

**ANÁLISE MECÂNICA COMPARATIVA DE TRAÇÃO, FLEXÃO E
IMPACTO ENTRE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE
CURAUÁ E COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO**

NATÁLIA DE OLIVEIRA ROQUE MACIEL

UNIVERSIDADE ESTADUAL NORTE FLUMINENSE - UENF

Campos dos Goytacazes - RJ

Abril - 2017

**ANÁLISE MECÂNICA COMPARATIVA DE TRAÇÃO, FLEXÃO E
IMPACTO ENTRE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE
CURAUÁ E COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO**

NATÁLIA DE OLIVEIRA ROQUE MACIEL

"Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais".

Orientador: DSc. Carlos Maurício Fontes Viera

Campos dos Goytacazes - RJ

Abril - 2017

ANÁLISE MECÂNICA COMPARATIVA DE TRAÇÃO, FLEXÃO E IMPACTO ENTRE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CURAUÁ E COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO

NATÁLIA DE OLIVEIRA ROQUE MACIEL

"Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais".

Aprovada em 12 de Abril de 2017.

Comissão examinadora:

Prof. Rosane da Silva Toledo Manhães (DSc, Física) - UENF

Prof. Jonas Alexandre (DSc, Engenharia) - UENF

Prof. Maycon de Almeida Gomes (DSc., Engenharia) - IFF

Prof. Carlos Maurício Fontes Vieira (DSc., Engenharia) - UENF

(Orientador)

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar.
Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.*

Madre Teresa de Calcutá

AGRADECIMENTOS

A Deus sou imensamente grata, porque até aqui me tem ajudado.

Ao meu marido Danilo Maciel, por ajudar e compreender meus momentos ausente.

Aos meus pais e irmãos que foram pilares na minha vida e me ajudaram a chegar onde estou.

Aos meus sogros que muita das vezes me socorreram nos momentos que precisei.

Ao bolsista Michel, pelo tempo dedicado aos ensaios e pela ajuda prestada.

Ao meu orientador, Carlos Maurício Fontes Vieira, que acreditou no meu potencial e me ajudou a findar este trabalho, bem como aos demais professores, em especial, Eduardo Atem, Jonas Alexandre e Cláudio Marciano, que foram de grande valia para a conclusão desta dissertação.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, pela oportunidade do mestrado.

Aos professores da banca, Rosane e Maycon, obrigada por espontaneamente aceitarem o convite para participar da banca desta dissertação.

Aos amigos e colegas conquistados na universidade durante este período, em especial, Dhyemila.

A todos que, de alguma forma, souberam compreender o momento e na arquibancada da vida torceram para que no fim tudo se ajeitasse da melhor forma possível.

Muito Obrigada!

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	OBJETIVOS.....	20
2.1	OBJETIVO GERAL.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3	JUSTIFICATIVA.....	21
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
4.1	COMPÓSITOS.....	22
4.2	MATRIZ.....	25
4.2.1	Resinas Epóxicas.....	28
4.3	FIBRAS.....	31
4.3.1	Fibras Sintéticas.....	32
4.3.1.1	Fibras de Vidro.....	33
4.3.2	Fibras Naturais.....	34
4.3.2.1	Fibras de curauá.....	38
4.3.2.2	Análise das características das fibras e dos compósitos de curauá.....	40
4.3.3	Fibras de Vidro x Fibras Naturais.....	45
4.4	PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS.....	48
4.4.1	Processos de Molde Aberto.....	48
4.4.2	Processos de Molde Fechado.....	51
4.4.3	Fatores que Influenciam as Propriedades Mecânicas dos Compósitos Reforçados com Fibras Naturais.....	52
4.5	O SETOR AUTOMOBILÍSTICO E OS COMPÓSITOS.....	58
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
5.1	MATÉRIA-PRIMA.....	60
5.2	METODOLOGIA EMPREGADA NA CARACTERIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	60
5.2.1	Preparação das fibras de curauá.....	60
5.2.2	Caracterização dimensional.....	61

5.2.2.1	Comprimento médio das fibras.....	61
5.2.2.2	Diâmetro médio	61
5.2.2.3	Massa.....	62
5.2.3	Determinação da densidade.....	62
5.2.3.1	Técnica geométrica	62
5.2.3.2	Ensaio com picnômetro	63
5.2.4	Caracterização Microestrutural.....	66
5.3	ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS.....	68
5.3.1	Tração	68
5.3.1.1	Corpo de prova para ensaio de tração	71
5.3.2	Flexão.....	73
5.3.2.1	Corpo de prova para ensaio de flexão.....	74
5.3.3	Impacto.....	75
5.3.3.1	Corpo de prova para ensaio de impacto.....	77
5.4	ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS ATRAVÉS DA ESTATÍSTICA DE WEIBULL.....	79
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	82
6.1	CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE CURAUÁ	82
6.1.1	Determinação da densidade: método geométrico	83
6.1.2	Determinação da densidade: método picnômetro	84
6.2	ENSAIOS MECÂNICOS	85
6.2.1	Tração	85
6.2.1.1	Tratamento estatístico dos dados experimentais - Diagrama de Weibull para ensaio de tração.....	91
6.2.2	Flexão.....	93
6.2.2.1	Tratamento estatístico dos dados experimentais - Diagrama de Weibull para ensaio de flexão	98
6.2.3	Impacto.....	100
7	CONCLUSÕES.....	105
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	107

REFERÊNCIAS.....	109
------------------	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos materiais compósitos (Adaptado de Callister, 2000; Bai, 2013).....	23
Figura 2 - Compósitos de plástico reforçados com fibras usados em 2002 (Adaptado de Mohanty <i>et al.</i> , 2005).....	24
Figura 3 - Classificação geral dos biopolímeros (Thomas <i>et al.</i> , 2013).....	26
Figura 4 - Reação do Bisfenol A e Epicloridrina com formação de resina epóxi (Gall e Greenspan, 1955).	29
Figura 5 - Esquema de cura da resina epóxi (Lee e Neville, 1967).....	29
Figura 6 - Classificação das fibras sintéticas (Adaptado de Thomas <i>et al.</i> , 2013)....	32
Figura 7 - Fluxograma primário da cadeia de produção das principais fibras sintéticas (Cunha <i>et al.</i> , 2001).....	33
Figura 8 - Representação esquemática da fibra de madeira (Coutts, 1992).	35
Figura 9 - Classificação das fibras naturais (Adaptado de Mohanty <i>et al.</i> , 2005).....	35
Figura 10 - Fotografia digital de algumas fibras naturais e fontes de fibras naturais (Adaptado de Misra <i>et al.</i> , 2015).	36
Figura 11 - (a) Planta de "curauá - branco" e "curauá - roxo" respectivamente (b) Fibra de curauá (Pires, 2009).....	38
Figura 12 - Fluxograma de processamento do compósito de curauá (Ferreira, 2009).	40
Figura 13 - Distribuição estatística do comprimento (a) e do diâmetro (b) das fibras (Monteiro <i>et al.</i> , 2006).	41
Figura 14 - Aspecto superficial da fibra de curauá observado no MEV (Takahashi <i>et al.</i> , 2011).	42

Figura 15 - Variação da tensão máxima (a) e módulo de elasticidade (b) versus o volume de fibras de curauá nos compósitos de matriz epoxídica (Lopes, 2011).	43
Figura 16 - Resultado de flexão dos compósitos com fibras de curauá em resina epóxi (Ferreira, 2009).....	44
Figura 17 - Variação da energia de impacto Charpy de compósitos epoxídicos versus fração em peso de fibras de curauá (Ferreira, 2009).....	44
Figura 18 - Fibras de vidro (Kemerich <i>et al.</i> , 2013)	45
Figura 19 - Comparação da resistência à tração de fibras vegetais e fibras de vidro (Silva, 2004).....	47
Figura 20 - Processo de deposição manual (Apostila processamento de materiais).	49
Figura 21 - Processo de pulverização (Apostila processamento de materiais).	49
Figura 22 - Processo de autoclave em embalagem à vácuo (Apostila processamento de materiais).....	50
Figura 23 - Processo de enrolamento filamental (Cerqueira e Alves, 2006).	50
Figura 24 - Processo de moldagem de folha (Smith e Hashemi, 2013).	51
Figura 25 - Processo de pultrusão contínua (Smith e Hashemi, 2013).	52
Figura 26 - Esquema das características geométricas e espaciais de reforços em compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) geometria, (d) distribuição e (e) orientação (Balasubramanian, 2013).	53
Figura 27 - (a) Baixa fração volumétrica de fibra (b) Intermediária fração volumétrica de fibra (c) Alta fração volumétrica de fibra (Rana e Fanguero, 2016).....	54
Figura 28 - Fraca aderência entre as fibras e a matriz (a); Forte aderência entre as fibras e a matriz (b) (Fonte: Batistelle e Renofio, 2005).	56

Figura 29 - (a) Gráfico tensão x deformação - reforço de fibras no sentido longitudinal (b) Gráfico tensão x deformação - reforço de fibras no sentido transversal (Adaptado de Besednjak, 2009).....	57
Figura 30 - Aplicação de fibras de plantas na Mercedes-Benz (Schuh, 2004).	59
Figura 31 - Projetor de Perfil Nikon, utilizado para medir o diâmetro das fibras de curauá (LAMAV/UENF).....	61
Figura 32 - Balança de precisão digital (LAMAV/UENF)	62
Figura 33 - Peso correspondente da fibra após seca (LAMAV/UENF).....	64
Figura 34 - Dessecador ligado à bomba a vácuo (LAMAV/UENF)	64
Figura 35 - Massa do picnômetro + água + fibra (LAMAV/UENF).....	65
Figura 36 - Microscópio eletrônico de varredura - MEV (Dedavid <i>et al.</i> , 2007)	67
Figura 37 - Corpo de prova para ensaio de tração (Dalcin, 2007).....	69
Figura 38 - Gráfico do comportamento típico da curva tensão-deformação para ensaio de tração (Adaptado de Callister, 2000).	70
Figura 39 - Organograma com o procedimento para fabricação dos corpos de prova de fibra de curauá para ensaio de tração.....	72
Figura 40 - Teste de flexão de 3 pontos	73
Figura 41 - Organograma do procedimento para fabricação dos corpos de prova de fibra de curaua para ensaio de flexão	75
Figura 42 - Ensaio de impacto (Dalcin, 2007).....	76
Figura 43 - Organograma do procedimento para fabricação dos corpos de prova de fibra de curauá para ensaio de Impacto Izod	78
Figura 44 - Histograma da distribuição dos diâmetros da fibra de curauá.....	82

Figura 45 - (a) Micrografias obtidas por MEV para análise da superfície irregular da fibra (b) Micrografias obtidas por MEV para análise das cavidades da fibra	83
Figura 46 - Macro aspecto dos corpos de prova após ensaio de tração: 0%, 30% fibra de curauá e 30% fibra de vidro respectivamente	86
Figura 47 - Curvas típicas de ensaio de tração (carga x alongamento) de compósitos na matriz epóxi reforçados com 0%, 30% fibra de curauá e 30% fibra de vidro, respectivamente	87
Figura 48 - Micrografias obtidas por MEV da superfície da matriz epóxi após ensaio de tração	87
Figura 49 - Variação média de resistência à tração em função da concentração e tipo de fibra.....	88
Figura 50 - Variação média de resistência específica à tração em função da concentração e tipo de fibra.	90
Figura 51 - Micrografias obtida por MEV da superfície de fratura do compósito reforçado com 30% em volume de fibras de curaua após ensaio de tração	90
Figura 52 - Diagrama de Weibull para compósitos com 0%, 30% FC e 30% FV (ensaio tração)	91
Figura 53 - Macro Aspecto dos corpos de prova após ensaio de flexão: 0%, 30% fibra de curauá e 30% fibra de vidro respectivamente	93
Figura 54 - Curvas típicas de ensaio de flexão (carga x tempo) de compósitos na matriz epóxi reforçados com 0%, 30% fibra de curauá e 30% fibra de vidro respectivamente	94
Figura 55 - Micrografias obtidas por MEV da superfície da matriz epóxi após ensaio de flexão.....	95
Figura 56 - Micrografias obtidas por MEV da superfície do compósito 30% FC após ensaio de flexão	95

Figura 57 - Micrografias obtidas por MEV da superfície do compósito 30% FV após ensaio de flexão	96
Figura 58 - Variação média de resistência à flexão em função da concentração e tipo de fibra.....	97
Figura 59 - Variação média de resistência específica à tração em função da concentração e tipo de fibra.	98
Figura 60 - Diagrama de Weibull para compósitos com 0%, 30% FC e 30% FV (ensaio flexão).....	99
Figura 61 - Aspectos macroestruturais por impacto Izod de compósitos de matriz epoxídica reforçados com 30% FC e 30% FV.....	101
Figura 62 - (a) Micrografias obtida por MEV da superfície da fibra de curauá após ensaio de flexão (b) Micrografias obtida por MEV da superfície da fratura após ensaio de impacto para compósito reforçado com 30% FC	102
Figura 63 - Micrografias obtida por MEV da superfície da fratura após ensaio de flexão para compósito 30% FV.....	102
Figura 64 - Variação média de energia de impacto Izod em função da concentração e tipo de fibra.....	103
Figura 65 - Variação média de energia de impacto Izod específica em função da concentração e tipo de fibra	104

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características dos polímeros termoplásticos e termofixos	28
Tabela 2 - Propriedades mecânicas de uma resina epóxi	31
Tabela 3 - Composição química da fibra de Curauá	39
Tabela 4 - Densidade do compósito de curauá na matriz epoxídica.....	42
Tabela 5 - Propriedades de tração para compósito de epóxi reforçado por fibras de curauá	43
Tabela 6 - Módulo específico de fibras naturais e fibra de vidro	46
Tabela 7 - Comparação entre as fibras naturais e as fibras de vidro	48
Tabela 8 - Comparação entre alguns compósitos reforçados com fibras naturais....	54
Tabela 9 - Aplicações de fibras naturais na indústria.....	59
Tabela 10 - Diferenças entre os ensaios de impacto <i>Charpy</i> e <i>Izod</i>	77
Tabela 11 - Massa da fibra, m_1 , m_2 , m_3	84
Tabela 12 - Parâmetros de Weibull para TRT.....	92
Tabela 13 - Parâmetros de Weibull para TRF.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.C. - Antes de Cristo

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CEAPAC - Centro de Apoio a Projetos de Ação Comunitária

Cp's - Corpos de prova

DGEBA - Éter Diglicidílico de Bisfenol A

DGEBF- Éter Diglicidílico de Bisfenol F

EDS - *Energy Dispersive x-ray detector*

Ep - Energia Potencial

GHG - *Greenhouse Gas Protocol*

ISO - *International Organization for Standardization*

I_c - Comprimento Crítico

LRT - Limite de Resistência a Tração

LRF - Limite de Resistência a Flexão

MEV - Micrografia Eletrônica de Varredura

MF - Moldagem de Folha

phr - Partes do endurecedor por 100 partes da resina

TETA - Trietileno Tetramina

TRF - Tensão de Ruptura à Flexão

TRT - Tensão de Ruptura à Tração

U.V. - Ultra Violeta

FC - Fibra de Curauá

FV - Fibra de Vidro

RESUMO

MACIEL, N. de O. R. **Análise mecânica comparativa de tração, flexão e impacto entre compósitos reforçados com fibras de curauá e compósitos reforçados com fibras de vidro.** 2017. 119f. Dissertação – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes/RJ.

Uma das maiores preocupações da atualidade tem sido com as questões ambientais, o que tem motivado a pesquisa e o desenvolvimento de materiais provenientes de recursos renováveis e ambientalmente amigável. Estudos apontam o uso de fibras naturais como reforço para substituir as fibras sintéticas em materiais compósitos, já que essas primeiras, possuem inúmeras vantagens tais como: baixa densidade, biodegradabilidade, baixos custos, atoxicidade, renovabilidade, dentre outras. Visando a uma possível substituição da fibra de vidro (fibra sintética) pela fibra de curauá (fibra vegetal), o presente trabalho focou em um estudo comparativo da resistência (tração e impacto) e rigidez (flexão) de compósito de matriz epóxi reforçada com fibra de curauá e de compósito de matriz epóxi reforçada com fibra de vidro. Para tanto, algumas características da fibra de curauá foram avaliadas a fim de se conhecer melhor a fibra. Os corpos de provas foram confeccionados em percentuais de 0 e 30% em peso e submetidos a prensagem uniaxial e, posteriormente, foram avaliadas as propriedades mecânicas dos compósitos. A microestrutura foi avaliada através por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e os resultados foram avaliados pela ótica estatística da distribuição de Weibull.

Palavras-chave: Compósitos. Fibras naturais. Fibras de vidro. Propriedades mecânicas. Meio ambiente.

ABSTRACT

MACIEL, N. de O. R. **Comparative mechanical analysis of traction, flexure and impact between composites reinforced with curauá fibers and composites reinforced with fiberglass.** 2017. 119f. Dissertation – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes/RJ.

One of today's biggest concerns has been with environmental issues, which has motivated the research and development of materials derived from renewable resources and environmentally friendly. Studies suggest the use of natural fibers as reinforcement to replace the synthetic fibers in composite materials since these first have numerous advantages such as: low density, biodegradability, low cost, low toxicity, renewability, among others. Aiming to replace the glass fiber (nylon) for fiber curauá (plant fiber), the present work focused on a comparative study of the strength (tensile and impact) and stiffness (flexion) of epoxy matrix composite reinforced with curauá fiber and fiberglass reinforced epoxy matrix composite. For that, some characteristics of the curauá fiber were evaluated in order to know better the fiber. The test bodies were made in percentages of 0 and 30% by weight and submitted to uniaxial pressing and, afterwards, the mechanical properties of the composites were evaluated. The microstructure was evaluated by scanning electron microscopy (SEM) and the results were evaluated by the statistical approach of the Weibull distribution.

Key-words: Composites. Natural fibers. Fiberglass. Mechanical properties. Environmental.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional exige maior demanda por bens de consumo de forma geral, o que implica em um aumento significativo na geração de resíduos. A grande questão na atualidade é como avançar tecnologicamente tendo em mente o conceito de sustentabilidade.

Desde as décadas de 60 e 70, a nova consciência ambiental ganhou dimensão e situou a proteção ao meio ambiente como um dos princípios mais fundamentais do homem moderno (Donaire, 1994). Foi nessa mesma época que Ashen (1970) afirmou que apesar do visível sucesso obtido pelo sistema capitalista devido a uma eficiente combinação de ciência e tecnologia, quando confrontamos os resultados econômicos e monetários com outros resultados sociais, tais como redução da pobreza, degradação das áreas urbanas, controle da poluição, diminuição das iniquidades sociais, entre outros, verifica-se que ainda há muito a ser alcançado.

A preocupação ecológica tem se destacado dentre as reivindicações exigidas pela sociedade em face de sua relevância para a qualidade de vida das populações, o que tem exigido das empresas um novo posicionamento em sua interação com o meio ambiente (Donaire, 1994).

Como pode-se perceber, a preocupação ambiental não é tão recente, há décadas há essa visão de proteção ao meio ambiente, contudo, a cada ano que passa a demanda é maior, os desejos por produtos avançados tecnologicamente também são maiores, em um cenário no qual as pessoas estão exigindo valores acessíveis e mercadorias ambientalmente amigáveis e, portanto, de acordo com Sanches (2000), as empresas industriais que procuram manter-se competitivas ou mesmo sobreviver e se ajustar a esse novo ambiente de negócios, que além de concorrido é marcado por incertezas, instabilidades e rápidas mudanças, percebem a necessidade de novas posturas.

Blezdiki *et al.* (1996) afirmam que o rápido crescimento populacional, a escassez de recursos minerais energéticos, a produção de resíduos e fatores sociais estimulam o desenvolvimento de novos materiais que sejam renováveis e de baixo custo como compósitos de fibras naturais.

Nesse contexto, os materiais compósitos, que são materiais projetados de modo a conjugar características desejáveis de dois ou mais materiais, fabricados com fibras naturais ganham espaço na indústria a fim de substituir os materiais compósitos fabricados com fibras sintéticas. A indústria automobilística enxerga grandes oportunidades na utilização desses compósitos já que possuem diversas vantagens, como afirma Kiperstok (2000), os compósitos possuem baixo peso e boas propriedades mecânicas, tendo sido utilizados em aplicações automotivas.

No caso das fibras naturais, as mesmas possuem relevante importância já que são renováveis, biodegradáveis e possuem natureza não cancerígena, além disso, devido à versatilidade dessas fibras, permite que sejam adequadas para diversos fins, inclusive para utilização em automóveis (Asim *et al.*, 2015).

O estudo em questão, a fim de contribuir com a proteção ao meio ambiente, apresenta a fibra natural oriunda da planta de curauá que por sua vez pertence à família das bromélias com parentesco com o abacaxizeiro, cujo nome científico, segundo Medina (1959), é *Ananas erectifolius*. Decidiu-se utilizar as fibras de curauá porque, de acordo com Oliveira (2005) e Leão (2001), essas fibras possuem excelentes propriedades mecânicas dentro da classificação de fibras vegetais e, portanto, é possível obter resultados que possam "competir" com as fibras sintéticas.

Esta pesquisa insere-se na linha da incorporação de fibras naturais e sintéticas em matriz polimérica epoxídica a fim de fabricar materiais compósitos. Especificamente, este trabalho compara as propriedades mecânicas dos compósitos de fibras naturais de curauá com os compósitos de fibras sintéticas de fibra de vidro e utiliza o método estatístico da distribuição de Weibull para analisar a veracidade dos resultados obtidos através dos ensaios mecânicos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver compósitos poliméricos na matriz epóxi reforçados com 30% de fibras de curauá e 30% de fibras de vidro a fim de avaliar o comportamento mecânico e comparar os resultados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as características dimensionais das fibras de curauá tais como comprimento médio, diâmetro médio bem como a densidade aparente e densidade real;
- Avaliar o comportamento mecânico dos compósitos através dos ensaios de tração, flexão e impacto;
- Avaliar a superfície de fratura por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e correlacionar com os resultados mecânicos obtidos;
- Realizar análise estatística de Weibull das propriedades mecânicas;
- Comparar os resultados dos ensaios mecânicos com fibras de Curauá com os resultados mecânicos dos compósitos de fibra de vidro, a fim de questionar a aplicabilidade da fibra natural em substituição da fibra sintética.

3 JUSTIFICATIVA

Atualmente muito se tem falado sobre as questões ambientais, afinal, o futuro da humanidade depende do que estamos fazendo hoje de forma a não prejudicar as gerações futuras. Tendo como base a definição de desenvolvimento sustentável e sabendo que, na literatura científica, a mesma se aplica sob diversos aspectos qualitativos como econômico, social, ecológico, institucional, ético, político, dentre outros (Ciegis *et al.*, 2015), o presente trabalho propõe pesquisar um material compósito reforçado com fibras naturais que propicia benefícios em todas os aspectos acima citados, principalmente no que diz respeito ao meio ambiente, já que as fibras são fontes renováveis, recicláveis e biodegradáveis; à economia, uma vez que as fibras possuem preços muito mais acessíveis quando comparadas as fibras sintéticas; e ao aspecto social devido à geração de empregos, influenciando, portanto, o desenvolvimento principalmente das regiões agropecuárias. Logo, contemplando tantas vantagens, faz-se jus a estudos mais aprofundados utilizando o uso de fibras naturais em substituição às fibras sintéticas como reforço estrutural em compósitos poliméricos.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 COMPÓSITOS

Os compósitos podem ser achados na natureza, como é o caso da madeira que é constituída de longas fibras de celulose mantidas juntas em uma matriz resinosa de lignina, contudo, a maior parte dos compósitos é feita pelo homem que são tipicamente, uma combinação de algum material resistente e fibroso em uma matriz de resina (Norton, 2013).

Segundo Padilha (1997), materiais compósitos são materiais projetados de modo a conjugar características desejáveis de dois ou mais materiais.

Outra definição, um pouco mais complexa, é dada por Smith (2013) que descreve material compósito como uma mistura ou combinação de dois ou mais micro ou macro constituintes que diferem na forma e na composição química e que, em sua essência, são insolúveis uns aos outros.

Na visão de Besednjak (2009), materiais compósitos é toda combinação de materiais constituído a partir de uma união (não química e insolúveis entres si) de dois ou mais componentes que dão lugar a um novo material com propriedades características específicas, não sendo essas novas propriedades iguais aos dos materiais individuais, porém, são dependentes do tipo de interface e das características de cada componente.

A forma mais usual de compósito são materiais constituídos por um reforço de fibra embutido em uma matriz polimérica, apesar de existirem formas diferentes. São classificados de acordo com o material que forma a matriz, também conhecida como fase contínua e suas propriedades dependem das propriedades físicas e fatores inerentes às fases constituintes como quantidades relativas e geometria da fase dispersa, ou seja, do reforço. Os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com a geometria, diâmetro e comprimento da fibra, conforme é mostrado na Figura 1 (Ventura, 2009).

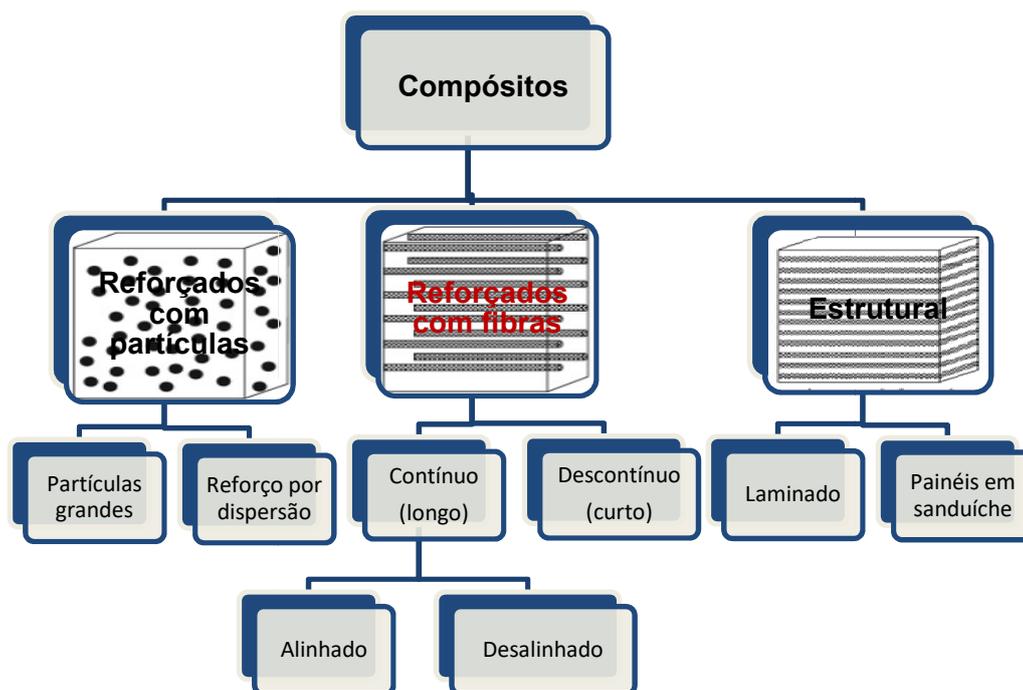


Figura 1- Classificação dos materiais compósitos (Adaptado de Callister, 2000; Bai, 2013).

O uso de compósitos remonta de tempos antigos, os egípcios, como exemplo, usavam fibras naturais como o papiro para fazer barcos, velas e cordas desde o ano 4000 a.C.

Outra aplicação diz respeito a palha que era, há mais de 2000 anos, e continua sendo usada para reforço de tijolos. Contudo, o uso dos compósitos caiu em declínio por muitas décadas e apesar dos compósitos de fibras sintéticas serem originados do século XIX, quando o homem fez o primeiro polímero (fenol-formaldeído), a utilização destes reapareceu no meado da década de XX com o uso de estruturas compósitas leves para solucionar necessidades técnicas. Já nas últimas décadas do século XX, utilizou-se compósitos para melhorar o desempenho de veículos espaciais e aviões militares (Ventura, 2009).

O fato dos materiais compósitos ganharem cada vez mais espaço na indústria se dá porque, segundo Casaril *et al.* (2007), esses materiais possibilitam uma boa sinergia na interação entre os diferentes componentes que o formam, resultando em uma gama de propriedades inerentes ao material e atribuições mais interessantes do que as dos componentes que o formam. Ainda segundo o mesmo autor, seria

difícil conseguir tais propriedades com outro material não compósito a um custo viável.

Os compósitos estão ganhando cada vez mais mercado, desde guitarras, raquetes de tênis e carros a aeronaves ultraleve, componentes eletrônicos e juntas artificiais.

A Figura 2 representa a porcentagem de materiais compósitos utilizados em diversas áreas no ano de 2002. O mercado de compósitos reforçados com fibras movimenta a economia e se classifica como sendo um negócio multibilionário (Mohanty *et al.*, 2005; Omrani, 2016).

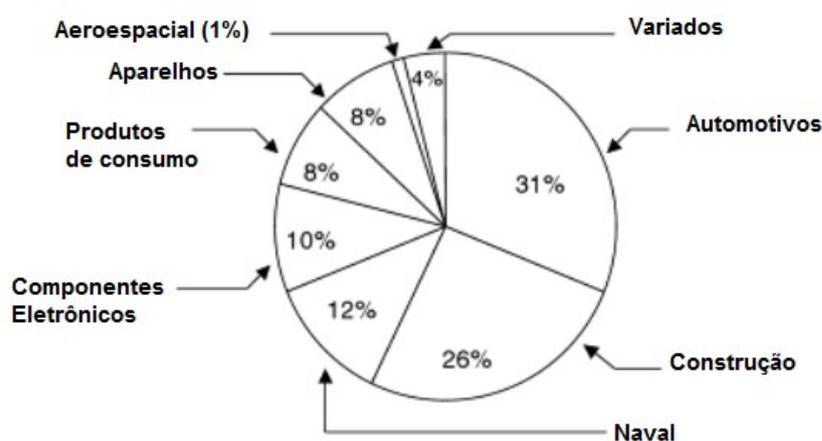


Figura 2 - Compósitos de plástico reforçados com fibras usados em 2002 (Adaptado de Mohanty *et al.*, 2005).

Antigamente o principal motivo para uso de fibras naturais como reforços de alguns componentes da aeronaves eram: reduzir peso, reduzir custo e aumentar a performance. Contudo, a ênfase atualmente tem mudado para questões ambientais, ou seja, os principais norteadores são: reduzir a queima de combustível, reduzir a poluição e reduzir o ruído (Rana e Fangueiro, 2016).

A indústria tem como desafio aliar todas essas características, a fim de tornar o produto economicamente e ambientalmente viável.

4.2 MATRIZ

A matriz tem como principal objetivo manter a orientação das fibras e seu espaçamento, transmitir as forças de cisalhamento entre as camadas das fibras e proteger do ambiente externo (Allen e Thomas, 1999).

A matriz pode ser de três tipos: metálica, cerâmica e polimérica que serão descritos abaixo por Besednjak (2009). Devido ao fato do objeto de estudo desse trabalho estar baseado em matriz polimérica, especial atenção será dada a mesma.

Materiais compostos de matriz metálica - têm sido desenvolvido principalmente para componentes aeroespaciais e automotivos. Possuem alta resistência e baixo peso. Se classificam em três grandes grupos, de acordo com o tipo de reforço incorporado: reforço com fibras contínuas, reforço com fibras descontínuas e reforços com partículas. Como exemplo, pode-se citar, ligas de alumínio reforçadas com fibras de boro, ligas de alumínio reforçadas com partículas de alumina e carboneto de silício, etc.

Materiais compostos de matriz cerâmica - melhoram as propriedades mecânicas como resistência e tenacidade dos materiais cerâmicos tradicionais, especialmente em baixas temperaturas. Também são classificadas de acordo com o tipo de reforço usado, ou seja, reforço com fibras contínuas, descontínuas e partículas. As principais fibras de reforço que combinam com as matrizes cerâmicas são os carbonetos de silício e os óxidos de alumínio.

Materiais compostos de matriz polimérica - são definidos como materiais com boas propriedades mecânicas, resistentes a corrosão e aos agentes químicos, e que dentro das suas características particulares, podem ser moldados de diversas formas. São os materiais cujas matrizes são constituídas por um polímero e o reforço é algum tipo de fibra.

Os biopolímeros se classificam em polímeros naturais e polímeros sintéticos, conforme representa a Figura 3.

Biopolímeros naturais são divididos em proteínas, polissacarídeos e ácidos nucléicos. Já uma classificação geral não é possível para biopolímeros sintéticos, logo, são classificados de acordo com o método de fabricação, por exemplo, biopolímeros sintetizados por condensação e reação de adição são listados separadamente (Thomas *et al.*, 2013).

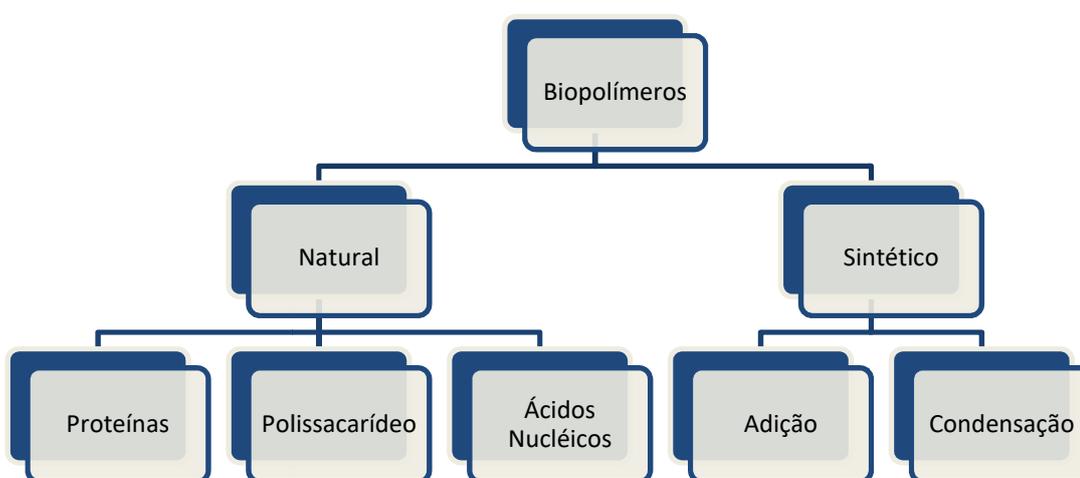


Figura 3 - Classificação geral dos biopolímeros (Thomas *et al.*, 2013).

Segundo Matthews e Rawlings (1994), devido ao fato do processamento de compósitos com matriz polimérica não envolver, necessariamente, altas pressão e altas temperaturas, devido ao fato dos problemas associados com a degradação do reforço durante a manufatura ser menos significativo para compósitos com matriz polimérica se comparado com outras matrizes e devido ao fato dos equipamentos necessários para se obter compósitos em matriz polimérica serem simples de usar, os compósitos com polímeros se desenvolveram rapidamente e se tornaram aceitos para aplicações estruturais.

Os polímeros são classificados em duas classes quanto à fusibilidade: termoplásticos e termofixos/termorrígidos.

Polímeros termoplásticos - podem ser repetidamente fundidos e solidificados, são fáceis de moldar e podem ser reaproveitados em uma nova moldagem. Constituem-se de longas cadeias moleculares de polímeros, com as forças de ligação sendo do tipo secundário de dipolo permanente. É utilizado o método moldagem por injeção, extrusão e moldagem por sopro para processar esses materiais. Possuem temperatura de transição vítrea acima da qual esses materiais se comportam como sólidos viscosos e borrachosos e a deformação permanente ocorre pelo deslizamento das cadeias moleculares uma sobre as outras, quebrando e formando ligações secundárias, já abaixo, comportam-se de modo frágil, sólidos semelhantes ao vidro. Exemplos: polietilenos, cloreto de polivinila, polipropileno e poliestireno (Norton, 2013; Smith, 2013).

Polímeros termofixos - ocorrem ligações cruzadas (aumentam a resistência e rigidez) quando aquecidos pela primeira vez para conformação, contudo, em um aquecimento posterior, esses irão se degradar e se decompor aos invés de fundir. Os termofixos são ligados por meio de fortes ligações covalentes entre todos os átomos e por isso, permitem pouca deformação antes da fratura. Utiliza-se métodos de moldagem por compressão, por transferência e fundição para processar os termofixos. Exemplos: fenólicos, poliéster insaturado, melamina e epóxis (Norton, 2013; Smith, 2013) .

Os mais utilizados são as resinas epóxis (80% de todos os plásticos reforçados) e os poliésteres, que são mais econômicos que os epóxis (Schmid, 2002).

A Tabela 1 resume as principais características dos polímeros termoplásticos e termofixos.

Tabela 1 - Principais características dos polímeros termoplásticos e termofixos

TERMOPLÁSTICOS	TERMOFIXOS
Reciclável mecanicamente	Não reciclável mecanicamente
Tempo ilimitado de armazenamento	Tempo limitado de armazenamento
Alta viscosidade quando fundido	Baixa viscosidade durante o processamento
Baixa resistência à fluência	Alta resistência à fluência
Temperatura de uso limitada, baixa estabilidade térmica e dimensional	Alta resistência térmica e dimensional

Fonte: Dos Santos (2006)

4.2.1 Resinas Epóxicas

Segundo Choi e Rudin (2015) os polímeros epóxi tem principal aplicabilidade em adesivos, revestimentos de superfície em combinação com fibras de vidros ou tecidos, como materiais estruturais leves e rígidos.

As resinas epóxi são da família de resinas sintéticas e são formadas pela reação de qualquer diol de alto peso molecular com epícloridrina. Mais especificamente essas resinas são produtos obtidos por reações de condensação (na presença de hidróxido de sódio - NaOH) entre a Epícloridrina (1-cloro-2, 3-epóxi-propano) e o Bisfenol A (2,2-bis (4-hidroxifenil) propano), tendo como resultado dessa reação um polímero de cadeia longa constituído de grupos epoxídicos em suas extremidades, conforme é mostrado na Figura 4 (May, 1987).

Quimicamente, define-se epóxi como polímeros de alto desempenho caracterizados pela presença de pelo menos dois anéis de três membros conhecidos como epóxi, epóxido, oxirano ou eteno epóxi. As três classes gerais de resinas epóxi são líquida, sólida e líquida modificada (May, 1987).

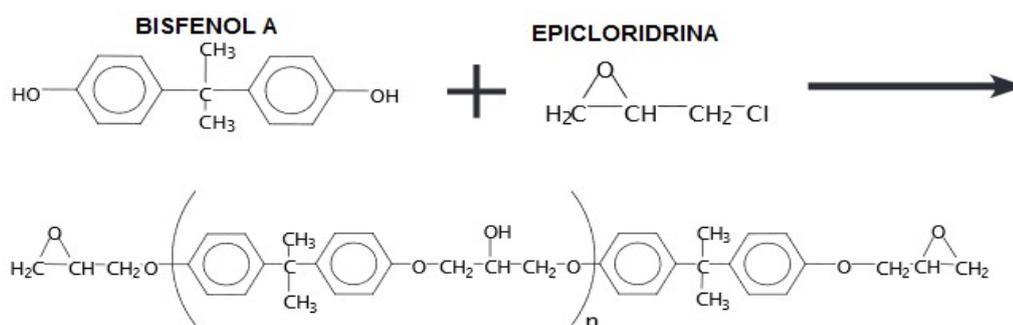
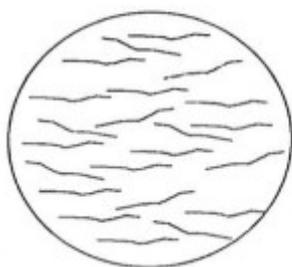


Figura 4 - Reação do Bisfenol A e Epicloridrina com formação de resina epóxi (Gall e Greenspan, 1955).

Sobrinho (2009) afirma que as resinas epóxi são convertidas em polímeros termofixos pela ação de endurecedores. O processo pelo qual um ou mais tipos de reagentes, uma resina e um endurecedor são transformados em um material altamente reticulado é denominado "cura". O agente de cura utilizado para a resinas epóxi, geralmente, são as aminas.

A Figura 5 representa um sistema da resina no estado líquido e após a cura no estado sólido.

**Resina antes da cura
(estado líquido)**



**Resina após a cura
(estado sólido)**

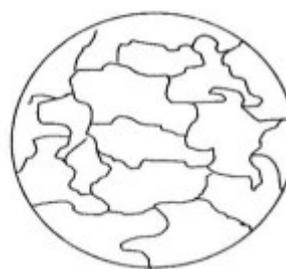


Figura 5 - Esquema de cura da resina epóxi (Lee e Neville, 1967).

As resinas epoxídicas comerciais podem variar, porém as principais são do tipo: éter diglicídílico de bisfenol A (DGEBA), éter diglicídílico de bisfenol F (DGBEF), éter diglicídílico de novolac fenólico (NOVOLAC), as cicloalifáticas e os poliglicóis alifáticos. A aplicação e o processo de fabricação do produto é o que irá nortear o tipo de resina ideal a ser utilizada, bem como, sua viscosidade (Nishitsuji, 2008).

As resinas epóxi são as resinas mais utilizadas nos compostos de alta qualidade, fundamentalmente porque possuem melhores propriedades físicas e mecânica que as resinas de poliéster e viniléster. Além disso, se associarmos sua boa capacidade de adesão sobre uma grande quantidade de materiais de reforço, o resultado será laminados com um elevado conteúdo de fibras. Contudo, as características finais da resina dependerá do tipo de epóxido e do agente de reticulação (resistência térmica, modo de endurecimento e ductilidade) (Besednjak, 2009).

Ainda segundo Nishitsuji (2008), dentre as matrizes termofixas, as epoxídicas apresentam vantagens, tais como:

- Boa adesão em diversos tipos de cargas, reforços e substratos;
- Ampla variedade de resinas e agentes de cura, que proporcionam as mais diversas propriedades físico-químicas após a cura;
- Na reação de cura com o endurecedor não há formação de água e ocorre a liberação de poucos produtos voláteis que propicia uma menor contração em relação a algumas resinas;
- As resinas curadas possuem alta resistência química e bom isolamento elétrico.

Além das vantagens já apresentadas, Cantwell e Morton (1997) apresenta ainda algumas propriedades aliadas à resina epóxi:

- A cura se dá rapidamente (entre 5° e 150°C) a depender do agente utilizado;
- Baixa viscosidade da resina e do endurecedor, ou seja, fácil manuseio; e
- Ocorre baixa contração durante a cura (3%).

Hyer (2009) afirma que as resinas epóxi são a escolha predominante para materiais compósitos avançados, o autor também afirma que são populares por causa das suas excelentes propriedades mecânicas, sua conservação das propriedades quando operando sob altas temperaturas e ambientes úmidos e sua boa resistência química. Além disso, possuem boa estabilidade dimensional, são facilmente processadas, possuem baixo custo e possuem boa adesão para uma variedade de fibras.

Devido a tantos benefícios, Rana e Fanguero (2016) ressalta que a resina epoxy é o polímero termofixo mais utilizado nas estruturas de aeronaves. A Tabela 2 mostra algumas das propriedades mecânicas da resina epóxi.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas de uma resina epóxi

Propriedades mecânicas (resina comercial)	
Resistência à flexão	124 MPa
Resistência ao cisalhamento	19,3 MPa
Dureza	69,0
Limite de Elasticidade	207 MPa

Fonte: Nishitsuji (2008).

4.3 FIBRAS

Santos (2006) descreve as fibras como sendo flexíveis, macroscopicamente homogêneas, com alta relação entre comprimento e seção transversal e as classifica de acordo com sua origem em fibras sintéticas ou fibras vegetais.

Já Schmid (2002) classifica as fibras como curtas ou longas, também conhecidas como fibras descontínuas ou contínuas, respectivamente. As fibras curtas, geralmente tem relação de aspecto (relação entre comprimento e diâmetro) entre 20 e 60, já as fibras longas, entre 200 e 500. A designação de fibras "curtas" ou "longas" se baseia no seguinte raciocínio, se as propriedades mecânicas melhoram com o aumento do comprimento médio das fibras, então essas recebem o nome de fibras curtas, se não ocorrer melhoria, então essas serão chamadas de fibras longas.

Os materiais fibrosos podem ser amplamente agrupados em fibras naturais e sintéticas, conforme serão descritos abaixo.

4.3.1 Fibras Sintéticas

O primeiro aparecimento das fibras sintéticas ocorreu há mais de 100 anos, quando Count Chardonnet inventou a seda artificial.

O nylon foi produzido pela primeira vez em 1935, cuja proposta era "ser mais fino do que o fio de aranha, mais forte do que o aço e mais elegante que a seda".

Atualmente as fibras sintéticas não são uma mera alternativa para substituição das fibras naturais, que existem há mais de 4000 anos, mas um material de alta funcionalidade e alta performance, no qual se encaixa no campo da alta tecnologia (Hongu e Phillips, 1997).

De acordo com Balasubramanian (2013), fibras sintéticas são fibras de alta performance. Algumas das fibras sintéticas mais comuns incluem vidro, boro, carbono, aramida, alumina e carboneto de silício e essas se dividem em orgânicas e inorgânicas conforme representado na Figura 6.

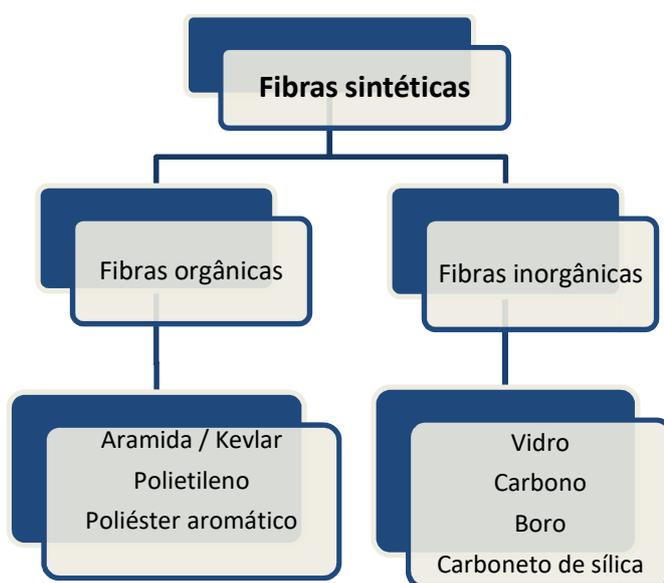


Figura 6 - Classificação das fibras sintéticas (Adaptado de Thomas *et al.*, 2013).

Segundo Cunha *et al.* (2001), o processo das fibras sintéticas orgânicas se inicia na indústria petroquímica através da transformação do nafta em benzeno, eteno, p-xileno e propeno, conforme ilustra a Figura 7.

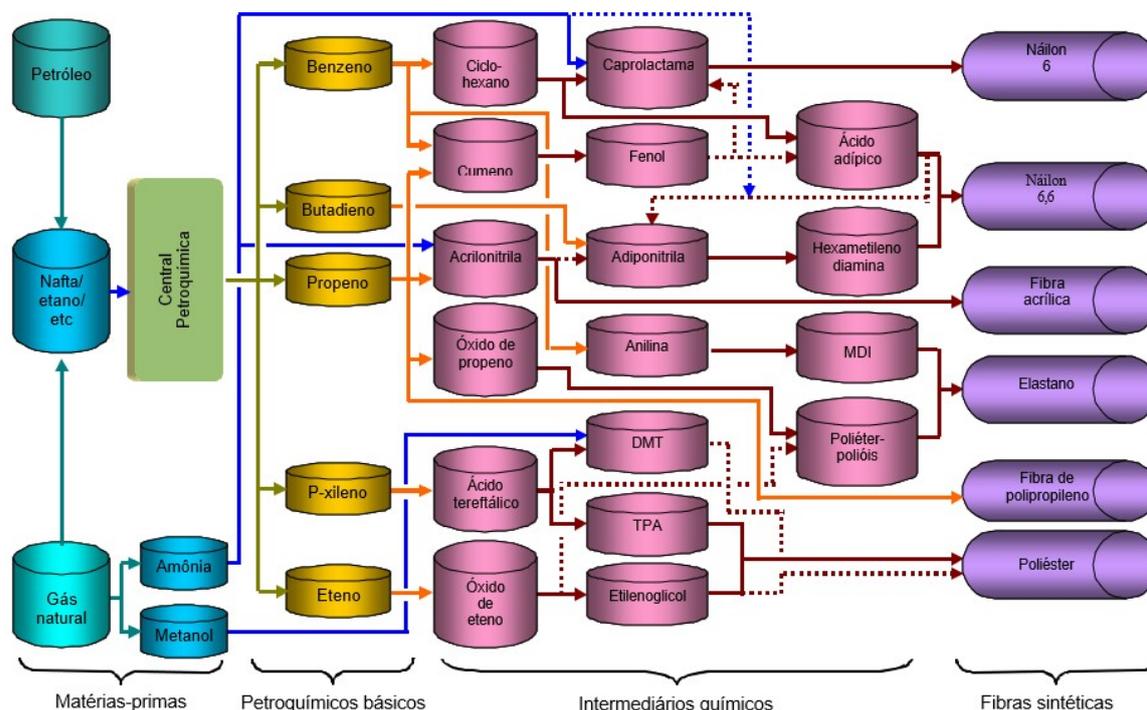


Figura 7 - Fluxograma primário da cadeia de produção das principais fibras sintéticas (Cunha *et al*, 2001).

4.3.1.1 Fibras de Vidro

Fibras de vidro são constituídas por substâncias minerais, solidificada de uma mistura de quartzo, carbonato de cálcio e carbonato de sódio, dispostas em feixes, de espessura extremamente fina e, é obtido mediante a passagem do vidro em fusão por pequeníssimo orifício (Matheus, 2002).

As fibras de vidro tipo E, segundo Pinto (2002) possuem basicamente a seguinte composição química: SiO_2 (52-56% em peso), Al_2O_3 (12-16% em peso), CaO (16-25% em peso) e B_2O_3 (8-13% em peso).

De acordo com Ota (2004), as fibras de vidro são aplicadas em mais de 35.000 produtos, sendo que as mais utilizadas são as do tipo E (E-glass), apesar disso, segundo Matthews e Rawlings (1994), existem as fibras tipo S ou tipo R na Europa, que é baseada no sistema SiO_2 , Al_2O_3 e MgO e possuem alta resistência em relação a fibra do tipo E, outros tipos tem sido desenvolvidos como C (chemical glass), E-CR (chemical resistance) e AR (alkali resistance).

Os compósitos de fibra de vidro são bastante populares, dado que as fibras podem ser facilmente fabricadas a partir do vidro derretido. Além disso, o processo de fabrico destes compósitos é relativamente barato, existindo várias técnicas para a sua elaboração (Gay, 2003) e bastante difundida devido às suas boas propriedades mecânicas, contudo, causam irritação quando as fibras entram em contato com a pele humana (Szabó e Czigány, 2003).

O diâmetro médio das fibras de vidro geralmente variam entre 5-20 microns e suas superfícies não são livres de falhas (De e White, 1996).

4.3.2 Fibras Naturais

Fibras naturais na definição de Cutler *et al.* (2009), é uma célula alongada, esclerenquimática, com extremidades afinadas conforme representado na Figura 8. Além disso, as paredes tornam-se lignificadas durante a maturação e durante esse período as células podem ou não ter um citoplasma bem como um protoplasto vivo.

Cutlet *et al.* (2009) segue afirmando que as fibras assumem formas gelatinosa (camadas internas de paredes secundárias podem inchar durante a absorção de água), libriforme (no xilema secundário como poucas pontoações¹ simples), pericíclica (enxarca² às regiões externas do sistema vascular ou associada ao floema) ou septada (com septos finos e transversais formados após a deposição da parede secundária).

¹ Área delgada de uma parede celular secundariamente espessada consistindo apenas de lamela média e parede primária.

² Localização de tipos de células e tecidos distantes do centro do eixo.

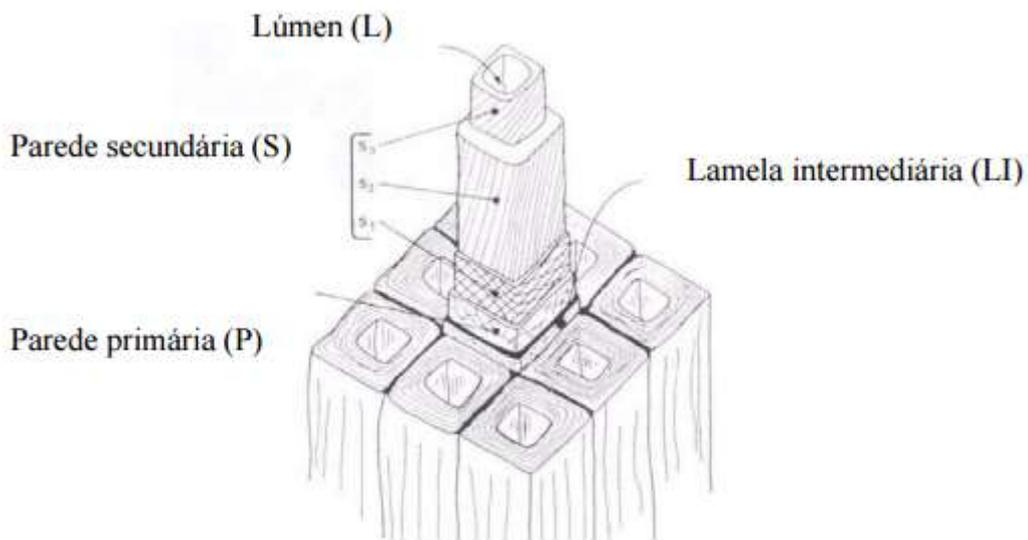


Figura 8 - Representação esquemática da fibra de madeira (Coutts, 1992).

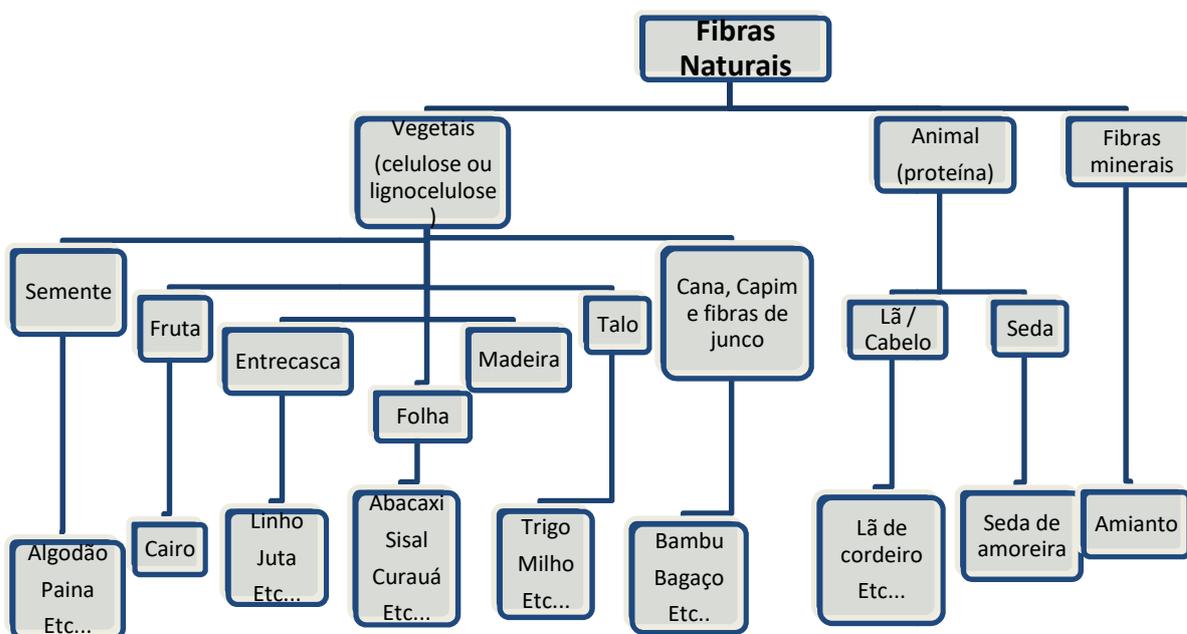


Figura 9 - Classificação das fibras naturais (Adaptado de Mohanty *et al.*, 2005)

As fibras naturais, segundo a visão de Mohanty *et al.* (2005), são subdivididas de acordo com sua origem, a Figura 9 esquematiza tal classificação e exemplifica as subdivisões.

A Figura 10 mostra exemplos de fibras naturais. As fibras oriundas das plantas incluem fibras de entrecasca, folhas ou fibras duras, semente, fruta, madeira, palha de cereais e outras fibras de grama.



Figura 10 - Fotografia digital de algumas fibras naturais e fontes de fibras naturais (Adaptado de Misra *et al.*, 2015).

Santos (2009) afirma que as fibras vegetais por serem provenientes de fontes renováveis são, à princípio, inesgotáveis. Além disso, são biodegradáveis, o que para produtos com limite de vida útil se faz necessário já que serão descartados e, ainda são recicláveis, já que podem ser convertidos em energia térmica através de combustão em fornos ou caldeiras sem deixar resíduos e geram menos impactos ambientais.

Em relação a composição química das fibras naturais, Nabi e Jog (1999) afirmam que varia de acordo com o tipo de fibra, contudo, contém, principalmente, celulose, hemicelulose, pectina e lignina. As propriedades de cada constituinte contribuem para as propriedades gerais da fibra. A hemicelulose, por exemplo, é responsável pela degradação da fibra e absorção de umidade, já a lignina é termicamente estável, contudo, é responsável pela degradação UV.

Geralmente, as fibras contém 60 - 80% de celulose, 5 - 20% de lignina e até 20% de umidade, podendo variar de fibra para fibra. Logo, Pukansky (2005), afirma que as fibras naturais podem receber a denominação de fibras celulósicas, já que a

celulose é um dos principais componentes químicos, ou ainda, lignocelulósicas uma vez que a maioria das fibras contém lignina.

Na visão de Mohanty *et al.* (2005) e Faruk *et al.* (2012), as principais vantagens de usar fibras naturais na fabricação de compósitos são:

- Renovabilidade, biodegradabilidade e neutralidade de CO₂ provenientes das fibras naturais, torna o compósito ambientalmente amigável. O seqüestro de carbono ajuda a reduzir a emissão de GHG e reduz as implicações das trocas climáticas;
- Reforço de fibras naturais pode diminuir a dependência de materiais derivados do petróleo, já que 50% do volume da matriz pode ser preenchido com fibras naturais;
- Fibras naturais apresentam menor custo;
- Fibras sintéticas como fibras de vidro podem ser substituídas por fibras naturais em determinadas aplicações. Isso se torna vantajoso para empresas cujos países possuem restrições severas na disposição de produtos produzidos com fibras de vidro, bem como o uso de amianto tem sido banido em várias partes do mundo;
- Quando compósitos de fibras naturais são incinerados no processo de recuperação de energia, resíduos inofensivos são liberados sem qualquer traço de metais pesados prejudiciais;
- Resíduos lignocelulósicos para aplicação em grandes volumes, podem trazer novas fontes de renda para agricultores e ajuda a criar emprego nas comunidades rurais;
- Fibras naturais não são abrasivas para as máquinas utilizadas no processo de fabricação de materiais compósitos, resultando em uma melhor eficiência;
- Fibras naturais possuem boas propriedades acústicas e de som. Têm uma relativa segurança no processo de fabricação com redução de irritação dérmica e respiratória.

4.3.2.1 Fibras de curauá

O Centro de Apoio a Projetos e Ação Comunitária - CEAPAC (2015) define curauá como sendo da família das bromeliáceas ou bromélias com parentesco próximo do abacaxizeiro inclusive se parecendo bastante com este, tanto no que diz respeito ao aspecto, quanto no que diz respeito ao gosto da fruta, contudo, de tamanho menor, além disso, o nome científico, segundo Medina (1959) é *Ananas erectifolius*, pertencente à divisão das Angiospermas, classe das Monocotiledôneas. As folhas chegam a medir cerca de 5 cm de largura e até 1,5m de comprimento.

O curauá pode também ser caracterizado de acordo com a coloração da folha, ou seja, como "curauá-roxo" devido a coloração da folha ser roxo-avermelhado e "curauá-branco" com folhas verde-claro, conforme representado na Figura 11.

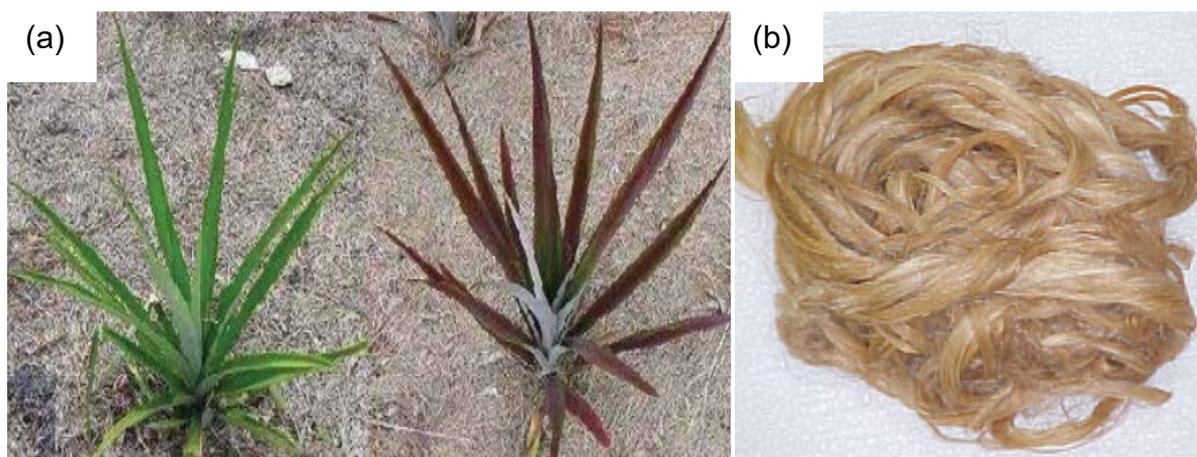


Figura 11 - (a) Planta de "curauá - branco" e "curauá - roxo" respectivamente (b) Fibra de curauá (Pires, 2009).

Os principais estados produtores de curauá são: Pará, Acre, Goiás e Amazonas, onde é cultivado principalmente por pequenos produtores da região do Lago Grande do curuaí no município de Santarém - PA.

Segundo Ferreira *et al.* (2010), as áreas mais altas das margens do rio da Amazônia são os ambientes propícios ao cultivo da planta de curauá. A Tabela 3 mostra os principais constituintes dessa planta.

Tabela 3 - Composição química da fibra de Curauá

Composição do Curauá	
Umidade	7,92 %
Teor de cinzas *	0,79%
Solubilidade em NaOH 1%**	19,30%
Solubilidade em água quente*	1,03%
Solubilidade em ciclohexano/etanol*	0,48%
Holocelulose*	91,8%
Celulose*	70,70%
Polioses**	21,10%
Lignina Klason solúvel*	1,57%
Lignina Klason insolúvel*	9,57%
Lignina Klason total*	11,10%
Grau de cristalização*	75,60%

Fonte: Ledo (1967).

* Determinação realizada em relação às fibras livres de umidade

** Determinado pela diferença entre holocelulose e celulose.

Dentre as fibras naturais com potencial de aplicação em compósitos, destaca-se o curauá que produz uma fibra de alta resistência e quando misturada a polímeros, por exemplo, pode dar origem a produtos com menor densidade, podendo apresentar grandes aplicações (Mothé e Araújo, 2004).

Zah *et al.* (2007) afirmam que as fibras de planta de Curauá é umas das mais promissoras devido a combinação das suas propriedades e do baixo custo.

Ledo (1967), confirma o grande potencial dessa planta como produtora de fibra de excelente qualidade, podendo ser utilizada na indústria automobilística já que apresenta boa resistência, maciez e baixo peso.

A fibra de curauá apresenta propriedades físicas e mecânicas que superam as fibras de sisal e juta, segundo Oliveira (2005) e Leão (2001), sendo, portanto, o motivo pelo qual foi escolhida para o desenvolvimento desse trabalho. Além disso, essa fibra tem a capacidade de absorver a mesma quantidade de resina que às fibras de vidro, não acarretando custos adicionais no que diz respeito ao processo de fabricação.

A fibra de curauá está entre as fibras lignocelulósicas de maior resistência. Ensaio mostraram que a resistência à tração média resulta em aproximadamente 400 MPa, no entanto, devido a sua característica heterogênea, comum a todas as fibras vegetais, há uma larga dispersão nessa propriedade, atingindo valores superiores a 700 MPa e inferiores a 200 MPa nas fibras individuais (Monteiro *et al.*, 2008).

4.3.2.2 Análise das características das fibras e dos compósitos de curauá

Alguns trabalhos foram feitos com o objetivo de se adquirir maiores informações sobre a fibra em estudo. Monteiro (2006) e Ferreira (2009) analisaram as características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras longas de curauá.

O fluxograma da Figura 12 retrata o esquema de produção de compósitos obtido através dessa fibra.

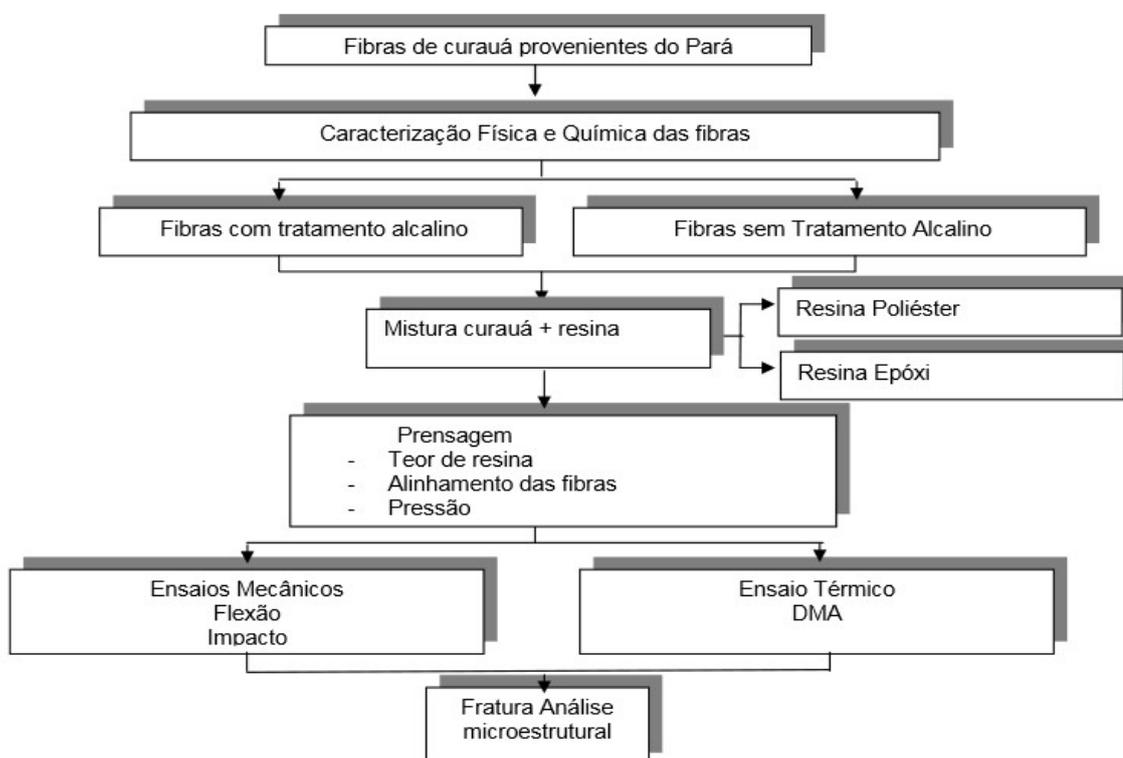


Figura 12 - Fluxograma de processamento do compósito de curauá (Ferreira, 2009).

Apesar de Ferreira (2009) abordar os compósitos em duas matrizes distintas e ter executado o processo de merceirização nas fibras, para questão de comparação, aqui será abordado apenas compósitos na matriz epóxi e com *fibras in natura*.

Em relação as características físicas e químicas da fibra foram obtidos os seguintes resultados:

- Comprimento médio e diâmetro médio - foi efetuada uma análise estatística com 100 fibras individuais, cujo resultado foi igual a: comprimento médio de 442 mm e diâmetro médio de 0,17 mm, conforme representado na Figura 13;

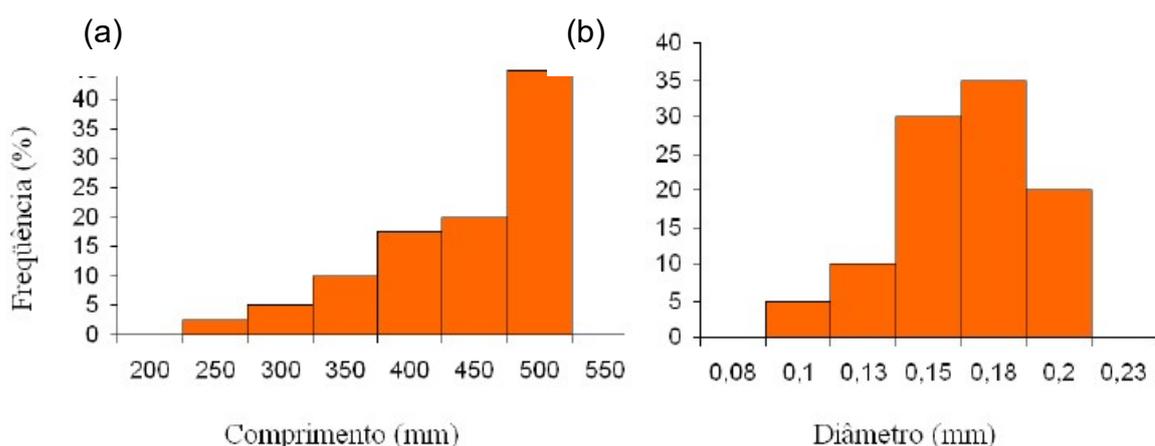


Figura 13 - Distribuição estatística do comprimento (a) e do diâmetro (b) das fibras (Monteiro *et al.*, 2006).

- Densidade - foi calculada a partir do peso médio e do volume médio da fibra, e o resultado obtido igual a 0,92 g/cm³;
- Difração de Raios-x e EDS - Ambas técnicas conseguiram identificar a presença de carbono e oxigênio na amostra.

Segundo Caraschi e Leão (2000), os resultados da caracterização química demonstraram: alto teor de celulose (70,7%), teor de umidade (7,92%), teor de

cinzas (0,79%), solubilidade em água quente (1,03%), solubilidade em NaOH 1% (19,3%), solubilidade em ciclohexano:etanol - 1:1 (0,48%), holocelulose (91,8%), lignina (11,1%) e índice de cristalinidade (75%).

Em relação as características microestruturais da fibra de curauá, Takahashi *et al.* (2011) afirmam que a fibra mostrou ser constituída por diversas microfibrilas (Figura 14), que convenientemente tratadas podem ajudar no ancoramento mecânico das fibras na matriz, melhorando a adesão interfacial entre a fibra e a matriz polimérica.

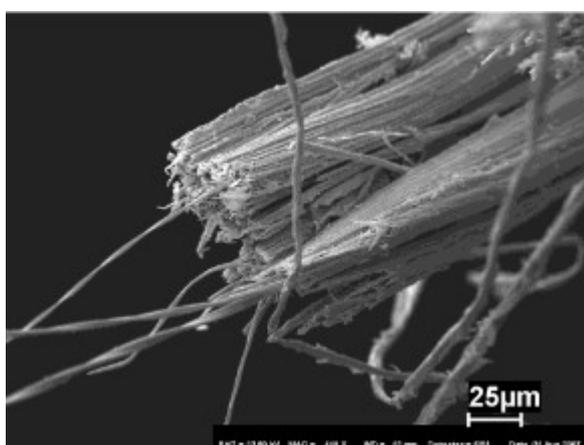


Figura 14 - Aspecto superficial da fibra de curauá observado no MEV (Takahashi *et al.*, 2011).

Ferreira (2009) caracterizou a densidade e obteve os seguintes valores (Tabela 4) para os compósitos de curauá na matriz epóxi:

Tabela 4 - Densidade do compósito de curauá na matriz epoxídica

% de fibra	Densidade (g/cm ³)
0	1,15
5	1,15
10	1,14
15	1,15
20	1,16
25	1,17
30	1,19

Fonte: Ferreira (2009)

Em relação à análise das propriedades mecânicas, Lopes (2011) realizou o ensaio de tração nos compósitos de curauá na matriz epóxi com fibras contínuas e alinhadas, obtendo os seguintes valores, conforme mostrado na Tabela 5 e ilustrado no gráfico da Figura 15.

Tabela 5 - Propriedades de tração para compósito de epóxi reforçado por fibras de curauá

Fração em Volume de Fibra de Curauá (vol. %)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação Total (%)
0	54.7 ± 9.58	1.14 ± 0.18	5.15 ± 1.74
5	57.9 ± 19.6	1.02 ± 0.18	5.67 ± 1.76
10	56.1 ± 11.2	1.84 ± 0.14	2.82 ± 0.77
15	74.8 ± 12.7	1.58 ± 0.22	4.90 ± 1.46
20	73.9 ± 14.4	1.94 ± 0.23	4.15 ± 0.51
25	96.1 ± 12.4	1.37 ± 0.18	7.10 ± 1.04
30	89.5 ± 12.5	2.32 ± 0.22	3.91 ± 0.78
35	95.2 ± 12.4	1.32 ± 0.16	6.86 ± 0.71

Fonte: Lopes (2011)

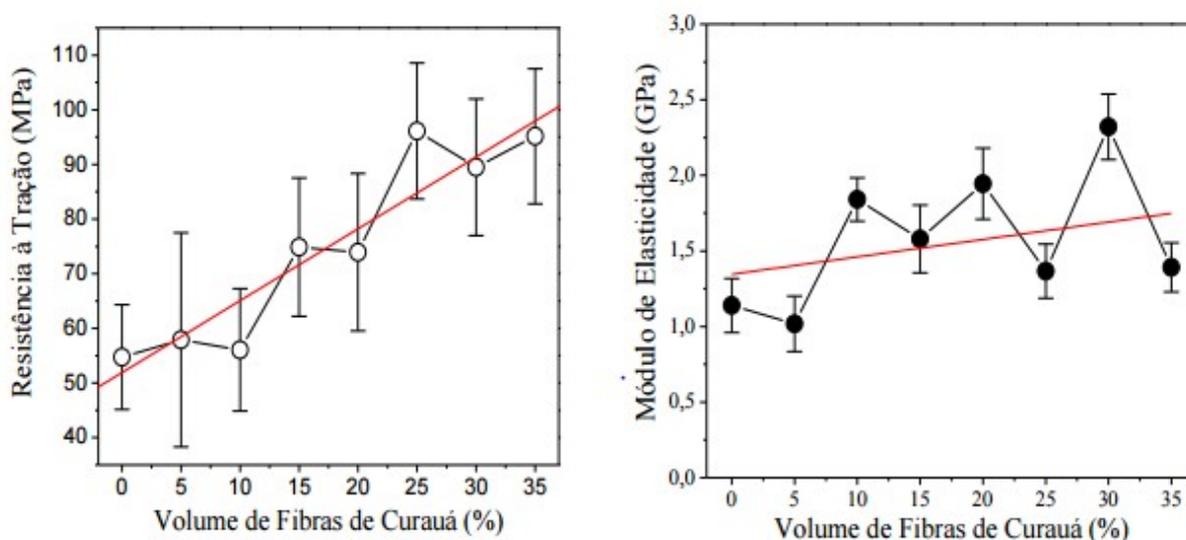


Figura 15 - Variação da tensão máxima (a) e módulo de elasticidade (b) versus o volume de fibras de curauá nos compósitos de matriz epoxídica (Lopes, 2011).

Com o ensaio, Lopes (2011) concluiu que tanto a resistência à tração quanto a rigidez dos compósitos tende a aumentar com a incorporação de fibras, contudo,

foi observado que alguns pontos não respeitaram a linearidade. Além disso, pôde-se constatar que os pontos onde a resistência à tração diminuiu, houve um aumento no módulo de elasticidade.

Ferreira (2009), analisou o comportamento do ensaio de flexão e chegou a conclusão de que compósitos fabricados com fibras contínuas e alinhadas de curauá apresentaram resistência à flexão superior a de outros compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas, os valores podem ser visualizados através da Figura 16.

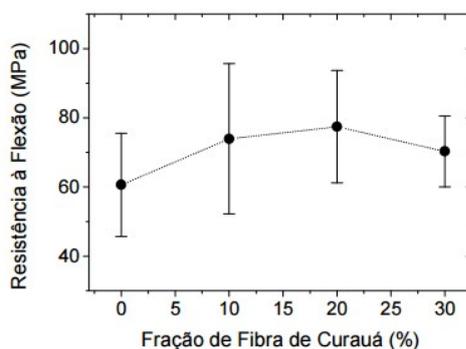


Figura 16 - Resultado de flexão dos compósitos com fibras de curauá em resina epóxi (Ferreira, 2009).

O ensaio de Impacto Charpy (Figura 17) também foi realizado por Ferreira (2009) que chegou a seguinte conclusão: a incorporação de fibra de curauá como reforço à matriz epoxídica aumenta significativamente a tenacidade do compósito, além disso, foi verificado que quanto maior a quantidade de fibra incorporada, maior se torna o desvio padrão.

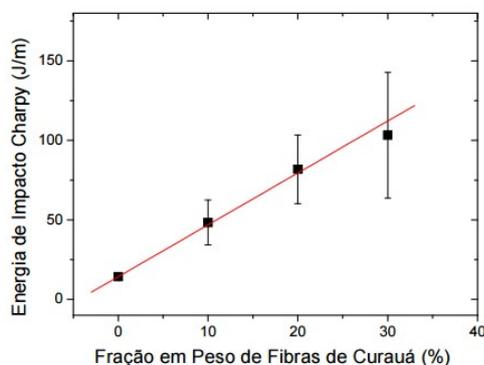


Figura 17 - Variação da energia de impacto Charpy de compósitos epoxídicos versus fração em peso de fibras de curauá (Ferreira, 2009).

4.3.3 Fibras de Vidro x Fibras Naturais

As fibras de vidro (Figura 18) são usadas em 95% dos casos para reforço em compósitos termoplásticos e termofixos. Contudo, pesquisas recentes mostram que a aplicação em certos compósitos, demonstram performance competitiva entres as fibras de vidro e as fibras naturais (Mohanty *et al.*, 2005).



Figura 18 - Fibras de vidro (Kemerich *et al.*, 2013)

Mohanty *et al.* (2005) ainda afirmam que após décadas de desenvolvimento de fibras sintéticas de alta performance, tais como, carbono, vidro e aramida, as fibras naturais vêm se destacando e ganhando cada vez mais interesse, especialmente quando se trata em substituir as fibras de vidro nas indústrias automotivas.

Hashmi (2016) afirma que as fibras naturais possuem diversas vantagens em relação às fibras sintéticas são as seguintes: baixo custo, baixa densidade, aceitáveis propriedades de força específica, fácil manuseio, seqüestrante de dióxido de carbono (CO₂) e biodegradabilidade. Logo, biocompósitos ambientalmente amigáveis tem o potencial em ser o novo material do século 21 e ser uma solução parcial para alguns problemas ambientais globais.

Segundo Monteiro (2009), as fibras naturais, especialmente as fibras lignocelulósicas, estão ganhando especial atenção como reforço nos compósitos de matriz polimérica devido às suas vantagens quando comparadas às fibras sintéticas.

As vantagens, na visão desse autor, são que as fibras naturais possuem menores custos, são renováveis e biodegradáveis, além disso, seu sistema de produção não demanda o uso de muitos equipamentos e são eficientes em termos energéticos. Em relação às propriedades mecânicas tais fibras podem aumentar algumas propriedades.

Neto e Pardini (2006), também afirmam que o uso das fibras naturais vegetais tem tido maior relevância em materiais compósitos quando comparadas com as fibras sintéticas, já que envolvem tanto aspectos tecnológicos quanto aspectos ambientais, sociais e econômicos.

A Tabela 6 mostra uma comparação entre diversas fibras naturais e a fibra de vidro e foi constatado que os valores absolutos característicos da fibra de vidro corresponde a, aproximadamente, o dobro dos valores característicos das fibras vegetais, porém, a densidade desta última fibra é consideravelmente menor, acarretando em níveis de resistência específica próximo aos da fibra de vidro.

Tabela 6 - Módulo específico de fibras naturais e fibra de vidro

Fibra	Gravidade específica	Módulo de Elasticidade	Módulo específico
Juta	1,3	55	38
Sisal	1,3	28	22
Linho	1,5	27	50
Cânhamo	1,07	35	32
E-vidro	2,5	72	28
Abacaxi	1,56	62	40

Fonte: Adaptado de Saheb e Jog (1999)

A Figura 19 retrata a resistência à tração específica (em função da densidade) de diferentes fibras vegetais comparadas à fibra de vidro.

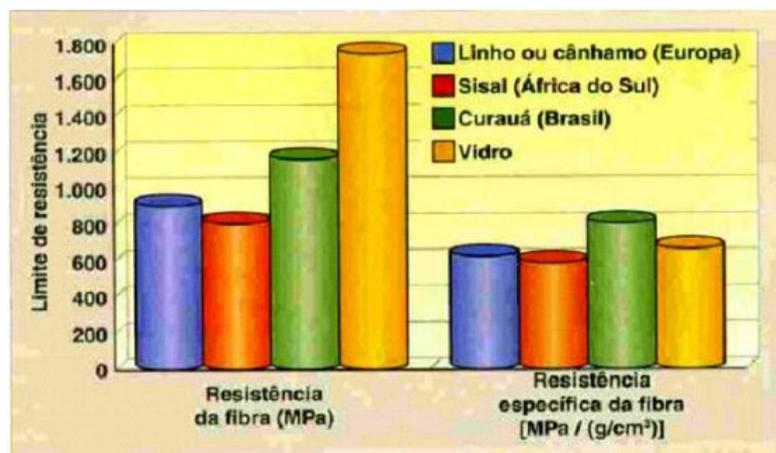


Figura 19 - Comparação da resistência à tração de fibras vegetais e fibras de vidro (Silva, 2004)

Quando comparando as fibras vegetais com as fibras de vidro, constata-se que as primeiras são muito eficientes na absorção de som, têm baixo custo, são leves, não estilhaçam em caso de acidentes, são biodegradáveis e podem ser obtidas utilizando-se 80% menos energia (Trindade *et al.*, 2005).

Na pesquisa realizada por Joshi *et al.* (2004), onde foi comparado o ciclo de vida dos compósitos com diferentes fibras naturais em relação a um compósito com fibra de vidro, os autores concluíram que em relação aos aspectos ambientais, os compósitos com fibras naturais são ambientalmente superiores, já que apresentam menor impacto durante a produção, menor peso quando utilizados em veículos, aumentando, portanto, a eficiência energética. Além disso, o fato de ser necessário uma quantidade maior de fibras naturais para se conseguir uma mesma performance que as fibras de vidro, não se torna um problema, pois está relacionado com a redução de poluição associada à quantidade de polímero. E no final do ciclo de vida, o material pode ser incinerado, fornecendo energia e créditos de carbono.

A Tabela 7 apresenta de maneira sucinta uma comparação das principais características das fibras naturais e das fibras de vidro.

Beltrami *et al.* (2014) afirmam que a fibra de curauá quando comparada com a fibra de vidro apresenta melhor flexibilidade, dureza e resistência a impacto, além de seu uso promover baixa abrasividade e consumo de energia no processamento.

Tabela 7 - Comparação entre as fibras naturais e as fibras de vidro

Comparação entre fibras naturais e fibras de vidro		
	Fibras Naturais	Fibras de Vidro
Densidade	Baixa	Dobro das fibras naturais
Custo	Baixo	Baixo, porém superior as fibras naturais
Renovável	Sim	Não
Reciclável	Sim	Não
Consumo de energia	Baixo	Alto
CO₂ neutro	Sim	Não
Abrasão para as máquinas	Não	Sim
Risco à saúde quando inalado	Não	Sim
Eliminação	Biodegradável	Não biodegradável

Fonte: Wambua *et al* (2003)

4.4 PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS

Para obtenção da forma final do produto, o desenvolvimento e preparação dos compósitos compreendem etapas como mistura, impregnação, compactação e moldagem. A aplicação dos materiais nas formas, controle de temperatura e pressão para permitir a cura das resinas e a compactação dos materiais são partes que se destacam no processo (Esmeraldo, 2006).

Há vários processos para a fabricação dos materiais compósitos, como a pultrusão, a moldagem por transferência de resina, o enrolamento de filamentos, a laminação manual e a moldagem por compressão (Carneiro e Teixeira, 2008).

Em suma, os processos podem ser divididos em processos de molde aberto e processos de molde fechado.

4.4.1 Processos de Molde Aberto

Alguns processos de molde aberto são: deposição manual, pulverização, embalagem a vácuo e enrolamento filamentar, que serão sucintamente descritos através da visão de Smith e Hashemi (2013) e Cerqueira e Alves (2006).

- Processo de deposição manual - é o método mais simples e barato para fabricação de uma peça reforçada com fibras. É adequado para o fabrico de peças grandes e em pequenas quantidades. O processo constitui-se da deposição manual, sobre um molde, de camadas de tecido ou manta de fibras e resina, através de um rolo as camadas são comprimidas e a cura ocorre a temperatura ambiente, conforme mostrado na Figura 20.

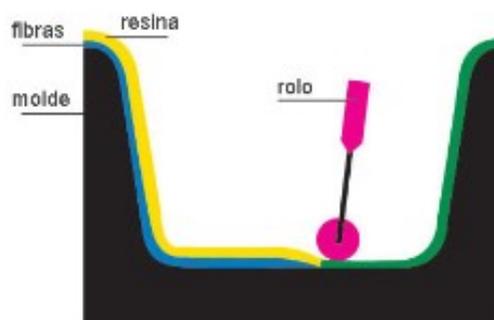


Figura 20 - Processo de deposição manual (Apostila processamento de materiais).

- Processo de Pulverização - é um processo semelhante a deposição manual, contudo, utiliza-se uma pistola de corte e projeção. Consiste na deposição simultânea de resina e de pedaços de fibras sobre um molde que, em seguida, é densificada ou comprimida através de um rolo (Figura 21), que remove o ar que possa vir a ficar aprisionado e assegura a impregnação da fibra na resina.

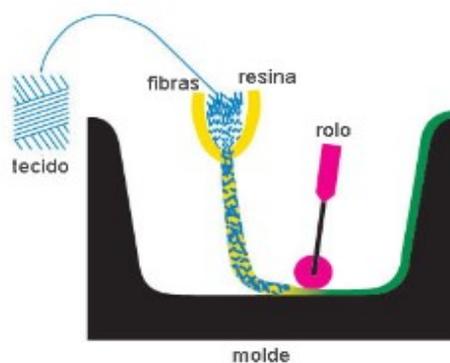


Figura 21 - Processo de pulverização (Apostila processamento de materiais).

- Processo de autoclave em embalagem à vácuo - é um processo utilizado no fabrico de laminados de alto desempenho, principalmente, para aplicações aeronáuticas e aeroespaciais. A deposição é de forma manual, as folhas de compósito pré-impregnada são colocados sobre um molde formando um laminado com as fibras em direções distintas, depois o laminado é fechado em uma embalagem à vácuo e submetido à cura em autoclave, ou seja, sob pressão e temperatura elevada (Figura 22).

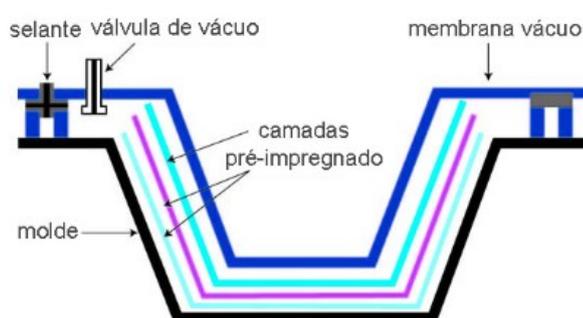


Figura 22 - Processo de autoclave em embalagem à vácuo (Apostila processamento de materiais).

- Processo de enrolamento filamento - o processo consiste em enrolar um fio de fibras contínuas e impregnadas em resina em um mandril de dimensões adequadas (Figura 23). Após o tempo de cura, em estufa ou em temperatura ambiente, a peça é extraída do mandril. Este processo permite fabricar tubos de elevada resistência.

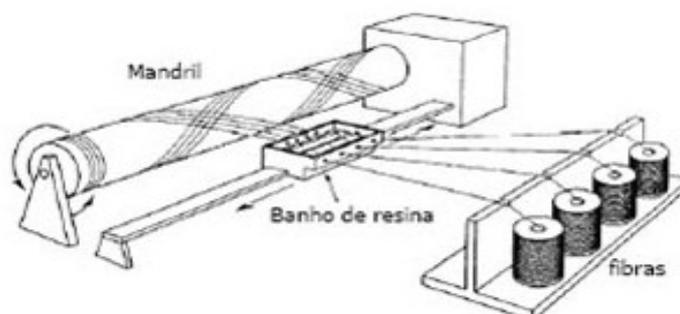


Figura 23 - Processo de enrolamento filamento (Cerqueira e Alves, 2006).

4.4.2 Processos de Molde Fechado

Segundo Smith e Hashemi (2013), vários são os processos de molde fechado, contudo, alguns dos mais importantes são: moldagem por compressão e moldagem por injeção, processo de moldagem de folha e processo de pultrusão, esses serão brevemente descritos de acordo com os autores.

- Moldagem por compressão e moldagem por injeção - são iguais aos processos de molde aberto, contudo, antes de se dar início ao processo, o reforço de fibra é misturado à resina.

- Processo de moldagem de folha (MF) - é um dos mais recentes processos de molde fechado, sendo muito utilizado pela indústria automobilística, pois, permite um eficiente controle de resina e obtenção de propriedades mecânicas atrativas, além de produzir peças de grandes dimensões, uniformes e em grande quantidade. As fibras de vidro são cortadas em comprimentos de cerca de 5 cm e são depositadas sobre uma camada de resina com uma "carga", ou seja, materiais de enchimento. Essa mistura passa sobre um filme de polietileno e mais adiante receberá mais uma camada da mistura (resina + carga). Logo após, esse "sanduíche" coberto por polietileno é então compactado e enrolado (Figura 24). Esse processo demonstra ser vantajoso na indústria automobilística, os painéis frontais, os painéis de carroceria e capô são exemplos das partes do automóvel que utilizam o MF.

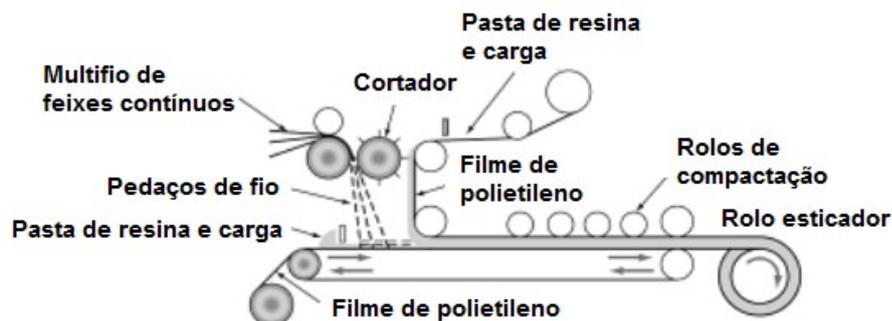


Figura 24 - Processo de moldagem de folha (Smith e Hashemi, 2013).

- Processo de pultrusão contínua - utilizado para compósitos de plástico reforçados com fibras para obtenção de formas de perfis de seção constante (vigas, calhas, tubos cilíndricos, etc). O processo consiste em banhar as fibras contínuas na resina e passá-las por uma fieira aquecida, onde na saída serão ligeiramente estiradas (Figura 25). O resultado será um material de elevada resistência mecânica, devido à grande concentração de fibras e à sua orientação paralela ao comprimento das peças trefiladas.

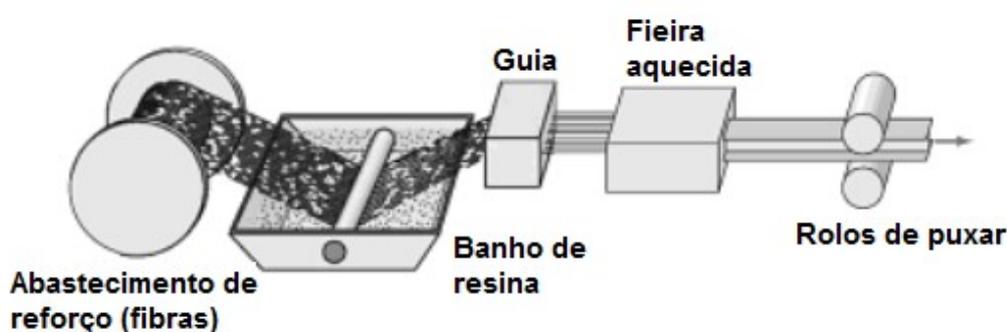


Figura 25 - Processo de pultrusão contínua (Smith e Hashemi, 2013).

4.4.3 Fatores que Influenciam as Propriedades Mecânicas dos Compósitos Reforçados com Fibras Naturais

As propriedades dos compósitos são funções das propriedades das fases constituintes e suas proporções relativas, tamanhos, formatos, distribuição e orientação da fase dispersa. Tais características podem ser vistas na Figura 26 (Balasubramanian, 2013).

As propriedades dos compósitos reforçados com fibras naturais dependem de vários parâmetros, tais como: volume e comprimento de fração das fibras; proporção/homogeneidade das fibras; adesão matriz-fibra, transferência de tensão na interface e orientação das fibras. Diferentes testes podem ser usados para avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos, tais como: tensão, flexão e teste de resistência ao impacto Izod ou Charpy (Nabi e Jog, 1999; Bai, 2013).

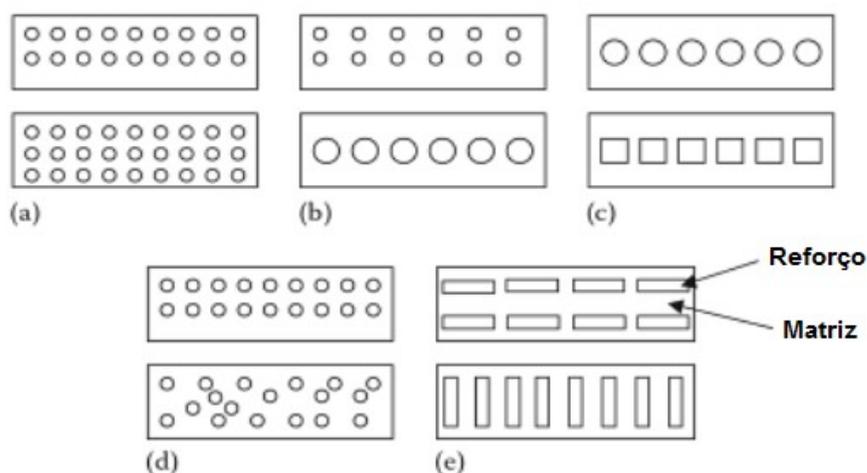


Figura 26 - Esquema das características geométricas e espaciais de reforços em compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) geometria, (d) distribuição e (e) orientação (Balasubramanian, 2013).

- **Fração de volume das fibras**

Segundo Crawford (1998), através da fração volumétrica de fibras (v_f) se expressa a quantidade de fibras em um compósito. A fração volumétrica é a razão entre o volume de fibras e o volume de compósito (v_f/v_c).

Em modelos teóricos, uma aumento no volume de fibras conduz à maior resistência do compósito, contudo, do ponto de vista experimental, um aumento de volume de fibra acima de um valor específico, deteriora as propriedades mecânicas.

Vários estudos tem sido conduzidos a fim de achar a melhor fração de volume de fibras naturais para atingir as melhores propriedades mecânicas.

A Tabela 8 mostra a melhor fração volumétrica em termos de resistência de algumas fibras.

É percebido que não há um valor universal de fração volumétrica de fibras naturais para se atingir a maior resistência, ou seja, para cada fibra há uma valor ótimo de fração volumétrica. Isso se dá devido a natureza da fibra natural e suas características, tais como: força, adesão interfacial, propriedades físicas, entre outras. Outro detalhe é que nenhuma fibra tem sua melhor performance com a fração volumétrica acima de 50% (Shalwan e Yousif, 2013).

Tabela 8 - Comparação entre alguns compósitos reforçados com fibras naturais

Materiais	Fração volumétrica ideal para melhor resistência (%)
Tecido de rami/Poliéster	≈ 30
Alfa/Poliéster	≈ 44
Hemp/PP	≈ 40-50
Kenaf/PP	≈ 40
Juta/PP	≈ 40
Hemp/PLA	≈ 35
Arroz / HDPE	≈ 5-10
Curauá/Epóxi	≈ 25-35

Fonte: Adaptado de Shalwan e Yousif (2013); Lopes (2011)

A Figura 27 mostra as características mais comuns de fratura de acordo com a fração volumétrica.

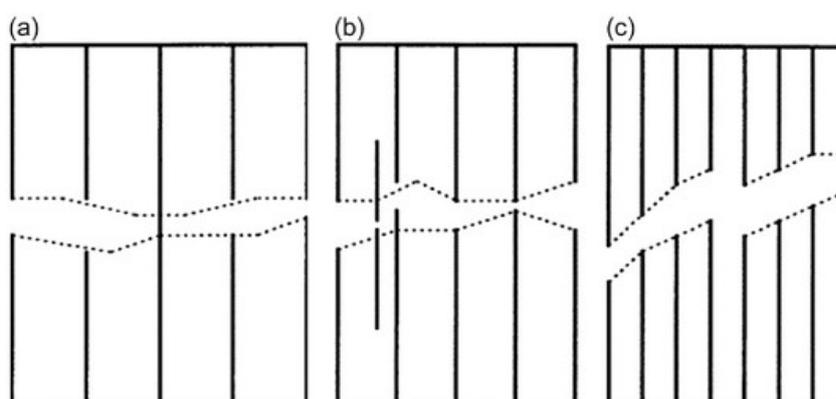


Figura 27 - (a) Baixa fração volumétrica de fibra (b) Intermediária fração volumétrica de fibra (c) Alta fração volumétrica de fibra (Rana e Fanguero, 2016)

- **Comprimento/diâmetro das fibras**

Um aumento do comprimento ou diminuição do diâmetro causam efeitos positivos nas propriedades mecânicas do compósitos poliméricos.

No que diz respeito ao comprimento das fibras, segundo Montardo (2010), quanto menor o comprimento, maior será a possibilidade delas serem arrancadas.

Além disso, um comprimento menor que o comprimento crítico da fibra natural, reduz a eficiência de transferência de tensão entre a matriz e a fibra (Shalwan e Yousif, 2013).

Se tratando do diâmetro, menores diâmetros de fibras naturais causam efeitos positivos na propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos reforçados com fibras. Isso se deve ao fato de que quanto maior o diâmetro, maior será a quantidade de microfibrilas com maior aumento de falhas intercelulares e, portanto, propriedades mecânicas mais baixas (Shalwan e Yousif, 2013).

- **Proporção/homogeneidade das fibras**

Balasubramanian (2013) afirma que os compósitos deveriam ter uma distribuição uniforme dos constituintes. Apesar de ser difícil obter tal homogeneidade na fabricação, distribuição não uniforme deveria ser evitada, uma vez que, diferentes regiões do compósito causarão diferentes propriedades. O compósito no todo será prejudicado devido a parte mais fraca causada pela não homogeneidade, ou seja, a falha de um compósito não uniforme iniciará na área de menor força afetando negativamente a resistência global do compósito.

- **Adesão Matriz-Fibra**

Salit (2014) afirma que o maior problema dos compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais diz respeito à baixa compatibilidade da fibra natural hidrofílica com a matriz que possui característica hidrofóbica. Isso acarreta em baixa adesão interfacial fibra-matriz e, conseqüentemente, propriedades mecânicas indesejáveis.

De acordo com Zafeiropoulos (2011), fibras naturais são hidrofílicas e polares e matrizes poliméricas são hidrofóbicas e apolares. As fibras possuem grupos de hidroxilas polares na superfície na forma de celulose e lignina e são incompatíveis com a matriz polimérica apolar e, portanto, não há uma boa ligação na interface. Isso resulta em má molhabilidade entre fibra e matriz acarretando em reforço insuficiente, bem como propriedades mecânicas de baixo rendimento. Afetando a

resistência à tração muitas outras propriedades são afetadas incluindo tenacidade à fratura, resistência à fluência, fadiga e degradação ambiental.

Uma boa interface permite uma efetiva transferência de tensão entre matriz e fibra.

Matthews e Rawlings (1994) afirmam que para que haja aderência entre a matriz e o reforço de maneira efetiva, alguma espécie de interação deve ocorrer. Segundo os autores, os principais mecanismos de interação superficial entre matriz e reforço são:

1. Interação mecânica - encaixe ou entrosamento entre as superfícies, sendo mais efetiva em superfícies rugosas devido à maior área de contato;
2. Interação eletrostática - ocorre quando uma superfície está carregada positivamente e a outra está carregada negativamente, fazendo, portanto, que haja atração entre as superfícies do compósito;
3. Ligação química - ocorre quando grupos presentes na matriz são capazes de reagir com grupos polares da carga inorgânica. A interação química entre as superfícies permite que as tensões mecânica sofridas pelo material sejam transferidas com mais eficiência da matriz para a carga, o que confere melhores propriedades mecânicas ao material (Plueddeman, 2016).

A Figura 28 retrata um exemplo de fibra com boa adesão na matriz e um exemplo de fibra com fraca aderência na matriz.

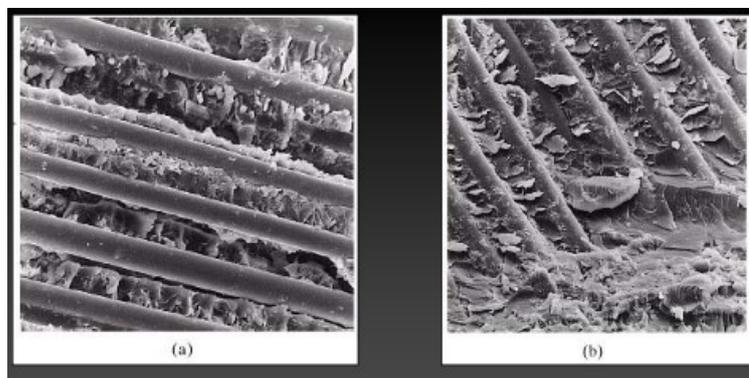


Figura 28 - Fraca aderência entre as fibras e a matriz (a); Forte aderência entre as fibras e a matriz (b) (Fonte: Batistelle e Renofio, 2005).

Plueddemann (2016) afirma que uma boa molhabilidade da resina é de suma importância, uma vez que, uma baixa molhabilidade produz vazios na interface e provoca concentradores de tensão, deixando, portanto, o material mais frágil.

- **Orientação das fibras**

Besednjak (2009) afirma que a orientação das fibras de reforço é extremamente importante. O autor compara dois corpos de provas, constituídos do mesmo material, que foram submetidos ao ensaio de tração. No primeiro caso, as fibras estavam no mesmo sentido da tração, já no segundo caso, o sentido de orientação das fibras foram arranjadas transversalmente ao esforço original de tração.

A Figura 29 representa os gráficos de tensão x deformação respectivos das situações descritas.

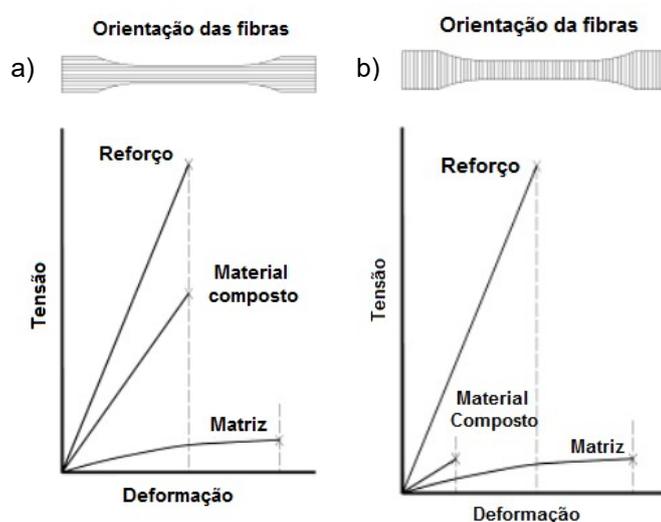


Figura 29 - (a) Gráfico tensão x deformação - reforço de fibras no sentido longitudinal (b) Gráfico tensão x deformação - reforço de fibras no sentido transversal (Adaptado de Besednjak, 2009).

Pode-se observar que, isoladamente, no primeiro caso, a matriz possui valores bastante inferiores de resistência à tração, contudo, ao adicionarmos fibras como material de reforço, a resistência a tração aumenta consideravelmente. Apesar

da maior resistência ser encontrada nas fibras isoladas, sua eficiência não é ótima. Logo, se faz necessário combinar o reforço com uma matriz que proteja de fatores externos e, além disso, atribua características desejáveis quando as mesmas estiverem misturadas.

No segundo caso, temos uma amostra constituída com a mesma matriz e o mesmo material de reforço da situação anterior, apenas foi mudado a orientação das fibras de reforço. Nota-se que o valor de resistência para o material compósito foi inferior se comparado com as fibras na posição longitudinal.

4.5 O SETOR AUTOMOBILÍSTICO E OS COMPÓSITOS

Materiais compósitos foram introduzidos no mercado automobilístico no início da década de 70, inicialmente, somente resina poliéster reforçada com fibra de vidro foram utilizadas e foram produzidas algumas partes do veículo pela técnica *hand lay-up* ou *spray-up*.

Desde então, muitos materiais e processos de produção novos tem sido desenvolvido, de forma que os projetistas de peças têm à sua disposição uma grande variedade de materiais e processos. Atualmente, cerca de 15 a 20% do peso médio dos automóveis consiste de materiais compósitos, o que no início (década de 70) correspondia a apenas 6% (Bai, 2013).

Paiva e Trindade (1999) afirmam que as primeiras patentes de compósitos datam da década de 60, contudo, devido a questões econômicas e de desempenho, nas décadas de 70 e 80 as fibras sintéticas substituíram as fibras vegetais. Foi, então, na década de 90 que houve maior interesse em fontes renováveis, motivado por uma visão mais realista e ambiental dos processos industriais, principalmente na indústria automotiva.

A Mercedes-Benz, em 2003, começou a utilizar fibras naturais, mais especificamente Juta, como material de enchimento do revestimento das portas do automóvel Mercedes Classe-A, a Figura 30 retrata a aplicação de fibras na fabricação do carro Mercedes-Benz.

A grande maioria dos principais fabricantes de carros na Alemanha utilizam compósitos à base de fibras naturais em diversas aplicações. Outro exemplo de empresa que investiu nas fibras naturais foi a BMW, que emprega 24 kg de materiais renováveis no modelo série 7, dentre os quais mais de 13 kg são fibras lignocelulósicas (Suddell *et al.*, 2002).

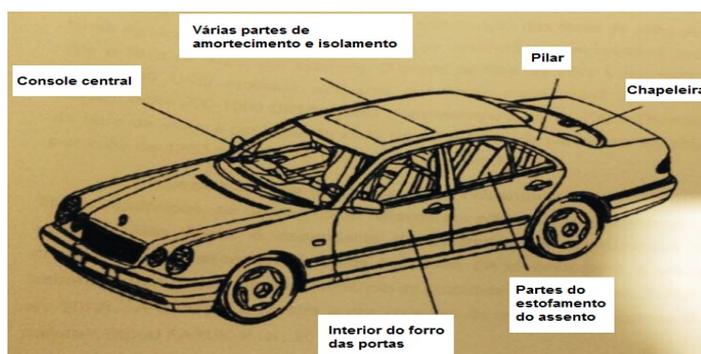


Figura 30 - Aplicação de fibras de plantas na Mercedes-Benz (Schuh, 2004).

A Tabela 9 descreve marcas de veículos que utilizam fibras naturais na fabricação com seus respectivos modelos e aplicações.

Tabela 9 - Aplicações de fibras naturais na indústria.

FABRICANTE	MODELO
AUDI	A2, A3, A4, A6, A8, Roaster, Coupe: encosto dos bancos, painéis laterais e porta traseira, forro...
BMW	3, 5, 7 series: painel da porta, forro, encosto dos bancos, painéis de isolamento de ruídos...
CITROEN	C5: painéis interior da porta
FIAT	Punto, Brava, Marea, Alfa Romeo 146, 156
FORD	Mondeo CD 162, Focus
LOTUS	Eco Elise: corpo dos painéis, bancos, tapetes..
PEUGEOT	406: encosto dos bancos
RENAULT	Clio, Twingo
ROER	2000 e outros: isolamento
TOYOTA	Brevis, Harrier, Celsior, Raum: painel das portas, encosto dos bancos
VOLKSWAGEN	Golf, Passat, Bora: painel da porta, encosto dos bancos, forro...
VOLVO	C70, V70: assento do estofamento, espumas naturais...

Fonte: Adaptado de Jamrichová e Aková (2013).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MATÉRIA-PRIMA

Os produtos primários utilizados para a produção dos compósitos foram:

- Reforço - Fibras de curauá que foram adquiridas da Amazon Paper, essa empresa comercializa fibra de curauá e produz artefatos a partir dela tais como papéis; Fibras de vidro do tipo E e manta de vidro que foram compradas da empresa *Glass* que faz reparos em veículos automotivos e pranchas de surf.
- Matriz - Utilizou-se a resina Epóxi do tipo éter diglicidílico do Bisfenol A (DGEBA), fornecida pela Dow Chemical (RJ), misturada ao catalisador trietileno tetramina (TETA) na proporção estequiométrica correspondente ao phr = 13 (13 partes do endurecedor por 100 partes da resina).

5.2 METODOLOGIA EMPREGADA NA CARACTERIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Devido ao fato das fibras adquiridas, possivelmente, não serem do mesmo lote das fibras já caracterizadas na revisão bibliográfica, faz-se necessário caracterizá-las novamente.

5.2.1 Preparação das fibras de curauá

As fibras recebidas da *Amazon Paper* sofreram uma breve limpeza superficial e secagem ao ar livre.

5.2.2 Caracterização dimensional

Retirou-se, aleatoriamente, 100 fios de fibras de curauá e realizou-se a caracterização dimensional (diâmetro, comprimento e massa).

5.2.2.1 Comprimento médio das fibras

A determinação do comprimento médio das fibras foi feita utilizando uma régua graduada de metal.

5.2.2.2 Diâmetro médio

A determinação do diâmetro médio das fibras foi feita com auxílio de um Projetor de Perfil da marca Nikon (Figura 31) pertencente ao Laboratório de Materiais Avançados, com um aumento de 50 vezes. O diâmetro foi medido em 10 posições distintas, 5 medidas foram tiradas em um ângulo e 5 medidas foram obtidas virando a fibra em 90 graus, isso se deve ao fato das fibras vegetais possuírem espessuras variáveis e diâmetros inconstantes.



Figura 31 - Projetor de Perfil Nikon, utilizado para medir o diâmetro das fibras de curauá (LAMAV/UENF)

5.2.2.3 Massa

A massa de cada fibra foi obtida através de uma balança de precisão digital de 4 casas decimais da marca SHYMDZU e modelo AY220 (Figura 32).



Figura 32 - Balança de precisão digital (LAMAV/UENF)

5.2.3 Determinação da densidade

A densidade é uma propriedade fundamental na definição da aplicação das fibras para o uso tecnológico. A densidade foi determinada através de duas técnicas: técnica geométrica e através do ensaio de picnômetro.

5.2.3.1 Técnica geométrica

Calcula-se a densidade através da razão da massa/volume. O valor obtido é influenciado pelos poros e pelo lúmen existentes nas fibras vegetais, logo, a densidade obtida por essa técnica é a densidade aparente.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1)$$

Onde:

ρ = densidade específica da fibra (kg/m³ ou g/cm³);

m = massa da fibra (kg ou g)

v = volume da fibra (m³ ou cm³)

A massa foi obtida pela média de 100 fibras pesadas diretamente através da balança de precisão, já para o volume foi utilizada a fórmula geométrica do cilindro.

$$v_f = \frac{\pi d^2}{4} \times L_f \quad (\text{cm}^3) \quad (2)$$

Onde:

v_f = volume da fibra (cm³)

d = diâmetro (cm)

L_f = comprimento da fibra (cm)

5.2.3.2 Ensaio com picnômetro

A determinação da densidade através do picnômetro é bastante precisa. Utiliza-se um líquido com densidade conhecida, como a água.

A técnica é usada para determinar ambas as fases, tanto do líquido como da fase dispersa, contudo, é bastante utilizada para medição de pó/grânulo e para determinar a fase sólida num sólido poroso (Kelley *et al.*, 2004).

Secou-se a fibra em temperatura de aproximadamente 105°C e pesou (Massa da fibra - M_f) em uma balança digital com 4 casas decimais da marca SARTORIUS

Basic (Figura 33). Foi pesado o frasco do picnômetro (m_1), bem como o picnômetro com água (m_2).



Figura 33 - Peso correspondente da fibra após seca (LAMAV/UENF)

Em um picnômetro seco (50mL), foi inserida a fibra e adicionado água destilada até atingir 90% do volume do picnômetro. Esse picnômetro com água destilada e fibra foi agitado, colocou-se em um dessecador ligado a uma bomba a vácuo com sucção de 400 mmHg (Figura 34), a fim de eliminar as bolhas de ar. Após 2 horas o picnômetro foi retirado do dessecador e agitado novamente.



Figura 34 - Dessecador ligado à bomba a vácuo (LAMAV/UENF)

O picnômetro foi completado com água, secou-se a água sobressalente, que vazou através do orifício capilar, com papel de filtro e foi medido o peso total, ou seja, picnômetro + fibra + água - m_3 (Figura 35).



Figura 35 - Massa do picnômetro + água + fibra (LAMAV/UENF)

O cálculo foi efetuado através da fórmula da densidade:

$$\rho_{fibra} = \frac{m_f}{V_f} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3)$$

Onde, o volume da fibra (V_f) é igual ao volume (V_d) devido a presença de fibra dentro do picnômetro cheio. A densidade da água depende da temperatura da água destilada ρ_{H_2O} (A_d). Logo, para calcular o volume da fibra, utilizou-se a seguinte equação:

$$v_f = v_d = \frac{[(m_2 - m_1) - (m_3 - m_1 - f_m)]}{A_d} \text{ (mL)} \quad (4)$$

Onde:

v_f = Volume da fibra (mL)

v_d = Volume deslocado (mL)

m_1 = Massa picnômetro (g)

m_2 = Massa picnômetro + água (g)

m_3 = Massa picnômetro + água + fibra (g)

f_m = massa da fibra seca (g)

A_d = Densidade da água destilada (mL)

Para se obter uma maior precisão, foram analisadas três amostras seguindo o mesmo procedimento e calculado a média através da Equação 5.

$$\bar{\rho} = \frac{\sum \rho}{n} \quad (5)$$

Onde:

ρ = densidade

n = Quantidade de amostra (3)

5.2.4 Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural se deu através da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Segundo Nagatani *et al.* (1987) o MEV é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características microestruturais de objetos sólidos. Possui alta resolução, essa é a principal razão de sua utilidade, valores entre 2 e 5 nm são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, já

os equipamentos de pesquisa avançada são capazes de alcançar uma resolução melhor que 1nm.

O princípio do MEV (Figura 36) consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquele feixe incidente. O rastreamento completo de cima para baixo, geralmente, leva apenas alguns segundos (Dedavid *et al.*, 2007).

As diferenças na superfície da amostra afetam o padrão com o qual os elétrons são dispersos a partir deste. Pontos e/ou manchas escuras aparentam ser buracos ou fissuras, já as protuberâncias e saliências aparecem claras, resultando em uma imagem tridimensional. Somente estruturas superficiais podem ser examinadas com o MEV (De Castro, 2002).

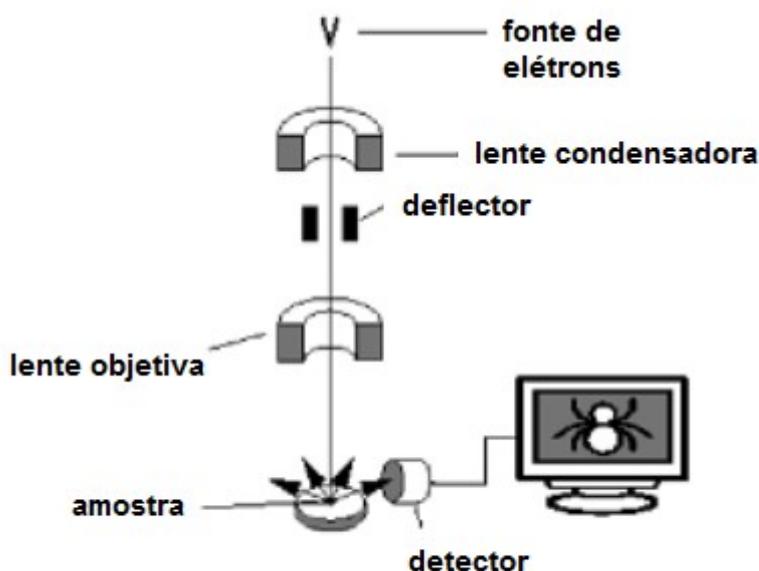


Figura 36 - Microscópio eletrônico de varredura - MEV (Dedavid *et al.*, 2007)

Para realizar a análise de MEV, foi necessário fixar uma pequena quantidade de fibras de Curauá em um suporte metálico/moeda com fita de carbono e metalizar com grafite, ou seja, a técnica do recobrimento da amostra através de uma fina camada de ouro ou grafite é chamada de *sputtering* e se faz necessário porque materiais compósitos com matriz polimérica, muitas vezes, não apresentam boa

resolução das características topográficas da região fraturada para exame neste equipamento, sendo assim, o *sputtering* torna a amostra condutora e minimiza as cargas estáticas devido aos feixes de elétrons, o que produz melhores imagens para a análise (Marinucci, 2001).

5.3 ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos possuem como principal objetivo verificar a complexibilidade entre reforço e matriz, de acordo com Humphreys e Goodhew (1988), as propriedades mecânicas de maior interesse são: resistência à tração, impacto, fadiga e abrasão, módulo de elasticidade, dureza e tenacidade à fratura além de compressão.

Em relação à integridade, são considerados ensaios destrutivos, já que, provocam inutilização parcial ou total da peça. Os ensaios são baseados nas normas *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

5.3.1 Tração

Consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. Devido ao fato desse ensaio permitir deformações uniformemente distribuídas em todo o corpo e, como é possível fazer com que a carga cresça lentamente durante o teste, pode-se medir de maneira satisfatória a resistência do material (Dalcin, 2007).

O corpo de prova geralmente é circular, contudo, neste caso será usado o corpo de prova retangular, conforme representado na Figura 37. Um das normas que rege o ensaio de tração é a ASTM D638M.



Figura 37 - Corpo de prova para ensaio de tração (Dalcin, 2007).

A região onde são feitas as medidas das propriedades mecânicas fica confinada à parte útil (L_0). Os extremos do corpo de prova, também conhecido como "cabeça" devem possuir diâmetro maior que o corpo para que a ruptura não ocorra naquele ponto e servem para permitir acoplar o corpo de prova na máquina, de forma que, a força atuante na máquina seja axial.

As dimensões necessárias segundo procedimentos equivalem a, aproximadamente, 12,8 mm (diâmetro) e 60 mm (comprimento da seção reduzida, ou seja, parte útil).

A máquina de ensaio de tração permite alongar o corpo a uma taxa constante e, através de um extensômetro, é possível quantificar o alongamento resultante. O resultado é plotado em um gráfico, cujas características típicas do gráfico podem ser visualizadas na Figura 38 e a fórmula utilizada para determinar o módulo de elasticidade é:

$$E = \frac{\left(\frac{F}{A}\right)}{\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)} \left(\frac{N}{m^2}\right) \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ (MPa)} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (8)$$

Substituindo a Equação 7 e 8 na Equação 6, têm-se:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (9)$$

Onde:

E = módulo de elasticidade

F = força

A = área

Δl = variação no comprimento ($l_f - l_0$)

l_0 = comprimento inicial

σ = tensão

ε = deformação

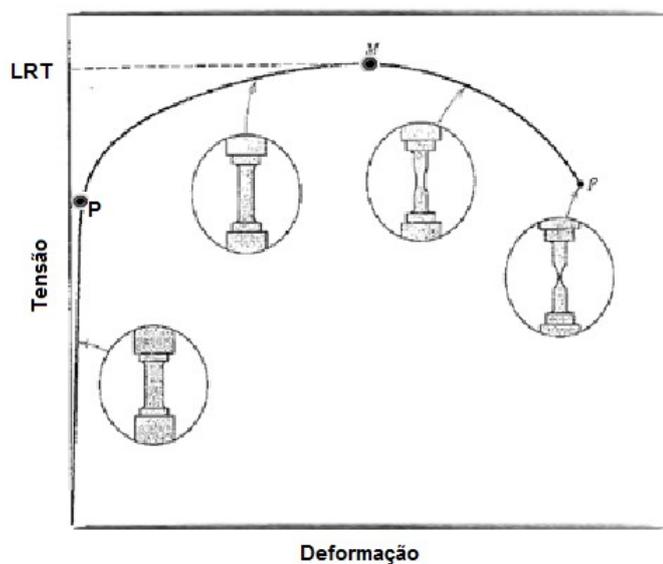


Figura 38 - Gráfico do comportamento típico da curva tensão-deformação para ensaio de tração (Adaptado de Callister, 2000).

Segundo Callister (2000), a Figura 38 mostra uma curva de tensão-deformação, no qual o ponto P exibe o limite entre a região plástica e a região elástica, ou seja, o limite no qual um material deixa de retornar ao seu estado original quando a força sobre ele é cessada e, como consequência, esse material fica deformado. Tal ponto é conhecido como limite de escoamento.

O ponto M representa a tensão máxima da curva tensão-deformação, conhecida como Limite de Resistência à Tração (LRT), caso essa tensão seja aplicada e mantida, ocorrerá a fratura. Nota-se nesse momento que, fisicamente inicia a ocorrência de uma constrição, também chamado de "pescoço", e toda deformação subsequente fica confinada a essa região, o fenômeno é conhecido como "empescoçamento".

A resistência à fratura corresponde à tensão aplicada quando da ocorrência da fratura.

Outra definição importante que o mesmo autor cita, diz respeito à ductilidade, ou seja, medida do grau de deformação plástica que foi suportado quando da fratura, isso irá definir se o material é frágil (não possui plasticidade) ou dúctil.

5.3.1.1 Corpo de prova para ensaio de tração

Os corpos de prova (CP's) foram preparados pelo processo de compressão juntamente com a matriz metálica de cura à temperatura ambiente. As fibras de curauá não sofreram nenhum tratamento superficial.

A Figura 39 mostra cada passo do procedimento de fabricação do corpo de prova para ensaio de tração.



Figura 39 - Organograma com o procedimento para fabricação dos corpos de prova de fibra de curauá para ensaio de tração.

As fibras foram cortadas no tamanho da matriz metálica, inseridas na mesma e banhadas com resina polimérica epoxídica misturada ao catalisador trietileno tetramina (TETA) na proporção estequiométrica correspondente ao phr = 13 (13 partes do endurecedor por 100 partes da resina). Logo após, a matriz foi levada à prensa com 2,5 toneladas por 24 horas durante o processo de cura.

Os corpos de prova foram retirados da matriz e submetidos a uma esmerilhadeira da marca Panambra e modelo DPU-10 a fim de retirar as rebarbas e enquadrar o corpo de prova ao tamanho adequado, segundo a ASTM D638M. Os corpos de prova foram medidos e numerados e os mesmos foram ensaiados na máquina universal da marca Instron e modelo 5582.

Utilizou-se o mesmo procedimento para fabricação dos corpos de prova dos compósitos de fibra de vidro. Foram fabricados 13 corpos de prova com concentração de 0% de fibra e 13 corpos de prova para ambas as fibras (curauá e fibra de vidro) longas e alinhadas com concentração de 30% em peso.

5.3.2 Flexão

O teste de flexão segundo ASTM D790, mede a força requerida para dobrar um material sob a carga de três pontos (Figura 40). O dado é usado freqüentemente para selecionar quais partes do material irão suportar peso sem flexionar. O módulo de flexão é usado como indicador da rigidez do material quando flexionado.

As principais propriedades obtidas em um ensaio de flexão são: módulo de ruptura na flexão, módulo de elasticidade, módulo de resiliência e módulo de tenacidade.

Existem várias dimensões para o corpo de prova de ensaio de flexão, contudo as mais utilizadas são: 3,2mm X 12,7mm X 125mm (ASTM) e 10mm X 4mm X 80mm (*Internacional Organization for Standardization - ISO*).

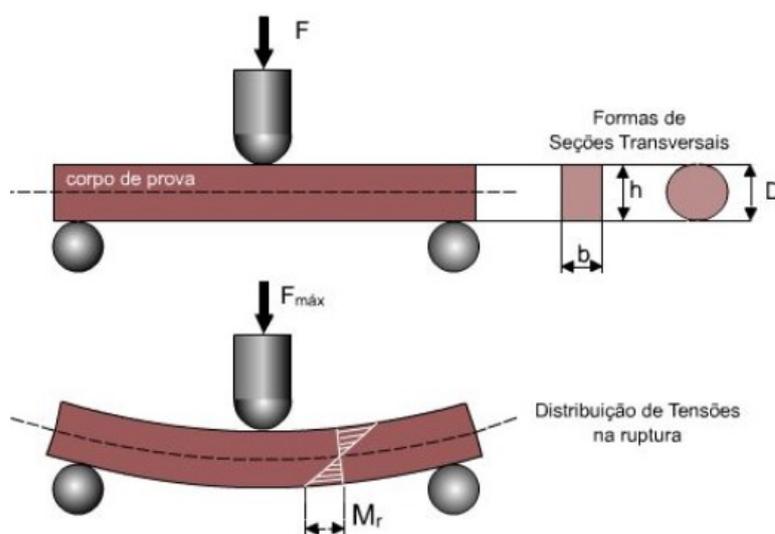


Figura 40 - Teste de flexão de 3 pontos

A tensão de ruptura à flexão pode ser calculado através da Equação 10:

$$TRF = \frac{3PL}{2bh^2} \text{ (MPa)} \quad (10)$$

Onde:

TRF = tensão de ruptura à flexão (MPa)

P = carga no instante da ruptura (N)

L = distância entre os apoios do corpo de prova (mm)

b = largura do corpo de prova (mm)

h = altura do corpo de prova (mm)

5.3.2.1 Corpo de prova para ensaio de flexão

Os corpos de prova (CP's) foram preparados pelo processo de compressão juntamente com a matriz de cura à temperatura ambiente. As fibras de curauá não sofreram nenhum tratamento superficial.

A Figura 41 mostra cada passo do procedimento de fabricação do corpo de prova para ensaio de flexão.

As fibras foram cortadas no tamanho da matriz metálica, inseridas na mesma e banhadas com resina polimérica epoxídica misturado ao catalisador trietileno tetramina (TETA) na proporção estequiométrica correspondente ao phr = 13 (13 partes do endurecedor por 100 partes da resina). Logo após, a matriz foi levada à prensa com 2,5 toneladas por 24 horas durante o processo de cura.

Retirou-se a placa da matriz, submeteu-a ao corte segundo a ASTM D790 e através da esmerilhadeira da marca Panambra e modelo DPU-10 retiraram-se as rebarbas. Os corpos de prova foram medidos e numerados e os mesmos foram ensaiados na máquina universal da marca Instron e modelo 5582 em uma velocidade de 1mm/mim até a ruptura.



Figura 41 - Organograma do procedimento para fabricação dos corpos de prova de fibra de curauá para ensaio de flexão

Para a fabricação dos corpos de prova de fibra de curauá, foram utilizadas fibras longas e alinhadas, já no caso da fibra de vidro, utilizou-se a manta de vidro com o intuito de homogeneizar o corpo de prova. Foram fabricados 13 corpos de prova com concentração de 0% de fibra e 13 corpos de prova para ambas as fibras (curauá e manta de vidro) com concentração de 30% em peso.

5.3.3 Impacto

O principal parâmetro para quantificar a resistência ao impacto é a energia de impacto. O ensaio de impacto caracteriza melhor o comportamento dúctil-frágil descrito no ensaio de tração.

Esse ensaio se dá através de uma carga aplicada, por meio de um pêndulo e uma altura determinada onde adquire uma energia potencial em um corpo de prova na forma de esforços por choque, conforme representado na Figura 42 (Dalcin, 2007).

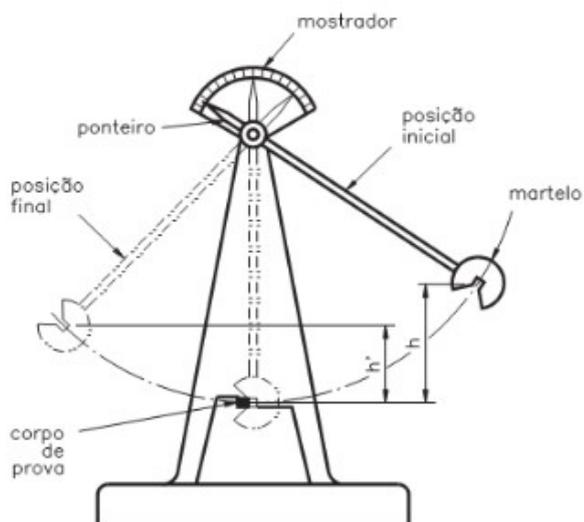


Figura 42 - Ensaio de impacto (Dalcin, 2007).

O impacto gerado no corpo fará com que o mesmo se rompa, contudo, o pêndulo irá continuar seu percurso até cessar sua energia. A diferença entre a energia inicial e a energia final corresponde à energia absorvida pelo material. Através da escala, que indica a posição do pêndulo, é possível calcular a energia potencial:

$$E_p = m \cdot g \cdot \Delta h \text{ (J/m)} \quad (11)$$

Onde:

E_p = energia potencial (J/m)

m = massa (g)

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

h = variação da altura ($h_f - h_i$)

Vários métodos de impacto podem ser utilizados, contudo, em nível tecnológico, o ensaio mais utilizado para medir a resistência ao impacto do polímero é o tipo *Charpy* e *Izod* e são especificados nas normas ASTM D6110 e ASTM D256 (respectivamente).

Segundo Atta (2014), há algumas diferenças entre os métodos de ensaios de impacto que seguem na Tabela 10.

Tabela 10 - Diferenças entre os ensaios de impacto *Charpy* e *Izod*

	CHARPY	IZOD
Posição da amostra	Horizontal	Vertical
Direção do entalhe	Posição oposta a martelo	Na direção do martelo
Tipo de entalhe	Em V ou U	Somente em V
Dimensões da amostra	55 x 10 x 10 mm	75 x 10 x 10 mm
Tipo de martelo	" <i>Farming</i> "	" <i>Ball Pin</i> "

Fonte: Adaptado de Att (2014).

5.3.3.1 Corpo de prova para ensaio de impacto

Os corpos de prova (CP's) foram preparados pelo processo de compressão juntamente com a matriz de cura à temperatura ambiente. As fibras de curauá não sofreram nenhum tratamento superficial.

A Figura 43 mostra cada passo do procedimento de fabricação do corpo de prova para ensaio de impacto.

As fibras foram cortadas no tamanho da matriz metálica, inseridas na mesma e banhadas com resina polimérica epoxídica misturado ao catalisador trietileno tetramina (TETA) na proporção estequiométrica correspondente ao phr = 13 (13 partes do endurecedor por 100 partes da resina). Logo após, a matriz foi levada à prensa com 2,5 toneladas por 24 horas durante o processo de cura.

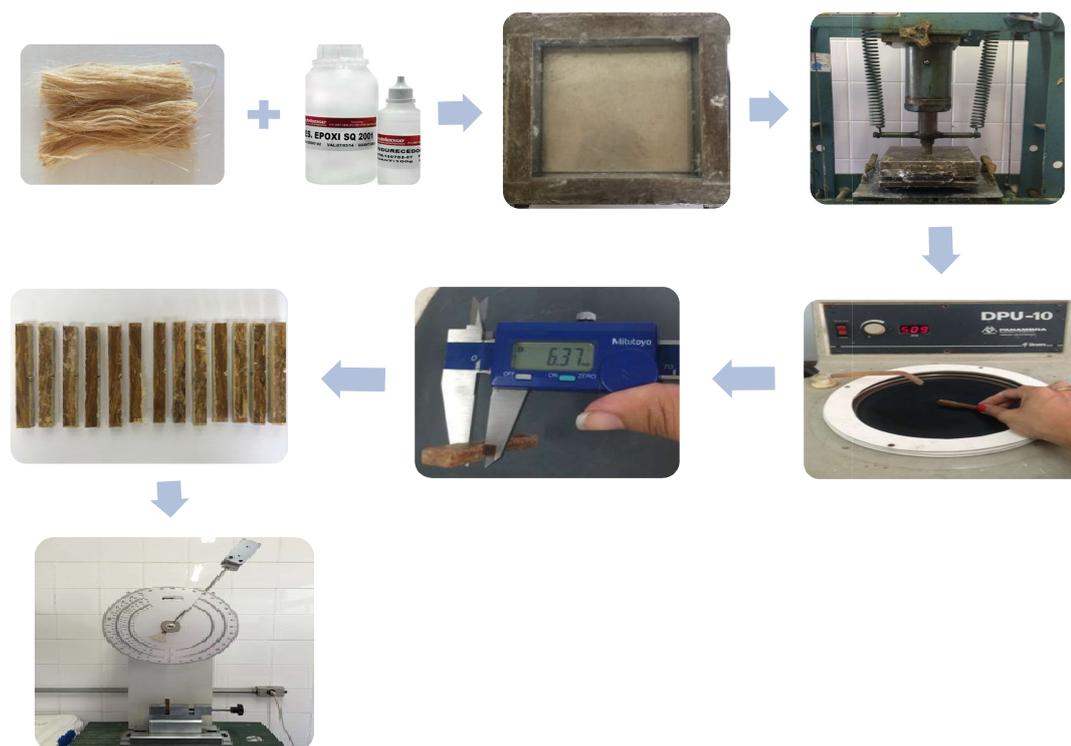


Figura 43 - Organograma do procedimento para fabricação dos corpos de prova de fibra de curauá para ensaio de Impacto Izod

Retirou-se a placa da matriz, submeteu-a ao corte segundo a ASTM D256 e ao entalhe em v, com 2,54 mm de profundidade e ângulo de 45° através de uma fresa alemã em aço rápido biangular a 45°, atendendo a norma DIN 847. Foi utilizada a esmerilhadeira da marca Panambra e modelo DPU-10 para retirar as rebarbas. Os corpos de prova foram medidos e numerados e os mesmos foram ensaiados em um pêndulo da marca PANTEC, modelo XC-50.

Para a fabricação dos corpos de prova de fibra de curauá, foram utilizadas fibras longas e alinhadas, já no caso da fibra de vidro, utilizou-se a manta de vidro.. Foram fabricados 13 corpos de prova com concentração de 0% de fibra e 13 corpos de prova para ambas as fibras (curauá e manta de vidro) com concentração de 30%.

5.4 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS ATRAVÉS DA ESTATÍSTICA DE WEIBULL

Segundo Dirikolu e Aktas (2001), materiais frágeis apresentam comportamento mecânico extremamente dependente dos defeitos encontrados no material.

A fragilidade se traduz em uma espécie de intolerância ao defeito, a partir do momento que qualquer heterogeneidade encontrada pode se tornar um defeito crítico e acarretar na fratura do material de maneira inesperada.

A variação apresentada pelas propriedades mecânicas entre um corpo de prova e outro é grande, exatamente pelo fato de que as heterogeneidades particulares de cada corpo de prova interferem diretamente em seu desempenho. O fenômeno descrito acima se acentua ainda mais para materiais compósitos, que além de frágeis, não são isotrópicos e apresentam uma microestrutura altamente heterogênea. Neste contexto, os resultados encontrados para suas propriedades mecânicas devem ser analisados não somente por meio de um valor absoluto, mas sim, fazendo uso de uma distribuição estatística.

Logo, utilizou-se a estatística de Weibull para melhor análise e confiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos.

O engenheiro sueco Ernst Hjalmar Walodi Weibull desenvolveu a distribuição de Weibull em 1951, no contexto de ajustamento de distribuições teóricas a dados empiricamente coletados (Becker, 2015).

Budynas e Nisbett (2009) afirmam que a distribuição de Weibull é discutida e usada em trabalhos que tratam de resultados experimentais, particularmente de confiabilidade. Ainda seguem discorrendo que trata-se de uma distribuição camaleônica, assimétrica, com valores diferentes para a média e mediana e, devido, a sua flexibilidade, é largamente usada.

A função de Weibull é definida conforme a Equação 12 (Dodson, 2006):

$$f(x) = \frac{\beta(x-\delta)^{\beta-1}}{\theta^{\beta}} \exp\left[-\left(\frac{x-\delta}{\theta}\right)^{\beta}\right], x \geq \delta \quad (12)$$

Onde:

β = parâmetro de forma ou módulo de Weibull.

e = parâmetro de escala ou grandeza característica

δ = é o fator de localização ou grandeza inicial.

Para a determinação dos coeficientes que governam a distribuição de freqüências de Weibull, monta-se sobre eixos cartesianos um conjunto de pontos cujas coordenadas são, no eixo das abscissas, o logaritmo neperiano da propriedade estudada, ou seja, $x = \ln \delta$ e no eixo das ordenadas, segundo a Equação 13.

$$y = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \right] \quad (13)$$

onde $F(t)$ é a função *rank* mediano. Tal equação é a linearização da equação anterior.

Segundo Dodson (2006), distribuições muito distorcidas, como é o caso das distribuições de Rank, a mediana descreve melhor a amostra como uma entre diversas opções para determinação deste estimador de probabilidade.

$$F = \frac{j - 0,3}{n + 0,4} \quad (14)$$

onde j é a ordem de falha e n é o tamanho da amostra.

A partir daí, pode-se obter os valores do módulo de Weibull considerando-o como sendo a inclinação de uma reta que mais adequadamente descreva os pontos, acima definidos.

Após a construção da reta, obtém-se a equação e conseqüentemente $a = y_0$ (coeficiente linear da reta) e $b = \beta$ (Módulo de Weibull).

O parâmetro de escala (θ) é determinado pela Equação 15:

$$\theta = e^{\left(\frac{y_0}{\beta}\right)} \quad (15)$$

De acordo com Carvalho (2007), o valor de β (Módulo de Weibull) deve estar compreendido no intervalo entre 0,5 e 15 para corpos frágeis. Se β aumenta a média μ se aproxima do parâmetro de escala θ e a variância tende a zero. Nos casos em que o parâmetro de localização δ é igual zero, θ é a vida característica, isto é, em um estudo de tensão de ruptura, por exemplo, θ é a tensão de ruptura característica da amostra. Isto significa que 63,8% das amostras sofrerão rompimento sob tensões inferiores a θ , independente do valor de β .

Outro fator importante que é analisado na estatística de Weibull é o fator de determinação ou parâmetro de ajuste (R^2) que indica o quanto os pontos do gráfico estarão bem ajustados à sua reta central. O valor de R^2 pode variar de 0 a 1, quanto mais próximo estiver de 1, maior confiabilidade terá.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE CURAUÁ

Através de 100 fios aleatórios de fibra, caracterizou-se a fibra de acordo com seu diâmetro e comprimento. Em relação ao comprimento, devido à fibra ser muito longa, houve-se a necessidade de cortá-la, o comprimento médio obtido dos 100 fios de fibras aleatórias foi de 15,6 cm. Já em relação ao diâmetro, a Figura 44 representa a distribuição dos diâmetros da fibra de curauá.

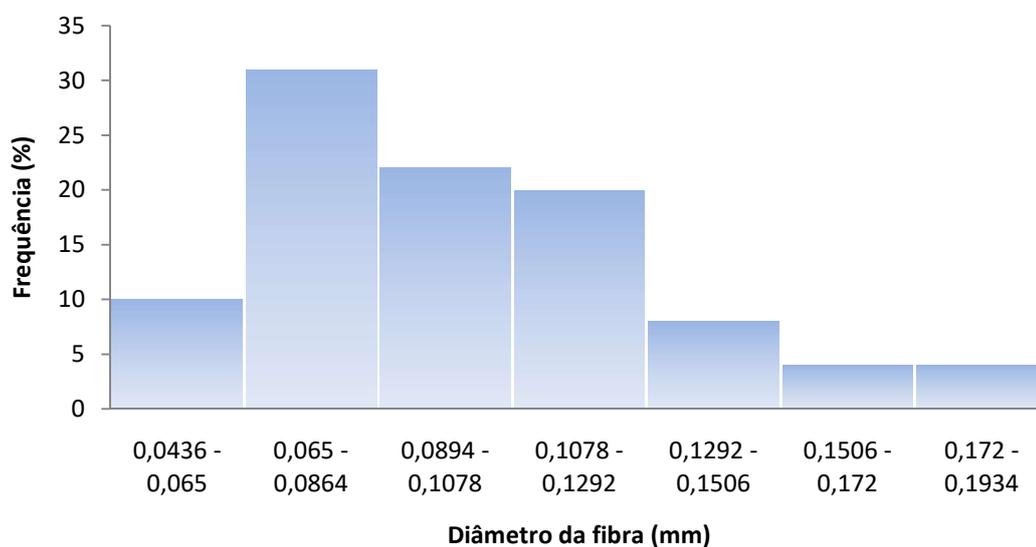


Figura 44 - Histograma da distribuição dos diâmetros da fibra de curauá

O histograma revela um diâmetro mínimo de 0,044 mm e um diâmetro máximo de 0,193 mm. A maioria das fibras se encontra na faixa entre 0,065 mm e 0,086 mm, contudo, o diâmetro médio é de aproximadamente 0,098 mm. Ferreira (2009) realizou a caracterização da fibra de curauá e no histograma de frequência obteve valor médio de 0,070 mm, ou seja, valor aproximado ao encontrado nesta pesquisa.

6.1.1 Determinação da densidade: método geométrico

Obteve-se o comprimento de cada fibra e a média das 10 medidas de diâmetro, permitindo, portanto, o cálculo do volume de cada fibra de acordo com a Equação 2:

$$Volume = \frac{\pi x (0,0984)^2}{4} \times 156 = 1,1863 \text{ mm}^3$$

A densidade foi obtida dividindo a massa de cada fibra pelo seu volume (Equação 1) e calculando a média das 100 densidades, o resultado foi de, aproximadamente, $0,96 \text{ g/cm}^3$, como segue o exemplo calculado na fórmula abaixo, o que está coerente com a densidade obtida por Monteiro *et al.* (2006), $0,92 \text{ g/cm}^3$.

$$\rho = \frac{0,00115}{1,1884} = 0,00096 \text{ g/mm}^3 = 0,96 \text{ g/cm}^3 = 960 \text{ kg/m}^3$$

Apesar de ser uma técnica muito utilizada, a caracterização geométrica para determinação da densidade, no caso das fibras naturais, não possui muita precisão, pois, como explicado anteriormente, as fibras naturais não são homogêneas, ou seja, não possuem a geometria de um cilindro perfeito como mostra a Figura 45a da superfície longitudinal da fibra de Curauá. Além disso, possuem cavidades não preenchidas (Figura 45b), que por esse método não são contabilizadas, dando, portanto, uma densidade aparente.

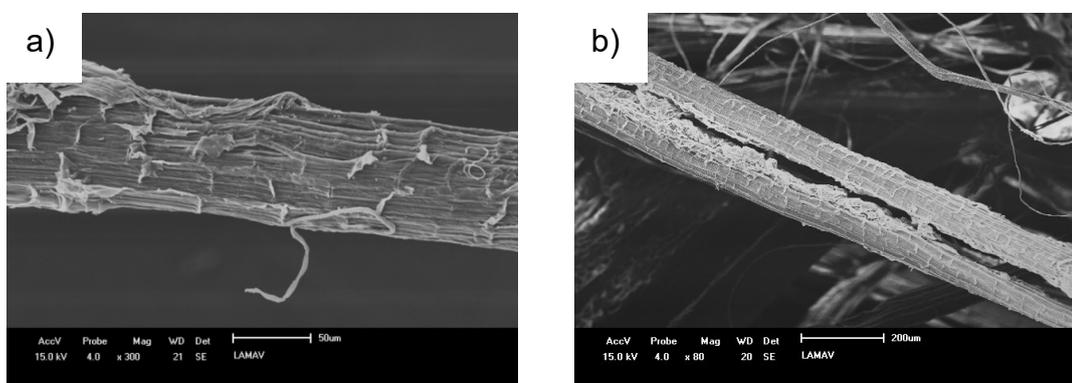


Figura 45 - (a) Micrografias obtidas por MEV para análise da superfície irregular da fibra
(b) Micrografias obtidas por MEV para análise das cavidades da fibra

6.1.2 Determinação da densidade: método picnômetro

A Tabela 11 mostra a massa das fibras submetidas a 105°C, a massa do picnômetro, a massa do picnômetro + água e a massa do picnômetro + água + fibra respectivamente, das três amostras.

Tabela 11 - Massa da fibra, m_1 , m_2 , m_3 .

Amostra	Fibra seca	Picnometro(m_1)	Picnômetro + água (m_2)	Picnômetro + água + fibra (m_3)
	G	g	g	g
1	0,601	28,065	80,333	80,503
2	0,320	37,997	86,472	86,543
3	0,553	37,869	90,678	90,835

Usando a equação 4, obtém-se o volume deslocado de cada amostra:

$$v_{f1} = \frac{[(80.333 - 28.065) - (80.503 - 28.065 - 0,601)]}{0,9962} = 0,432 \text{ cm}^3$$

$$v_{f2} = \frac{[(86.472 - 37.997) - (86.543 - 37.997 - 0.320)]}{0,9962} = 0,250 \text{ cm}^3$$

$$v_{f3} = \frac{[(90.678 - 37.869) - (90.835 - 37.869 - 0.553)]}{0,9962} = 0,397 \text{ cm}^3$$

Logo, aplicando o resultado na Equação 3, obtém-se a densidade de cada amostra:

$$\rho_{f1} = \frac{0.601}{0.432} = 1,391 \text{ g/cm}^3 = 1.391 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{f2} = \frac{0.320}{0.250} = 1,280 \text{ g/cm}^3 = 1.280 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{f3} = \frac{0.553}{0.397} = 1,393 \text{ g/cm}^3 = 1.393 \text{ kg/m}^3$$

Calculando a média da densidade, Equação 5:

$$\bar{\rho} = \frac{(1.391 + 1.280 + 1.393)}{3} = 1,355 \text{ g/cm}^3 = 1.355 \text{ kg/m}^3$$

Logo, através do método do picnômetro, o valor de densidade encontrada é de aproximadamente 1.355 kg/m^3 . Esse valor é comparável aos resultados encontrados por Da Silva (2010) que realizou ensaio de picnômetro a ar e encontrou $1,37 \text{ g/cm}^3$ ou 1.370 kg/m^3 e por De Paoli (2002), cujo valor encontrado foi de $1,4 \text{ g/cm}^3$ ou 1.400 kg/m^3 . Há uma diferença de, aproximadamente, 47% no cálculo da densidade aparente e densidade real, justificada exatamente pela heterogeneidade das fibras naturais, conforme verificado na Figura 45.

6.2 ENSAIOS MECÂNICOS

6.2.1 Tração

A Figura 46 mostra o macro aspecto dos corpos de prova após o ensaio de tração. O primeiro corpo de prova é de 0% na matriz epóxi, o segundo é de 30% de

fibras de curauá (FC) na matriz epóxi e o terceiro é de 30% de fibras de vidro (FV) na matriz epóxi.

Nesta figura, o corpo de prova com 0% tende a ser transversal ao eixo de tração, fato que indica que o mecanismo de fratura para a matriz epóxi pura está principalmente associado à propagação de fissuras transversais, que é uma característica de um material frágil.

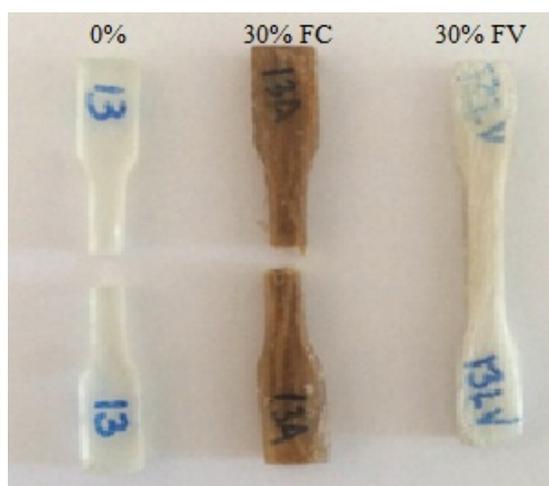


Figura 46 - Macro aspecto dos corpos de prova após ensaio de tração: 0%, 30% fibra de curauá e 30% fibra de vidro respectivamente

A Figura 47 retrata as curvas típicas do ensaio de tração vs alongamento de compósitos com fibras naturais de curauá e fibras de vidro.

É possível verificar uma mudança de comportamento entre os dois primeiros gráficos e o gráfico com o corpos de prova contendo 30% de fibra de vidro. Ou seja, no caso dos lotes com 0% e 30% FC, notou-se um comportamento frágil devido à queda abrupta da curva, não ocorrendo deformação no corpo de prova antes da sua ruptura. No caso do lote com 30% FV, o comportamento possui característica dúctil de acordo com a curva apresentada.

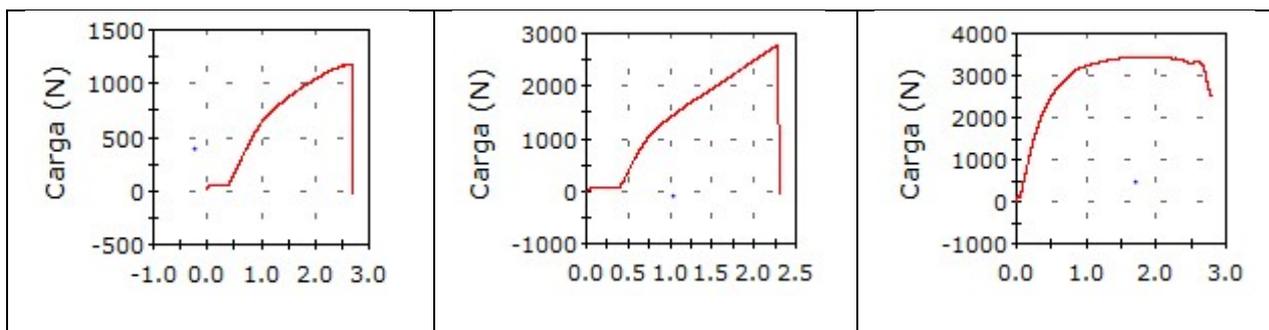


Figura 47 - Curvas típicas de ensaio de tração (carga x alongamento) de compósitos na matriz epóxi reforçados com 0%, 30% fibra de curauá e 30% fibra de vidro, respectivamente

A Figura 48 comprova através do MEV que a resina epóxi tem característica de fratura frágil, já que apresenta marcas conhecidas como "*river patterns*".

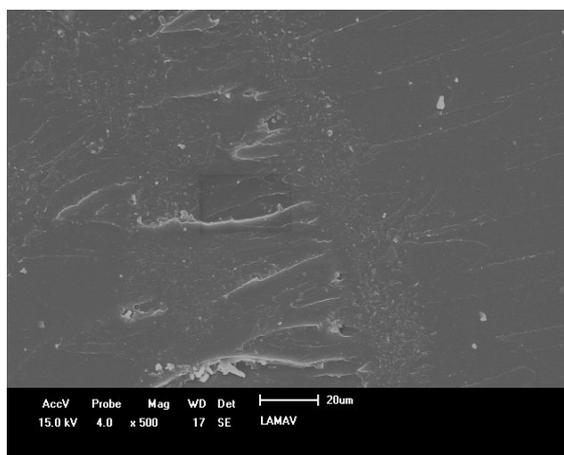


Figura 48 - Micrografias obtidas por MEV da superfície da matriz epóxi após ensaio de tração

Com a inserção de 30% de fibras de curauá há uma tendência de mudança na direção da fratura já que a fratura tende a seguir a direção da fibra, comportamento este associado com uma baixa relação de interface entre a fibra natural e a matriz epóxi. O corpo de prova com 30% de fibra de vidro não rompeu.

A Figura 49 mostra o gráfico com a média dos resultados de tensão obtidos através do ensaio de tração para as amostras com 0%, 30% de fibra de curauá e 30% de fibra de vidro, respectivamente.

Analisando o gráfico, é percebido que a tensão do corpos de prova contendo fibras aumentou consideravelmente quando comparada à dos corpos de prova com 0%.

O valor de tensão para os corpos de prova com 0% variou entre 15 MPa e 48 MPa, tendo uma média de 31 MPa. Para os corpos de prova com fração volumétrica de 30% FC, variou entre 32 MPa e 92 MPa com um valor médio de aproximadamente 61 MPa. Já para os corpos de prova com 30% FV o valor mínimo da tensão foi de 70 MPa e o máximo foi de 206 MPa, com valor médio de aproximadamente 130 MPa.

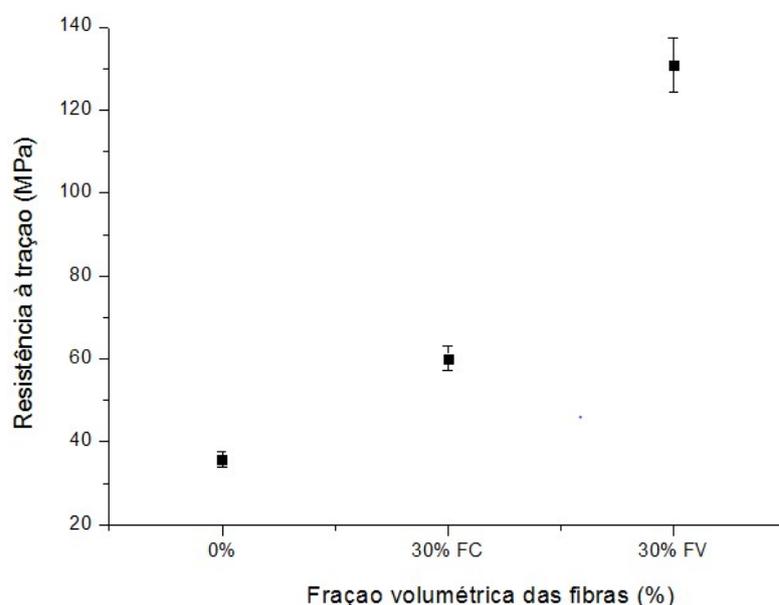


Figura 49 - Variação média de resistência à tração em função da concentração e tipo de fibra.

Já era esperado que a resistência da fibra de vidro fosse maior que a fibra natural de curauá, uma vez que, as fibras naturais são hidrofílicas e por isso têm baixa compatibilidade com a matriz que é hidrofóbica, resultando em baixa adesão interfacial fibra-matriz, impactando diretamente nos resultados das propriedades mecânicas. Além disso, as propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais variam consideravelmente dependendo da composição química e estrutural e das condições de crescimento, ou seja, intempéries, o que não acontece com as fibras de vidro já que são homogêneas (Mohanty *et al.*, 2005).

Como exemplo de tal variação, Lopes *et al.* (2011) avaliaram a média de resistência à tração e concluíram que para os corpos de prova com 0% a média foi de, aproximadamente, 55 MPa, ou seja, 44% acima do valor obtido neste trabalho e para os corpos de prova com 30% a média encontrada foi de 89 MPa, ou seja, um aumento de 31% na resistência à tração. Alguns fatores impactam diretamente sobre esses resultados, os mais importantes são: Lote da resina, características físicas e química da fibra e processo de fabricação. Nagucci (2001) afirma que a formação de vazios nos compósitos de matriz polimérica está quase sempre associada às seguintes causas: impregnação incompleta da fibra pela matriz e aprisionamento de ar entre as camadas do compósito.

Apesar de aparentemente as fibras naturais de curauá possuírem menor resistência quando comparadas com as fibras de vidro, há o fator densidade que, se levado em consideração, torna a resistência da fibra natural de curauá bastante atrativa, como pode ser visto no gráfico da Figura 50.

A tensão específica é a razão entre a tensão adquirida do material através do ensaio de tração e sua densidade. O gráfico mostra que, quando analisada a resistência do material levando em consideração sua densidade, a ordem entre o compósito de fibras naturais de curauá inverte com o compósito de fibras de vidro. Ou seja, a média de resistência para o compósito utilizando fibras de curauá aumentou em, aproximadamente, 23% em relação ao compósito utilizando fibras de vidro.

Wambua *et al.* (2003) afirmam que as propriedades mecânicas das fibras vegetais são muito mais baixas quando comparadas com as fibras de vidro. Contudo, devido à sua baixa densidade, as propriedades específicas (razão propriedade/densidade), resistência e rigidez das fibras vegetais são comparáveis aos valores das fibras de vidro.

Silva (2009), em seu trabalho, observou que há uma redução em torno de 5% na densidade dos compósitos a cada 25% de fibras de vidro substituídas por fibras de curauá e afirma que, embora os compósitos sofram uma redução em sua resistência, dependendo da aplicação, essa redução de densidade pode ser mais relevante do que a redução das propriedades mecânicas.

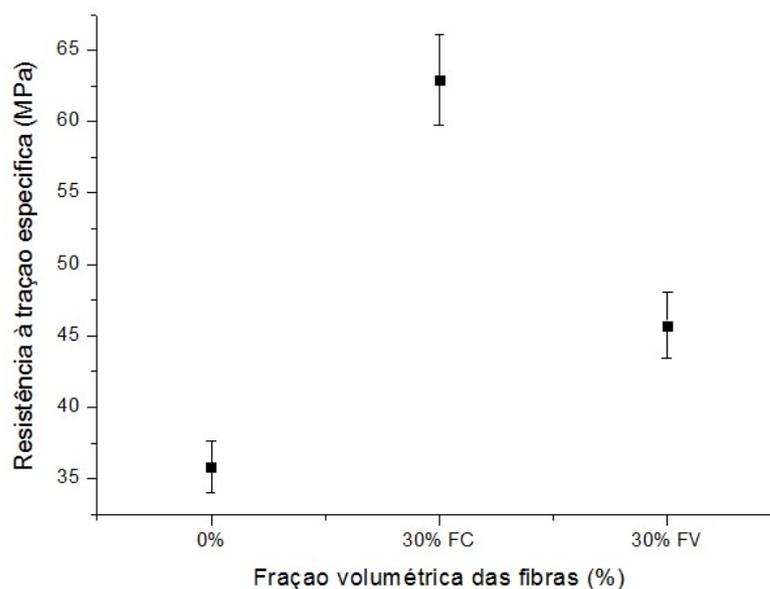


Figura 50 - Variação média de resistência específica à tração em função da concentração e tipo de fibra.

A Figura 51 mostra o MEV do compósito de fibra de curauá após o ensaio de tração, focando no contorno e aderência das fibras na matriz.

É possível identificar na figura a propagação da fratura ao redor da fibra e as marcas de "river patterns" na resina como característica frágil.

Observa-se que as fibras não aderem à resina e as fibras foram "escorregadas" da outra parte fraturada. Como foi dito anteriormente, as fibras naturais não possuem uma boa aderência com a resina, diminuindo, portanto, a máxima resistência que o material pode atingir (Plueddemann, 2016).

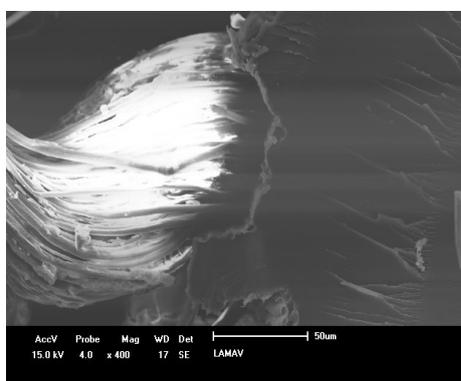


Figura 51 - Micrografias obtida por MEV da superfície de fratura do compósito reforçado com 30% em volume de fibras de curauá após ensaio de tração

6.2.1.1 Tratamento estatístico dos dados experimentais - Diagrama de Weibull para ensaio de tração

A Figura 52 apresenta o diagrama de Weibull ($\ln(\ln(1/(1 - \text{rank})))$ versus $\ln \text{TRT}$) para os lotes confeccionados a partir dos compósitos com 0%, 30% de fibra de curauá e 30% de fibra de vidro.

Foi utilizada uma linha de tendência linear a fim de se obter a equação do gráfico, essa equação tem como função calcular o valor exato do Módulo de Weibull (β) que é indicado pelo número que acompanha o parâmetro "x" e a tensão característica (θ) obtida a partir de $y = 0$.

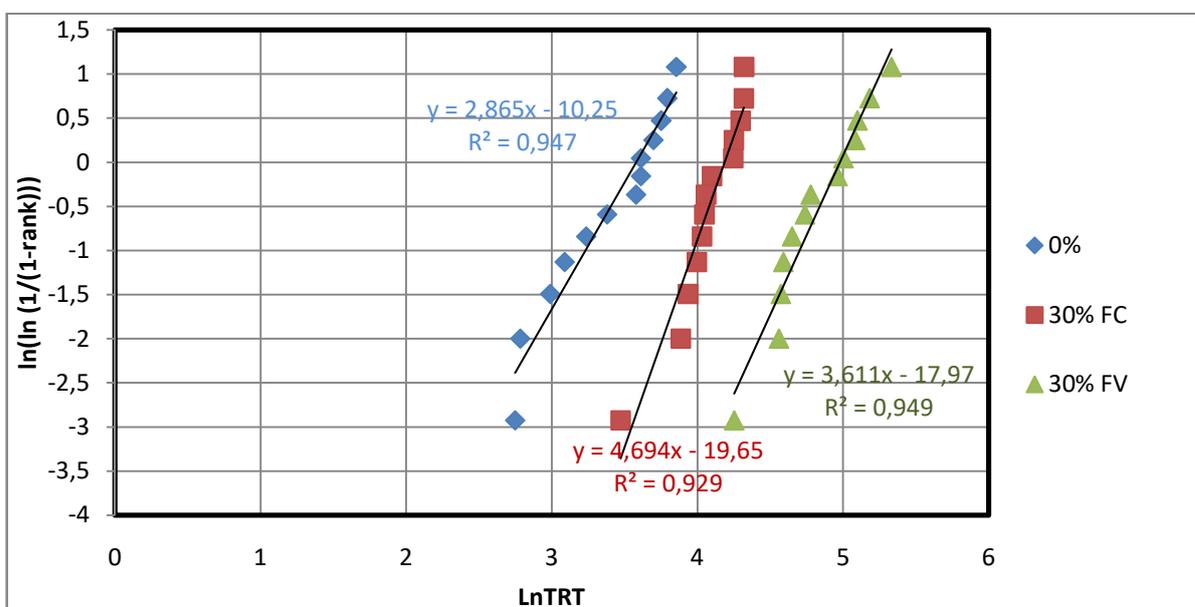


Figura 52 - Diagrama de Weibull para compósitos com 0%, 30% FC e 30% FV (ensaio tração)

Na Tabela 12 são apresentados os valores do parâmetro de Weibull (β), da tensão característica (θ) e o coeficiente de determinação para todos os lotes.

Apesar dos corpos de prova 0% não possuírem fibras e, conseqüentemente, serem mais homogêneos, foi o lote que apresentou menor valor para o módulo de Weibull, logo, maior dispersão dos valores. Talvez isso seja explicado devido ao lote da resina, o que provavelmente tenha permitido maiores concentrações de bolhas e, portanto, maior concentração de tensão e falhas. Nagucci (2001) afirma que a

formação de vazios pode ocorrer devido a liberação de vapor utilizados na formulação da matriz, ou seja, durante a etapa de aquecimento para polimerização da matriz é possível ocorrer vazios intralaminares.

O maior valor do módulo de Weibull foi para os compósitos com fibra de curauá, que apresentou um valor maior cerca de 30% quando comparado ao compósito de fibra de vidro, o que também não era esperado, já que as fibras de vidro são homogêneas, característica não encontrada nas fibras naturais. Porém, as fibras de curauá são mais maleáveis que as fibras de vidro, o que permitiu uma melhor acomodação física na matriz, preenchendo melhor os espaços vazios entre as fibras, permitindo um valor menor de dispersão.

Quanto à tensão característica, já era esperado um valor próximo à tensão média, já que esse termo determina a tensão característica de ruptura da amostra, onde 62,3% dos corpos serão rompidos até o valor de ϵ . Ou seja, é possível que em média 8 corpos de provas sejam rompidos quando a tensão atingir o valor de 35,79 MPa para o lote de 0%, 66,01 MPa para o lote de 30% de fibra de curauá e 145 MPa para o lote contendo 30% de fibra de vidro.

Se tratando do coeficiente de determinação, todos os 3 lotes deram um valor bastante satisfatório e muito parecido, ficando evidente que no máximo 7% dos corpos de provas para cada lote não podem ser explicados pelo modelo matemático apresentado.

Tabela 12 - Parâmetros de Weibull para TRT

LOTE	Parâmetro de Weibull (β)	Tensão característica (ϵ)	Coefficiente de determinação (R^2)
0%	2,86	35,79 MPa	0,95
30% FC	4,69	66,01 MPa	0,93
30% FV	3,61	145,16 MPa	0,95

6.2.2 Flexão

A Figura 53 mostra o macro aspecto dos corpos de prova após o ensaio de flexão. O primeiro corpo de prova é de 0% na matriz epóxi, o segundo é de 30% de fibras de curauá na matriz epóxi e o terceiro é de 30% de fibras de vidro na matriz epóxi.



Figura 53 - Macro Aspecto dos corpos de prova após ensaio de flexão: 0%, 30% fibra de curauá e 30% fibra de vidro respectivamente

A Figura 54 retrata as curvas típicas para o ensaio de flexão com 0%, 30% FC e 30% FV.

As curvas revelaram que as amostras apresentam deformação plástica limitada. Após uma linha reta, ocorre uma fratura súbita, indicando um comportamento frágil para a resina epóxi.

Em relação à curva contendo 30% FC é possível observar um trecho com suave inclinação característica de uma certa plasticidade. Outro fato que diz respeito a esse compósito é que não houve fratura súbita e a carga oscila em seu lento decréscimo, que segundo Ferreira *et al.* (2008), isso se deve à efetiva resistência que as fibras oferecem à propagação de trincas por meio da frágil matriz epoxídica, bem como, ocorreu com o lote de 30% FV.

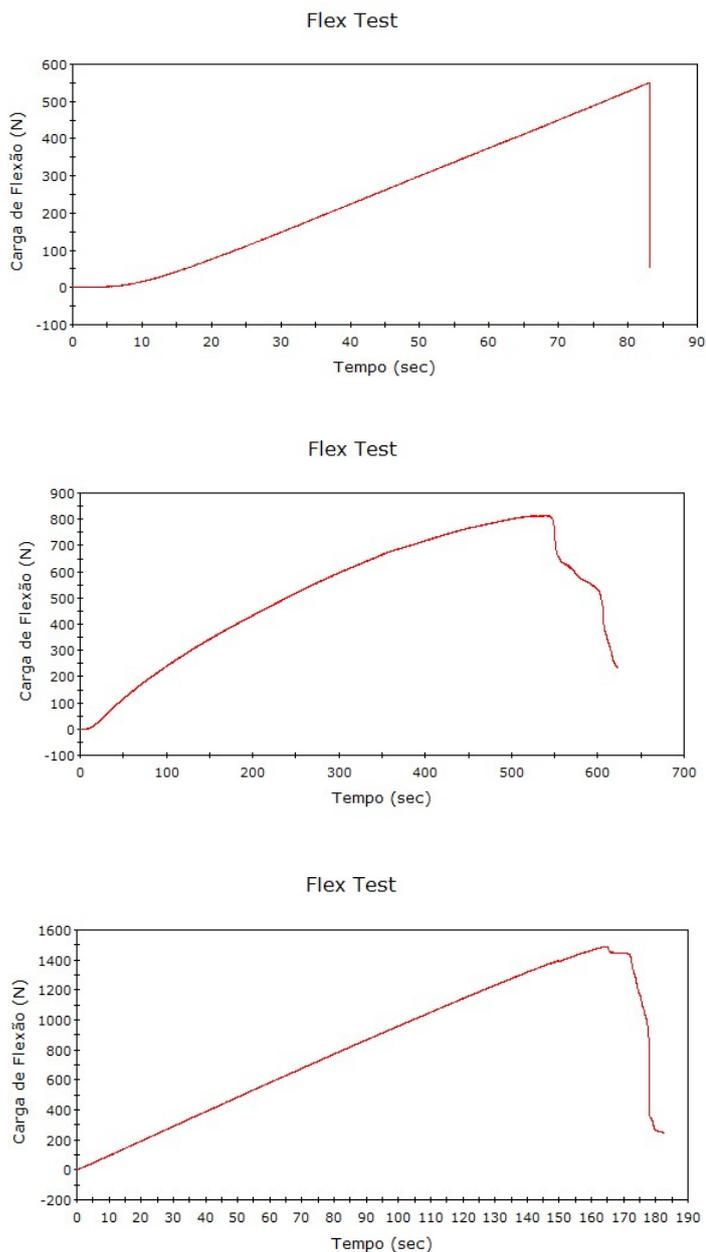


Figura 54 - Curvas típicas de ensaio de flexão (carga x tempo) de compósitos na matriz epóxi reforçados com 0%, 30% fibra de curauá e 30% fibra de vidro respectivamente

É possível, na Figura 55, analisar a superfície da fratura, através do MEV, para o corpo de prova. Conforme dito anteriormente, a resina apresenta características de fratura frágil, já que possui "*river patterns*" e as marcas propagam-se sofrendo poucos desvios pela matriz epóxi.

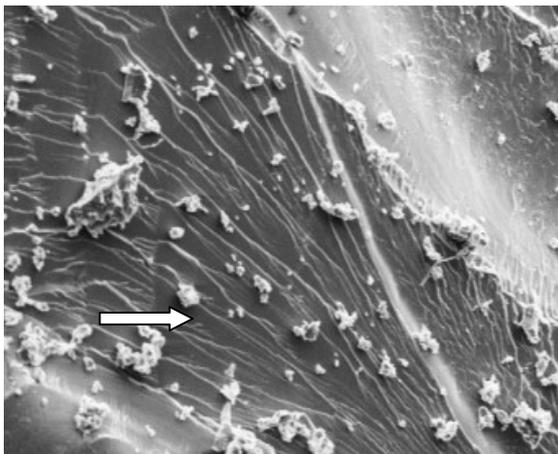


Figura 55 - Micrografias obtidas por MEV da superfície da matriz epóxi após ensaio de flexão

A Figura 56 apresenta a superfície da fratura para o compósito reforçado com 30% FC.

É importante salientar que o corpo de prova não se rompeu completamente e, portanto, a ruptura foi concluída após o ensaio. As setas em branco realçam alguns pontos, sendo assim, é possível concluir que: os buracos encontrados na matriz ocorrem devido o escorregamento da fibra, uma vez que, existe um fraca adesão fibra/matriz.

Devido ao fato das fibras escorregarem, elas não se rompem e, portanto é causado o efeito "*bridging*", ou seja, o arrancamento superficial das fibras permanece unindo as superfícies da trinca (Gomes, 2015).

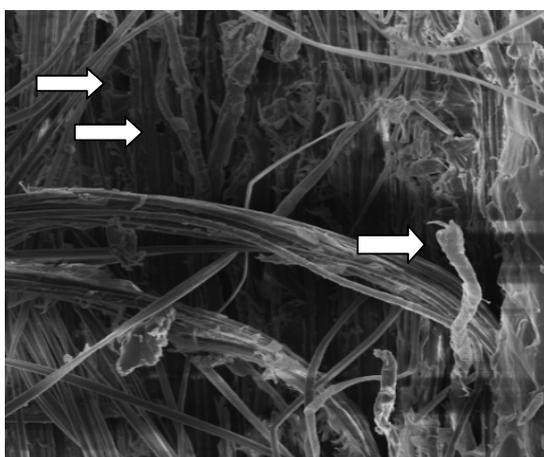


Figura 56 - Micrografias obtidas por MEV da superfície do compósito 30% FC após ensaio de flexão

Na Figura 57 é possível verificar a superfície da fratura do compósito de 30% FV.

Assim como no compósito de 30% FC, este não rompeu completamente, sendo assim, foi necessário rompê-lo ao término do ensaio. Diferente do que ocorre com o outro compósito, as fibras de vidro aderem melhor à matriz, acarretando em fratura da fibra e não escorregamento da mesma. As fibras deslizaram um pouco pela matriz e, posteriormente, romperam, significando ter havido melhor adesão na interface (Gomes, 2015).

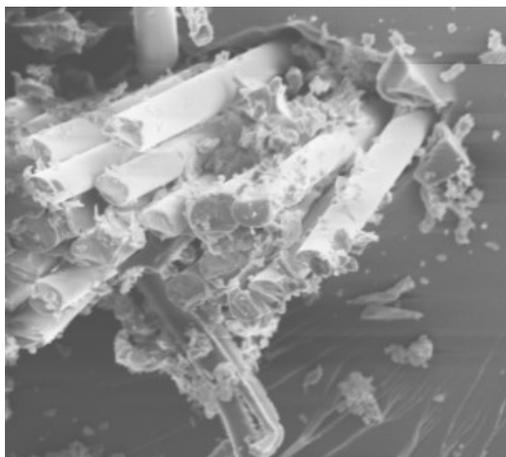


Figura 57 - Micrografias obtidas por MEV da superfície do compósito 30% FV após ensaio de flexão

A Figura 58 mostra o gráfico com os resultados de tensão média obtido através dos resultados do ensaio de flexão para as amostras com 0%, 30% FC e 30% FV, respectivamente.

Percebe-se que, a resistência à flexão da resina é baixa, contudo, a inserção de fibras aumentou significativamente a resistência. Ou seja, foi possível perceber que a resistência aumentou em mais de 100% na média dos resultados, de 30 MPa referente à resina para, aproximadamente, 70 MPa referente aos compósitos (Ferreira, 2009).

Comparando os compósitos com fibras, apesar da diferença não ser muito significativa, conforme é possível observar no gráfico, a fibra de curauá é mais resistente que a fibra de vidro. Segundo Nagucci (2001), nem sempre uma excelente adesão fibra-matriz garante uma elevada rigidez do material.

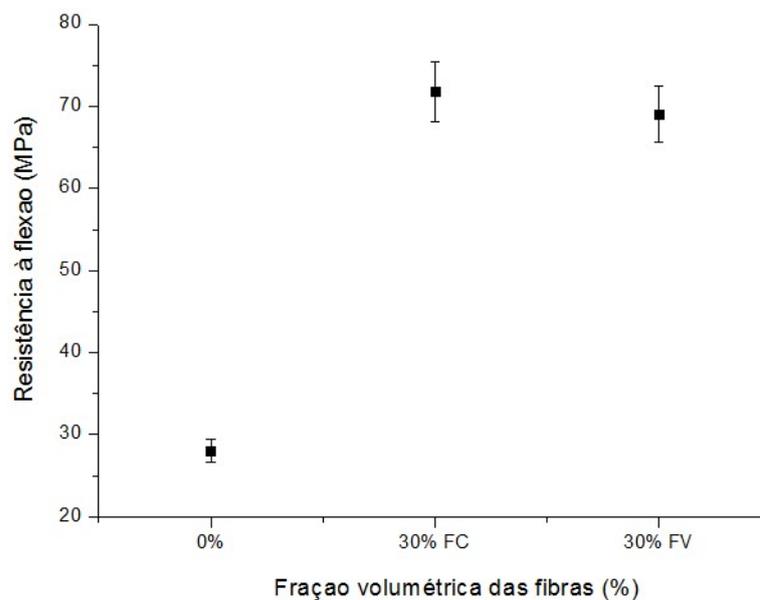


Figura 58 - Variação média de resistência à flexão em função da concentração e tipo de fibra.

A diferença entre o compósito de fibra de curauá e o compósito de fibra de vidro aumentou significativamente ao compararmos as tensões quando levando-se em consideração a densidade específica de cada material, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 59, onde é possível analisar a comparação entre a média dos resultados obtidos.

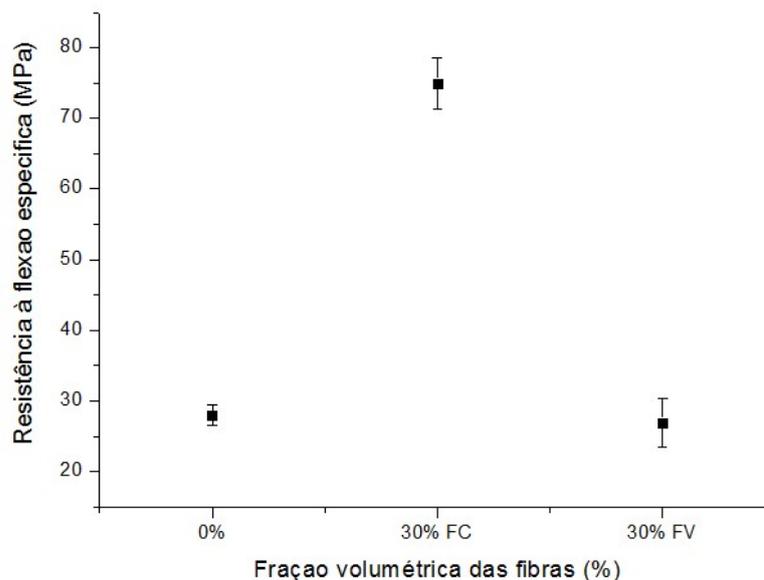


Figura 59 - Variação média de resistência específica à tração em função da concentração e tipo de fibra.

Ao analisarmos a resistência de acordo com a densidade do material, observa-se que o compósito com fibra de vidro teve um resultado semelhante à resina pura, enquanto que o compósito com fibra natural de curauá, obteve um pequeno aumento em sua resistência.

6.2.2.1 Tratamento estatístico dos dados experimentais - Diagrama de Weibull para ensaio de flexão

A Figura 60 exibe o diagrama de Weibull ($\ln(\ln(1/(1 - \text{rank})))$ versus $\ln \text{TRF}$) para os lotes confeccionados a partir dos compósitos com 0%, 30% de fibra de curauá e 30% de fibra de vidro.

Foi utilizada uma linha de tendência linear a fim de se obter a equação do gráfico, essa equação tem como função calcular o valor exato do Módulo de Weibull (β) que é indicado pelo número que acompanha o parâmetro “x” e a tensão característica (θ) obtida a partir de $y = 0$.

Em todas as situações, os pontos correspondentes à resistência à flexão apresentaram comportamento unimodal, ou seja, eles pertencem a um mesmo grupo e se relacionam através da mesma reta.

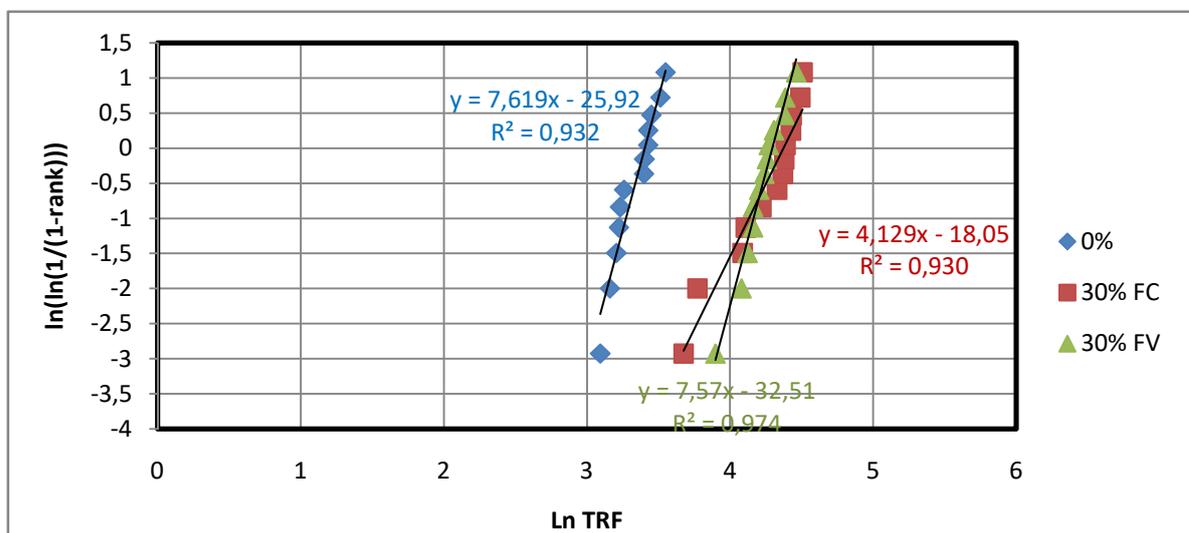


Figura 60 - Diagrama de Weibull para compósitos com 0%, 30% FC e 30% FV (ensaio flexão)

Na Tabela 13 são apresentados os valores do módulo de Weibull (β), da tensão característica (θ) e do coeficiente de determinação (R^2) para o ensaio de flexão.

É possível notar que a maior dispersão para o ensaio de flexão foi para os compósitos com fibras de curauá ($\beta = 4,13$). Nesse caso, dois motivos devem ser levados em consideração, o fato da fibra de vidro ser na realidade manta, para melhor acomodação na matriz e, conseqüentemente, tornar o compósito mais homogêneo e o fato do lote da resina possivelmente ser diferente. Para o lote de 0% e 30% FV os resultados do módulo de Weibull foram praticamente iguais, significando que a inserção de fibras de vidro na resina, não alterou a dispersão.

A tensão característica foi maior para o lote de 30% de fibra de curauá ou seja, possivelmente, 62,3% dos corpos de prova para os compósitos contendo 30% de fibras de curauá serão rompidos até a tensão atingir 79 MPa.

É possível verificar que foram obtidos excelentes ajustes, pois o R^2 se mostrou superior a 0,9 para todos os lotes.

Tabela 13 - Parâmetros de Weibull para TRF

LOTE	Parâmetro de Weibull (β)	Tensão característica (σ)	Coefficiente de determinação (R^2)
0%	7,62	30,01 MPa	0,93
30% FC	4,13	79,08 MPa	0,97
30% FV	7,57	73,30 MPa	0,93

6.2.3 Impacto

A Figura 61 apresenta o aspecto macroestrutural da ruptura por impacto Izod dos corpos de prova de compósitos epoxídicos reforçados com 30% de fibras de curauá e 30% de fibra de vidro.

Segundo Monteiro *et al.* (2008), a partir de 20% de incorporação de fibras de curauá, alguns corpos de prova não se separam totalmente após o impacto, no caso do lote com 30% não foi diferente.

O motivo pelo qual o corpo de prova não se rompe completamente ocorre porque as trincas geradas no entalhe ao impacto iniciam uma propagação transversal pela matriz polimérica, que é pouco tenaz e ao se defrontarem com as fibras de curauá, que são resistentes, essas trincas mudam a direção de propagação para um sentido longitudinal, que tende a acompanhar a interface fibra/matriz, relativamente menos resistente. Este mecanismo contribui substancialmente para aumentar a capacidade de absorção de energia deste compósito, porque ao ocorrer a delaminação, os diversos filamentos resultantes do arrancamento superficial das fibras permanecem unindo as superfícies da trinca.

O mecanismo de união das superfícies de fratura de compósitos por fibras é chamado "*bridging*" e está associado a uma elevada tenacidade do compósito por gerar maior área de fratura, o que se traduz em maior energia absorvida no impacto (Bucknall e Gilbert, 1989; Ferreira *et al.*, 2008; Yue *et al.*, 1995).

Tratando-se do compósito reforçado com 30% FV, percebe-se que o comportamento de fratura é diferente, ou seja, a falha ocorreu por um mecanismo de

tensão normal transversalmente às fibras. Isso é explicado, possivelmente, devido à natureza hidrofóbica tanto da matriz quanto da fibra, que gera uma melhor aderência e, conseqüentemente, o comportamento da fratura é diferente, ou seja, a trinca não percorre as laterais da fibra, mas devido à boa aderência entre fibra e matriz, é causado o rompimento das fibras.

De acordo com Nagucci (2001), quando a interface apresenta ótima adesão entre os elementos constituintes do compósito, observa-se uma elevada porcentagem de fibras fraturadas provocando o mínimo arrancamento destas da matriz.

Segundo Dandekar e Shin (2012), materiais compósitos com interface fraca apresentam baixa rigidez e resistência mecânica, porém, por serem mais tenazes, necessitam de altas tensões para que ocorra a fratura, já materiais com interfaces fortes são altamente rígidos e resistentes, entretanto, frágeis.



Figura 61 - Aspectos macroestruturais por impacto Izod de compósitos de matriz epoxídica reforçados com 30% FC e 30% FV

A Figura 62 ilustra a micrografia da superfície da fibra após fratura por impacto Izod de um corpo de prova epoxídico com 30% de FC e a propagação da fratura ao redor da fibra. Na Figura 64(a) é possível afirmar que nem todas as fibrilas foram rompidas, conforme é mostrado através da seta.

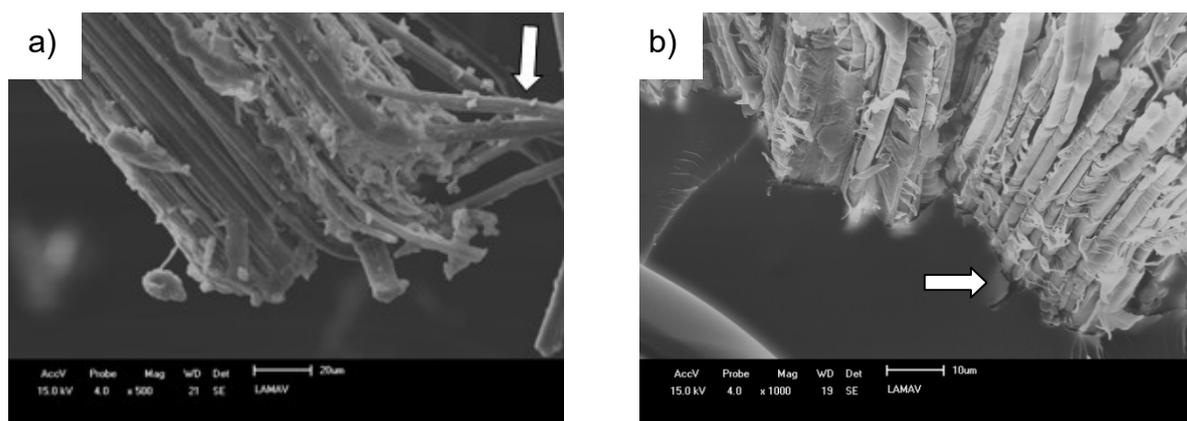


Figura 62 - (a) Micrografias obtida por MEV da superfície da fibra de curauá após ensaio de flexão (b) Micrografias obtida por MEV da superfície da fratura após ensaio de impacto para compósito reforçado com 30% FC

Na Figura 62(b) é possível perceber que ocorreu propagação da trinca pela interface entre fibra e matriz. Ambos mecanismos apresentados, a fibra não romper completamente e o fato da trinca propagar ao redor da fibra devido à fraca aderência e resistência interfacial, corroboram para justificar a alta energia absorvida no impacto.

A Figura 63 retrata a fibra de vidro após ensaio de impacto. Nota-se a diferença entre as fibras de curauá, que por serem naturais, não possuem homogeneidade em sua geometria, enquanto que a fibras de vidro possuem sua superfície lisa e cilíndrica (Silva, 2010).

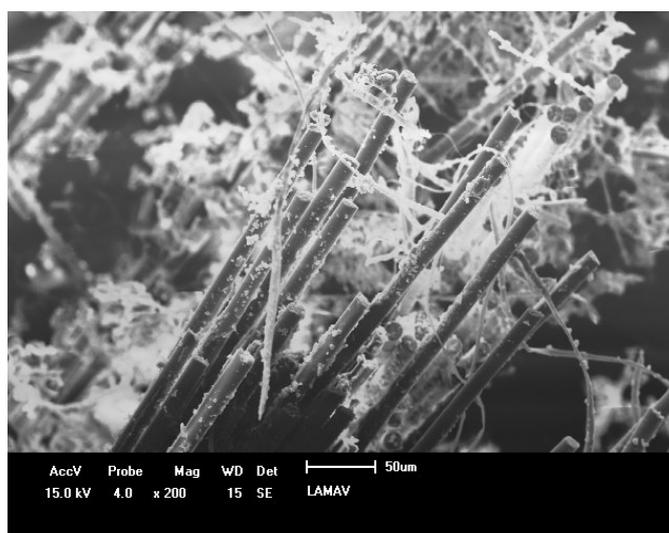


Figura 63 - Micrografias obtida por MEV da superfície da fratura após ensaio de flexão para compósito 30% FV

Apesar da aderência das FV ser maior, o fato das fibras naturais possuírem tais irregularidades, é um fator positivo, pois, há o ancoramento mecânico da resina e, portanto, uma certa adesão fibra/matriz.

A Figura 64 apresenta a variação da energia de impacto dos corpos de prova com 0% e dos compósitos com a fração de 30% FC e 30% FV em peso. Neste frático, nota-se que os valores de energia aumentaram com a inserção de FC e FV. O desvio padrão também aumenta com a incorporação da fibra. Esta imprecisão nos valores é reconhecida como uma característica da heterogeneidade própria das fibras lignocelulósicas (Monteiro *et al*, 2009).

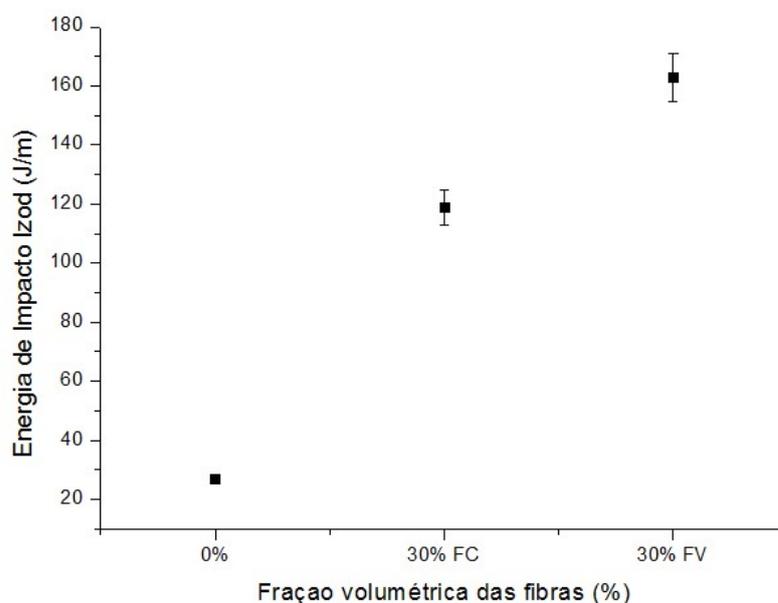


Figura 64 - Variação média de energia de impacto Izod em função da concentração e tipo de fibra

O lote com 0% resulta em um valor médio de, aproximadamente, 30 J/m. Ferreira (2009) realizou o mesmo ensaio e encontrou o valor de, aproximadamente, 20 J/m, valor este que depende de vários fatores, como exemplo, modo de processamento do compósito e lote da resina.

Foi possível perceber que para os compósitos, a resistência ao impacto aumentou 4x para o lote com 30% FC e, em torno de, 5x para o lote com 30% FV.

Na Figura 65 é possível observar o comportamento do ensaio de impacto Izod levando-se em consideração a densidade dos materiais, ou seja, o gráfico reflete os resultados de energia específica de impacto. Nota-se que a resistência do compósito contendo 30% FC permaneceu praticamente a mesma, contudo, o resultado da resistência para o compósito contendo 30% FV diminuiu de maneira drástica, para o valor de, aproximadamente, 60 J/m.

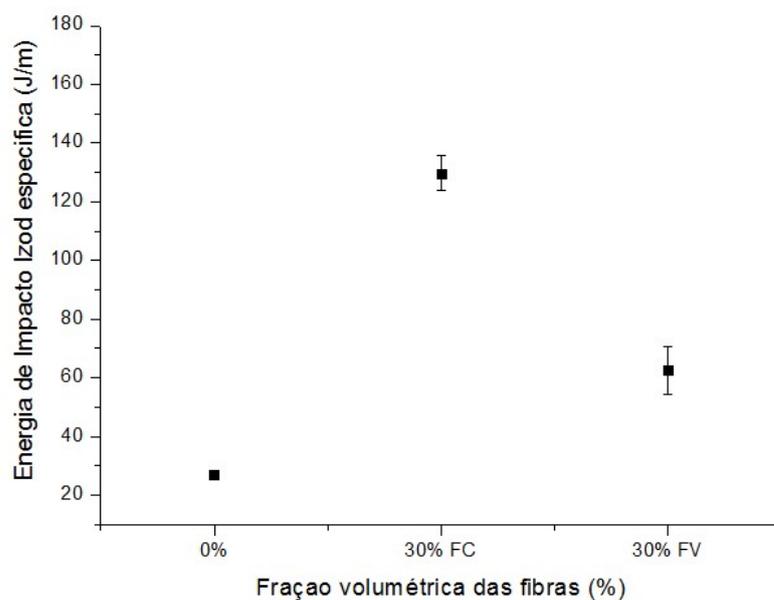


Figura 65 - Variação média de energia de impacto Izod específica em função da concentração e tipo de fibra

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho de avaliação das propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras naturais de curauá e reforçados com fibras sintéticas de vidro, foi possível concluir que:

- A análise da caracterização das fibras de curauá para determinar a densidade resultou em valores próximos ao encontrado na literatura. Além disso, o resultado obtido através do ensaio com picnômetro e do MEV reforçou a afirmativa de que a fibra realmente possui vazios, falhas e porosidades.
- A técnica utilizada para confecção dos compósitos influencia nos resultados obtidos, uma vez que, as fibras longas de curauá quando inseridas na matriz epoxídica, não se acomodam de maneira homogênea, sendo assim, deixam espaços vazios ou com menor concentração de fibras, o que ocasiona pontos mais frágeis e concentradores de tensão, diminuindo a resistência do compósito de uma maneira geral;
- De maneira macroscópica, os corpos de prova 0% e 30% FC apresentam características de materiais frágeis, porém, o corpo de prova reforçado com 30% FV não foi rompido, apresentando, portanto, características de um material dúctil. Quanto aos resultados de resistência à tração, a fibra de curauá possui uma menor resistência. Porém, ao analisarmos a fibra levando em consideração sua densidade, conclui-se que a resistência específica à tração é superior para as fibras de curauá quando comparadas com as fibras de vidro;
- Para o ensaio de flexão, houve um comportamento diferente para o corpo de prova de 0% em relação aos compósitos. A curva obtida pela máquina Instron revelou que a resina epóxi apresenta característica de material frágil, contudo, para os lotes contendo 30% de ambas as fibras, os comportamentos foram semelhantes, apresentaram uma certa plasticidade. As fibras de curauá apresentaram um resultado melhor em relação à resistência. Se tratando da resistência específica à

flexão, conclui-se que as fibras de curauá apresentam uma resistência muito superior às fibras de vidro;

➤ Para o ensaio de impacto Izod, a resina apresentou uma fratura frágil, o compósito com 30% FC apresentou uma alta energia de absorção ao impacto devido ao comportamento "*bridging*" e o compósito reforçado com 30% FV apresentou o mesmo comportamento do compósito com fibras naturais. Através da macro estrutura foi possível perceber que os compósitos não romperam, justificando o efeito comentado anteriormente. A energia ao impacto Izod foi maior para o compósito com 30% FV, contudo, como aconteceu com os demais ensaios, ao analisarmos a energia de impacto específica, a fibra de curauá se torna mais atraente por apresentar maior energia de impacto;

➤ A comparação da resistência mecânica com a resistência específica é importante para ressaltar que, apesar da maioria dos ensaios apresentarem valores superiores para o compósitos com fibras de vidro, as fibras de curauá se tornam bastante atraentes quando levando-se em consideração sua densidade, o que torna o material mais leve e traz, dessa forma, uma série de benefícios, principalmente para a indústria automotiva.

➤ A análise estatística utilizando o módulo de Weibull foi um aliado importante para verificar a confiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos. Para todos os ensaios que foram empregados a estatística de Weibull, obteve-se valores satisfatórios para parâmetros de Weibull, apenas para o lote 0% no ensaio de tração foi obtido um valor inferior a 3, porém, muito próximo desse valor. No que diz respeito ao coeficiente de determinação (R^2), para todos os lotes obtiveram-se um valores superiores a 0,9. Em todas as situações, os pontos correspondentes apresentaram comportamento unimodal.

➤ De uma maneira geral, foi possível constatar que a fibra de curauá possui resistência suficiente para ser utilizada em determinadas situações, substituindo as fibras de vidro, colaborando, principalmente, com aspectos ambientais, sociais e econômicos.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho de dissertação foi dedicado ao estudo das propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras naturais de curauá e fibras sintéticas de vidro. Para dar continuidade à pesquisa deste trabalho, pode-se sugerir:

- Para maior precisão, determinar a densidade da fibra de curauá através da picnometria a ar (hélio);
- Modificar o processamento dos compósitos, uma vez que, o atual processamento gera falhas que impactam diretamente na resistência do material;
- Obter fibras de curauá de regiões e/ou estados distintos e analisar através de difração de Raios-X (DRX), Espectrometria por dispersão de Raios-X (EDS), determinação de celulose, entre outros métodos, a variação de composição química e como essas interferem nas propriedades mecânicas;
- Confeccionar e ensaiar corpos de provas de compósitos feitos com a densidade real, determinada através do picnômetro;
- Confeccionar e ensaiar corpos de prova de compósitos reforçados com fibras de curauá e fibras de vidro com outra resina e comparar os resultados com a matriz epóxi;
- Confeccionar e ensaiar corpos de prova de compósitos reforçados com manta de curauá e manta de vidro na matriz epóxi;
- Confeccionar e ensaiar corpos de prova de compósitos híbridos com fibras de curauá e fibras de vidro;
- Tratar superficialmente as fibras de curauá com métodos de merceirização ou outros métodos a fim de melhorar a interface fibra/matriz;

- Utilizar outros métodos estatísticos para avaliar a confiabilidade dos ensaios realizados;

- Realizar pesquisa de viabilidade econômica para compósitos reforçados com fibras naturais de curauá e para compósitos reforçados com fibras sintéticas de vidro e comparar os resultados a fim de se conhecer, além da vantagens qualitativas, a real vantagem econômica da fibras de curauá em substituição às fibras de vidro.

REFERÊNCIAS

Allen, S. M.; Thomas, E. L. (1999). *The structure of materials*. John Wiley & Sons.

Arruda, C.; Salum, F.; Rennó, L. (2012) Caso de Inovação, Fiat automóveis - Estratégia de Inovação. *Fundação Dom Cabral*.

Ashen, M. (1970) Changing the social Contract: a role for business. *Journal of World Business*. Columbia, v.5, p. 6-10.

Asim, M.; Abdan, K.; Jawaid, M.; Nasir, M.; Dashtizadeh, Z.; Ishak, M. R.; Enamul, M. H. (2015) A Review on Pineapple Leaves Fibre and Its Composites. Hindawi *Publishing Corporation International Journal of Polymer Science*. ID 950567.

ASTM D638M - American Society for Testing and Materials. (1998) Standard Method For Tensile Properties of Plastics.

ASTM D790 - American Society for Testing and Materials. (1998) Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.

ASTM D6110 - American Society for Testing and Materials. (1998) Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics.

ASTM D256 - American Society for Testing and Materials. (1998) Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics.

Atta, T. Difference between Izod and Charpy test | *Green Mechanic*. Disponível em: <<http://www.green-mechanic.com/2014/04/difference-between-izod-and-charpy.html>> Acesso em: 3 out. 2015.

Balasubramanian, M. (2013) Composite materials and processing. [s.l.]: CRC Press.

Bai, J. (2013) Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) *Composites for Structural Applications*. [s.l.]: Elsevier.

Batisttele, R. A.G; Renofio, A. (2005) *Matrizes tradicionais e matrizes alternativas: os materiais compósitos*. Apresentação power point - 5ª aula, parte 2. Disponível em: http://wwwp.feb.unesp.br/renofio/producao%20limpa/Matrizes%20Trad%20e%20Alternativas_Mat%20Compositos_Parte%202a.pdf. Acesso em: 09 de Dezembro de 2015.

Becker, J.L. (2015) Estatística Básica: Transformando Dados em Informação. [s.l.]: Bookman Editora.

Beltrami, L.V.R., Bandeira, J.A.V., Scienza, L.C., Zattera, A.J. 2014. Biodegradable composites: morphological, chemical, thermal and mechanical properties of composites of poly (hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) with curauá fibers after exposure to simulated soil. *Applied Polymer Science*, 2014, Vol. 131

Besednjak, A. (2009) Materiales Compuestos. [s.l.]: Univ. Politèc. de Catalunya.

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2009). *Elementos de máquinas de Shigley*. AMGH Editora

Bucknall, C. B.; Gilbert, A. H. (1989) *Polymer*, vol.30, p. 213.

Callister, W. D. (2000) Materials Science and Engineering. *Student Solutions Manual: An Introduction*. [s.l.]: Wiley.

Cantwell, W. J.; Morton, J. (1997) The impact resistance of composites materials – *Review Composites*. Vol 22, n.5.

Caraschi, J. C.; Leão, A. L. (2000) Characterization of curaua fiber. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 353, 149-152 p.

Carneiro, L. A. V.; Teixeira, A. M. A. J. (2008) Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção. *Revista Tecnologia*.

Carvalho, E. A. (2007) *Avaliação da influência do fator de localização e rank mediano no valor do Módulo de Weibull em materiais frágeis*. Anais: 62º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Vitória/ES. p. 1175-1185.

Casari, A.; Gomeas, E. R.; Soares, M. R.; Fredel, M. C.; Al-Qureshi H. A. (2007) Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas. *Revista Matéria*, v.12, n. 2, p. 408 - 419.

Cerqueira, H. G. C.; Alves, B. M. R. Compósitos de Kevlar: Métodos de processamento de compósitos na indústria aeronáutica e aeroespacial. Processamento do Kevlar. Disponível em: <<http://compositoskevlar.blogspot.com.br/2006/12/mtdos-de-processamento-de-compitos-na.html>>. Acesso em: 5 out. 2015.

Choi, P.; Rudin, A. (2015) *Ciência e Engenharia de Polímeros*. 3. Ed. - Rio de Janeiro: Elsevier Brasil.

Ciegis, R.; Ramanauskiene, J.; Martinkus, B. (2015) The concept of sustainable development and its use for sustainability scenarios. *Engineering Economics*, v. 62, n. 2.

Crawford, R.J. (1998) *Plastics Engineering*. 3º ed New York : Butterworth Heinemann.

Cunha, J. M. M. C., Andrade, J. E.P., Correa, A. R., Silva. (2001) Pólo de Tecelagem Plana de Fibras Artificiais e Sintéticas da Região de Americana. *Área de Operações Industriais*.

Cutler, D. F.; Botha, T.; Stevenson, D. W. (2009) *Anatomia Vegetal: Uma Abordagem Aplicada*. [s.l.]: Artmed Editora.

Curáua - CEAPAC. Disponível em: <<http://www.ceapac.org.br/exibir-destaque.php?id=8>>. Acesso em: 1 set. 2015.

Dalcin, G. B. (2007) Ensaio dos materiais. *Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões*.

DANDEKAR, C. R., e SHIN, Y. C. (2012). Modeling of machining of composite materials: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 102-121.

De, S. K.; White, J. R. (1996) *Short Fibre-Polymer Composites*. Woodhead, Publishing Limited England.

De Castro, L. A. S. (2002) Processamento de amostras para microscopia eletrônica de varredura. *Embrapa. Centro de Pesquisa Agropecuária de Clima Temperado*.

Dedavid, B. A.; Gomes, C. I.; Machado, G. (2007) Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. *EdiPUCRS*.

De Paoli, M. A. (2002) Substituição de Fibra de Vidro por Fibras Vegetais, in: 6º Seminário das Comissões Técnicas da ABPol.

Dirikolu, M.; Aktas, A. (2001) *Statistical Analysis of Fracture Strength of Composite Materials Using Weibull Distribution Kirikkale University*. Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, Kirikkale, Turkey.

Dodson, B. (2006) *The Weibull Analysis Handbook*. 2.ed. ASQ Quality Press. Milwaukee, Wisconsin.

Donaire, D. (1994). Considerações sobre a influência da variável ambiental na empresa. *Revista de Administração de Empresas*, v. 34, n. 2, p. 68-77.

Dos Santos, A. M. (2006) *Estudo de compósitos híbridos polipropileno/fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Curitiba - Paraná, Universidade Federal do Paraná.

Esmeraldo, M. A. (2006) *Preparação de novos compósitos suportados em matriz de fibra vegetal/natural*. Dissertação (Mestrado em Química Inorgânica) Universidade Federal do Ceará, 119p.

Faruk, O.; Fink, H. P.; Sain, M. (2012). Biocomposites Reinforced with Natural Fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*.

Ferreira, A. da S. (2009) *Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras longas de curauá*. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) Campos - RJ. Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 190p.

Ferreira, J.F.; Sbruzzi, D.; Barros, K.V.G.; Machado, I. S.; Tambourgi, E.B. (2010) Extração e Caracterização de uma Enzima Proteolítica do Curauá (*Ananas erectifolius*). Artigo Científico, *Exacta*, v 8, n. 2, p. 179 –184, São Paulo.

Gall, R.J., Greenspan, F.P. (1995) *Ind.Eng.Chem.*, vol 47, 147 p.

Gay, D. (2003) *Composite Materials - Design and Applications*. Boca Raton, FL: CRC Press LLC, ISBN: 978-1587160844.

Hashmi, S. *Comprehensive Materials Finishing*. Elsevier, 2016. 1463 p.

Hyer, M. W. (2009) *Stress Analysis of Fiber-reinforced Composite Materials*. [s.l.]: DEStech Publications, Inc.

Hongu, T.; Phillips, G. O. (1997) *New Fibers*. 2ª ed. [s.l.]: Elsevier.

Humphreys, F. J.; Goodhew, P. J. (1988) *Electron Microscopy Analysis*. Taylor & Francis, London.

Jamrichova, Z.; Akova, E. (2013) Mechanical Testing of Natural Fibre Composites for Automotive Industry. *University Review*, v. 7, n. 3, p. 20–25.

Joshi, S. V.; Drzal, L. T.; Mohanty, A. K.; Arora, S. (2004) *Composites: Part A*, 35, p.371.

Kelley SS, Rowell RM, Davis M, Jurich CK, Ibach R. Rapid analysis of the chemical composition of agricultural fibers using near infrared spectroscopy and pyrolysis molecular beam mass spectrometry. *Biomass Bioenergy*, 2004; 27) 77–88.

Kemerich, P. D. da C.; Piovesan, M.; Bertoletti, L. L.; Altmeyer, S.; Hohmvpapgel, T. (2013) Fibras de vidro: caracterização, disposição final e impactos ambientais gerados. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 10, n. 10, p. 2112–2121.

Kiperstok, A. (2000). *Tendências ambientais do setor automotivo: prevenção da poluição e oportunidades de negócio*. Revista NEXOS. Mestrado em Economia. Salvador - Bahia, Universidade Federal da Bahia - UFBA.

Ledo, I. A. M. (1967) O cultivo do Curauá no Lago Grande da Franca. *Banco de Crédito da Amazônia S/A*, p.24.

Lee, H., Neville, K. (1967) *Handbook of Epoxy Resins*. McGraw-Hill. New York.

Lopes, F. P. D. (2011) *Estudos adicionais dos compósitos poliméricos reforçados por fibras de curauá*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 92p.

May, Clayton. (1987) *Epoxy Resins: Chemistry and Technology*. Second Edition,. [s.l.]: CRC Press.

Marinucci, G. (2001) *Desenvolvimento, fabricação e análise de falha e fratura de cilindros de fibra de carbono colapsados por pressão interna*. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - São Paulo - SP, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, 171p.

Matthews, F. L.; Rawlings, R. D. (1994) *Composite Materials: engineering and science*. Great Britain. Chapman & Hall. UK.

Matheus, M. A. (2002) *Fibra de vidro*. [s.l.]: livrostecnicos.com.

Medina, J. C. (1959) Plantas Fibrosas da Flora Mundial. *Instituto Agronômico de Campinas*, p. 787-792.

Misra, M.; Pandey, J. K.; Mohanty, Amar. (2015) *Biocomposites: Design and Mechanical Performance*. [s.l.]: Woodhead Publishing.

Mohanty, A. K.; Misra, M.; Drzal, L. T. (2005) *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. [s.l.]: CRC Press.

Montardo, J. P. (2010) Boletim Técnico ANAPRE. Disponível em:
<http://www.anapre.org.br/Boletim_tecnico/edicao28.asp>. Acesso em: 9 nov. 2015.

Monteiro, S.N.; Ferreira, A.S.; Lopes, F.P.D. (2008) A Comparative Study of Curauá Waste Fibers Reinforced Epoxy Matrix Composites as Building Material. Symposium *REWAS: Characterization of Minerals, Metals, and Materials*. P.20-30.CANCUM.

Monteiro, S. N.; Lopes, F. P. D.; Ferreira, A. S.; Nascimento, D. C. O. (2009) Natural-fiber polymer-matrix composites: Cheaper, tougher, and environmentally friendly. *JOM*, v. 61, n. 1, p. 17–22.

- Monteiro, S. N.; Aquino, R. C.M. P.; Lopes, F. P. D; Carvalho, E. A.; D'almeida, J. R. M. (2006) Mechanical behavior and structural characteristics of polymeric composites reinforced with continuous and aligned curauá fibers. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 11, n. 3, p. 197–203.
- Mothé, C. G.; Araújo, C. R. (2004) Caracterização Térmica e Mecânica de Compósitos de Poliuretano com Fibras de Curauá. *Polímeros Ciência e Tecnologia*, vol. 14, n. 4, p. 274-278.
- Nabi, S. D.; Jog, J. P. (1999) Natural Fiber Polymer Composites: A Review. *Advances in Polymer Technology* , Vol 18, No 4, p. 351-363.
- Nagatani, T.; Saito, S.; Sato, M.; Yamada, M. (1987) *Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-less system*. Scanning Microscopy . v.11.
- Neto, F. L.; Pardini, L. C. (2006) *Compósitos estruturais: ciência e tecnologia*. [s.l.]: Edgard Blücher.
- Nisbett, R.G.; Budynas J. K. (2009) *Elementos de máquinas de Shigley*. 8. ed. New York: AMGH Editora, 1086p.
- Nishitsuji, D. A. (2008) Desenvolvimento de matrizes epoxídicas e estudo dos parâmetros de cura por feixe de elétrons para fabricação de compósitos poliméricos. *Universidade de São Paulo*. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-26082009-141134/>>. Acesso em: 30 set. 2015.
- Norton, R. L. (2013) *Projeto de Máquinas*. 4ed. [s.l.]: Bookman Editora.
- Omrani E, Menezes PL, Rohatgi PK. State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. junho de 2016;19(2):717–36.

- Ota, W. N. (2004) *Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro* utilizados pela indústria automotiva nacional. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná - PR, 104p.
- Paiva, J. M. F.; Trindade, W.G. (1999) *Polímeros ciência e tecnologia*. 4, 170-176.
- Padilha, A. F. (1997) *Materiais de engenharia*. Hemus.
- Pinto, K. N. C. (2002) *Reciclagem de resíduos de materiais compósitos de matriz polimérica: Poliéster insaturado reforçado com fibras de vidro*. Dissertação (Mestrado em Ciências). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo - SP, 81p.
- Pires, J. S. C. (2009) *FIBRAS NATURAIS: Características químicas e potenciais aplicações*. Trabalho de Conclusão de Curso - Botucatu - SP, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 60p.
- Pukansky, B. (2005) *European Polymer Journal*, 41, p.645.
- Plueddemann, E. P. (2016) *Interfaces in Polymer Matrix Composites: Composite Materials*. Elsevier. 317 p.
- Rana S, Fanguero R. (2016) *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering: Processing, Properties and Applications*. Woodhead Publishing; 498 p.
- Saheb, D. N.; Jog, J. P. (1999) Natural fiber polymer composites: a review. *Advances in polymer technology*, v. 18, n. 4, p. 351-363.
- Salit, Mohd Sapuan. (2014) *Tropical Natural Fibre Composites: Properties, Manufacture and Applications*. [s.l.]: Springer.
- Sanches, C. S. (2000) Gestão ambiental proativa. *Revista de Administração de Empresas*, v. 40, n. 1.

Santos, A.M. (2006) *Estudo de compósitos híbridos polipropileno/fibras de vidro e coco para aplicações na engenharia*. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) - Curitiba - Paraná, Universidade Federal do Paraná. 90p.

Santos, P. A.; Spinacé, M. A. S.; Fermoselli, K. K. G.; Paoli, M. A. De. (2009) Efeito da Forma de Processamento e do Tratamento da Fibra de Curauá nas Propriedades de Compósitos com Poliamida-6. *Polímeros: Ciência e tecnologia*, v. 19, n. 1, p. 31-39.

Schmid, S. R. (2002) *Manufactura, ingeniería y tecnología*. [s.l.]: Pearson Educación.

Shalwan A, Yousif B.F. (2013) *In State of Art: Mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres*. *Materials & Design*. 48:14–24.

Silva, H. S. P. (2010) *Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras de Curauá e Híbridos com Fibras de Vidro*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) Porto Alegre - RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRS, 86p.

Smith, W. F.; Hashemi, J. (2013) *Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais*. [s.l.]: McGraw Hill Brasil.

Sobrinho, L. L. (2009) *Desenvolvimento de tubos compósitos para possíveis aplicações como risers*. Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Suddell, B. C.; Evans, W. J.; Isaac, D. H.; Crosky, A. (2002) A survey into the application of natural fiber composites in the automotive industry. *Natural Polymers and Composites*, v. 4, p. 455-460.

Szabó, J. S.; Czigány, T. (2003) Static fracture and failure behaviour of aligned continuous mineral fiber reinforced polypropylene composites. *Elsevier Science*. Hungary.

Takahashi, R.; Pereira, L. C. O.; Oliveira, D. R. C.; Fujijama, R. T. (2011) *Fabricação de mantas de fibras de sisal e de curauá para fabricação de material compósito*. Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. Blumenau - SC: FURB.

Trindade, W. G.; Hoareau, W; Megiatto, J. D.; Razera, I. A. T.; Castellan, A.; Frollini, E. (2005) phenolic matrices reinforced with unmodified and surface-grafted furfuryl alcohol sugar cane bagasse and curaua fibers: properties of fibers and composites. *Biomacromolecules*, v. 6, n. 5, p. 2485–2496.

Thomas, S.; Joseph, K.; Malhotra, S.K.; Goda, Koichi; Sreekala, M.S. (2013) Polymer Composites. *Biocomposites*. [s.l.]: John Wiley & Sons.

Ventura, A. M. F. M. (2009) Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, v. 21, n. 3-4, p. 10–19

Wambua, P.; Ivens, I.; Verpoest, I. (2003) Natural fibers: can they replace glass and fibre reinforced plastics?" *Composites Science and Technology*. v. 63, p. 1259-1264.

Yue, C.Y.; Looi, H.C; Quek, M.Y. (1995). Assessment of fibre-matrix adhesion and interfacial properties using the pullout test. *Int. J. Adhesion and Adhesives*, v.15, p. 73-80.

Zafeiropoulos, N. E. (2011) *Interface Engineering of Natural Fibre Composites for Maximum Performance*. [s.l.]: Elsevier.

Zah, R.; Hischier, R.; Leão, A. L.; Braun I. (2007) Curauá fibers in the automobile industry – a sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*. v. 15, n. 11-12, p. 1032–1040.