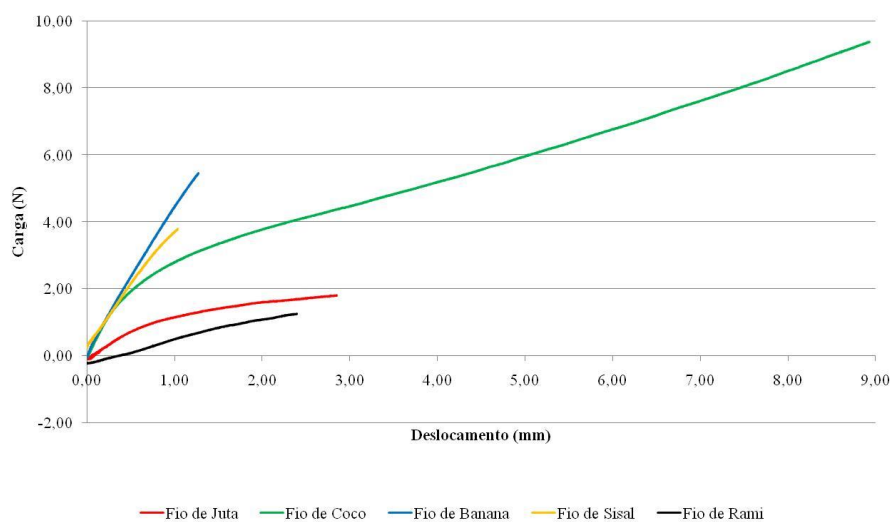
**Tabela 34 – Valores do ensaio de tração a 23°C dos fios únicos de fibra natural.**

Corpo de Prova	Fio de Juta		Fio de Coco		Fio de Banana		Fio de Sisal		Fio de Rami	
	$\sigma$ - Carga de Ruptura (N)	$\epsilon$ - Deslocamento (mm)	Carga de Ruptura (N)	Deslocamento (mm)	Carga de Ruptura (N)	Deslocamento (mm)	Carga de Ruptura (N)	Deslocamento (mm)	Carga de Ruptura (N)	Deslocamento (mm)
1	1,63	1,08	9,57	9,16	5,22	0,82	3,79	1,03	0,34	0,91
2	1,80	2,85	5,27	11,76	4,78	1,17	2,27	1,02	0,75	1,39
3	1,55	1,25	6,69	10,74	5,37	0,64	2,12	1,66	0,51	1,33
4	1,59	0,94	7,35	8,76	5,45	1,27	3,22	1,08	1,26	2,39
5	1,54	2,30	6,35	12,88	6,00	0,85	1,61	0,32	0,49	1,37
Mínimo	<b>1,54</b>	<b>0,94</b>	<b>5,27</b>	<b>8,76</b>	<b>4,78</b>	<b>0,64</b>	<b>1,61</b>	<b>0,32</b>	<b>0,34</b>	<b>0,91</b>
Máximo	<b>1,80</b>	<b>2,85</b>	<b>9,57</b>	<b>12,88</b>	<b>6,00</b>	<b>1,27</b>	<b>3,79</b>	<b>1,66</b>	<b>1,26</b>	<b>2,39</b>
Média	<b>1,62</b>	<b>1,68</b>	<b>7,05</b>	<b>10,66</b>	<b>5,36</b>	<b>0,95</b>	<b>2,60</b>	<b>1,02</b>	<b>0,67</b>	<b>1,48</b>
Desvio Padrão	<b>0,11</b>	<b>0,84</b>	<b>1,60</b>	<b>1,73</b>	<b>0,44</b>	<b>0,26</b>	<b>0,88</b>	<b>0,48</b>	<b>0,36</b>	<b>0,55</b>
Coefficiente de Variação	<b>6,52%</b>	<b>50,09%</b>	<b>22,69%</b>	<b>16,25%</b>	<b>8,20%</b>	<b>27,54%</b>	<b>33,94%</b>	<b>46,50%</b>	<b>53,89%</b>	<b>37,16%</b>

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

As curvas do ensaio de tração para um exemplar único de cada tipo de fio de fibra natural testada estão apresentadas no Gráfico 17.

**Gráfico 17 – Curvas do ensaio de tração a 23°C dos fios únicos de fibra natural.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

A fibra de coco suportou a maior média para a carga de ruptura, que foi de 9,57 N, tendo também a maior média das medições, com 7,05 N, o que significa ser 1.052,2% mais

resistente que o fio de rami que suportou apenas 0,67 N em média na ruptura. Dentre os fios testados, o fio com menor variação na sua carga de ruptura foi o fio de juta, com apenas 1,1% de variação, obtendo assim um desvio padrão menor do que todos os outros testados. Esses resultados justificam assim seu uso como reforço nos compósitos aqui criados e testados com resinas epóxi, poliéster e polipropileno.

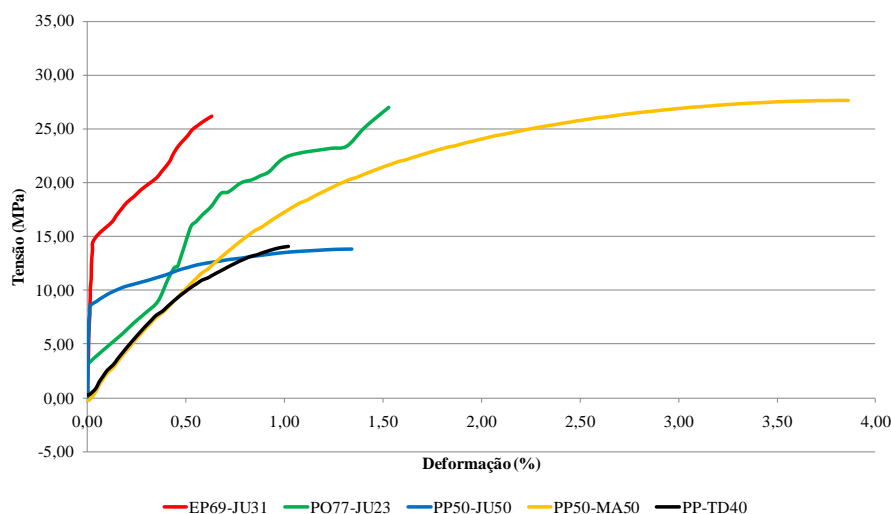
A Tabela 35 mostra os valores para a tensão de ruptura (MPa) e deformação (%) obtidos no ensaio de tração dos compósitos no sentido longitudinal de laminação a 23°C. Foram feitas medições em 10 corpos de prova e eliminadas as 5 medições de carga mais discrepantes da média global.

**Tabela 35 – Valores do ensaio de tração a 23°C no sentido longitudinal de laminação.**

Corpo de Prova	Tração 23 °C Longitudinal EP69-JU31		Tração 23 °C Longitudinal PO77-JU23		Tração 23 °C Longitudinal PP50-JU50		Tração 23 °C Longitudinal PP50-MA50		Tração 23 °C Longitudinal PP-TD40	
	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)
1	30,46	0,03	21,69	1,53	10,45	0,02	27,68	3,83	15,22	1,17
2	28,60	0,18	25,46	0,73	13,80	1,34	28,10	3,63	10,25	1,17
3	26,13	0,63	28,45	0,86	10,18	0,47	28,36	3,56	14,04	1,02
4	25,61	0,01	25,25	0,83	11,47	0,26	27,98	3,43	10,23	1,17
5	23,00	0,21	27,00	1,53	12,16	0,42	27,64	3,66	10,00	1,17
Mínimo	<b>23,00</b>	<b>0,01</b>	<b>21,69</b>	<b>0,73</b>	<b>10,18</b>	<b>0,02</b>	<b>27,64</b>	<b>3,43</b>	<b>10,00</b>	<b>1,02</b>
Máximo	<b>30,46</b>	<b>0,63</b>	<b>28,45</b>	<b>1,53</b>	<b>13,80</b>	<b>1,34</b>	<b>28,36</b>	<b>3,83</b>	<b>15,22</b>	<b>1,17</b>
Média	<b>26,76</b>	<b>0,21</b>	<b>25,57</b>	<b>1,10</b>	<b>11,61</b>	<b>0,50</b>	<b>27,95</b>	<b>3,62</b>	<b>11,95</b>	<b>1,14</b>
Desvio Padrão	<b>2,87</b>	<b>0,25</b>	<b>2,53</b>	<b>0,40</b>	<b>1,46</b>	<b>0,50</b>	<b>0,30</b>	<b>0,15</b>	<b>2,49</b>	<b>0,07</b>
Coefficiente de Variação	<b>10,72%</b>	<b>118,27%</b>	<b>9,88%</b>	<b>36,35%</b>	<b>12,54%</b>	<b>98,86%</b>	<b>1,07%</b>	<b>4,04%</b>	<b>20,80%</b>	<b>5,88%</b>

**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

As curvas do ensaio de tração para um exemplar único de cada tipo de compósito testado no sentido longitudinal de laminação a 23°C estão apresentadas no Gráfico 18. E não apresentaram linhas suaves, nota-se uma clara contribuição da fibra de juta como reforço, alterando o comportamento das curvas. Os compósitos EP69-JU31, PO77-JU23 e PP50-MA50 suportaram praticamente a mesma tensão de ruptura de aproximadamente de 27,0 MPA, porém com deformações distintas, sendo o PP50-MA50 com maior deformação entre todos. Observa-se ainda que a adição da fibra de juta no polipropileno, praticamente não alterou sua máxima tensão de ruptura.

**Gráfico 18 – Curvas do ensaio de tração a 23°C no sentido longitudinal de laminação.**

**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

A Tabela 36 mostra os valores para a tensão de ruptura (MPa) e deformação (%) obtidos no ensaio de tração dos compósitos no sentido transversal de laminação a 23°C. Foram feitas medições em 10 corpos de prova e eliminadas as 5 medições de carga mais discrepantes da média global.

**Tabela 36 – Valores do ensaio de tração a 23°C no sentido transversal de laminação.**

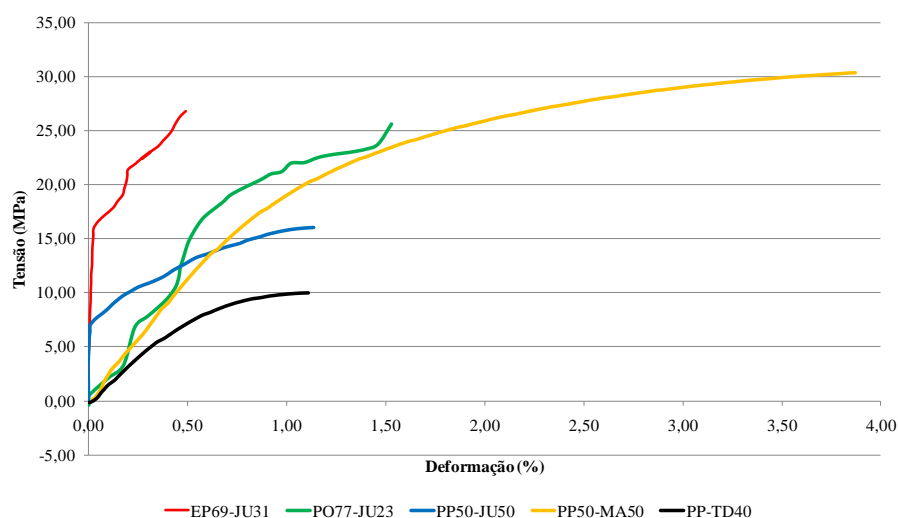
Corpo de Prova	Tração 23 °C Transversal EP69-JU31		Tração 23 °C Transversal PO77-JU23		Tração 23 °C Transversal PP50-JU50		Tração 23 °C Transversal PP50-MA50		Tração 23 °C Transversal PP-TD40	
	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)
1	30,71	0,11	25,62	1,53	16,05	1,13	30,80	4,87	9,70	1,00
2	28,64	0,21	29,35	0,73	13,94	0,21	30,82	5,51	9,96	1,11
3	26,74	0,49	30,45	0,86	15,21	1,23	30,70	5,43	8,81	0,73
4	27,10	0,09	29,65	0,95	18,34	0,05	30,42	5,32	9,93	1,23
5	26,60	0,25	31,26	1,72	14,84	0,38	30,60	6,21	9,24	0,90
Mínimo	<b>26,60</b>	<b>0,09</b>	<b>25,62</b>	<b>0,73</b>	<b>13,94</b>	<b>0,05</b>	<b>30,42</b>	<b>4,87</b>	<b>8,81</b>	<b>0,73</b>
Máximo	<b>30,71</b>	<b>0,49</b>	<b>31,26</b>	<b>1,72</b>	<b>18,34</b>	<b>1,23</b>	<b>30,82</b>	<b>6,21</b>	<b>9,96</b>	<b>1,23</b>
Média	<b>27,96</b>	<b>0,23</b>	<b>29,27</b>	<b>1,16</b>	<b>15,68</b>	<b>0,60</b>	<b>30,67</b>	<b>5,47</b>	<b>9,53</b>	<b>0,99</b>
Desvio Padrão	<b>1,74</b>	<b>0,16</b>	<b>2,17</b>	<b>0,44</b>	<b>1,67</b>	<b>0,54</b>	<b>0,16</b>	<b>0,48</b>	<b>0,49</b>	<b>0,19</b>
Coefficiente de Variação	<b>6,21%</b>	<b>69,13%</b>	<b>7,41%</b>	<b>37,91%</b>	<b>10,66%</b>	<b>90,50%</b>	<b>0,53%</b>	<b>8,83%</b>	<b>5,19%</b>	<b>19,33%</b>

**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

As curvas do ensaio de tração para um exemplar único de cada tipo de compósito no sentido transversal de laminação a 23°C estão apresentadas no Gráfico 19. E também não apresentaram linhas suaves, sendo que os compósitos EP69-JU31, PO77-JU23 e PP50-MA50 continuaram suportando praticamente a mesma tensão de ruptura de aproximadamente 29,0

MPa, porém ainda com deformações distintas, sendo o PP50-MA50 com maior deformação entre todos. Mas neste caso, a adição da fibra de juta no polipropileno aumentou sua máxima tensão de ruptura em 64,5%.

**Gráfico 19 – Curvas do ensaio de tração a 23°C no sentido transversal de laminação.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

A Tabela 37 mostra os valores para a tensão de ruptura (MPa) e deformação (%) obtidos no ensaio de tração dos compósitos no sentido longitudinal de laminação a 80°C. Foram feitas medições em 10 corpos de prova e eliminadas as 5 medições de carga mais discrepantes da média global.

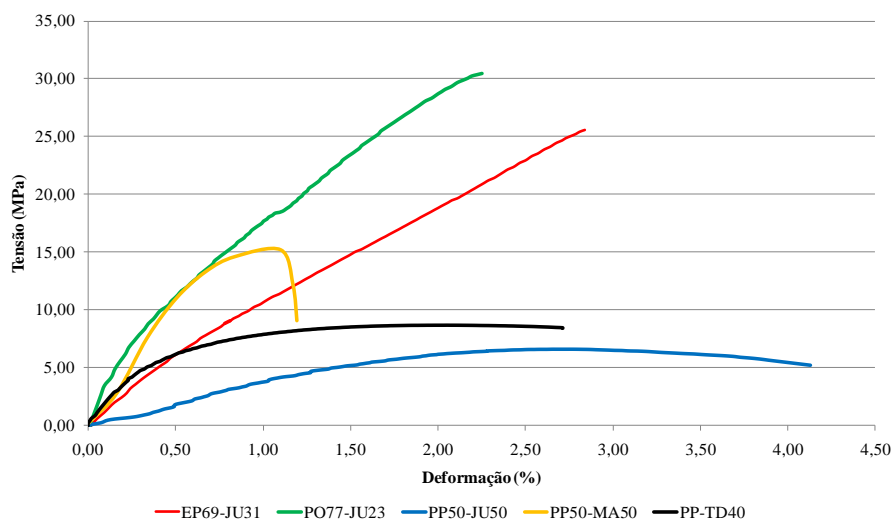
Os compósitos EP69-JU31 e PO77-JU23 suportaram as maiores tensões de ruptura de aproximadamente 21,75 MPa e 24,02 MPa respectivamente na média. Sendo muito maiores do que os demais materiais. Nota-se que o efeito temperatura contribuiu em muito para a queda da tensão dos materiais com altos valores de polipropileno em sua composição.

**Tabela 37 – Valores do ensaio de tração a 80°C no sentido longitudinal de laminação.**

Corpo de Prova	Tração 80 °C Longitudinal EP69-JU31		Tração 80 °C Longitudinal PO77-JU23		Tração 80 °C Longitudinal PP50-JU50		Tração 80 °C Longitudinal PP50-MA50		Tração 80 °C Longitudinal PP-TD40	
	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)
1	25,54	2,84	21,13	2,31	5,43	2,53	11,57	1,00	8,64	2,05
2	19,98	2,25	17,72	1,61	5,72	2,50	17,14	0,67	8,79	2,07
3	22,71	2,71	30,45	2,25	8,13	2,85	15,15	1,10	9,08	2,18
4	20,05	2,15	23,70	2,50	6,58	2,78	11,57	0,90	8,95	2,14
5	20,49	2,20	27,10	2,07	7,80	2,87	14,07	1,00	8,80	2,07
Mínimo	<b>19,98</b>	<b>2,15</b>	<b>17,72</b>	<b>1,61</b>	<b>5,43</b>	<b>2,50</b>	<b>11,57</b>	<b>0,67</b>	<b>8,64</b>	<b>2,05</b>
Máximo	<b>25,54</b>	<b>2,84</b>	<b>30,45</b>	<b>2,50</b>	<b>8,13</b>	<b>2,87</b>	<b>17,14</b>	<b>1,10</b>	<b>9,08</b>	<b>2,18</b>
Média	<b>21,75</b>	<b>2,43</b>	<b>24,02</b>	<b>2,15</b>	<b>6,73</b>	<b>2,71</b>	<b>13,90</b>	<b>0,93</b>	<b>8,85</b>	<b>2,10</b>
Desvio Padrão	<b>2,39</b>	<b>0,32</b>	<b>4,97</b>	<b>0,34</b>	<b>1,21</b>	<b>0,18</b>	<b>2,40</b>	<b>0,16</b>	<b>0,17</b>	<b>0,06</b>
Coefficiente de Variação	<b>11,00%</b>	<b>13,18%</b>	<b>20,71%</b>	<b>15,72%</b>	<b>17,94%</b>	<b>6,57%</b>	<b>17,24%</b>	<b>17,55%</b>	<b>1,90%</b>	<b>2,64%</b>

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

As curvas do ensaio de tração para um exemplar único de cada tipo de compósito no sentido longitudinal de laminação a 80°C estão apresentadas no Gráfico 20.

**Gráfico 20 – Curvas do ensaio de tração a 80°C no sentido longitudinal de laminação.**

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

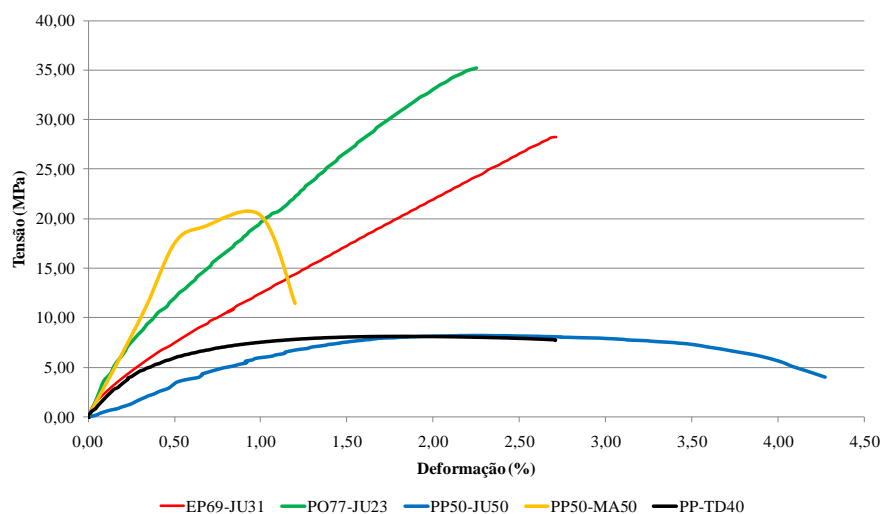
A Tabela 38 mostra os valores para a tensão de ruptura (MPa) e deformação (%) obtidos no ensaio de tração dos compósitos no sentido transversal de laminação a 80°C. Foram feitas medições em 10 corpos de prova e eliminadas as 5 medições de carga mais discrepantes da média global.

**Tabela 38 – Valores do ensaio de tração a 80°C no sentido transversal de laminação.**

Corpo de Prova	Tração 80 °C Transversal EP69-JU31		Tração 80 °C Transversal PO77-JU23		Tração 80 °C Transversal PP50-JU50		Tração 80 °C Transversal PP50-MA50		Tração 80 °C Transversal PP-TD40	
	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)
1	27,65	2,84	28,03	2,31	8,20	2,29	20,07	1,00	8,08	1,88
2	21,76	2,25	20,31	1,63	9,64	1,93	20,18	0,84	8,09	1,86
3	28,26	2,71	35,17	2,25	7,32	1,86	19,62	0,91	7,81	1,90
4	19,23	2,15	25,82	2,50	10,55	2,96	20,36	1,00	8,10	1,84
5	29,19	2,20	30,43	2,07	7,17	2,11	21,23	0,80	8,23	1,82
Mínimo	<b>19,23</b>	<b>2,15</b>	<b>20,31</b>	<b>1,63</b>	<b>7,17</b>	<b>1,86</b>	<b>19,62</b>	<b>0,80</b>	<b>7,81</b>	<b>1,82</b>
Máximo	<b>29,19</b>	<b>2,84</b>	<b>35,17</b>	<b>2,50</b>	<b>10,55</b>	<b>2,96</b>	<b>21,23</b>	<b>1,00</b>	<b>8,23</b>	<b>1,90</b>
Média	<b>25,22</b>	<b>2,43</b>	<b>27,95</b>	<b>2,15</b>	<b>8,58</b>	<b>2,23</b>	<b>20,29</b>	<b>0,91</b>	<b>8,06</b>	<b>1,86</b>
Desvio Padrão	<b>4,44</b>	<b>0,32</b>	<b>5,50</b>	<b>0,33</b>	<b>1,48</b>	<b>0,44</b>	<b>0,59</b>	<b>0,09</b>	<b>0,15</b>	<b>0,03</b>
Coefficiente de Variação	<b>17,60%</b>	<b>13,18%</b>	<b>19,69%</b>	<b>15,32%</b>	<b>17,22%</b>	<b>19,77%</b>	<b>2,92%</b>	<b>10,01%</b>	<b>1,87%</b>	<b>1,70%</b>

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

As curvas do ensaio de tração para um exemplar único de cada tipo de compósito no sentido longitudinal de transversal a 80°C estão apresentadas no Gráfico 21.

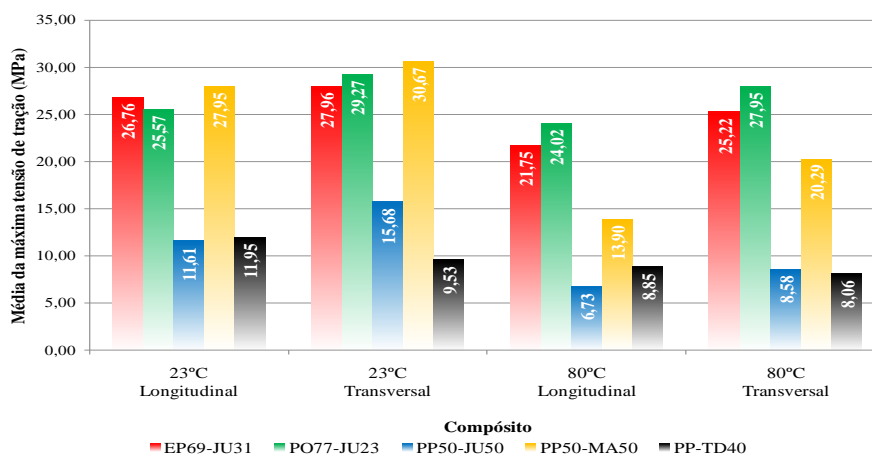
**Gráfico 21 – Curvas do ensaio de tração a 80°C no sentido transversal de laminação.**

Os compósitos PO77-JU23 e EP69-JU31 continuaram suportando as maiores tensões de ruptura em relação aos demais e ainda houve um aumento dos valores em relação aos valores para os corpos de prova no sentido longitudinal.



Comparados os valores obtidos para máxima tensão no ensaio de tração a 23°C e 80°C o efeito temperatura se mostra presente conforme o Gráfico 22, onde todos os compósitos sofreram diminuição das tensões máximas.

**Gráfico 22 – Média da máxima tensão de tração a 23°C e a 80°C.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

### 4.3.2 Flexão

A Tabela 39 mostra os valores para a máxima carga de flexão (N), a extensão de flexão (MPa) e o módulo de elasticidade (MPa) obtidos no ensaio de flexão dos compósitos no sentido longitudinal de laminação a 23°C. Foram feitas medições em 10 corpos de prova e eliminadas as 5 medições de carga mais discrepantes da média global.

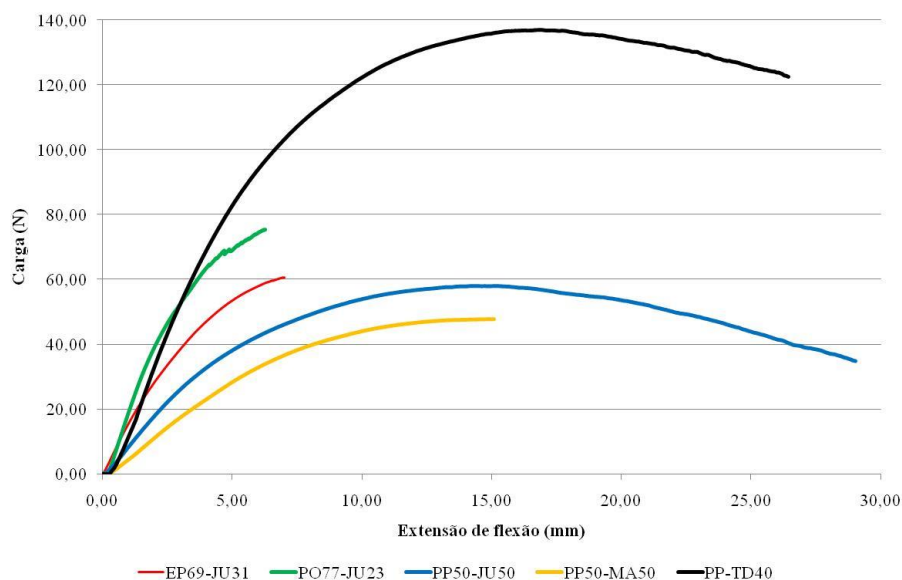
**Tabela 39 – Valores do ensaio de flexão a 23°C no sentido longitudinal de laminação.**

Corpo de Prova	Flexão 23 °C Longitudinal EP69-JU31			Flexão 23 °C Longitudinal PO77-JU23			Flexão 23 °C Longitudinal PP50-JU50			Flexão 23 °C Longitudinal PP50-MA50			Flexão 23 °C Longitudinal PP-TD40		
	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)
1	37,44	7,76	822,63	70,00	7,49	2026,62	41,66	16,34	1240,50	39,50	11,71	2100,09	132,46	15,00	5199,90
2	60,54	7,01	1330,12	81,41	8,16	2356,67	45,82	15,71	1364,28	37,84	11,21	2011,99	132,08	15,50	5185,02
3	59,37	8,61	1304,43	75,39	6,28	2182,42	52,04	14,33	1549,55	37,77	11,75	2007,83	132,22	15,29	5190,44
4	63,44	7,77	1393,89	68,24	4,37	1975,62	61,16	15,25	1821,26	48,47	15,63	2576,90	136,09	16,46	5342,33
5	56,33	7,01	1237,63	64,00	6,49	1852,80	57,87	15,17	1723,05	47,86	15,08	2544,33	137,03	16,92	5379,59
Mínimo	37,44	7,01	822,63	64,00	4,37	1852,80	41,66	14,33	1240,50	37,77	11,21	2007,83	132,08	15,00	5185,02
Máximo	63,44	8,61	1393,89	81,41	8,16	2356,67	61,16	16,34	1821,26	48,47	15,63	2576,90	137,03	16,92	5379,59
Média	55,42	7,63	1217,74	71,81	6,56	2078,82	51,71	15,36	1539,73	42,29	13,08	2248,23	133,97	15,83	5259,46
Desvio Padrão	10,37	0,66	227,86	6,74	1,44	195,19	8,11	0,74	241,50	5,41	2,10	287,77	2,39	0,82	93,74
Coefficiente de Variação	18,71%	8,70%	18,71%	9,39%	21,97%	9,39%	15,68%	4,82%	15,68%	12,80%	16,05%	12,80%	1,78%	5,16%	1,78%

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

As curvas do ensaio de flexão para um exemplar único de cada tipo de compósito no sentido longitudinal de laminação a 23°C estão apresentadas no Gráfico 23.

**Gráfico 23 – Curvas do ensaio de flexão a 23°C no sentido longitudinal de laminação.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

O PP-TD40 foi o que suportou a maior carga em flexão com uma média de 133,97 N. Ao adicionar 50,0% de juta no polipropileno (PP50-JU50), a carga cai para 51,71 N, diminuindo 61,4%, mas mantendo uma extensão de flexão de aproximadamente 15,0 mm. Já os compósitos PO77-JU23 e EP69-JU31 obtiveram 71,81 N e 55,42 N em média, porém com extensões de flexão muito próximas de 6,56 N e 7,63 N respectivamente.

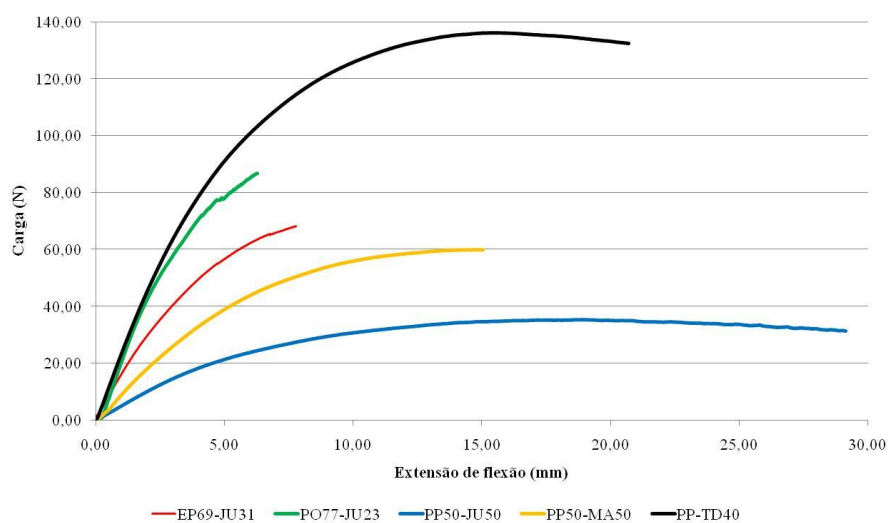
A Tabela 40 mostra os valores para a máxima carga de flexão (N), a extensão de flexão (MPa) e o módulo de elasticidade (MPa) obtidos no ensaio de flexão dos compósitos no sentido transversal de laminação a 23°C. Foram feitas medições em 10 corpos de prova e eliminadas as 5 medições de carga mais discrepantes da média global.

**Tabela 40 – Valores do ensaio de flexão a 23°C no sentido transversal de laminação.**

Corpo de Prova	Flexão 23 °C Transversal EP69-JU31			Flexão 23 °C Transversal PO77-JU23			Flexão 23 °C Transversal PP50-JU50			Flexão 23 °C Transversal PP50-MA50			Flexão 23 °C Transversal PP-TD40		
	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)
1	84,07	7,76	2005,80	72,20	6,62	2478,50	35,29	18,64	1240,44	58,83	11,71	2799,88	136,14	15,54	5344,60
2	64,90	7,01	1548,40	86,69	6,28	2975,92	38,31	19,46	1346,75	57,51	11,63	2737,32	135,83	15,84	5332,16
3	64,03	8,61	1527,77	92,77	5,11	3184,62	36,93	18,63	1297,98	54,51	11,54	2594,41	135,95	15,46	5336,97
4	68,10	7,77	1624,85	70,29	3,40	2412,92	32,89	18,83	1156,28	59,70	15,04	2841,22	140,14	16,46	5501,32
5	60,66	7,01	1447,31	79,16	6,28	2717,57	33,31	16,83	1170,77	59,94	15,04	2852,90	141,29	16,92	5546,82
Mínimo	<b>60,66</b>	<b>7,01</b>	<b>1447,31</b>	<b>70,29</b>	<b>3,40</b>	<b>2412,92</b>	<b>32,89</b>	<b>16,83</b>	<b>1156,28</b>	<b>54,51</b>	<b>11,54</b>	<b>2594,41</b>	<b>135,83</b>	<b>15,46</b>	<b>5332,16</b>
Máximo	<b>84,07</b>	<b>8,61</b>	<b>2005,80</b>	<b>92,77</b>	<b>6,62</b>	<b>3184,62</b>	<b>38,31</b>	<b>19,46</b>	<b>1346,75</b>	<b>59,94</b>	<b>15,04</b>	<b>2852,90</b>	<b>141,29</b>	<b>16,92</b>	<b>5546,82</b>
Média	<b>68,35</b>	<b>7,63</b>	<b>1630,83</b>	<b>80,22</b>	<b>5,54</b>	<b>2753,91</b>	<b>35,35</b>	<b>18,48</b>	<b>1242,45</b>	<b>58,10</b>	<b>12,99</b>	<b>2765,15</b>	<b>137,87</b>	<b>16,04</b>	<b>5412,37</b>
Desvio Padrão	<b>9,18</b>	<b>0,66</b>	<b>218,94</b>	<b>9,53</b>	<b>1,33</b>	<b>327,20</b>	<b>2,32</b>	<b>0,98</b>	<b>81,44</b>	<b>2,22</b>	<b>1,87</b>	<b>105,62</b>	<b>2,63</b>	<b>0,63</b>	<b>103,32</b>
Coefficiente de Variação	<b>13,42%</b>	<b>8,70%</b>	<b>13,42%</b>	<b>11,88%</b>	<b>23,95%</b>	<b>11,88%</b>	<b>6,55%</b>	<b>5,31%</b>	<b>6,55%</b>	<b>3,82%</b>	<b>14,41%</b>	<b>3,82%</b>	<b>1,91%</b>	<b>3,91%</b>	<b>1,91%</b>

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

As curvas do ensaio de flexão para um exemplar único de cada tipo de compósito no sentido transversal de laminação a 23°C estão apresentadas no Gráfico 24.

**Gráfico 24 – Curvas do ensaio de flexão a 23°C no sentido transversal de laminação.**

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

No sentido transversal houveram aumentos nas cargas médias suportadas em flexão a 23°C para o PP-TD40 (2,9%), PO77-JU23 (11,7%), EP696-JU31 (23,3%) e PP50-MA50 (37,4%). Somente o compósito PP50-JU50 teve uma diminuição de 31,6% na sua carga. Evidenciando que, no sentido longitudinal de laminação destes compósitos, suas cargas suportadas em flexão são melhores.

A Tabela 41 mostra os valores para a máxima carga de flexão (N), a extensão de flexão (MPa) e o módulo de elasticidade (MPa) obtidos no ensaio de flexão dos compósitos no sentido longitudinal de laminação a 80°C. Foram feitas medições em 10 corpos de prova e eliminadas as 5 medições de carga mais discrepantes da média global.

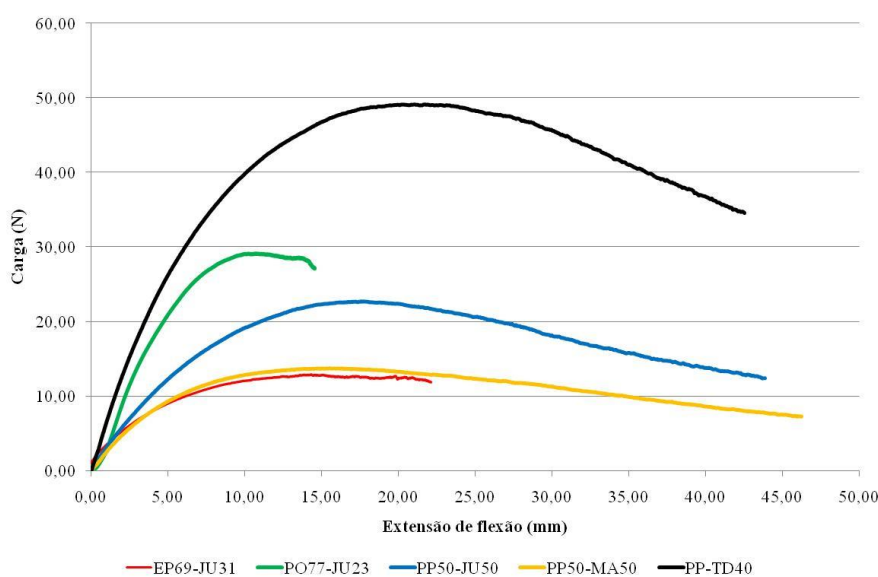
**Tabela 41 – Valores do ensaio de flexão a 80°C no sentido longitudinal de laminação.**

Corpo de Prova	Flexão 80 °C Longitudinal EP69-JU31			Flexão 80 °C Longitudinal PO77-JU23			Flexão 80 °C Longitudinal PP50-JU50			Flexão 80 °C Longitudinal PP50-MA50			Flexão 80 °C Longitudinal PP-TD40		
	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)
1	13,33	13,64	270,80	23,27	14,04	673,66	24,51	19,15	729,89	13,72	15,52	729,53	47,82	19,94	1877,35
2	8,25	17,25	167,60	37,70	13,80	1091,40	24,29	19,69	723,40	13,86	14,56	736,87	48,46	18,99	1902,37
3	12,89	14,30	261,86	27,95	14,04	809,17	19,74	18,86	587,66	15,48	18,73	823,16	49,47	19,22	1941,87
4	13,26	14,93	269,38	27,95	11,95	809,14	22,69	17,56	675,61	15,31	21,77	813,93	49,05	21,72	1925,62
5	10,43	19,68	211,97	29,11	10,68	842,70	19,28	18,86	574,11	14,85	20,40	789,42	48,54	19,22	1905,44
Mínimo	<b>8,25</b>	<b>13,64</b>	<b>167,60</b>	<b>23,27</b>	<b>10,68</b>	<b>673,66</b>	<b>19,28</b>	<b>17,56</b>	<b>574,11</b>	<b>13,72</b>	<b>14,56</b>	<b>729,53</b>	<b>47,82</b>	<b>18,99</b>	<b>1877,35</b>
Máximo	<b>13,33</b>	<b>19,68</b>	<b>270,80</b>	<b>37,70</b>	<b>14,04</b>	<b>1091,40</b>	<b>24,51</b>	<b>19,69</b>	<b>729,89</b>	<b>15,48</b>	<b>21,77</b>	<b>823,16</b>	<b>49,47</b>	<b>21,72</b>	<b>1941,87</b>
Média	<b>11,63</b>	<b>15,96</b>	<b>236,32</b>	<b>29,20</b>	<b>12,90</b>	<b>845,22</b>	<b>22,10</b>	<b>18,82</b>	<b>658,13</b>	<b>14,64</b>	<b>18,20</b>	<b>778,58</b>	<b>48,67</b>	<b>19,82</b>	<b>1910,53</b>
Desvio Padrão	<b>2,24</b>	<b>2,49</b>	<b>45,41</b>	<b>5,26</b>	<b>1,52</b>	<b>152,19</b>	<b>2,48</b>	<b>0,78</b>	<b>73,72</b>	<b>0,81</b>	<b>3,09</b>	<b>43,30</b>	<b>0,62</b>	<b>1,12</b>	<b>24,51</b>
Coefficiente de Variação	<b>19,22%</b>	<b>15,57%</b>	<b>19,22%</b>	<b>18,01%</b>	<b>11,78%</b>	<b>18,01%</b>	<b>11,20%</b>	<b>4,16%</b>	<b>11,20%</b>	<b>5,56%</b>	<b>17,01%</b>	<b>5,56%</b>	<b>1,28%</b>	<b>5,66%</b>	<b>1,28%</b>

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

As curvas do ensaio de flexão para um exemplar único de cada tipo de compósito no sentido longitudinal de laminação a 80°C estão apresentadas no Gráfico 25.

**Gráfico 25 – Curvas do ensaio de flexão a 80°C no sentido longitudinal de laminação.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

A Tabela 42 mostra os valores para a máxima carga de flexão (N), a extensão de flexão (MPa) e o módulo de elasticidade (MPa) obtidos no ensaio de flexão dos compósitos no sentido transversal de laminação a 80°C. Foram feitas medições em 10 corpos de prova e eliminadas as 5 medições de carga mais discrepantes da média global.

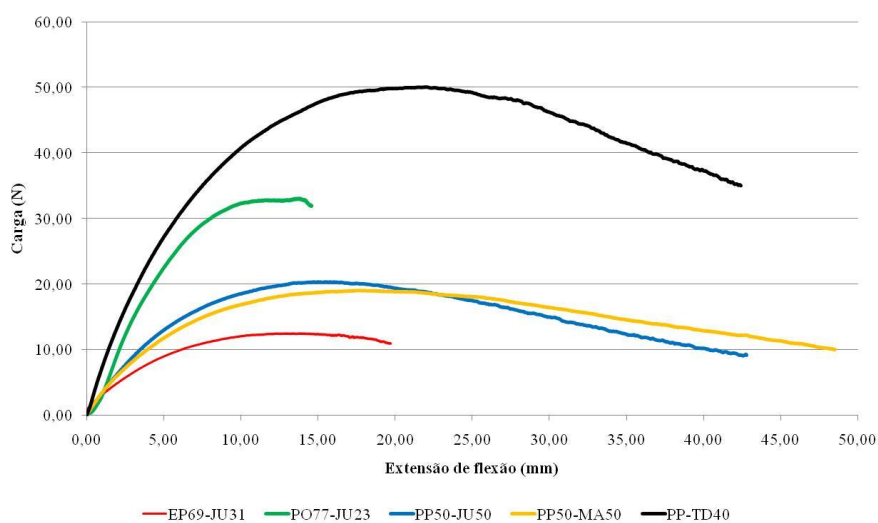
**Tabela 42 – Valores do ensaio de flexão a 80°C no sentido transversal de laminação.**

Corpo de Prova	Flexão 80 °C Transverval EP69-JU31			Flexão 80 °C Transverval PO77-JU23			Flexão 80 °C Transverval PP50-JU50			Flexão 80 °C Transverval PP50-MA50			Flexão 80 °C Transverval PP-TD40		
	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Máxima carga de flexão (N)	Extensão de flexão (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)
1	9,26	18,06	221,01	30,77	14,25	1056,34	17,05	18,64	599,20	20,47	15,40	974,05	50,08	21,98	1965,91
2	11,18	13,58	266,85	33,10	13,79	1136,31	21,09	19,46	741,52	20,25	15,11	963,77	46,08	21,69	1808,88
3	7,21	17,25	172,14	39,54	13,80	1357,41	18,36	18,63	645,40	18,74	14,73	891,88	48,46	18,98	1902,37
4	12,46	11,66	297,28	25,14	14,04	863,10	17,16	18,83	603,13	19,05	17,56	906,64	49,47	19,23	1941,87
5	12,51	19,70	298,41	31,14	12,05	1069,13	20,33	16,83	714,69	20,05	17,56	954,50	49,05	21,73	1925,62
Mínimo	<b>7,21</b>	<b>11,66</b>	<b>172,14</b>	<b>25,14</b>	<b>12,05</b>	<b>863,10</b>	<b>17,05</b>	<b>16,83</b>	<b>599,20</b>	<b>18,74</b>	<b>14,73</b>	<b>891,88</b>	<b>46,08</b>	<b>18,98</b>	<b>1808,88</b>
Máximo	<b>12,51</b>	<b>19,70</b>	<b>298,41</b>	<b>39,54</b>	<b>14,25</b>	<b>1357,41</b>	<b>21,09</b>	<b>19,46</b>	<b>741,52</b>	<b>20,47</b>	<b>17,56</b>	<b>974,05</b>	<b>50,08</b>	<b>21,98</b>	<b>1965,91</b>
Média	<b>10,53</b>	<b>16,05</b>	<b>251,14</b>	<b>31,94</b>	<b>13,59</b>	<b>1096,46</b>	<b>18,80</b>	<b>18,48</b>	<b>660,79</b>	<b>19,71</b>	<b>16,07</b>	<b>938,17</b>	<b>48,63</b>	<b>20,72</b>	<b>1908,93</b>
Desvio Padrão	<b>2,27</b>	<b>3,32</b>	<b>54,22</b>	<b>5,18</b>	<b>0,88</b>	<b>177,83</b>	<b>1,84</b>	<b>0,98</b>	<b>64,76</b>	<b>0,77</b>	<b>1,38</b>	<b>36,56</b>	<b>1,54</b>	<b>1,48</b>	<b>60,55</b>
Coefficiente de Variação	<b>21,59%</b>	<b>20,71%</b>	<b>21,59%</b>	<b>16,22%</b>	<b>6,47%</b>	<b>16,22%</b>	<b>9,80%</b>	<b>5,31%</b>	<b>9,80%</b>	<b>3,90%</b>	<b>8,58%</b>	<b>3,90%</b>	<b>3,17%</b>	<b>7,16%</b>	<b>3,17%</b>

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

As curvas do ensaio de flexão para um exemplar único de cada tipo de compósito testado no sentido transversal de laminação a 80°C estão apresentadas no Gráfico 26.

**Gráfico 26 – Curvas do ensaio de flexão a 80°C no sentido transversal de laminação.**

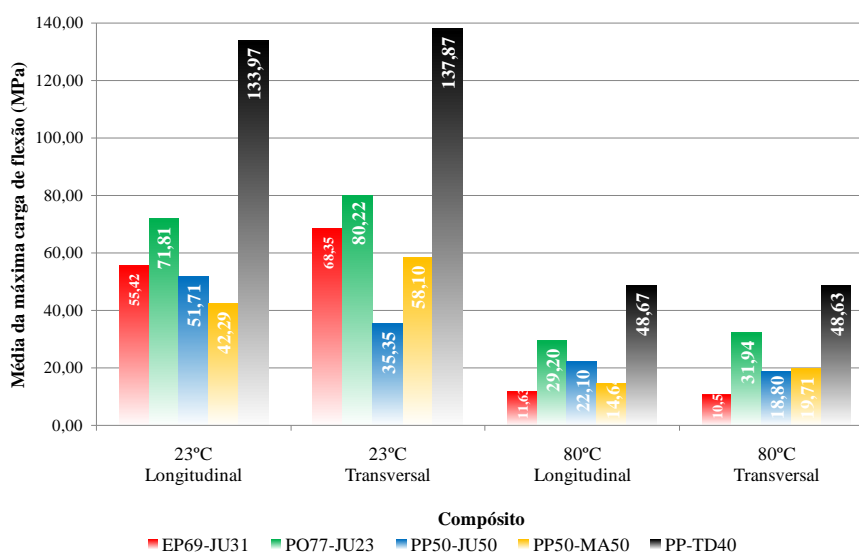


Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

No sentido transversal houveram aumentos nas cargas médias suportadas em flexão a 80°C para o PO77-JU23 (9,4%) e PP50-MA50 (34,6%). E uma diminuição das cargas suportadas para os compósitos EP69-JU31 (-9,5%) e PP50-JU50 (-14,9%). O PP-TD40 se manteve inalterado.

Mas comparados os valores obtidos para máxima carga no ensaio de flexão a 23°C e 80°C o efeito temperatura se mostra presente conforme a Gráfico 27, onde todos os compósitos sofreram diminuição das máximas cargas de flexão.

**Gráfico 27 – Média da máxima carga de flexão a 23°C e a 80°C.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

### 4.3.3 Impacto por queda de dardo

Para cada corpo de prova, foram feitas 7 medições. Sendo eliminadas a maior e a menor medição, para evitar erros grosseiros e ficando assim 5 medidas para cada corpo de prova (TAB. 43).

O compósito com maior variação de energia absorvida dentre as amostras foi o EP69-JU31 e o compósito com menor variação foi o PP50-JU50 (GRAF. 28).

A energia absorvida média do compósito EP69-JU31 foi 152,0% maior do que o PP-TD40 e 207,3% maior do que o PP50-MA50.

A energia absorvida média do compósito PO77-JU23 foi 298,4% maior do que o PP-TD40 e 407,1% maior do que o PP50-MA50.

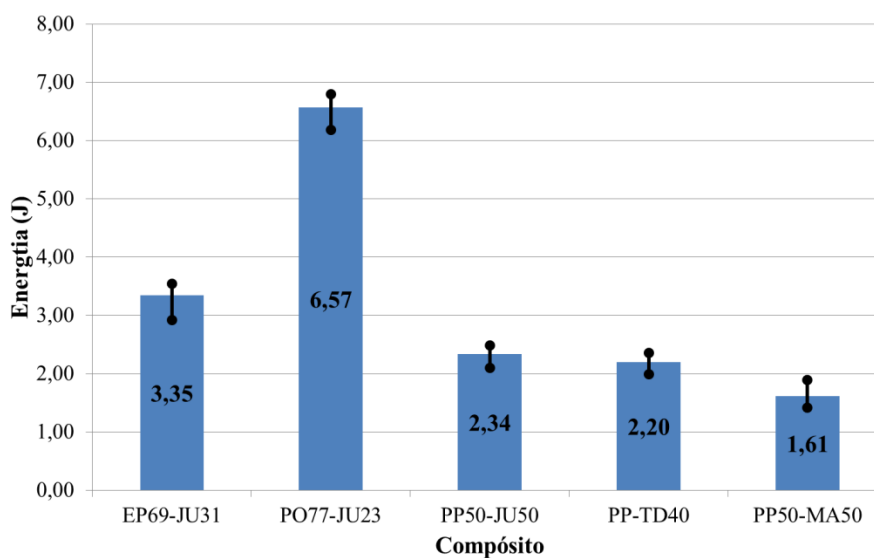
Portanto, os dois compósitos laminados manualmente tiveram uma absorção de energia muito maior do que os materiais já existentes no mercado, maior também do que o compósito termoformado PP50-JU50.

**Tabela 43 – Energia absorvida no teste de impacto pelos compósitos.**

Medida	Energia (J)				
	EP69-JU31	PO77-JU23	PP50-JU50	PP-TD40	PP50-MA50
1	2,92	6,80	2,35	2,36	1,42
2	3,53	6,68	2,30	2,00	1,60
3	3,27	6,68	2,49	2,15	1,90
4	3,46	6,19	2,45	2,20	1,55
5	3,55	6,50	2,10	2,30	1,60
Mínimo	<b>2,92</b>	<b>6,19</b>	<b>2,10</b>	<b>2,00</b>	<b>1,42</b>
Máximo	<b>3,55</b>	<b>6,80</b>	<b>2,49</b>	<b>2,36</b>	<b>1,90</b>
Média	<b>3,35</b>	<b>6,57</b>	<b>2,34</b>	<b>2,20</b>	<b>1,61</b>
Desvio Padrão	<b>0,26</b>	<b>0,24</b>	<b>0,15</b>	<b>0,14</b>	<b>0,18</b>
Coefficiente de Variação	<b>7,85%</b>	<b>3,62%</b>	<b>6,55%</b>	<b>6,34%</b>	<b>10,91%</b>

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

**Gráfico 28 – Energia absorvida no teste de impacto pelos compósitos.**



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

#### 4.4 Propriedades morfológicas

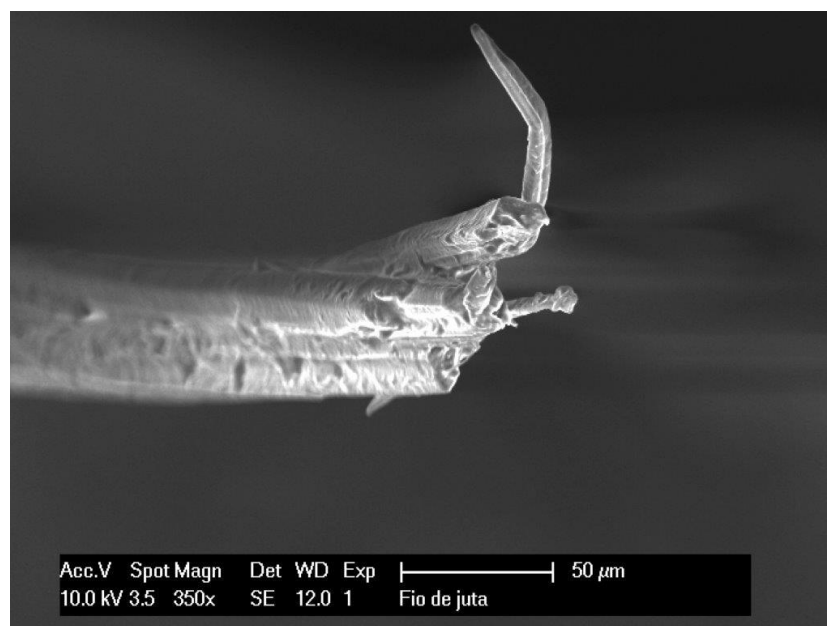
As propriedades morfológicas foram analisadas através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

##### 4.4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As micrografias do MEV dos fios únicos das fibras naturais fraturadas no ensaio de tração estão representadas abaixo. Onde nota-se a diferença de dimensões dos fios testados.

A Figura 104 mostra o fio de juta com um aumento de 350 vezes onde se verifica o fio único da fibra na sua seção transversal fraturada.

**Figura 104 – MEV do fio da fibra de juta fraturado.**

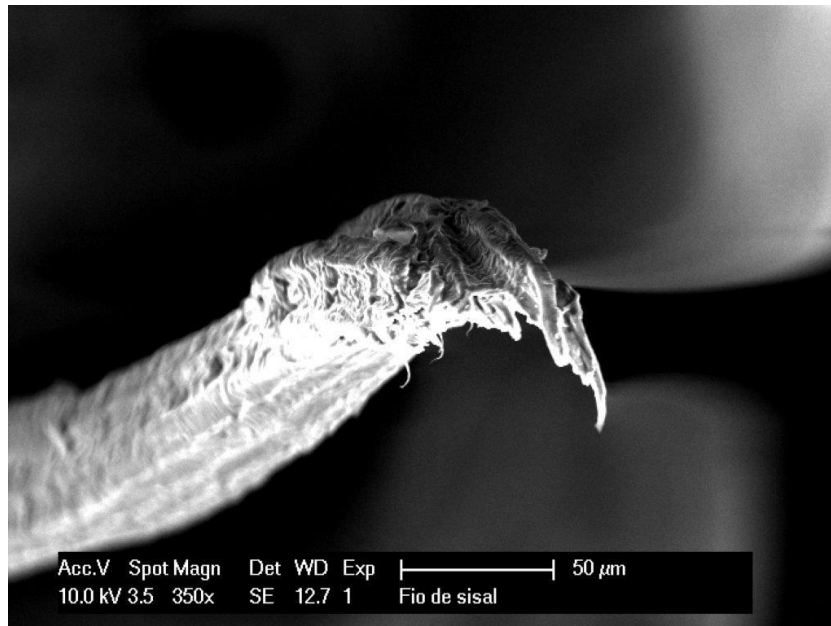


Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

A Figura 105 mostra o fio de sisal com um aumento de 350 vezes onde se verifica o fio único da fibra na sua seção transversal fraturada.



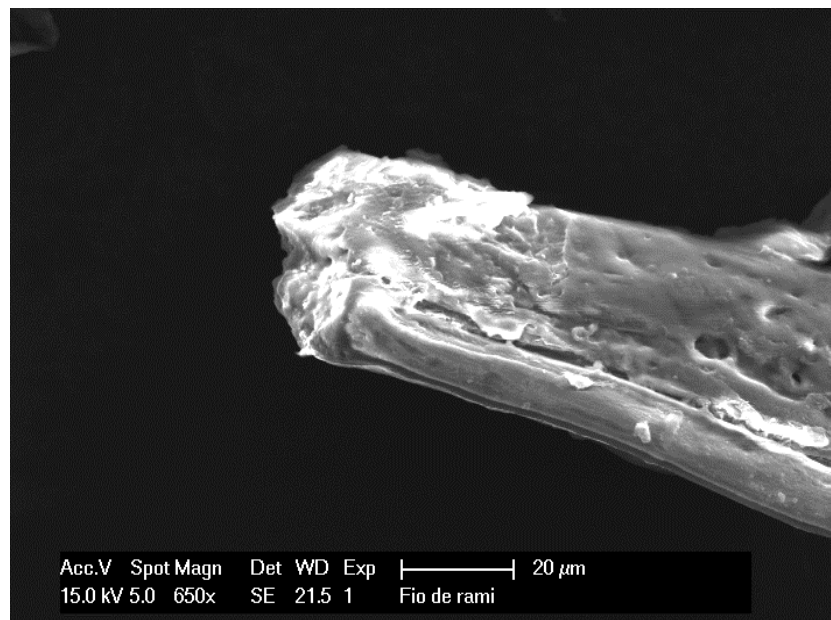
**Figura 105 – MEV do fio da fibra de sisal fraturado.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

A Figura 106 mostra o fio de rami com um aumento de 650 vezes onde se verifica o fio único da fibra na sua seção transversal fraturada.

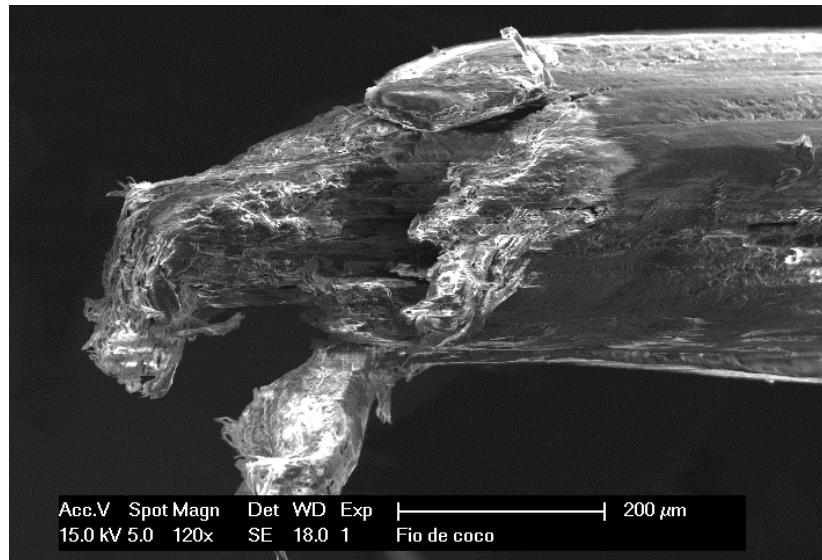
**Figura 106 – MEV do fio da fibra de rami fraturado.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

A Figura 107 mostra o fio de coco com um aumento de 120 vezes onde se verifica o fio único da fibra na sua seção transversal fraturada.

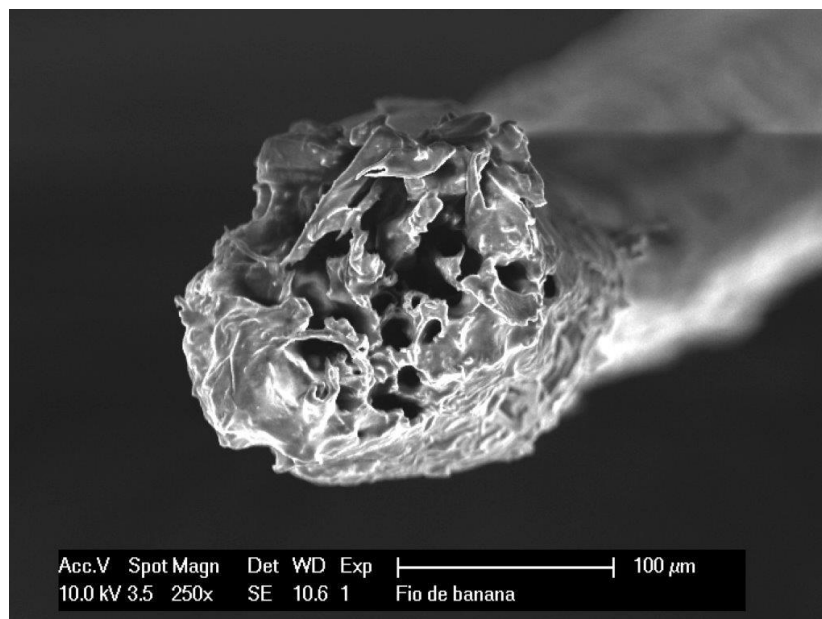
**Figura 107 – MEV do fio da fibra de coco fraturado.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

A Figura 108 mostra o fio de banana com um aumento de 250 vezes onde se verifica o fio único da fibra na sua seção transversal fraturada.

**Figura 108 – MEV do fio da fibra de banana fraturado.**

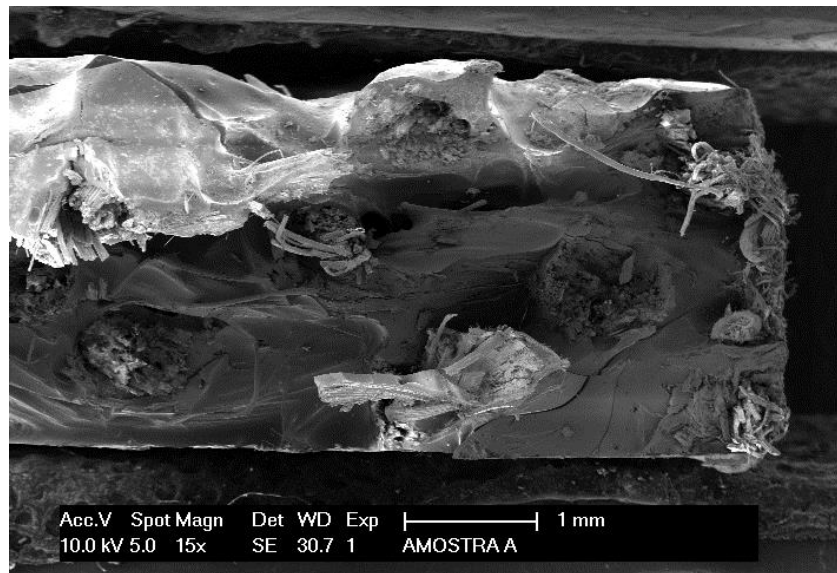


**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

As micrografias do MEV das superfícies das amostras fraturadas no ensaio de tração estão representadas abaixo. Onde fenômenos de arrancamento das fibras foram observados para todos os compósitos. As imagens do MEV indicam claramente as quebras das fibras e alguns espaços vazios presentes devido a este arrancamento da fibra. Isto mostra que houve uma interação das fibras e as matrizes, gerando uma melhor ligação mecânica entre as matrizes diversas testadas e as fibras de juta.

A Figura 109 mostra o compósito EP69-JU31 com um aumento de 20 vezes onde se verifica vazios entre as fibras e a resina epóxi.

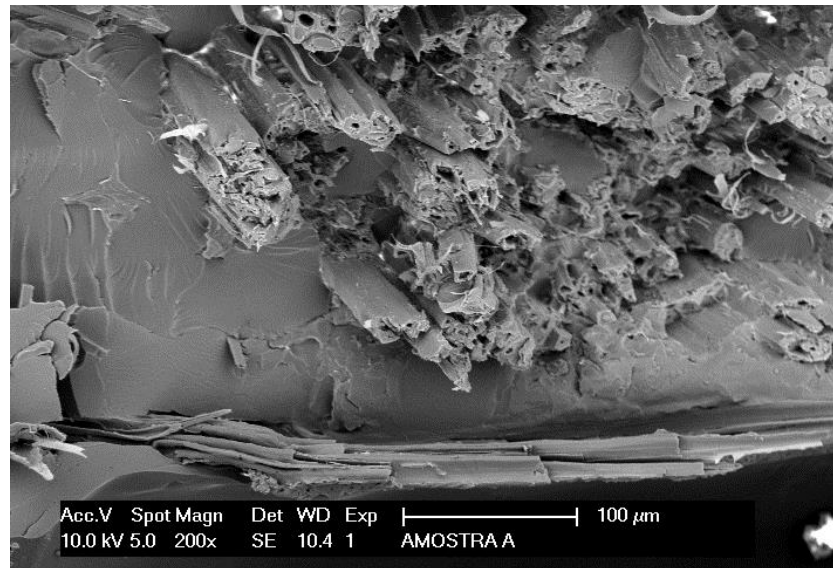
**Figura 109 – MEV do compósito EP69-JU31 com aumento de 15x.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

A Figura 110 mostra o compósito EP69-JU31 com um aumento de 200 vezes onde se verifica as fibras partidas/arrancadas pelo ensaio de tração.

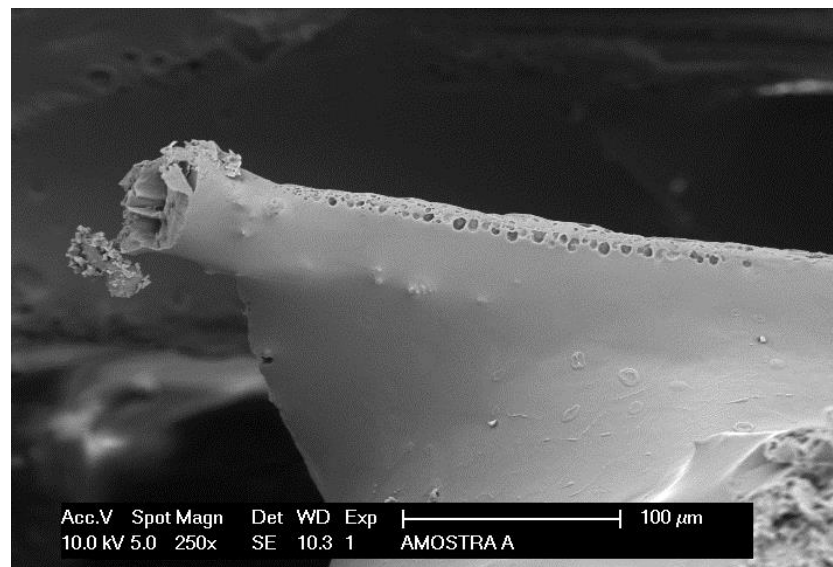
**Figura 110 – MEV do compósito EP69-JU31 com aumento de 200x.**



**FONTE: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

A Figura 111 mostra o compósito EP69-JU31 com um aumento de 250 vezes onde se observa uma fibra de juta envolta na resina epóxi, o que mostra uma real interação entre as fibras e a resina epóxi.

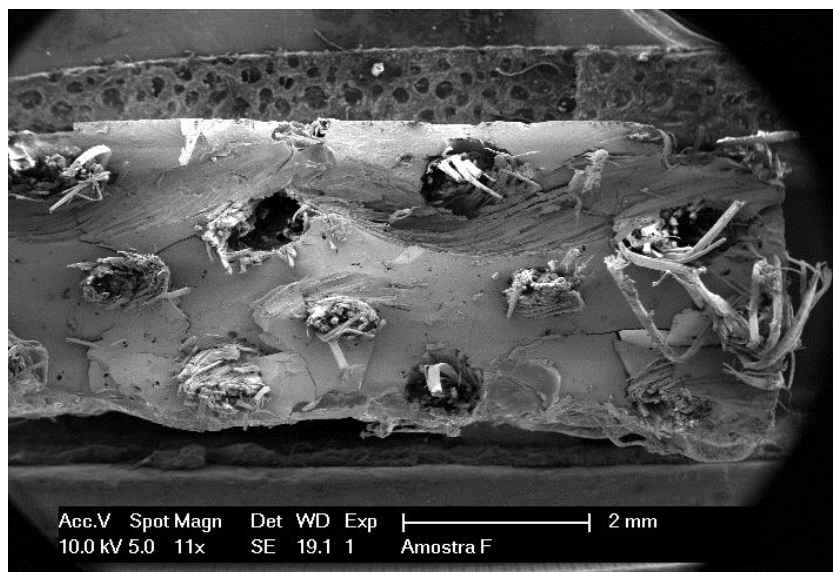
**Figura 111 – MEV do compósito EP69-JU31 com aumento de 250x.**



**FONTE: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

A Figura 112 mostra o compósito PO77-JU23 com um aumento de 11 vezes onde se verifica vazios entre as fibras e a resina epóxi.

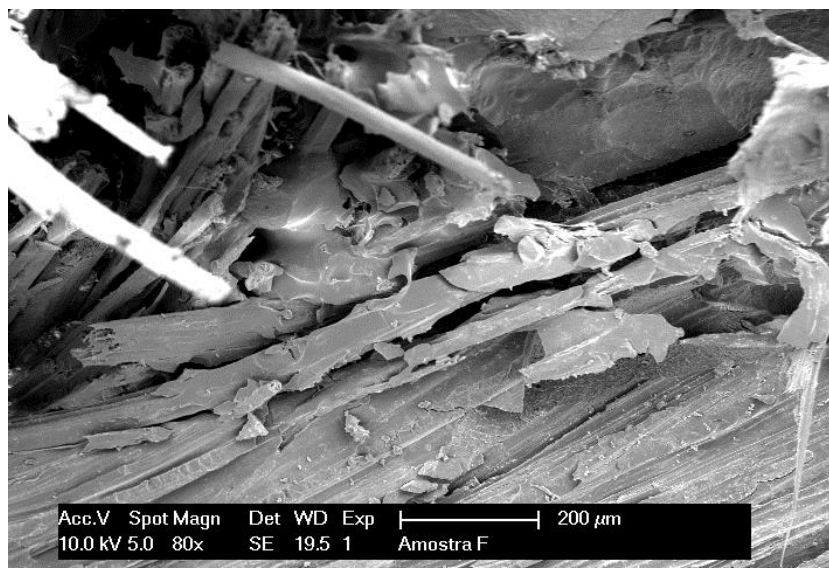
**Figura 112 – MEV do compósito PO77-JU23 com aumento de 11x.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

A Figura 113 mostra o compósito PO77-JU23 com um aumento de 80 vezes onde se verifica as fibras partidas/arrancadas pelo ensaio de tração, bem como as trincas na resina poliéster, também em virtude do ensaio de tração.

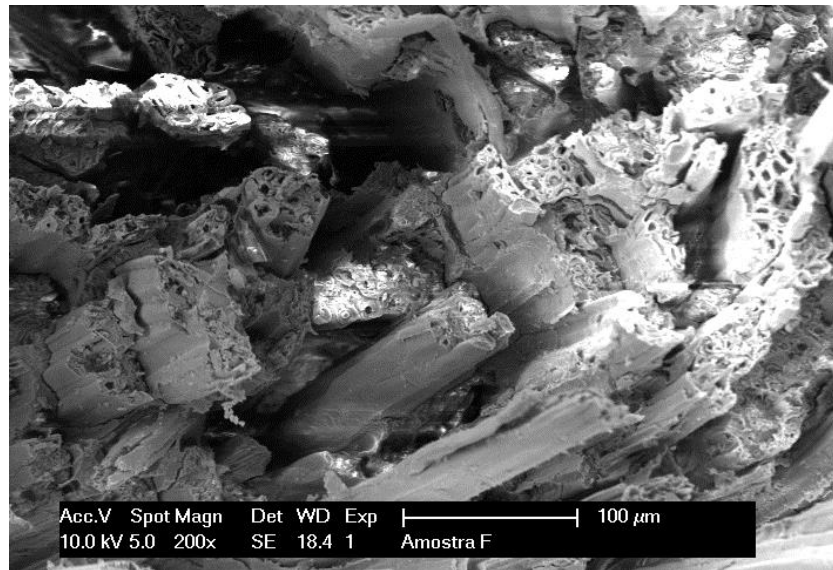
**Figura 113 – MEV do compósito PO77-JU23 com aumento de 80x.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

A Figura 114 mostra o compósito PO77-JU23 com um aumento de 200 vezes onde se verifica as fibras partidas/arrancadas pelo ensaio de tração.

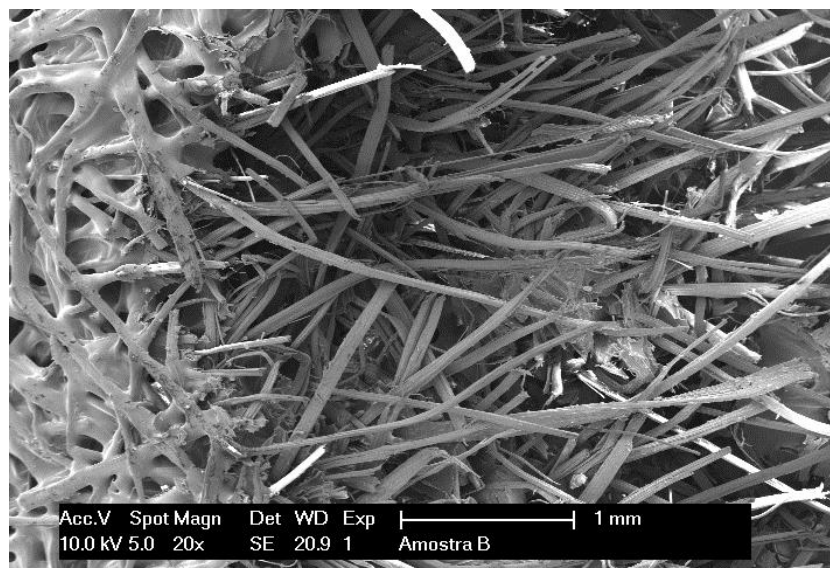
**Figura 114 – MEV do compósito PO77-JU23 com aumento de 200x.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

A Figura 115 mostra o compósito PP50-JU50 com um aumento de 20 vezes onde se verifica vazios entre as fibras e o polipropileno.

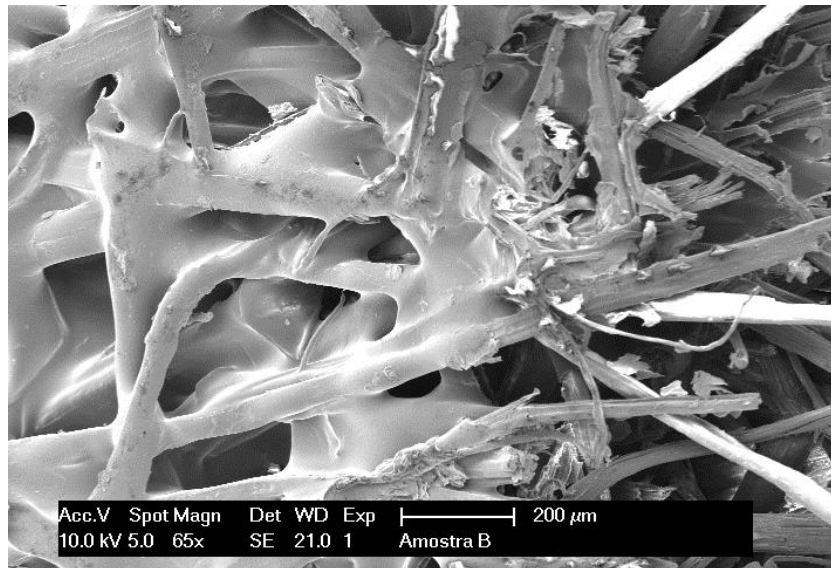
**Figura 115 – MEV do compósito PP50-JU50 com aumento de 20x.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

A Figura 116 mostra o compósito PP50-JU50 com um aumento de 65 vezes onde se verifica melhor os vazios e as interações entre as fibras e o polipropileno.

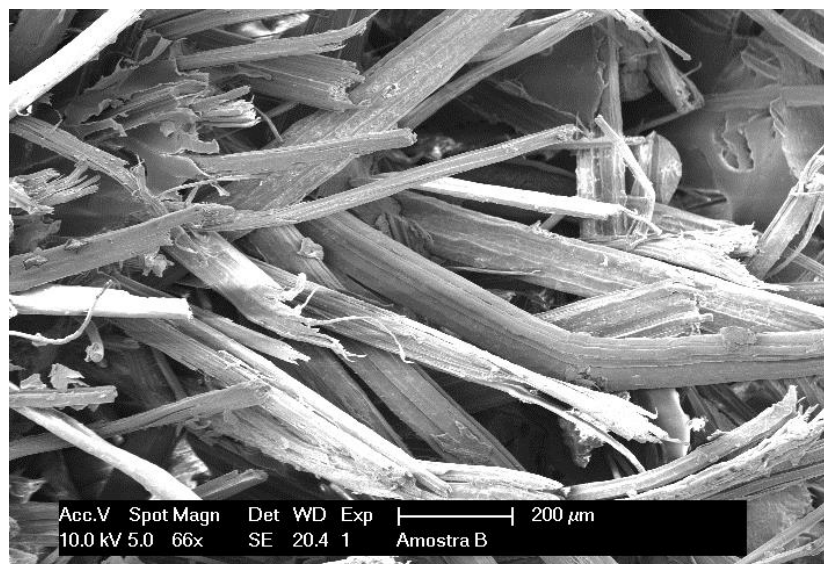
**Figura 116 – MEV do compósito PP50-JU50 com aumento de 65x.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

A Figura 117 mostra o compósito PP50-JU50 com um aumento de 66 vezes onde se verifica as fibras partidas/arrancadas pelo ensaio de tração.

**Figura 117 – MEV do compósito PP50-JU50 com aumento de 66x.**



**Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.**

#### 4.5 Comparativo entre os compósitos

Após as amostras serem avaliadas em análises físicas: densidade aparente, absorção de água, perda de umidade, absorção acústica e análise termogravimétrica (TGA); análises mecânicas: tração e flexão (23°C e 80°C) nos sentidos longitudinal e transversal e impacto por queda de dardo, os resultados foram comparados entre os materiais testados para se determinar qual o melhor compósito dentre todos. Para isto foram atribuídas notas que variavam de 1 a 5, onde 1 seria o pior material e 5 o melhor material naquele ensaio testado (TAB. 44).

Os critérios utilizados para atribuir as notas de 1 a 5 para cada material em relação ao resultado do ensaio são mostrados abaixo:

- **Densidade aparente:** O critério utilizado foi o de atribuir a maior nota (5) ao material com menor densidade, que foi o PP50-JU50 e assim por diante até chegar ao material com maior densidade e, desse modo a menor nota (1).
- **Absorção de água:** O critério utilizado foi o de atribuir a maior nota (5) ao material que absorveu a menor quantidade de água ao final do ensaio, que foi o PP-TD40 e por conseguinte até chegar ao material que absorveu a maior quantidade de água e, logo a menor nota (1).
- **Perda de umidade:** O critério utilizado foi o de atribuir a maior nota (5) ao material que perdeu menos umidade ao final do ensaio, que foi o PP-TD40 e assim por diante até chegar ao material que perdeu mais umidade e, então a menor nota (1).
- **Absorção acústica:** O critério utilizado foi o de atribuir a maior nota (5) ao material com a maior absorção acústica durante o ensaio e por conseguinte até chegar ao material com menor absorção acústica e então a menor nota (1). Apesar do PO77-JU23 obter a melhor absorção acústica entre 1,300 e 2,700 Hertz esse material ficou em terceiro lugar com nota 3 e do mesmo modo os materiais PP50-MA50 e PP-TD40 obtiveram na faixa de 1,150 Hz ótimas absorções acústicas,



porém ficaram em quarto e quinto lugares com notas 2 e 1, pois na média final, esses materiais foram inferiores ao PP50-JU50.

- **Análise termogravimétrica (TGA):** O critério utilizado foi o de atribuir a maior nota (5) ao material que obteve uma estabilidade térmica maior, iniciando sua degradação em função da temperatura mais tarde em relação aos outros materiais, que foi o PP-TD40 e assim por diante até chegar ao material que começou a se degradar mais cedo e, por consequência a menor nota (1).
- **Ensaio de Tração (23°C e 80°C) nos sentidos longitudinal e transversal:** O critério utilizado foi o de atribuir a maior nota (5) ao material que suportou a maior tensão de ruptura (MPa) em média no ensaio que, a 23°C, nos sentidos longitudinal e transversal, foi o PP50-MA50 e a 80°C nos sentidos longitudinal e transversal foi o PO77-JU23 e, por conseguinte, até chegar ao material que suportou a menor tensão de ruptura (MPa) em média no ensaio e, logo a menor nota (1).
- **Ensaio de Flexão (23°C e 80°C) nos sentidos longitudinal e transversal:** O critério utilizado foi o de atribuir a maior nota (5) ao material que suportou a maior carga de flexão (N) em média no ensaio, que a 23°C e a 80°C nos sentidos longitudinal e transversal foi o PP-TD40 e, assim por diante até chegar ao material que obteve a menor carga de flexão (N) em média no ensaio e, dessa forma a menor nota (1).
- **Ensaio de Impacto por queda de dardo:** O critério utilizado foi o de atribuir a maior nota (5) ao material que absorveu a maior energia no impacto (J) em média no ensaio que foi o PO77-JU23 e, por conseguinte, até chegar ao material que absorveu a menor energia no impacto (J) em média no ensaio e, então a menor nota (1).

Tabela 44 – Notas de 1 a 5 por experimento para todos materiais testados.

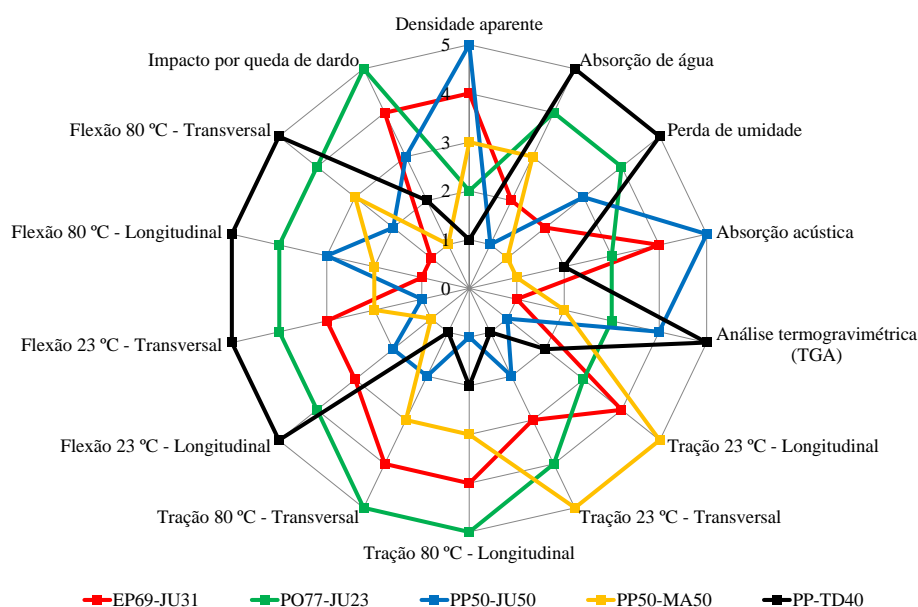
Nomenclatura	EP69-JU31	PO77-JU23	PP50-JU50	PP50-MA50	PP-TD40
Compósito	Compósito de Epóxi Juta + Juta + Juta	Compósito de Poliéster Juta + Juta + Juta	Compósito PP + Juta	Composto de Woodstock	Polipropileno com 40% de carga mineral
Densidade aparente	4	2	5	3	1
Absorção de água	2	4	1	3	5
Perda de umidade	2	4	3	1	5
Absorção acústica	4	3	5	1	2
Análise termogravimétrica (TGA)	1	3	4	2	5
Tração 23 °C - Longitudinal	4	3	1	5	2
Tração 23 °C - Transversal	3	4	2	5	1
Tração 80 °C - Longitudinal	4	5	1	3	2
Tração 80 °C - Transversal	4	5	2	3	1
Flexão 23 °C - Longitudinal	3	4	2	1	5
Flexão 23 °C - Transversal	3	4	1	2	5
Flexão 80 °C - Longitudinal	1	4	3	2	5
Flexão 80 °C - Transversal	1	4	2	3	5
Impacto por queda de dardo	4	5	3	1	2
<b>Total geral</b>	<b>40</b>	<b>54</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>46</b>

Nota (1 a 5)  
Onde:  
1 - Pior  
5 - Melhor

Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

Com as notas de cada material atribuídas, foi possível criar um gráfico de radar (GRAF. 29), o qual proporciona uma fácil visualização comparativa entre os materiais e uma averiguação de onde cada material possui melhores características físicas ou mecânicas.

Gráfico 29 – Radar com notas de 1 a 5 por experimento.



Fonte: DADOS DA PESQUISA, 2015.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões acerca dos resultados experimentais obtidos por este estudo, além de sugerir pesquisas futuras que possam agregar e proporcionar avanços na compreensão sobre o tema abordado.

### 5.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos neste trabalho conclui-se que:

As larguras dos fios das fibras naturais analisados tiveram uma variabilidade muito grande. O fio de sisal foi o que obteve uma maior variação da largura com 19,7% e o fio de rami foi o que obteve a menor variabilidade de largura com apenas 2,9% dentre todos testados.

Os compósitos laminados manualmente EP69-JU31 e PO77-JU23 e o termoformado PP50-JU50 apresentaram boa constituição geométrica, sem alterações dimensionais após a cura, estando as mantas de fibra de juta perfeitamente envolvidas pela resina epóxi, porém, foi possível notar a presença de vazios ou bolhas de forma muito aparente no compósito EP69-JU31. Já os outros dois compósitos não apresentaram bolhas de forma aparente, sendo que o PP50-JU50 apresentou um melhor acabamento dentre os compósitos aqui testados

O compósito com maior variação de espessura dentre as amostras foi o PO77-JU23 com 7,1% e o compósito com menor variação foi o PP50-JU50 com 1,8%. A espessura do compósito PP50-JU50 foi 10,3% menor que o PP-TD40 e 4,5% menor que o PP50-MA50, as quais são dois materiais já existentes e muito utilizados no mercado.

O compósito com maior variação de densidade dentre as amostras foi o PO77-JU23 com 6,0% e o compósito com menor variação foi o PP50-MA50 com 1,4%, este último, obtendo uma variação até mesmo menor que o PP-TD40 que foi de 2,7%. O compósito PP50-JU50 apresentou uma densidade 51,7% menor que o PP-TD40 e 47,5% menor que o PP50-MA50. Até mesmo os compósitos de EP69-JU31 e PO77-JU23 que foram laminados manualmente, obtiveram uma densidade menor que os materiais já utilizados na indústria.

A absorção de água se deve basicamente à presença das fibras vegetais que têm natureza hidrofílica. O aumento do teor de fibra provocou um aumento significativo da absorção de água com valores mais significativos em maiores tempos de imersão, pois o compósito PP50-JU50 absorveu 69,3% de água após 1172 horas de imersão, enquanto que o PP-TD40 absorveu apenas 0,9% de água.

O compósito PP50-MA50 foi o material que perdeu mais umidade em função do tempo, apresentou uma perda de 10,1% de umidade após 1080 horas no forno. Já o compósito PO77-JU23 teve uma perda de apenas 4,2%. Também em função dos valores de fibra em cada material, mas neste caso não se pode afirmar que quanto maior a quantidade de fibra, maior será a perda. Dependendo da resina aglutinante.

O compósito PO77-JU23 obteve o melhor resultado dentre todos os testados na frequência de 2250 Hz, com 32,0% de absorção. Já os compósitos PP50-JU50 e EP69-JU31 obtiveram uma melhor absorção acústica em relação aos compósitos PP-TD40 e PP50-MA50 em frequências de 1250 até 6400 Hz onde obtiveram absorções de 64,0% e 31,0% respectivamente, mostrando que compósitos com maior percentagens de fibra natural tiveram maiores taxas de absorção acústica.

Com os resultados obtidos para a estabilidade térmica (TGA) das amostras estudadas, pode-se concluir que o compósito com EP69-JU31 se degradou mais cedo que os outros materiais e que a adição da juta no polipropileno aumentou sua degradação também. Foram observados três principais estágios de decomposição, referentes à vaporização da umidade, degradação da fibra (hemicelulose e celulose) e decomposição final, respectivamente.

A maior média da máxima tensão de tração foi a do PP50-MA50 com 30,67 MPa, seguido de perto dos compósitos EP69-JU31 com 27,96 MPa e do compósito PO77-JU23 com 29,27 MPa, todos no sentido transversal a 23°C. Todos os materiais tiveram seus valores de máxima tensão de tração diminuídos a 80°C em relação aos valores a 23°C e o material que obteve a maior alteração em relação aos valores longitudinais e transversais foi o PP50-MA50 com 31,5% a 80°C, já o EP69-JU31 obteve uma variação de apenas 4,3% a 23°C.

A adição da fibra de juta no polipropileno, fez com que a sua resistência máxima a tração diminuísse apenas 2,8%, passando de 11,95 MPa (PP-TD40) para 11,61 MPa (PP50-

JU50) a 23°C no sentido longitudinal, já no sentido transversal não houve diminuição e sim aumento da resistência, que aumentou 64,5%. A 80°C a resistência máxima a tração passou de 8,85 MPa (PP-TD40) para 6,73 MPa (PP50-JU50) diminuindo assim cerca de 23,9% no sentido longitudinal e um aumento de 6,4% no sentido transversal, evidenciando que a adição da fibra trouxe melhorias ao polipropileno nesta propriedade no sentido transversal.

A maior média da máxima carga de flexão foi a do PP-TD40 com 137,87 MPa, no sentido transversal a 23°C. Novamente, todos os materiais tiveram seus valores de máxima carga de flexão diminuídos a 80°C em relação aos valores a 23°C e o material que obteve a maior alteração em relação aos valores longitudinais e transversais foi o PP50-JU50 com 46,3% a 23°C, já o PO77-JU23 obteve uma variação de apenas 8,6% a 80°C.

A adição da fibra de juta no polipropileno, fez com que a sua carga máxima de flexão diminuísse 61,4%, passando de 133,97 MPa (PP-TD40) para 51,71 MPa (PP50-JU50) a 23°C no sentido longitudinal, já no sentido transversal esta diminuição foi ainda maior 74,4%. A 80°C a resistência máxima a tração passou de 48,67 MPa (PP-TD40) para 22,10 MPa (PP50-JU50) diminuindo assim cerca de 54,6% no sentido longitudinal e 61,3% no sentido transversal. Mostrando que a adição da fibra não trouxe melhorias ao polipropileno nesta propriedade.

A adição da fibra de juta no polipropileno, praticamente não alterou sua resistência ao impacto. Todavia os compósitos PO77-JU23 e EP69-JU31 obtiveram resistências ao impacto muito maiores que o PP-TD40.

Através da análise morfológica pode-se observar vazios na superfície correspondentes às fibras que foram destacadas da resina após o ensaio de tração. Isto foi um indicativo de que as fibras sem tratamento químico apresentaram uma adesão fibra-matriz pobre.

O PP-TD40 obteve melhores resultados nos ensaios de flexão a 23°C e a 80°C em ambos os sentidos, longitudinal e transversal e ainda foi o material que menos absorveu água e umidade e menos se degradou ou perdeu massa em função da temperatura. O PP50-JU50 obteve os melhores resultados em absorção acústica e densidade. O PP50-MA50 foi o melhor na tração a 23°C nos sentidos longitudinal e transversal. O PO77-JU23 foi o melhor material na tração a 80°C nos sentidos longitudinal e transversal. Contudo, o compósito EP69-JU31

não conseguiu se sair melhor em nenhum ensaio em relação aos outros materiais. Somando todas as notas nos ensaios de todos os materiais o melhor foi o PO77-JU23 com 54 pontos e o houve um empate técnico entre os materiais PP50-JU50 e o PP50-MA50 com 35 pontos cada.

Por último, a adição de fibra de juta no polipropileno fez com que sua densidade diminuísse 51,7%, sua absorção de água aumentasse 68,4%, sua perda de umidade aumentasse 10,0%, sua absorção acústica a 6.400 Hertz aumentasse 53,0%, sua energia absorvida no impacto aumentasse 6,2%, sua resistência a tração a 23°C diminuísse 2,8% e aumentasse 64,5% nos sentidos longitudinal e transversal e a 80°C diminuísse 23,9% e aumentasse 6,4% respectivamente, sua carga máxima de flexão a 23°C diminuísse 61,4% e 74,4% nos sentidos longitudinal e transversal e a 80°C diminuísse 54,6% e 61,3% respectivamente.

Assim, podemos concluir que compósitos naturais podem ser muito úteis em diversos ramos da indústria, dependendo apenas das solicitações e aplicações que cada peça / componente sofre, para uma escolha correta do compósito a ser utilizado. Com isso, as empresas aumentariam seus índices de uso de produtos biodegradáveis ou ecologicamente corretos e diminuiriam o consumo de combustíveis fósseis, indo de encontro aos anseios da humanidade.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Com o desenvolvimento deste trabalho, torna-se importante o conhecimento de outros assuntos que poderão aperfeiçoar e complementar os temas aqui abordados. Algumas propostas foram aqui sugeridas:

Realizar um tratamento alcalino nas fibras para diminuir a absorção de água. Entre os componentes principais das fibras vegetais a hemicelulose é a principal responsável pela absorção de água da fibra. O tratamento alcalino extrai ao menos parte da hemicelulose e desta maneira espera-se uma redução no nível de absorção da fibra.

Realizar ensaios mecânicos na fibra de sisal aglutinada com resina epóxi em outras condições extremas de temperaturas, sejam elas mais altas, acima de 80°C ou temperaturas muito baixas, negativas, para verificar melhor o comportamento dos compósitos.

Realizar os mesmos ensaios mecânicos aqui testados, porém antes dos testes, deixar os compósitos submersos em água por algumas horas, secá-los e depois testá-los novamente, para efeito comparativo.

Realizar ensaios triaxiais cíclicos a fim de entender melhor o comportamento tensão-deformação dos compósitos aqui criados.

Realizar o ensaio de flexão dos dois lados do compósito, ou seja, testar do lado em que a resina fica mais aparente quando laminado e no lado em que a fibra fica mais aparente quando laminado. Para assim comparar os dados. Os testes nesta tese foram feitos somente do lado em que a resina fica mais aparente.

Utilizar estes compósitos, para validar/utilizar em uma peça utilizada na indústria automobilística, tendo assim um novo material mais ecologicamente correto.

Validar/utilizar os dados encontrados nos ensaios aqui feitos em um programa de elementos finitos para demonstrar e confirmar as melhores peças onde poderão ser utilizados estes novos materiais.

Laminar, para efeito comparativo, compósitos utilizando fibra de juta e outras resinas vegetais, como canola, milho, linho, oliva, óleo de soja no lugar das resinas aqui testadas, as quais são sintéticas. Assim teríamos um compósito feito com fibra natural e resina vegetal, sendo totalmente ecológico.

Avaliar a variação das propriedades com maiores percentagens de fibra nos compósitos.

Estudar o efeito de diferentes tipos de tratamento da fibra de juta nas propriedades estudadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENDA 21 BRASILEIRA. 2002. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/agenda21brasileira.php>>. Acesso em: 28 mar. 2014.

AHMED, B. A.; ABDERREZAK, B. A.; MOSTEFA, B. B.; FABRIZIO S. **Tensile static and fatigue behaviour of sisal fibres**. Elsevier. Materials and Design 46, pag. 76–83, 2013.

ALMANAQUE ABRIL. Ano 36. São Paulo: Abril, 2010.

AL-QURESHI, H. A. **Composite Materials: Fabrication and Analysis**. p.p. 3.2-3.3. ITA (Instituto Tecnológico da Aeronáutica), SP, 1988.

AL-QURESHI, H. A. **Introdução aos materiais plásticos reforçados**. UFSC, Florianópolis, 2002.

ANON, M.C. **Curso básico intensivo de plásticos (C.B.I.P.)**. Jornal de Plásticos. Niterói, RJ, 1997.

ARAÚJO, J. R.; WALDMAN, W. R.; DE PAOLI, M. A. **Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: coupling agent effect**. Polymer Degradation and Stability, v 93, p 1770-1775, 2008.

ARAÚJO, M., CASTRO, E. M. M., **Manual de engenharia têxtil**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1984.

ARTECOLA. **Chevrolet Cruze**. Disponível em: <<http://www.msam.com.br/v2/noticias/artecola-desenvolve-fibra-natural-em-parceria-com-gm0>>. Acesso em 23 ago. 2014.

ASHBEE, K. H. G. **Fundamentals Principles of Fiber Reinforced Composites**. 2nd. ed., Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, PA, 1993.



ASM. Metals Handbook. Volume 21. **Composites**, American Society of Metals, International Handbook Committee, 2001.

BAMBOOYA. **Bamboo car**. Disponível em: <<http://www.bambooya.com/bamboo.html>>. Acesso em: 23 ago. 2014.

BANANEIRA. **Fibra de bananeira**. Disponível em: <<http://portuguese.alibaba.com/product-free-img/fibra-de-bananeira-musa-textilis--126416065.html>>. Acesso em 14 set. 2014.

BEN. **Balanco Energético Nacional. Relatório final, ano base 2011**. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2011.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf)>. Acesso em: 28 jul. 2014.

BEN. **Balanco Energético Nacional. Relatório final, ano base 2012**. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2012.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf)>. Acesso em: 28 jul. 2014.

BEN. **Balanco Energético Nacional. Relatório final, ano base 2013**. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2013.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf)>. Acesso em: 28 jul. 2014.

BEN. **Balanco Energético Nacional. Relatório final, ano base 2014**. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2014.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf)>. Acesso em: 28 jul. 2014.

BENTO, P. F. **Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos**. Dissertação de mestrado. UnB, Brasília, 2006.

BOOPALAN, M.; NIRANJANAA, M.; UMAPATHY, M.J. **Study on the mechanical properties and thermal properties of jute and banana fiber reinforced epoxy hybrid composites**. Elsevier. Composites: Part B 51, pag. 54–57, 2013.

BORRI, A.; CORRADI, M.; SPERANZINI, E. **Reinforcement of wood with natural fibers**. Elsevier. Composites: Part B 53, pag. 1–8, 2013.

BRAGA, R. A. **Análise da utilização de fibras naturais aglutinadas com resina epóxi, para fabricação de uma cobertura central do porta-malas de um automóvel de passageiros.** Dissertação (Mestrado). – PUC-MG, Belo Horizonte, 2010.

BRAGA, R. A. **Uma análise da utilização de fibra vegetal na indústria automobilística.** Monografia (Especialização em Engenharia Automotiva) – UFSC – Santa Catarina, 2006.

BRAHMAKUMAR, M.; PAVITHRAN, C.; PILLAI, R. M. **Coconut fibre reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites.** Composites Science and Technology, v 65, p 563-569, 2005.

CANEVAROLO Jr., **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** São Paulo: Artliber, 2002.

CARRETEIO, Fernando; BORGES, Marcos Roberto. **Unidade protótipo para secagem de biomassa utilizando tecnologia de microondas.** Monografia, Universidade Positivo, Núcleo de ciências exatas e tecnológicas , Curitiba, 2008

CASTRO, Heizir F. **Processos Químicos Industriais II.** Faculdade de engenharia química de Lorena. Departamento de engenharia química. Anotações Apostila 4, 2001.

CAVALCANTE, J. M. F.; CARVALHO, L. H. **Development and mechanical characterization of LDPE/unidirectional jute yarn composite.** 6<sup>o</sup>International Symposium on Natural Polymers and Composites, 2007.

CHIAVERINI, Vicente. **Estrutura e propriedades das ligas metálicas.** Vols. I, II e III. 2<sup>a</sup> Edição. Cidade: Makron Books, 1986.

CONSUMIDOR MODERNO. **Consciente por conveniência.** Nº 192, Página: 36 a 56, Junho, 2014.

COQUEIRO. **O coqueiro (*Cocos nucifera*).** Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Coqueiro>>. Acesso em: 30 jul. 2014.

DA SILVA, R. V.; AQUINO, E. M. F.; RODRIGUES, L. P. S.; BARROS, A. R. F. **Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética.** Revista Matéria, v 13, p 154-161, 2008.

DAS, B.R.; BANERJEE, P.K. **Interface bond and compatibility of jute with asphalt.** Elsevier. Composites: Part B 53, pag. 69–75, 2013.

DEMARCHI, Carlos Alberto. **Aplicabilidade de placas de fibra de bananeira: caracterização, produção e absorção sonora.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2010.

ERHARDT, T.; BLUMCKE A., BURGER, W.; MARKLIN, M.; QUINZLER G. **Curso técnico têxtil – Segunda parte: Fibras vegetais, polímeros naturais, fibras de animais.** Editora pedagógica e universitária Ltda, São Paulo, SP, 2006.

FAGURY, R. V. G. **Avaliação de fibras naturais para a fabricação de compósitos: Açaí, coco e juta.** Dissertação de mestrado. UFPA, Belém, 2005.

FAZFÁCIL. **Qual o desmoldante mais apropriado ?.** 2010. Disponível em: <<http://www.fazfacil.com.br/materiais/desmoldantes.html>>. Acesso em: 31 mar. 2014.

FORD BRASIL. Sala de imprensa. **Ford é pioneira em utilizar sisal no interior dos veículos.** Disponível em: <[https://www.ford.com.br/sala\\_imprensa\\_noticia.asp?id\\_noticia=94](https://www.ford.com.br/sala_imprensa_noticia.asp?id_noticia=94)>. Acesso em: 28 mar. 2014.

FREIRE, R. C. S.; SILVA, C. S.; AQUINO, E. M. F. **Influência da presença de fibras aturais em compósitos híbridos, tipo sanduíche.** Centro de Tecnologia, Campus Universitário, Lagoa Nova. Natal, RN, 2013.

GASSAN, J.; BLEDZKI, A.K. **Composites reinforced with cellulose based fibres.** Progress in Polymer Science, v. 24, p. 221 – 274, 1999.

GEORGOPOULOS, S. T.; TARANTILI, P. A.; AVGERINOS, E.; ANDREOPOULOS, A. G.; KOUBIOS, E. G. **Thermoplastic polymer reinforced with fibrous agricultural residues. Polymer Degradation and Stability**, v 90, p 303-312, 2005.

GHOSH, P., SAMANTA, A. K., DEV, D., **Simultaneous free radical polymerization and acidic polycondensation of acrylamide-formaldehyde de resin in jute fabric.**, Journal Applied Polymer Science, 64: 2473-2489, 1997.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **Footprint calculator**. Disponível em: <<http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/calculators/>>. Acesso em: 15 jun. 2014.

GREENPEACE. Disponível em: <[http://www.greenpeace.org/brasil/pt/?gclid=CJfNyfbK\\_MACFfMgtAodyyYAxg](http://www.greenpeace.org/brasil/pt/?gclid=CJfNyfbK_MACFfMgtAodyyYAxg)>. Acesso em: 15 jun. 2014.

HACHEMANE, B; ZITOUNE, R.; BEZZAZI, B.; BOUVET, C. **Sandwich composites impact and indentation behaviour study**. Elsevier. Composites: Part B 51, pag. 1–10, 2013.

HEINBERG, Richard. **The End of Growth**. Canada: New Society Publishers, 2011.

HULL, D.; CLYNE T. W. **An introduction to composite materials**. Cambridge, UH, Cambridge University Press, 1996.

INPI. **Instituto Nacional de Propriedade Intelectual**. Disponível em: <[http://www.inpi.gov.br/portal/artigo/guia\\_basico\\_patentes](http://www.inpi.gov.br/portal/artigo/guia_basico_patentes)>. Acesso em: 28 jul. 2014.

JACOBI, Pedro. **O complexo desafio da sustentabilidade**. 2002. Disponível em: <<http://www.itcp.usp.br/drupal/node/301>>. Acesso em: 28 jul. 2014.

JOSEPH, P. V.; MATHEW, G.; JOSEPH, K.; GROENINCKX, G.; THOMAS, S., **Dynamic mechanical properties of short sisal fibre reinforced polypropylene composites**. Composites: Part A, v 34, p 275-290, 2003.

JOSEPH, S., **A comparison of the mechanical properties of phenol formaldehyde composites reinforced with banana fibres and glass fibres.**, Composites Science and Technology, vol. 62, p. 1857-1868, 2002.

KHALID, M.; RATNAM, C. T.; CHUAH, T. G.; ALI, S.; CHOONG, T. S. Y. **Comparative study of polypropylene composites reinforced with oil palm empty fruit bunch fiber and oil palm derived cellulose.** Materials and Design, v 29, p 173-178, 2008.

LANGENHEIM, Jean H. **Plant resins: Chemistry, evolution, ecology, and ethnobotany.** Hong Kong: Timber Press/Portland and Cambridge, 2003.

LEÃO, A. R. **Termoformagem: Estudo de conformação de chapas termoplásticas por vácuo com auxílio de contramolde.** Monografia. Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, São Paulo, 2009.

LEE, S. M. (Ed.). **Natural fiber composites. In: International encyclopedia of composites.** New York. VCH Publishers.V. 4, p. 8-16, 1989.

LESKO, Jim. **Design Industrial: Materiais e processos de fabricação.** São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

LUZ, Maria J. S. **Efeito da deficiência hídrica sobre o rendimento e a qualidade da fibra do algodoeiro.** Embrapa, 1997. Disponível em: <[http://www.cnpa.embrapa.br/rbof/artigos/111997016\\_rbof,1\(1\),125-133,1997.pdf](http://www.cnpa.embrapa.br/rbof/artigos/111997016_rbof,1(1),125-133,1997.pdf)>. Acesso em: 25 jun. 2014.

MARCONCINI, J. M.; ITO, E. N.; JR, E. H.; MATTOSO, L. H. C. **Studies on polypropylene/cellulose microfiber composites.** 6th International Symposium on Natural Polymers and Composites, 2007.

MARTINS T. **O conceito de desenvolvimento sustentável e seu contexto histórico.** 2003. Disponível em: <<http://jus2.uol.com.br/doutrina/texto.asp?id=5490>>. Acesso em: 28 mar. 2013.

MATHUR, V. K. **Composite materials from local resources**. Construction and Building Materials, v 20, p 470-477, 2006.

MATTOSO, L. H. C.; FERREIRA, F. C.; CURVELO, A. A. S. **Sisal Fiber: Morphology and Applications in Polymer Composites**. International Symposium on Lignocellulósics-Plásticos Composites. USP; UNESP. São Paulo, 1996.

MAXEPOXI. **Centro técnico e comercial voltado à distribuição de resinas epóxi da marca Araldite®**. 2014. Disponível em: <<http://www.maxepoxi.com.br>>. Acesso em: 02 set. 2014.

MEADOWS, Donella; RANDERS, Jorgen; MEADOWS, DENNIS. **Limits to Growth: the 30-year update**. Cidade: Chelsea Green Publishing Company, 2004.

MEDEIROS, E. S. **Desenvolvimento de compósitos de resina fenólica reforçados por tecidos híbridos juta/algodão**. 149 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

MEDINA, J. C. **Plantas fibrosas da flora mundial**. Campinas: IAC, p. 1-21, 1989

MENDONÇA, Paulo de Tarso R. **Materiais Compósitos & Estruturas Sanduíche: Projeto e Análise**. Barueri, SP. Editora Manole, 2005.

MILANESE, A. C.; CIOFFI, M. O. K.; JACOBUS, H. **Mechanical behavior of natural fiber composites**. Elsevier. Procedia Engineering 10, pag. 2022–2027, 2011.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M., DRZAL, L. T. **Sustainable Bio-Composites From Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green Materials World**, Journal of Polymers and the Environment, v.10, 2002.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. **Natural fibers, biopolymers, and biocomposites**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.

MOL, Arthur P. J. **The Refinement of Production: ecological modernization theory and the chemical industry.** 1995. Disponível em:

<<http://www.enp.wur.nl/NR/rdonlyres/10455A53-B1F5-4BA5-9F68-614CE241511B/144953/Mol1995TheRefinementofProduction.pdf>>. Acesso em 28 mar 2014.

MORAES, A. B. **Caracterização mecânica de compósitos injetados em molde com resinas de fontes renováveis reforçadas por fibras naturais de sisal.** PUC Minas. Dissertação de mestrado, Belo Horizonte, 2012.

MORAES, D. J. O. **Avaliação de propriedades de fadiga de compósitos de polipropileno reforçado com fibras de coco.** Centro Universitário da FEI. Dissertação de mestrado, São Bernardo do Campo, 2013.

MUBARAK, A. K.; JOHANNES, G.; HANS-PETER, F. **Hybrid composites of jute and man-made cellulose fibers with polypropylene by injection moulding.** Elsevier. Composites: Part A 40, pag. 846–851, 2009.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: Ciência e tecnologia.** São Paulo, SP. Editora Edgard Blucher, 2006.

NORMA ABNT NBR NM 30. **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.** (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 2001.

NORMA ASTM C1557. **Standard test method for tensile strength and young's modulus of fibers.** (American Society for Testing and Materials), 2013.

NORMA ASTM D3822. **Standard test method for tensile properties of single textile fibers.** (American Society for Testing and Materials), 2014.

NORMA ASTM D638. **Standard test method for tensile properties of plastics.** (American Society for Testing and Materials), 2010.

**NORMA ASTM D790. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials.** ASTM (American Society for Testing and Materials), 2010.

**NORMA FIAT AUTO 50424.** Fiat Chrysler Automobiles. **Prova d'urto mediante caduta di dardo de materie plástiche rigide.** 10/10/2011. Turin, Itália, 2011.

**NOTÍCIAS NATURAIS. As incríveis plantas brasileiras que esquecemos de comer.** Disponível em: <<http://forum.noticiasnaturais.com/Topico-as-incr%C3%ADveis-plantas-aliment%C3%ADcias-brasileiras-que-esquecemos-de-comer>>. Acesso em: 04 Fev. 2015.

**OLIVEIRA, Elaine C. P. Estrutura foliar de curauá em diferentes intensidades de radiação fotossinteticamente ativa.** Artigo técnico. Embrapa, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.org/pdf/pab/v43n2/a02v43n2.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2014.

**ORBIT.** Disponível em: <<http://www.orbit.com>>. Acesso em 15 jul. 2014.

**PASSOS, Priscila N. C. A Conferência de Estocolmo como ponto de partida para a proteção internacional do meio ambiente.** 2009. Texto completo. Disponível em: <<http://revistaeletronicardfd.unibrasil.com.br/index.php/rdfd/article/view/18/17>>. Acesso 28 mar 2014.

**PEREIRA, J. C. Curso de projeto estrutural com material compósitos.** UFSC, Florianópolis, SC, 2005.

**PIGATTO, C. Polipropileno e blendas PP/EPDM reforçadas com fibras curtas de sisal.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de mestrado, Porto Alegre, 2009.

**PIRES, Eduardo Nascimento. Efeito do tratamento de superfície em fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi.** Dissertação (Mestrado) – UFSC, Florianópolis, SC, 2009.

**POTTER, D. M., CORBMAN, B. P., Textiles: fiber to fabric.,** New York, Ed. McGraw-Hill/EUA, 495 p, 1967.



RABELLO, M. **Aditivação de Polímeros**. São Paulo: Artiliber, 2000.

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; REDDY, H. K. **Mechanical property evaluation of sisal–jute–glass fiber reinforced polyester composites**. Elsevier. Composites: Part B 48, pag. 1–9, 2013.

RANA, A.K., MANDAL, A., BANDYOPADHYAY, S., **Short jute fiber reinforced polypropylene composites: effect of compatibiliser, impact modifier and fiber loading.**, Composites Science and Tecnology. Vol. 63, pp: 801- 806, 2003.

RECICLA BRASIL. **Reciclagem PP: Características e Limitações**. <<http://reciclabrasil.net/pp.html>> Acesso em: 28 jul. 2014.

RED BARON ORIGINAL. **Red Baron**. Disponível em: <<http://images.google.com.br/imgres?imgurl=http://img.blogs.abril.com.br/1/hotwheels/images/800px-rotebaron.jpg&imgrefurl=http://blogs.abril.com.br/hotwheels/2009/09/red-baron-original.htm=K10IUtGM0fYidM:&tbnh=95&tbnw=143&prev=/images%3Fq%3Dbar%25C3%25A3o%2Bvermelho%2Bavi%25C3%25A3o%2Bnome%2Bdo%2Bavi%25C3%25A3o%26um%3D1%26hl%3Dpt-BR%26sa%3DN%26tbs%3Disch:1>> Acesso em: 28 jul. 2014.

REICHHOLD. **Boletim técnico: Composites Resapol 10-116 Rígida**. 08/02/2002.

REICHHOLD. **Boletim técnico: Composites Resapol 10-255 Flexível**. 13/03/2001.

REVISTA MECÂNICA ON LINE. **Ford kA Beauty**. 2008. Disponível em: <<http://www.mecanicaonline.com.br/especiais/2008/10/salao%2Bdo%2Bautomovel%2Bbrasil/16%2Bford.htm>>. Acesso em 23 ago. 2014.

REVISTA MOTORSHOW. **Plástico ecológico. Tecnologia à base de sisal, desenvolvida pela Ford do Brasil, pode deixar os carros mais leves e econômicos**. Disponível em: <<http://motorshow.terra.com.br/edicoes/315/artigo143560-1.htm>>. Acesso em: 28 mar. 2014.

RODRIGUEZ, Ferdinand. **Principies of Polymer Systems**. Taylor & Francis. Washington, DC, 1996.

ROWELL, R. M., SANADI, A. R., CAULFIELD, D. F., JACOBSON, R. E., **Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities.**, First International Lignocelluloses Plastics Composites, São Paulo, 1996.

RURAL NEWS, **O rami.** Disponível em: <<http://www.ruralnews.com.br/visualiza.php?id=291>>. Acesso em: 14 set. 2014

SABEEL, A. K.; VIJAYARANGAN, S. **Tensile, flexural and interlaminar shear properties of woven jute and jute-glass fabric reinforced polyester composites.** Elsevier. Journal of materials processing technology 207, pag. 330–335, 2008.

SALAZAR, V. L. P.; LEÃO, A. L. **Biodegradação das fibras de coco e de sisal aplicadas na indústria automotiva.** Tese de Doutorado, Departamento de Recursos Naturais e Ambientais, FCA/UNESP, Botucatu, SP, 2006.

SANTULLI, C.; SARASINI, F.; TIRILLÒ, J.; VALENTE, T.; VALENTE, M.; CARUSO, A. P.; INFANTINO, M.; NISINI, E.; MINAK, G. **Mechanical behaviour of jute cloth/wool felts hybrid laminates.** Elsevier. Materials and Design 50, pag. 309–321, 2013.

SATHISHKUMAR, T. P.; NAVANEETHAKRISHNAN, P.; SHANKAR, S.; RAJASEKAR, R.; RAJINI, N. **Characterization of natural fiber and composites - A review.** Journal of Reinforced Plastics and Composites 32, pag. 1457, 2013.

SILAEX. **Silaex química Ltda.** Disponível em: <<http://www.silaex.com.br>>. Acesso em: 31 ago. 2014.

SILVA, J. L. G.; AL-QURESHI, H.A. **Mechanics of wetting systems of natural fibres with polymeric resin.** Journal of Materials Processing Technology, Amsterdam, v.92/93, p.124-128, 1999.

SILVA, O. R. R. F.; BELTRÃO, N. E. M. **O agronegócio do sisal no Brasil.** Brasília: EMBRAPA-SPI, 1999.

SILVA, R. V. **Compósito de Resina Poliuretano Derivada de Óleo de Mamona e Fibras Vegetais**. Tese de Doutorado, USP- São Carlos-SP, 2003.

SOARES, Leonardo. **Da juta à saca de café, a cara de um país**. 2010. Disponível em: <[http://gazetaonline.globo.com/\\_conteudo/2010/03/618154-da+juta+a+saca+de+cafe+a+cara+de+um+pais.html](http://gazetaonline.globo.com/_conteudo/2010/03/618154-da+juta+a+saca+de+cafe+a+cara+de+um+pais.html)>. Acesso em: 20 jun. 2014.

VASILIEV, V. V.; MOROZOV, E. V. **Mechanical and analysis of composite materials**. ELSEVIER, 2001.

WIKIPEDIA. **Spitfire**. Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Spitfire\\_F\\_VB\\_BM597.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Spitfire_F_VB_BM597.jpg)>. Acesso em: 06 ago. 2014.

WOOL, Richard P; SUN, Xiuzhi S. **Bio-based Polymers and Composites**. Cidade: Elsevier Science & Technology Books, p. 114-115, 2005.

WWF. **World Wide Fund for Nature**. Disponível em: <<http://www.worldwildlife.org/who/index.html>>. Acesso em: 20 jun. 2014.

XANTHOS, M. **Functional fillers for plastics**, Newark USA: Wiley-VCH, 2005.

## GLOSSÁRIO

**Acrílico** – Nome comum do poli (metacrilato de metila), que é um termoplástico duro, vítreo e de alta transparência.

**Aditivos (em polímeros)** – São materiais adicionados como componentes auxiliares dos plásticos e/ou das borrachas, a inclusão de aditivos nas formulações ou composições de plásticos ou de borrachas visa uma ou mais aplicações específicas como, por exemplo, abaixar o custo, modificar e/ou melhorar diversas propriedades, facilitar o processamento, colorir, etc. os principais aditivos em polímeros são: fibras de reforço, cargas inertes, cargas reforçantes ou reforçadas, plastificantes, lubrificantes, pigmentos, corantes, estabilizantes térmicos, antioxidantes, retardantes de chama, agentes de expansão, aromatizantes, etc.

**Blenda polimérica** – Terminologia adotada, na literatura técnica sobre polímeros, para representar as misturas físicas ou misturas mecânicas de dois ou mais polímeros, de forma que entre as cadeias moleculares dos polímeros diferentes só exista interação intermolecular secundária ou que não haja um elevado grau de reação química entre as cadeias moleculares dos polímeros diferentes. Muitas blendas poliméricas são utilizadas como plásticos de engenharia, com aplicações principalmente na indústria automobilística.

**Borracha** – É o mesmo que elastômero, podendo ser natural ou sintética; as borrachas tradicionais são materiais poliméricos que exibem, após a vulcanização, elasticidade em longas faixas de deformação, à temperatura ambiente; as borrachas comuns são: borracha natural, copolímero butadieno-estireno (borracha SBR), polibutadieno, borracha butílica, borracha de etileno-propileno. (EPR), borracha de etileno-propileno-monômero diênico. (EPDM), borracha nitrílica (copolímero butadieno-acrilonitrila) e o policloropreno; as borrachas especiais são: elastômeros fluorados, elastômeros de silicone, elastômeros de poliuretanos, elastômeros de polietileno clorossulfonados, elastômeros de polissulfetos (ou borrachas polissulfídicas) e elastômeros termoplásticos; borracha crua: borracha não vulcanizada, sem qualquer aditivo, sendo um termoplástico nesta fase; vulcanização de borrachas: é o processo químico de maior importância para as borrachas tradicionais, introduzindo a elasticidade, melhorando a resistência mecânica e reduzindo a sua sensibilidade às variações de temperatura. O principal agente de vulcanização é o enxofre; borracha vulcanizada: borracha após a vulcanização, possuindo cadeias poliméricas com

poucas ligações cruzadas (ligações químicas primárias), interconectando cadeias poliméricas diferentes. Só após a vulcanização é que as borrachas tradicionais têm aplicação prática; borracha regenerada: borracha que pode ser reaproveitada através de tratamento químico. A regeneração nem sempre é possível e algumas vezes não é um processo economicamente viável. A borracha regenerada pode ser utilizada uma segunda vez, como carga em composições de borrachas cruas; borrachas pretas: são composições de borracha contendo o negro de fumo como carga reforçante, que melhora muito a resistência à abrasão das borrachas.

**Borracha (natural)** – Polímero natural obtido pela coagulação do látex da “*Hevea Brasiliensis*”, a borracha natural é quimicamente constituída pelo poli-cis-isopreno.

**Borracha (nitrílica)** – Borracha sintética constituída pelo copolímero butadieno-acrilonitrila, com teor de acrilonitrila variando normalmente entre 20 e 45%; a borracha nitrílica com alto teor de acrilonitrila tem excelente resistência à gasolina e a outros fluídos apolares.

**Compósito (polimérico)** – Material conjugado formado por pelo menos duas fases ou dois componentes, sendo geralmente uma fase polimérica (matriz polimérica) e uma outra fase de reforço, normalmente na forma de fibras. Para a formação do material compósito ou do material conjugado é necessário haver uma interação química e/ou física entre a matriz polimérica e o reforço fibroso, proporcionando a transferência de esforços mecânicos da matriz polimérica para os reforços fibrosos; em compósitos com plásticos, os principais reforços fibrosos são: fibras de vidro, fibra de carbono e fibras tipo Kevlar.

**Copolímero** – Denominação geral para o polímero em que cada uma das muitas cadeias poliméricas é formada por dois ou mais tipos de meros; de acordo com a distribuição dos meros nas cadeias poliméricas, os copolímeros podem ser: estatísticos, alternados ou em blocos.

**Cristalinidade (em polímeros)** – A cristalinidade em polímeros pode ser definida como um arranjo ordenado tridimensional das estruturas macromoleculares dos polímeros; os polímeros, dependendo de vários fatores, podem apresentar estruturas com algum grau de cristalinidade, mas na prática 100% de cristalinidade não é atingida; em polímeros, as regiões cristalinas são denominadas cristalitos; alguns polímeros cristalinos podem apresentar uma

microestrutura com esferulitos, que são arranjos esféricos, birrefringentes, de cristais interligados com regiões amorfas, e que apresentam a forma de uma cruz de Malta quando observados em microscópios ópticos com luz transmitida e polarizada. Os esferulitos aparecem em função das condições de cristalização, que têm grande influência nas propriedades dos polímeros cristalinos.

**Degradação (em polímeros)** – Reações químicas destrutivas dos plásticos ou das borrachas, que podem ser causadas por agentes físicos (radiação solar, temperatura, atrito mecânico intenso, etc.) e/ou por agentes químicos; a degradação é qualquer fenômeno que provoque alterações estruturais em um polímero, causando uma modificação irreversível nas suas propriedades físico-mecânicas, evidenciada pela variação indesejável dessas propriedades; as reações de degradação são minimizadas pela seleção adequada do plástico ou da borracha e pelo uso correto de aditivos estabilizantes na formulação do material.

**Elastômeros** – Polímeros que, na temperatura ambiente, podem ser estirados repetidamente a pelo menos duas vezes o seu comprimento original e que, após a retirada do esforço mecânico causador do estiramento, devem voltar rapidamente ao seu comprimento inicial.

**Ensaio (técnico)** – Conjunto de procedimentos normalizados para a obtenção de uma propriedade e/ou de um parâmetro do material ensaiado; o uso de ensaios padronizados é importante para garantir a comparação de valores obtidos em diferentes locais e/ou equipamentos de ensaios; no Brasil, é a Associação Brasileira de Normas Técnicas. (ABNT) quem cuida da normalização dos ensaios de materiais e das especificações técnicas dos materiais; os ensaios de materiais geralmente são divididos em ensaios físicos, mecânicos, elétricos, térmicos e outros.

**Fibras (em polímeros)** – São materiais definidos pela condição geométrica de alta relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra; em polímeros, muitas vezes considera-se que o quociente comprimento da fibra/diâmetro da fibra, denominado razão de aspecto, deve ser igual ou maior que cem; as fibras poliméricas, isto é, os polímeros empregados na forma de fibras, são termoplásticos orientados no sentido do eixo da fibra (orientação longitudinal); principais fibras poliméricas: náilons, poliésteres lineares saturados. (principalmente o poli. (tereftalato de etileno)), poliácrlonitrila e fibras poliolefínicas. (principalmente o polipropileno).

**Fibras de reforço (em polímeros)** – São materiais fibrosos que quando adequadamente incorporados aos polímeros aumentam muito a sua resistência mecânica, tendo também influência em outras propriedades. A incorporação das fibras de reforço em polímeros pode ser precedida de um tratamento prévio das fibras para a compatibilização do compósito que vai ser produzido, pois, muitas vezes as fibras de reforço são inorgânicas e o polímero é, freqüentemente, orgânico; para ter grande influência no reforçamento de polímeros, as fibras precisam ser incorporadas em misturadores adequados e o processamento do compósito ou material conjugado deve ser feito corretamente, para evitar drásticas reduções nos comprimentos das fibras. A eficiência do reforçamento depende da razão do aspecto das fibras, que é o quociente comprimento da fibra/diâmetro da fibra; as principais fibras de reforço empregadas em polímero são: fibras de vidro, fibras de carbono e fibras aramídicas.

**Grau de polimerização (em polímeros)** – Número de segmentos repetitivos ou meros que formam uma cadeia molecular polimérica; o grau de polimerização deve ser tratado em termos de valores médios para uma amostra polimérica; o grau de polimerização médio de polímeros comerciais é superior a 100, sendo muitas vezes superior a 500; ver peso molecular (em polímeros).

**Homopolímero** – Polímero constituído de cadeias poliméricas contendo um único tipo de mero.

**Látex** – Emulsão de um polímero em um meio líquido, normalmente água. Neste caso, temos emulsões aquosas; as emulsões podem ser aplicadas diretamente ou podem ser coaguladas, sendo o polímero extraído dos látices.

**Macromoléculas** – Grandes moléculas, mas não necessariamente polímeros. As macromoléculas não precisam ser internamente constituídas por unidades de repetição. Assim, os polímeros são formados por macromoléculas, mas as macromoléculas nem sempre são polímeros. São macromoléculas, sem ser polímeros, as proteínas (a-aminoácidos) e os ácidos nucléicos como o DNA – ácido desoxirribonucléico e o RNA – ácido ribonucleico.

**Materiais compósitos** – Materiais polifásicos resultante da mistura intencional de materiais distintos, um funcionando como matriz e outra como fase dispersa. A matriz pode ser polimérica e a fase dispersa podem ser fibras de vidro ou de carbono, por exemplo.

**Meio ambiente** – Tudo o que cerca o ser vivo, que o influencia e que é indispensável à sua sustentação. Estas condições incluem solo, clima, recursos hídricos, ar, nutrientes e os outros organismos. O meio ambiente não é constituído apenas do meio físico e biológico, mas também do meio sociocultural e sua relação com os modelos de desenvolvimento adotados pelo homem.

**Moldagem** – Conformação de um polímero em pó para uma massa sólida pela aplicação de pressão e calor.

**Mero** – Unidade de repetição do polímero, ou seja, é a unidade estrutural que se repete na cadeia macromolecular do polímero; a nomenclatura monômero e mero é muito empregada para os polímeros de adição, nas polimerizações em cadeia.

**Monômero** – Molécula simples que dá origem à unidade de repetição (mero) de um polímero. O monômero tem que ser pelo menos bifuncional, pois deve ter a capacidade de reagir em pelo menos dois pontos, dando origem a cada uma das cadeias macromoleculares do polímero; diferente de mero.

**Oligômero** – Material com peso molecular intermediário entre os materiais de baixo peso molecular e os polímeros; oligômeros = poucos meros; o termo oligômero é algumas vezes utilizado como sinônimo de pré-polímero; os oligômeros possuem normalmente grau de polimerização entre 5 e 100; ver grau de polimerização, peso molecular e polímero.

**Plástico** – É um material cujo constituinte fundamental é um polímero, principalmente orgânico e sintético, sólido em sua condição final (como produto acabado) e que em alguma fase de sua produção foi transformado em fluído, adequado à moldagem por ação de calor e/ou pressão. O plástico, além do(s) polímero(s) de base, pode conter vários tipos de aditivos; em relação aos processos tecnológicos os plásticos são divididos em termoplásticos e termofixos (ou termorrígidos); em função da qualidade da aplicação em que são empregados, os plásticos podem ser separados em plásticos convencionais, especiais e de engenharia; os plásticos de engenharia podem ser reforçados com fibras de vidro ou com outros reforços fibrosos; em função de sua natureza química e/ou de seus aditivos, os plásticos podem ser rígidos, semiflexíveis ou semi-rígidos, e flexíveis; os plásticos podem ser ligeiramente



expandidos formando os plásticos expandidos estruturais ou podem se transformar, por grande expansão, em plásticos expansíveis ou espumas – plásticos fabricados na forma celular por processos térmicos e/ou químicos e/ou mecânicos, e que possuem densidade entre 0,03 a 0,3 g/cm<sup>3</sup> (exemplo: isopor, nome comercial da espuma de poliestireno); ver aditivos, polímero, termoplásticos e termofixos.

**Polimerização** – É a síntese de um polímero; a polimerização é o conjunto das reações que provocam a união de pequenas moléculas, por ligação covalente, para a formação das muitas cadeias macromoleculares que compõem um material polimérico; a polimerização consiste em reagir um ou mais monômeros para a obtenção de polímeros; em relação ao número de meros das cadeias poliméricas do polímero sintético, as polimerizações podem ser: homopolimerização, que é a polimerização onde as cadeias poliméricas do polímero sintetizado são constituídas por um único tipo de mero e, copolimerização, que é o termo geral para a polimerização onde as cadeias poliméricas do copolímero sintetizado são constituídas por dois ou mais tipos de meros; quanto ao método de preparação as polimerizações se dividem em poliadição e policondensação. As poliadições são polimerizações não acompanhadas da formação de subprodutos, e que, quando convencionais, são polimerizações com mecanismos de reações em cadeia, subdivididas em: polimerizações em cadeia via radicais livres, polimerizações em cadeia iônicas (catiônicas, aniônicas comuns e aniônicas via polímeros vivos) e as polimerizações em cadeia estereoespecíficas por complexos de coordenação, onde se destacam as polimerizações em cadeia tipo Ziegler-Natta. Os principais polímeros de adição (obtidos em polimerizações em cadeia) são: polietilenos, polipropileno, poliestireno, poli (cloreto de vinila), poli (metacrilato de metila), etc. As policondensações convencionais são polimerizações acompanhadas da formação de subprodutos, com mecanismos de reações em etapas. Os principais polímeros de condensação (obtidos em policondensações convencionais) são: náilons, poliésteres, resinas fenólicas, resina melamina-formaldeído, resina uréia-formaldeído, etc; em relação ao meio físico em que são realizadas, as polimerizações podem ser separadas em polimerização em massa, em solução, em suspensão e em emulsão;

**Polímero** – Material orgânico ou inorgânico, natural ou sintético, de alto peso molecular, formados por muitas macromoléculas, sendo que cada uma destas macromoléculas deve possuir uma estrutura interna onde há a repetição de pequenas unidades chamadas meros (unidades de repetição); o termo polímeros vem de: poli = muitas e meros = partes, unidades

de repetição; o termo polímero é massivo, sendo utilizado para designar o material cuja composição é baseada em um conjunto de cadeias poliméricas, e cada uma das muitas cadeias poliméricas que formam o polímero é uma macromolécula formada por união de moléculas simples ligadas por covalência; os polímeros de interesse comercial geralmente têm pesos moleculares médios superiores a 10.000g/mol, sendo que para os polímeros com muito alto peso molecular (acima de 100.000g/mol) algumas vezes adota-se a designação alto polímero; em relação ao tipo de cadeia polimérica, pode-se ter polímeros de cadeia carbônica, onde só existem átomos de carbono na cadeia molecular principal ou eixo ou espinha dorsal do polímero, e polímeros de cadeia heterogênea (ou heteropolímeros), onde a cadeia molecular principal do polímero contém átomos diferentes de carbono, que também pode estar na cadeia principal do polímero; polímeros naturais orgânicos: borracha natural, madeira, algodão, etc.; polímeros naturais inorgânicos: diamante, grafite, vidro, etc.; polímeros artificiais, que são polímeros orgânicos naturais modificados: acetato de celulose, nitrato de celulose, acetatobutirato de celulose, carboximetil celulose, etc.; polímeros sintéticos orgânicos: polietilenos, polipropileno, PVC, poliestireno, náilons, poliésteres, etc.; polímeros sintéticos inorgânicos: ácido polifosfórico, poli (cloreto de fosfonitrila), etc.; não sendo acrescentada nenhuma característica ao polímero, normalmente admite-se que o polímero seja orgânico e sintético; os polímeros, quanto ao arranjo espacial tridimensional das cadeias poliméricas podem ser: amorfos (com arranjo desordenado das moléculas poliméricas) ou parcialmente cristalinos (arranjos onde existem regiões ordenadas, sendo que a fração dessas regiões ordenadas, em relação ao material todo, caracteriza o grau de cristalinidade do polímero); os polímeros, como matérias-primas na forma de pós, grânulos, dispersões ou fardos (borrachas), são transformados e utilizados em produtos finais como plásticos, borrachas, fibras, espumas, revestimentos, tintas e adesivos; os polímeros, em função do seu consumo e da qualidade de suas aplicações, podem ser: convencionais (ou de grande consumo) e não convencionais, onde se enquadram os polímeros de engenharia, os polímeros reforçados, os polímeros para uso em altas temperaturas, os polímeros condutores, os cristais líquidos poliméricos ou polímeros líquidos cristalinos, os polímeros barreira e outros polímeros especiais; ver borracha, peso molecular e plástico.

**Processamento de polímeros** – O mesmo que moldagem; processamento é a transformação de um polímero, como matéria-prima, em um produto final; a escolha do tipo de processo de transformação de um polímero em um produto polimérico é feita com base nas características intrínsecas do polímero, na geometria do produto a ser moldado e na quantidade do produto

que será produzida; o processamento de um polímero pode ser feito por várias técnicas, sendo as principais citadas a seguir: moldagem por injeção, extrusão (incluindo as técnicas de coextrusão), moldagem por sopro (extrusão-sopro e injeção-sopro), moldagem por compressão, calandragem, termoformagem à vácuo, moldagem rotacional (ou rotomoldagem).

**Reologia** – É ciência que estuda as deformações e o escoamento dos materiais; a reologia, que é particularmente importante para o estudo dos polímeros, abrange principalmente o estudo da elasticidade, da plasticidade, da viscosidade e do escoamento dos materiais em geral.

**Resina** – Termo atualmente empregado para representar qualquer matéria-prima polimérica no estado termoplástico, sendo fusíveis, insolúveis em água, mas solúveis em outros meios líquidos. Assim, são resinas: um próprio termoplástico ou uma resina, antes da cura, e que vai se transformar em um termofixo, após a cura; para os polímeros sintéticos pode-se empregar o termo resina sintética.

**Termofixos** – São materiais plásticos que quando curados, com ou sem aquecimento, não podem ser reamolecidos por um próximo aquecimento; as matérias-primas para os termofixos são resinas oligoméricas, ainda termoplástica, que na moldagem em produtos, são curadas e transformadas em termofixos, insolúveis; estruturalmente, os termofixos têm como componentes fundamentais polímeros com cadeias moleculares contendo muitas ligações químicas primárias entre as cadeias diferentes – ligações cruzadas – que geram o comportamento dos termofixos, que podem também ser chamados polímeros reticulados ou polímeros com muitas ligações cruzadas; os termofixos, quando for necessário, podem conter aditivos e podem ter aplicações como plásticos de engenharia, como é o caso dos poliésteres insaturados reforçados com fibras de vidro; exemplos de matérias-primas para os plásticos termofixos: resina fenólica, resina uréia-formaldeído, resina melamina-formaldeído, resina epóxi e resina de poliéster insaturado; podem ser empregados como sinônimos de termofixos, os termos termorrígidos e termoendurecíveis; ver cura, oligômero, plástico, polímero e resina.

**Termoplásticos** – São polímeros capazes de ser repetidamente amolecidos pelo aumento da temperatura e endurecidos pela diminuição da temperatura. Esta alteração reversível é física e não química, mas pode provocar alguma degradação no termoplástico, para um número elevado de ciclos de aquecimento e de resfriamento; estruturalmente, os componentes

fundamentais dos termoplásticos são polímeros com cadeias lineares ou ramificadas, sem ligações cruzadas, isto é, entre as cadeias poliméricas diferentes só existem interações intermoleculares secundárias, reversíveis com a temperatura; os termoplásticos podem ser: convencionais (ou de grande uso), especiais ou de engenharia; os termoplásticos convencionais (ou de grande uso) são: polietileno de baixa densidade, polietileno de alta densidade, polipropileno, poli (cloro de vinila) e o poliestireno; entre os termoplásticos especiais se destacam o poli. (metacrilato de metila) e o poli (tetraflúor-etileno); os principais termoplásticos de engenharia são: náilons, policarbonatos, poliacetais, poliésteres termoplásticos, ABS. (graus de engenharia), poli (óxido de fenileno) modificado com poliestireno, polissulfonas, poli (sulfeto de fenileno) e poli (éter-éter-cetona); os termoplásticos, quando for necessário, podem conter aditivos;

**Termorrígidos** – O mesmo que termofixos.

**Termopolímero** – Caso particular de copolímero formado por três meros diferentes; o ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno) é o principal exemplo de terpolímeros.