

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 - PPGEM

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
COM FIBRAS DE CURAUÁ E HÍBRIDOS COM FIBRAS DE VIDRO**

Humberto Sartori Pompeo da Silva

Dissertação para obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

Porto Alegre

2010

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 - PPGEM

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
COM FIBRAS DE CURAUÁ E HÍBRIDOS COM FIBRAS DE VIDRO

Humberto Sartori Pompeo da Silva

Engenheiro Mecânico

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 - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2010

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Campos Amico

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ademir José Zattera (UCS)

Prof. Dra. Branca Freitas de Oliveira (UFRGS)

Prof. Dra. Tatiana Louise Avila de Campos Rocha (UFRGS)

Prof. Dr.- Ing. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

DEDICATÓRIA

*A minha família e aos amigos que
estiveram nesse tempo, a meu lado.*

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao professor Dr. Sandro Campos Amico pela dedicação, orientação e idealização deste trabalho.

Aos bolsistas de iniciação científica Diocleciano e Tiago pela colaboração na realização de parte deste trabalho.

À Clarissa e Katia pela amizade e participação no desenvolvimento do *Molde 2*.

Aos amigos do Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) da Escola de Engenharia da UFRGS, Álvaro, Alessandra, Alexsandro, André, Bianca, Caroline, Cristiane, Eliane, Fábio, Franciélli, Gustavo, Juliana, José, Micheli, Rafael, Sandro B. e Vicente pela colaboração e amizade.

À minha família, em especial aos meus pais Nicacio e Wilma, minha irmã Maristela e irmão Marcos, por todo incentivo e por estarem sempre ao meu lado.

À UCS pela realização de ensaios mecânicos.

À UFRGS, PPGEM, UDESC/Joinville, CNPq, CAPES e FAPERGS pelo suporte técnico e financeiro.

TRABALHOS PUBLICADOS

- ◆ Desenvolvimento de Materiais Compósitos Poliméricos Termorrígidos com Fibras de Curauá. Silva, H. S. P.; Junqueira, D.; Moraes, A. G. O.; Amico, S. C. 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, 2008.

- ◆ Utilização de Ensaio *Short Beam* em Compósitos com Fibras de Sisal e Curauá. Silva, H. S. P.; Abreu, T. M.; Moraes, A. G. O.; Tomiyama, M.; Coelho, L. A. F.; Amico, S. C. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros - CBPol, 2009.

- ◆ Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras de Curauá e Híbridos com Fibras de Curauá/Vidro. Silva, H. S. P.; Amico, S. C. 9º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, 2010. (*aceito*)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
2.1 Geral	4
2.2 Específicos	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Compósitos.....	5
3.2 Fibras Vegetais.....	6
3.2.1 Fibras de Curauá	7
3.3 Matrizes Termorrígidas	11
3.3.1 Resina Poliéster	12
3.4 Desenvolvimento de Compósitos com Fibras de Curauá	13
3.5 Desenvolvimento de Compósitos Híbridos com Fibras Vegetais e Fibras de Vidro	18
3.6 Ensaio <i>Short Beam</i>	20
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
4.1 Materiais	22
4.2 Métodos	24
4.2.1 Preparo das Fibras de Curauá	24
4.2.2 Produção das Mantas com Fibras de Curauá	26
4.2.3 Projeto e Desenvolvimento de Molde.....	29
4.2.4 Produção dos Compósitos	31
4.2.5 Caracterização dos Compósitos	34
4.2.5.1 Preparação dos Corpos de Prova.....	34
4.2.5.2 Ensaio Realizados	34

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
5.1 Caracterização das Fibras de Curauá	36
5.2 Efeito do Pré-tratamento da Fibra.....	39
5.3 Efeitos da Variação no Comprimento das Fibras.....	42
5.4 Ensaio <i>Short Beam</i>	46
5.5 Efeito da Variação da Fração Volumétrica de Fibras.....	53
5.6 Compósitos Híbridos.....	56
6 CONCLUSÕES	63
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
8 REFERÊNCIAS.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Proposta de classificação hierárquica de compósitos.....	6
Figura 2 - Superfície fraturada e área da seção transversal da fibra de curauá.....	9
Figura 3 - Resina poliéster isoftálica insaturada.....	13
Figura 4 - Fibras de curauá <i>in natura</i> (a) e <i>roving</i> de fibras de vidro-E (b).....	22
Figura 5 - Fibras de curauá <i>in natura</i> (a) e fibras lavadas (b).....	25
Figura 6 - Fibras de vidro e curauá picadas (a), manta de curauá (b) e manta híbrida curauá/vidro(c).....	27
Figura 7 - Aparato construído de material compósito, utilizado para a produção de mantas de fibras vegetais.....	27
Figura 8 - Processo de produção de mantas em água destilada: (a) início da deposição das fibras, (b) manta em formação e (c) manta obtida.....	28
Figura 9 - Molde em aço inox, cavidade interna de 150 × 50 × 10 mm – denominado <i>Molde 1</i>	29
Figura 10 - Desenho da parte inferior do molde construído - <i>Molde 2</i>	30
Figura 11 - Desenho da parte superior do molde construído - <i>Molde 2</i>	30
Figura 12 - Molde em aço inox - cavidade interna de 270 × 170 × 22 mm - denominado <i>Molde 2</i>	31
Figura 13 - Fluxograma de produção e caracterização dos compósitos.....	31
Figura 14 - Prensa hidráulica Marconi utilizada nas moldagens.....	32
Figura 15 - Equipamento de ultrassom utilizado na degasagem.....	32
Figura 16 - Esquema ilustrativo do ensaio <i>short beam</i> em 3 pontos.....	35
Figura 17 - Análise termogravimétrica (TGA) das fibras de curauá <i>in natura</i>	37
Figura 18 - Análise termogravimétrica (TGA) das fibras de curauá lavadas.....	37
Figura 19 - Imagem (MEV) lateral da fibra de curauá lavada em diferentes ampliações: (a) 500, (b) 1.000 e (c) 3700.....	38

Figura 20 - Imagem (MEV) da seção transversal das fibras de curauá lavadas em diferentes ampliações: (a) 100 e (b) 200.....	39
Figura 21 - Resistência à tração e módulo de elasticidade dos compósitos com fibras <i>in natura</i> , secas e lavadas ($L_f = 30$ mm; $\%V_f \approx 20\%$).....	40
Figura 22 - Resistência à flexão e módulo de elasticidade dos compósitos com fibras <i>in natura</i> , secas e lavadas ($L_f = 30$ mm; $\%V_f \approx 20\%$).....	41
Figura 23 - Resistência ao impacto e dureza Barcol dos compósitos com fibras <i>in natura</i> , secas e lavadas ($L_f = 30$ mm; $\%V_f \approx 20\%$).....	41
Figura 24 - MEV dos compósitos com fibras <i>in natura</i> (a) e com fibras lavadas (b)..	42
Figura 25 - Resistência à tração e módulo dos compósitos com fibras de diferentes comprimentos ($\%V_f \approx 20\%$ - fibras lavadas).....	43
Figura 26 - Resistência à flexão e módulo dos compósitos com fibras de diferentes comprimentos ($\%V_f \approx 20\%$ - fibras lavadas).....	44
Figura 27 - Resistência ao impacto e dureza Barcol dos compósitos com fibras de diferentes comprimentos ($\%V_f \approx 20\%$ - fibras lavadas).....	45
Figura 28 - Corpos-de-prova usados para ensaio <i>short beam</i> , com espessura de 3,15 mm (a), 4,80 mm (b) e 6,45 mm (c).....	47
Figura 29 - Resultados de resistência <i>short beam</i> de compósitos com diferentes comprimentos de fibras de curauá ($\%V_f = 20\%$).....	47
Figura 30 - Curvas de força \times deslocamento de compósitos com diferentes $\%V_f$ ($L_f = 30$ mm).....	49
Figura 31 - Fotografia (a) de corpo de prova ensaiado por <i>short beam</i> ($\times 20$). Em detalhe (b e c), característica da fratura (aumento de $200\times$ no microscópio óptico). (espessura: 3,15 mm; $\%V_f \approx 20\%$ e $L_f = 30$ mm)	49
Figura 32 - Resultados de resistência <i>short beam</i> de compósitos com diferentes $\%V_f$. ($L_f = 30$ mm).....	50
Figura 33 - Resultados de resistência <i>short beam</i> de compósitos com diferentes espessuras - ($\%V_f \approx 20\%$; $L_f = 30$ mm).....	51

Figura 34 - Resultados de resistência para diferentes razões s/t em compósitos com curauá ($\%V_f \approx 20\%$; $L_f = 30$ mm).....	53
Figura 35 - Resistência e módulo em tração dos compósitos com diferente $\%V_f$. ($L_f = 50$ mm).....	54
Figura 36 - Resistência e módulo em flexão dos compósitos com diferentes $\%V_f$ ($L_f = 50$ mm).....	55
Figura 37 - Resistência ao impacto e dureza Barcol dos compósitos com diferentes $\%V_f$ ($L_f = 50$ mm).....	56
Figura 38 - Placas de compósitos híbridos com diferentes teores volumétricos de curauá/vidro ($\%V_f \approx 20\%$; $L_f = 50$ mm).....	57
Figura 39 - Resistência à tração dos compósitos híbridos.....	58
Figura 40 - Resistência à flexão e módulo dos compósitos híbridos.....	59
Figura 41 - Curvas de Tensão \times Deformação dos compósitos com fibras de vidro, híbridos e fibras de curauá. Ensaio de tração (a) e ensaio de flexão (b).....	60
Figura 42 - Resistência ao impacto e dureza Barcol dos compósitos híbridos.....	61

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Diferentes tipos de resinas poliéster.....	12
Tabela 2 - Propriedades mecânicas de compósitos com fibras de curauá	14
Tabela 3 - Características da resina UCEFLEX UC ISO 1005, da Elekeiroz.....	23
Tabela 4 - Características da resina ARAZYN AZ 12.0, da Ara Ashland.....	23
Tabela 5 - Densidade e fração volumétrica de vazios dos compósitos.....	46
Tabela 6 - Fração volumétrica, fração mássica de fibra e densidade dos compósitos reforçados com fibras de curauá.....	48
Tabela 7 – Variação da fração volumétrica e mássica de fibras e densidade dos compósitos ($L_f = 30$ mm).....	51
Tabela 8 – Densidade dos compósitos de curauá ($\%V_f \approx 20\%$), com diferentes espessuras.....	52
Tabela 9 - Variação da fração volumétrica e mássica e densidade dos compósitos ($L_f = 50$ mm).....	54
Tabela 10 - Densidade dos compósitos híbridos ($\%V_f \approx 20\%$).....	57

RESUMO

Atualmente na engenharia de materiais observa-se um revigoramento da busca por materiais oriundos de fontes renováveis. O uso de fibras vegetais reforçando polímeros, por exemplo, representa uma alternativa na substituição parcial de fibras de vidro em compósitos. O curauá é uma planta legitimamente brasileira, de fácil cultivo e processamento, que produz fibras de ótimo desempenho mecânico. Neste trabalho, fibras de curauá foram caracterizadas e foi definido um processo simples para a limpeza (lavagem e secagem), a seleção e o corte das fibras *in natura*. Então, desenvolveu-se uma metodologia para a fabricação de mantas. Compósitos de matriz poliéster isoftálica foram moldados por compressão à quente com mantas provenientes de diferentes pré-tratamentos (*in natura*, secagem e lavagem/secagem). Também foram moldados compósitos com fibras de diferentes comprimentos (10, 20, 30, 40, 50 mm), frações volumétricas ($\%V_f = 10, 20, 30$ e 40%) e com diferentes espessuras (3,15, 4,80 e 6,45 mm). Finalmente, foram moldados compósitos híbridos, com um teor variável das fibras constituintes (curauá/vidro). Utilizou-se então ensaios de tração, flexão, impacto, *short beam* e dureza Barcol para a caracterização dos compósitos. Foi constatada a importância dos processos de lavagem, secagem e seleção das fibras para o incremento das propriedades mecânicas do compósito. O aumento do comprimento das fibras dentro do intervalo pesquisado produziu melhores propriedades mecânicas nos compósitos. Já a resistência *short beam* não aumentou com o comprimento da fibra, somente com a fração volumétrica de fibras. Com o aumento do teor de fibras de curauá, obteve-se um incremento da resistência ao impacto além das resistências e módulos de tração e flexão. No entanto, observou-se uma redução gradativa nos resultados de dureza Barcol. Com comprimento de fibra de 50 mm e $\%V_f = 40\%$, foram obtidos os melhores resultados. Com relação aos compósitos híbridos, notou-se que o ajuste das propriedades mecânicas pode ser realizado pelo controle do teor das fibras (curauá/vidro), de acordo com a aplicação pretendida para o material. Substituindo-se 25% das fibras de vidro por curauá obteve-se um ótimo resultado, pois ocorreu apenas uma leve redução na resistência mecânica. As fibras de curauá apresentaram limitações quando usadas em materiais compósitos, mesmo assim possuem muitas características desejáveis, que permitem essa aplicação.

ABSTRACT

The search for a greater use of renewable materials is on the rise again. The use of vegetal fibres to reinforce polymers, for instance, represents an alternative for the partial substitution of glass fibres in composites. Curauá is a genuinely Brazilian plant, of easy cultivation and processing, which produces fibres with excellent mechanical performance. In this work, the curauá fibres were characterized (density, morphology and thermogravimetry), and a simple and effective process for cleaning (washing and drying), selecting and cutting of the raw fibres was defined. Then, a methodology for producing fibre mats was proposed. Isophthalic polyester matrix composites were moulded via hot compression with the mats produced with fibres from different pre-treatments (as received, drying and washing/drying). Composites with fibres of variable length (10, 20, 30, 40, 50 mm), distinct fiber volume fraction ($\%V_f = 10, 20, 30 \text{ e } 40\%$) or with different thickness (3.15, 4.80 e 6.45 mm) were also molded. Finally, hybrid composites were moulded using a variable relative volume content of the constituent fibres (curaua/glass) and an overall constant fiber content. Tensile, flexural, impact, short beam and Barcol hardness tests were used for the characterization of the composites. The washing, drying and selection of the fibres were found important to increase the mechanical properties of the composites. The increase in fibre length increased the mechanical properties of the composites. Regarding short beam strength, the fibre length did not exert a significant influence on it, although it increased with the fibre volumetric fraction. An increase in impact strength, tensile and flexural strength and modulus and a gradual decrease in Barcol Hardness were found when increasing the curauá fibre volume fraction. Regarding the hybrid composites, the results showed that the mechanical properties can be adjusted by controlling the ratio of fibre content (curaua/glass), according to the intended application of the final material. In this study, the curaua fibres presented some limitations when used in composite materials, yet having many advantages that allow this application.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e a difusão das técnicas de fabricação de materiais compósitos, aliados à sua versatilidade, vêm promovendo a utilização desses materiais por empresas de diversos segmentos. Os materiais compósitos mais utilizados atualmente são aqueles que empregam fibras sintéticas, e.g. aramida, vidro e carbono, como reforço.

Compósitos com fibras de vidro (chamados PFRV) proporcionam excelentes propriedades térmicas e mecânicas. No entanto estas propriedades dificultam o desenvolvimento de processos eficientes de reciclagem. De fato, dificuldades de descarte, reciclagem ou reutilização são hoje preocupações ambientais e por isso objeto de estudo de muitas pesquisas. O estabelecimento de métodos de disposição ou descarte para compósitos reforçados com fibras de vidro e suas leis de reciclagem são temas contemporâneos importantes, porque muitos problemas ambientais surgiram recentemente e vêm se agravando mundialmente [1].

Além disso, é necessário reduzir impactos ambientais relacionados ao aquecimento global, que são acelerados pelo grande consumo de petróleo, um recurso não renovável, como matéria-prima ou fonte energética na obtenção de materiais diversos, como as fibras de vidro. Identificou-se assim a necessidade de desenvolver e comercializar materiais compósitos baseados em constituintes derivados de fontes renováveis, minimizando o impacto ambiental e econômico e a dependência de materiais não renováveis.

O crescente interesse pelas fibras lignocelulósicas se deve principalmente por ser uma produção de baixo custo e que não requerer equipamentos sofisticados. Apresentando-se também condições de trabalho mais seguras em relação às fibras sintéticas. O aspecto mais interessante em relação às fibras naturais é o seu impacto ambiental positivo. As biofibras são oriundas de fontes renováveis com baixo consumo de energia na sua produção. São consideradas neutras em relação a emissão de dióxido de carbono quando compostadas ou sofrem combustão [2]. Compósitos com fibras naturais vêm sendo também apontados como alternativas potenciais economicamente rentáveis para a fixação de carbono na natureza, reduzindo também a emissão de CO₂ na atmosfera durante seu ciclo de produção,

processamento e utilização, ganhando assim um incremento de seu potencial econômico devido à possibilidade de comércio de créditos carbonos para a cadeia produtiva [3]

Nos últimos anos, pressões ambientais revigoraram o interesse pelas fibras naturais. No caso de reforço de polímeros, o uso de fibras vegetais representa uma alternativa para a substituição parcial de PFRV [4]. De fato, diversos setores começaram a utilizar compósitos reforçados com fibras vegetais, como por exemplo, a indústria automotiva, que as utiliza em painéis internos de portas, painéis dos encostos de bancos e de cabeça, botões, maçanetas, tampas internas do portamalas e painéis internos do teto em alguns veículos [5].

Fibras vegetais, em comparação com fibras de vidro, são muito eficientes na absorção de som, têm baixo custo, são leves, não estilhaçam em caso de acidentes, são biodegradáveis e podem ser obtidas utilizando-se 80% menos energia que fibras de vidro [6]. No entanto, problemas de adesão fibra-matriz, de absorção de água e também de propriedades mecânicas variáveis e limitadas vêm dificultando sua utilização em determinados ambientes e situações de carregamento que exijam um melhor desempenho mecânico.

O curauá é uma planta nativa da região amazônica, com ótimas propriedades mecânicas, de fácil cultivo e processamento, podendo ser cultivada em consórcio com outras culturas, inclusive em áreas de reflorestamento e produção de madeira, podendo ser colocada como mais uma fonte de renda e diversificação de culturas para pequenos agricultores ou ser cultivada em grandes plantações [7, 8]. O fomento ao cultivo do curauá pode se tornar uma importante fonte de emprego e renda em regiões carentes de incentivos e oportunidades de desenvolvimento econômico e social. Não apenas a indústria automotiva e têxtil, que já demonstram interesse e utilizam o curauá, mas também outros setores industriais podem se beneficiar com a expansão desta cultura e com o desenvolvimento tecnológico, como a indústria moveleira.

A utilização combinada de fibras de curauá e vidro, formando compósitos híbridos, possibilita o incremento significativo das propriedades mecânicas, mantendo algumas das características e vantagens das duas classes de fibras. Pesquisar as possibilidades de combinações destas fibras é importante para que se possa otimizar o desempenho de compósitos híbridos, extraindo ao máximo suas

potencialidades. As referências científicas internacionais relacionadas a compósitos poliméricos termorrígidos híbridos curauá/vidro são muito raras atualmente, por isso torna-se importante pesquisar estes materiais, explorando suas potencialidades reais e aplicação industrial.

Neste contexto, este projeto pretende ampliar o conhecimento científico em materiais compósitos poliméricos com fibras de curauá, sua produção e caracterização. As fibras de curauá são utilizadas em diferentes comprimentos e teores volumétricos, de modo a otimizar as propriedades dos compósitos produzidos. Além disso, foram moldados e caracterizados compósitos híbridos (com fibras de curauá e vidro) em matriz termorrígida, avaliando-se o efeito da variação dos teores das fibras constituintes no seu desempenho mecânico. Assim, pretende-se promover a valorização de matérias-primas nacionais com potencial de aplicação tecnológica, especialmente no setor automotivo.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Desenvolver e caracterizar compósitos poliméricos de matriz poliéster isoftálica reforçados com fibras de curauá e compósitos híbridos reforçados por fibras de vidro e curauá para explorar o uso destas fibras em compósitos de maior responsabilidade estrutural.

2.2 Específicos

- ♦ Desenvolver um processo simples e eficaz para a limpeza, o corte e a classificação das fibras *in natura* recebidas, evitando tratamentos que possam alterar as propriedades mecânicas das fibras e aumentar os custos do processo.
- ♦ Definir uma rota adequada de produção das mantas, feitas com fibras curtas, buscando-se uma distribuição aleatória e homogênea e a compactação adequadas das fibras.
- ♦ Definir uma rota de processamento dos compósitos com fibras de curauá.
- ♦ Definir o percentual volumétrico de fibras ($\%V_f$) e o comprimento ótimo que maximize as propriedades mecânicas dos compósitos.
- ♦ Desenvolver compósitos híbridos intra-camadas, com fibras de curauá e vidro com diferentes teores relativos dessas fibras e comparar o desempenho em relação aos compósitos feitos com curauá ou com vidro isoladamente, buscando um compromisso entre custo e desempenho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Compósitos

O desenvolvimento de materiais compósitos e a combinação dos diversos tipos de materiais, segundo Callister [9], possibilitam a ampliação de suas propriedades. Embora não haja uma definição universalmente aceita, de maneira geral, pode-se considerar um compósito como sendo um material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades. Sendo que as fases constituintes devem estar separadas por uma interface distinta e de escala microscópica. Geralmente são compostos por apenas duas fases; uma é chamada de matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada de fase dispersa. De acordo com o princípio da ação combinada, propriedades podem ser obtidas pela combinação judiciosa de dois ou mais materiais distintos.

Os compósitos podem ser produzidos a partir de matrizes metálicas, cerâmicas ou poliméricas. Existe também, uma variedade de compósitos que ocorrem na natureza, como a madeira, que é formada por fibras de celulose resistentes e flexíveis, que são envolvidas e mantidas unidas por meio de um material menos rígido chamado lignina.

Observa-se na Figura 1, uma proposta de classificação de compósitos dada por Levy Neto e Pardini [10]. Tecnicamente, os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase dispersa encontra-se na forma de uma fibra. Resistência e/ou rigidez alta são as características perseguidas frequentemente, sendo expressas em termos de resistência específica e módulo específico. A maioria dos compósitos é desenvolvida visando à melhoria das propriedades mecânicas, como rigidez, resistência e tenacidade [9], sendo às vezes explorada combinadamente outras propriedades, como resistência às condições ambientais e às altas temperaturas. Sendo assim, a análise dos compósitos normalmente é concentrada nas propriedades mecânicas.

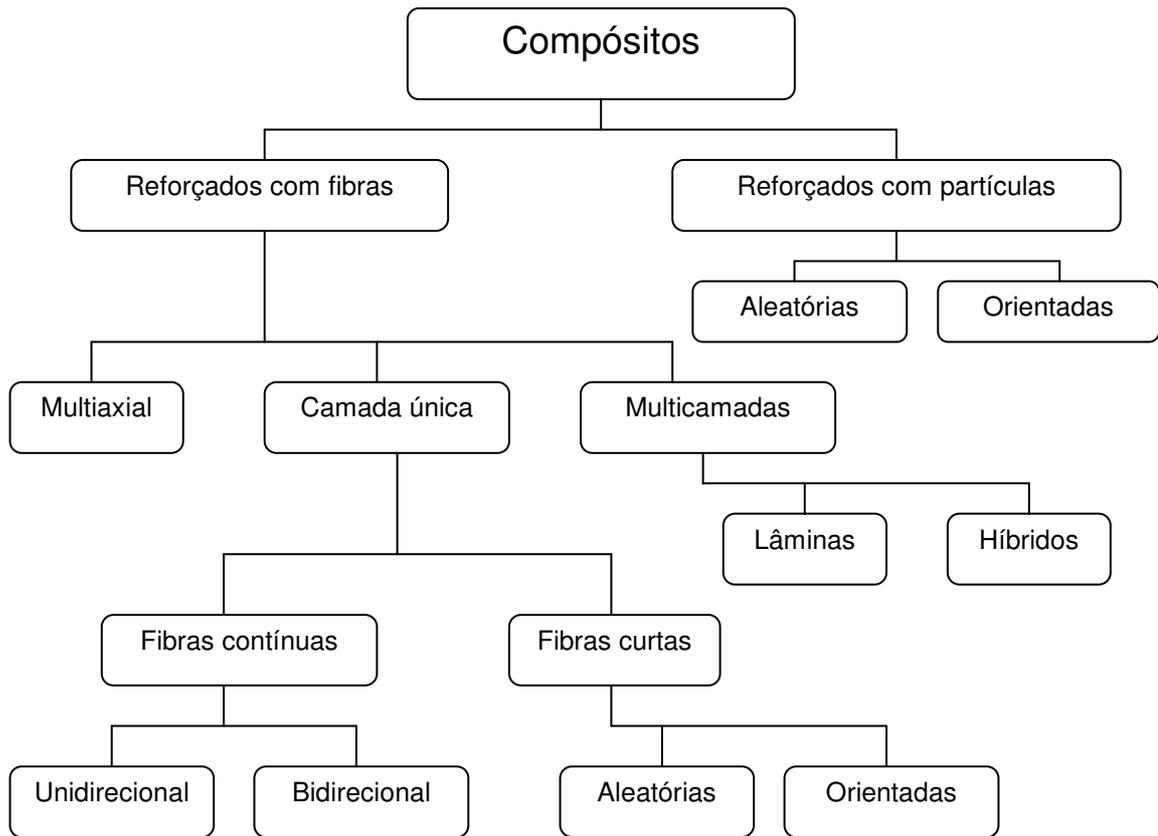


Figura 1: Proposta de classificação hierárquica de compósitos [10].

3.2 Fibras Vegetais

Fibras vegetais vêm sendo utilizadas por diferentes civilizações e nas mais diversas aplicações. Inúmeros artefatos são manufaturados e comercializados no mundo inteiro há centenas de anos, como bolsas, mantas, cordas, redes, pincéis, cestos, além de outros produtos. Mais recentemente, as fibras vegetais começaram a ser investigadas e aplicadas como reforço em materiais compósitos poliméricos, entre eles compósitos de matriz termorrígida [11].

O apelo ambiental e o baixo custo talvez sejam os aspectos mais importantes quando se considera fibras naturais para aplicação em materiais compósitos. Mais detalhadamente, as vantagens normalmente associadas com fibras vegetais são: biodegradabilidade, atoxicidade, reciclabilidade, baixo custo de produção e processamento, baixa densidade, bom conjunto de propriedades mecânicas, menor abrasividade que as fibras sintéticas, provocando menor desgaste em

equipamentos, proveniência de fontes renováveis, absorção e armazenagem de CO₂, baixo consumo de energia na sua produção, além da promoção de trabalho e renda na área rural.

Por outro lado, há uma série de desvantagens associadas às fibras naturais [10] incluindo: baixa temperatura de utilização, acentuada variabilidade nas propriedades mecânicas, baixa estabilidade dimensional, alta sensibilidade a efeitos ambientais (variações de temperatura e umidade), influência significativa das condições do solo à época da colheita, do processamento pós-colheita e mesmo da localização relativa da fibra no corpo da planta, além de seções transversais de geometria complexa e não uniforme e, talvez a mais limitante, propriedades mecânicas modestas em relação aos materiais fibrosos sintéticos.

Marinelli *et al.* [3] escrevem com a intenção de divulgar e apresentar a inserção da área ou da cadeia produtiva de compósitos poliméricos com fibras vegetais dentro do contexto do Projeto Fênix Amazônico, onde duas frentes de pesquisas são propostas: uma que trabalharia com sistemas de produção com maquinário relativamente barato e simples, para que as comunidades rurais da Amazônia pudessem absorver tal tecnologia e uma outra frente para desenvolver materiais compósitos com tecnologia de fabricação mais avançada. Espera-se deste modo despertar o interesse da comunidade científica e tecnológica das mais diversas áreas em colaborar para o desenvolvimento de novas tecnologias que possam ser utilizadas para a recuperação de áreas degradadas da Amazônia.

Satyanarayana *et al.* [12] descrevem a respeito da disponibilidade de algumas fibras lignocelulósicas brasileiras, seus mercados, métodos de extração, morfologia, propriedades e aplicações atuais. Também são apresentadas algumas perspectivas para estas fibras, considerando sua crescente importância e todo espectro de oportunidades promissoras e desafios para o Brasil e outros países em desenvolvimento.

3.2.1 Fibras de Curauá

O curauá (*Ananas erectifolius*) é uma planta amazônica conhecida desde os tempos pré-colombianos pela qualidade de suas fibras que são extraídas das folhas

da planta. É uma planta da família das bromeliáceas que vem atraindo muita atenção, particularmente a partir de 1993, quando esta fibra foi reconhecida comercialmente pela indústria automotiva brasileira [13].

A fibra de curauá está entre as fibras lignocelulósicas de maior resistência, com resistência a tração média em torno de 400 MPa. No entanto, devido a sua característica heterogênea, comum a todas as fibras vegetais, há uma larga dispersão nessa propriedade, e resistência à tração superior a 700 MPa ou inferior a 200 MPa pode ser encontrada para fibras individuais [14]. A grande dispersão nos resultados de resistência á tração é comum quando se trata de fibras vegetais. Fatores como a variação dimensional ao longo do comprimento das fibras e a diversidade de formatos da seção transversal influenciam a dispersão dos resultados [7].

A fibra de curauá é a terceira numa análise econômica no país, após sisal e juta, e está entre as lignocelulósicas de maior rigidez. Algumas vezes citada como a mais competitiva entre as fibras brasileiras, a atenção sobre ela vem crescendo e, de certa forma, compensando a diminuição no cultivo de juta, sendo cultivada em larga escala na região Amazônica. A resistência à tração desta fibra é 5 a 9 vezes maior que a do sisal ou da juta [7, 12, 14] e as folhas da planta podem ser colhidas em apenas um ano após a plantação, tendo aproximadamente 1,0-1,5 m de comprimento, 0,04 m de largura e 5 mm de espessura. Com aproximadamente 8 meses, as folhas rendem 5-8% de fibras, o restante é mucilagem, que pode ser usada como ração animal ou fertilizante orgânico. Estas fibras são utilizadas pela população indígena para a confecção de redes para dormir, cordas, linhas de pesca, entre outros [12]. Cordeiro *et al.* [8] realizaram uma análise da viabilidade econômica das monoculturas de parica e curauá, e da associação no cultivo de parica e curauá. Foi constatado que o plantio associado é economicamente recomendável, tanto para agricultores que desejam implantar um reflorestamento, como para empresas interessadas em reduzir o custo florestal.

Segundo Horeau *et al.* [15], os estudos publicados de caracterização destas fibras são ainda escassos. A composição química típica da fibra foi relatada como sendo celulose (73,6%), hemicelulose (9,9%), lignina (7,5%) e cinzas (0,9%). Em outra referência, cita-se a seguinte composição: celulose (66,4%), lignina (7,5%), xilana (11,6%), mannan (0,1%), galactan (0,5%) e arabinan (0,5%) [16].

Caraschi e Leão [17] descrevem a caracterização química, térmica e mecânica das fibras de curauá. Os resultados da caracterização química demonstraram: alto teor de celulose (70,7%), teor de umidade (7,92%), teor de cinzas (0,79%), solubilidade em água quente (1,03%), solubilidade em NaOH 1% (19,3%), solubilidade em ciclohexano:etanol - 1:1 (0,48%), holocelulose (91,8%), lignina (11,1%) e índice de cristalinidade (75%). Tendo sido concluído que é possível utilizar fibras de curauá em materiais compósitos ou novos produtos com propriedades interessantes.

Na caracterização química das folhas (fibras) de curauá, dá-se atenção especial à composição dos componentes lipofílicos e à caracterização estrutural da lignina, pois essas duas frações orgânicas são muito importantes durante a formação da polpa e a fabricação de papel. As fibras de curauá são caracterizadas pelo alto teor de holocelulose e R-celulose (92,5 e 66,4%, respectivamente) e pelo baixo teor de lignina (6,5% do peso total da fibra), que é similar ao de outras fibras não-madeiráveis [18].

A Figura 2 mostra micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície fraturada (Figura 2a) e da seção em corte (Figura 2b) das fibras de curauá. Estas imagens mostram que as fibras de curauá consistem de um feixe de filamentos com diâmetro equivalente a 9-10 μm , empacotados pela ação da lignina.

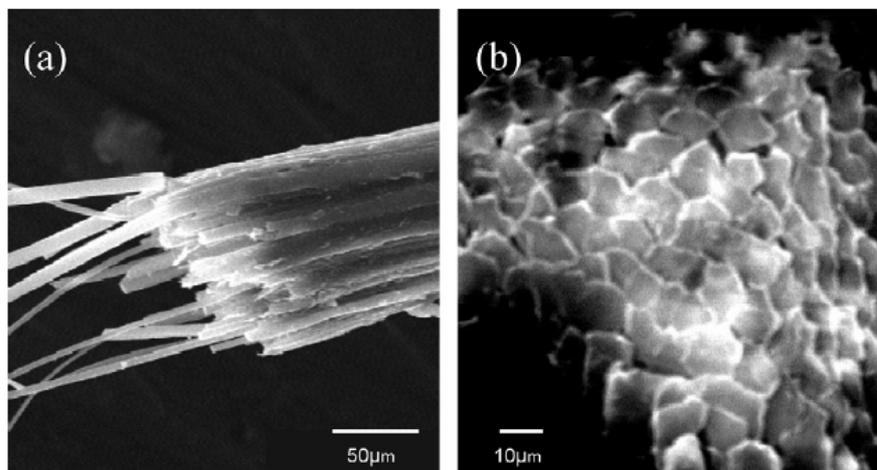


Figura 2: Superfície fraturada e área da seção transversal da fibra de curauá [4].

Também são encontrados estudos de espectroscopia dessas fibras, incluindo espectroscopia Raman e infra-vermelho (FT-IR), e de propriedades físicas e mecânicas, incluindo cristalinidade, resistência à tração em diferentes condições e propriedades térmicas. Estudos de difração de raios-X revelam um índice de cristalinidade das fibras de curauá em torno de 66%, o que pode explicar a alta resistência observada. O coeficiente de expansão térmica da fibra única e do feixe de fibras, no intervalo de temperaturas entre 293-323 K, foi determinado como sendo $38,07 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1}$ e $10,57 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1}$, respectivamente [13]. O percentual de umidade destas fibras é de aproximadamente 7,9% [15], sendo que a água contida nas fibras contribui para reduzir a rigidez da fibra, fator que pode comprometer sua utilização em compósitos poliméricos [6].

Silva e Aquino [7] apresentaram uma breve descrição e caracterização das fibras de curauá, por serem pouco conhecidas na comunidade científica, quando comparadas a outras fibras vegetais empregadas tradicionalmente em compósitos poliméricos. A caracterização consistiu de ensaios de tração, análise morfológica e termogravimétrica. Segundo Spinacé *et al.* [19], as fibras de curauá possuem propriedades mecânicas específicas similares às fibras inorgânicas o que é muito importante para seu uso como reforço em compósitos poliméricos além de serem matéria prima de fonte renovável. Fibras moídas de curauá, submetidas a diferentes tratamentos – lavagem em uma máquina de lavar convencional, tratamento por imersão em solução de hipoclorito de sódio ou tratamento com plasma frio de oxigênio em um reator de quartzo – e caracterizadas. Após os tratamentos, foram observadas modificações significativas em relação ao teor de umidade, às propriedades mecânicas e à rugosidade superficial. A micromorfologia das fibras lignocelulósicas pode exercer um efeito significativo nas propriedades mecânicas de compósitos com matriz polimérica. Fibras de curauá e piaçava apresentam relevos que, embora acarretem concentrações de tensões, não comprometem o efeito de reforço dos respectivos compósitos até uma quantidade de 30% de fibras [20].

Corrêa *et al.* [21] obtiveram nanofibras de celulose a partir de fibras de curauá submetidas a tratamento alcalino com solução de NaOH 5%. As nanofibras foram caracterizadas morfológicamente por microscopia eletrônica de transmissão e de força atômica, apresentando formato acicular e razão de aspecto (L/D) de aproximadamente 14. Após secagem da suspensão por liofilização, as nanofibras

foram caracterizadas usando a técnica de difração de raios-X, apresentando altos índices de cristalinidade, e de análise termogravimétrica (TGA), onde se observou que as nanofibras foram menos estáveis termicamente que a fibra tratada, mas próxima da fibra original, dependendo das condições de secagem das nanofibras.

Existe um interesse crescente no uso de fibras naturais como componentes de reforço em materiais compósitos, por serem baratas, menos abrasivas, biodegradáveis, quando comparadas com fibras inorgânicas. No entanto a natureza hidrofílica, das fibras naturais, afeta as propriedades adesivas devido à fraca interação interfacial entre as fibras e a matriz polimérica. A modificação da superfície da fibra por métodos físicos ou químicos pode amenizar esse problema. No trabalho de Femoseli *et al.* [22], a superfície das fibras de curauá foi modificada com solução de hipoclorito de sódio ou plasma. Estes tratamentos não modificaram a densidade e as propriedades mecânicas e térmicas das fibras, apenas aumentaram a rugosidade superficial e diminuíram o percentual de umidade das fibras. O tratamento por plasma foi considerado mais vantajoso por não gerar resíduo e ser realizado em apenas uma etapa.

3.3 Matrizes Termorrígidas

Dentre as resinas poliméricas, as resinas termorrígidas são as mais utilizadas no processamento de compósitos poliméricos. Isto ocorre por serem fáceis de processar, promovendo uma excelente molhabilidade dos reforços, e apresentarem um bom balanço de propriedades, além de estarem disponíveis em uma ampla variedade de *grades* a um custo relativamente baixo.

As resinas termorrígidas são obtidas a partir de oligômeros de baixo peso molecular e normalmente se apresentam na forma de um líquido de baixa a média viscosidade. A reação de reticulação se dá através da adição de um agente de cura (e.g. iniciador ou endurecedor) ou pelo aumento da temperatura. O processo de pós-cura é recomendável para que se obtenha o máximo em propriedades mecânicas. O sistema rígido resultante é uma rede macromolecular altamente reticulada, infusível e insolúvel, exibindo alta resistência/rigidez mecânica com um mínimo de tenacidade e alta estabilidade térmica [23,24].

3.3.1 Resina Poliéster

As resinas de poliéster são uma família de polímeros formados da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos (anidrido maleico ou ftálico) e glicóis, que, quando reagidos, dão origem a moléculas de cadeias longas lineares. O tipo de ácido influencia as propriedades finais da resina e poliésteres ortoftálicas, isoftálicas e tereftálicas podem ser produzidas. Se um ou ambos constituintes principais são insaturados, ou seja, contêm uma ligação dupla reativa entre átomos de carbono, a resina resultante é insaturada.

A Tabela 1 apresenta os diferentes tipos de resina poliéster.

Tabela 1: Diferentes tipos de resinas poliéster [25].

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 reação de síntese da resina poliéster é uma reação de polimerização por condensação em etapas, ou seja, a reação de um álcool (base orgânica) com um ácido, resultando em uma reação de esterificação, formando um éster e água. O grupo funcional [-COO-] é o grupo éster. A reação é reversível e, na prática, o equilíbrio é deslocado na direção da esterificação, com eliminação de água do meio reacional. Se a reação se processar com um diálcool e um diácido, o produto resultante contará com diversos grupos éster, dando origem a um poliéster, cujas unidades são unidas entre si por ligações éster [10].

A reação de cura de resinas poliéster insaturadas é realizada com iniciadores do tipo peróxido, que se dissociam formando um radical livre, para então se combinar a uma molécula de monômero, geralmente dissolvido em diluente reativo, como o estireno, formando assim a cadeia polimérica [26]. O ácido isoftálico não forma anidrido cíclico, i.e. não sofre regeneração, como no caso das ortoftálicas, e conseqüentemente, pode ser usado para se obter poliésteres de alto peso molecular, ou seja, com cadeias mais longas (Figura 3). Tais cadeias conferem ao produto final maior resistência mecânica, pois absorvem melhor impactos e, conseqüentemente, tornam-se polímeros de maior resistência química e térmica [25].

3.4 Desenvolvimento de Compósitos com Fibras de Curauá

Compósitos de polímeros com fibras vegetais vêm sendo também apontados como alternativas com potencial econômico para a fixação de carbono na natureza, reduzindo a emissão de CO₂ na atmosfera durante o seu ciclo de produção, processamento e utilização, ganhando assim um incremento de seu potencial econômico devido à possibilidade de comércio de créditos de carbono para a cadeia produtiva [3].

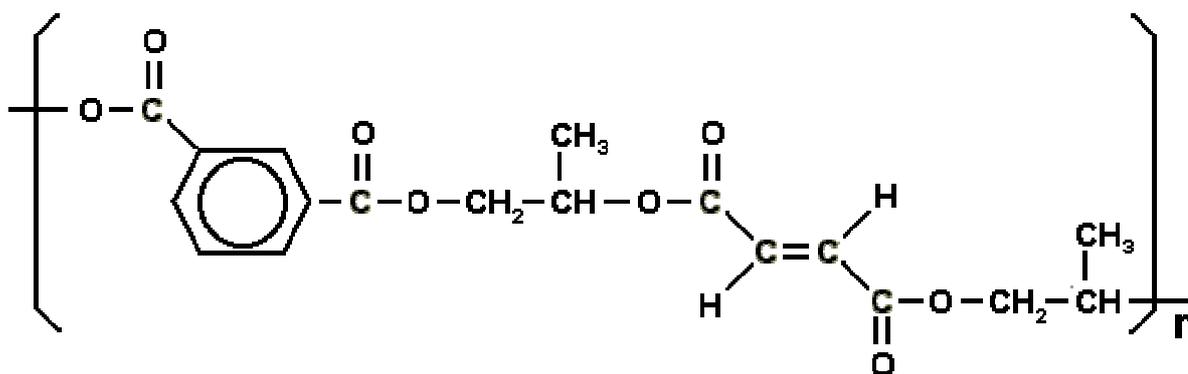


Figura 3: Resina poliéster isoftálica insaturada [25].

Em um trabalho publicado [1], avaliaram-se os prováveis impactos ao meio ambiente com a aplicação de fibras de curauá na indústria automobilística em

substituição à fibra de vidro. O estudo identifica as vantagens econômicas e sociais da aplicação de compósitos reforçados com fibras de curauá em peças de automóveis. É citado que, além de custar 50% menos que a fibra de vidro, o uso da fibra de curauá pode promover o desenvolvimento regional na Amazônia. O mercado de compósitos poliméricos com fibras naturais cresce rapidamente nos EUA (54% ao ano) e o mercado global potencial para fibras naturais apenas na indústria automobilística é de aproximadamente 800.000 ton/ano. No Brasil, é esperado que aproximadamente 10.000 novos empregos relacionados ao setor de produção de fibras de curauá sejam criados somente ao redor da cidade de Santarém/PA até o final de 2006.

Entre os trabalhos na literatura, cita-se um onde foi realizada a moldagem por compressão e a caracterização de compósitos de matriz poliéster insaturada (ortoftálica) reforçados por fibras de curauá. Alguns resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2, sendo que Giacomini *et al.* [27] concluíram que as propriedades mecânicas encontradas não atenderam às especificações exigidas pela Mercedes-Benz. Entretanto, foram sugeridas alternativas para solucionar as dificuldades, como a modificação das características dos equipamentos, a formulação da resina e a necessidade de incorporar maior teor de fibras ou mudar o tipo de reforço.

Tabela 2: Propriedades mecânicas de compósitos com fibras de curauá [27].

Teor de fibras (w/w)	Resistência à tração (MPa)	Resistência ao impacto (kJ/m ²)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de Young (MPa)
22,2	34,7	13,9	62,3	4042
28,4	53,1	26,0	85,3	4998
29,4	40	22,5	54,4	3636

Em outro estudo [28], investigaram-se as propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster ortoftálica reforçada com até 30% em peso de fibras contínuas e alinhadas de curauá. Foram realizados ensaios de flexão e a superfície fraturada foi observada por MEV. Segundo os autores, os resultados mostraram

resistência superior à obtida por outros pesquisadores em compósitos com fibras curtas e não-orientadas, como esperado.

No trabalho de Monteiro *et al.* [14], foram investigados os aspectos microestruturais das fibras de curauá em relação ao desempenho em testes de *pull-out*, realizados para caracterizar a resistência interfacial das fibras com uma matriz de poliéster. De acordo com os autores, em uma escala micro-estrutural, a adesão natural entre os filamentos que constituem a fibra origina vazios inter-espaciais entre esses filamentos. Estes vazios permitem a penetração da matriz ainda líquida podendo auxiliar na adesão à matriz polimérica, resultando em um reforço efetivo para compósitos reforçados com fibras de curauá.

Almeida *et al.* [29], fizeram um estudo para verificar a eficácia de tratamentos com NaOH e enzimas em fibras de curauá utilizadas para a produção de compósitos com matriz poliéster. Comparou-se os valores da tangente de perda ($\tan \delta$), do módulo de armazenamento (E') nas regiões elástica e viscosa, da temperatura de transição vítrea (T_g) e também o comportamento em ensaios de flexão de três pontos desses compósitos. Embora nenhum tratamento tenha alterado de maneira significativa os valores de resistência à flexão, houve uma redução estatisticamente significativa na deformação dos compósitos reforçados por fibras tratadas em relação ao compósito fabricado com fibras *in natura*. Todos os tratamentos aumentaram o módulo de elasticidade dos compósitos e houve uma tendência de aumento da rigidez nos compósitos tratados, em relação ao compósito reforçado com fibras *in natura*, que foi creditado a uma possível maior adesão na interface fibra/matriz. Em outros trabalhos, estudam-se tratamentos químicos das fibras de curauá com os agentes NaOH [30] e álcool furfurílico [15] de modo a melhorar a performance mecânica dos compósitos.

Mothe *et al.* [31] avaliaram a influência das fibras de curauá no comportamento térmico e na coesividade polimérica do poliuretano (PU) por análise termo-dinâmico-mecânica e calorimetria exploratória diferencial. A interação específica entre as fibras e o segmento rígido do PU influenciou o módulo de armazenamento (E') e o módulo de perda (E''). Cita-se também um trabalho com compósitos de PU reforçados com fibras de curauá em diferentes proporções: 10 e 20% w/w, que foram preparados usando o método de mistura por fusão [32].

Nesta dissertação aborda-se o desenvolvimento de compósitos de matriz poliéster insaturada reforçados com fibras de curauá. Entretanto, há poucos trabalhos em artigos científicos publicados em revistas que exploram essa combinação de materiais. Em vista dessa dificuldade, também incluiu-se trabalhos que investigaram compósitos com fibras de curauá em matriz termoplástica, buscando-se uma análise de seu potencial como reforço.

Compósitos de polipropileno (PP) reforçado com fibras de curauá e moldados por injeção foram testados através de ensaios de tração (ASTM D638), de impacto (ASTM D 256) e de dureza Shore D (ASTM D 2240) [33], onde se avaliou o efeito do teor de fibras e de polipropileno maleatado (MAPP), usado como compatibilizante, nas propriedades mecânicas dos compósitos. Os resultados mostraram que o agente de acoplamento não teve influência nas propriedades de tração, no entanto o módulo e o alongamento em tração dos compósitos foram influenciados pelo teor de fibras.

Em outro trabalho [34], compósitos de PP reforçados por fibras vegetais (sisal, *kenaf*, *hemp*, juta e côco) foram processados por compressão, utilizando-se o método de empilhamento de filmes de polipropileno. As propriedades mecânicas dos compósitos com as diferentes fibras vegetais foram testadas e comparadas a compósitos feitos com mantas de fibras de vidro. *Kenaf*, *hemp* e sisal apresentaram propriedades semelhantes em tensão e módulo, mas em impacto os compósitos com *hemp* apresentaram-se melhores do que os reforçados com *kenaf*. Em geral, as propriedades específicas encontradas para os compósitos com fibras vegetais foram mais favoráveis que os compósitos com fibras de vidro.

Araújo *et al.* [35] prepararam compósitos com fibras de curauá e polietileno de alta densidade (PEAD) por extrusão com dois diferentes agentes de acoplamento. O polietileno graftizado com anidrido maleico afetou a estabilidade do compósito mais acentuadamente do que o polietileno graftizado com co-vinil acetato. Os resultados também indicaram que uma forte interação fibra-matriz se opõe ao aumento de cristalinidade causado pela fibra.

Compósitos de polipropileno e polietileno de alta densidade, reforçados com 20 wt% de fibras de curauá foram preparados numa extrusora de dupla rosca. Avaliou-se os efeitos da velocidade de rotação, as propriedades mecânicas dos compósitos, a morfologia e as dimensões das fibras. O aumento na velocidade de

rotação causa a redução do comprimento, do diâmetro e da razão de aspecto das fibras nos dois tipos de compósitos. A diminuição do efeito de reforço das fibras fica evidenciado pelas propriedades mecânicas de flexão e tração dos compósitos [36].

Segundo Santos *et al.* [37], o interesse recente pelo uso de fibras vegetais como reforço de polímeros tem aumentado devido às vantagens ambientais e tecnológicas únicas que podem ser obtidas. Neste trabalho, foi avaliado o uso em compósitos de fibras de curauá com poliamida-6 (PA-6) em substituição à fibra de vidro. Foram preparados por extrusão compósitos com diferentes teores de fibra, 20, 30 e 40% wt% e com comprimento médio de fibra de 0,1 ou 10 mm, sendo moldados por injeção. As propriedades em tração e flexão desses compósitos foram melhores do que os sem carga, mas inferiores aos de poliamida-6 reforçados com fibra de vidro. No entanto, a resistência ao impacto e a temperatura de deflexão térmica foram similares aos compósitos de poliamida-6 com fibra de vidro, apresentando menor densidade o que permite sua utilização em aplicações específicas e não-críticas.

Em outro trabalho [38], a superfície das fibras de curauá foi modificada com nano-partículas de polianilina (PANI), o que resultou em um aumento significativo da condutividade elétrica das fibras (em aproximadamente 2500 vezes). O material modificado também foi caracterizado por FT-IR, XPS e SAXS, e os resultados obtidos foram utilizados para explicar algumas das características observadas no material, como a condutividade elétrica.

Também foi desenvolvido um compósito “verde”, fabricado com resina biodegradável termoplástica, uma blenda à base de amido de milho e poliácido láctico, reforçada por fibras de curauá. O compósito atingiu uma resistência à tração de 10,6 MPa, densidade de 1,16 Mg/m³ e deformação na ruptura de 6,5% [4].

Fibras de curauá como reforço de compósitos poliméricos termoplásticos apresentam propriedades específicas excelentes quando comparadas com cargas minerais. As propriedades mecânicas dos produtos são próximas dos produtos com carga de fibra de vidro, no entanto é necessário melhorar a interação fibra-polímero. Compósitos poliméricos com fibras naturais abrem muitas oportunidades não apenas na indústria automotiva, mas também em várias outras aplicações industriais onde há a necessidade por compósitos “verdes”. Além do aspecto ecológico dessas fibras existem muitas considerações relacionadas à aplicação industrial, incluído o

segmento automotivo. Pesquisas atuais e futuras devem focar em como incrementar o desempenho desses compósitos para torná-los tão funcionais quanto os produtos tradicionais [39]. Neste contexto, cita-se o trabalho de John e Thomas [2], que fizeram uma revisão na literatura recente sobre vários aspectos de fibras lignocelulósicas e de biocompósitos. O termo biocompósitos vem sendo aplicado a uma gama de materiais derivados total ou parcialmente de recursos renováveis da biomassa. Segundo esses autores, a revolução atual dos materiais nessa área talvez seja promovida pelos materiais compósitos verdes.

3.5 Desenvolvimento de Compósitos Híbridos com Fibras Vegetais e Fibras de Vidro

Segundo Mishra *et al.* [16], os materiais compósitos baseados em reforços compostos por dois ou mais tipos de fibras em uma matriz, ou seja, os compósitos híbridos, podem apresentar uma grande diversidade de propriedades e ainda permanece em um estágio preliminar de desenvolvimento. Pesquisas revelam que o comportamento dos compósitos híbridos aparenta ser a simples média ponderada das propriedades dos componentes individuais, podendo, porém apresentar um balanço mais favorável entre as vantagens e as desvantagens inerentes a todos os materiais compósitos.

Compósitos híbridos podem ser projetados pela combinação de fibras sintéticas e fibras naturais em uma matriz e pela combinação de duas fibras naturais (às vezes denominadas de biofibras) em uma matriz. A hibridização com fibra de vidro é um método para incrementar as propriedades mecânicas dos compósitos com fibras naturais, sendo que o grau de resistência depende do *design* e da construção do compósito [2]. É geralmente aceito que as propriedades dos compósitos híbridos são controladas por fatores como a natureza da matriz, o comprimento e a composição relativa dos reforços, a orientação, a interface fibra-matriz, o grau de entrelaçamento entre as fibras, o design da hibridização, entre outros. No trabalho citado, foi avaliado experimentalmente o potencial de reforço obtido com a introdução de fibras vegetais (abacaxi e sisal) formando compósitos híbridos com fibras de vidro em matriz de poliéster. Adicionando-se baixos teores de

fibra de vidro às fibras vegetais promoveu-se a performance mecânica do compósito híbrido. A superfície das fibras de sisal também foi modificada com diferentes tratamentos químicos o que proporcionou uma melhora nas propriedades mecânicas dos compósitos híbridos, sendo observado também que nos compósitos híbridos há uma menor absorção de umidade [16].

Em outro trabalho [40], foi avaliado o desempenho mecânico de compósitos de poliéster com tecidos híbridos sisal/vidro fabricados manualmente com 3 diferentes tipos de tecidos, com sisal no sentido do urdume e vidro no sentido da trama. Como esperado, as propriedades em tração dos compósitos aumentaram com o aumento do teor de fibras, sendo maiores na direção das fibras de vidro.

Cavalcanti *et al.* [41] apresentaram uma modelagem matemática tridimensional transiente para prever a transferência de massa durante a absorção de água em um compósito com tecido híbrido juta-vidro (26% de juta, 32% de vidro e 42% de resina poliéster insaturado). Foram mostrados dados da evolução da umidade média dentro do material durante o processo em comparação aos dados experimentais analisados, obtendo-se um coeficiente de difusão.

Já na referência [42], foi desenvolvido um compósito laminado híbrido com matriz em resina poliéster ortoftálica reforçada por fibras contínuas de curauá e mantas de fibra de vidro-E. Foram realizados ensaios de absorção de água e de tração e flexão. Concluiu-se que os compósitos híbridos absorvem mais umidade do que compósitos feitos unicamente com fibras de vidro. As propriedades mecânicas mais afetadas pela absorção de água foram o módulo elástico em flexão, quando imerso em água do mar, e a resistência à tração, quando imerso em água destilada.

Da Silva *et al.* [43] desenvolveram compósitos laminados híbridos associando fibras naturais (mantas de fibras longas de curauá) e sintéticas (mantas de vidro-E) ao poliéster. As propriedades mecânicas em flexão do laminado híbrido foram muito próximas do laminado de fibra de vidro, já o laminado de curauá teve um desempenho bastante inferior. Nos ensaios de absorção de água, foi comprovada a eficiência da hibridização na redução do percentual de absorção de água em relação ao laminado com fibra natural.

Oliveira e Aquino [44] apresentaram um estudo de resistência, rigidez e mecanismo de dano de compósitos híbridos de matriz poliéster ortoftálica reforçada

com tecidos de vidro-E e tecidos de fibras de juta ou fibras unidirecionais de curauá, indicando um melhor desempenho mecânico dos compósitos vidro/curauá em relação aos vidro/juta. Também, fibras de palma de óleo foram hibridizadas com fibras de vidro, sendo que o desempenho geral dos compósitos foi melhorado pela adição de fibras de vidro. A resistência ao impacto apresentou um grande incremento pela introdução de uma pequena quantidade de fibras de vidro [45].

Em um estudo anterior do grupo de pesquisa LAPOL/UFRGS [46], avaliaram-se as propriedades mecânicas de compósitos híbridos sisal/vidro em matriz de poliéster em função da seqüência de empilhamento das diferentes mantas de fibra. As diferentes combinações de sisal e vidro apresentaram propriedades intermediárias, mas dependendo da seqüência de empilhamento e do volume de reforço, atingiram-se propriedades muito próximas aos dos compósitos com apenas fibras de vidro.

Como se pode ver, as combinações de fibras vegetais com fibras sintéticas pode se apresentar como uma ótima alternativa para a inclusão de fibras vegetais em compósitos de maior responsabilidade, ao mesmo tempo reduzindo-se o uso de fibras sintéticas. Além disso, a combinação das diferentes propriedades das fibras envolvidas pode resultar em materiais mais eficientes em determinadas aplicações, por exemplo, unindo a rigidez da fibra sintética com a maior capacidade de absorção de vibrações das fibras vegetais.

3.6 Ensaio *Short Beam*

Ensaio denominado de *short beam* (ASTM D2344M) são realizados para inferir a resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS) de materiais compósitos. Estes ensaios permitem a identificação do local onde inicia a delaminação e a sua forma de propagação. Outra característica muito importante de compósitos que é a adesão fibra-matriz também pode ser indiretamente avaliada por este ensaio. Na literatura pesquisada, não foram encontrados trabalhos que relatassem resultados de ensaios *short beam* em compósitos reforçados com fibras vegetais e mantas

produzidas com fibras curtas de forma manual com dispersão homogênea e aleatória.

Compósitos são utilizados em muitas aplicações como materiais de engenharia. A resistência ao cisalhamento interlaminar é um parâmetro muito importante no design de estruturas. Muitos métodos foram sugeridos para mensurar a resistência ao cisalhamento interlaminar em compósitos reforçados por fibras. Atualmente, *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 [47], sendo largamente utilizado na caracterização mecânica de compósitos devido a 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 [48].

O ensaio de *short beam* submete o corpo de prova à flexão, da mesma maneira que um ensaio de flexão comum, porém o comprimento do corpo de prova é muito pequeno em relação à sua espessura. Por exemplo, a ASTM D2344 especifica que a distância entre suportes (*span*) deve obedecer à razão de 4:1 (*span*/espessura) para minimizar tensões associadas à flexão (efeitos de tração e compressão) e maximizar a tensão de cisalhamento induzida [49].

A presença de vazios em compósitos estruturais pode ter efeitos deletérios significativos. Em geral, os vazios diminuem a resistência estática e a sua vida em fadiga. Essa influência é bastante pronunciada na resistência ao cisalhamento interlaminar [50], portanto este teste fornece também uma estimativa da qualidade da moldagem. O teor de vazios pode ser determinado combinando-se as normas ASTM D792 e ASTM D2734, porém, em compósitos reforçados com fibras naturais, o cálculo do volume de vazios pode ficar comprometido devido à grande variação de densidade das fibras naturais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os materiais utilizados nos compósitos poliméricos desenvolvidos nesta dissertação foram:

a) Mantas com fibras de curauá, fibras de vidro e mantas híbridas (curauá/vidro), que foram produzidas *in house* utilizando:

- Fibras de curauá: Obtidas diretamente de um produtor do interior do estado do Pará (Figura 4a).
- Fibras de vidro E na forma de *roving* (bobina de fios), da empresa Owens Corning (código ME 3050 4000), com densidade de $2,5 \text{ g/cm}^3$, para aplicação em moldagem por *spray-up* (Figura 4b).

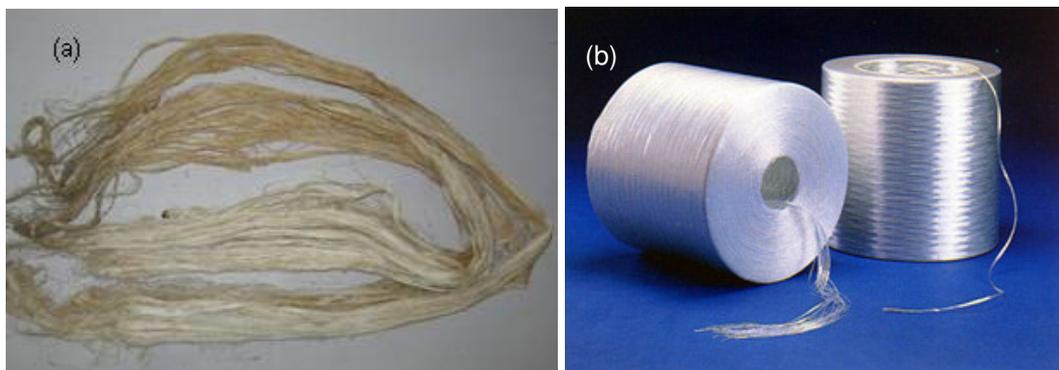


Figura 4: Fibras de curauá *in natura* (a) e *roving* de fibras de vidro-E (b).

b) Duas resinas de poliéster insaturada isoftálica, especificadas nas Tabelas 3 e 4.

O que motivou a substituição da resina UCEFLEX UC ISO 1005 pela ARAZYN AZ 12.0, foi o envelhecimento da resina e a impossibilidade de adquirir quantidades inferiores a 250 kg, enquanto que a ARAZYN pôde ser adquirida na quantidade adequada para os experimentos que seriam realizados.

Tabela 3: Características da resina UCEFLEX UC ISO 1005, da Elekeiroz [51].

Descrição: Resina poliéster insaturada, isoftálica, de média reatividade, média viscosidade, não acelerada de cura rápida e uniforme, pequena contração durante a polimerização e excelentes propriedades mecânicas finais.

Características	Unidade	Valores
Viscosidade (25°C)	cP	400 – 600
Tempo de gel*	min	9 – 15
Pico exotérmico	---	---
Índice de acidez	mgKOH/g	15 max
Teor de sólidos	---	---
Teor de estireno	%	44 max
Densidade (25 °C)	g/cm ³	1,10 – 1,20
Dureza Barcol	---	---

*Cura a 25°C, com 0,6 c.c. de Octanato de Co 6% + 0,9 c.c. de P-MEK em 100 g de resina.

Tabela 4: 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.

c) Dois iniciadores de reação:

- BUTANOX M-50 - Peróxido de metil-etil-cetona (PMEK), 33% em dimetil-ftalato).
- Peróxido de Benzoila (PBO).

O PMEK foi substituído pelo PBO visando um maior controle sobre o processo de moldagem já que o PBO só começa a reagir acima de 50°C.

d) Como desmoldante foram utilizados:

- Cera de carnaúba.
- Chemelease 75 (agente desmoldante do tipo semi-permanente da CHEM-TREND).

A cera de carnaúba foi substituída pelo agente desmoldante Chemelease 75, visando um melhor acabamento superficial e maior agilidade no processo de moldagem e desmoldagem dos compósitos.

4.2 Métodos

4.2.1 Preparo das Fibras de Curauá

As fibras utilizadas neste estudo foram adquiridas diretamente de um agricultor da região de Santarém, no interior do estado do Pará. As fibras não haviam sofrido qualquer tipo de tratamento, a não ser a retirada da mucilagem e uma limpeza grosseira das fibras, secando ao ar livre. Tendo-se assim a oportunidade de trabalhar com fibras de curauá em seu estado natural.

Buscando a forma mais econômica e eficaz para a utilização das fibras de curauá, como reforço em compósitos poliméricos, as fibras foram utilizadas de três diferentes formas ou com três diferentes “tratamentos” básicos. De acordo com o tratamento realizado, as fibras foram denominadas:

- ***In natura***: Fibras utilizadas como recebidas, sofrendo apenas uma limpeza superficial (Figura 5a).
- **Secas**: Fibras utilizadas após uma limpeza superficial e uma secagem em estufa com circulação forçada de ar (Marca DeLee, Modelo N2.04), imediatamente antes da moldagem dos compósitos, na temperatura de 105°C por 30 min.
- **Lavadas**: Fibras da Figura 5b que foram penteadas e passaram por um processo manual de lavagem para a retirada de sujidades e impurezas, ficando submersas em água destilada durante 1 h. Em seguida, foram secas por 50 min a 105°C no mesmo equipamento descrito acima e novamente penteadas para provocar a desfibrilação e aprimorar a limpeza. As mantas foram secas imediatamente antes da moldagem dos compósitos, na temperatura de 105°C por 30 min.

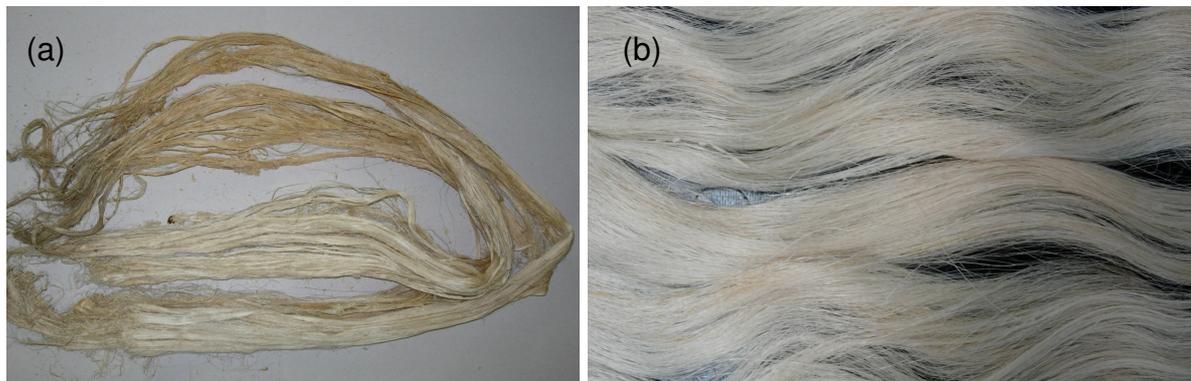


Figura 5: Fibras de curauá *in natura* (a) e fibras lavadas (b).

Assim, definiu-se o processamento primário aplicado às fibras utilizadas para o restante dos compósitos fabricados durante o trabalho. Após cada tratamento, as fibras foram selecionadas, cortadas e preparadas para serem utilizadas como reforço.

A densidade das fibras de curauá *in natura* e lavadas foi obtida através de ensaios de picnometria, segundo a norma ISO 1183-1. Também determinou-se a densidade da fibras de curauá lavadas através de ensaios de picnometria a gás, utilizando um multi-picnômetro (Marca Quantachrome, Modelo MVP-1) com gás

Hélio. O picnômetro a gás determina o volume verdadeiro de um sólido, mesmo que poroso, por variação da pressão de gás numa câmara de volume conhecido. Normalmente utiliza-se Hélio porque este gás, além de inerte, penetra facilmente nos poros (acessíveis) da amostra, devido ao pequeno tamanho dos seus átomos, permitindo assim, determinar o volume do sólido com mais rigor [53].

Através da análise termogravimétrica (TGA) em atmosfera de nitrogênio, com rampa de aquecimento de 20°C/min, observou-se a estabilidade térmica das amostras de fibras de curauá *in natura* e após lavagem com o objetivo de definir as temperaturas possíveis de processamento dos compósitos sem provocar danos à estrutura das fibras.

4.2.2 Produção das Mantas com Fibras de Curauá

Com o volume de reforço a ser utilizado em cada compósito e a densidade das fibras pré-definidos, foram produzidas mantas por dispersão manual homogênea e aleatória nas dimensões do molde a ser utilizado. Este método foi utilizado para a produção das mantas utilizadas na definição do tipo de tratamento a ser empregado nas fibras e também para os compósitos de curauá onde se estudou a variação do teor de fibras e para os híbridos (Figura 6).

Para os compósitos onde se avaliou o efeito dos diferentes comprimentos de fibras, as mantas foram produzidas em um aparato construído com material compósito reutilizado que foi denominado de “aquário”. Este aparato consistiu de um recipiente contendo água destilada e um suporte para içar a manta ao final do processo (Figura 7), e foi usado com o objetivo de se avaliar sua eficiência na produção de mantas de fibras vegetais.



Figura 6: Fibras de vidro e curauá picadas (a), manta de curauá (b) e manta híbrida curauá/vidro (c).



Figura 7: Aparato construído de material compósito, utilizado para a produção de mantas de fibras vegetais.

Para se produzir as mantas no aparato desenvolvido, as fibras de curauá lavadas foram cortadas no comprimento requerido e novamente submersas dentro de um recipiente com água destilada por 10 a 15 min, então são içadas gradativamente e dispersadas dentro do aquário (Figura 8a). Com a deposição das fibras, a manta vai sendo formada (Figura 8b) até sua emersão completa (Figura 8c), sendo então prensada durante 10 min sob uma carga de 2 ton para a retirada do excesso de água e então secas a 105°C durante 50 min na mesma estufa citada.

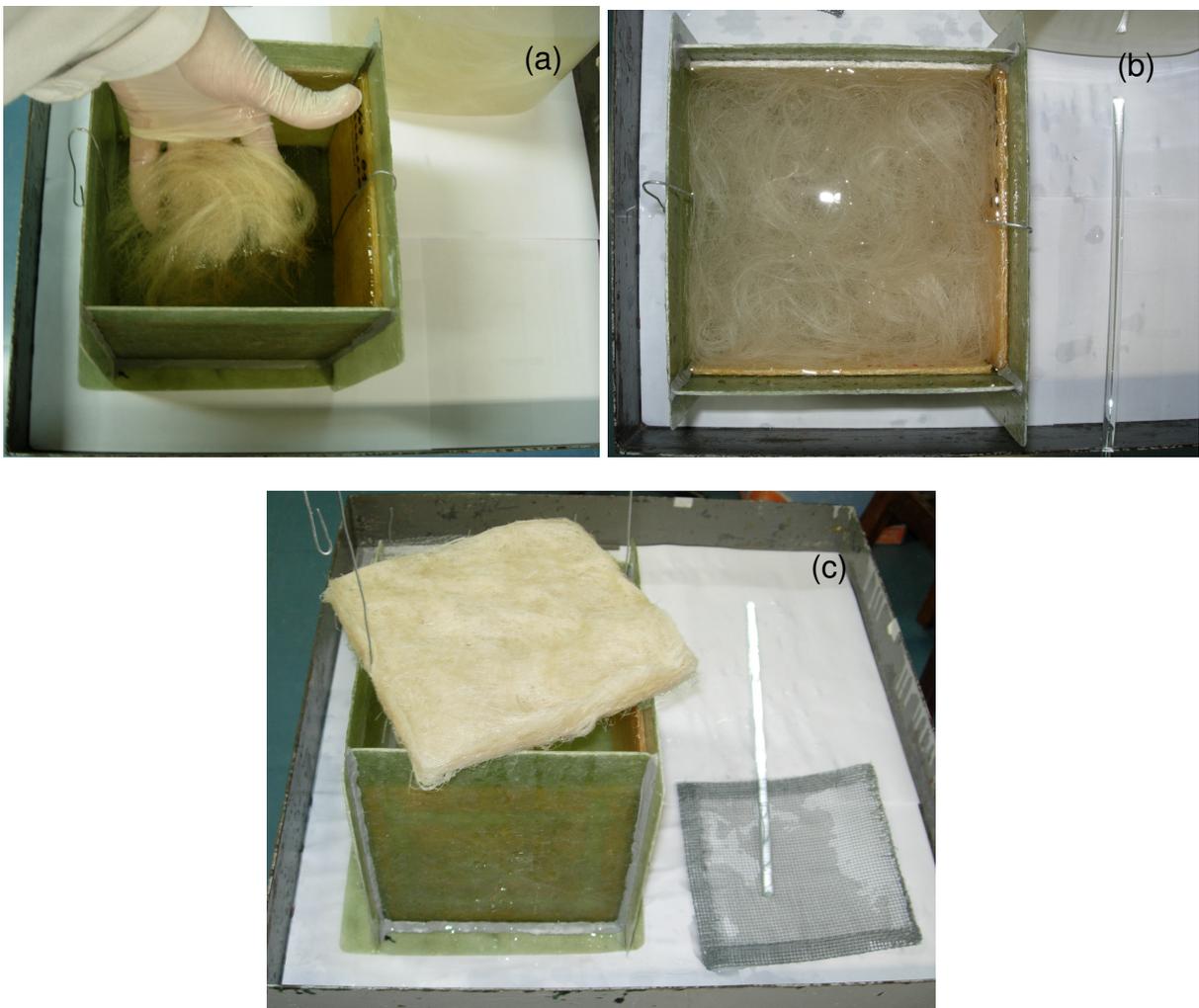


Figura 8: Processo de produção de mantas em água destilada: (a) início da deposição das fibras, (b) manta em formação e (c) manta obtida.

4.2.3 Projeto e Desenvolvimento de Molde

O LAPOL já contava com um molde metálico para o processamento por compressão dos compósitos (Figura 9). Este molde foi usado para a obtenção dos compósitos preliminares.

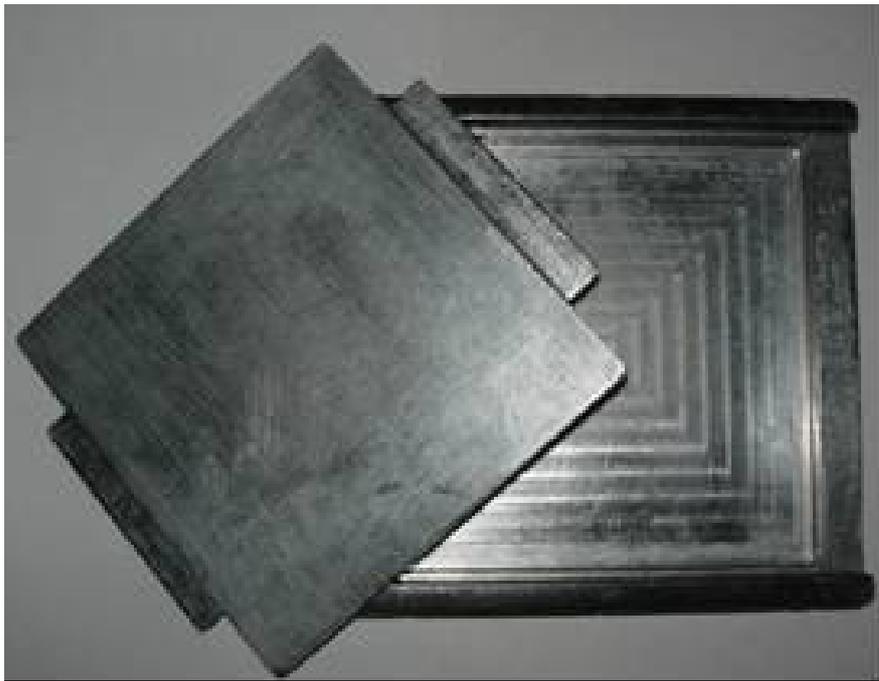


Figura 9: Molde em aço inox, cavidade interna de $150 \times 50 \times 10$ mm – denominado *Molde 1*.

Entretanto, visando maior agilidade na produção, um melhor acabamento superficial e maior uniformidade dimensional dos compósitos, optou-se pelo desenvolvimento de um novo molde. As Figuras 10 e 11 mostram, respectivamente, os desenhos da parte inferior (fêmea) e da parte superior (macho) do projeto do molde. O molde final foi produzido em aço inox AISI 304 no laboratório de usinagem da Universidade Comunitária de Caxias do Sul (UCS) e está apresentado na Figura 12.

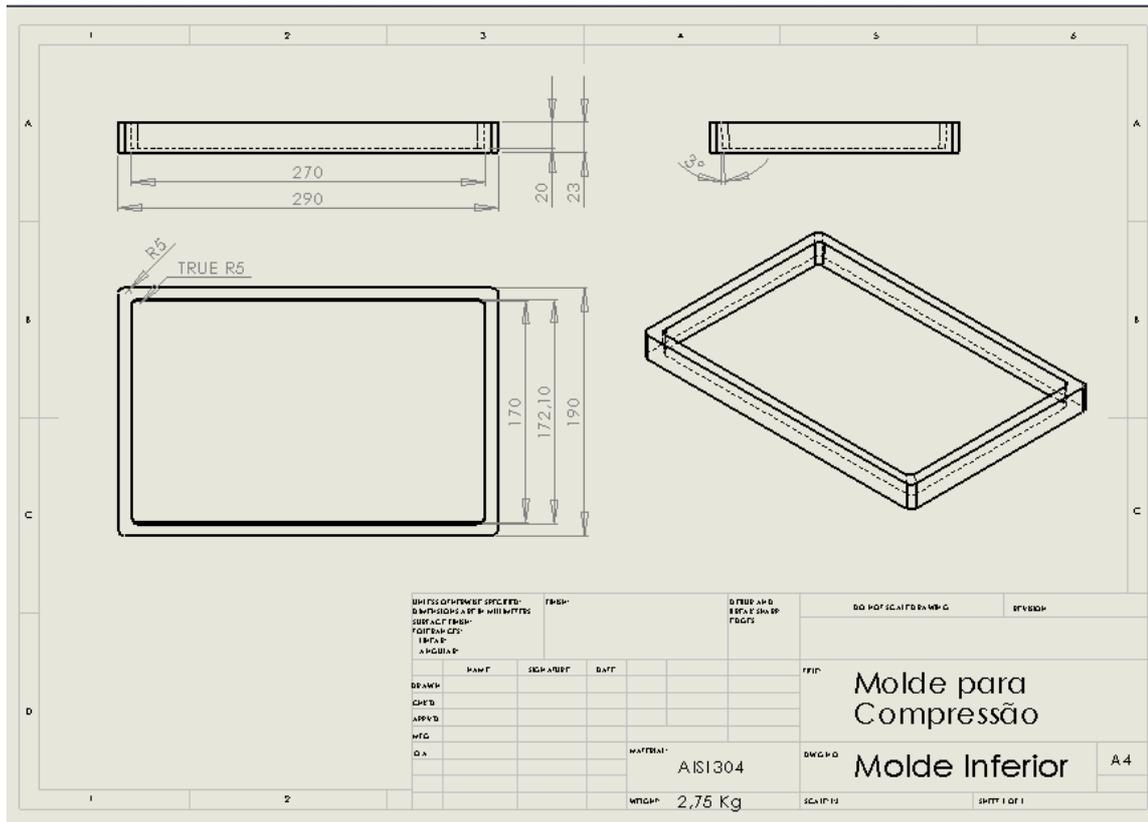


Figura 10: Desenho da parte inferior do molde construído - Molde 2.

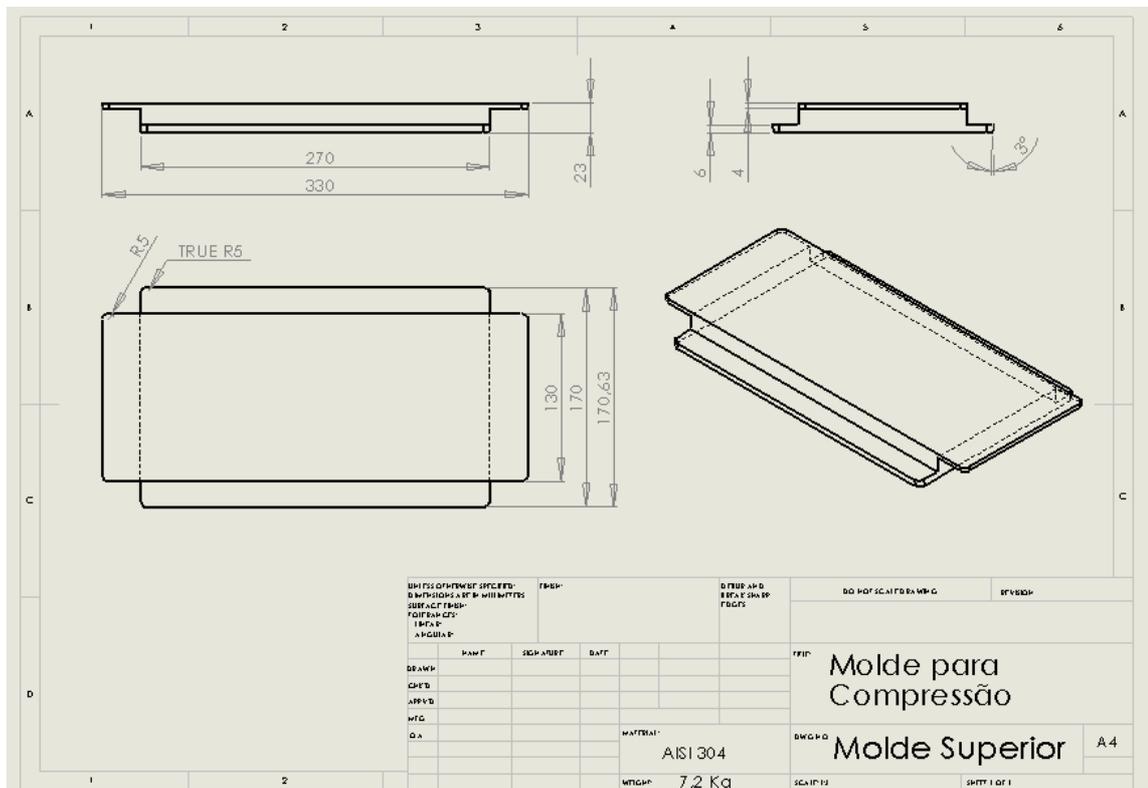


Figura 11: Desenho da parte superior do molde construído - Molde 2.



Figura 12: Molde em aço inox - cavidade interna de $270 \times 170 \times 22$ mm – denominado *Molde 2*.

4.2.4 Produção dos Compósitos

O processo de moldagem utilizado, apresentado no fluxograma da Figura 13, foi o de compressão à quente sob carga de 3 ton, a 95°C e por 70 min. O equipamento empregado foi uma prensa hidráulica da Marconi com aquecimento e controle/monitoramento digital, modelo MA 098/A 3030 (Figura 14).

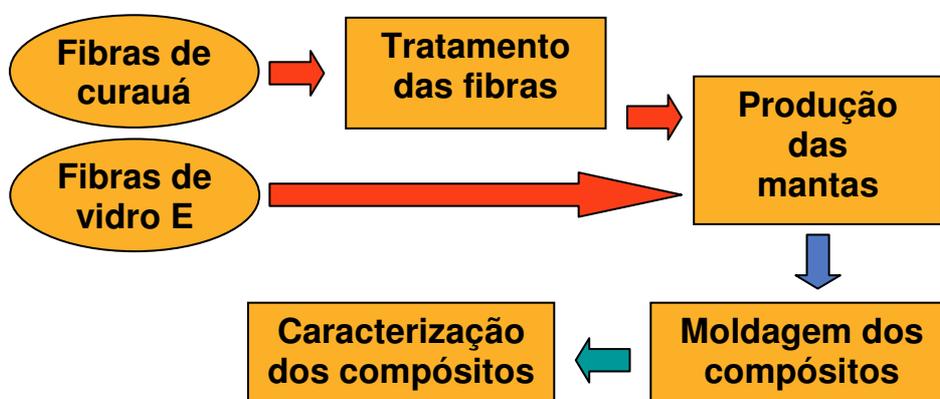


Figura 13: Fluxograma de produção e caracterização dos compósitos.



Figura 14: Prensa hidráulica Marconi utilizada nas moldagens.

Como reforço, foram utilizadas mantas de fibras de curauá (tratadas ou não) ou mantas híbridas (curauá/vidro). Com exceção das mantas dos compósitos com fibras *in natura*, todas as mantas sofreram um processo de secagem em estufa com circulação forçada de ar, permanecendo a 105°C por 30 min, imediatamente anterior à moldagem. Também antes de qualquer moldagem, o conjunto resina+iniciador sofreu um processo de degasagem por 5 min em um banho ultra-sônico (Marca UNIQUE, Modelo USC-1400A) (Figura 15).

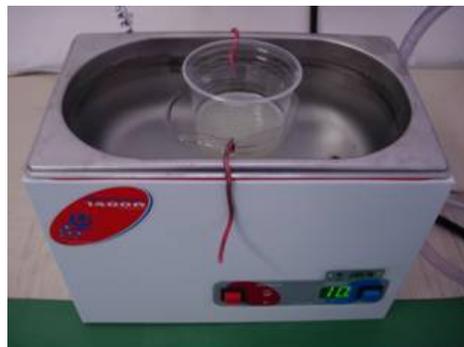


Figura 15: Equipamento de ultrassom utilizado na degasagem.

Os compósitos preliminares foram moldados utilizando-se mantas com fibras *in natura*, ou após secagem ou ainda após lavagem/secagem/penteamento. O comprimento e o teor volumétrico de fibras ($\%V_f$) utilizados foram de 30 mm e de 20%, respectivamente. Em seguida, foram produzidos compósitos variando-se o comprimento das fibras entre 10, 20, 30, 40 e 50 mm, mantendo-se o ($\%V_f$) de 20%. Foram moldadas placas planas, em um molde de aço inox, de cavidade interna com dimensões de $150 \times 150 \times 3$ mm (Figura 9). Estes compósitos foram produzidos na forma de placas planas no *Molde 1* (Figura 9) utilizando-se a resina UCEFLEX UC ISO 1005 (Tabela 3) e o iniciador BUTANOX M-50, na proporção de 1,5% em volume de resina. Não foi utilizado pós-cura nesses compósitos.

Também foram produzidos compósitos com fibras de curauá para serem caracterizados por ensaios *short beam*. Foram moldados compósitos com $\%V_f = 20\%$ com diferentes comprimentos de fibra (10, 20, 30, 40 e 50 mm), outros compósitos mantendo-se o comprimento das fibras em 30 mm e utilizando $\%V_f = 10, 20, 30$ e 40% , além de compósitos com diferentes espessuras (3,15, 4,80, 6,45 mm) mantendo-se o $\%V_f$ (20%) e o comprimento de fibra (30 mm) constantes. Estes compósitos foram moldados na forma de placas planas nas mesmas condições supra-citadas.

Após a definição do tipo de pré-processamento e do comprimento ótimos das fibras de curauá, foram moldados compósitos com diferentes frações volumétricas de fibras ($\%V_f = 10, 20, 30$ e 40%). Nessas moldagens, foi utilizada a resina ARAZYN AZ 12.0 (Tabela 4) e o *Molde 2*. Como iniciador, foi utilizado peróxido de benzoila (PBO) na proporção de 2% em massa de resina. Esses compósitos passaram por pós-cura de 2 h a 60°C , em estufa com circulação forçada de ar, conforme recomendação do fabricante.

Finalmente foram produzidos compósitos híbridos, com $\%V_f = 20\%$ (total), utilizando-se um teor volumétrico variável das fibras constituintes (curauá/vidro) entre 0/100, 25/75, 50/50, 75/25 e 100/0 (volume/volume). Nessas moldagens foi utilizada a resina ARAZYN AZ 12.0 e PBO na proporção de 2% em massa de resina e o *Molde 2*. Esses compósitos passaram por pós-cura de 2 h a 60°C , em estufa com circulação forçada de ar.

4.2.5 Caracterização dos Compósitos

4.2.5.1 Preparação dos Corpos de Prova

A partir das placas moldadas foram extraídos corpos de prova (CPs) para a realização dos diversos ensaios, utilizando-se uma máquina de corte da NORTON, modelo TT 200 EM, com disco diamantado. Os CPs sofreram então um polimento final em uma politriz (Marca PANTEC, Modelo Polipan-U), buscando-se o máximo de precisão dimensional. Os ensaios foram realizados em ambiente climatizado a uma temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de $50 \pm 5\%$. A caracterização dos compósitos foi realizada por diversos ensaios, detalhados a seguir.

4.2.5.2 Ensaio Realizados

- **Densidade:** A avaliação experimental de densidade dos diferentes compósitos foi realizada de acordo com a norma ASTM D792, usando água destilada.
- **Tração:** Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM D3039, em uma máquina universal de ensaios mecânicos EMIC DL 2000, com velocidade de 2 mm/min, sem extensômetro. Foram obtidos valores de módulo de elasticidade, resistência à tração e alongamento na ruptura. Foram utilizados 10 CPs de dimensões $150 \times 25 \times 3$ mm para cada tipo de compósito.
- **Flexão:** Os ensaios de flexão foram realizados de acordo com a norma ASTM D790, na mesma máquina universal de ensaios descrita acima. Obteve-se os valores de módulo de elasticidade, resistência à flexão e alongamento na ruptura. Foram utilizados 10 CPs de dimensões $120 \times 12,7 \times 3$ mm para cada tipo de compósito.
- **Impacto:** Os ensaios de impacto Izod (sem entalhe) foram realizados de acordo com a norma ASTM D256, em uma máquina para ensaios de impacto CEAST, com martelo de 5,5 J. Obteve-se os valores resistência ao impacto. Foram utilizados 12 CPs de dimensões $60 \times 12,7 \times 3$ mm para cada tipo de compósito.

- **Dureza Barcol:** Os ensaios de dureza Barcol foram realizados de acordo com a norma ASTM D2583. Os resultados de dureza foram obtidos a partir de uma média de 15 leituras na superfície do compósito em pontos espaçados entre si.
- **Short Beam:** Os ensaios *short beam* foram realizados de acordo com a norma ASTM D2344. A norma exige que a geometria dos corpos de prova seja: comprimento (h) = 6 × espessura, e largura (b) = 2 × espessura. Foram utilizados 10 corpos de prova em cada uma das séries de ensaios realizados e a razão s/t (*span/thickness*) foi mantida em 4:1.

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios EMIC DL 30000 N, na configuração representada na Figura 16. A resistência *short beam* foi calculada através da Equação (1), onde P é a carga máxima registrada, b e h são a largura e a espessura do corpo de prova, respectivamente.

$$\text{Resistência Short Beam} = \frac{0,75 \times P}{b \times h} \quad (1)$$

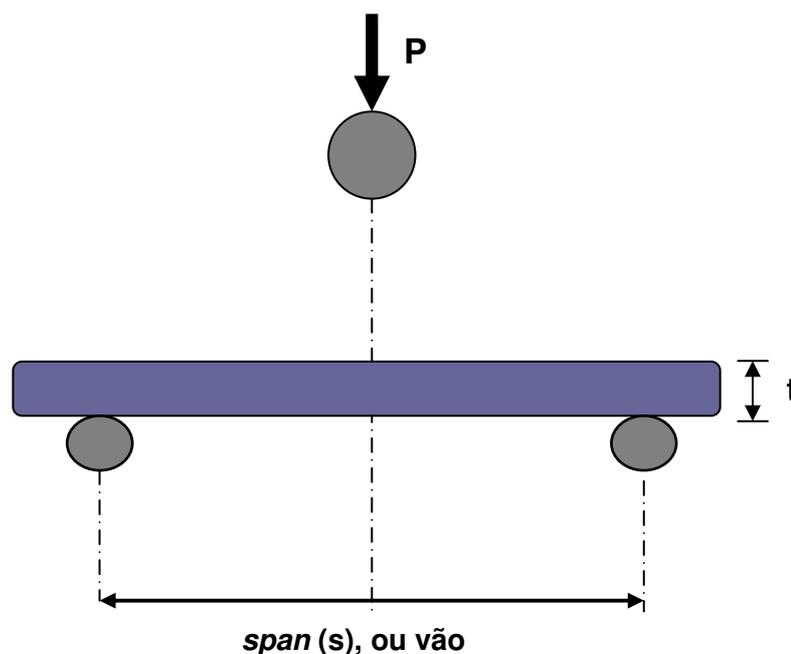


Figura 16: Esquema ilustrativo do ensaio *short beam* em 3 pontos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das Fibras de Curauá

Através de uma série de ensaios de picnometria, determinou-se a densidade das fibras de curauá utilizadas. As fibras *in natura* apresentaram densidade de $1,37 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$ e as fibras lavadas $1,38 \pm 0,06 \text{ g/cm}^3$. A densidade das fibras de curauá lavadas também foi determinada através de ensaios de picnometria a gás e obteve-se densidade de $1,38 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, confirmando os valores de densidade obtidos nos ensaios de picnometria.

Por TGA observou-se a estabilidade térmica das amostras de fibras de curauá *in natura* (Figura 17) e fibras lavadas (Figura 18). A perda de massa nas fibras *in natura* iniciou com a evaporação de água entre 32 e 125°C, sendo o ponto de máxima evaporação em torno de 69°C. Um segundo processo de perda de massa ocorreu entre 174 e 253°C, atribuído à degradação de hemicelulose, ceras e sujidades presentes nas fibras *in natura*. O processo de degradação continuou com a presença de um ombro entre 295 e 317°C, creditado à degradação de hemicelulose. Entre 317 e 398°C, com máximo grau de degradação em torno de 365°C, ocorreu principalmente a degradação da celulose. Acima de 365°C a perda de massa continua com a degradação da lignina restante.

Nos ensaios realizados neste trabalho, observou-se uma pequena diferença de comportamento entre as duas amostras abaixo de 220°C, provavelmente devido à maior presença de água, ceras e sujidades na amostra de fibras *in natura*. Já na amostra de fibras lavadas, o segundo processo de perda ocorreu entre 216 e 320°C. Sendo o processo de degradação restante bastante similar para as duas amostras.

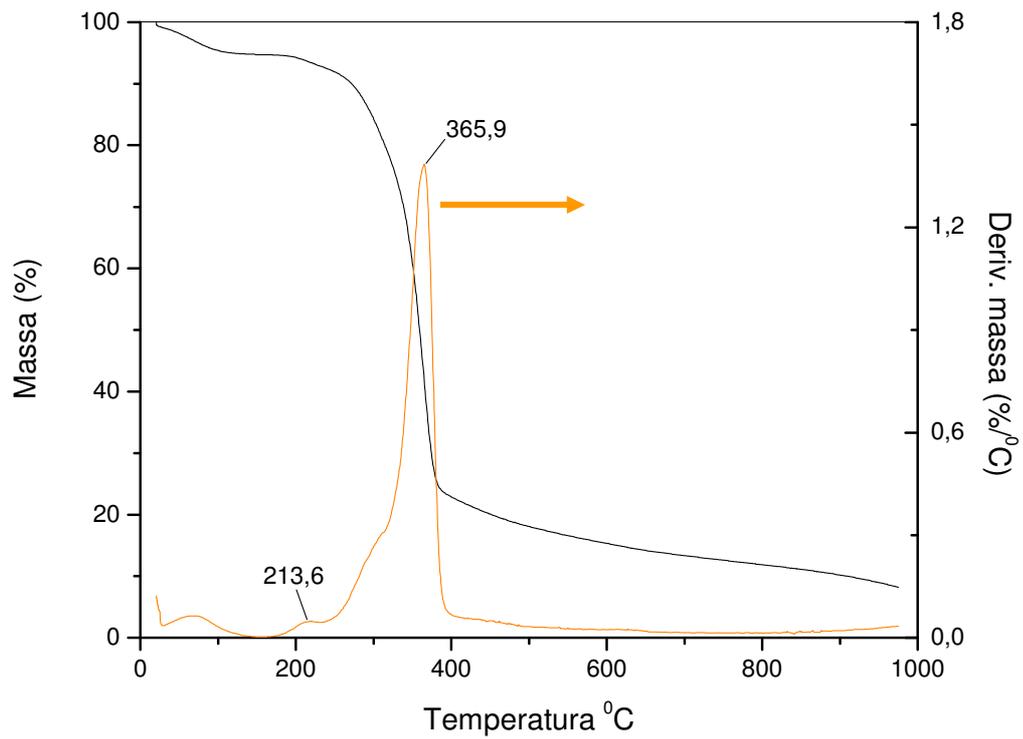
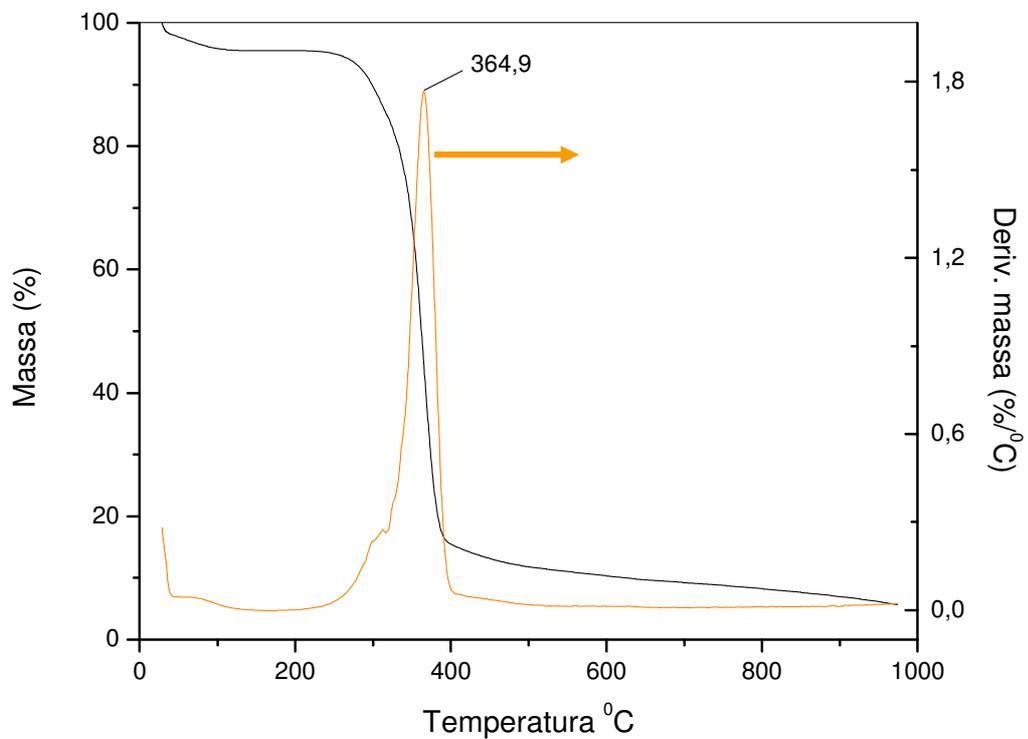
Figura 17: Análise termogravimétrica (TGA) das fibras de curauá *in natura*.

Figura 18: Análise termogravimétrica (TGA) das fibras de curauá lavadas.

Resultados de estudos anteriores [17] já haviam demonstrado que até 200°C ocorre a perda de água e de alguns componentes, como ceras e sujidades, enquanto próximo a 250°C inicia-se a degradação das estruturas químicas dos componentes das fibras, seguido de carbonização, com uma perda de massa entre 18 e 85%. Em um estudo realizado em 2007 [13], constatou-se que no primeiro pico exotérmico entre 200-290°C ocorre a degradação de hemicelulose e entre 240-360°C ocorre a degradação da celulose formando uma estrutura ramificada, num outro pico, entre 280-500°C, ocorre a degradação da lignina. Comparando esses três componentes, a lignina é o mais difícil de decompor, sua decomposição ocorre lentamente com um grau máximo de decomposição a 439°C [19].

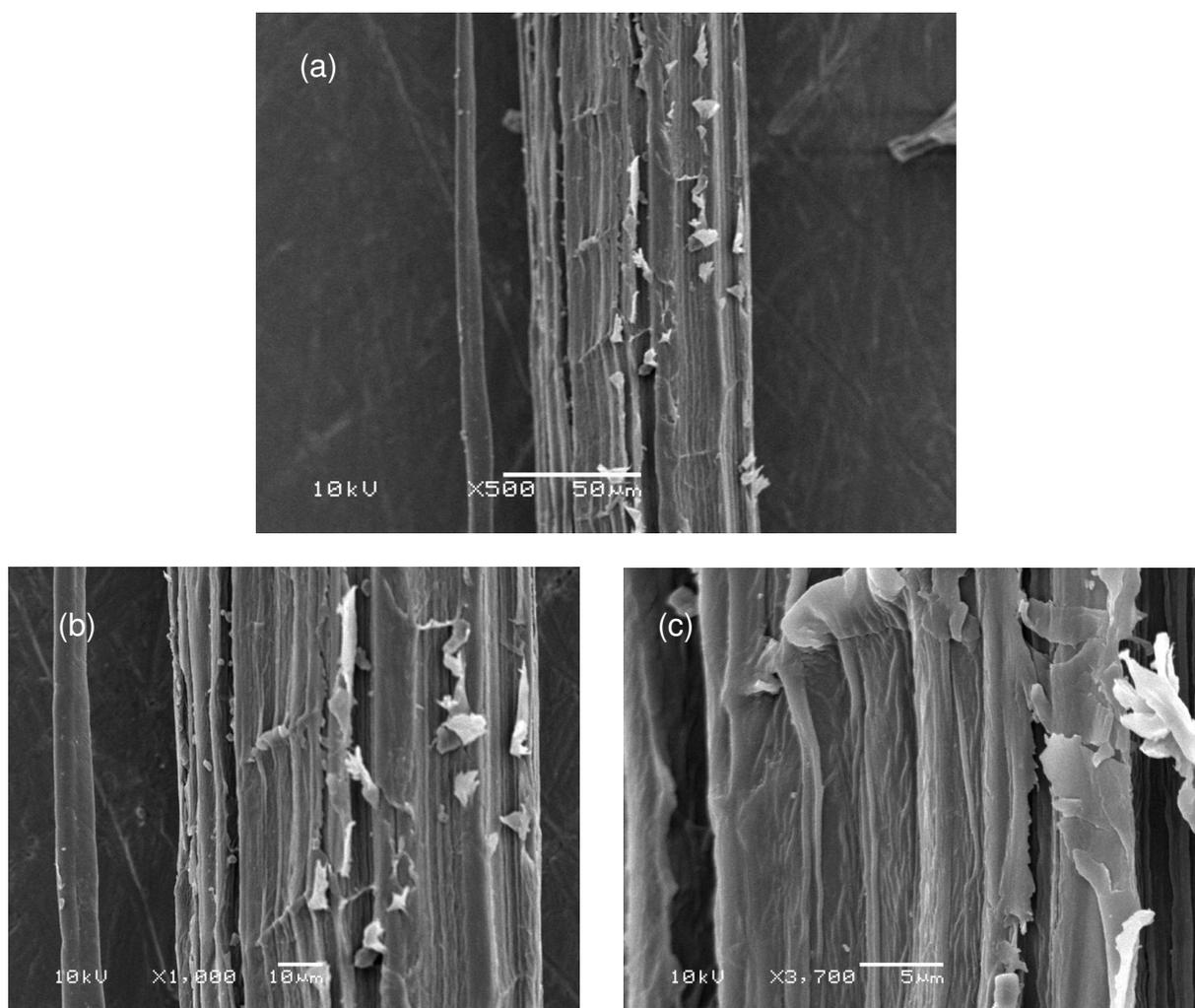


Figura 19: Imagem (MEV) lateral da fibra de curauá lavada em diferentes ampliações: (a) 500, (b) 1.000 e (c) 3700.

Através da micrografia MEV da Figura 19, pode-se observar que as fibras de curauá são formadas por um aglomerado de micro-fibrilas. Observa-se também que a superfície da fibra é ligeiramente rugosa e não uniforme, o que pode facilitar o ancoramento mecânico da resina, portanto a adesão fibra/matriz. Diferentemente das fibras sintéticas, essas fibras (Figura 20) apresentam uma grande diversidade na forma geométrica da seção transversal, lembrando também que o diâmetro das fibras de curauá não é uniforme ao longo do comprimento das fibras. Como referência, cita-se que em outros trabalhos onde foi estudada a morfologia das fibras de curauá [7,19], encontrou-se variações no diâmetro das fibras entre 20 e 130 μm , com diâmetro médio de 60 μm e microfibrilas com diâmetro de 3,5 μm .

5.2 Efeito do Pré-tratamento da Fibra

As propriedades mecânicas dos compósitos são determinadas, entre outros fatores, pelas propriedades da matriz e do reforço, pelo processo utilizado e também pelos parâmetros do processo. A capacidade de transferência dos esforços da matriz para o reforço, que depende diretamente da qualidade da adesão reforço/matriz, é outro fator crucial no desempenho do compósito.

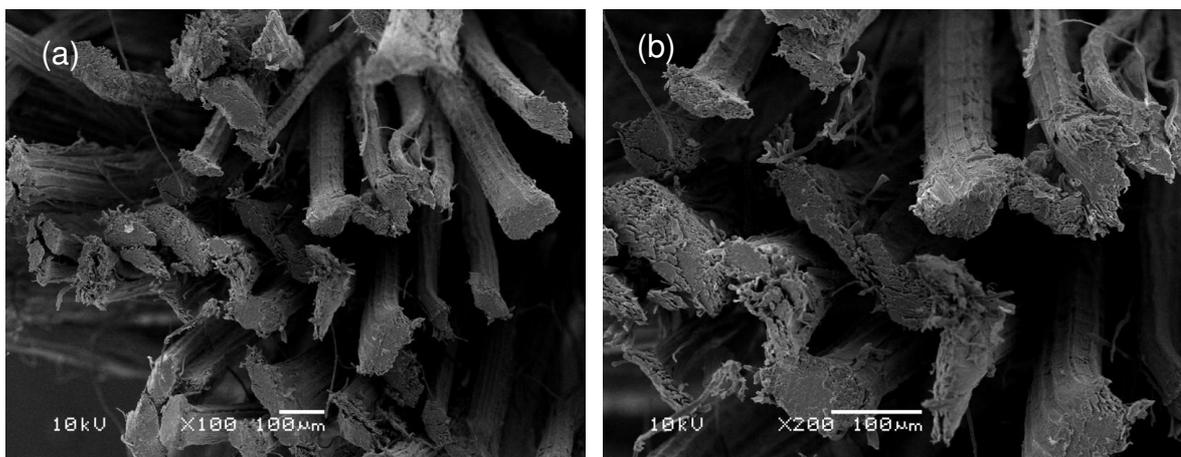


Figura 20: Imagem (MEV) da seção transversal das fibras de curauá lavadas em diferentes ampliações: (a) 100 e (b) 200.

Os resultados dos ensaios de tração realizados nos compósitos preliminares (com mantas denominadas *in natura*, secas e lavadas) são apresentados na Figura 21. Embora não se observe variações muito significativas nas propriedades mecânicas, os compósitos com fibras lavadas apresentaram em geral os melhores resultados, o que pode indicar uma maior adesão fibra/matriz devido principalmente à secagem das fibras.

Nos ensaios de flexão (Figura 22), pode-se constatar novamente uma leve tendência de acréscimo nas propriedades com a lavagem e a secagem das fibras. O valores médios de resistência à flexão para os compósitos com fibras lavadas foi de 67,7 MPa, com fibras secas 63,3 MPa e com fibras *in natura* 48,3 MPa. Em relação ao módulo elástico, a mesma tendência se manteve, com valores médios de 5,3, 3,6 e 3,5 GPa, respectivamente.

Nos ensaios Izod (Figura 23), os compósitos com fibras lavadas absorveram maior energia ao impacto com valores médios de resistência ao impacto de 25,3 kJ/m², com fibras secas 20,0 kJ/m² e com fibras *in natura* 15,8 kJ/m². Observa-se também um elevado desvio padrão nos valores obtidos. Analisando a Figura 23, percebe-se que a limpeza e a secagem das fibras também contribuem para o incremento dos resultados de dureza Barcol dos compósitos.

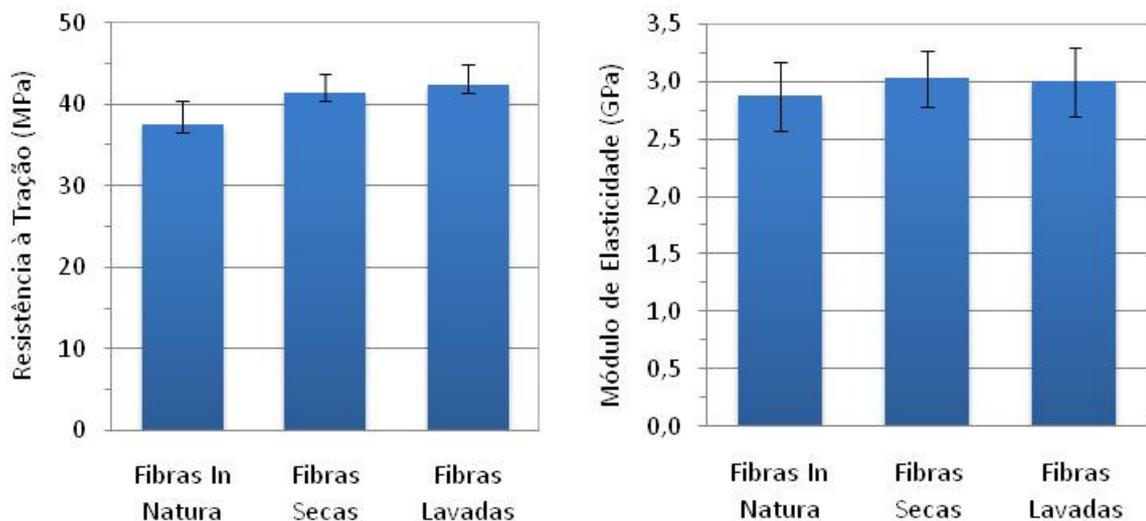


Figura 21: Resistência à tração e módulo de elasticidade dos compósitos com fibras *in natura*, secas e lavadas ($L_f = 30$ mm; $\%V_f \approx 20\%$).

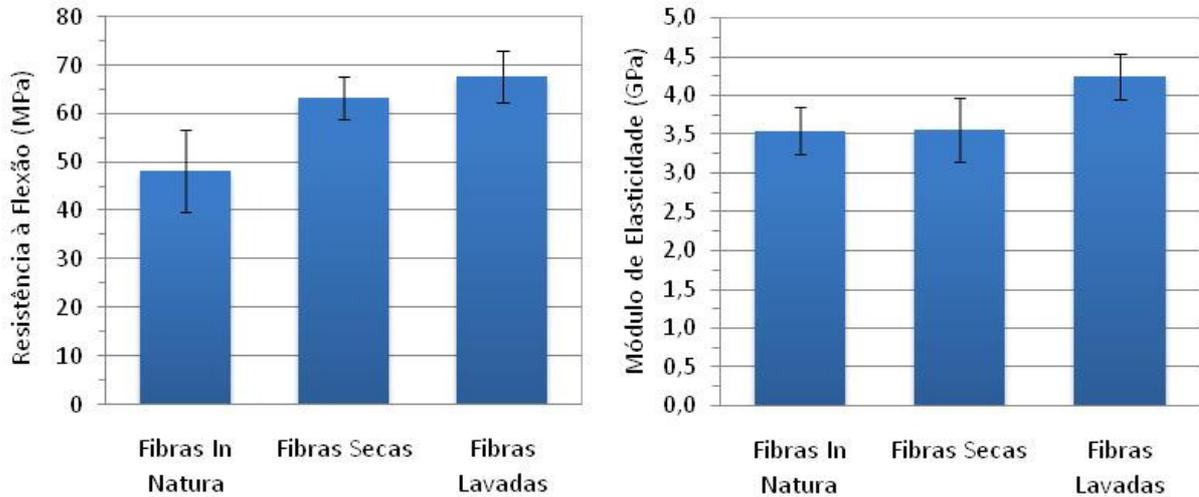


Figura 22: Resistência à flexão e módulo de elasticidade dos compósitos com fibras *in natura*, secas e lavadas ($L_f = 30$ mm; $\%V_f \approx 20\%$).

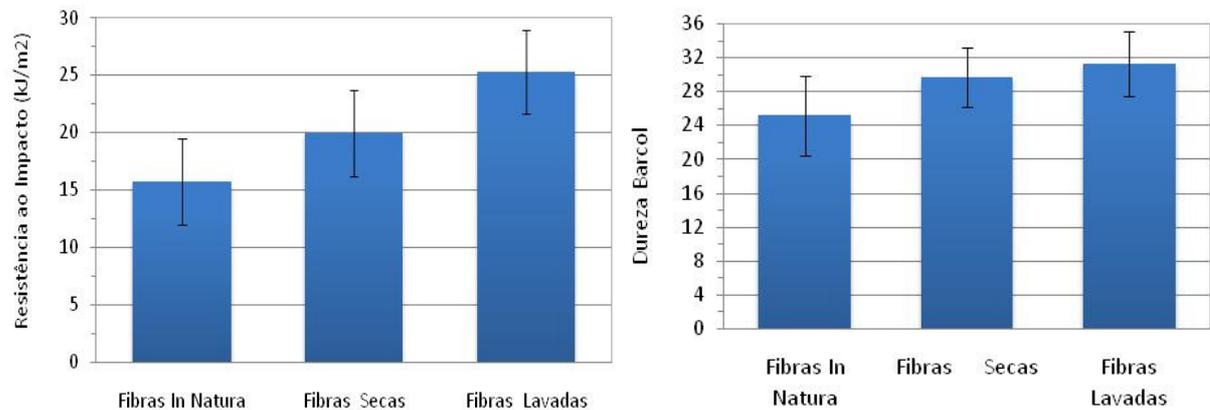


Figura 23: Resistência ao impacto e dureza Barcol dos compósitos com fibras *in natura*, secas e lavadas ($L_f = 30$ mm; $\%V_f \approx 20\%$).

No pré-tratamento (ao pentear, lavar, secar e novamente pentear as fibras de curauá) são retiradas sujidades, restos de mucilagem ainda presentes e parte da hemicelulose. Isto provoca também certa desfibrilação, ou seja, a desagregação das

fibras e micro-fibrilas, aumentando a área superficial, a rugosidade e consequentemente a adesão fibra/matriz. Nas micrografias mostradas na Figura 24, pode-se observar que o processo de lavagem e secagem das fibras de curauá proporciona uma visível melhora na adesão fibra-matriz em relação aos compósitos produzidos com fibras *in natura*. Em comparação à amostra da Figura 24b, a amostra da Figura 24a apresenta um maior número de vazios e impressões que indicam uma mais fraca adesão fibra/matriz e o arrancamento de fibras da matriz (*pull-out*). Assim observa-se a necessidade de lavagem e secagem das fibras e da pré-secagem das mantas para se obter compósitos de melhor desempenho.

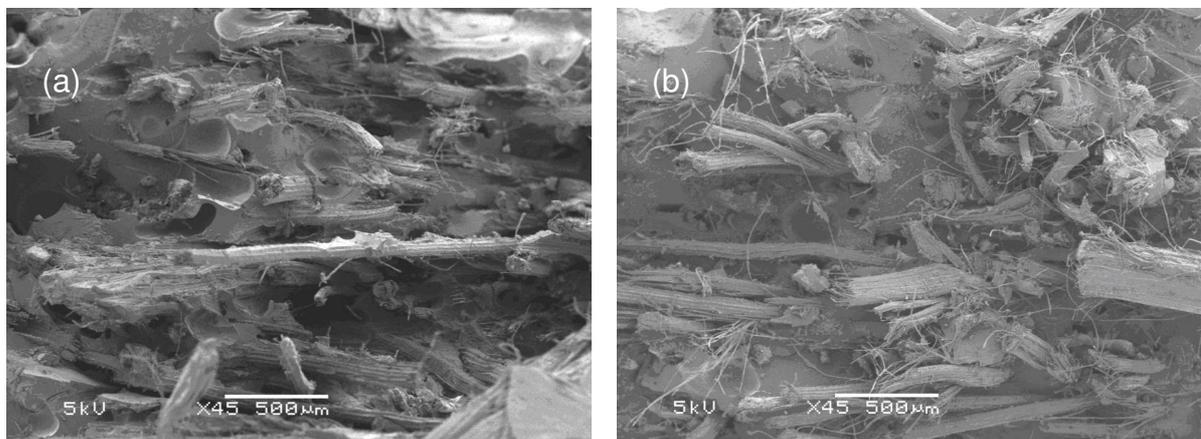


Figura 24: MEV dos compósitos com fibras *in natura* (a) e com fibras lavadas (b).

5.3 Efeitos da Variação no Comprimento das Fibras

Nesta etapa, foram analisados compósitos produzidos com variação no comprimento das fibras, mantendo-se o volume de reforço constante ($\%V_f = 20\%$). Nos ensaios de tração (Figura 25), observa-se que os compósitos com comprimentos de fibra de 40 e 50 mm apresentaram as maiores médias de resistência. Em relação ao módulo elástico, os compósitos moldados com fibras no comprimento de 50 mm apresentaram a melhor média (2,93 GPa), seguidos dos compósitos de 30 mm e de 40 mm com 2,84 e 2,67 GPa, respectivamente.

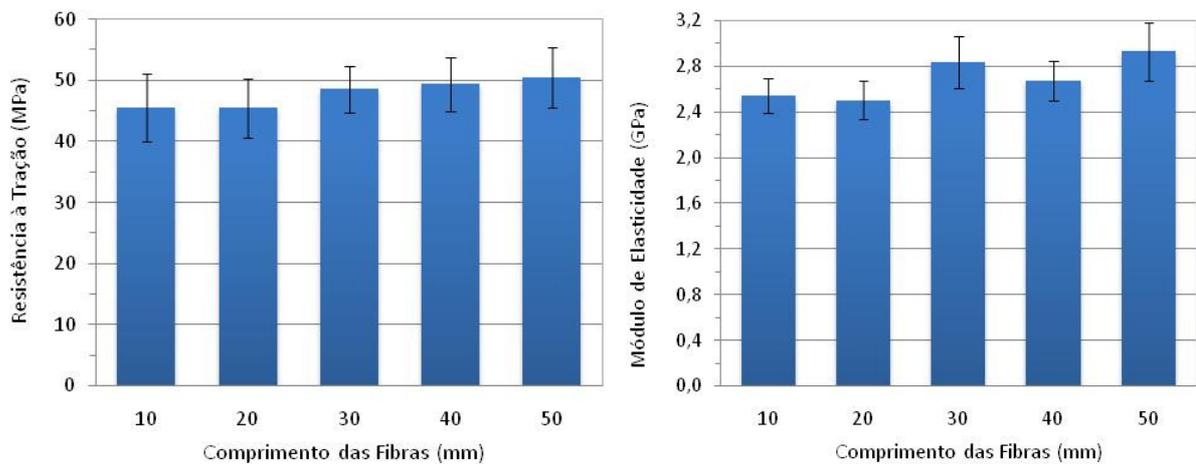


Figura 25: Resistência à tração e módulo dos compósitos com fibras de diferentes comprimentos ($\%V_f \approx 20\%$ - fibras lavadas).

Nos resultados do ensaio de flexão (Figura 26), pode-se observar uma clara tendência de crescimento da resistência à flexão com o aumento do comprimento das fibras. Apesar da dispersão nos resultados do módulo elástico, os compósitos com fibras de 50 mm apresentaram os melhores resultados, o que indica que a transferência de esforços da matriz para as fibras ocorre de uma forma mais eficaz.

Segundo Joseph *et al.* [54], a resistência e o módulo de compósitos reforçados por fibras curtas dependem principalmente da eficiência de transferência de tensões da matriz às fibras. A eficiência desta transferência, por sua vez, depende do comprimento das fibras e da magnitude das interações na interface fibra/matriz. Se o comprimento das fibras de reforço for inferior ao comprimento crítico, as fibras serão sacadas da matriz (*pull out*) e o compósito irá falhar em baixas tensões. Quando o comprimento das fibras é maior que o comprimento crítico, há uma maior eficiência na transferência de tensões ocorrendo o rompimento das fibras, obtendo-se assim compósitos de maior resistência mecânica. Monteiro *et al.* [14] realizou ensaios de *pull out* com fibras de curauá e resina poliéster e encontrou um comprimento crítico de fibra de 10,20 mm, com uma resistência interfacial de 3,4 ($\pm 1,2$) MPa, para um diâmetro médio das fibras 0,17 mm e resistência à tração da fibra de 404 MPa. Considerando-se estes valores, nota-se que todos os comprimentos de fibra avaliados nesta dissertação estão acima do

comprimento crítico (exceto 10 mm), porém ainda podem ser consideradas fibras curtas, pois o comprimento é de no máximo 5 vezes o comprimento crítico.

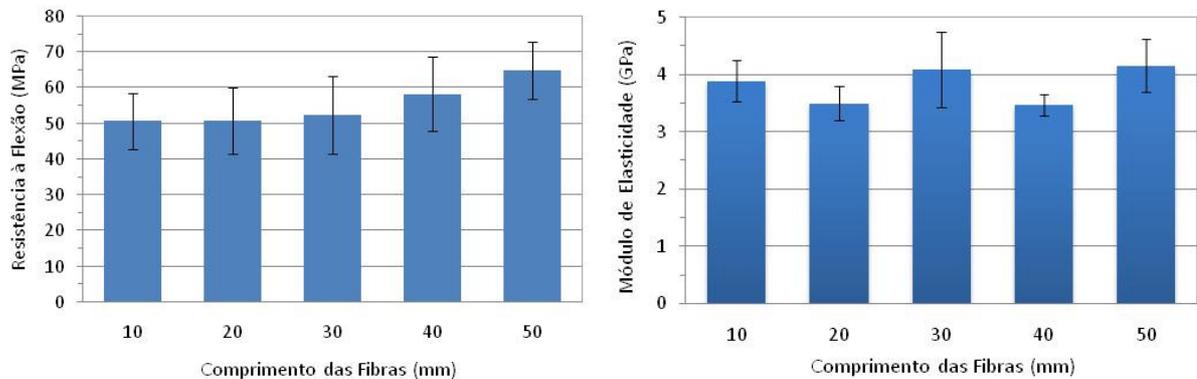


Figura 26: Resistência à flexão e módulo dos compósitos com fibras de diferentes comprimentos ($\%V_f \approx 20\%$ - fibras lavadas).

Na Figura 27, os resultados de resistência ao impacto mostraram um aumento com o aumento do comprimento das fibras. Os compósitos com fibras de 50 e 30 mm apresentam médias de 20,5 e 19,9 kJ/m^2 respectivamente, porém com um maior desvio padrão para este último. Já os compósitos com fibras de 40 mm apresentaram valores similares aos compósitos com fibras de 20 mm, possivelmente devido a alguma falha nas mantas ou na moldagem dos compósitos com as fibras mais longas.

Em relação à variação da dureza Barcol com o comprimento das fibras (Figura 27), não houve variações acentuadas, porém observa-se uma tendência de aumento dos valores com o aumento do comprimento das fibras. Comparando-se esses dados com aqueles apresentados na Figura 23, vê-se que houve uma redução nos valores médios de dureza. A provável causa dessa redução nos valores é o envelhecimento da resina (matéria-prima), ou seja, a perda de estireno ao longo do tempo (durante a estocagem) e o conseqüente aumento de viscosidade da resina, provocando dificuldades no molhamento das fibras e possível aumento do teor de defeitos (vazios) superficiais.

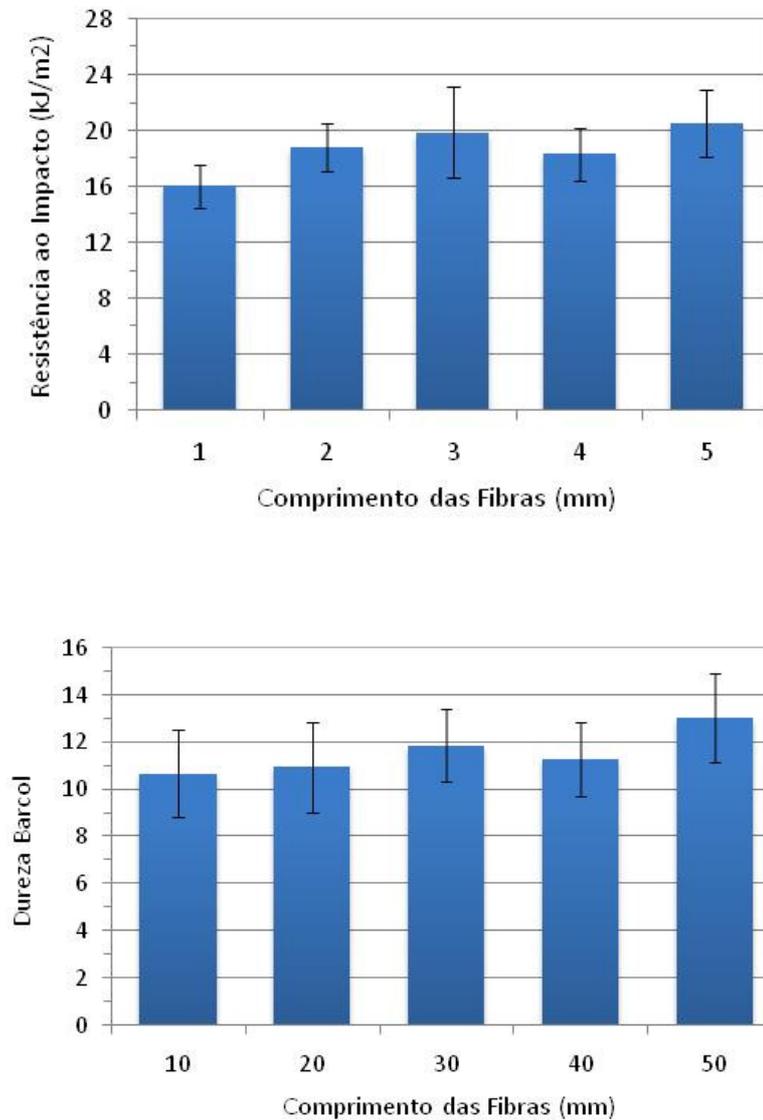


Figura 27: Resistência ao impacto e dureza Barcol dos compósitos com fibras de diferentes comprimentos ($\%V_f \approx 20\%$ - fibras lavadas).

Na Tabela 5, observa-se que o processo de lavagem e secagem das fibras colaborou consideravelmente para a redução da fração volumétrica de vazios. Também, o comprimento das fibras utilizadas no reforço não tem influência significativa neste aspecto, dentro do desvio observado, se o comprimento é de pelo menos 20 mm. Quando o comprimento é muito curto, dificulta-se a impregnação das fibras, o que leva a um aumento do teor de micro-regiões de fibras não impregnadas.

Tabela 5: Densidade e fração volumétrica de vazios dos compósitos.

Tipo de Compósito	Densidade (g/cm³)	Fração volumétrica de vazios (%)
Fibras <i>in natura</i>	1,087	11,76 ± 1,21
Fibras secas	1,217	2,56 ± 0,81
Fibras lavadas	1,197	3,02 ± 1,03
Lavadas - 10 mm	1,202	2,72 ± 0,82
Lavadas - 20 mm	1,216	2,38 ± 0,52
Lavadas - 30 mm	1,213	2,48 ± 0,53
Lavadas - 40 mm	1,217	2,33 ± 0,41
Lavadas - 50 mm	1,209	2,42 ± 0,47

* Resina poliéster isoftálica – densidade de 1,20 g/cm³.

5.4 Ensaio *Short Beam*

Nesta etapa do trabalho, novos compósitos de resina poliéster reforçados por fibras de curauá foram moldados para estudo da sua resposta em ensaios *short beam* sob diferentes condições: (a) Fibras de diferentes comprimentos (10, 20, 30, 40 e 50 mm) e %V_f constante (20%), (b) compósitos de diferentes espessuras (3,15, 4,80 e 6,45 mm) com %V_f (20%) e comprimento de fibras (30 mm) constantes, e (c) compósitos com diferentes %V_f (aprox. 10, 20, 30 e 40%), com comprimento de fibra (30 mm) constante. Na Figura 28, para ilustração, apresentam-se os corpos de prova para ensaios *short beam* de compósitos com diferentes espessuras.

Pode-se observar na Figura 29 que não existe uma diferença significativa entre os valores médios de resistência nos compósitos com diferentes comprimentos de fibra. O desvio padrão dos resultados foi creditado a uma pequena variação de espessura existente entre os corpos de prova e a forma manual e aleatória de distribuição das fibras na confecção das mantas. Assim, a resistência *short beam* parece ser independente do comprimento das fibras para a faixa de comprimento analisada.

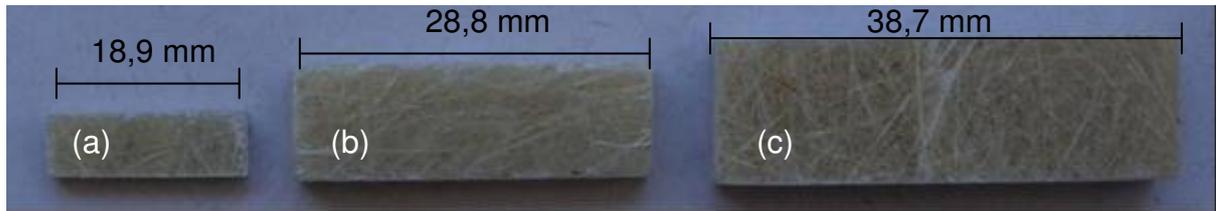


Figura 28: Corpos-de-prova usados para ensaio *short beam*, com espessura de 3,15 mm (a), 4,80 mm (b) e 6,45 mm (c).

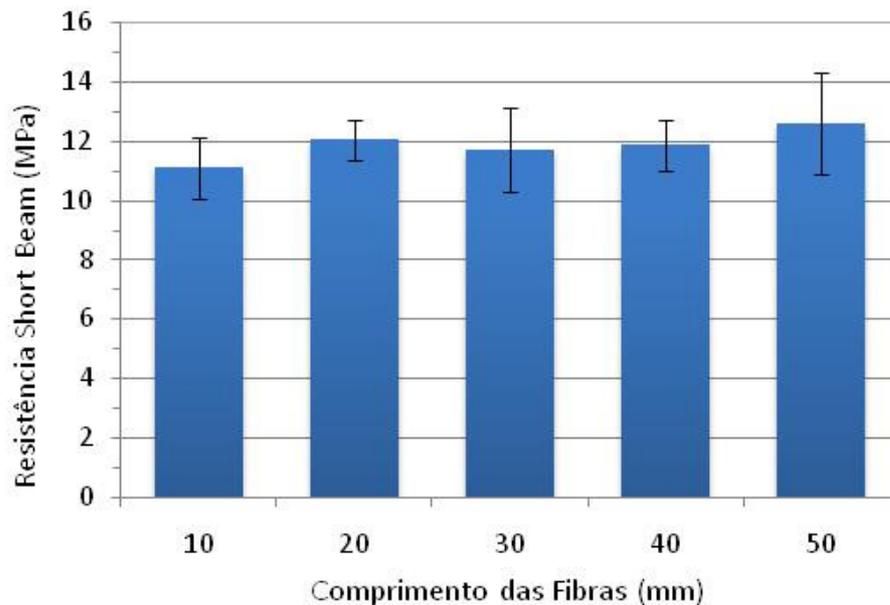


Figura 29: Resultados de resistência *short beam* de compósitos com diferentes comprimentos de fibras de curauá ($\%V_f = 20\%$).

Na Tabela 6, são apresentados os resultados de fração volumétrica e fração mássica de fibras, juntamente com a densidade de cada compósito avaliado. Observa-se que a densidade permaneceu praticamente constante, com uma tendência à diminuição para comprimentos muito curtos pelas características deste reforço, como já comentado.

Tabela 6: Fração volumétrica, fração mássica de fibra e densidade dos compósitos reforçados com fibras de curauá.

L_f (mm)	$\%V_f$	$\%W_f$	ρ_c (g/cm ³)
10	21,62	24,08	1,197 (\pm 0,005)
20	21,81	24,29	1,193 (\pm 0,004)
30	21,57	24,03	1,210 (\pm 0,007)
40	20,46	22,83	1,211 (\pm 0,004)
50	21,49	23,94	1,219 (\pm 0,006)

- Resina poliéster isoftálica – densidade de 1,20 g/cm³.

Na Figura 30 é possível observar curvas típicas de força \times deslocamento, obtidas em ensaios *short beam* ($span = 4:1$) para compósitos com diferentes teores de fibra. Com este gráfico procura-se demonstrar que nos corpos de prova submetidos aos ensaios ocorreram falhas por cisalhamento, como esperado. Pode-se observar quedas (bruscas) após o ponto de carga máxima, que são características destes ensaios quando a resposta mecânica obtida é de uma falha por cisalhamento interlaminar. Isto não ocorre em falhas por flexão, onde o material sofre falhas sucessivas, resultando numa curva com formato diverso do apresentado. Segundo Botelho [55], trincas horizontais e verticais são características de cisalhamento interlaminar em corpos de prova submetidos a ensaios de *short beam*. Nas micrografias óticas da Figura 31, observam-se falhas por cisalhamento em um corpo de prova (pós-ensaio) de compósito de curauá com espessura de 3,15 mm.

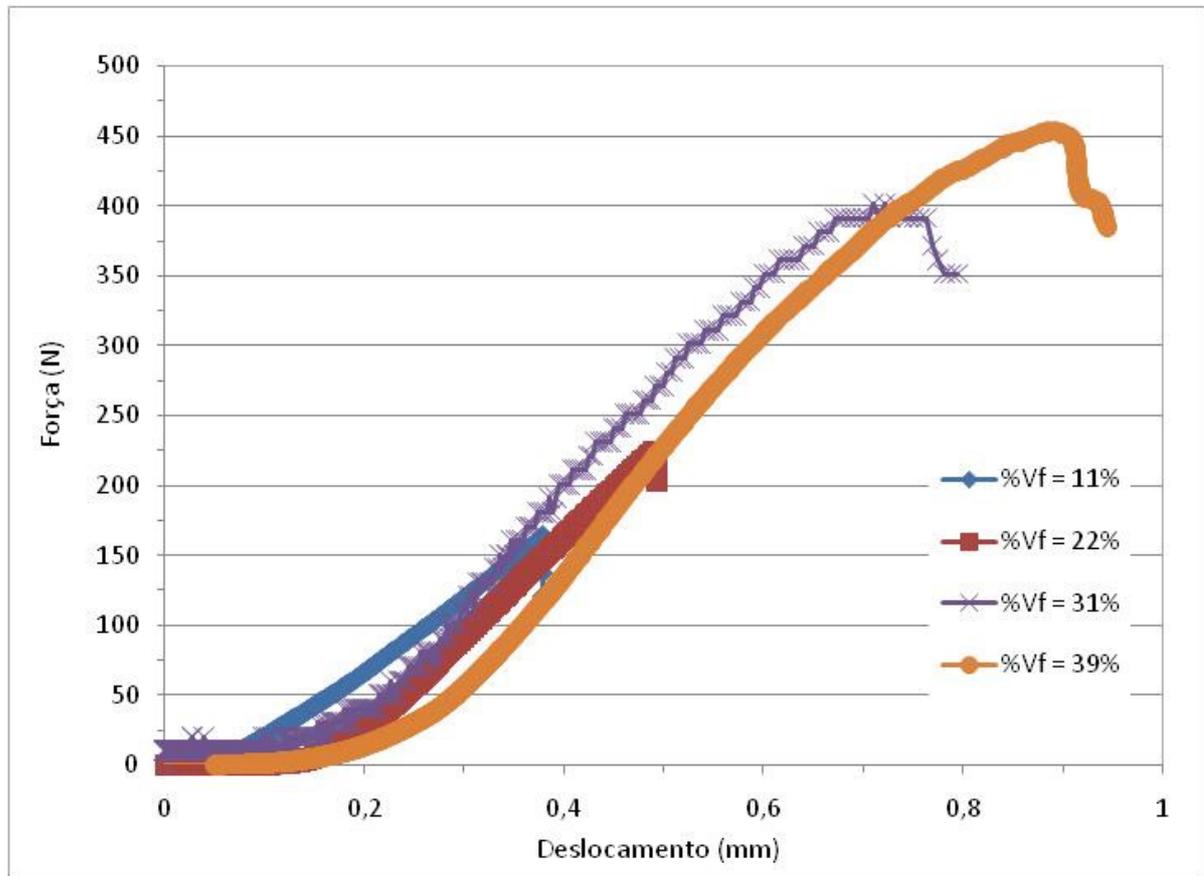


Figura 30: Curvas de força \times deslocamento de compósitos com diferentes $\%V_f$ ($L_f = 30$ mm).

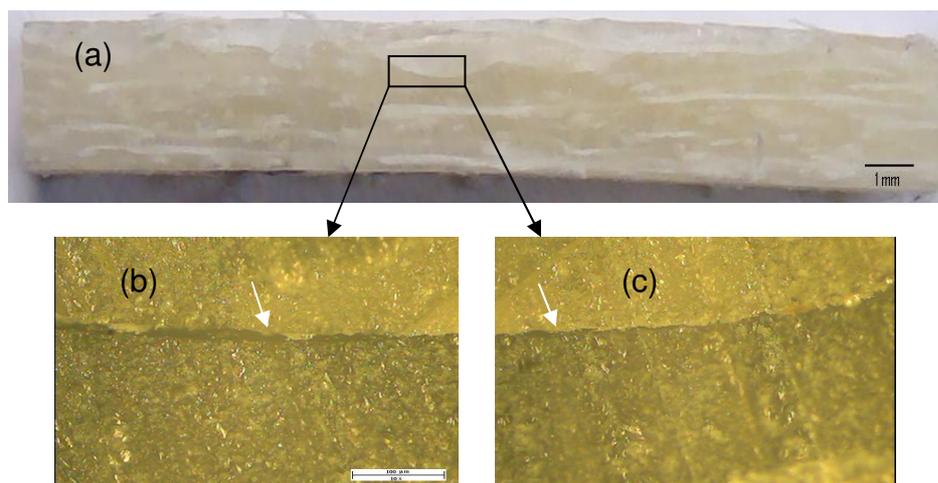


Figura 31: Fotografia (a) de corpo de prova ensaiado por *short beam* ($\times 20$). Em detalhe (b e c), característica da fratura (aumento de $200\times$ no microscópio óptico). (espessura: 3,15 mm; $\%V_f \approx 20\%$ e $L_f = 30$ mm).

Os resultados dos ensaios *short beam* mostraram que um aumento na fração volumétrica de fibra promove um incremento relevante na resistência (Figura 32). Quando se eleva o $\%V_f$ de 31 para 39%, observa-se um incremento na resistência *short beam*, porém este ganho é menor em relação ao ganho obtido entre 22 e 31%. Com o teste t de *Student*, observou-se uma diferença significativa entre os compósitos com diferentes $\%V_f$ exceto entre os compósitos com $\%V_f$ de 31 e 39%. Assim, observa-se que, em altos valores de $\%V_f$, a resistência parece se encaminhar para um *plateau*. Porém, para se concluir sobre isso, seria necessário moldar compósitos com teor de fibras ainda maior, o que é difícil com as condições de moldagem escolhidas. De fato, a dificuldade de moldagem e de molhabilidade aumenta significativamente quando o $\%V_f$ é elevado, provavelmente contribuindo para diminuir a qualidade da moldagem e aumentar o teor de vazios (diminuindo a densidade esperada), com conseqüente redução da resistência *short beam*.

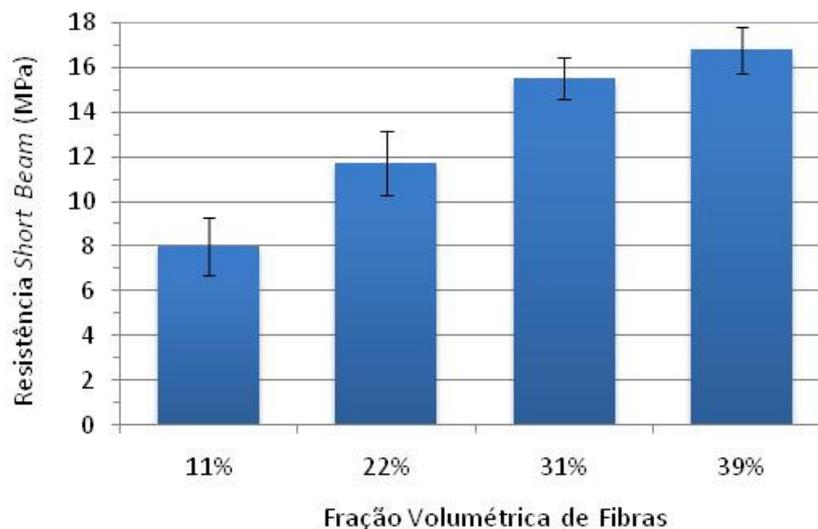


Figura 32: Resultados de resistência *short beam* de compósitos com diferentes $\%V_f$ ($L_f = 30$ mm).

Para corroborar a discussão sobre os resultados apresentados na Figura 32, foi medida a densidade desses compósitos. Na Tabela 7, observa-se que há uma tendência de aumento dos valores de densidade com o aumento do $\%V_f$ até 31%, o que era esperado visto que a densidade da fibra é maior que a da matriz. Porém,

para $\%V_f = 39\%$, a densidade deveria continuar aumentando, o que não foi notado. Isto leva a crer que o teor de vazios deve ter aumentado e influenciado negativamente a densidade, que por consequência não aumentou como deveria.

Tabela 7. Variação da fração volumétrica e mássica de fibras e densidade dos compósitos ($L_f = 30$ mm).

$\%V_f$	$\%W_f$	ρ_c (g/cm ³)
11	13	1,202 ($\pm 0,008$)
22	24	1,210 ($\pm 0,007$)
31	34	1,219 ($\pm 0,006$)
39	43	1,213 ($\pm 0,003$)

* Resina poliéster isoftálica – densidade de 1,20 g/cm³.

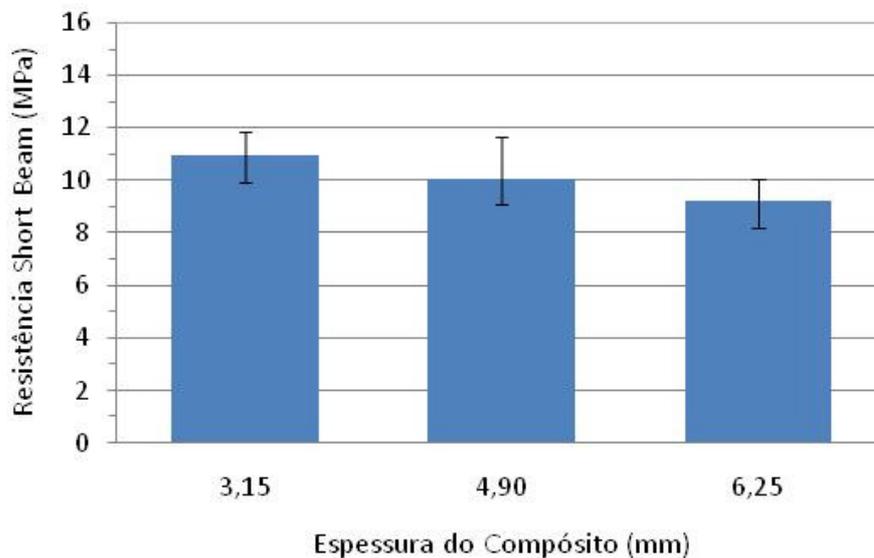


Figura 33: Resultados de resistência *short beam* de compósitos com diferentes espessuras – ($\%V_f \approx 20\%$; $L_f = 30$ mm).

Com o aumento da espessura dos compósitos (Figura 33) houve uma redução na resistência em *short beam*. Embora o percentual volumétrico de fibra permaneça o mesmo, em torno de 20%, as mantas de reforço usadas são mais

espessas, o que pode dificultar à impregnação da matriz na manta, e conseqüentemente a qualidade da moldagem. A Tabela 8 apresenta os resultados de densidade desses compósitos e pode-se ver uma diminuição da densidade dos compósitos de maior espessura, o que confirma o aumento esperado do teor de vazios neste caso.

Tabela 8: Densidade dos compósitos de curauá ($\%V_f \approx 20\%$), com diferentes espessuras.

Espessura (mm)	Densidade (g/cm ³)	Desvio padrão
3,15	1,210	0,007
4,90	1,202	0,005
6,25	1,166	0,005

*Resina poliéster isoftálica – densidade de 1,20 g/cm³.

Uma revisão de dados analíticos e experimentais revela que em testes *short beam* em 3 e 4 pontos, mesmo sob o melhor controle de qualidade, muitas vezes a falha que ocorre não é por cisalhamento interlaminar, e sim por indentação ou flexão. Os pontos de carregamento no ensaio podem provocar deformação por indentação e concentração de tensões de cisalhamento transversas e compressivas. Estes esforços, individualmente ou combinados, ultrapassam a resistência do material antes da falha interlaminar ocorrer [56]. Por isso é importante obedecer a relação *s:t* (*span:thickness*), ou seja, vão:espessura recomendada pela norma.

Neste trabalho, resolveu-se estudar a influência da relação *s/t* no resultado do ensaio. Observou-se que com o aumento da razão *s/t* (Figura 34) ocorre uma diminuição da resistência medida. Através de microscopia óptica, verificou-se que em razões *s/t* acima de 8:1 começam a ocorrer falhas por flexão e não mais por cisalhamento. Razões *s/t* mais baixas produzem valores mais elevados, que estão mais próximos dos resultados obtidos quando se utiliza o ensaio geralmente mais aceito em cisalhamento, o ensaio de *Iosipescu* [49]. No ensaio de *Iosipescu*, o corpo-de-prova, com entalhes centrais em “V”, é fixado por uma das extremidades e

submetido a uma carga em sentido paralelo aos entalhes, o que provoca a fratura por cisalhamento no plano central, obtendo-se assim resultados mais precisos.

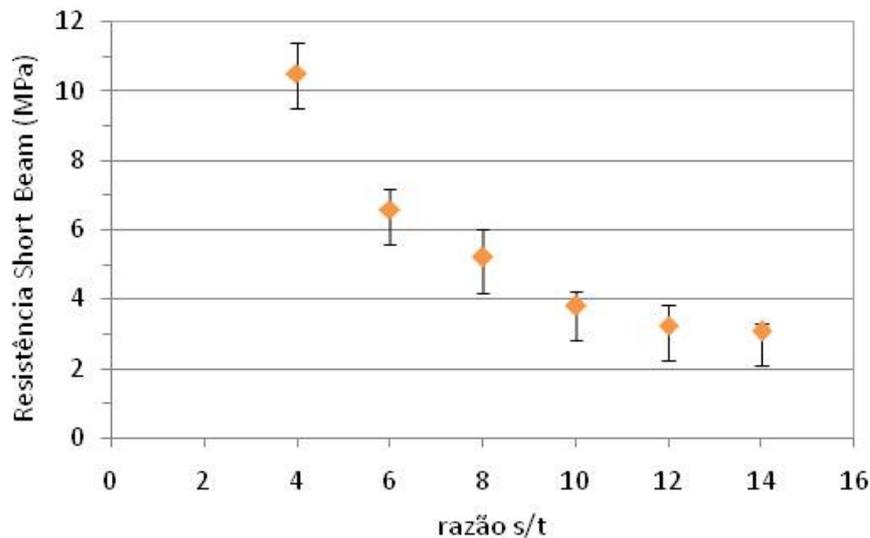


Figura 34: Resultados de resistência para diferentes razões s/t em compósitos com curauá ($\%V_f \approx 20\%$; $L_f = 30$ mm).

5.5 Efeito da Variação da Fração Volumétrica de Fibras

O aumento da fração volumétrica de fibras de curauá nos compósitos apresentados na Tabela 9 provocou um leve aumento nos valores de densidade, como esperado. O aumento, no entanto, foi um pouco menor que poderia ser estimado teoricamente, o que pode ser uma consequência do aumento no teor de vazios para compósitos com uma grande massa de fibras.

Com relação aos ensaios de tração desses compósitos, observou-se que o aumento da fração volumétrica de fibras ($\%V_f$) resulta em um aumento gradual da resistência à tração e do módulo de elasticidade (Figura 35). No entanto observa-se que na faixa de $\%V_f$ de 11 a 22% há um incremento de aproximadamente 50% na resistência (em torno de 4,5% a cada 1% de aumento no teor de fibras), na faixa de $\%V_f$ de 22 a 32% há um incremento de 70% na resistência (em torno de 7% a cada 1% de aumento no teor de fibras) e na faixa de $\%V_f$ de 32 a 38% há um incremento

de 18% na resistência (em torno de 3% a cada 1% de aumento no teor de fibras). Em relação ao módulo de elasticidade o incremento é crescente com o aumento do teor de fibras. A cada 1% de aumento no teor de fibras, na faixa de %V_f de 11 a 22% ocorreu um incremento de aproximadamente 1,0% no módulo de elasticidade, na faixa de %V_f de 22 a 32% um incremento de 1,2% e na faixa de %V_f 32 a 38% um incremento de 2,3% a cada 1% de aumento no teor de fibras.

Tabela 9: Variação da fração volumétrica e mássica e densidade dos compósitos (L_f = 50 mm)

%V _f	%W _f	ρ _c (g/cm ³)
11	13	1,179 (±0,009)
22	25	1,187 (±0,001)
32	36	1,204 (±0,007)
38	42	1,208 (±0,004)

* Resina poliéster isoftálica – densidade de 1,16 g/cm³.

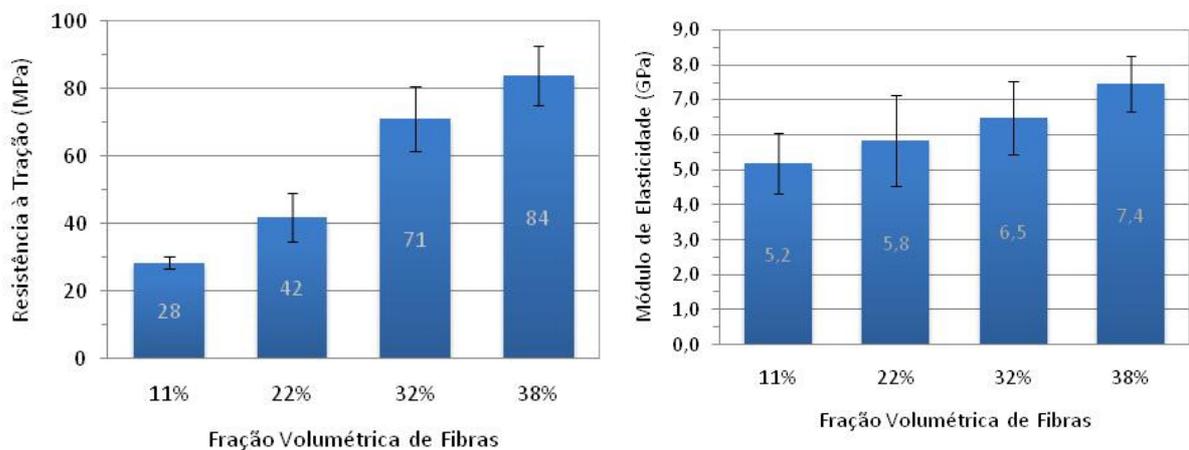


Figura 35: Resistência e módulo em tração dos compósitos com diferente %V_f (L_f = 50 mm).

Quando o teor volumétrico de reforço é muito baixo, as fibras influenciam pouco na resistência do compósito que passa a ser dominada pela matriz. Neste caso as fibras agem como defeitos, fragilizando a matriz. Acima de um volume crítico de fibras, a resistência dos compósitos aumenta com o teor de fibras. Em geral quanto maior a razão de aspecto (comprimento/diâmetro), menor é este volume crítico [54,11].

Os resultados de flexão, apresentados na Figura 36, confirmam a tendência observada em tração. Ocorrendo um grande aumento de resistência (62%) na faixa de $\%V_f$ de 11 a 22% (em torno de 5,6% a cada 1% de aumento no teor de fibras). Na faixa de $\%V_f$ de 22 a 32% um aumento menor, em torno de 2,9% a cada 1% de aumento no teor de fibras e de 32 a 38% o ganho foi ainda menor, mas considerável, em torno de 2,2% a cada 1% de aumento no teor de fibras. Os resultados de módulo de elasticidade apresentaram-se similares em $\%V_f$ de 11 e 22%, ocorrendo aumento significativo para um maior teor de fibras, demonstrando que a transferência de tensões da matriz para as fibras continua sendo eficiente com o aumento do teor de fibras na faixa estudada.

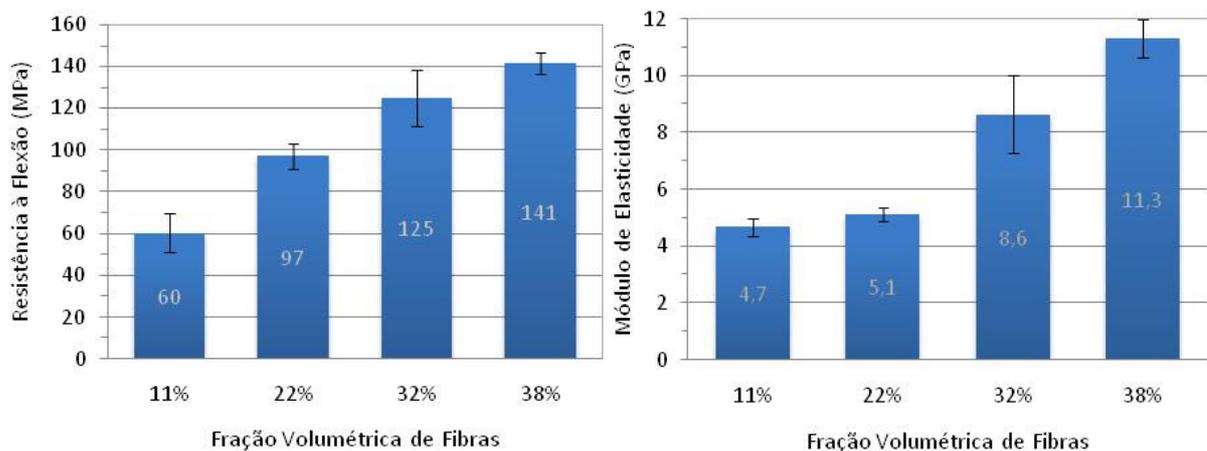


Figura 36: Resistência e módulo em flexão dos compósitos com diferentes $\%V_f$ ($L_f = 50$ mm).

Também ocorre o incremento da resistência ao impacto com o aumento do $\%V_f$ (Figura 37). Na faixa de $\%V_f$ entre 11 e 22% ocorre um aumento de 82% na resistência (em torno de 7,4% a cada 1% de aumento no teor de fibras), quando o

$\%V_f$ passa de 22 para 32% ocorre um aumento de 65% (em torno de 6,5% a cada 1% de aumento no teor de fibras) e na faixa de $\%V_f$ entre 32 e 38% ocorre um aumento de 33,3% (em torno de 5,6% a cada 1% de aumento no teor de fibras). Por outro lado, resultados de dureza Barcol, também mostrados na Figura 35, revelam uma diminuição gradual e considerável com o aumento de $\%V_f$. Acredita-se que essa diminuição de dureza ocorra já que as fibras de curauá são menos duras que a matriz poliéster, mas também porque com o aumento do $\%V_f$, as fibras ficam mais próximas à superfície da placa de compósito e o teor de vazios aumenta.

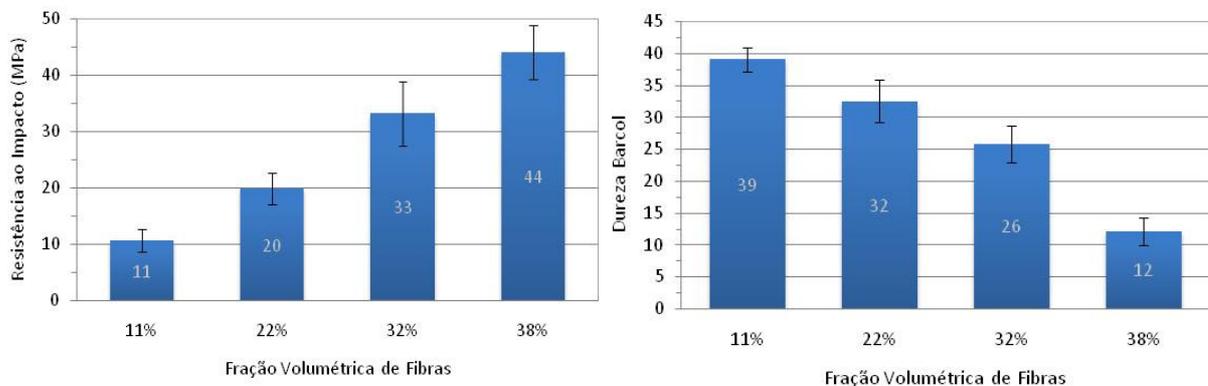


Figura 37: Resistência ao impacto e dureza Barcol dos compósitos com diferentes $\%V_f$ ($L_f = 50$ mm).

5.6 Compósitos Híbridos

Na produção das mantas híbridas, as fibras de curauá e vidro foram misturadas e posteriormente dispersadas manualmente para a formação das mantas. Os compósitos produzidos a partir dessas mantas são denominados de híbridos intra-camadas. A Figura 38 apresenta fotos dos compósitos híbridos produzidos e pode-se ver claramente a diferença no seu aspecto visual em decorrência das fibras presentes. A densidade dos compósitos, mostrada na Tabela 10, aumenta com o aumento do teor de fibras de vidro na relação curauá/vidro, a uma taxa aproximada de 5% a cada 25% de fibras de vidro que são substituídas por fibras de curauá.

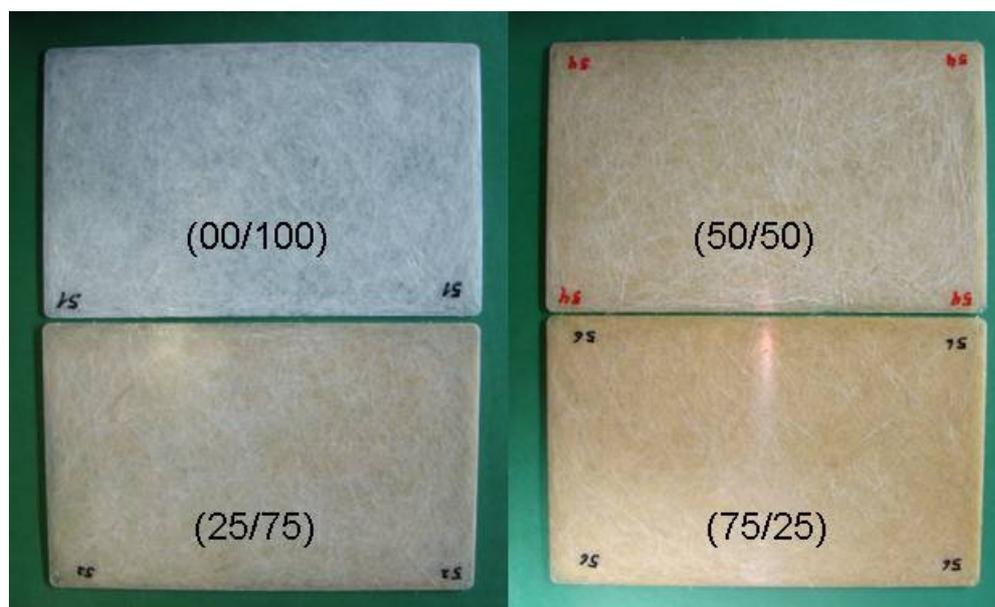


Figura 38: Placas de compósitos híbridos com diferentes teores volumétricos de curauá/vidro ($\%V_f \approx 20\%$; $L_f = 50$ mm).

Tabela 10: Densidade dos compósitos híbridos ($\%V_f \approx 20\%$).

Curauá / Vidro	Densidade (g/cm^3)*	Desvio padrão
00 / 100	1,402	0,028
25 / 75	1,332	0,042
50 / 50	1,302	0,030
75 / 25	1,245	0,012
100 / 00	1,187	0,001

*Resina poliéster isoftálica – densidade de $1,16 \text{ g/cm}^3$

Nos resultados dos ensaios a seguir pode-se observar que há uma redução gradual dos valores de resistência com o acréscimo das fibras de curauá. Essa redução gradual (em escada) ocorre somente em compósitos híbridos intracamadas, não aparecendo de forma tão clara em híbridos inter-laminares. Os resultados de resistência à tração (Figura 39) mostram, como previsto, uma redução da resistência com a adição de fibras de curauá. No entanto, quando se comparam os compósitos (00/100) e (25/75), observa-se que a inclusão de 25% de fibras de

curauá na fração volumétrica total de reforço provoca uma redução de resistência à tração de apenas 4%, ainda dentro do desvio experimental, ou seja, não compromete essa propriedade do compósito. Embora as propriedades mecânicas sofram uma redução de valores, dependendo da aplicação, a redução de densidade do compósito pode ser uma característica mais relevante do que a pequena redução das propriedades mecânicas. Pode-se citar o setor automotivo onde a redução de massa dos componentes individuais provoca uma redução no peso final dos veículos, possibilitando além da redução do consumo de combustíveis o aumento da capacidade de carga, o que pode proporcionar vantagens econômicas.

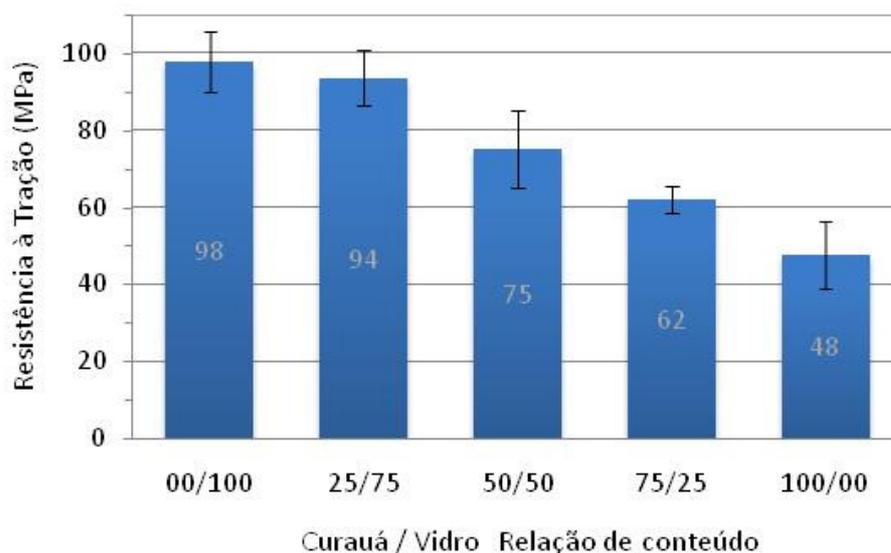


Figura 39: Resistência à tração dos compósitos híbridos.

Em flexão (Figura 40) observa-se um comportamento similar ao de tração, ou seja, a redução da resistência com a adição de fibras de curauá. Do compósito produzido com apenas fibras de vidro para o compósito híbrido com 25% do volume total de reforço composto por fibras de curauá, há uma redução ainda pequena, de 10%, na média de resistência à flexão, porém mais elevada do que em tração. Já para os compósitos com um maior teor de curauá, a redução de resistência se torna significativa. Essa redução pode ser atribuída às propriedades mecânicas inferiores da fibra de curauá e também à pobre adesão entre as fibras de curauá e a matriz de poliéster. Os resultados de módulo em flexão novamente mostram que a substituição

de 25% de vidro por curauá não compromete esta propriedade do compósito resultante.

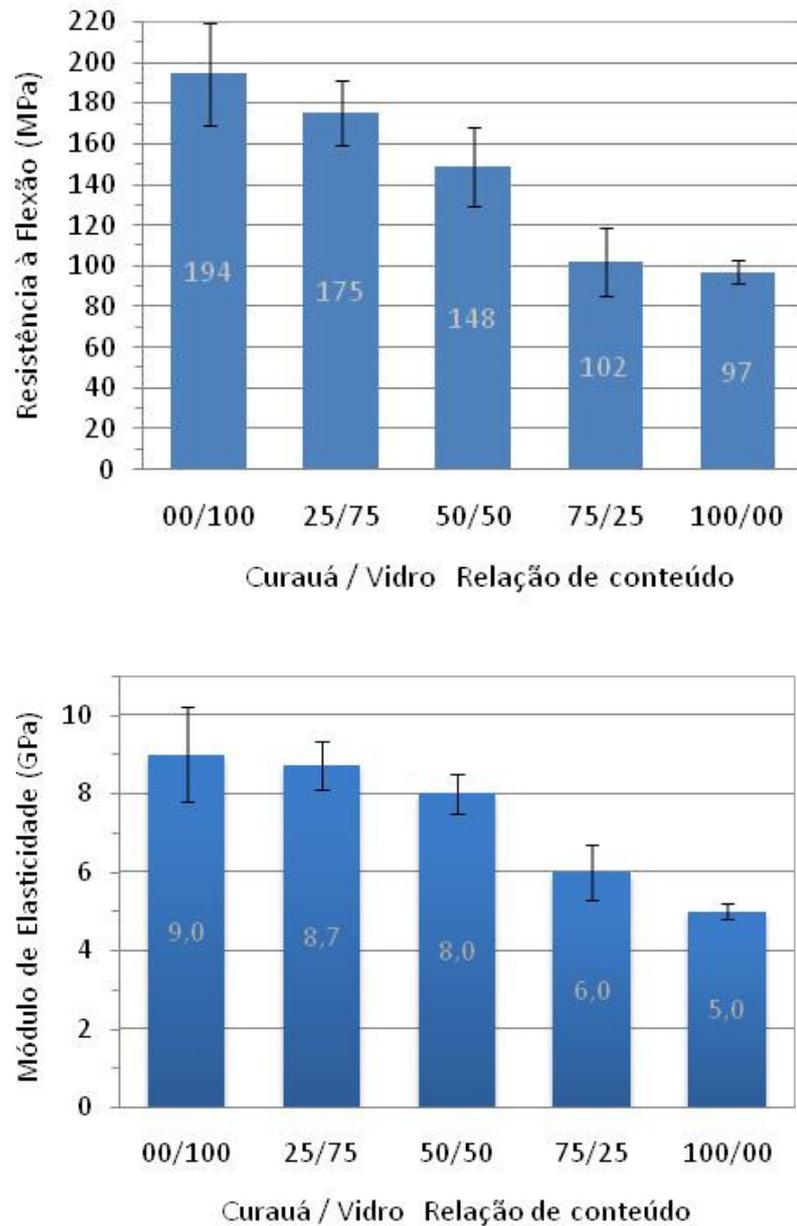


Figura 40: Resistência à flexão e módulo dos compósitos híbridos.

Na Figura 41, pode-se visualizar curvas típicas de tensão × deformação que demonstram que o desempenho tanto em tração quanto em flexão dos compósitos reforçados com fibras de vidro é bastante superior aos compósitos reforçados com fibras de curauá. Já o compósito híbrido com 25% de fibras de curauá apresenta um

desempenho intermediário e bastante próximo ao compósito com apenas fibras de vidro.

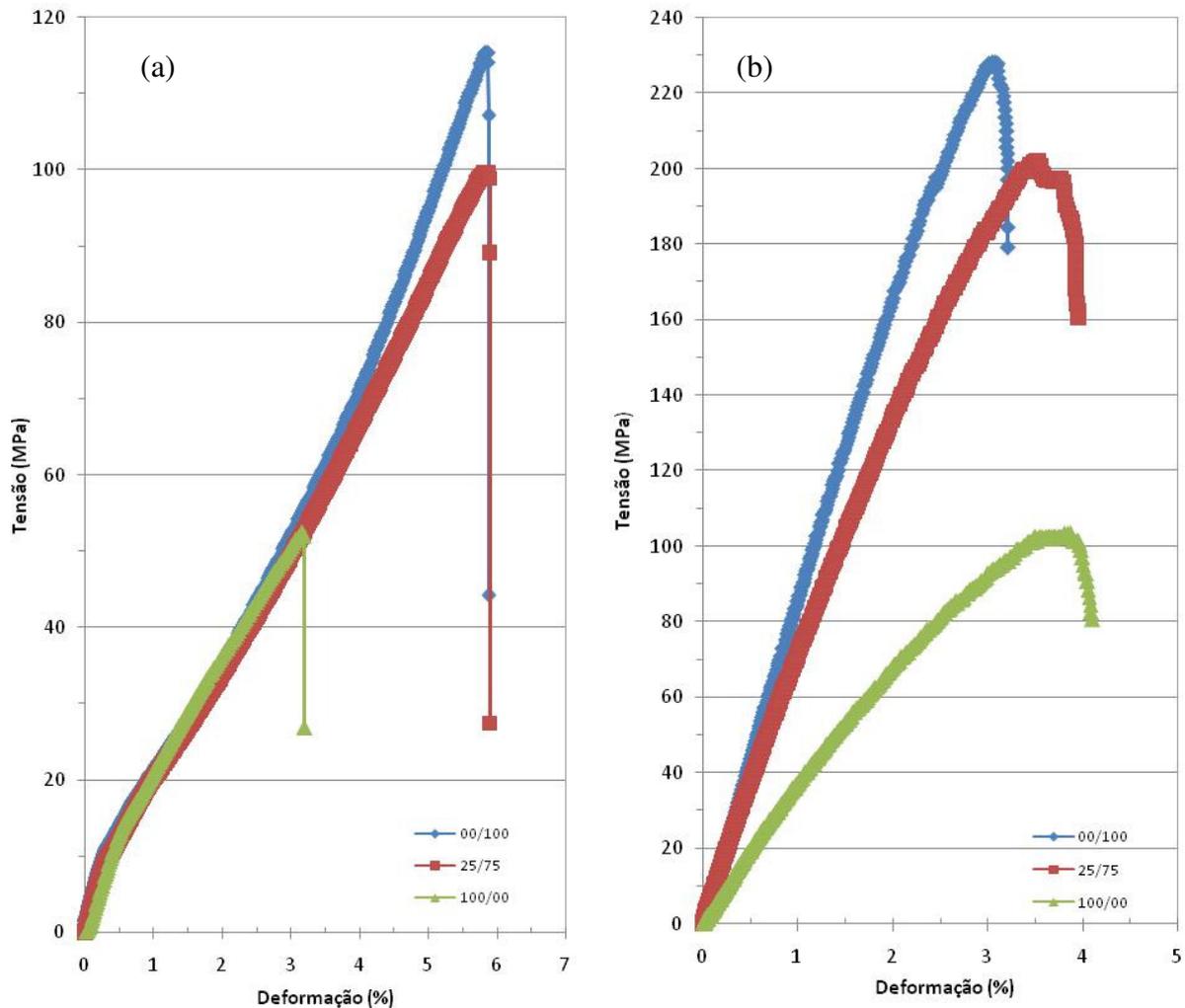


Figura 41: Curvas de Tensão × Deformação dos compósitos com fibras de vidro, híbridos e fibras de curauá. Ensaio de tração (a) e ensaios de flexão (b).

Deve-se considerar que as fibras de vidro utilizadas receberam um revestimento com agentes de acoplamento, o que promove a interação química entre as fibras de vidro e a matriz poliéster, tratamento esse que as fibras de curauá utilizadas não receberam. No entanto, comparando-se a adesão à matriz poliéster das fibras de curauá em relação às fibras de sisal, dentro das mesmas condições, observa-se que as fibras de curauá apresentam uma adesão superior às fibras de sisal, devido principalmente a seus aspectos morfológicos [11, 12].

Na Figura 42 observa-se claramente que a resistência ao impacto dos compósitos produzidos apenas com fibras de vidro (00/100) é muito superior a de compósitos com apenas fibras de curauá (100/00). Também, vê-se que a adição de 25% de fibras de vidro, formando o híbrido (75/25), causa um aumento considerável da resistência ao impacto, e que a diferença de resistência entre os compósitos (00/100) e (25/75) é de apenas 10%.

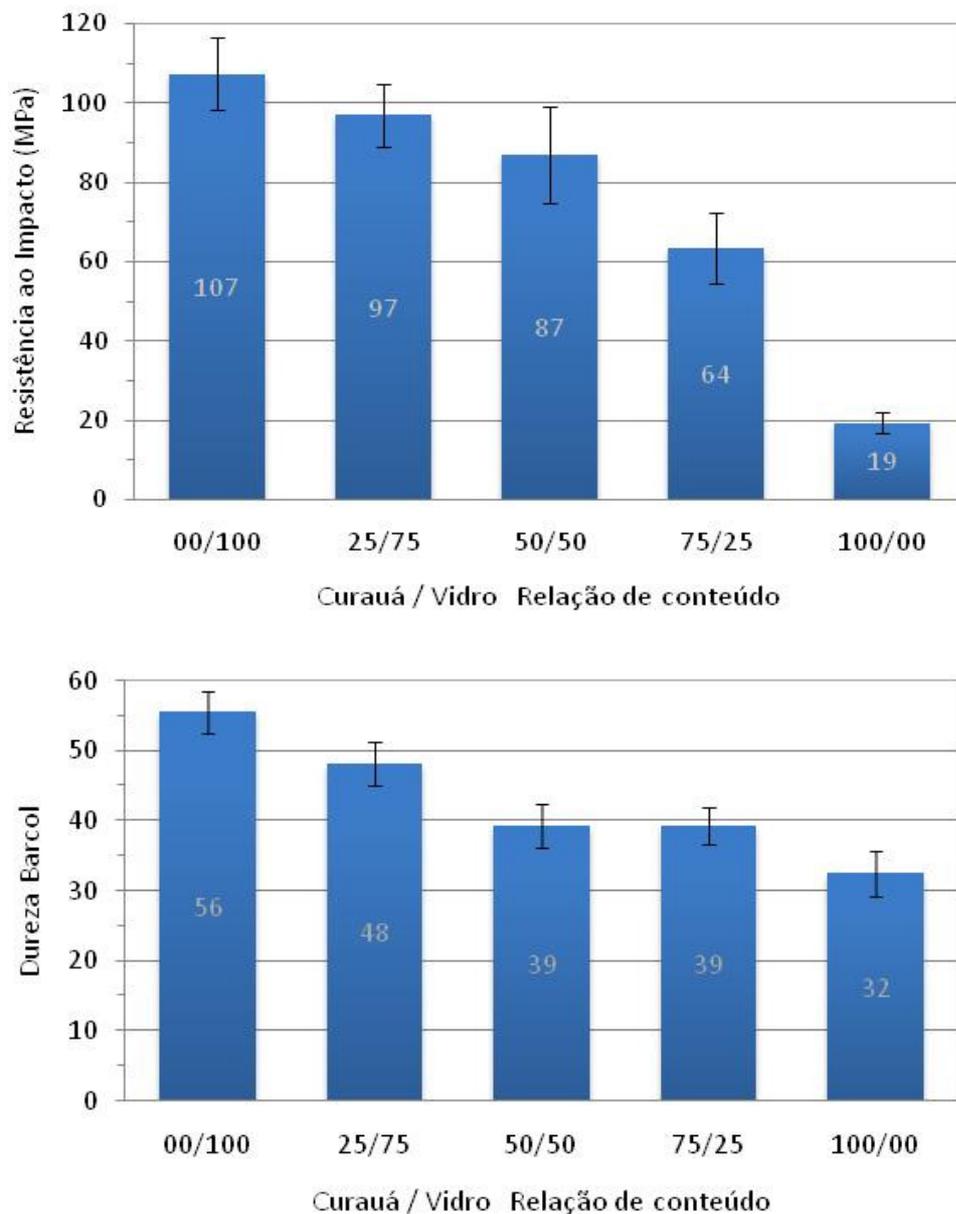


Figura 42: Resistência ao impacto e dureza Barcol dos compósitos híbridos.

Os resultados de dureza Barcol, mostrados na Figura 39, também apresentam resultados superiores para o compósito (00/100) em relação ao compósito (100/00). Nos compósitos híbridos (25/75), onde as fibras de vidro ainda predominam, a dureza Barcol continua elevada. Nos compósitos com 50 e 25% de fibras de vidro a dureza ainda permanece superior a 35, que é o valor de dureza Barcol da resina. Com 100% de fibras de curauá o valor médio de dureza Barcol dos compósitos cai para 32, o que demonstra que as propriedades da matriz são superiores às do compósito nesta situação.

Para finalizar, pode-se afirmar que os resultados obtidos para os compósitos híbridos demonstram que suas propriedades mecânicas podem ser ajustadas pelo controle cuidadoso da relação dos teores de fibras (curauá/vidro), de acordo com a aplicação do material e das propriedades requeridas.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos para os compósitos preliminares, pode-se concluir que os processos de lavagem, secagem e seleção das fibras são necessários para a retirada de impurezas e a desagregação dos filamentos. Este procedimento facilita a molhabilidade das fibras e conseqüentemente a adesão fibra/matriz, incrementando as propriedades mecânicas finais.

Durante o desenvolvimento experimental realizado, o aprimoramento das técnicas de limpeza/seleção das fibras e de produção de mantas e compósitos gerou resultados positivos no controle do processo. O processo manual, utilizado na produção das mantas embora cansativo e demorado, gerou uma boa reprodutibilidade nos resultados. No processo de produção de mantas em água destilada houve dificuldade na uniformização da espessura das mantas, resultando em um processo tão lento quanto a produção por dispersão manual. Como o ganho em propriedades mecânicas não foi significativo, considerou-se que este processo, da forma como foi desenvolvido, não apresenta vantagens em relação à produção por dispersão manual.

As fibras de maior comprimento têm a tendência de curvar, diminuindo o comprimento efetivo das fibras, mesmo assim, os resultados obtidos demonstraram que o aumento do comprimento das fibras, dentro do intervalo pesquisado (10 – 50 mm), gera melhores propriedades mecânicas nos compósitos.

Considerando os resultados apresentados de resistência à tração, resistência à flexão e módulo elástico, em conjunto com os aspectos que envolvem a produção dos compósitos, como uma maior praticidade e agilidade no corte e na seleção das fibras para a produção das mantas, dentre os comprimentos analisados os compósitos com fibras de 50 mm apresentaram os melhores resultados, sendo considerado o mais adequado para o desenvolvimento experimental posterior. O elevado desvio padrão obtido em alguns resultados esteve na ordem de grandeza esperada por se tratarem de fibras vegetais.

Com auxílio da microscopia óptica e pela análise das curvas de carregamento dos ensaios *short beam* observou-se que, de fato, houve falha por cisalhamento nos compósitos, qualificando o ensaio realizado. Observou-se que o comprimento da

fibra não exerceu uma influência significativa na resistência *short beam* enquanto o aumento da fração volumétrica de fibras provoca um incremento nessa resistência. No entanto, esse aumento tendeu a estabilizar para um elevado carregamento de fibras, acima de 30%. O aumento na espessura das mantas para a moldagem de compósitos de maior espessura pode ter dificultado sua impregnação pela matriz, reduzindo a molhabilidade das fibras, aumentando o teor de vazios e reduzindo a resistência *short beam*. De qualquer maneira, vê-se que deve ser utilizado o mesmo teor de fibras quando se compara resultados de *short beam* de diferentes compósitos.

Com o aumento da fração volumétrica de fibras de curauá nos compósitos estudados, obteve-se um incremento da resistência ao impacto além das resistências e módulos de tração e flexão, podendo-se dizer que, dentro do intervalo pesquisado, o % V_f de 38% gerou os melhores resultados. No entanto, observou-se uma redução gradativa nos resultados de dureza Barcol que foi atribuído especialmente ao maior teor de defeitos superficiais nos compósitos com elevado teor de fibras.

A redução das propriedades mecânicas dos compósitos híbridos intra-camadas com maior teor de fibras de curauá, pode ser atribuída às propriedades mecânicas inferiores das fibras de curauá e à baixa adesão entre as fibras de curauá e a matriz poliéster. Isso ocorre pois não há compatibilidade química entre as fibras de curauá e a resina poliéster, fato que também ocorre com as fibras de vidro, no entanto estas possuem um revestimento comumente a base de organo-silanos para promover a adesão química entre fibra e matriz.

Observou-se uma redução em torno de 5% na densidade dos compósitos a cada 25% de fibras de vidro substituídas por fibras de curauá, e embora as propriedades mecânicas sofram uma redução, dependendo da aplicação, essa redução de densidade pode ser mais relevante do que a redução das propriedades mecânicas. Pode-se citar como exemplo o setor automotivo, onde a redução de peso dos componentes individuais provoca uma redução no peso final dos veículos que leva a uma redução do consumo de combustíveis, ao aumento da capacidade de carga e a uma possível redução dos custos de produção pela utilização de fibras vegetais. Os resultados dos ensaios demonstraram que o controle das propriedades mecânicas dos compósitos híbridos intra-camadas pode ser realizado através do

controle da relação do teor das diferentes fibras (curauá/vidro), de acordo com a aplicação do material e as propriedades requeridas.

Este estudo demonstrou que as fibras de curauá apresentam algumas restrições ou limitações quando usadas em materiais compósitos, mesmo assim possuem características e condições que permitem essa aplicação. O desenvolvimento de compósitos híbridos utilizando-se fibras de curauá e fibras de vidro combinadas pode reduzir o uso dessas fibras sintéticas, reduzindo o peso e o custo do material e também promovendo aspectos ambientais, econômicos e sociais.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ♦ Desenvolver algum aparato que facilite e agilize a limpeza e o corte das fibras de curauá, e outro para automatizar a produção das mantas.
- ♦ Desenvolver compósitos utilizando reforços com fibras de curauá na forma de fibras longas ou tecidos.
- ♦ Desenvolver compósitos com fibras vegetais dentro de outros processos de produção, como infusão, RTM ou RTM *light*, possibilitando a redução do teor de vazios e o possível incremento das propriedades mecânicas.
- ♦ Desenvolver compósitos híbridos com diferentes frações volumétricas de reforço total.
- ♦ Realizar um estudo mercadológico das possibilidades de aplicação dos compósitos de curauá e dos compósitos híbridos.
- ♦ Estudar o envelhecimento dos compósitos híbridos intra-camadas.
- ♦ Estudar compósitos termoplásticos híbridos com fibras de vidro e curauá.

8 REFERÊNCIAS

- [1] ZAH, R.; HISCHIER, R.; LEÃO, A. L.; BRAUN, I. Curaua fibers in the automobile industry - A sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**, 15 (11-12), pp. 1032-1040, 2007.
- [2] JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, 71, pp. 343-364, 2008.
- [3] 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 (2), pp. 92-99, 2008.
- [4] 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 - Applied Science and Manufacturing**, 38 (8), pp. 1811-1820, 2007.
- [5] WUZELLA, G.; KANDELBAUER, A. Novel Composites Based on Natural Fibres and Thermosets. **JEC Composites Magazine – Biocomposites**, 37 (dec), pp. 36-38, 2007.
- [6] TRINDADE, W. G.; HOAREAU, W.; MEGIATTO, J. D.; RAZERA, I. A. T.; CASTELLAN, A.; FROLLINI, E. Thermoset phenolic matrices reinforced with unmodified and surface-grafted furfuryl alcohol sugar cane bagasse and curaua fibers: Properties of fibers and composites. **Biomacromolecules**, 6 (5), pp. 2485-2496, 2005.
- [7] SILVA, R. V.; AQUINO, E. M. F. Curaua fiber: A new alternative to polymeric composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, 27 (1), pp. 103-112, 2008.
- [8] CORDEIRO, I. M. C. C.; DE SANTANA, A. C.; LAMEIRA, O. A.; SILVA, I.M. Economical analysis of cultivation systems with *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby (Parica) and *Ananas comosus* var. *erectifolius* (L.B. Smith) Coppel & Leal (Curaua) crop at Aurora Para, Brazil. **Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia**, 26 (2), pp. 243-265, 2009.

- [9] CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução**. Editora LTC, 2007.
- [10] LEVY NETO, F. L.; PARDINI, L.C. **Compósitos Estruturais – Ciência e Tecnologia**. Editora Edgard Blucher Ltda, 2006.
- [11] SINGH, B.; GUPTA, M.; VERMA, A.; HAJELA, R. B. Studies on polymer composites based on sisal polyester and glass modified sisal fibers, filler and unsaturated polyester resin. **Research and Industry**, 39 (1), pp. 38-42, 1994.
- [12] 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**, 38, pp. 1694-1709, 2007.
- [13] TOMCZAK, F.; SATYANARAYANA, K. G.; SYDENSTRICKER, D. T. H. Studies on lignocellulosic fibers of brazil: Part III - morphology and properties of brazilian curauá fibers. **Composites Part A - Applied Science and Manufacturing**, 38 (10), pp. 2227-2236, 2007.
- [14] MONTEIRO, S. N.; AQUINO, R. C. M. P.; LOPES, F. P. D. Performance of curauá fibers in pullout tests. **Journal of Materials Science**, 43, pp. 489-493, 2008.
- [15] HOAREAU, W.; TRINDADE, W. G.; SIEGMUND, B.; CASTELLAN, A.; FROLLINI, E. Sugar cane bagasse and curaua lignins oxidized by chlorine dioxide and reacted with furfuryl alcohol: characterization and stability. **Polymer Degradation and Stability**, 86 (3), pp. 567-576, 2004.
- [16] MISHRA, S.; MOHANTY, A.; DRZAL, L.; MISRA, M.; PARIJA, S.; NAYAK, S.; TRIPATHY, S. Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites. **Composites Science and Technology**, 63 (10), pp. 1377-1385, 2003.
- [17] CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L. Characterization of curaua fiber. **Molecular Crystals and Liquid Crystals**, 353, pp. 149-152, 2000.
- [18] MARQUES, G.; GUTIERREZ, A.; DEL RIO, J. C. Chemical characterization of lignin and lipophilic fractions from leaf fibers of curaua (*Ananas Erectifolius*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 55 (4), pp. 1327-1336, 2007.

- [19] SPINACÉ, M. A. S.; LAMBERT, C. S.; FERMOSELLI, K. K. G.; DE PAOLI, M. A. Characterization of lignocellulosic curauá fibres. **Carbohydrate Polymers**, 77, pp. 47-53, 2009.
- [20] MONTEIRO, S. N.; RANGEL, J. J. A. Influência da micromorfologia das fases nas propriedades dos materiais compósitos. **17º CBCiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, pp. 3776-3787, 2006.
- [21] CORREA, A. C.; TEIXEIRA, E. M.; MARCONCINI, J. M.; PESSAN, L. A.; MATTOSO, L. H. C. Nanofibras de celulose a partir de fibras de curauá. **10º Congresso Brasileiro de Polímeros**, pp. 47, 2010.
- [22] FERMOSELI, K. K. G.; SPINACÉ, M. A. S.; LAMBERT, C. S.; DE PAOLI, M. A. Tratamento Superficial de Fibras Curauá para Reforço de Compósitos com Polímeros. **7º Congresso Brasileiro de Polímeros**, pp. 220-221, 2003.
- [23] PILATO, L. A.; MICHNO, M. J. **Advanced Composite Materials**. Publisher: Springer-Verlag, 1994.
- [24] ROSATO, D. V.; ROSATO, D. V. **Reinforced Plastics Handbook**. Publisher: Elsevier, 2004.
- [25] www.silaex.com.br/poliéster.htm (acessado em janeiro de 2010).
- [26] FERREIRA, C. A.; BORGES, S. G.; CARNEIRO, P. S.; TRINDADE, R. S.; LEITE, P. A. M. Avaliação da influência de diferentes cargas no tempo de cura e temperatura de cura de resinas poliéster insaturadas por intermédio de curvas exotérmicas. **17º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, pp. 3833-3842, 2006.
- [27] GIACOMINI, N. P.; LEÃO, A. L.; NEIS, A. M. Unsaturated polyester based composites reinforced with curauá fiber – preliminar studies. **ISNaPol**, pp. 386-392, 2000.
- [28] MONTEIRO, S. N.; AQUINO, R. C. M. P.; LOPES, F. P. D.; CARVALHO, E. A.; D'ALMEIDA, J. R. M. Comportamento mecânico e características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de curauá. **Revista Matéria**, 11 (3), pp. 197-203, 2006.
- [29] ALMEIDA, A. L. F. S.; ALMEIDA, J. R. M.; CALADO, V. M.; BARRETO, D. W. Compósitos de poliéster reforçados por fibras de curauá submetidas a diferentes

tratamentos superficiais. **18º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, pp. 4083-4094, 2008.

[30] GOMES, A.; GODA, K.; OHGI, J. Effects of alkali treatment to reinforcement on tensile properties of curaua fiber green composites. **JSME International Journal Series A-Solid Mechanics and Material Engineering**, 47 (4), pp. 541-546, 2004.

[31] MOTHE, C. G.; ARAUJO, C. R.; WANG, S. H. Thermal and mechanical characteristics of polyurethane/curaua fiber composites. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 95 (1), pp. 181-185, 2009.

[32] ARAUJO, C. R.; CARASCHI, J. C.; MOTHÉ, C. G. Nonisothermal degradation of PU composites with curaua fiber. **IX International Macromolecular Colloquium e 6º CBPOL**, pp. 647-650, 2001.

[33] CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L. Mechanical properties of curauá fiber reinforced polypropylene composites. **ISNaPol**, pp. 450-453, 2000.

[34] WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? **Composite Science and Technology**, 63, pp. 1259-1264, 2003.

[35] ARAÚJO, J. R.; WALDMAN, W. R.; DE PAOLI, M. A. Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: coupling agent effect. **Polymer Degradation and Stability**, 93, pp. 1770-1775, 2008.

[36] MANO, B.; ARAÚJO, J. R.; SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. Polyolefin composites with curauá fibres: effect of the processing conditions on mechanical properties, morphology and fibres dimensions. **Composites Science and Technology**, 70, pp. 29-35, 2010.

[37] SANTOS, P. A.; SPINACÉ, M. A. S.; FERMOSELLI, K. K. G.; DE PAOLI, M. A. Polyamide-6/ vegetal fiber composite prepared by extrusion and injection molding. **Composites: Part A**, 38, pp. 2404-2411, 2007.

[38] SOUZA, F. G.; OLIVEIRA, G. E.; RODRIGUES, C. H. M.; SOARES, B. G.; NELE, M.; PINTO, J. C. Natural Brazilian Amazonic (curaua) fibers modified with polyaniline nanoparticles. **Macromolecular Materials and Engineering**, 294 (8), pp. 484-491, 2009.

- [39] MANO, B.; DE PAOLI, M.A. **Plastics, Additives and Compounding**. The curauá challenge: Optimizing natural fibres, 11 (5), pp. 12-15, 17, nov.-dec. 2009.
- [40] DE CARVALHO, L. H. E.; CAVALCANTI, W. S. Tensile properties of unsaturated polyester/hybrid sisal-glass fabric reinforced composites. **4º ISNaPol - International Symposium on Natural Polymers and Composites**, pp. 170-172, 2004.
- [41] CAVALCANTI, W. S.; CARVALHO, L. H.; LIMA, A. G. B. Difusão de água em compósitos poliéster insaturados reforçados por tecido híbrido de juta-vidro: Modelagem e Simulação. **Revista Matéria**, 10 (1), pp. 14-23, 2005.
- [42] BARROS, A. R. F.; AQUINO, L. P. S.; DA SILVA, R. V. Laminados compósitos a base de fibras natural e sintética: efeito de condições ambientais adversas. **17º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, pp. 3177-3188, 2006.
- [43] DA SILVA, R. V.; AQUINO, E. M. F.; RODRIGUES, L. P. S.; BARROS, A. R. F. Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética. **Revista Matéria**, 13 (1), pp. 154 – 161, 2008.
- [44] OLIVEIRA, W.; AQUINO, E. M. F. Compósitos híbridos de fibras de vidro, juta e curauá: comportamento estático e mecanismo de dano. **16º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, pp. 1-12, 2004.
- [45] SREEKALA, M. S.; GEORGE, J.; KUMARAN, M. G.; THOMAS, S. The mechanical performance of hybrid phenol-formaldehyde-based composites reinforced with glass and oil palm fibres. **Composites Science and Technology**, 62, pp. 339-353, 2002.
- [46] DRUMMOND, M. L.; ANGRIZANI, C. C.; AMICO, S. C. Influence of the stacking sequence on the mechanical properties of glass/sisal hybrid composites. **6º ISNaPol - International Symposium on Natural Polymers and Composites**, pp. 1-4, 2007.
- [47] LI, S. H.; ZENG, Q. Y.; XIAO, Y. L.; FU, S. Y.; ZOU, B. L. Biomimicry of bamboo bast fiber with engineering composite materials. **Materials Science and Engineering**, C3, pp. 125-130, 1995.
- [48] COSTA, M. L.; ALMEIDA, S. F. M.; REZENDE, M. C. The influence on the interlaminar shear strength of carbon/epoxy and carbon/bismaleimide fabric laminates. **Composites Science and Technology**, 61, pp. 2101-2108, 2001.

- [49] ADAMS, D. F. The short beam shear test. **High Performance Composites**, July, 2006.
- [50] 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**, 11 (4), pp. 182-189, 2001.
- [51] Boletim técnico da resina poliéster isoftálica do tipo UCEFLEX ISO 1005, **produzido por Elekeiroz S.A.**, março de 2008.
- [52] Boletim técnico da resina poliéster isoftálica do tipo Arazyn 12.0, da **Ara Química S.A.**, agosto de 2008.
- [53] MOURA, M. J.; FIGUEIREDO, M. M. **Silva Lusitana**, 10, (2), pp. 207-216, 2002.
- [54] JOSEPH, K.; MEDEIROS, E. S.; CARVALHO, L. H. Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 9 (4), pp 136-141, 2009.
- [55] BOTELHO, E. C.; REZENDE, M. C. Caracterização mecânica de compósitos de poliamida/fibra de carbono via ensaios de cisalhamento interlaminar e de mecânica da fratura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 12, (3), pp. 153-163, 2002.
- [56] ABALI, F.; PORA, A.; SHIVAKUMAR, K. Modified short beam shear test for measurement of interlaminar shear strength of composites. **Journal of Composite Materials**, 37 (5), pp. 453-464, 2003.