

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE COMPÓSITOS UNIDIRECIONAIS DE POLIÉSTER
COM FIBRAS DE VIDRO OU DE CURAUÁ**

FELIPE HÖRLLE DE OLIVEIRA

Engenheiro de Materiais

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2015

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE COMPÓSITOS UNIDIRECIONAIS DE POLIÉSTER
COM FIBRAS DE VIDRO OU DE CURAUÁ**

FELIPE HÖRLLE DE OLIVEIRA

Engenheiro de Materiais

Trabalho realizado no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Porto Alegre

2015

FELIPE HÖRLLE DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE COMPÓSITOS UNIDIRECIONAIS DE POLIÉSTER
COM FIBRAS DE VIDRO OU DE CURAUÁ**

COMISSÃO JULGADORA

Dissertação para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA

Orientador: Prof. Dr. Sandro Campos Amico

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Sandra Maria da Luz (UnB)

Dr.^a Cristiane Miotto Becker (SENAI/RS)

Prof.^a Dr.^a Branca Freitas de Oliveira (PgDesign / UFRGS)

*“Não importa o que seja, não há nada que não possa ser feito.
Se existe determinação, podemos mover o céu e a terra de acordo com nossos desejos”*

Yamamoto Tsunetomo

TRABALHOS PUBLICADOS

OLIVEIRA, F. H.; AMICO, S. C.; HELFER, A. L.; AMICO, S. C. Mechanical behavior of unidirectional curaua fiber and glass fiber composites. **Macromolecular Symposia**, v. 319, n. 1, p. 83-92, 2012.

OLIVEIRA, F. H.; AMICO, S. C.; HELFER, A. L.; GARAY, A. C. Influência do teor de fibras na resistência ao cisalhamento interlaminar em compósitos unidirecionais de curauá ou vidro. In: **11º Congresso Brasileiro de Polímeros CBPol**, 2011, Campos do Jordão/SP. p. 2971-2976.

OLIVEIRA, F. H.; HELFER, A. L.; AMICO, S. C. Theoretical and experimental micromechanical study of curaua fiber and glass fibre composites. In: **IX Simposio Argentino de Polímeros - SAP**, 2011, Bahía Blanca/Argentina. p. 100-105.

Sumário

Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	x
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos	xi
Resumo	xiii
Abstract	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS	18
2.1. Objetivo Geral.....	18
2.2. Objetivos Específicos	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1. Materiais Compósitos Poliméricos	19
3.2. Fibras Sintéticas.....	21
3.2.1. Fibras de Vidro.....	21
3.3. Fibras Vegetais.....	23
3.3.1. Fibras de Curauá.....	27
3.4. Matrizes Termorrígidas	31
3.4.1. Resina Poliéster.....	31
3.5. Compósitos Termorrígidos com Fibras Vegetais.....	33
3.6. Lâminas	37
3.7. Análise Mecânica Básica de Lâminas	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.1. Materiais	47
4.2. Produção dos Compósitos.....	48
4.3. Caracterização dos Compósitos.....	51

4.3.1. Preparação dos Corpos de Prova	51
4.3.2. Análises.....	52
4.4. O Software “ <i>The Laminator</i> ”	53
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
5.1. Aspectos Morfológicos dos Compósitos	55
5.2. Influência do Teor de Fibra nas Propriedades Mecânicas	57
5.3. Influência do Ângulo de Orientação nas Propriedades Mecânicas	61
5.4. Ensaio <i>Short-Beam</i>	68
5.5. Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura.....	73
5.6. Análise Micro- e Macro-Mecânica	77
6. CONCLUSÕES.....	82
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
8. REFERÊNCIAS	86

Índice de Figuras

Figura 1: Classificação dos compósitos segundo Levy Neto [14].	20
Figura 2: Fibras de sisal secando ao sol [23].	23
Figura 3: a) Primeira cadeira monobloco feita com fibras vegetais (cânhamo e <i>kenaf</i>) desenvolvida pelo designer Werner Aisslinger em cooperação com a BASF apresentada na <i>Material Vision</i> , 2011 [24] b) <i>Tulipa chair</i> [25].	25
Figura 4: Plantação de curauá <i>Ananás erectifolius</i> [38].	28
Figura 5: a) Curva de TG da fibra de curauá não tratada; e b) primeira derivada em relação à temperatura (em ar-sintético) [8].	30
Figura 6: Reação de poliéster insaturado com monômero de estireno resultando na resina de poliéster curada [43].	33
Figura 7: Projeto CIEO, veículo construído à base de fibra de linho e resina ampliTex: a) visão externa e b) visão interna [25]	33
Figura 8: Processo de fabricação de compósitos “verdes” [40].	36
Figura 9: Representação de uma lâmina unidirecional [51].	39
Figura 10: Desenho representativo de uma lâmina.	40
Figura 11: Descrição dos eixos de coordenadas 1,2 e x,y [14]	42
Figura 12: Molde de compressão utilizado.	48
Figura 13: Prensa hidráulica Marconi utilizada.	48
Figura 14: Equipamento de ultrassom utilizado na degasagem.	50
Figura 15: Fluxograma de produção e caracterização dos compósitos.	51
Figura 16: Micrografias da seção transversal de compósitos com fibra de curauá para: a) 10 %, b) 20 %, c) 30 %, d) 40 %, e) 50 % de fibra (Zoom 10x, zoom digital 1,7-2,0).	55
Figura 17: Micrografias mostrando a seção transversal de compósitos reforçados com fibra de vidro para: a) 10 %, b) 20 %, c) 30 %, d) 40 % e e) 50 % de fibra (Zoom 10x, zoom digital 1,7-2,0).	56

Figura 18: Resistência à tração dos compósitos com diferentes teores de fibra de curauá (orientação 0°).....	58
Figura 19: Resistência à flexão dos compósitos com diferentes teores de fibra de curauá (orientação 0°).....	58
Figura 20: Resistência à tração dos compósitos com diferentes teores de fibra de vidro (orientação 0°).....	59
Figura 21: Resistência à flexão dos compósitos com diferentes teores de fibra de vidro (orientação 0°).....	60
Figura 22: Comparação da resistência à tração de compósitos reforçados com fibras de curauá e compósitos reforçados com fibra de vidro com diferentes teores de fibra (orientação 0°).....	60
Figura 23: Comparação da resistência à flexão de compósitos reforçados com fibras de curauá e compósitos reforçados com fibra de vidro com diferentes teores de fibra (orientação 0°).....	61
Figura 24: Resistência à Tração (a) e Módulo de Elasticidade (b) para compósitos de curauá ($V_f = 20\%$).....	62
Figura 25: Resistência à flexão (a) e módulo (b) dos compósitos reforçados com fibra de curauá ($V_f = 20\%$).....	64
Figura 26: Resistência à tração (a) e módulo (b) para os compósitos de fibra de vidro ($V_f = 20\%$).....	66
Figura 27: Resistência à flexão (a) e módulo (b) para compósitos reforçados com fibra de vidro ($V_f = 20\%$).....	67
Figura 28: Curvas de ILSS obtidas para diferentes teores de fibra de compósitos curauá/poliéster (a) e vidro/poliéster (b).....	69
Figura 29: Curvas de ILSS obtidas para diferentes orientações de fibras de compósitos curauá/poliéster (a) e vidro/poliéster (b).....	70
Figura 30: Variação da resistência <i>short-beam</i> com o teor de fibra.....	71

Figura 31: Valores médios de resistência <i>short-beam</i> para compósitos reforçados com fibra de curauá e de vidro.	72
Figura 32: MEV da fibra de curauá com aumento de 1300x (a) e de 1000x (b).	74
Figura 33: MEV do compósito de curauá/poliéster com aumento de 150x.	75
Figura 34: MEV do compósito de vidro com aumento de 350x (a) e de 1100x (b).	76
Figura 35: Propriedades da lâmina inseridas no software <i>The Laminator</i>	78

Índice de Tabelas

Tabela 1: Composição das fibras de vidro mais utilizadas em compósitos [14].....	21
Tabela 2: Propriedades das fibras de vidro tipo E e tipo S [14].	23
Tabela 3: Diferentes tipos de resinas poliéster [42].....	32
Tabela 4: Oportunidades, riscos e estratégias de contorno de risco para a substituição de compósitos de fibra de vidro por compósitos de fibra de curauá [12].	35
Tabela 5: Comparação de propriedades de compósitos de fibras naturais/polipropileno de composição 50/50 [13].....	37
Tabela 6: Características da resina ARAZYN AZ 12.0, da Ara Ashland [52]	47
Tabela 7: Resultados encontrados para resistência e módulo de tração para compósitos de fibra de vidro.	79
Tabela 8: Resultados encontrados para resistência e módulo de tração para compósitos de fibra de curauá.	80

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

<i>ELV</i>	<i>End of Life Vehicles</i>
$\% V_f$	Percentual volumétrico de fibra
SiO_2	<i>Dióxido de Silício / sílica</i>
Al_2O_3	<i>Óxido de Alumínio / Alumina</i>
B_2O_3	<i>Óxido de Boro</i>
MgO	<i>Óxido de Magnésio</i>
CaO	<i>Óxido de Cálcio / Cal</i>
Na_2O	<i>Óxido de Sódio</i>
CO_2	<i>Dióxido de Carbono</i>
$NaClO$	<i>Hipoclorito de Sódio</i>
O_2	<i>Gás Oxigênio</i>
$NaOH$	<i>Hidróxido de Sódio</i>
N_2	<i>Gás Nitrogênio</i>
V_f	Volume de fibra
V_c	Volume do compósito
V_m	Volume da matriz
v_f	Fração volumétrica de fibras
v_m	Fração volumétrica da matriz
ρ_f	Massa específica da fibra
ρ_m	Massa específica da matriz
ρ_c	Massa específica do compósito
ϵ_c	Deformação do compósito
ϵ_f	Deformação da fibra
ϵ_m	Deformação da matriz
E_1	Módulo de elasticidade longitudinal do compósito

E_f	Módulo de elasticidade da fibra
E_m	Módulo de elasticidade da matriz
ν	Coefficiente de poisson
ν_{12}	Coefficiente de poisson maior
ν_{21}	Coefficiente de poisson menor
ν_m	Coefficiente de poisson da matriz
ν_f	Coefficiente de poisson da fibra
E_2	Módulo de elasticidade transversal do compósito
γ_{12}	Deformações angulares no plano
G_{12}	Módulo de cisalhamento do compósito no plano
σ_1	Resistência à tração longitudinal do compósito
σ_2	Resistência à tração transversal do compósito
τ_{12}	Tensão de cisalhamento no plano
σ_x	Tensão normal na direção x
σ_y	Tensão normal direção y
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento no plano xy
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DMA	Análise Térmica Dinâmico-Mecânica
G_m	Módulo de cisalhamento da matriz
G_f	Módulo de cisalhamento da fibra
Q'_{ij}	Componente da matriz rigidez reduzida transformada da linha "i", coluna "j"
ILSS	Resistência ao cisalhamento interlaminar
$\tau_{máx}$	Resistência máxima ao cisalhamento no plano

Resumo

O entendimento das características de compósitos com fibras naturais pode promover o seu uso a ponto de sugerir sua aplicação no lugar de compósitos reforçados com fibras sintéticas. Este trabalho busca embasar essa alternativa através da comparação do comportamento mecânico de compósitos unidirecionais de matriz poliéster isoftálica reforçada com fibras de curauá e reforçada com fibras de vidro. Os compósitos foram produzidos na forma de lâminas finas com teor de fibra de 20% onde se variou o ângulo do reforço (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° e 90°) com o objetivo de estudar o efeito de orientação da fibra nas suas propriedades. Foram moldados compósitos variando-se o teor volumétrico de fibras (10 %, 20 %, 30 %, 40 % e 50 %) a fim de avaliar a quantidade ótima de reforço em cada lâmina; a eficiência de um tratamento alcalino (5 % em peso de NaOH) na superfície das fibras de curauá também foi avaliada afim de se observar o ganho em resistência mecânica dos compósitos. Todos os compósitos unidirecionais foram caracterizados por meio de ensaios de tração, flexão e cisalhamento *short-beam*. As propriedades das lâminas reforçadas com fibra de curauá ou com fibra de vidro também foram estudadas utilizando-se as teorias da micromecânica disponíveis em softwares comerciais. As fibras de curauá tratadas com a solução alcalina produziram compósitos com maior resistência à tração quando comparados aos compósitos de curauá sem o tratamento devido a melhor interação com a matriz. A variação do ângulo de reforço mostrou o quão dependente são a resistência e o módulo dos compósitos reforçados com fibra de curauá ou vidro em relação à orientação das fibras. O efeito da orientação da fibra foi mais pronunciado em compósitos reforçados com fibra de vidro. Por último, embora os compósitos reforçados com fibra de vidro sejam mais resistentes que aqueles com fibra de curauá, os resultados para ângulos maiores que 45° foram considerados similares, equiparando as duas fibras nessas condições.

Abstract

The understanding of natural fibers composites can promote its use. This work aims in compare the behavior of unidirectional polyester matrix composites reinforced with curaua fibers and reinforced with glass fiber. The composites were produced in the shape of a thin sheet where was varied the reinforcement angle (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° and 90°) with the objective of studying the fiber orientation effect on composite properties. For this study was also mold composites varying the fiber volume fraction (10 %, 20 %, 30 %, 40 % and 50 %) in order to evaluate the best amount of reinforcement in each composite sheet and the efficiency of an alkaline treatment (5 % NaOH) at the curaua fiber surface. All the unidirectional composites were characterized using tensile, flexural and short-beam tests according to ASTM standards. The composites reinforced sheet properties with either glass or curaua fibers were also studied using theoretical micromechanical approach available in commercial software. Curaua fibers treated with alkaline solution produced higher tensile strength results compared with untreated fibers. As expected, the increase in reinforcement angle significantly decreased strength and modulus of curaua reinforcement composites as in glass reinforcement composites. The effect of fiber orientation was more relevant in the glass fiber composites. At last, although the glass fiber composites indicate higher strenght than curaua fiber composites, the results for higher angles ($> 45^\circ$) were considered similar for both fibers in this conditions.

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras sintéticas como vidro, aramida, carbono, entre outras, tem crescido especialmente com os avanços na aplicação na indústria aeroespacial desde os anos 50. Após o desafio da aplicação aeroespacial, o desenvolvimento dos materiais compósitos se deu através de aplicações na indústria em geral. Materiais compósitos, leves, com alta razão resistência/peso e boa rigidez, vêm substituindo gradualmente materiais convencionais como metais e madeira [1]. Fibras sintéticas como aramida e resinas termofixas como epóxis, poliuretanas e poliéster insaturado são derivados do petróleo, o que tem causado sérios problemas ao meio ambiente devido a sua característica de não biodegradabilidade. Apesar da reciclagem destes materiais estar aumentando, através da moagem e reutilização como carga, uma boa parte ainda acaba sendo depositada em lixões e aterros. O aumento da consciência ecológica, a preocupação com as reservas de petróleo e as novas políticas mundiais de sustentabilidade tem encorajado os cientistas a desenvolverem compósitos mais ecologicamente corretos [2] [3].

A criação de compósitos de baixo impacto ao meio ambiente está relacionada principalmente à utilização de matérias-primas renováveis que levem à diminuição do impacto ambiental e da dependência de recursos não renováveis. Boa parte dessas matérias-primas renováveis concentra-se nos reforços para compósitos, através do uso de fibras naturais. O emprego de fibras lignocelulósicas como agentes de reforço na substituição de fibras sintéticas como a fibra de vidro e de carbono vem aumentando devido às propriedades favoráveis das fibras naturais [4] [5] [6]. Comparando com a fibra de vidro, a fibra vegetal possui um custo menor, menor densidade (em torno de 1,2 g/cm³ a 1,5 g/cm³), não é tóxica, não é abrasiva e polui menos o meio ambiente. Outra razão para a mudança está na alta demanda de energia utilizada na produção da fibra de vidro,

através do uso de grandes equipamentos para aquecimento, derretimento e fiação de grandes quantidades de sílica, o que não ocorre para as fibras naturais [7].

Além disso, diversas fibras vegetais são produzidas em praticamente todos os países e agregam um caráter social no seu cultivo. Por ser um país rico em recursos naturais, com grandes áreas para plantio e variadas espécies de plantas, o Brasil pode assumir a liderança no desenvolvimento destes materiais. Há alguns projetos em andamento na região amazônica que cultivam essas plantas, levando em consideração a sustentabilidade ambiental e econômica [7] [8]. As principais vantagens do uso de fibras vegetais nos polímeros incluem: a) serem provenientes de fontes renováveis o que, a princípio, corresponde a uma fonte inesgotável; b) serem produtos biodegradáveis, o que é crucial para componentes que, após esgotar sua vida útil, devem ser descartados; c) serem recicláveis e facilmente convertidos em energia térmica através da combustão em fornos ou caldeiras sem deixar resíduos, gerando menos poluição e com adicional crédito de carbono; d) representam uma nova fonte de renda para a população rural [8]. Fibras vegetais absorvem CO₂ durante todo seu ciclo de vida o que contribui para a mitigação do gás na atmosfera. As características de processamento e as propriedades acústicas e de vibração também são outras vantagens apresentadas por essas fibras.

Como desvantagem, pode-se citar que as fibras naturais apresentam pouca uniformidade nas propriedades, podendo variar conforme o tipo de solo onde está inserida, clima, tipo de processo de separação e obtenção das fibras. Normalmente, as fibras vegetais não são suficientemente resistentes ao calor quando comparadas a fibra de vidro. Na Europa, a principal aplicação das fibras naturais está ligada à indústria de veículos de passeio, mas espera-se que seu uso seja estendido a caminhões, ônibus e trens, além de móveis e na indústria do design [9].

É estimado que a produção mundial anual de carros chegue a 76 milhões de veículos por ano em 2020. Novas políticas de regulamentação, como a *End of Life Vehicles* (ELV) da União Europeia [10] devem forçar os fabricantes de automóveis a considerarem o impacto ambiental de substituírem o uso de materiais sintéticos por naturais [11]. Substituir

a fibra de vidro por fibras naturais na indústria automotiva pode ser econômico, além de gerar benefícios sociais e ambientais. A utilização dessas fibras naturais pode promover o desenvolvimento da região Amazônica. O curauá (*Ananás erectifolius*) é umas das fibras vegetais mais promissoras devido a suas propriedades mecânicas. O curauá é bastante conhecido na região oeste do Pará, onde iniciaram as primeiras plantações. O custo da fibra é semelhante ao custo de outras fibras encontradas no Brasil, contudo, sua resistência à tração e módulo elástico são superiores aos encontrados para coco, sisal e juta, quase alcançando as propriedades da custosa fibra de linho e da fibra de vidro [12]. Outra diferença está no odor, muitas fibras naturais possuem um odor característico, a fibra de curauá é inodora, o que é bastante vantajoso para aplicações em interiores de automóveis. Embora o curauá já esteja em uso no Brasil e seja bastante promissor em uma aplicação de baixa escala, ainda é necessário avaliar se essa fibra natural poderá competir com a tradicional fibra de vidro [12] em aplicações de compósitos. A fibra de curauá custa de duas a três vezes menos que a fibra de vidro [13], contudo há o risco de se utilizarem áreas que seriam destinadas à produção de alimentos, o que poderia ser remediado através da prática da multicultura sem danos ao cultivo da fibra [12].

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver e caracterizar compósitos poliméricos unidirecionais de matriz poliéster isoftálica reforçada com fibras de curauá ou de vidro, variando-se a orientação do reforço e o teor de fibra, a fim de compará-los para promover à utilização de fibra de curauá em substituição a fibra de vidro.

2.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver um processo simples e eficaz para a limpeza, o corte e a classificação das fibras naturais recebidas, buscando alternativas que possam alterar de forma positiva as propriedades mecânicas das fibras.
- Obter uma rota de processamento de compósitos unidirecionais com fibras de curauá.
- Obter o percentual volumétrico de fibras para que sejam maximizadas as propriedades mecânicas dos compósitos.
- Comparar as propriedades mecânicas dos compósitos em variados ângulos de reforço de compósitos com fibras de vidro ou de curauá a fim de quantificar a importância da orientação do reforço.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Materiais Compósitos Poliméricos

De uma maneira geral, pode ser chamado de compósito todo e qualquer material multifásico que mostre uma proporção significativa das propriedades das fases que o constituem, de modo a apresentar uma melhor combinação de propriedades. As fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e devem estar separadas por uma interface distinta. Muitos materiais compósitos são compostos por apenas duas fases; uma é chamada de matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada frequentemente de fase dispersa.

A combinação de diferentes materiais possibilita a obtenção de novos materiais, com um conjunto de propriedades especiais que seus constituintes não possuem isoladamente. Se reforços individuais, formados por filamentos extremamente resistentes, rígidos e leves fossem usados sem uma matriz que os mantivesse unidos, protegidos e estabilizados geometricamente, sua aplicação ficaria reduzida a componentes submetidos unicamente por esforços de tração. Por outro lado, materiais poliméricos, cerâmicos ou metálicos, usados como matrizes, não apresentam, isoladamente, desempenho estrutural elevado em dois ou mais aspectos distintos, como por exemplo, resistência mecânica e a corrosão simultaneamente, ou rigidez e tenacidade à fratura somada a baixa massa específica [14]. Por isso, a união de reforços e matrizes na obtenção de compósitos têm se tornado tão atrativa.

De fato, segundo Callister [15], as faixas de propriedades dos materiais foram, e continuam sendo, ampliadas através do desenvolvimento de materiais compósitos. As propriedades dos compósitos são uma função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa. A homogeneidade ou uniformidade dos compósitos é determinada pela distribuição do reforço e pela fração presente bem como a razão de peso. Contudo as propriedades anisotrópicas dos

compósitos são altamente influenciadas pela geometria e orientação do reforço [16]. É esperado que haja a expansão no uso de compósitos reforçados com fibra pelas vantagens oferecidas por esse tipo de material, e.g. alta resistência, baixo peso, resistência a corrosão e baixa manutenção [17]. Na natureza é possível encontrar uma variedade de materiais compósitos, como por exemplo, a madeira, que consiste em fibras de celulose resistentes e flexíveis, que são envolvidas e mantidas unidas por meio de um material mais rígido chamado lignina. Outro exemplo encontrado na natureza são os ossos, compósitos constituídos pela proteína forte, porém mole, conhecida por colágeno, juntamente com o duro e frágil mineral apatita.

A Figura 1 mostra um tipo de classificação dos compósitos em relação ao tipo de reforço.

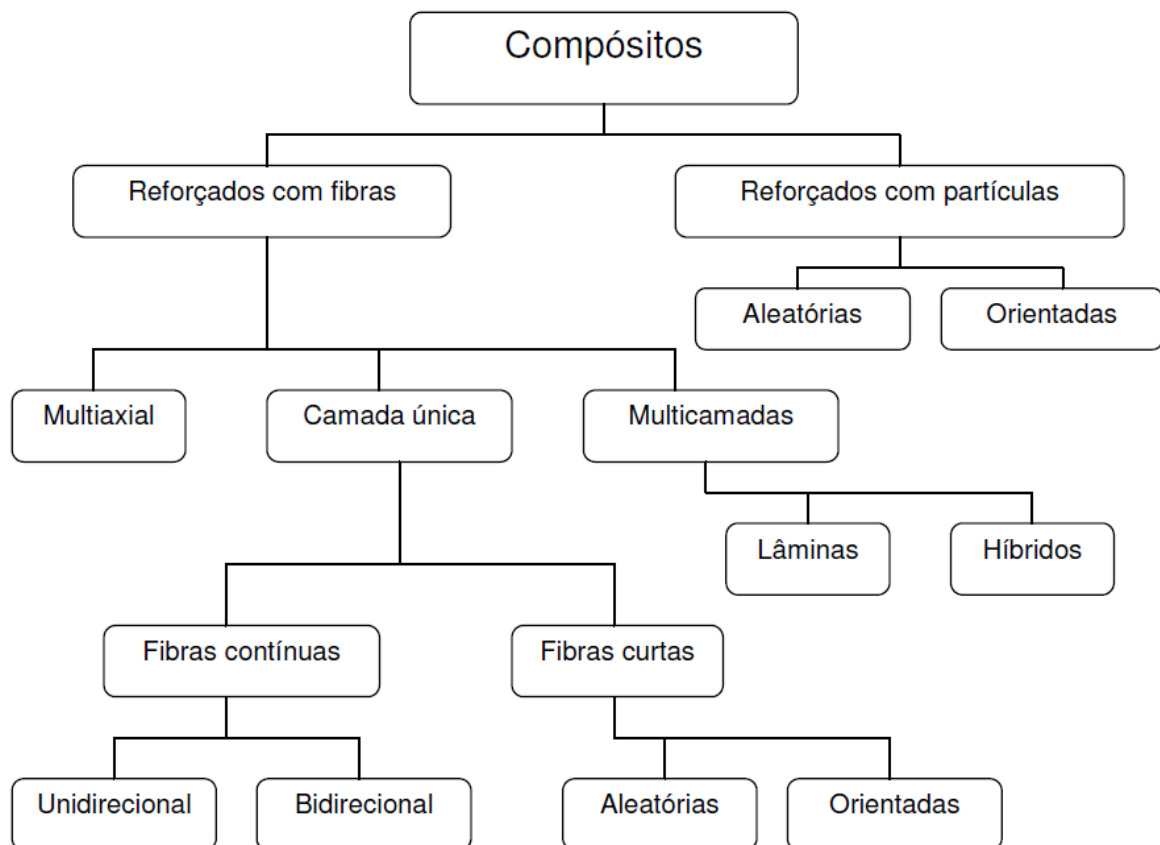


Figura 1: Classificação dos compósitos segundo Levy Neto [14].

3.2. Fibras Sintéticas

Tecnologicamente, os compósitos estruturais mais importantes são aqueles em que a fase dispersa encontra-se na forma fibrosa. Os objetivos de projeto dos compósitos reforçados com fibras incluem com frequência resistência e/ou rigidez elevada em relação ao seu peso. O vidro, o carbono e a poliaramida são os reforços sintéticos fibrosos mais comumente usados em matrizes poliméricas [15]. As fibras resultam em um meio efetivo de reforço porque à medida que se tornam mais finas, os materiais tendem a apresentar um menor número de defeitos indutores de falhas que se estivesse em sua forma mássica e, dessa forma, a resistência tende a se aproximar da resistência teórica do material [14]. No caso de fibras sintéticas, essas propriedades mecânicas ficam ainda mais evidentes, já que elas são produzidas artificialmente através de processos mecanizados, o que permite um rigoroso controle de suas dimensões (diâmetro, superfície e comprimento) além do controle sobre a sua composição química.

3.2.1. Fibras de Vidro

A fibra mais utilizada em compósitos com matriz polimérica é a fibra de vidro, devido principalmente ao seu baixo custo, alta resistência à tração, e grande inércia química. As desvantagens dessa fibra são associadas ao relativo baixo módulo de elasticidade, alta abrasividade e a baixa resistência à fadiga quando agregada a compósitos [14]. Na Tabela 1 é apresentada a composição de alguns tipos de fibras de vidro.

Tabela 1: Composição das fibras de vidro mais utilizadas em compósitos [14].

Constituintes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O
<i>Vidro E</i>	55,2	14,8	7,3	3,3	18,7	-
<i>Vidro C</i>	65	4	5	3	14	8,5
<i>Vidro S</i>	65	25	--	10	--	--

A fibra de vidro é produzida a partir da aglomeração de filamentos muito finos e flexíveis de sílica que são extrudados a partir de uma massa fundida de vidro [18]. A sílica e outros componentes são misturados em fornos com temperaturas de 2.500 à 3.000 °C até fundirem e serem escoados em compartimentos com centenas de pequenos orifícios para formarem filamentos. Assim que resfriam com o uso de água e/ou ar os filamentos são puxados a uma velocidade de 80 Km/h e sofrem um tratamento superficial chamado *sizing*, que pode variar entre 0,25 e 6 % do peso original da fibra. O tratamento de *sizing* é feito por diferentes motivos; promover molhabilidade da fibra, melhorar a interface fibra/resina e proteger a fibra de quebras durante o manuseio e processamento. A formulação do *sizing* é dependente de sua aplicação [19]. As fibras de vidro, de alta resistência, têm diâmetro que varia normalmente de 3 µm a 20 µm. São um material amplamente disponível e podem ser utilizados empregando-se uma ampla variedade de técnicas de fabricação de materiais compósitos. Quando associado com diferentes polímeros, elas possuem inércia química, o que torna o compósito útil para aplicações em uma variedade de ambientes corrosivos [15]. O conceito de utilizar estas fibras para aplicações em compósito permitiu a produção de peças com grande variedade de formatos e tamanhos, tais como placas para montagem de circuitos eletrônicos, cascos e hélices de barcos, fuselagens de aviões, caixas d'água, piscinas, pranchas de surf, carrocerias de automóveis, na construção civil e em muitas outras aplicações [20].

A Tabela 2 mostra algumas propriedades de diferentes tipos de fibras de vidro. Segundo Khalil [21] os altos valores de tenacidade em tração (4,1 MPa) encontrado em compósitos reforçados com fibra de vidro são principalmente uma consequência da boa ligação na interface entre a fibra de vidro e as resinas, no caso a ester-vinílica.

Tabela 2: Propriedades das fibras de vidro tipo E e tipo S [14].

Propriedades	Vidro E	Vidro S
Massa específica (g/cm ³)	2,54	2,55
Modulo de elasticidade (GPa)	70	86
Resistência à tração (GPa)	2,40	2,80
Preço (US\$/kg) (<i>roving</i>)	1,65 – 2,20	13,0 – 17,5
Preço (US\$/kg) (<i>tecido</i>)	10 – 20	20 – 40

3.3. Fibras Vegetais

Fibras vegetais, como mostrado na Figura 2, vêm sendo usadas por diferentes civilizações e com diversas aplicações há centenas de anos. Muitos artefatos são fabricados e comercializados até hoje, como bolsas, mantas, cordas, redes, pincéis, cestos, entre outros [22].

**Figura 2:** Fibras de sisal secando ao sol [23].

As pesquisas focadas em substitutos verdes para aplicações em engenharia desde a virada do século levou ao rótulo do século atual como o século da celulose. Enquanto a segunda metade do século 20 foi dedicada a pesquisas em tribologia, no início do século 21 tem-se focado mais em fontes renováveis de fibras naturais principalmente para aplicações em materiais compósitos em resposta a problemas ambientais em diferentes aplicações na indústria [16]. Nas recentes iniciativas em “materiais verdes”, grandes esforços foram feitos na área política e na promoção da procura por soluções de engenharia sustentável para energia e meio ambiente, por exemplo, a União Europeia alterou a legislação a fim de promover o uso de veículos mais energeticamente eficientes e amigáveis ao meio ambiente [16].

O uso de matérias-primas de fontes renováveis vem sendo objeto de estudos e pesquisas nas últimas décadas devido ao seu potencial na substituição de derivados petroquímicos. Por serem materiais considerados “ecologicamente corretos” compósitos com fibras vegetais têm-se mostrado uma alternativa viável em muitas aplicações na substituição de polímeros reforçados com fibra de vidro e outras cargas. A Figura 3, por exemplo, mostra algumas aplicações recentes de compósitos de fibras vegetais, como a cadeira monobloco feita de fibra de cânhamo combinado à resina Acrodur BASF, resina acrílica a base de água, desenvolvida pelo designer Werner Aisslinger em um projeto conjunto com as BASF e apresentada pela primeira vez na *Material Vision*, evento de arquitetura e design em 2011. Outro exemplo é a cadeira conceito *Tulipa*, ou *Tulipa Chair*, desenvolvida pela empresa Lingrove nos Estados Unidos.



Figura 3: a) Primeira cadeira monobloco feita com fibras vegetais (cânhamo e *kenaf*) desenvolvida pelo designer Werner Aisslinger em cooperação com a BASF apresentada na *Material Vision*, 2011 [24] b) *Tulipa chair* [25].

Um fator importante que favorece o emprego de fibras vegetais como insumos renováveis é o crescente significado que vem assumindo a perspectiva de economia de energia por meio da redução de peso dos componentes, bem como os aspectos ligados à recuperação das matérias-primas e reaproveitamento de materiais no final do ciclo de vida do produto [8]. Apesar da presença da matriz termorrígida, a presença de fibras naturais no compósito diminuiria significativamente a poluição gerada no caso de incineração do material ou na moagem para uso como carga. Preocupações ambientais como aquecimento global, consumo de energia e o desejo de se obter produtos de fontes renováveis têm levado ao crescimento do interesse por produtos naturais. Fibras naturais renováveis, com propriedades como baixo custo, boa qualidade, baixa demanda de energia oriunda de combustíveis fósseis e boas propriedades mecânicas têm chamado a atenção para o uso em materiais compósitos [26] [27]. Esse tipo de compósito reforçado com fibras naturais pode alcançar propriedades específicas comparáveis a compósitos reforçados com fibra de vidro [28].

As vantagens do uso de fibras naturais estendem-se a fontes abundantes com rápida renovação, baixo custo, não abrasivo, fácil processamento, não tóxico, grande flexibilidade e baixa densidade associada a grandes propriedades mecânicas. O ciclo quase fechado

de CO₂ evita que haja o aumento no efeito estufa, e a reutilização de resíduos agrícolas impede que esses sejam acumulados no ambiente [29].

As fibras naturais podem ser classificadas de acordo com sua origem, e agrupadas em *seed fibers* (algodão), *bast fibers* (juta, linho, *hemp*), *leaf fibers* (banana, sisal, curauá) e *fruit fibers* (coco) [27]. Cânhamo, juta, linho, coco, sisal e bambu estão entre as fibras que têm atraído atenção. Compósitos reforçados com essas fibras têm obtido sucesso em aplicações nas indústrias automobilísticas e em setores de engenharia.

Um dos principais pontos negativos das fibras naturais está na sua baixa temperatura de processamento devido à possibilidade de degradação da fibra ou emissão de voláteis em altas temperaturas, o que pode afetar a fabricação do compósito. A temperatura de processamento está limitada normalmente a temperaturas de até 200°C, contudo, no caso de compósitos que utilizam resinas termofixas, esta característica não é limitante, já que a cura dessas resinas ocorre em temperaturas inferiores. Outra desvantagem está na elevada absorção de umidade das fibras naturais devido ao seu caráter hidrofílico, o que pode levar ao inchamento das fibras e perda da estabilidade dimensional do compósito em ambientes úmidos. Além disso, as fibras naturais apresentam incompatibilidade com a maioria dos polímeros que são hidrofóbicos, o que pode prejudicar a adesão fibra/matriz. Dezenas de trabalhos na literatura focam em tratamentos físico-químicos das fibras para melhorar este aspecto, e estes têm alcançado sucesso razoável [27].

Embora existam algumas desvantagens a utilização de fibras naturais como reforço em compósitos poliméricos é, sem dúvida, crescente. Em um estudo utilizando fibra da *Phoenix dactylifera* também conhecida como tamareira ou datileira, para reforço em compósitos, foram encontradas propriedades bastante competitivas para aplicação na indústria automotiva. Compósitos reforçados com essa espécie de fibra apresentaram elevado módulo de elasticidade específico por custo de fibra. A fibra de tamareira está entre as mais baratas do mundo e seu uso na indústria automotiva traria maior sustentabilidade e produtividade além de auxiliar na gestão de descarte de resíduos [30].

É importante destacar que as fibras naturais são extremamente dependentes de fatores como condições do solo, época de colheita, processamento pós-colheita bem como da localização da fibra no corpo da planta [31]. Em outro estudo Marinelli apresenta a cadeia produtiva de compósitos poliméricos com fibras vegetais, dentro do contexto do Projeto Fênix Amazônico, na intenção de despertar o interesse da comunidade científica das mais diversas áreas em colaborar para o desenvolvimento de novas tecnologias que possam ser utilizadas para a recuperação de áreas degradadas da Amazônia [32] [33]. O Brasil é rico em variedade de fibras naturais, Satyanarayana descreve sobre a disponibilidade de muitas delas, seus mercados, métodos de extração, morfologia, propriedades e aplicações atuais. Algumas perspectivas futuras quanto a essas fibras também são apresentadas, levando em consideração sua crescente importância e todo espectro de oportunidades promissoras e desafios para o Brasil e outros países em desenvolvimento [33] [34].

3.3.1. Fibras de Curauá

Apesar de ser conhecido pelos povos indígenas desde os tempos pré-colombianos, para a fabricação de redes, o curauá (*Ananás erectifolius*), mostrado na Figura 4, recebeu verdadeira atenção comercial apenas a partir de 1993, quando a fibra começou a ser utilizada pela indústria automotiva brasileira [8].

O curauá é uma planta da família das bromeliáceas, cultivada na região Amazônica, particularmente no Estado do Pará. Suas folhas, que chegam a 1,5 m de comprimento e 4 cm de largura, são duras, eretas e planas. A fibra extraída de suas folhas possui resistência mecânica superior a de seus concorrentes tradicionais como sisal, juta e linho. Sua composição química depende do local de plantação, da espécie e do tempo decorrido depois da extração das folhas [35]. Em 2003, o Brasil produziu aproximadamente 150 toneladas de curauá [36]. Em 2012 a produção já havia aumentado para 290 toneladas, número bastante abaixo da demanda mensal de fibra seca de aproximadamente 500 toneladas segundo a indústria automobilística [37].



Figura 4: Plantação de curauá *Ananás erectifolius* [38].

Existem quatro variedades de curauá: branco, roxo, vermelho e o branco brilhante. Os mais comuns são o curauá roxo com folhas roxo-avermelhadas e o curauá branco com folhas verde claras com crescimento menor que o roxo. Cada planta de curauá produz 20 a 24 folhas anualmente, o que equivale a 2 kg de fibra. Em uma área de 1 ha é possível produzir 3600 kg de fibra seca por ano em um período de 5 a 6 anos, o que corresponde ao seu ciclo de vida. O processamento da fibra consiste na desfibrilação das folhas por secagem, amolecimento ou iluminação das fibras, manual ou mecanicamente. Por serem macias e resistentes, as fibras de curauá são comumente empregadas como matérias-primas na indústria têxtil, automotiva, de fiação, de bolsas entre outras [32].

A composição mássica média das fibras foi determinada por Behrens [35], em função do local de plantação, tempo de envelhecimento das fibras e tipo de curauá (roxo ou branco). Pode-se citar como exemplo de composição encontrada para esta fibra: 69,0 - 74,1 % de celulose, 19,0 - 21,1% de hemicelulose, 1,0 - 2,2 % de lignina e 0,6 - 1,2 % de cinzas [8].

No Pará, comunidades locais produzem o curauá associado a outras culturas como mandioca, vegetais e feijão. O governo local tem estimulado a implantação de novos projetos para a melhor utilização da fibra de curauá. Uma parceria com a indústria automotiva foi firmada para a fabricação de mantas de curauá, desse modo estimulando a produção de fibras em pequenas propriedades. Projetos como este permitem que famílias se envolvam em processos tecnológicos, e ao mesmo tempo, contribuem para a estabilidade do trabalhador no campo [32]. O curauá é utilizado na indústria automotiva para forração de bancos, painéis e etc.

Spinacé caracterizou a fibra de curauá após alguns tratamentos químicos superficiais. A densidade obtida para fibras sem tratamento, tratadas com água, tratadas com solução de hipoclorito de sódio (NaClO) e com plasma a frio de O₂ foi de 1100 (±91), 1200 (±99), 1100 (±91) e 1100 (±91) kg/m³ respectivamente, o que mostra que os diferentes tratamentos da fibra não alteram sua densidade. E este valor está no mesmo patamar de outras fibras naturais como *palm* (1030 kg/m³), coco (1150 kg/m³), sisal (1500 kg/m³) e banana (1350 kg/m³), todas bem abaixo da densidade da fibra de vidro (2500 kg/m³) [7].

Santos estudou por termogravimétrica a estabilidade térmica da fibra de curauá em ar sintético (Figura 5) na faixa de 30 a 800 °C. Constatou-se uma perda inicial de umidade em torno de 80 °C, e dois processos principais de perda de massa, com máximos em 220 °C, relacionado à degradação da lignina e da hemicelulose, e a 310 °C relacionado à degradação da celulose. Um terceiro processo de perda de massa, máximo em 414 °C, deveu-se a termo-oxidação dos resíduos dos processos anteriores [8].

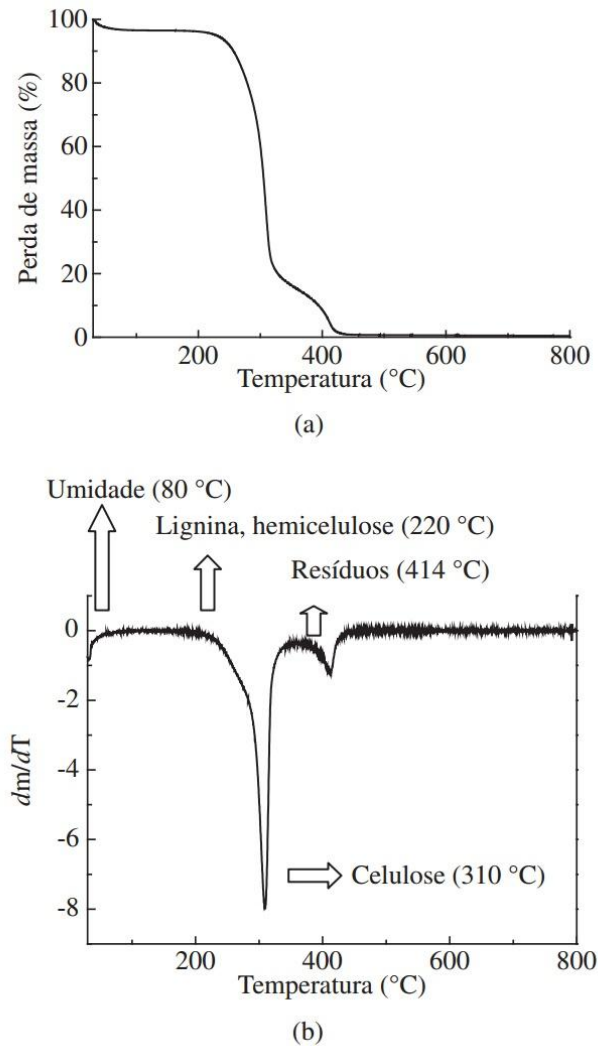


Figura 5: a) Curva de TG da fibra de curauá não tratada; e b) primeira derivada em relação à temperatura (em ar-sintético) [8].

Tomczak et al. [39] analisou o efeito do diâmetro da fibra de curauá nas suas propriedades em tração. A deformação na ruptura não foi afetada pela variação do diâmetro, e manteve-se na faixa de 3 % a 5 %, com um valor médio de 4,6 %, similar a outras fibras naturais. Porém, os valores de módulo de elasticidade e resistência à tração diminuíram com o aumento do diâmetro da fibra. A resistência diminuiu de 310 para 131 MPa, e o módulo de elasticidade diminuiu de 96,1 para 30,0 GPa em uma faixa de variação de diâmetro de 26 para 64 μm .

Estudos indicam que a fibra de curauá é um material promissor para o reforço de termoplásticos e termofixos [39] [40]. Baseado na sua resistência específica, os compósitos com fibra de curauá podem apresentar uma redução de peso de até 15 % em comparação com materiais reforçados com fibras de vidro.

3.4. Matrizes Termorrígidas

As resinas termorrígidas são mais utilizadas em compósitos que as resinas termoplásticas por uma série de fatores. Matrizes termorrígidas apresentam uma maior facilidade de processamento por serem líquidas à temperatura ambiente (25 °C), facilitando assim a molhabilidade dos reforços. O custo das matrizes termorrígidas também é um fator positivo, já que normalmente é mais baixo do que o custo de resinas termoplásticas de desempenho similar. A reação de reticulação ou cura da matriz termorrígida pode ser feita através da adição de um agente de cura (e.g. iniciador ou endurecedor) ou através do aumento da temperatura. Os polímeros termofixos se tornam permanentemente duros quando submetidos à aplicação de calor e não amolecem com o posterior aquecimento. Os polímeros termofixos são geralmente mais duros, mais fortes, e mais frágeis do que os polímeros termoplásticos, e possuem melhor estabilidade dimensional [15] [19] [41].

3.4.1. Resina Poliéster

As resinas de poliéster são uma família de polímeros formados da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos e glicóis, que, quando reagidos, dão origem a moléculas de cadeias longas lineares. Se um ou ambos constituintes principais são insaturados, ou seja, contêm uma ligação dupla reativa entre átomos de carbono, a resina resultante é insaturada [14]. As resinas de poliéster apresentam-se na forma de um líquido viscoso que se transforma em um sólido rígido infusível (termorrígido) por meio de uma reação química exotérmica de polimerização ou cura. As resinas de poliéster insaturado são comercializadas com acelerador de tal forma que o sistema reativo seja obtido pela mistura

pré-acelerada com o catalisador. A quantidade de acelerador e de catalisador controla a velocidade de reação e, portanto, o tempo de gel e a temperatura máxima atingida durante a reação. Na prática, sistemas de cura à temperatura ambiente não atingem cura total, sendo necessário efetuar uma pós-cura, a uma determinada temperatura por um determinado tempo, para completar a reação. Para a cura à temperatura ambiente, o iniciador mais utilizado é o peróxido de metil-etil-cetona (MEKP), utilizado juntamente com aceleradores naftenato de cobalto (NafCo), ou dimetilanilina (DMA), na proporção de até 0,3 % em massa. As resinas formuladas para cura ambiente são ligeiramente instáveis e inibidores do processo de cura, em quantidades menores que 100 ppm, devem ser adicionados para prolongar o tempo de vida durante a estocagem à temperatura ambiente. Para moldagem com prensagem a quente, são utilizados catalisadores sem utilização de aceleradores, e a mistura é estável por um tempo relativamente longo a baixas temperaturas. Uma vez iniciada a reação pelo fornecimento de calor, a mistura tem um tempo de gel curto, pois a reação de polimerização é exotérmica. Curas realizadas à temperatura elevada são usualmente rápidas [14].

Há diferentes tipos de resinas poliéster: ortoftálicas, tereftálicas, isoftálicas, isoftálicas com NPG e bisfenólicas (Tabela 3).

Tabela 3: Diferentes tipos de resinas poliéster [42].

Tipos	Comentários
Ortoftálica	Resina mais comum, de menor custo, para uso básico.
Tereftálica	Possui resistência física um pouco superior à ortoftálica, porém baixa resistência à UV.
Isoftálica	Melhores características mecânicas, químicas e térmicas que as anteriores.
Isoftálica c/ NPG	O NPG melhora a resistência à hidrólise.
Bisfenólica	Possui as melhores características químicas e térmicas

A Figura 6 mostra a estrutura molecular da resina poliéster insaturada e sua reação com o monômero de estireno resultando na resina curada.

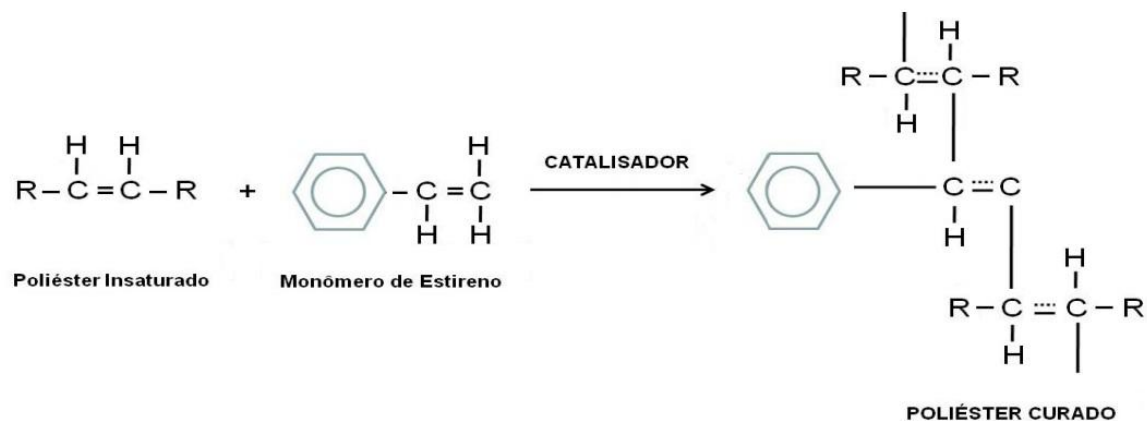


Figura 6: Reação de poliéster insaturado com monômero de estireno resultando na resina de poliéster curada [43].

3.5. Compósitos Termorrígidos com Fibras Vegetais

Conforme Kalia, a utilização de fibras naturais não apenas irá diminuir o problema de descarte de resíduos como também reduzir a poluição do meio ambiente [44]. Compósitos reforçados com fibras naturais são materiais ambientalmente atrativos, e já foi provado que esse tipo de material vem emergindo como alternativa a compósitos reforçados com fibra de vidro ou fibra de carbono [45] [46]. A Figura 7 mostra uma aplicação recente de compósitos reforçados com fibra natural. A empresa Lingrove produziu um protótipo de veículo movido a pedal utilizando matérias primas vegetais para o Projeto CIEO.



Figura 7: Projeto CIEO, veículo construído à base de fibra de linho e resina ampliTex: a) visão externa e b) visão interna [25]

De Rosa comparou as propriedades mecânicas em tração e flexão, de compósitos de matriz epóxi reforçados com 20 % de fibras curtas ou longas, de folhas da *Phormium tenax*. Para os testes de tração e flexão, as placas com fibras longas apresentaram um aumento de resistência de 25 % e 32 % respectivamente, quando comparadas a placas sem reforço. No ensaio de flexão essa diferença de resistência é ainda maior, as fibras longas superaram em 20 % a resistência encontrada para as placas de epóxi puro ou reforçadas com fibras curtas que obtiveram resistência similar [47].

Zah et al. [12] realizaram em parceria com a indústria automotiva um estudo do impacto ambiental da substituição de compósitos utilizados em automóveis feitos em fibra de vidro por outros com fibra de curauá (ver Tabela 4). A fibra de curauá foi escolhida por apresentar um desempenho superior a de outras fibras naturais ligadas a uma matriz de polipropileno (PP), comum na indústria automotiva (Tabela 5). Foi visto que algumas fibras podem apresentar diferentes odores, enquanto a fibra de curauá é inodora e constatou-se que compósitos curauá/PP possuem potencial para substituir compósitos fibra de vidro/PP para isolamento acústico e em peças no interior do automóvel.

Spinacé et al. [8] avaliaram o uso de fibras de curauá para substituir a fibra de vidro em compósitos de poliamida-6 reforçada com 20 % de fibras curtas de curauá não tratadas, ou tratadas com secagem, por plasma a frio de N₂ por 15 minutos, 30 minutos em solução 10 % de NaOH e ainda fibras longas sem tratamento. Os corpos-de-prova injetados com as amostras processadas com e sem secagem mostraram resultados similares em termos de resistência à tração, flexão e ao impacto, diferente do esperado. Comparado ao material sem reforço ambas mostraram um aumento significativo no módulo de tração e flexão, enquanto a resistência à tração, à flexão e ao impacto permaneceram praticamente constantes, por outro lado, o alongamento à ruptura apresentou grande redução, como normalmente ocorre para polímeros reforçados. As amostras cujas fibras foram tratadas por plasma de N₂ ou solução de NaOH, apresentaram melhores propriedades mecânicas ou, pelo menos, similares às amostras de fibras não tratadas, provavelmente devido a uma melhor adesão fibra/matriz. Porém, este método

gera resíduos que precisam ser neutralizados posteriormente em tanques de efluentes, implicando em um investimento adicional.

Tabela 4: Oportunidades, riscos e estratégias de contorno de risco para a substituição de compósitos de fibra de vidro por compósitos de fibra de curauá [12].

	Oportunidades	Riscos	Contorno de risco
Aspectos econômicos	<ul style="list-style-type: none"> - baixo custo de material - mais negócios agrícolas - eco-marketing 	<ul style="list-style-type: none"> - qualidade e disponibilidade variáveis - produção insuficiente 	<ul style="list-style-type: none"> - múltiplos fornecedores, estocagem - aumento da capacidade de produção
Aspectos ambientais	<ul style="list-style-type: none"> - menor impacto ambiental em relação à fibra de vidro - maior taxa de recuperação térmica do planeta 	<ul style="list-style-type: none"> - maior peso em relação à fibra de vidro para mesmo desempenho - maior impacto ambiental devido à monocultura 	<ul style="list-style-type: none"> - otimização da fibra (tratamentos alcalinos) - redução do uso de pesticidas, fertilizantes (multi-culturas)
Aspectos sociais	<ul style="list-style-type: none"> - disponibilidade de trabalho em regiões pouco desenvolvidas - redução de riscos à saúde no processo produtivo 	<ul style="list-style-type: none"> - uso de trabalhadores não registrados (trabalho informal) 	<ul style="list-style-type: none"> - cooperação com programas de desenvolvimento social (e.g. POEMA)

Em outro estudo, Gomes et al. [40] avaliaram compósitos reforçados com fibras longas de curauá, , ligados por uma matriz biodegradável baseada em amido de milho. Para a confecção dos compósitos (Figura 8), foi utilizada uma prensa com 2 aquecedores, e 3 configurações de peça. Na primeira, as fibras foram inseridas no molde e logo após a resina foi vertida e o material mantido sob pressão. Na segunda, a fibra de curauá foi enrolada e esticada ao redor de uma placa metálica onde a resina foi aplicada por pincel.

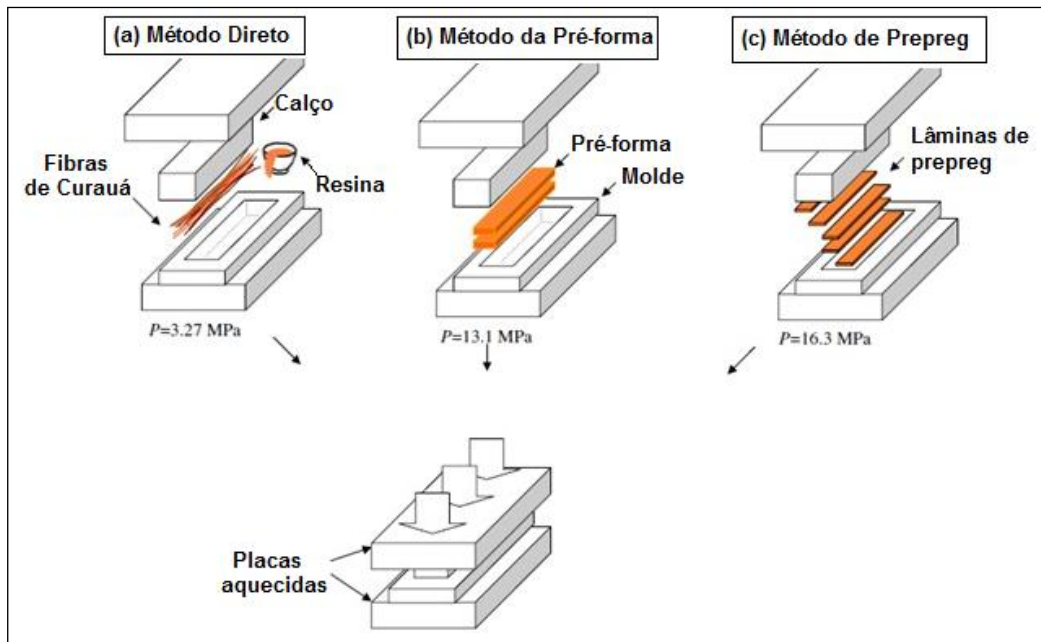


Figura 8: Processo de fabricação de compósitos “verdes” [40].

As pré-formas fibrosas impregnadas de resina foram secas a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h, recortadas nas dimensões do molde, inseridas nele e comprimidas. A terceira configuração consiste na primeira etapa de pré-forma, após a fibra ser esticada e enrolada na placa metálica e coberta por resina, as pré-formas foram prensadas uma a uma sob uma temperatura de $120 \text{ }^\circ\text{C}$ para a fabricação de *prepregs*, que foram recortados nas dimensões do molde. Para a construção do compósito, 5 camadas de *prepregs* foram adicionadas ao molde e comprimidas a uma pressão de $3,27 \text{ MPa}$. Todas as composições ficaram a $150 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 h no molde. Parte das fibras passou por um tratamento em uma solução de NaOH 10 % por 2 h à temperatura ambiente, sendo posteriormente lavadas com uma solução de ácido acético 1 % e depois com água, e então secas à temperatura ambiente por 24 h. A resistência à tração dos compósitos provenientes do método de fabricação por *prepregs* (327 MPa) foi maior que pela pré-forma (275 MPa) e pelas fibras dispersas (216 MPa), justificado pela diferença de alinhamento final das fibras. O módulo de elasticidade do método *prepreg* também foi o mais alto (36 GPa) atingindo um valor comparável aos apresentados por plásticos reforçados com fibras de vidro (38 GPa para poliéster/fibra de vidro 50/50). Em um segundo momento foi avaliado o resultado do

tratamento alcalino nas propriedades finais do compósito. A resistência à tração obtida para os compósitos com fibras tratadas foi similar àqueles com fibras não tratadas, porém com maior deformação na ruptura, principalmente para o método de prepregs, que apresentou uma deformação de 2,78 % contra 1,24 % para o compósito com fibras não tratadas.

A Tabela 5 apresenta resultados encontrados por Leão [13] em um estudo para a indústria automotiva utilizando termoplásticos reforçados com fibras naturais.

Tabela 5: Comparação de propriedades de compósitos de fibras naturais/polipropileno de composição 50/50 [13].

Fibra	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo em flexão (GPa)
Rami	34,6	3,43	29,3	3,02
Juta	15,6	2,4	23,9	2,50
Curauá	46,5	3,78	33,1	2,51

3.6. Lâminas

Uma lâmina é uma camada fina de um material compósito de espessura típica de 0,125 mm composta de diferentes materiais (a propriedade varia ponto a ponto), sendo que esta dimensão é bastante inferior em relação às outras duas [48]. Porém, a análise neste nível considera as lâminas homogêneas (uso da mecânica do contínuo), com propriedades médias. A caracterização de uma lâmina unidirecional requer mais parâmetros que a de uma lâmina isotrópica. Caso a lâmina tenha fibras orientadas em ângulos, as deformações (e distorções) resultantes variarão com o ângulo.

Segundo Pardini [49], um compósito laminado é formado pelo empilhamento de lâminas (planas ou curvas) na direção da sua espessura, com ou sem direção preferencial, que são orientadas de uma maneira específica. Cada lâmina individual é unida a outra através da cura da resina resultando em um compósito termorrígido. As propriedades

mecânicas do laminado serão dependentes das propriedades de cada lâmina bem como de suas orientações angulares em relação ao eixo de referência do compósito [49]. Entre os fatores que mais influenciam as propriedades mecânicas do laminado, estão a tenacidade da matriz polimérica, a resistência interfacial fibra/matriz, a orientação das fibras, a sequência de empilhamento das camadas e a espessura do laminado [50].

3.7. Análise Mecânica Básica de Lâminas

Para a análise de lâminas é necessário obter propriedades mecânicas como resistência e constantes elásticas por meio de ensaios mecânicos convencionais ou realizando uma análise micro-mecânica preliminar. Esta análise leva em consideração as propriedades individuais da fibra e da matriz, e os teores volumétricos das fases para estimar as propriedades finais do material compósito, em geral desconsiderando as propriedades da interface, a existência de vazios (i.e. a lâmina é contínua), e assumindo que seu comportamento é linear elástico.

Utilizando-se a Equação 1 e Equação 2, é possível calcular o percentual volumétrico de cada componente do compósito, sendo sua massa específica dada pela Equação 3.

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (\text{Eq. 3})$$

onde: v_f é o volume de fibras; v_m é o volume da matriz; v_c é o volume do compósito V_f a fração volumétrica de fibras; V_m é a fração volumétrica da matriz; ρ_f é a massa específica da fibra; ρ_m é a massa específica da matriz e ρ_c é a massa específica do compósito.

A Figura 9 mostra a direção longitudinal (1) paralela às fibras e a direção transversal (2), perpendicular às fibras. Quando aplicada uma força de tração em 1, os materiais

apresentarão a mesma deformação (ε), como mostra a Equação 4. Considerando-se a lei de Hooke válida para esses materiais, o módulo elástico longitudinal pode ser definido por meio da Equação 5.

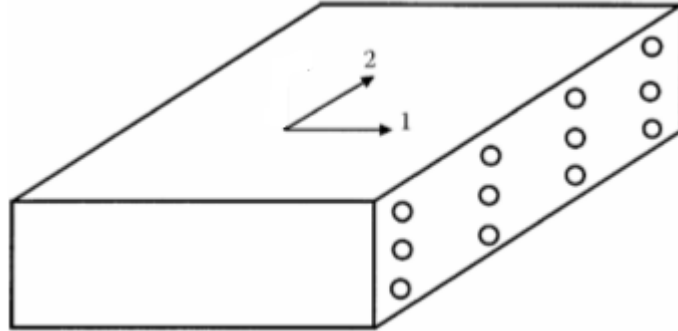


Figura 9: Representação de uma lâmina unidirecional [51].

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (\text{Eq. 4})$$

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (\text{Eq. 5})$$

O coeficiente de Poisson maior, ν_{12} , pode ser obtido por equação similar à Regra das Misturas (Equação 6). O coeficiente de Poisson menor, ν_{21} , relaciona-se com o maior por meio da Equação 7 [48].

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\nu_{12} E_2 = \nu_{21} E_1 \quad (\text{Eq. 7})$$

Para estudar o comportamento elástico de uma lâmina, é normalmente considerado que a mesma é homogênea (propriedades homogeneizadas pela micromecânica) e contínua (i.e. não existem vazios), com comportamento linear elástico [48]. Imaginando-se uma lâmina (fina camada de compósito) bidimensional com reforço unidirecional, conforme apresentado na Figura 10, novamente com a direção 1 sendo o eixo coordenado paralelo

às fibras, e a direção 2, perpendicular às fibras no plano 12. Normalmente as fibras são bem mais rígidas que a matriz, assim a lâmina possui um módulo de elasticidade mais elevado, E_1 , na direção 1 (direção das fibras), que o módulo na direção 2, E_2 [14].

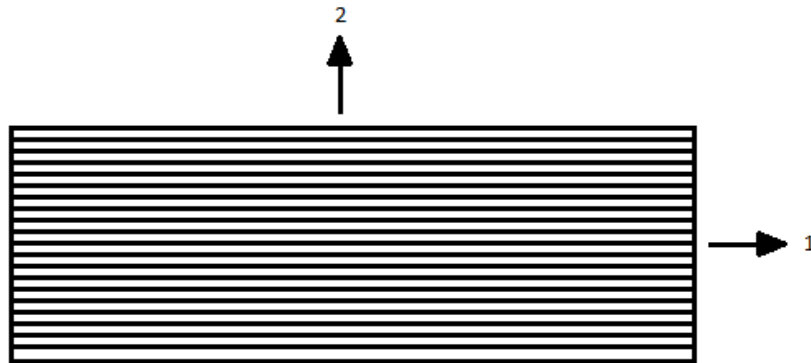


Figura 10: Desenho representativo de uma lâmina.

A lâmina com reforço unidirecional apresenta dois coeficientes de Poisson. O maior deles, ν_{12} , refere-se à situação na qual a tensão normal é aplicada na direção 1 das fibras, e o menor, ν_{21} , ocorre quando a tensão é perpendicular às fibras. Outra propriedade elástica dessa lâmina é o módulo de cisalhamento G_{12} , o qual relaciona as tensões de cisalhamento, τ_{12} , no plano da lâmina (1,2), com as deformações angulares, γ_{12} , neste mesmo plano. As propriedades elásticas de uma lâmina ortotrópica, determinada pelas constantes elásticas E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12} e ν_{21} , são válidas apenas no sistema de coordenadas principal do material (1,2). Neste caso, os tensores de tensões e deformações podem ser definidos no sistema de coordenadas (1,2) como:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [S] \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (\text{Eq. 8})$$

Na Equação 8, a matriz 3×3 , simétrica, é conhecida como matriz [S]. E a relação matricial inversa que fornece as tensões referentes às direções 1 e 2 em função das deformações, é dada pela Equação 9. Sendo a matriz 3×3 neste caso conhecida como matriz [Q], a qual é a inversa de [S], ou seja, $[Q] = [S]^{-1}$, lembrando que as matrizes [S] e [Q] apresentadas só valem no sistema (1,2).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [Q] \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$\text{onde: } Q_{11} = \frac{E_1}{1-\nu_{21}\nu_{12}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{21}\nu_{12}} = Q_{21} = \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{21}\nu_{12}}, \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1-\nu_{21}\nu_{12}} \text{ e } Q_{66} = G_{12}$$

Os valores de E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12} e ν_{21} podem ser calculados através das equações da micromecânica ou medidos experimentalmente. Deve se observar que os elementos da matriz [S], definidos na Equação 8, só dependem de constantes elásticas E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12} e ν_{21} . Estas constantes definem comportamento elástico ortotrópico de lâminas com reforço unidirecional no sistema (1,2), chamados de eixos locais, eixos principais dos materiais ou eixos materiais.

Em algumas lâminas, o sistema de coordenadas 1,2 não é coincidente com o sistema de coordenadas x,y , chamado de eixos globais (*off-axes*) ou geométricos (longitudinal e transversal). Neste caso, estes sistemas de coordenadas estão defasados (rotacionados) por um ângulo θ , como mostra a Figura 11. Para expressar o estado de tensões nesse novo sistema faz-se uso da matriz de rotação mostrada na Equação 10.

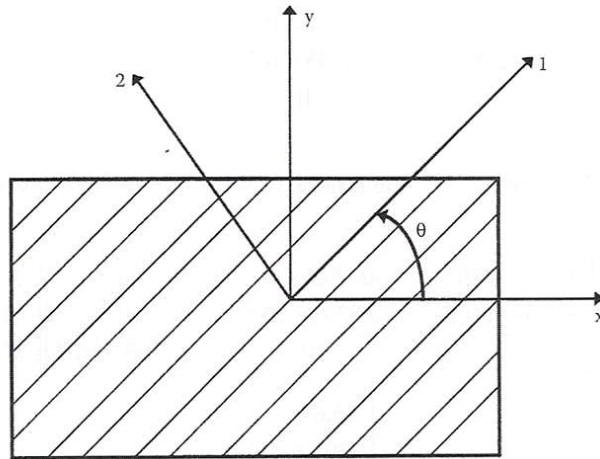


Figura 11: Descrição dos eixos de coordenadas 1,2 e x,y [14]

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 10})$$

onde: $s = \text{sen}(\theta)$ e $c = \text{cos}(\theta)$.

Para expressar os novos tensores de tensão e deformação a partir do sistema local, faz-se uso das Equações 11 e 12.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 12})$$

Assim a equação constitutiva no sistema xy, é dada pela Equação 13:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [T]^T \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 13})$$

Portanto, para definir \bar{Q} no sistema de coordenadas global utiliza-se:

$$\bar{Q} = [T]^{-1} [Q] [T]^T \quad (\text{Eq. 14})$$

Assim, chega-se a:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11}c^4 + Q_{22}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})s^2c^2 + Q_{12}(c^4 + s^4) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}s^4 + Q_{22}c^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3c \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})cs^3 - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})s^2c^2 + Q_{66}(s^4 + c^4) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 15})$$

Pode-se, a partir destas equações obter, por exemplo, a previsão de E_x para um ângulo de orientação particular. Neste caso, substituindo a Equação 7 na primeira expressão da Equação 8, tem-se:

$$E_x = \left[\frac{1}{E_1}c^4 + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) s^2c^2 + \frac{1}{E_2}s^4 \right]^{-1} \quad (\text{Eq. 16})$$

Crítérios de falha são métodos, normalmente empíricos, utilizados para determinar de forma matemática se, sob determinadas condições de carregamento, um dado material irá ou não falhar. Geralmente usa-se um índice de falha, que deve ser inferior à unidade

para considerar que o material não falha, onde o inverso desse índice consiste no coeficiente de segurança. Os principais critérios de falha utilizados em compósitos são:

a) Máxima Tensão: Neste critério, busca-se averiguar, individualmente, se as tensões aplicadas no material superam o valor máximo permitido por ele. Para tanto são realizados três testes, onde ambos devem ser satisfeitos simultaneamente para que a falha não ocorra, sendo:

$$-(\sigma_1^C)_{ult} < \sigma_1 < (\sigma_1^T)_{ult} \quad \text{ou} \quad -(\sigma_2^C)_{ult} < \sigma_2 < (\sigma_2^T)_{ult} \quad \text{ou} \quad -(\tau_{12})_{ult} < \tau_{12} < (\tau_{12})_{ult} \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde:

$$(\sigma_1^T)_{ult} = \text{Resistência à tração na direção 1,}$$

$$(\sigma_1^C)_{ult} = \text{Resistência à compressão na direção 1,}$$

$$(\sigma_2^T)_{ult} = \text{Resistência à tração na direção 2,}$$

$$(\sigma_2^C)_{ult} = \text{Resistência à compressão na direção 2}$$

$$(\tau_{12})_{ult} = \text{Resistência ao cisalhamento no plano 1-2.}$$

b) Máxima Deformação: Critério semelhante ao anterior, porém são testadas as deformações ao invés de tensões. Analogamente, é definido por:

$$-(\varepsilon_1^C)_{ult} < \varepsilon_1 < (\varepsilon_1^T)_{ult} \quad \text{ou} \quad -(\varepsilon_2^C)_{ult} < \varepsilon_2 < (\varepsilon_2^T)_{ult} \quad \text{ou} \quad -(\gamma_{12})_{ult} < \gamma_{12} < (\gamma_{12})_{ult} \quad (\text{Eq. 18})$$

onde:

$$(\varepsilon_1^T)_{ult} = \text{Deformação máxima em tração na direção 1,}$$

$$(\varepsilon_1^C)_{ult} = \text{Deformação máxima em compressão na direção 1,}$$

$$(\varepsilon_2^T)_{ult} = \text{Deformação máxima em tração na direção 2,}$$

$(\varepsilon_2^C)_{ult}$ = Deformação máxima em compressão na direção 2,

$(\gamma_{12'})_{ult}$ = Deformação máxima em cisalhamento no plano 1-2.

c) Tsai-Hill: Este critério busca estimar o índice de falha em um único modo, no entanto não é capaz de prever modos de falha, como fazem os demais critérios, sendo necessário na Equação 19 alternar entre $(\sigma^C)_{ult}$ e $(\sigma^T)_{ult}$, por exemplo.

$$\left[\frac{\sigma_1}{X_1} \right]^2 - \left[\left(\frac{\sigma_1}{X_2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_2}{X_2} \right) \right] + \left[\frac{\sigma_2}{Y} \right]^2 + \left[\frac{\tau_{12}}{S} \right]^2 < 1 \quad (\text{Eq. 19})$$

Onde:

$$\begin{aligned} X_1 &= (\sigma_1^T)_{ult} \text{ se } \sigma_1 > 0 & X_2 &= (\sigma_1^T)_{ult} \text{ se } \sigma_2 > 0 & Y &= (\sigma_2^T)_{ult} \text{ se } \sigma_2 > 0 & S &= (\tau_{12})_{ult} \\ X_1 &= (\sigma_1^C)_{ult} \text{ se } \sigma_1 < 0 & X_2 &= (\sigma_1^C)_{ult} \text{ se } \sigma_2 < 0 & Y &= (\sigma_2^C)_{ult} \text{ se } \sigma_2 < 0 \end{aligned}$$

d) Tsai-Wu: Este critério se baseia na teoria da energia deformacional total adaptada para materiais ortotrópicos e também propõe apenas um modo de falha, mas considera esforços em todas as direções, sendo dado por:

$$H_1 \sigma_1 + H_2 \sigma_2 + H_6 \tau_{12} + H_{11} \sigma_1^2 + H_{22} \sigma_2^2 + H_{66} \tau_{12}^2 + 2H_{12} \sigma_1 \sigma_2 < 1 \quad (\text{Eq. 20})$$

onde:

$$\begin{aligned} H_1 &= \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_1^C)_{ult}} & H_2 &= \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_2^C)_{ult}} & H_6 &= 0 \\ H_{11} &= \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult} (\sigma_1^C)_{ult}} & H_{22} &= \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult} (\sigma_2^C)_{ult}} & H_{66} &= \frac{1}{(\tau_{12})_{ult}^2} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 21})$$

O único componente que não pode ser obtido diretamente dos parâmetros de resistência é o H_{12} , mas ele pode ser determinado experimentalmente aplicando uma tensão biaxial que cause a falha de uma lâmina e substituindo os valores de σ_1 , σ_2 e τ_{12} na Equação 20.

e) Hoffman: Neste critério, Hoffman propôs a utilização do critério de Tsai-Wu, porém dispensando a necessidade de ensaios experimentais para H_{12} , que passa a ser determinado por:

$$H_{12} = -\frac{1}{2(\sigma_1^T)_{ult}(\sigma_1^C)_{ult}} \quad (\text{Eq. 22})$$

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

Os materiais utilizados na fabricação dos compósitos poliméricos foram:

- a) Fibras de curauá: Obtidas de um produtor do estado do Pará.
- b) Solução de Hidróxido de Sódio 5 % em massa.
- c) *Roving* de fibras de vidro ME3050 4000 da empresa Owens Corning.
- d) Resina poliéster insaturada isoftálica (ARAZYN 12.0), cuja especificação encontra-se na Tabela 6.
- e) Iniciador Butanox M-50, na quantidade de 1,5 % em volume.

Tabela 6: Características da resina ARAZYN AZ 12.0, da Ara Ashland [52]

Descrição: Resina poliéster insaturada, isoftálica, baixa viscosidade, não acelerada, alta transparência e coloração amarelada, apresentando ótimas propriedades físicas e químicas.

Variáveis	Unidade	Valores
Viscosidade (25°C)	cP	400 - 600
Tempo de gel*	min.	10 – 15
Pico exotérmico	°C	190
Índice de acidez	Mg KOH/g	10 máx.
Teor de Sólidos	%	55
Teor de estireno	--	--
Densidade (25/4 °C)	--	--
Dureza Barcol*	--	35

*Cura a 25 °C, com 0,5% de octanato de Co 6% + 1,0 g de P-MEK em 100 g de resina seguido de pós-cura de 3 horas a 80 °C.

4.2. Produção dos Compósitos

Para a produção dos compósitos foi utilizada a técnica de moldagem por compressão com o auxílio de um molde retangular metálico (aço inox AISI 304) disponível no Laboratório de Materiais Poliméricos da UFRGS (LAPOL) (Figura 12). Utilizou-se para tal, uma prensa hidráulica marca Marconi com aquecimento e controle/monitoramento digital, modelo MA 098/A 3030 (Figura 13).



Figura 12: Molde de compressão utilizado.



Figura 13: Prensa hidráulica Marconi utilizada.

A fim de promover o alinhamento das fibras de curauá, primeiramente tentou-se utilizar água deionizada, que foi eficaz em manter as fibras igualmente orientadas e paralelas, porém, após a secagem da água, as fibras tornaram-se aglomeradas, o que dificultou a infiltração da resina entre as fibras não permitindo seu molhamento e levando ao surgimento de um grande número de vazios. Assim, o método adotado foi a escovação da fibra de curauá seca que, apesar de resultar em um alinhamento não tão preciso, facilitava a moldagem posterior. Foram moldados compósitos utilizando-se fibras *in natura*, fibras após secagem e fibras após lavagem/secagem/escovamento. Devido à dificuldade encontrada em alinhar as fibras de curauá, optou-se por utilizar a fibra de vidro em forma de *roving* ao invés de tecido unidirecional. Essa escolha visou aproximar os resultados encontrados para compósitos de curauá e vidro e mostrar o quanto o processo de disposição das fibras e moldagem manual prejudica os resultados de resistência. O comprimento e o teor volumétrico de fibras ($\%V_f$) utilizadas foram de 130 mm e de 20 %, respectivamente e as fibras foram dispostas com orientação preferencial unidirecional.

Em uma segunda etapa, foram produzidos compósitos variando-se o ângulo das fibras (15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°), mantendo-se 20 % V_f . As fibras de curauá (tratadas e não tratadas) dispostas unidirecionalmente sofreram um processo de secagem em estufa com circulação de ar, permanecendo a 105 °C por 30 minutos, imediatamente antes da moldagem. O conjunto resina/iniciador foi degasado por 5 minutos em um banho ultrassônico da marca UNIQUE, Modelo USC – 1400A), como mostra a Figura 14.



Figura 14: Equipamento de ultrassom utilizado na degasagem.

A Figura 15 ilustra todo o procedimento experimental adotado neste trabalho. Os compósitos de fibra de vidro foram produzidos seguindo metodologia similar, exceto pela etapa de tratamento/secagem das fibras. Foram moldadas placas planas com dimensões de 150 x 250 x 3 mm utilizando a resina poliéster ARAZYN AZ 12.0 da ARA ASHLAND e o iniciador BUTANOX M-50, na proporção de 1,5 % em volume de resina. A compressão à quente foi realizada sob carga de 3 toneladas, a 95 °C por 70 minutos, seguido de processo de pós-cura a 60 °C por 2 horas.

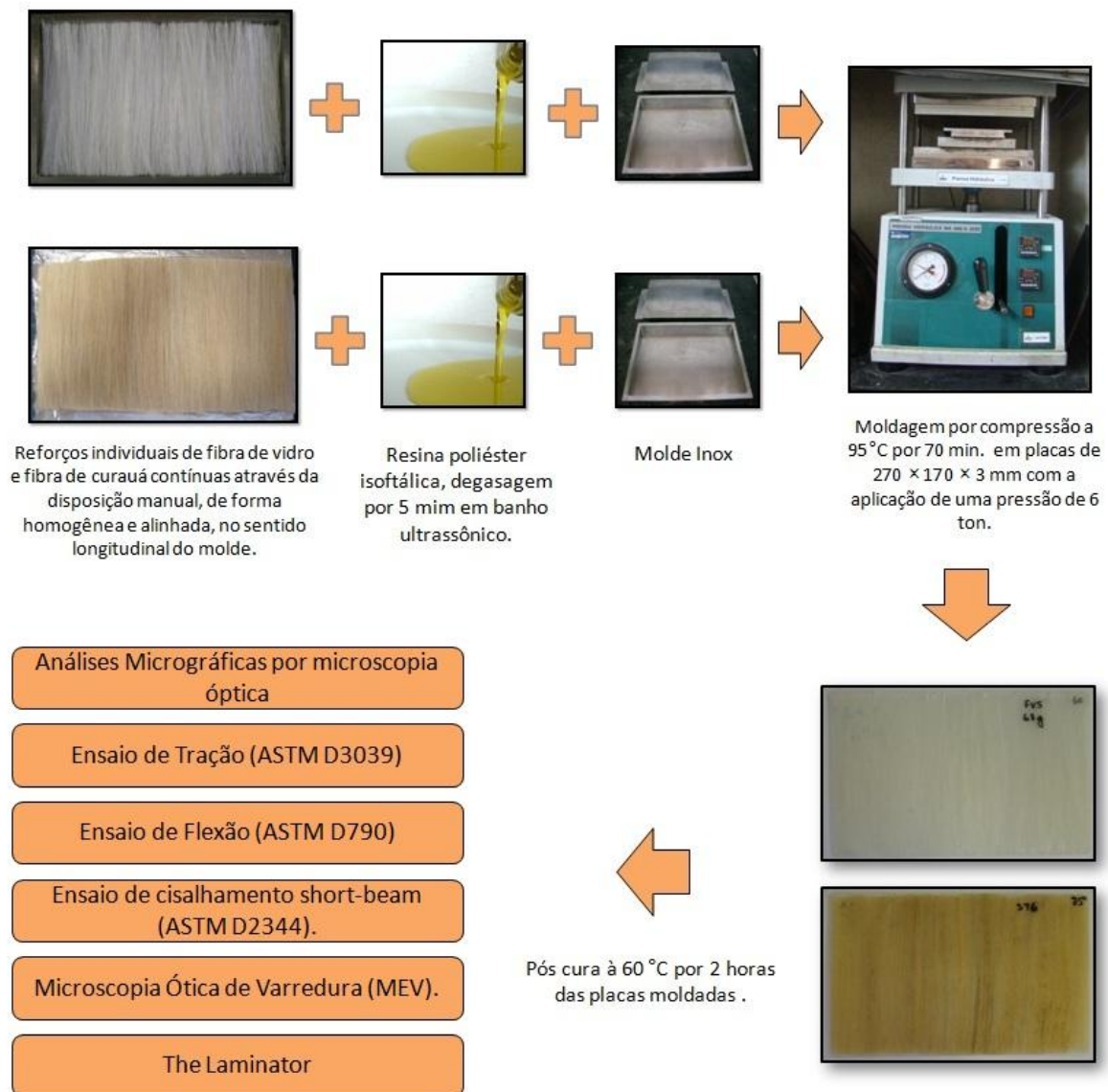


Figura 15: Fluxograma de produção e caracterização dos compósitos.

4.3. Caracterização dos Compósitos

4.3.1. Preparação dos Corpos de Prova

Utilizou-se uma máquina de corte NORTON, modelo TT 200 EM, com disco diamantado, para obter um mínimo de 6 corpos-de-prova (CPs) para cada ensaio, a partir das placas moldadas. Os CPs sofreram então um acabamento final em uma politriz (Pantec/Polipan-U) em busca de uma maior precisão dimensional.

4.3.2. Análises

Analisou-se a seção transversal do compósito obtido para determinar a distribuição das fibras e presença de vazios, com uso do microscópio óptico da marca Carl Zeiss modelo AX10. A caracterização mecânica e fractográfica realizada nos compósitos incluiu:

a) Ensaio de Flexão: Os ensaios de flexão de 3 pontos foram realizados de acordo com a norma ASTM D790 utilizando a máquina universal de ensaios mecânicos EMIC DL3000 com uma célula de carga de 200 KN, disponível na Universidade de Caxias do Sul (UCS). As amostras utilizadas possuíam dimensões de 170 × 12,7 × 3 mm e obtiveram-se os valores de módulo em flexão, resistência à flexão e deformação na ruptura.

b) Ensaio de Tração: os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM D3039, na mesma máquina universal de ensaios mecânicos descrita acima. Obtiveram-se os valores de módulo em tração e resistência à tração. As amostras utilizadas possuíam dimensões de 170 × 25 × 3 mm.

c) Ensaio *Short-beam*: O ensaio *short-beam* foi utilizado para determinar a resistência ao cisalhamento interlaminar, isto é, fora do plano. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D2344, que exige que a dimensão da amostra seja: comprimento (h) = 6 × espessura, e largura (b) = 2 × espessura.

Esse ensaio submete o corpo de prova à flexão, da mesma maneira que um ensaio de flexão comum, porém, diferente deste, o comprimento do corpo de prova é muito pequeno em relação à sua espessura. A razão *s:t* (*span:thickness*) foi mantida em 4:1 como recomendado pela norma para minimizar tensões associadas à flexão (efeitos de tração e compressão) e maximizar a tensão de cisalhamento induzida [53]. A máquina e a célula de carga utilizada foram as mesmas do ensaio de flexão. A resistência *short-beam* foi calculada através da Equação 23, na qual P é a carga máxima registrada, b e h são a largura e a espessura do corpo de prova, respectivamente.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{0,75 \times P}{b \times h} \quad (\text{Eq. 23})$$

Ensaio *short-beam* são muito utilizados para medir a resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS) de materiais compósitos e permitem a identificação do local onde inicia a delaminação e sua forma de propagação. A adesão fibra-matriz e a presença de vazios em compósitos também podem ser indiretamente avaliadas por esse ensaio [54], pois estes têm influência bastante pronunciada na resistência ao cisalhamento interlaminar. Assim, esse teste fornece uma estimativa indireta da qualidade da moldagem [55]. Atualmente, o *short-beam* em três pontos é o método mais utilizado para se observar a falha por cisalhamento que ocorre no plano central do corpo de prova [56], sendo largamente utilizado na caracterização mecânica de compósitos devido à sua simplicidade e à pequena quantidade de material requerida para o ensaio, podendo se produzir muitos corpos de prova a fim de se obter uma descrição estatística confiável [55].

d) Microscopia Eletrônica de varredura (MEV): Analisou-se a região de fratura na amostra após ensaio de tração. Foi necessário recobrir as amostras com ouro para gerar as imagens. O microscópio é da marca JEOL modelo JSM-6060 e utilizou-se uma tensão de 10 KV.

4.4. O Software “The Laminator”

The Laminator (versão 3.6) é um programa de engenharia utilizado para análise de compósitos laminados de acordo com a Teoria clássica de lâminas e laminados. No programa são inseridos dados como propriedades dos componentes por camada de material, resistência dos materiais, orientação das fibras, sequência de lâminas, cargas mecânicas e/ou deformações, temperatura e umidade (análise micro-mecânica), ou então, para a análise macro-mecânica, utilizam-se como dados de entrada, as propriedades da

lâmina. Para ambas é necessária à orientação das fibras na lâmina e a sequência de empilhamento, neste caso utilizou-se apenas uma lâmina. Neste trabalho fez-se um estudo baseado na análise macro-mecânica de lâminas, obtendo como resultado o módulo de elasticidade e as resistências de lâminas com fibras em diferentes orientações.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Aspectos Morfológicos dos Compósitos

A Figura 16 e a Figura 17, mostram micrografias óticas da seção transversal dos compósitos de curauá (fibras sem tratamento) e de vidro, respectivamente. Nessas figuras, é possível visualizar uma distribuição razoável das fibras tendo-se em vista o processo manual de disposição das mesmas.

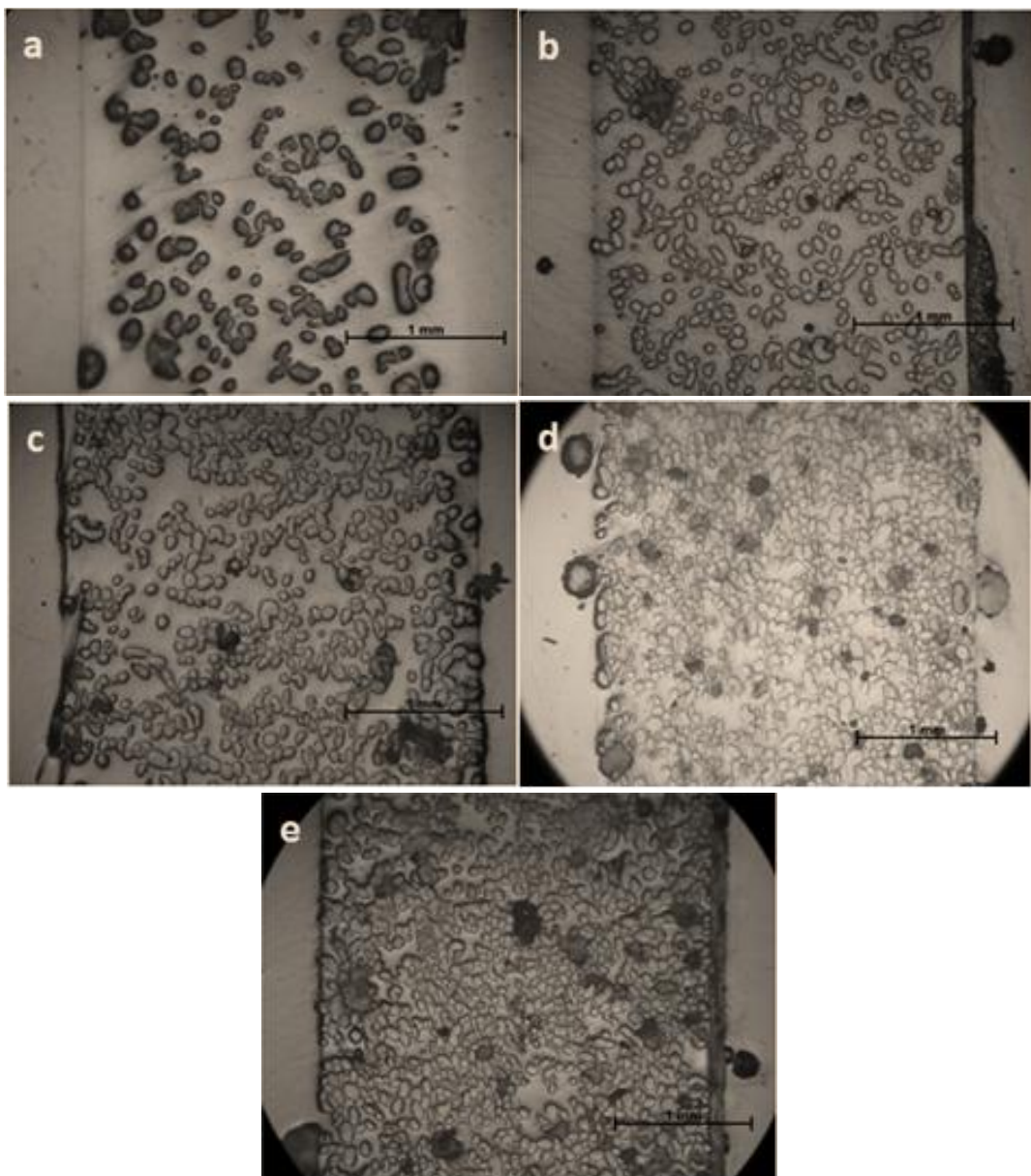


Figura 16: Micrografias da seção transversal de compósitos com fibra de curauá para: a) 10 %, b) 20 %, c) 30 %, d) 40 %, e) 50 % de fibra (Zoom 10x, zoom digital 1,7-2,0).

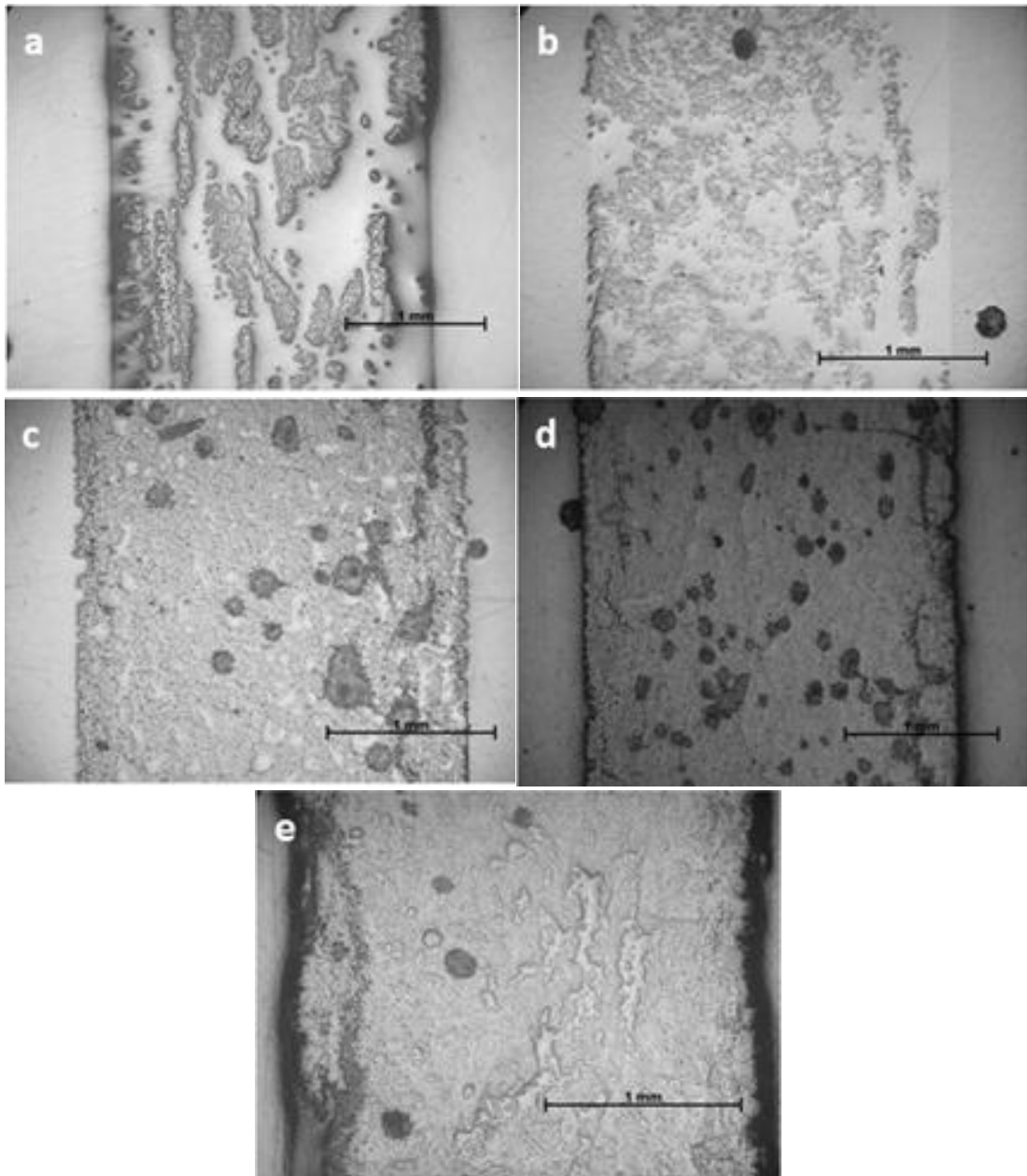


Figura 17: Micrografias mostrando a seção transversal de compósitos reforçados com fibra de vidro para: a) 10 %, b) 20 %, c) 30 %, d) 40 % e e) 50 % de fibra (Zoom 10x, zoom digital 1,7-2,0).

É possível notar também a presença de vazios, indicados pelas manchas mais escuras, que parecem ser mais acentuadas para frações maiores de fibra, entre 40-50 % para a fibra de curauá e entre 30-40 % para a fibra de vidro. Em alguns teores de fibra, as amostras com fibra de vidro mostraram maior presença de vazios quando comparadas aos compósitos de curauá, o que pode ser explicado pelo fato de que o reforço de fibra de

vidro ter sido produzido pela distribuição de finos “feixes” de fibra de vidro em forma de *roving*, paralelas às paredes do molde. Esses feixes podem ter se agrupado durante a compressão do molde, evitando que o reforço fosse molhado pela matriz viscosa de forma adequada.

5.2. Influência do Teor de Fibra nas Propriedades Mecânicas

a) Compósitos de Curauá/Poliéster:

Com relação aos resultados dos ensaios de tração realizados nos compósitos reforçados com fibra de curauá sem tratamento e dispostas á 0° (Figura 18), é possível verificar o aumento inicial da resistência com o aumento do teor de fibra. Ao chegar no ponto de maior resistência, inicia-se um comportamento inverso, com a diminuição da resistência à medida que se aumenta o teor de fibra. Esse aumento da resistência alcança seu ponto mais elevado em aproximadamente 30 % de teor de fibra de curauá. Quantidades maiores de fibra são seguidas por valores mais baixos de resistência mecânica. Em um estudo similar, realizado por Chitataranjan [57] onde se utilizou a erva *Lantana Camara* como reforço natural para compósitos de matriz epóxi, foram encontradas porcentagens semelhantes de teor de fibra para os compósitos com maior resistência.

Nos resultados de flexão realizados nesses compósitos reforçados com fibra de curauá (Figura 19), é possível visualizar um comportamento similar ao de tração. Em um primeiro momento há o aumento da resistência com o aumento do teor de fibra, chegando ao patamar de maior resistência, entre 30-40 %, a resistência diminui para maiores teores de fibra. Em ambos os casos, a resistência diminui para elevados teores de fibra pela inabilidade da técnica de fabricação para os materiais utilizados em evitar o contato fibra-fibra, que diminui a performance mecânica global do compósito pela ausência de interface em regiões do reforço.

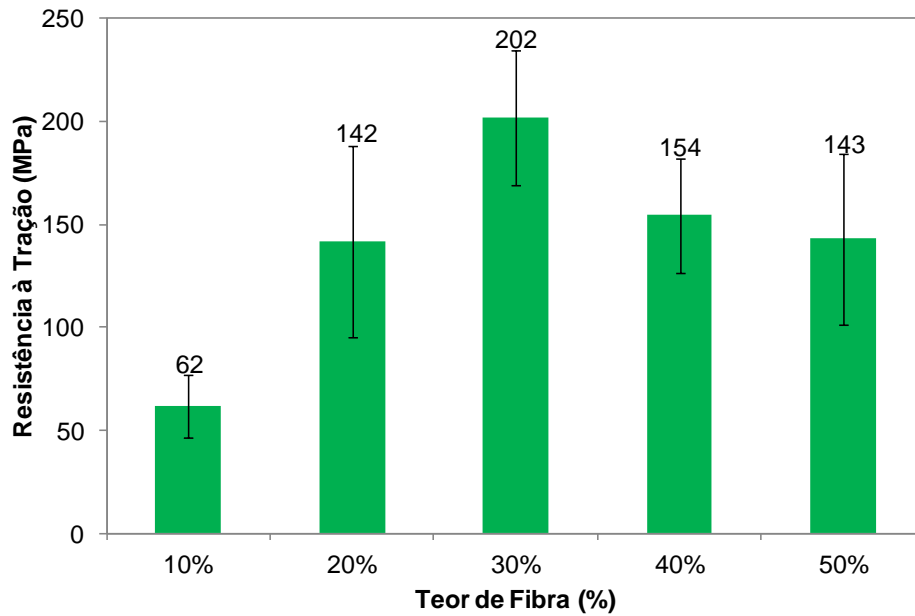


Figura 18: Resistência à tração dos compósitos com diferentes teores de fibra de curauá (orientação 0°).

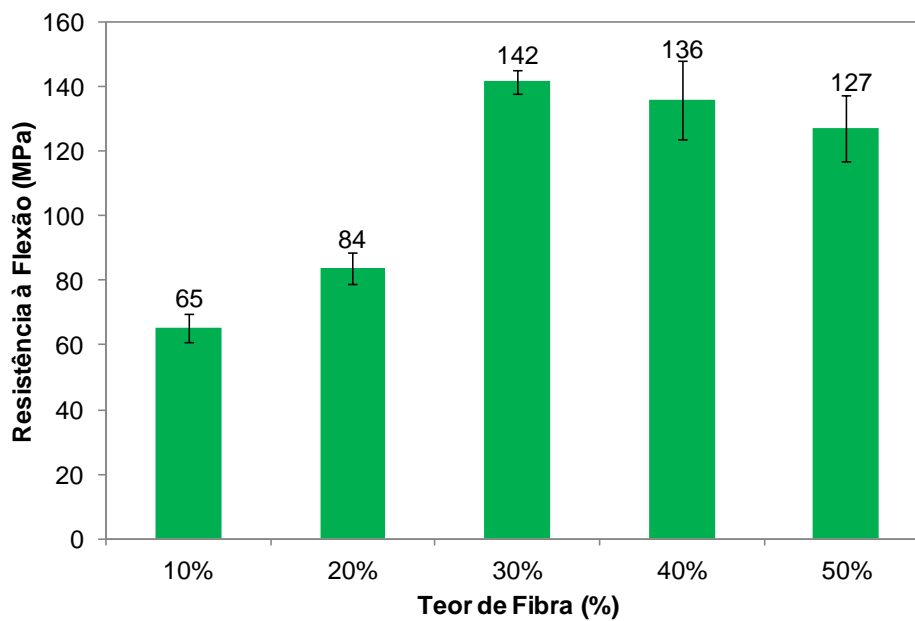


Figura 19: Resistência à flexão dos compósitos com diferentes teores de fibra de curauá (orientação 0°).

b) Compósitos de Vidro/Poliéster:

Os resultados de resistência à tração dos compósitos reforçados com fibra de vidro dispostas à 0° (Figura 20) apresentaram perfil similar ao encontrado nos compósitos reforçados com fibra de curauá. Ou seja, há aumento da resistência com o aumento do teor de fibra até chegar ao ponto de maior resistência, novamente em 30 %, diminuindo a resistência para maiores teores de fibra.

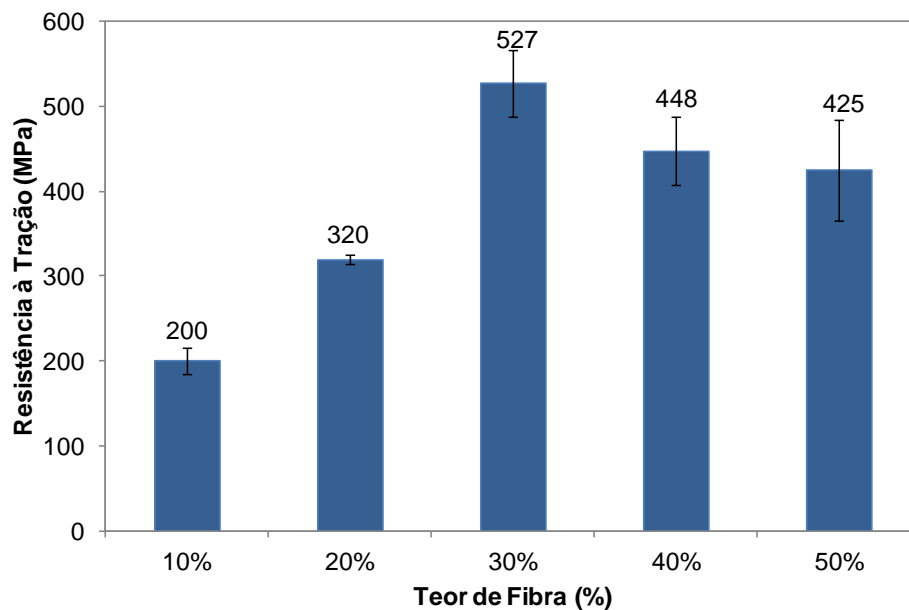


Figura 20: Resistência à tração dos compósitos com diferentes teores de fibra de vidro (orientação 0°).

A variação da resistência à flexão dos compósitos com fibra de vidro apresentou um perfil similar, com um valor ótimo em um teor intermediário de fibras (Figura 21). Porém, neste caso, a maior resistência foi encontrada em 20 % de fração volumétrica de fibras.

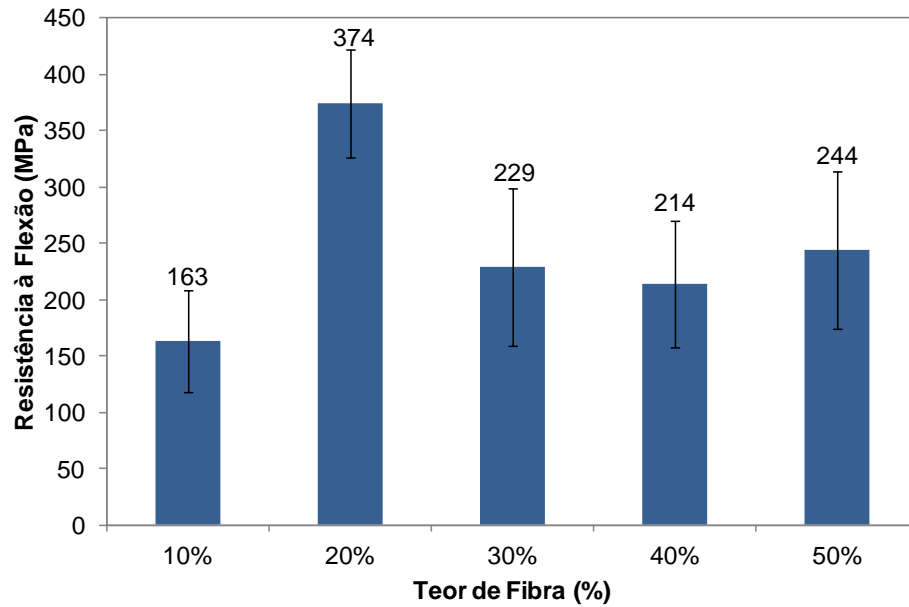


Figura 21: Resistência à flexão dos compósitos com diferentes teores de fibra de vidro (orientação 0°).

As Figura 22 e Figura 23 comparam os valores de tração e flexão respectivamente, de compósitos reforçados com fibras de curauá e compósitos reforçados com fibra de vidro com diferentes teores de fibra.

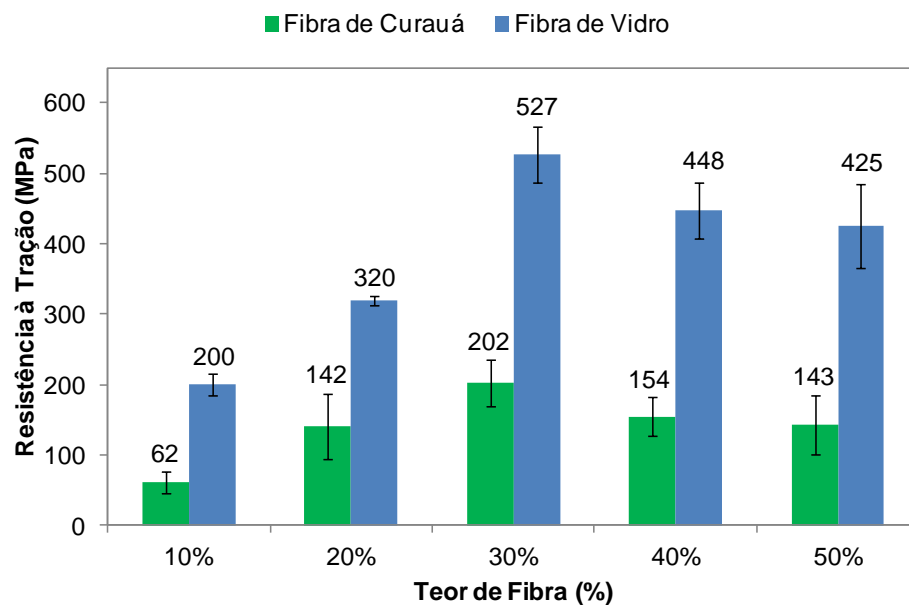


Figura 22: Comparação da resistência à tração de compósitos reforçados com fibras de curauá e compósitos reforçados com fibra de vidro com diferentes teores de fibra (orientação 0°).

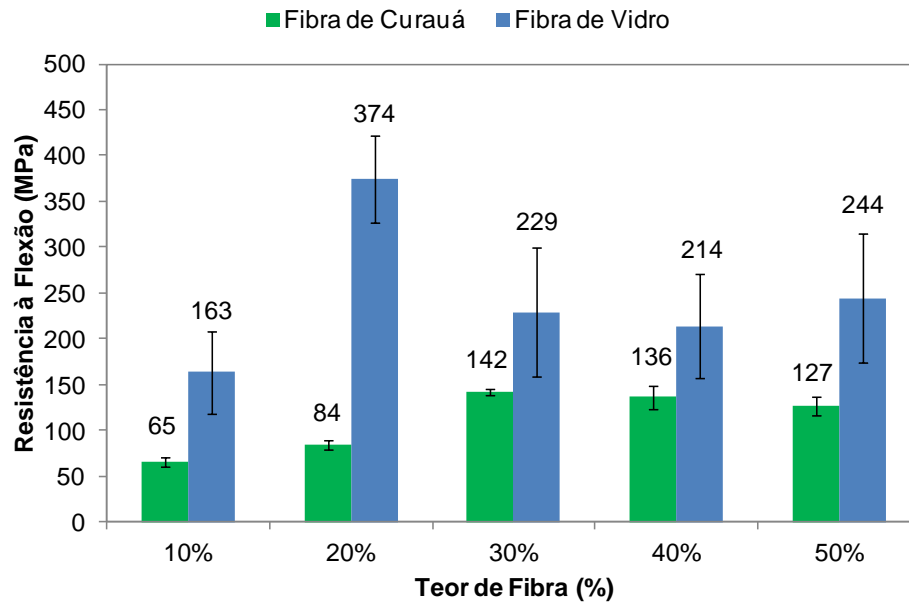


Figura 23: Comparação da resistência à flexão de compósitos reforçados com fibras de curauá e compósitos reforçados com fibra de vidro com diferentes teores de fibra (orientação 0°).

5.3. Influência do Ângulo de Orientação nas Propriedades Mecânicas

a) Fibras de Curauá:

Para avaliar o comportamento dos compósitos em relação ao ângulo de orientação das fibras, utilizou-se gráficos de resistência à tração e módulo de elasticidade versus ângulo de orientação das fibras. A Figura 24a mostra os valores médios da resistência à tração para compósitos reforçados com fibra de curauá (20% de teor de fibra), lembrando que, para a orientação de 0°, ou seja, orientação da fibra no sentido longitudinal ao esforço aplicado, foram utilizadas dois tipos de fibras, não tratadas (*in natura*) e tratadas com uma solução de NaOH. As outras orientações de fibras avaliadas foram: 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90° (i.e. transversal ao esforço aplicado).

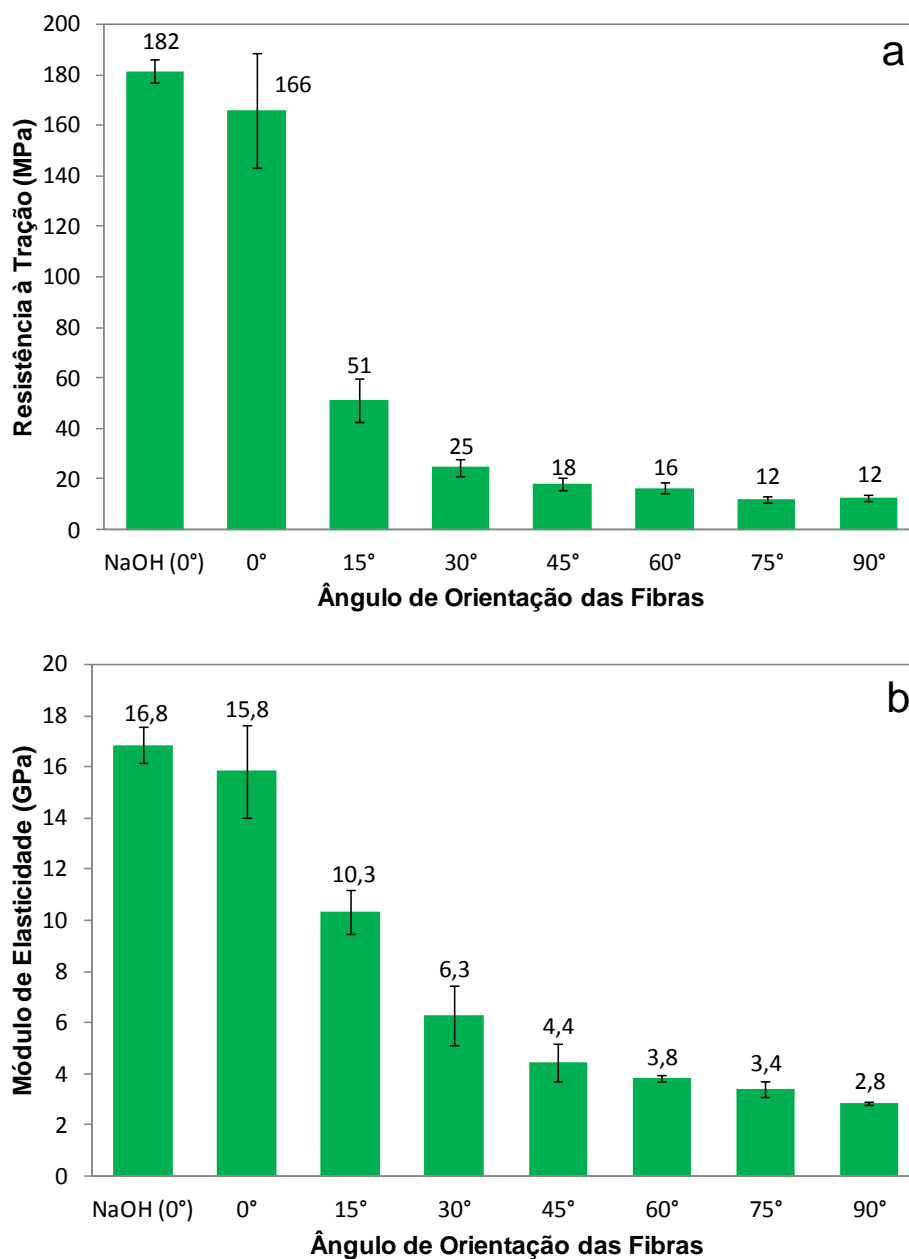


Figura 24: Resistência à Tração (a) e Módulo de Elasticidade (b) para compósitos de curauá ($V_f = 20\%$).

Para os compósitos a 0° de orientação, a resistência à tração foi de 160 MPa para as fibras sem tratamento superficial, e de 180 MPa para as fibras tratadas com solução de NaOH, um aumento de 12,5 %, sendo este o maior valor encontrado nesse estudo para essa fibra. O tratamento de superfície com NaOH, também conhecido como mercerização, é muito utilizado para tratar fibras celulósicas pois causa aumento da tensão superficial e

com isso da molhabilidade das fibras, o que melhora a ligação mecânica entre a matriz e a superfície rugosa das fibras. A mercerização também ajuda no desfibrilamento das fibras, ou seja, sua separação em microfibras, aumentando a área superficial efetiva disponível para o contato com a matriz líquida [33]. De acordo com Mallick [58], muitos compósitos que utilizaram como reforço fibras mercerizadas, obtiveram propriedades mecânicas superiores àqueles compósitos cujo reforço era composto por fibras não tratadas.

Nos compósitos de curauá com orientação de 15° houve uma queda na resistência à tração de aproximadamente 70 % em relação à amostra a 0° , alcançando um valor final de 50 MPa. De 15° para 30° o valor decaiu aproximadamente 42 %, posteriormente estabilizando em torno de 15 MPa para ângulos maiores que 45° . Para os valores de módulo dos compósitos reforçados com curauá (Figura 24b), a orientação de 0° obteve um valor de 15 GPa, decaindo para 10 GPa para a orientação de 15° , uma diminuição de 30 %. De 15° para 30° o decréscimo foi de aproximadamente 20 % (8,2 GPa), mantendo-se posteriormente em aproximadamente 3,5 GPa para ângulos maiores que 60° .

O tratamento superficial realizado na fibra de curauá foi avaliado apenas para a orientação de 0° para comparação com a fibra *in natura*. A partir desse resultado, pode-se esperar para as outras orientações um ganho de resistência na faixa de 10-15 % para fibras tratadas.

A Figura 25 mostra os valores médios da resistência à flexão dos compósitos reforçados com fibra de curauá para diferentes ângulos de orientação das fibras. Novamente, para os compósitos com fibras a 0° , utilizou-se fibras *in natura* ou tratadas com solução de NaOH. Seguindo a tendência encontrada em tração, os compósitos reforçados com fibras tratadas também se mostraram mais resistentes em flexão, apresentando um valor de 156 MPa, 17 % maior que aqueles com fibras não tratadas e a mesma orientação.

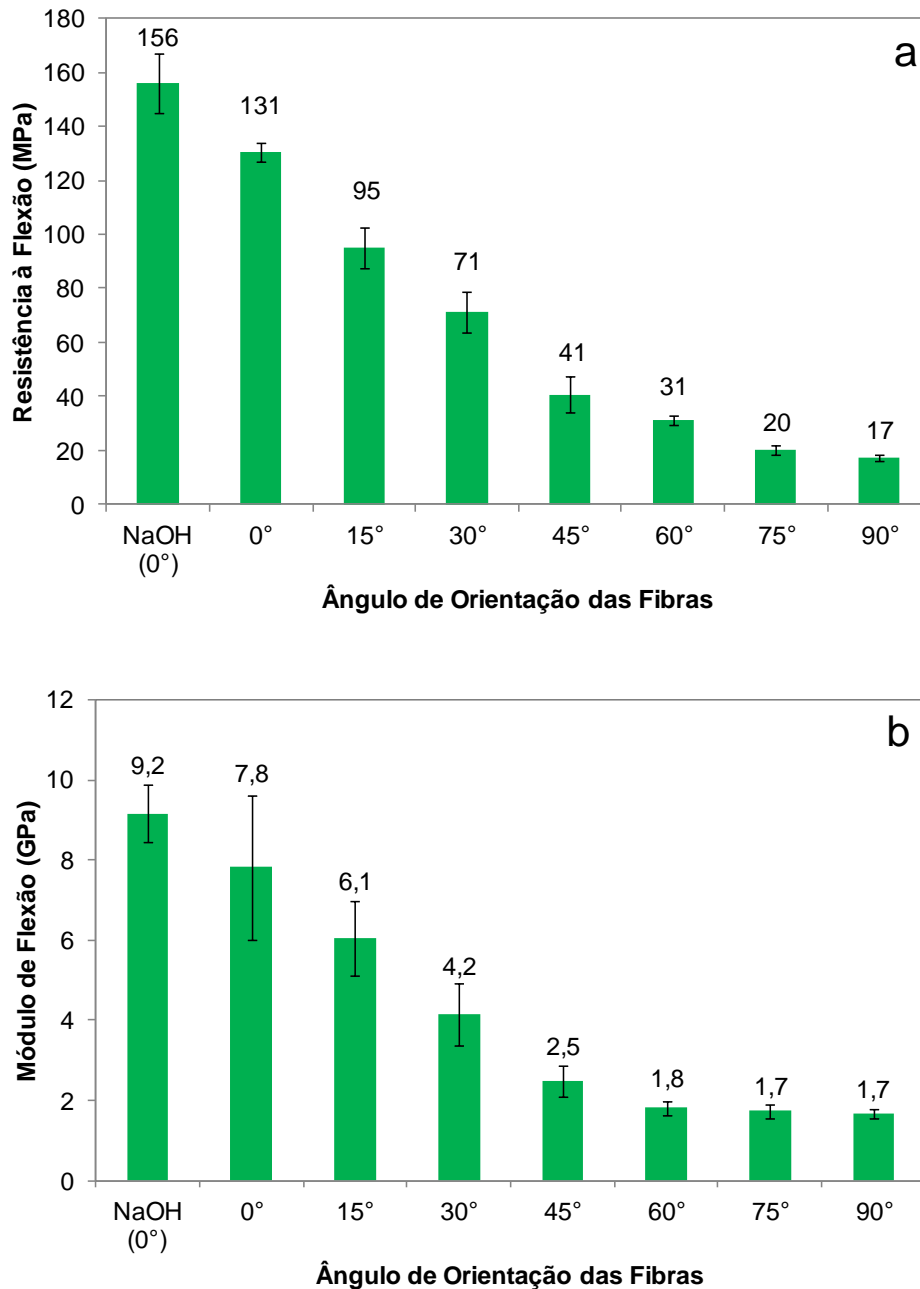


Figura 25: Resistência à flexão (a) e módulo (b) dos compósitos reforçados com fibra de curauá ($V_f = 20\%$).

Nota-se claramente a diminuição da resistência à flexão com o aumento do ângulo de orientação das fibras de curauá. Para compósitos reforçados com fibras não tratadas, a orientação a 0° alcançou o valor máximo de resistência à flexão de 130 MPa, caindo para 95, 71, 40 e 29 MPa para os ângulos de 15°, 30°, 45° e 60°, respectivamente. Para ângulos de 75° e 90°, os valores ficaram entre 16 - 19 MPa. O módulo em flexão dos

compósitos (Figura 25b) mostra comportamento similar, apresentando, porém, uma queda menos acentuada para ângulos maiores. Para o ângulo de 0° , o módulo foi de 7,8 GPa, estabilizando em aproximadamente 1,7 GPa para ângulos maiores que 60° .

Kushwaha et al. (50) relatou comportamento semelhante para compósitos com fibras de bambu tratadas em solução 5 % de NaOH. Foram moldados compósitos com resina epóxi e com resina poliéster, e nestes o aumento foi de 30 % e 37 %, respectivamente, em relação aos compósitos reforçados com fibras não tratadas.

b) Fibras de Vidro:

A Figura 26a mostra a variação dos valores médios de resistência à tração dos compósitos reforçados com fibra de vidro com o ângulo de orientação das fibras. Para compósitos com reforços orientados a 0° , ou seja, no sentido longitudinal ao esforço aplicado, a resistência à tração encontrada foi de 288 MPa, o maior valor obtido para esse tipo de compósito nesse estudo. À medida que se aumenta o ângulo de orientação é possível visualizar uma queda abrupta e bastante significativa nos valores de resistência à tração. Com uma orientação do reforço de apenas 15° em relação ao eixo de esforço aplicado a resistência já diminui 82 % chegando a aproximadamente 53 MPa. A resistência continua a cair e, para uma orientação de 30° da fibra de vidro, alcança 26 MPa, uma queda de 49 % em relação ao 15° de orientação da fibra, ou seja, uma queda real de mais de 90 % em relação à orientação de 0° . Essa queda na resistência à tração acaba chegando a 5 MPa para ângulos maiores que 45° , valor muito abaixo do esperado para esses ângulos e do valor de resistência da resina pura indicado pelo fabricante (45 MPa). Acredita-se que a maciça presença de bolhas na lâmina tenha levado a valores tão pouco significativos.

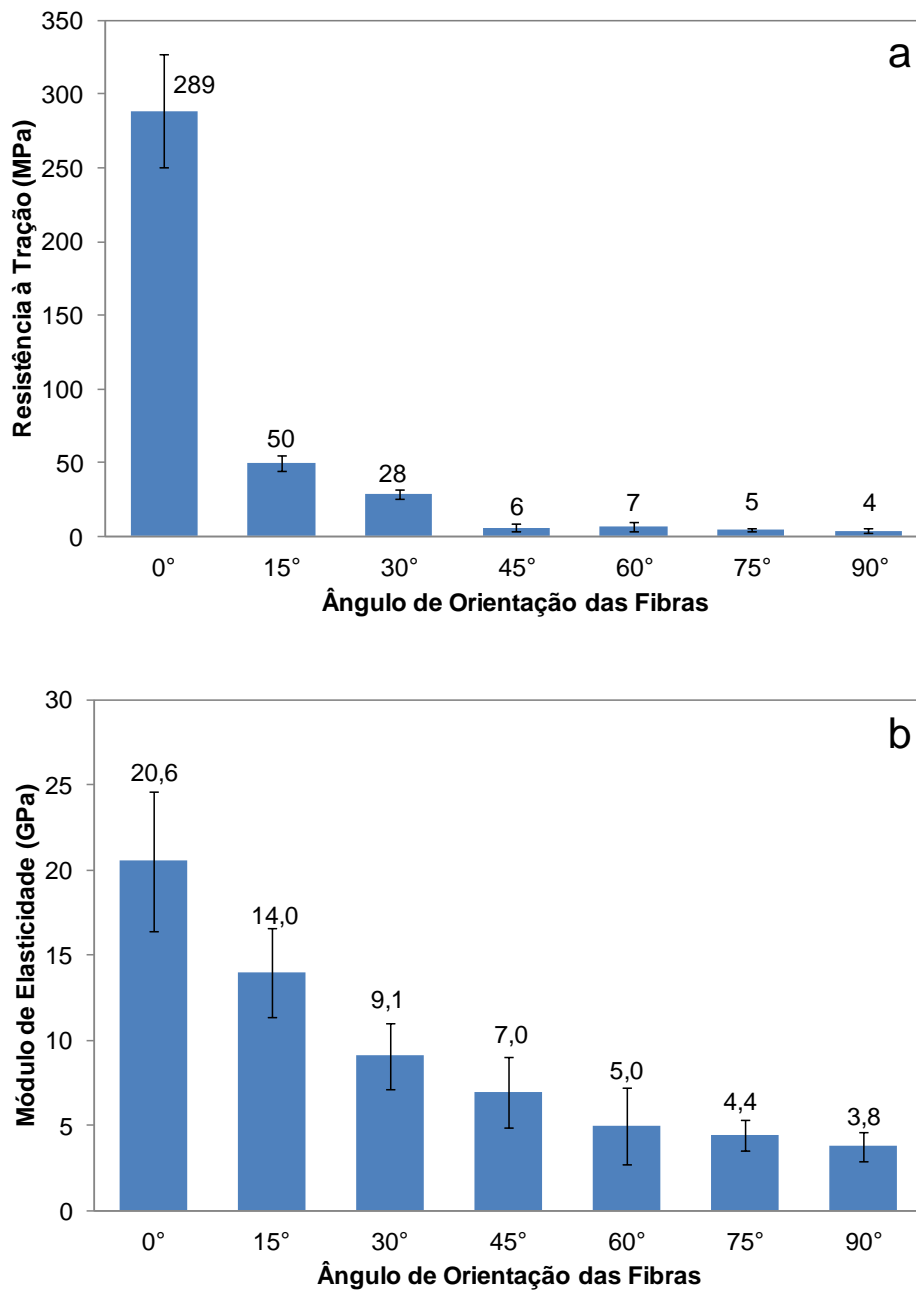


Figura 26: Resistência à tração (a) e módulo (b) para os compósitos de fibra de vidro ($V_f = 20\%$).

Na Figura 26b, apresenta-se a variação do módulo de elasticidade para os mesmos compósitos com fibras de vidro orientados em diferentes ângulos. Para fibras a 0°, os compósitos apresentaram um módulo de 20 GPa, que diminui aproximadamente 32%, atingindo 13,7 GPa, para a orientação de 15°. A 30°, essa queda no módulo já atinge 46%,

chegando a 10,8 GPa. O módulo continua a cair com o aumento do ângulo de orientação, estabilizando em aproximadamente 5,6 GPa para ângulos maiores que 60°.

A Figura 27a mostra os valores médios de resistência à flexão dos compósitos reforçados com fibras de vidro orientadas em diferentes ângulos e vê-se que o comportamento foi similar ao encontrado para os compósitos reforçados com fibras de curauá.

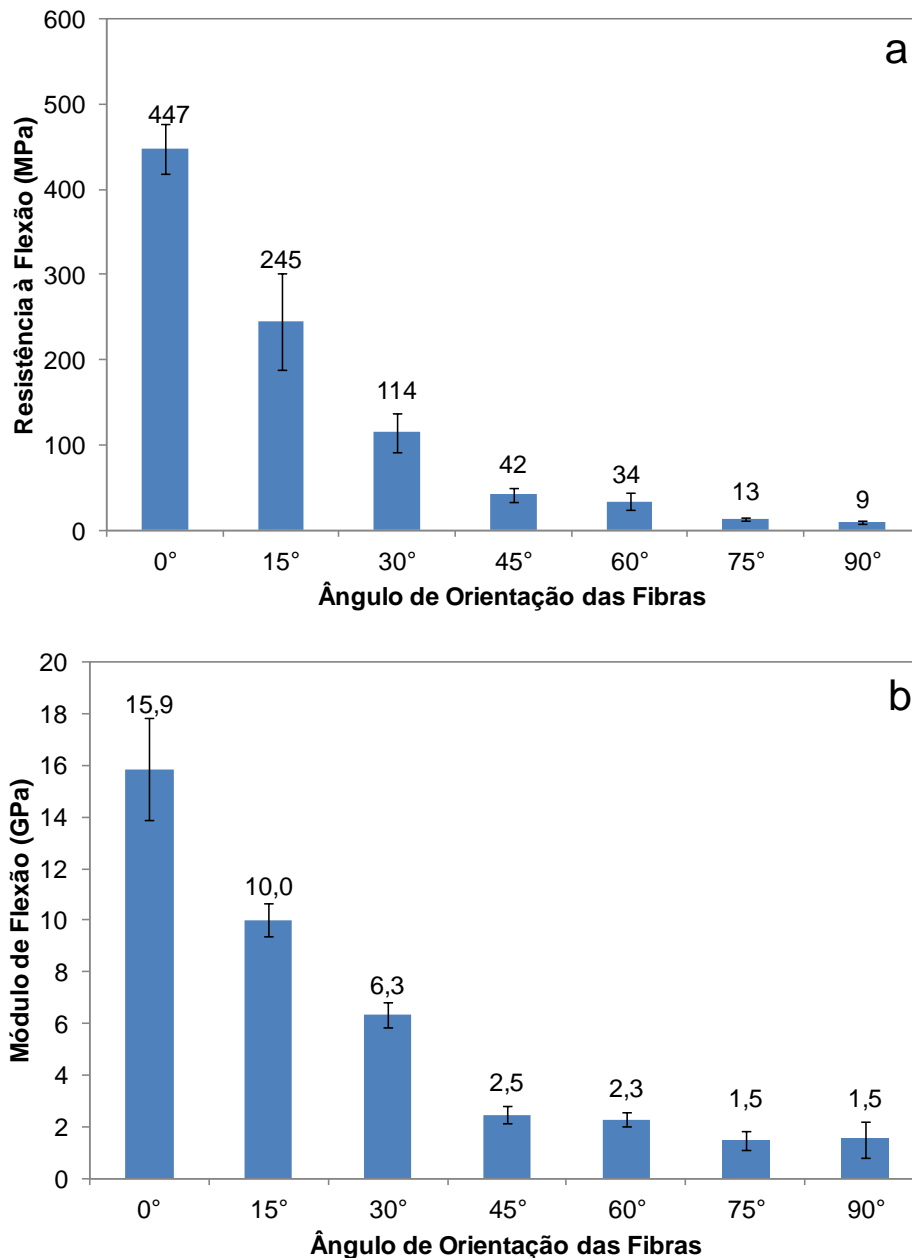


Figura 27: Resistência à flexão (a) e módulo (b) para compósitos reforçados com fibra de vidro ($V_f = 20\%$).

Foi encontrada uma resistência de 447 MPa para a orientação de 0° seguido de uma queda abrupta (de 45 %) para apenas 15°, chegando a aproximadamente 245 MPa. Na orientação de 30°, a resistência é de 114 MPa, uma queda de mais de 75 % em relação ao compósito a 0°. A resistência à flexão eventualmente se estabiliza em 10 MPa para ângulos maiores que 60°. Sharma et al. [59] em um estudo sobre a orientação da fibra de carbono em compósitos matriz polieterimida concluiu que o reforço da fibra aumenta a resistência dos compósitos, mas não em todas as orientações, podendo em alguns casos apresentar deterioração das propriedades.

Na Figura 27b vê-se o Módulo de Flexão dos compósitos de fibra de vidro. Para fibras orientadas a 0°, os compósitos apresentaram um módulo de 17,2 GPa. Com o aumento do grau de orientação da fibra para 15°, o módulo de elasticidade diminuiu aproximadamente 42 %, atingindo um valor de 10 GPa, e, para 30°, essa queda no módulo atinge 65 %, chegando a 6 GPa. O módulo eventualmente estabiliza em aproximadamente 1,5 GPa para ângulos maiores que 60°.

5.4. Ensaio *Short-Beam*

A Figura 28 mostra as curvas representativas de força versus deslocamento obtidas no ensaio de *short-beam* (ILSS) para compósitos reforçados com fibra de curauá e compósitos reforçados com fibra de vidro onde se variou a fração de fibras entre 10 – 50 % tendo a fração de 30% os melhores resultados para ambas as fibras. A falha das amostras ocorreu através do cisalhamento interlaminar influenciados pela flexão, *folding* e descolamento das fibras (*pull out*). Esses efeitos parecem ser aumentados devido à fraca adesão superficial das fibras naturais com a matriz polimérica, podendo alterar o padrão das curvas para os compósitos de curauá [60].

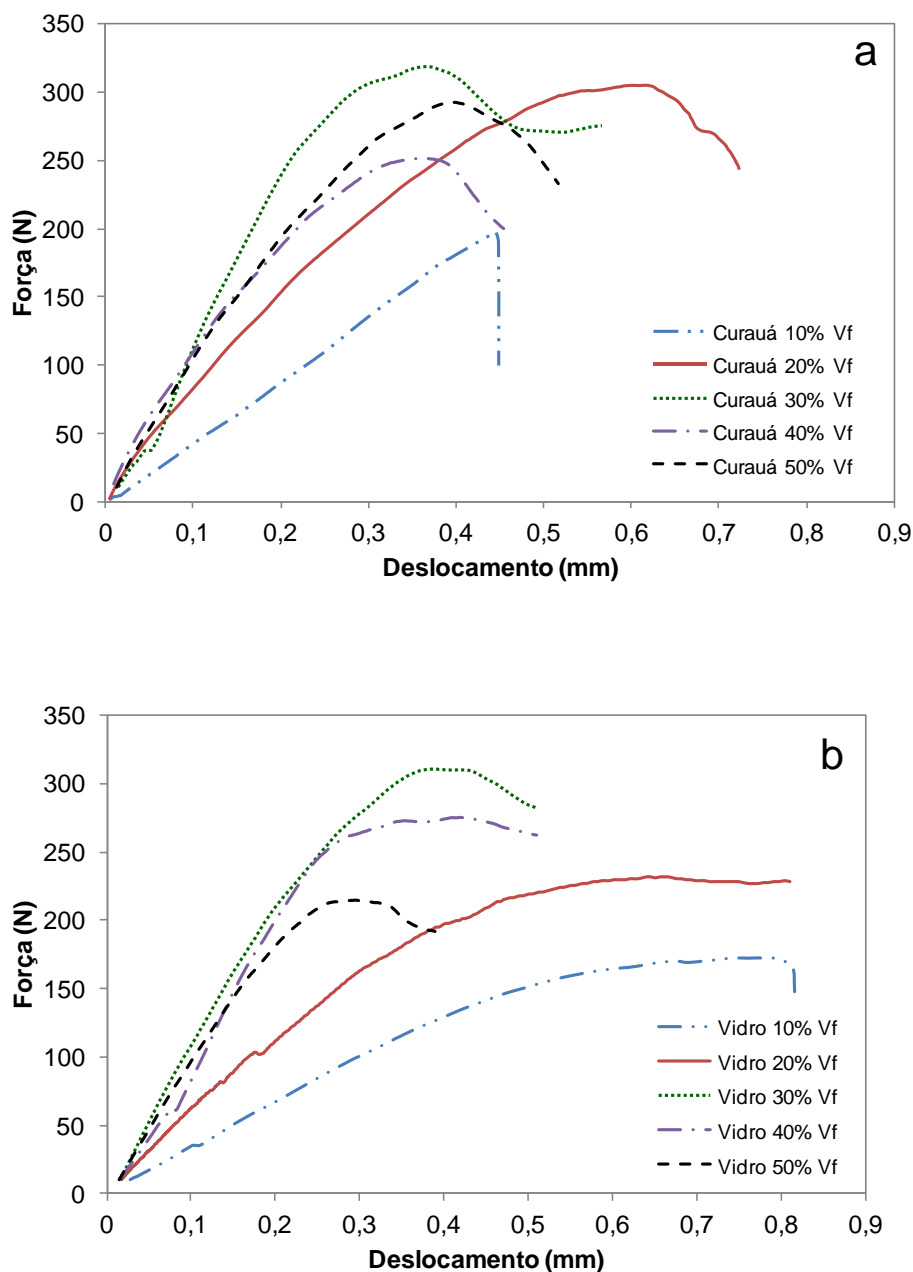


Figura 28: Curvas de ILSS obtidas para diferentes teores de fibra de compósitos curauá/poliéster (a) e vidro/poliéster (b).

Neste ensaio além do tipo de reforço também variou-se a orientação e fração de fibra para cada reforço. A Figura 29 mostra as curvas representativas de força versus deslocamento obtidas no ensaio de *short-beam* (ILSS) para compósitos reforçados com fibra de curauá e compósitos reforçados com fibra de vidro onde se manteve o teor de

reforço de 30% mas se variou o ângulo das fibras entre 0° e 90°. Os melhores resultados foram encontrados para orientações de 0° para ambas as fibras.

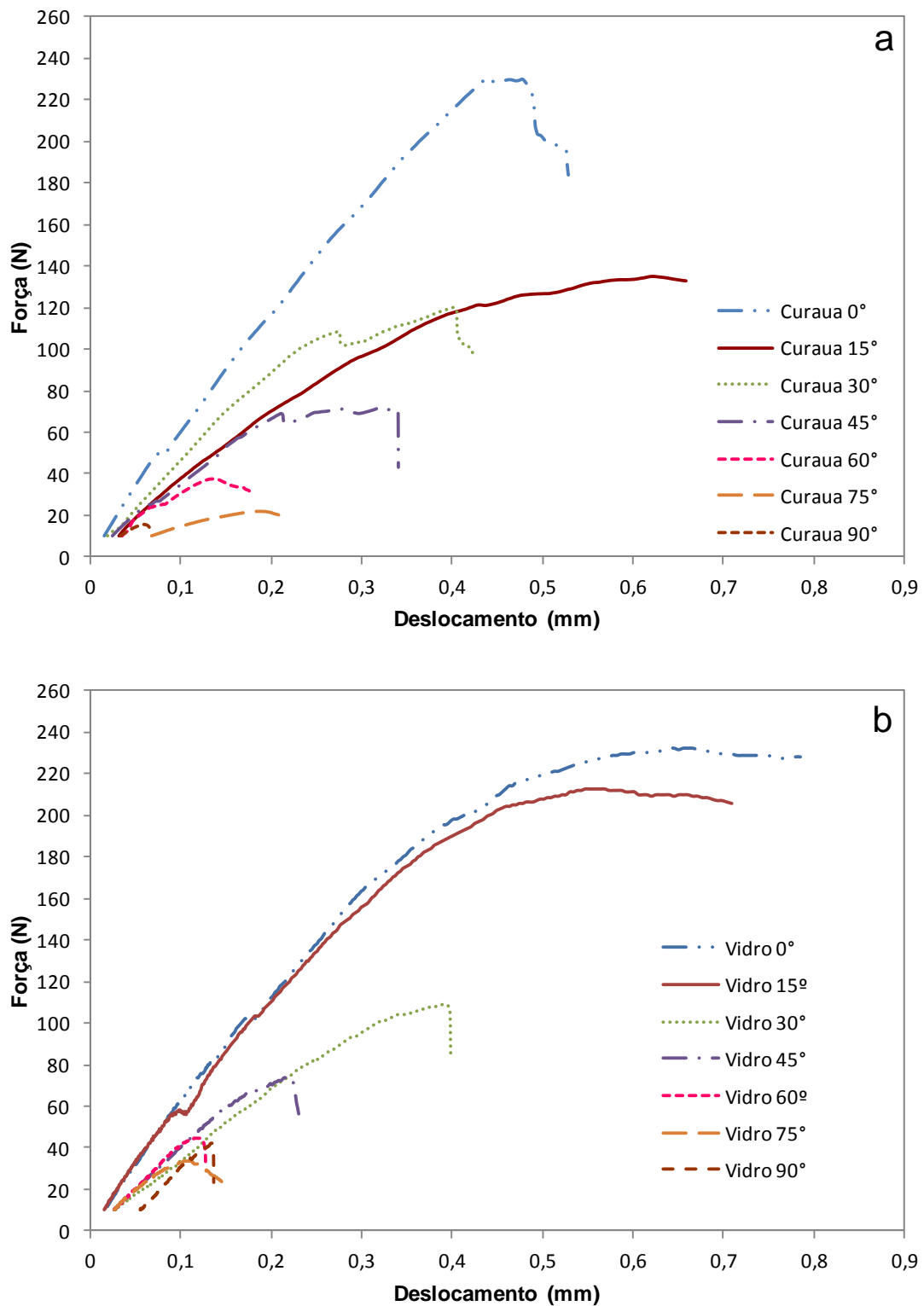


Figura 29: Curvas de ILSS obtidas para diferentes orientações de fibras de compósitos curauá/poliéster (a) e vidro/poliéster (b).

Lembra-se aqui que a teoria clássica de vigas afirma que a distribuição da força de cisalhamento através da espessura da amostra é uma função parabólica que é simétrica em relação ao eixo central “neutro” (força de cisalhamento máxima), caindo para zero nas faces de compressão e tração. Contudo, o campo real de aplicação da força é normalmente dominado pela concentração de tensão perto da área na qual a carga está em contato com a amostra [61].

A Figura 30 mostra a variação dos valores de resistência *short-beam* em relação ao volume de fibra de curauá e de vidro. É possível notar para os compósitos de vidro que a resistência aumenta de 10 % a 30 %, alcançando um valor máximo de 20,7 MPa, e então decai para teores maiores de fibra. Para os compósitos de curauá, o comportamento foi similar, as amostras mostraram uma maior resistência para frações de 30 % de fibra, alcançando uma resistência máxima de 17,1 MPa, com valores abaixo daqueles encontrados para a fibra de vidro.

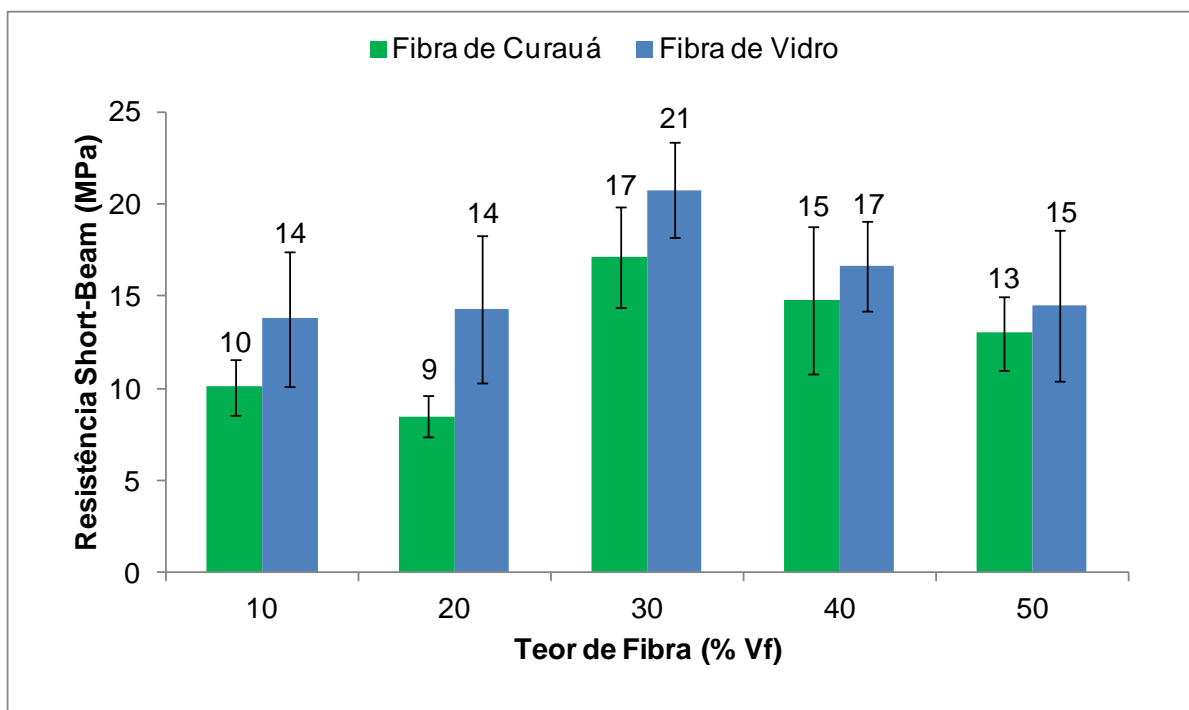


Figura 30: Variação da resistência *short-beam* com o teor de fibra.

A resistência *short-beam* também é influenciada pela orientação da fibra como mostra a Figura 31. Para orientações de fibra de 0° a resistência mostra-se máxima, e bem acima das outras orientações (15°, 30° etc.), tanto para os compósitos de curauá como para os de vidro. Diferentemente dos compósitos reforçados com curauá que apresentaram uma maior queda entre 0° e 15°, os compósitos reforçados com fibra de vidro mostraram uma queda de resistência mais suave. A partir de 30°, a queda de resistências obtida para ambas as fibras é similar. A resistência *short-beam* depende primeiramente das propriedades da matriz e da adesão na interface fibra/matriz não sendo tão dependente das propriedades das fibras [62].

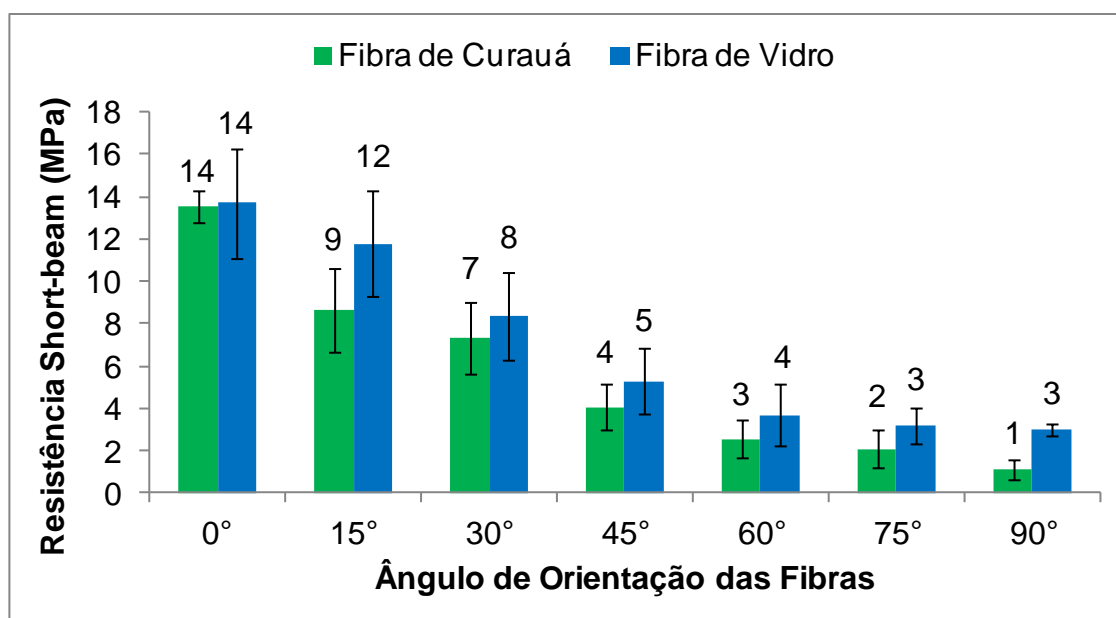


Figura 31: Valores médios de resistência *short-beam* para compósitos reforçados com fibra de curauá e de vidro.

Ahmed et al. [62] obteve um valor de ILSS de 13,9 MPa para compósitos juta/poliéster com 36 % de fração de fibra, valor similar ao encontrado nesse trabalho para compósitos de curauá com frações de fibra no intervalo de 30 % e 40 % (17,1 e 14,8 MPa),. Para os compósitos de fibra de vidro, o valor máximo encontrado foi de 20,7 MPa, abaixo do reportado em Mathews e Rawlings [63]. Kim et al. [61] encontrou

valores de 30-75 MPa para o mesmo tipo de fibra de vidro mas com uma matriz diferente, menos suscetível a vazios e produzido por outro processo. Wisnow et al. (1996) reportou uma redução no ILSS para compósitos unidirecionais vidro/epóxi causados por vazios grandes pontuais (diâmetro de 3 mm) e vazios pequenos distribuídos (diâmetro de 0,28 mm). Esses vazios agem como iniciadores de falhas e trincas quando submetidos a forças de cisalhamento. A fim de atingir valores maiores de ILSS, John et al. [64] sugeriu mudar o tipo de resina de modo a melhorar a interface fibra/resina.

5.5. Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 32 (a)(b) mostra imagens de microscopia eletrônica de varredura das fibras de curauá sem tratamento. Como outras fibras naturais, é possível visualizar o conjunto de pequenas fibrilas que, agrupadas através da pectina e outros compostos celulósicos, formam a estrutura principal da fibra [4] [65] [66]. As fibrilas encontradas nas imagens apresentaram um diâmetro médio de 3 μm formando uma fibra com diâmetro médio de 35 μm . Na Figura 32 é possível perceber que o diâmetro das fibrilas não se altera, contudo, o aglomerado que forma a fibra é bastante heterogêneo, nesse caso apresentando um diâmetro de até 90 μm . Como outras fibras naturais, a variabilidade no diâmetro da fibra e do lúmen possuem uma grande influência nas propriedades mecânicas [67].

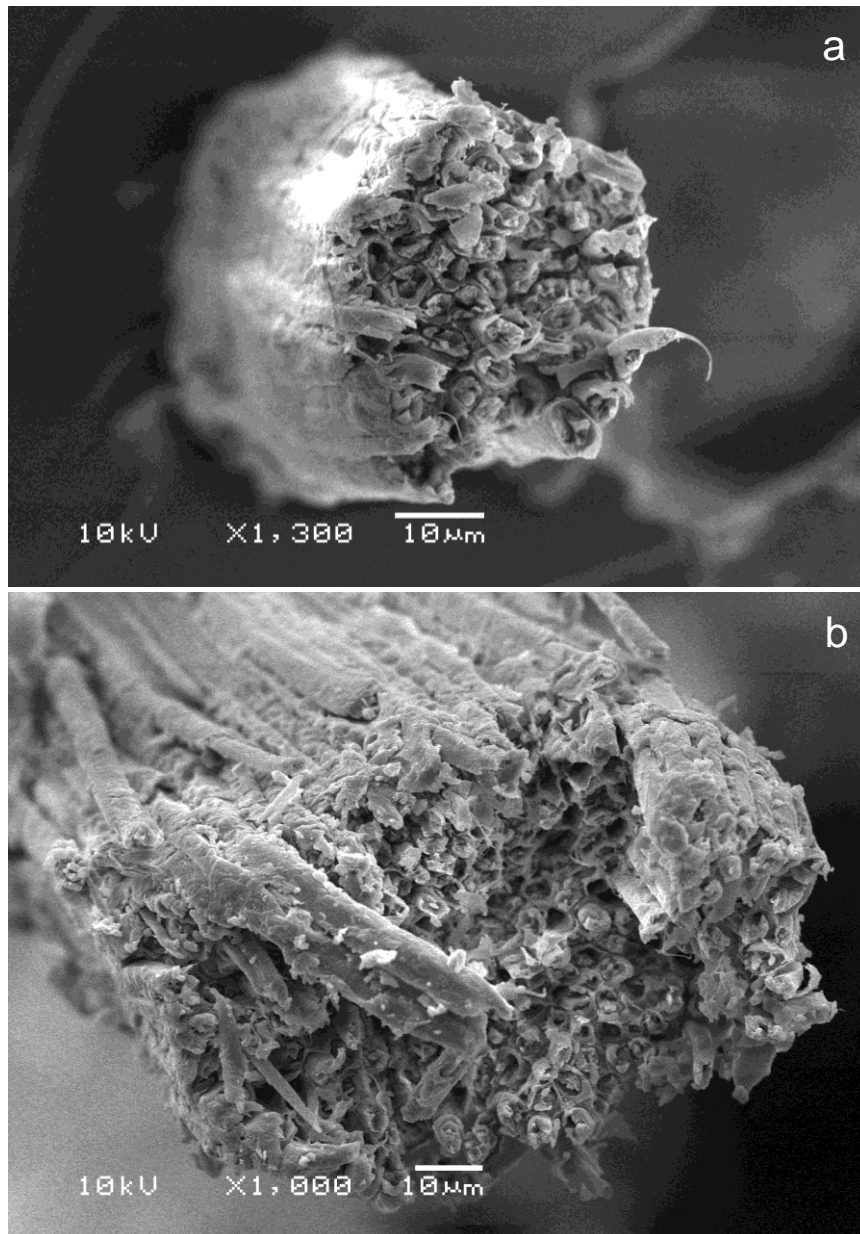


Figura 32: MEV da fibra de curauá com aumento de 1300x (a) e de 1000x (b).

A Figura 33 mostra a microscopia eletrônica de varredura feita na superfície fraturada de um compósito matriz poliéster reforçado com fibras de curauá sem tratamento. Nota-se nessa microscopia a fraca adesão da fibra com a matriz, através do aparecimento de áreas de *pull-out*. Monteiro et al. [68] avaliou compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras longas de curauá encontrando valores de resistência à flexão até 3 vezes menores que o esperado pela regra das misturas, e atribuiu essa

diferença a diversos fatores, como a concentração de tensões na interface fibra/matriz provocada pelas microfibrilas formadoras da fibra.

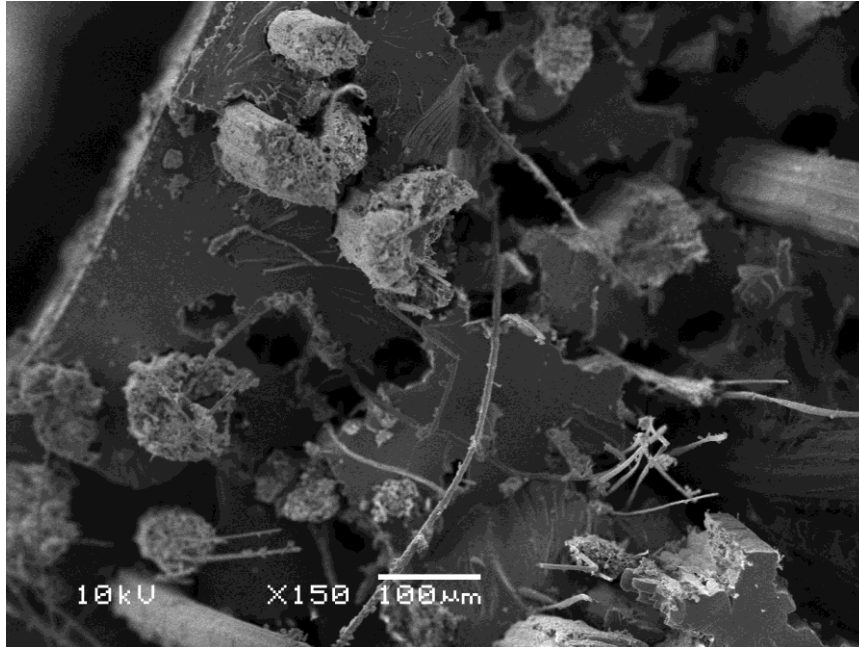


Figura 33: MEV do compósito de curauá/poliéster com aumento de 150x.

A Figura 34 (a)(b) mostra imagens de microscopia eletrônica de varredura com um aumento de 350x e 1100x, respectivamente, da superfície de fratura do compósito reforçado com fibra de vidro. Nota-se a homogeneidade da fibra de vidro quanto ao seu diâmetro, aproximadamente 12 μm . Diferentemente dos compósitos reforçados com fibra de curauá, os reforçados com fibra de vidro não apresentam áreas de *pull-out*. Isso se deve principalmente à boa interface entre fibra/matriz, resultado do tratamento superficial que a fibra de vidro recebe quando é produzida.

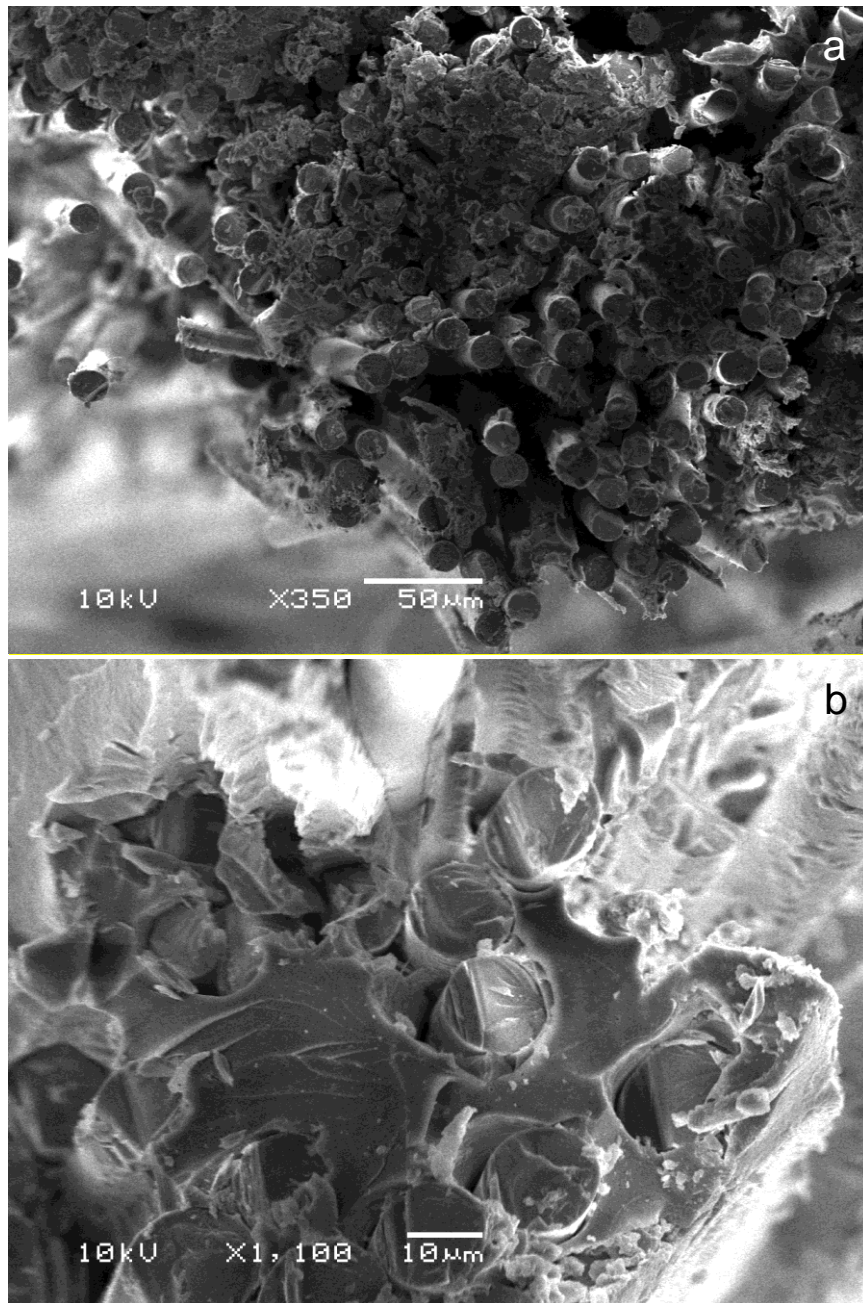


Figura 34: MEV do compósito de vidro com aumento de 350x (a) e de 1100x (b).

5.6. Análise Micro- e Macro-Mecânica

Os dados utilizados na análise mecânica teórica utilizando o software *The Laminator* foram:

Fibra de Curauá: Módulo longitudinal (E_1) = 21 GPa; Módulo transversal (E_2) = 2,8 GPa, Módulo de cisalhamento (G_{12}) = 4,7 GPa; Coeficiente de Poisson (ν_{12}) = 0,25, Resistência à tração (σ_{1T}) = 580 MPa, Resistência à compressão (σ_{1C}) = 350 MPa, Massa específica (ρ) = 1,45 g/cm³. Esses dados foram obtidos das referências [32], [69], [39].

Fibra de Vidro: $E_1 = 72,5$ GPa; $E_2 = 72,5$ GPa, $G_{12} = 27,6$ GPa, $\nu_{12} = 0,22$, $\sigma_{1T} = 2400$ MPa, $\sigma_{1C} = 1550$ MPa, $\rho = 2,5$ g/cm³. Esses dados foram obtidos das referências [70], [71].

Resina Poliéster: $E = 4,3$ GPa, $G = 4,27$ GPa, $\nu = 0,353$, $\sigma_T = 45$ MPa, $\sigma_C = 55$ MPa, Resistência ao cisalhamento (τ) = 41,9 MPa, $\rho = 1,15$ g/cm³ [72].

Nesta dissertação, fez-se um estudo baseado na análise micro-mecânica de compósitos, obtendo-se como resultado os módulos de elasticidade e as resistências de lâminas com fibras em diferentes orientações, como exemplificado na Figura 35.

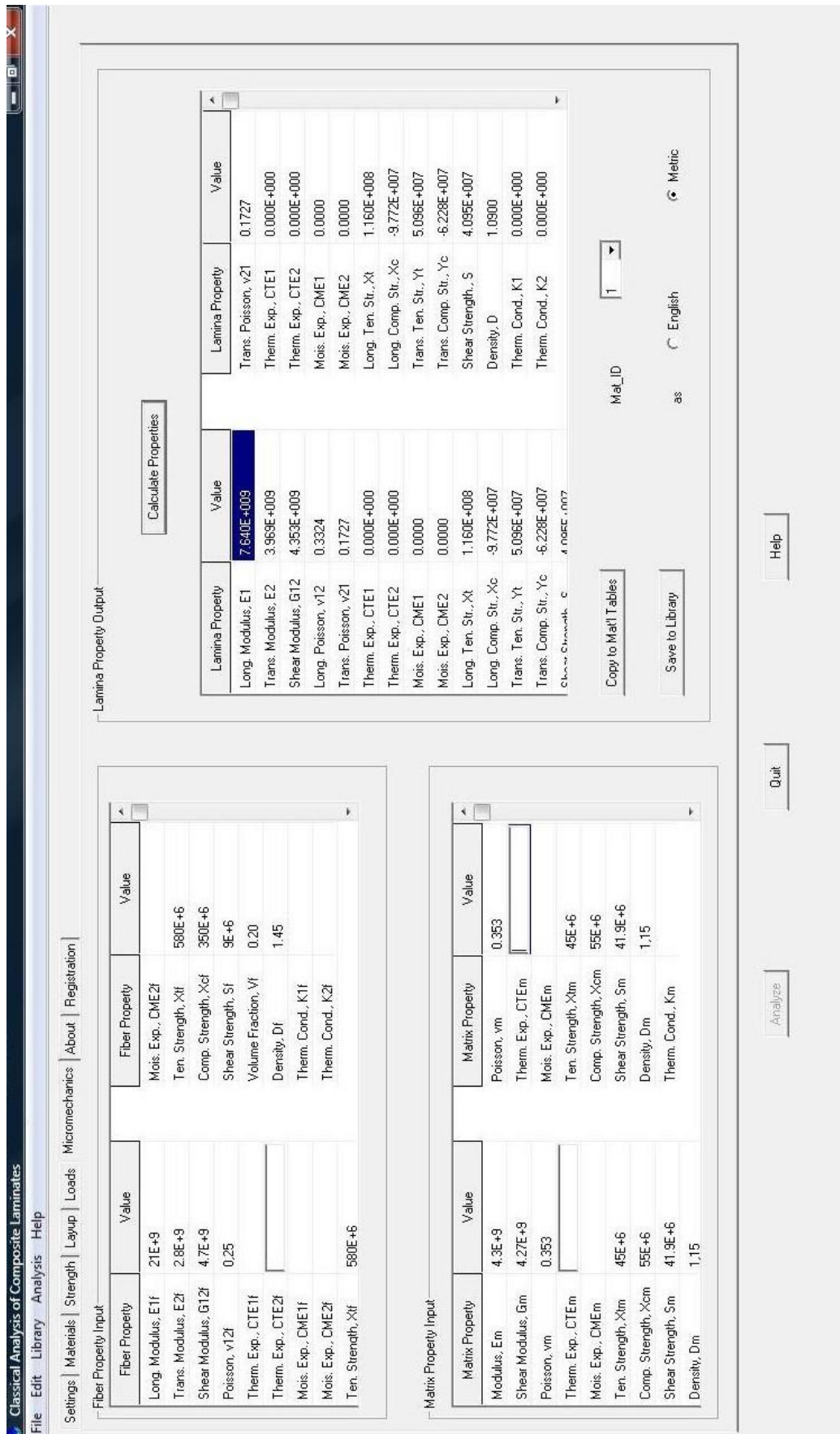


Figura 35: Propriedades da lâmina inseridas no software *The Laminator*.

A Tabela 8 mostra os resultados experimentais e resultados da simulação para compósitos reforçados com fibras de vidro, utilizando o software *The Laminator* para uma única lâmina de 3 mm de espessura com diferentes ângulos de orientação de reforço.

Tabela 7: Resultados encontrados para resistência e módulo de tração para compósitos de fibra de vidro.

Vidro	Critério de falha	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Resistência σ_{xT} (MPa)	Máxima tensão	480,0	132,6	76,5	66,3	46,1	37,0	34,5
	Máxima deformação	335,8	132,6	76,5	66,3	48,1	37,4	34,5
	Tsai-Hill	480,0	124,8	66,7	47,8	39,5	35,7	34,5
	Hoffman	480,0	135,7	68,8	48,2	39,5	35,7	34,5
	Tsai-Wu	480,0	140,9	71,0	49,3	40,0	35,8	34,5
	<i>Experimental</i>	<i>288,8</i>	<i>49,6</i>	<i>28,4</i>	<i>6,0</i>	<i>6,6</i>	<i>4,6</i>	<i>3,9</i>
Módulo de elasticidade E_x (GPa)	Estimado	17,9	17,3	15,1	11,8	9,0	7,4	6,9
	<i>Experimental</i>	<i>20,6</i>	<i>14,0</i>	<i>9,1</i>	<i>7,0</i>	<i>5,0</i>	<i>4,4</i>	<i>3,8</i>

Para compósitos reforçados com fibra de vidro, quando se compara os resultados experimentais com aqueles encontrados através da simulação, é possível perceber uma grande diferença entre os valores, principalmente quanto aos de resistência. Para os valores de módulo de elasticidade a diferença cai consideravelmente, mostrando faixas mais similares. Essa divergência foi atribuída principalmente aos defeitos encontrados na lâmina usada para testes experimentais, com uma parcela pouco significativa dos dados de entrada específicos dos materiais que de fato foram utilizados.

Para compósitos de fibra de vidro, o critério de falha que mais se assemelha aos resultados experimentais é o Critério de Máxima Deformação, onde as deformações as quais é submetida a lâmina são transformadas em deformações nos eixos locais, havendo

falha no caso de quaisquer das deformações, normais ou de cisalhamento, nos eixos locais da lâmina igualar ou exceder as deformações máximas correspondentes da lâmina unidirecional. A queda brusca de resistência experimentalmente para ângulos maiores que 15° foi atribuída principalmente a dificuldade de alinhamento das fibras e defeitos encontrados na matriz (vazios, bolhas e etc.).

A Tabela 8 mostra os resultados para compósitos reforçados com fibras de curauá, utilizando o software *The Laminator* para uma única lâmina de 3 mm de espessura com diferentes ângulos de orientação de reforço.

Tabela 8: Resultados encontrados para resistência e módulo de tração para compósitos de fibra de curauá.

Curauá	Critério de falha	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Resistência σ_{xT} (MPa)	Máxima tensão	190,0	163,8	94,6	81,9	67,9	54,6	51,0
	Máxima deformação	190,0	163,8	94,6	81,9	70,9	55,1	51,0
	Tsai-Hill	190,0	127,6	82,7	63,8	55,5	51,9	51,0
	Hoffman	190,0	138,6	89,7	67,1	56,7	52,2	51,0
	Tsai-Wu	190,0	143,8	94,7	70,1	58,1	52,6	51,0
	<i>Experimental</i>	<i>166,0</i>	<i>51,1</i>	<i>24,7</i>	<i>18,4</i>	<i>16,5</i>	<i>11,8</i>	<i>12,3</i>
Módulo de elasticidade E_x (GPa)		10,4	10,5	9,9	7,8	5,6	4,3	4,0
	<i>Experimental</i>	<i>15,8</i>	<i>10,3</i>	<i>6,3</i>	<i>4,4</i>	<i>3,8</i>	<i>3,4</i>	<i>2,8</i>

Para compósitos reforçados com fibra de curauá, ao se comparar os resultados experimentais com aqueles encontrados através da simulação, percebe-se uma menor diferença entre os valores, principalmente quanto aos de resistência. Para os valores de módulo de elasticidade a diferença encontrada é maior, seguindo um comportamento oposto ao encontrado para a fibra de vidro. Para os compósitos de curauá era esperado

uma grande divergência entre valores devido a heterogeneidade da fibra, o que implicou em uma suposição dos dados de entrada do software baseados em muitos artigos anteriores. Para compósitos reforçados com fibra de curauá, o critério de falha que mais se assemelha aos resultados experimentais é o Critério de Tsai-Hill por apresentar valores menores para ângulos de reforço maiores que 15° . Esse critério baseado no critério de falha de energia distorcional de Von-Mises, diz que energia distorcional é uma parte da energia deformacional total de um corpo, que consiste de duas partes, uma devida à mudança em volume (chamada de energia de dilatação), e a outra devido à mudança de forma (chamada de energia distorcional). A falha ocorre somente quando a energia distorcional é maior que a energia distorcional de falha do material. Hill adotou o critério de energia distorcional de Von-Mises para materiais anisotrópicos e Tsai o adaptou para uma lâmina unidirecional (transversalmente isotrópica).

Novamente a queda brusca de resistência experimental para ângulos de reforço maiores que 15° foi atribuída principalmente a dificuldade de alinhamento das fibras e em menor escala aos defeitos encontrados na matriz (vazios, bolhas e etc.).

6. CONCLUSÕES

Quanto aos diferentes processos de alinhamento das fibras de curauá para moldagem dos compósitos, o método que fez uso de água deionizada mostrou-se eficaz em manter as fibras igualmente orientadas e paralelas, contudo, após a secagem da água as fibras se aglomeravam, não permitindo seu molhamento. Assim, o método adotado foi da escovação da fibra seca, embora este resulte em um alinhamento não tão preciso. Ao serem escovadas repetidamente, além do alinhamento gradual ocorre a seleção natural das fibras mais resistentes e compridas, e a separação de aglomerados de fibra e sujidades, o que auxilia no molhamento pela resina e resulta em uma quantidade menor de vazios nos compósitos.

O tratamento alcalino (solução aquosa 5 % de NaOH em peso, à temperatura ambiente por 1 h) utilizado nas fibras de curauá produziu resultados de resistência maiores em comparação com as fibras não tratadas. Em tração, o tratamento superficial da fibra de curauá proporcionou um aumento da resistência de 12,5 % e de módulo de 6 %. Em flexão, o aumento foi de 17 % e 15 % para a resistência e o módulo, respectivamente. Esse aumento se deu principalmente pela mudança de rugosidade superficial das fibras, que acabam sofrendo um processo de descamação permitindo um melhor ancoramento mecânico da fibra na resina.

Em tração, tanto os compósitos reforçados com fibras de curauá, quanto os reforçados com fibras de vidro obtiveram melhores resultados para um teor de fibras de 30 %. Já em flexão, os compósitos reforçados com fibra de curauá apresentaram maior resistência em um teor de 30 % e os com fibra de vidro em 20 %. Nos ensaios de *short-beam* ambos os compósitos de curauá e fibra de vidro apresentaram maior resistência para o teor de fibra de 30 %. Utilizando as micrografias, ficou bastante clara a presença de

vazios, que se mostraram mais acentuados para frações de 40 - 50 % de curauá e 30 - 40 % de vidro.

Em tração, tanto os compósitos reforçados com fibra de curauá, quanto os reforçados com fibra de vidro obtiveram melhores resultados para o ângulo de 0°, ou seja, quando o ângulo da fibra coincide com o sentido do esforço aplicado. Para ambas as fibras, o aumento no ângulo de reforço foi seguido por uma queda abrupta de resistência e módulo, estabilizando para ângulos maiores que 60°. No entanto, o aumento do ângulo de orientação causou um maior impacto para os compósitos com fibra de vidro, que para os de curauá. O impacto é maior também para os valores de resistência, que para os de módulo.

A utilização do software de mecânica de compósitos, *The Laminator*, mostrou que infelizmente ainda há uma disparidade muito grande entre os valores experimentais e os valores encontrados em simulações. Essa diferença se deve principalmente à dificuldade encontrada em reproduzir a moldagem manual das lâminas e também na disposição do reforço de fibra. Somado a isso é de extrema importância que os dados inseridos no software, obtidos em artigos ou com os fabricantes dos materiais utilizados (resina e fibra), sejam os mais precisos possíveis, pois é a partir dessas informações que o software irá criar toda a cadeia de simulação.

Em flexão, houve um comportamento semelhante à tração, com valores de resistência e módulo mais elevados para orientações de 0° seguidos de uma queda abrupta para ângulos maiores. Para compósitos reforçados com fibra de curauá, essa queda de resistência e módulo se deu de maneira mais suave, diminuindo gradualmente com o aumento do ângulo de reforço.

Para a resistência *short-beam*, os compósitos de curauá e de vidro também apresentaram maior resistência para o ângulo de orientação de 0°, contudo a maior queda em relação ao ângulo se deu para a fibra de curauá, enquanto que para o vidro ângulos de 0° e 15° obtiveram resultados mais próximos. A resistência *short-beam* depende primeiramente das propriedades da matriz e da adesão na interface fibra/matriz não sendo tão dependente das propriedades das fibras. Novamente a queda brusca em valores de resistência pode ser atribuída a defeitos (bolhas e vazios) encontrados no compósito, principalmente devido a matriz utilizada. Esses vazios normalmente agem como iniciadores de falhas e trincas quando submetidos a forças de cisalhamento.

Mesmo com a resistência superior das fibras de vidro; a menor densidade das fibras de curauá somada a melhoria de resistência através de tratamentos superficiais, permite à fibra vegetal gerar compósitos de resistência semelhante para um mesmo peso. Somado a isso, a natureza de desalinhamento das fibras de curauá possibilita que compósitos unidirecionais possuam um acréscimo de resistência em direções não contempladas pela orientação das fibras, gerando materiais mais resistentes a esforços não previstos pelo projetista.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar um estudo semelhante para compósitos híbridos com reforço unidirecional, combinando-se fibras de vidro e de curauá e variando-se a orientação dessas fibras. Também, utilizar diferentes sequencias de empilhamento das fibras, alternando entre camadas de fibra de curauá e camadas de fibra de vidro.
- Desenvolver protótipos e peças técnicas em que se possam aplicar os resultados obtidos nesses estudos.
- Aprofundar o trabalho de simulação numérica a fim de comparar os resultados obtidos com aqueles encontrados através dos experimentos práticos, ajustando a simulação para que, quando aplicada no desenvolvimento de protótipos, se aproxime mais dos resultados reais.

8. REFERÊNCIAS

- [1] MIR A., ZITOUNE R., COLLOMBET F., BEZZAZI B., Study of Mechanical and Thermomechanical Properties of Jute/Epoxy Composite Laminate. **Journal of Reinforced Plastics and Composites** , 29, pp. 1669-1680, 2010.
- [2] KIM J. T.; NETRAVALI, A. N. Mercerization of sisal fibers: Effect of tension on mechanical properties of sisal fiber and reinforced composites. **Composites: Part A**, 41, pp. 1245-1252, 2010.
- [3] KRISHNAPRASAD R., V. N. R. . M. H. J. R. R. . S. M. . J. K. Mechanical and Thermal Properties of Bamboo Microfibril Reinforced Polyhydroxybutyrate Biocomposites. **Journal of Polymers and the Environment**, 17, pp. 109-114, 2009.
- [4] FIORE V., SCALICI T., VALENZA A., Characterization of a new natural fiber from *Arundo donax* L. as potential reinforcement of polymer composites. **Carbohydrate Polymers**, Palermo, n. 106, pp. 77-83, 2014.
- [5] SCARPONI C., MESSANO M., Comparative evaluation between E-Glass and hemp fiber composites application in rotorcraft interiors. **Composites: Part B**, 69, pp. 542–549, 2015.
- [6] MEI-PO HO, WANG H., LEE J-H., HO C-K., LAU K-T., LENG J., HUI D., Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. **Composites: Part B**, 43, pp. 3549–3562, 2012.
- [7] SPINACÉ, M. A. S., LAMBERT C. S., FERMOSELLI K. K. G., PAOLI M. A., Characterization of Lignocellulosic Curaua Fibres. **Carbohydrate Polymers**, 77, pp. 47-53, 2009.
- [8] SANTOS, P. A.; SPINACÉ, M. A. S.; FERMOSELLI, K. K. G.; DE PAOLI, M. A. Efeito da Forma de Processamento e do Tratamento da Fibra de Curauá nas Propriedades

- de Compósitos com Poliamida 6. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 19, pp. 31-39, 2009.
- [9] MEDINA, L.; SCHLEDJEWSKI, R.; SCHLARB, A. K. Process related mechanical properties of press molded natural fiber reinforced polymers. **Composites Science and Technology**, Kaiserslautern, n. 69, pp. 1404-1411, 2009.
- [10] EUROPEAN Commission. European Commission, 2015. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/environment/waste/elv/>>. Acesso em: 23 novembro 2015.
- [11] DAVOODI, M. M.; SAPUAN, S. M.; AHMAD, D.; ALI, A.; KHALINA, A.; JONOBI, M. Mechanical properties of hybrid kenaf/glass reinforced epoxy composite for passenger car bumper beam. **Materials and Design**, n. 31, pp. 4927-4932, 2010.
- [12] ZAH, R.; HISCHIER, R.; LEÃO, A.L.; I., BRAUN. Curauá Fibers in the Automobile Industry e a Sustainability Assessment. **Journal of Cleaner Production**, Gallen, n. 15 , pp. 1032-1040, 2007.
- [13] LEÃO A. L., ROWELL R., TAVARES N., Applications of natural fibres in automobile industry in Brazil - Thermoforming process. **Science and Technology of Polymers and Advanced Materials**, 1998.
- [14] NETO, L. F. . PARDINI C. L., Compósitos Estruturais Ciência e Tecnologia. Editora Edgard Blücher, 2006.
- [15] CALLISTER, W. D. J. Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução. Editora LTC, 2007.
- [16] NIRMAL U., HASHIM J., M M H MEGAT AHMAD. A review on tribological performance of natural fibre polymeric composites. **Tribology International**, Melaka, n. 83, pp. 77-104, 2015.

- [17] YOUSIF B., EL-TAYEB N. Tribological Evaluations of Polyester Composites Considering Three Orientations of CSM Glass Using BOR Machine. **Applied Composite Materials**, n. 14, 2007.
- [18] VAUGHAN, D. J. Fiberglass reinforcement: Handbook of Composites, Chapman 1998.
- [19] SANJAY K. MAZUMDAR, P. D. COMPOSITES MANUFACTURING Materials, Product, and Process Engineering. Boca Raton: CRC Press LLC, 2002.
- [20] ZHU J, IMAM A, CRANE R, LOZANO K, KHABASHESKU VN, BARRERA EV. Processing a glass fiber reinforced vinyl ester composite with nanotube enhancement of interlaminar shear strength. **Composites Science and Technology**, n. 67, pp. 1509-1517, 2007.
- [21] KHALIL, H. P. S. A.; KANG, C. W.; KHAIRUL, A.; RIDZUAN, R.; ADAWI, T. O. The Effect of Different Laminations on Mechanical and Physical Properties of Hybrid Composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Penang, 28, n. 9, pp. 1123-1136, 2009
- [22] SILVA, R. V.; AQUINO, E. M. F.; RODRIGUES, L. P. S.; BARROS, A. R. F. Curaua/Glass Hybrid Composite: The Effect of Water Aging on the Mechanical Properties. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, 28, pp. 1857-1868, 2009
- [23] RESPOSTA Carioca. Site da WordPress, 2015. Disponível em: <<http://respostacarioca.com.br/wp-content/uploads/2013/09/sisal.jpg>>. Acesso em: 4 Fevereiro 2015.
- [24] JEC COMPOSITES. First natural fiber monobloc chair. Jec Composites, S/Data. Disponível em: <<http://www.jeccomposites.com/news/composites-news/first-natural-fiber-monobloc-chair>>. Acesso em: 2 Fevereiro 2015.

- [25] LINGROVE. Applications. Lingrove, S/Data. Disponível em: <<http://lingrove.com/applications-2/>>. Acesso em: 2 Fevereiro 2015.
- [26] IDICULA, M.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Mechanical Performance of Short Banana/Sisal Hybrid Fiber Reinforced Polyester Composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Kerala, 29, pp. 12-29, 2010.
- [27] SINHA, E.; PANIGRAHI, S. Effect of Plasma Treatment on Structure, Wettability of Jute Fiber and Flexural Strength of its Composite. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, 43, pages 1791-1802, 2009.
- [28] WESTMAN M P, FIFIELD L S, SIMMONS K L, LADDHA S G, KAFENTZIS T A. Natural Fiber Composites: A Review, 2010. Disponível em: <http://www.pnl.gov/Main/Publications/External/Technical_Reports/Pnnl-19220.Pdf>. Acesso em: 3 Fevereiro 2015.
- [29] ROWELL, R.; LEÃO, A.; CARVALHO, F. X.; FROLLINI, E. Utilisation of Natural Fibers in plastic Composites: Problems and Opportunities. **Plastic Composites**, pp. 23-51, 1997.
- [30] FARIS M. AL-OQLA, SAPUAN S. M. Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry. **Journal of Cleaner Production**, Malaysia, 66, pp. 347 - 354, 2014.
- [31] SRIKANTH PILLA. Handbook of Bioplastics and Biocomposites Engineering Applications. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- [32] SILVA, R. V.; AQUINO, E. M. F. Curaua fiber: A New Alternative to Polymeric Composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, 27, pp.103-112, 2008.

- [33] MARINELLI, A. L.; MONTEIRO, M. R.; AMBRÓSIO, J. D.; BRANCIFORTI, M. C.; KOBAYASHI, M.; NOBRE, A. D. Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras Vegetais Naturais da Biodiversidade: Uma Contribuição para a Sustentabilidade Amazônica. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 18, pp. 92-99, 2008.
- [34] SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. Studies on Lignocellulosic fibers of Brasil. Part I: Source, Production, Morphology, Properties and Applications. *Composites Part A*, Curitiba, 38, pp.1694-1709, 2007.
- [35] BEHRENS, D. Curauá-Faser - eine Pflanzenfaser als Konstruktionswerkstoff?: Untersuchungen zum Anbau der brasilianischen Bromelien-Art Curauá (*Ananas lucidus* Miller) und Prüfung der Blattfasern im Hinblick auf ihre technologische Nutzbarkeit. Berlin: Köster, pp. 159-178 ,1999.
- [36] LEÃO, A. L., SARTOR S. M., CARASCHI J. C., Natural fibers based composites - technical and social issues. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, n. 448, pp. 161-177, 2006.
- [37] LIANA JOHN. Curauá enfrenta até terremoto. Planeta Sustentável. Disponível em: <<http://planetasustentavel.abril.com.br/blog/biodiversa/curaua-enfrenta-ate-terremoto/>>. Acesso em: 17 setembro 2015.
- [38] PLANETA SUSTENTÁVEL. Curauá enfrenta até terremoto! Planeta Sustentável, Disponível em: <<http://planetasustentavel.abril.com.br/blog/biodiversa/curaua-enfrenta-ate-terremoto/>>. Acesso em: 5 Fevereiro 2015.
- [39] TOMCZAK, F.; SATYANARAYANA, K. G.; SYDENSTRICKER, T. H. D. Studies on Lignocellulosic fibers of Brasil: Part III – Morphology and Properties of Brazilian Curaua Fibers. *Composites: Part A*, Curitiba, 38, pp. 2227-2236, 2007.

- [40] GOMES, A.; MATSUO, T.; GODA, K.; OHGI, J. Development and effect of alkali treatment on tensile properties of curaua fiber green composites. **Composites: Part A**, Tokiwadai, 38, pp. 1811-1820, 2007.
- [41] STRONG, A. B. Fundamentals of Composites Manufacturing, Second Edition: Materials, Methods and Applications. 2. ed. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2008.
- [42] WWW.SILAEX.COM.BR/POLIELSTER.HTML (ACESSADO EM DEZEMBRO DE 2012), 2012.
- [43] RIO, P. MAXWELL PUC RIO. Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/13445/13445_3.PDF>. Acesso em: 19 Janeiro 2016.
- [44] KALIA S., KAITH B. S., KAUR I., Cellulose Fibers: Bio-and Nano-polymer Composites Green Chemistry and Technology, Berlin Heidelberg, 2011.
- [45] FARUK O, ANDRZEJ K. B, FINK HP, SAIN M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in Polymer Science**, 37, n. 11, 2012.
- [46] KALIA S., AVÉROUS L., NJUGUNA J., DUFRESNE A., CHERIAN B. M., Natural Fibers, Bio- and Nanocomposites. **International Journal of Polymer Science**, 2011.
- [47] DE ROSA I. M., SANTULLI C., SARASINI F., Mechanical and thermal characterization of epoxy composites reinforced with random and quasi-unidirectional untreated Phormium tenax leaf fibers. **Materials and Design**, Rome, 31, pp. 2397-2405, 2010.
- [48] KAW, A. K. Mechanics Composite Materials, CRC Press, 2006.
- [49] PARDINI, L. C. Preformas para Compósitos Estruturais. Polímeros: **Ciência e Tecnologia**, 10, 2000.

- [50] REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. Compósitos Estruturais: tecnologia e prática, Artliber, 2011.
- [51] ANGRIZANI, C. C. Compósitos laminados híbridos de curauá/vidro: análise mecânica experimental e teórica., Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- [52] Boletim técnico da resina poliéster isoftálica do tipo ARAZYN 12.0 da Ara Química S.A., agosto 2015.
- [53] ADAMS, D. F. The short beam shear test: High Performance Composites, 2006.
- [54] SIDERIDIS E., P. A. Short-Beam and Three-Point-Bending Tests for the Study of Shear and Flexural Properties in Unidirectional-Fiber-Reinforced Epoxy Composites. **Journal of Applied Polymer Science**, 93, pp. 63-74, 2004.
- [55] COSTA, M. L.; ALMEIDA, S. F. M.; REZENDE, M. C. Resistência ao cisalhamento interlaminar de compósitos com resina epóxi com diferentes arranjos das fibras na presença de vazios, **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, n. 11 (4), pp. 182-189, 2001.
- [56] LI, S. H., ZENG Y. L., XIAO Y. L., FU S. Y., ZHOU B. L., Biomimicry of bamboo bast fiber with engineering composite materials, **Materials Science and Engineering: C**, Vol. 3, pp. 125-130, 1995
- [57] CHITTARANJAN DEO, S. K. A. Effect of Moisture Absorption on Mechanical Properties of Chopped Natural Fiber Reinforced Epoxy Composite. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, 29, n. 16, pp. 2513-2521, 2010.
- [58] MALLICK, P. K. Fiber-Reinforced Composites. New York: Marcel Dekker Inc, 1988.
- [59] SHARMA M, RAO I. M., BIJWE J., Influence of orientation of long fibers in carbon fiber-polyetherimide composites on mechanical and tribological properties. **Wear**, n. 267, 2009.

- [60] GOWDA T. M., NAIDU A. C. B., CHHAYA R., Some mechanical properties of untreated jute fabric reinforced polyester composites. **Composites: Part A**, n. 30, pp. 277-284, 1999.
- [61] KIM J., M. Y. W. Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites, Elsevier, 1998.
- [62] AHMED K S, V. S. Tensile flexural and interlaminar shear properties of woven jute-glass fabric reinforced polyester composites. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 207, pp. 330-335, 2008.
- [63] MATHEWS F. L., RAWLINGS R. D. Composite Materials: Engineering and Science. [S.I.]: Woodhead Publishing Ltd. and CRC Press, 1999.
- [64] JOHN N. A. ST., BROWN. J. R. Flexural and interlaminar shear properties of glass reinforced phenolic composites. **Composites: Part A**, n. 29A, pp. 939-946, 1998.
- [65] ARIFUZZAMAN KHAN G. M., SHAHERUZZAMAN. Md., . RAHMAN. M. H., ABDUR RAZZAQUE. S. M., SAKINUL ISLAM. Md., SHAMSUL ALAM Md., Surface modification of okra bast fiber and its physico-chemical characteristics. **Fibers and Polymers**, 2009.
- [66] FIORE V., VALENZA. A., DI BELLA G., Artichoke (*Cynara cardunculus* L.) fibres as potential reinforcement of composite structures. **Composites Science and Technology**, 2011.
- [67] DE ROSA, I. M., KENNY J. M., PUGLIA D., SANTULLI C., SARASINI F., Morphological, termal and mechanical characterization of okra (*abelmoschus esculentus*) fibres as potential reinforcemet in polymer composites. **Composites Science and Technology**, pp. 116-122, 2010.

- [68] MONTEIRO S. N., LOPES F. P. D., NASCIMENTO D. C. O., FERREIRA A. S., SATYANARAYANA K. G., Processing and properties of continuous and aligned curaua fibers incorporated polyester composites. **Journal of Materials Research and Technology**, 2, pp. 2-9, 2013.
- [69] RAO K. M. M., PRASA. A. V. R., RANGA BABU. M. N. V., RAO. K. M. . GUPTA A. V. S. S. K. S. Tensile properties of elephant grass fiber reinforced polyester composites. **Journal Materials Science**, n. 43, 2007.
- [70] THOMASON J.L. The influence of fibre properties of the performance of glass fibre reinforced polyamide 6, **Composites Science and Technology**, Vol. 59, 16, pp. 2315–2328, 1999.
- [71] MOHANTY A. K., MISRA M., HINRICHSEN G., Biofibers, biodegradable polymers and biocomposites. **Macromolecular Materials and Engineering**, n. 1, 2000.
- [72] BRAHIM S. B., CHEIKH R. B., Influence of fibre orientation and volume fraction on the tensile properties of unidirectional Alfa-polyester composite. **Composites Science and Technology**, n. 67, 2007.
- [73] ASTM INTERNATIONAL, C. Engineered Materials Handbook, v. 7, pp. 23, 25, 27 .
- [74] JOSEPH K., MEDEIROS E. S., CARVALHO L. H., Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 4, n. 9, pp. 136-141, 2009.
- [75] SING B., GUPTA M., VERMA A., Studies on polymer composites based on sisal polyester and glass modified sisal fibers, filler and unsaturated polyester resin. **Research and Industry**, 1, n. 39, 1994.

- [76] FIORE V., SCALICI T., VALENZA A., Characterization of a new natural fiber from *Arundo donax* L. as potential reinforcement of polymer composites. **Carbohydrate Polymers**, Palermo, 106, pp. 77–83, 2014.
- [77] WISNOW M. R., REYNOLDS T., GWILLIAM N., Reduction in interlaminar shear strength by discrete and distributed voids. **Composites Science Technology**, 1996.
- [78] SILVA, H. S. P. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de curauá e híbridos com fibras de vidro, Porto Alegre, 2010.
- [79] DANIEL, I. M.; ISHAI, O. *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press, 1994.
- [80] AMICO, S. C. *Notas de aula - Mecânica de Materiais Compósitos*.