



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM

EFEITOS DO ENVELHECIMENTO AMBIENTAL ACELERADO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Leonardo Pereira Sarmiento Rodrigues

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do grau em MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Eve Maria Freire de Aquino

Natal

Dezembro/2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela razão do meu ser e pela força nos momentos difíceis.

A minha namorada, futura esposa, Vanessa Câmara de Figueiredo, pela infinita contribuição e paciência, que fez com que eu alcançasse mais este objetivo em minha vida.

A professora Dra. Eve Maria Freire de Aquino, pela amizade e companheirismo no trabalho de iniciação científica e orientação na realização deste trabalho.

A professora Dra. Rosana Vilarim, pela contribuição e empenho para que este trabalho fosse concluído da melhor forma possível.

A EMATER-PA, Sr. Joaquim Cristovam de Andrade Sena, pelo fornecimento das fibras de curauá.

Aos professores da UFRN – PPGEM, pela utilização dos laboratórios e equipamentos.

Aos profissionais do Laboratório de Ensaio de Materiais do CTGÁS – LEM/CTGÁS, no auxílio durante os ensaios e análise dos corpos-de-prova e pela amizade desde 2001, quando nos conhecemos na graduação do curso de Tecnólogos em Materiais.

A professora da UFRN, Neyde Tomazim, pelo auxílio durante a confecção dos corpos-de-prova e utilização do laboratório.

Ao Dr. Raimundo Júnior pelos conselhos, dicas a seguir na vida acadêmica e na elaboração da dissertação.

Ao Dr. George Santos Marinho pelos conselhos, ajuda na confecção da câmara de envelhecimento e pela liberação de espaço e equipamentos do laboratório.

Ao Eng. Marcus Vinicius Silvério pela ajuda na construção da câmara de envelhecimento e amizade construída na graduação de engenharia mecânica.

A Marisa por toda ajuda dada durante o período do mestrado.

A todos os meus amigos e amigas que me deram apoio nos momentos difíceis e contribuíram de uma forma ou de outra para a realização deste trabalho.

A minha mãe, Maria de Fátima Pereira Sarmiento Rodrigues e ao meu pai Lucas Sarmiento Rodrigues, em memória, que sempre me apoiaram nos meus estudos sob a mensagem de ser é a única coisa que poderiam me dar para adquirir um futuro melhor, além da vivência com os mesmo.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
ÍNDICE DE TABELAS.....	vi
ÍNDICE DE TABELAS.....	vi
RESUMO.....	vii
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 - Introdução.....	4
2.2 - Materiais compósitos.....	6
2.2.1 - Materiais compósitos fibrosos	9
2.2.2 - Materiais compósitos híbridos	11
2.2.3 - Matrizes poliméricas.....	16
2.2.4 - Reforços fibrosos	19
2.2.4.1 - Fibras de vidro	20
2.2.4.2 - Fibras naturais e vegetais.....	22
2.2.5 - Processos de fabricação de compósitos poliméricos termofixos.....	31
2.2.5.1 - Processo de fabricação por moldagem manual (hand lay-up).....	31
2.2.6 – Propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras	32
2.2.7 – Compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro	33
2.2.8 – Compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais	34
2.2.9 – Problemas relativos à utilização de fibras vegetais em compósitos poliméricos.....	36
2.2.10 – Fatores influentes nas propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras ..	37
2.2.11 – Degradação de polímeros e compósitos	39
2.2.12 – Mecanismo de dano	41
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1 – Materiais utilizados nos laminados compósitos.....	46
3.2 – Processo de fabricação e configuração do laminado de fibra de vidro-E (CV).....	47
3.3 - Processo de fabricação e configuração do laminado híbrido	47
3.3.1 – Compósito laminado híbrido de fibras de curauá e vidro-E (CH).....	48
3.4 - Determinação da densidade e fração volumétrica dos componentes	49
3.5 – Corte e confecção dos corpos-de-prova.....	49
3.5.1 – Análises macroscópica e microscópica dos corpos-de-prova.....	51
3.6 – Ensaio de envelhecimento	51
3.7 – Construção da câmara de envelhecimento acelerado.....	51
3.8 – Ensaios mecânicos	55
3.8.1 – Ensaio de tração uniaxial	56

3.8.2 – Ensaio de flexão em três pontos.....	56
3.9 – Análise da Fratura.....	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
INTRODUÇÃO.....	58
4.1 – Estudo da microestrutura dos compósitos CH e CV no estado não-envelhecido.....	58
4.2 – Densidade volumétrica e percentual de volume de fibras.....	61
4.3 – Estudo da perda de massa causada pelo envelhecimento acelerado.....	62
4.4 – Ensaio de tração uniaxial no compósito laminado de fibra de vidro (CV) no estado original.....	65
4.4.1 – Característica da fratura do CV submetido à tração uniaxial.....	66
4.5 – Ensaio de tração uniaxial no compósito híbrido (CH) na condição seca.....	67
4.5.1 – Característica da Fratura do CH submetido à tração uniaxial.....	68
4.6 - Ensaio de flexão em três pontos no laminado de fibra de vidro (CV) no estado original.....	71
4.6.1 – Característica da fratura do CV submetido à flexão em três pontos.....	71
4.7 - Ensaio de flexão em três pontos do laminado híbrido (CH) no estado original.....	73
4.7.1 – Característica da fratura do CH submetido à flexão em três pontos.....	73
4.8 – Comportamento em tração uniaxial do CV e CH no estado original.....	75
4.9 – Comportamento em flexão em três pontos do CV e CH no estado original.....	76
4.10 – Ensaio de tração uniaxial no compósito laminado de fibra de vidro no estado envelhecido (CVE).....	78
4.10.1 – Característica da fratura do CVE submetido à tração uniaxial.....	78
4.11 – Ensaio de tração uniaxial no compósito híbrido no estado envelhecido (CHE).....	82
4.11.1 – Característica da fratura do CHE submetido à tração uniaxial.....	82
4.12 - Ensaio de flexão em três pontos no laminado de fibra de vidro no estado envelhecido (CVE).....	86
4.12.1 – Característica da fratura do CVE submetido à flexão em três pontos.....	86
4.13 - Ensaio de flexão em três pontos do compósito CHE no estado envelhecido.....	88
4.13.1 – Característica da fratura do CHE submetido à flexão em três pontos.....	88
4.14 – Comparativo entre a tração uniaxial do CVE e CHE – Influência da configuração no envelhecimento.....	91
4.14.1 – Comparativo entre a flexão em três pontos do CVE e CHE.....	92
4.15 – Comparativo entre a tração uniaxial do CH e CHE – Influência do envelhecimento.....	94
4.15.1 – Comparativo entre a flexão em três pontos do CH e CHE.....	95
4.16 – Comparativo entre a tração uniaxial do CV e CVE – Influência do envelhecimento.....	97
4.16.1 – Comparativo entre a flexão em três pontos do CV e CVE.....	98
4.17 – Visão geral do comportamento mecânico dos compósitos submetidos ao processo de envelhecimento acelerado.....	99
5. CONCLUSÕES.....	101
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

CPs – Corpos-de-prova

CP – Corpo-de-prova

UV – Radiação ultravioleta

CV – Compósito de fibra de vidro-E

CH – Compósito laminado híbrido de fibras de curauá e vidro-E

CVE – Compósito laminado de fibra de vidro-E envelhecido

CHE - Compósito laminado híbrido de fibras de curauá e vidro-E envelhecido

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Formas possíveis de utilização de fibras na fabricação de materiais compostos (Chou et al., 1986).	10
Figura 2.2 - Possíveis formas de utilização de fibras na fabricação de materiais compostos (Chou et al., 1986).	10
Figura 2.3 - (a): Tecido bidirecional de fibras de vidro; (b): Manta de fibras de vidro (Aquino Carvalho, 1992).	22
Figura 2.4 - (a) Cultivo da fibra de curauá; (b) Secagem da fibra de curauá (Revista Agro Amazônia, 2003).	28
Figura 2.5 - Aspecto microscópico de uma fibra de curauá típica.	29
Figura 2.6 – Fissuração em matriz polimérica. Fonte: base de pesquisa em compósitos, 2005.	42
Figura 2.7 – Ruptura das fibras de vidro. Fonte: base de pesquisa em compósitos, 2005 (200x)	43
Figura 2.8 – Desaderência fibras de vidro/matriz. Fonte: base de pesquisa em compósitos, 2006.	43
Figura 2.9 – Delaminação entre as camadas de fibras. Fonte: base de pesquisa em compósitos, 2006	44
Figura 2.10 – Microflambagem em fibras. Fonte: base de pesquisa em compósitos, 2007.	44
Figura 3.1 - Configuração do laminado de fibra de vidro-E. MV – Manta de fibras curtas de vidro- E.	47
Figura 3.2 - Configuração do laminado híbrido vidro/curauá. MV – Manta de fibras curtas de vidro- E. MC – Manta de fibras contínuas de curauá.	48
Figura 3.3 – Desenho esquemático dos CPs para o ensaio de tração uniaxial.	50
Figura 3.4 – Desenho esquemático dos CPs para o ensaio de flexão em três pontos.	50
Figura 3.5 – Visão geral da câmara de envelhecimento	53
Figura 3.6 – Reservatório de água – Câmara de envelhecimento.	54
Figura 3.7 – Câmara de envelhecimento aberta – Visão geral.	54
Figura 3.8 – Detalhes do módulo 2 – Câmara de envelhecimento.	55
Figura 4.1 – Configuração do CH - Corte em sua secção transversal (7x).	59

Figura 4.2 – Desalinhamento das fibras de curauá após a confecção do compósito CH.....	59
Figura 4.3 – Presença de bolhas no compósito vidro (25x).....	60
Figura 4.4 – Distribuição das fibras de vidro e de curauá e interface ricas em resina após a impregnação (100x).....	60
Figura 4.5 – Resultados do ensaio de calcinação para o CV e CH	61
Figura 4.6 – Perda de massa no ensaio de envelhecimento acelerado.....	62
Figura 4.7 – Perda de fibras na face exposta ao envelhecimento (30x).....	63
Figura 4.8 – Degradação da interface fibra/matriz (500x).....	64
Figura 4.9 – Região não afetada pela radiação UV . CVE - (100x).....	64
Já na região onde sofre a radiação, a degradação é facilmente perceptível, pois a sua coloração e rugosidade são alteradas, conforme mostrado na figura 4.10.	65
Figura 4.10 – Região afetada pela radiação, seção transversal do corpo-de-prova (100x).	65
Figura 4.11 – CPs pós-ensaio do compósito CV submetidos à tração uniaxial.	66
Figura 4.12 – Região próxima à fratura final de tração uniaxial CV (100x).....	67
Figura 4.13 – CPs de tração uniaxial - CH após-ensaio.....	68
Figura 4.14 – Superfície de fratura - Tração uniaxial CH	68
Figura 4.15 – Superfície de fratura de um CP de tração do CH obtida através de MEV.....	69
Figura 4.16 – Região próxima à fratura no CH (200x)	70
Figura 4.17 – Presença de fratura adesiva e coesiva no CH (500x).....	70
Figura 4.18 – Aspecto da aderência da resina á fibra de vidro no compósito híbrido (CH)	71
Figura 4.19 – Fenda longitudinal na linha neutra no CV (100x).....	72
Figura 4.20 – Fenda transversal na linha neutra no CV (50x).....	72
Figura 4.21 – CPs de flexão em três pontos pós-ensaio. (a) Largura e (b) lateral.....	74
Figura 4.22 – Fratura adesiva na interface de fibra de vidro/matriz (500x).....	74
Figura 4.23 – Fenda transversal interna até a camada de fibra de vidro após a central de Curauá (200x)	75
Figura 4.24 – Propriedades mecânicas em tração uniaxial dos compósitos de fibra de vidro e híbrido. (a) Resistência última à tração, (b) Módulo de elasticidade, (c) Deformação de ruptura (alongamento).	76
Figura 4.25 – Propriedades mecânicas em flexão dos compósitos híbrido e de fibra de vidro. (a) Resistência à flexão, (b) Módulo de elasticidade em flexão, (c) Deflexão máxima	77

Figura 4.26 – Dois CPs de tração uniaxial de CVE pós-ensaio.	79
Figura 4.27 – Região de fratura final e fissuras na matriz.....	79
Figura 4.28 – Região próxima à fratura final na tração uniaxial CVE (200x).....	80
Figura 4.29 – Fratura adesiva na superfície exposta ao envelhecimento do CVE	81
Figura 4.30 – Região de fratura do CVE	81
Figura 4.31 – Dois CPs do compósito CHE após ensaio de tração uniaxial.....	83
Figura 4.32 – Superfície de fratura de um CP de tração do CHE obtida através de MEV.	84
Figura 4.33 – Região próxima à fratura no CHE (200x).....	84
Figura 4.34 – Aspecto da aderência da resina à fibra de vidro no CHE	85
Figura 4.35 – Aspecto da aderência da resina à fibra de curauá no CHE	85
Figura 4.36 – Fenda longitudinal na segunda camada de fibras de vidro no CVE (100x).....	86
Figura 4.37 – Fissura transversal na camada tracionada no CVE (200x).....	87
Figura 4.38 – Região de fratura do CVE após ensaio de flexão em três pontos.....	88
Figura 4.39 a e b – CPs de flexão em três pontos pós-ensaio do compósito CHE . (a) Largura e (b) lateral.....	89
Figura 4.40 – Fratura adesiva na interface de fibra de vidro/matriz (200x).....	90
Figura 4.41 – Fenda transversal interna até a camada de fibra de curauá (100x).....	90
Figura 4.42 – Característica da fibra de curauá após ensaio de flexão em três pontos no CHE	91
Figura 4.43 – Propriedades mecânicas em tração uniaxial dos compósitos de fibra de vidro e híbrido envelhecidos. (a) Resistência última à tração, (b) Módulo de elasticidade, (c) Deformação (alongamento).	92
Figura 4.44 – Propriedades mecânicas em flexão dos compósitos híbrido e de fibra de vidro envelhecidos. (a) Resistência à flexão, (b) Módulo de elasticidade em flexão, (c) Deflexão máxima.....	93
Figura 4.45 – Propriedades mecânicas em tração uniaxial dos compósitos CH e CHE . (a) Resistência última à tração, (b) Módulo de elasticidade, (c) Deformação máxima (alongamento).	95
Figura 4.46 – Propriedades mecânicas em flexão dos compósitos CH e CHE . (a) Resistência à flexão, (b) Módulo de elasticidade em flexão, (c) Deflexão máxima.....	96

Figura 4.47 – Propriedades mecânicas em tração uniaxial dos compósitos CV e CVE . Resistência última à tração, módulo de elasticidade e máximo alongamento.....	97
Figura 4.48 – Propriedades mecânicas em flexão dos CV e CVE . Resistência à flexão, módulo de elasticidade em flexão e deflexão máxima.....	98
Figura 4.49 – Comportamento mecânico dos compósitos CV , CH , CVE e CHE em diferentes carregamentos.	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação dos materiais compósitos segundo a natureza dos constituintes, (Hull, 1988).....	7
Tabela 2.2 - Classificação dos materiais compósitos sintéticos microcompósitos, quanto à natureza da matriz (Antequera et al., 1991).....	8
Tabela 2.3 - Classificação dos materiais compósitos sintéticos microcompósitos, quanto à forma, ao tamanho e distribuição dos reforços (Hull, 1988).	9
Tabela 2.4 - Principais fontes de fibras vegetais (Young, 1994).....	23
Tabela 2.5 - Composição química de algumas fibras vegetais (Young, 1994).....	24
Tabela 2.6 - Composição química de fibra do curauá (Ledo, 2005).....	30
Tabela 2.7 – Propriedades mecânicas e características das fibras vegetais mais utilizadas em compósitos poliméricos (Leão e Caraschi 2001; Mohanty et al. 2000; Bledzik e Gassan 1999; Baley 1997).....	31
Tabela 2.8 - Comparação entre várias propriedades de algumas fibras vegetais e sintéticas...	35
Tabela 4.1 – Densidade volumétrica dos compósitos.....	61
Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas do CV - Tração uniaxial.....	66
Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas do CH - Tração uniaxial.	67
Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas do CV - Flexão em três pontos.	71
Tabela 4.5 - Propriedades mecânicas do CH - Flexão em três pontos.	73
Tabela 4.6 - Propriedades mecânicas CVE - Tração uniaxial.....	78
Tabela 4.7 - Propriedades mecânicas do CHE - Tração uniaxial.....	82
Tabela 4.8 - Propriedades mecânicas do CVE - Flexão em três pontos.....	86
Tabela 4.9 - Propriedades mecânicas do CHE - Flexão em três pontos.	88

RESUMO

As vantagens do uso de fibras vegetais sobre as fibras sintéticas, como as fibras de vidro, no reforço de compósitos são: baixo custo, baixa densidade, boa tenacidade, boas propriedades térmicas e uso reduzido de instrumentos para o seu tratamento ou processamento. Porém, problemas relacionados com o baixo desempenho mecânico de algumas fibras vegetais, têm dificultado seu uso direto em elementos estruturais. Neste sentido, o aparecimento de materiais alternativos, como os compósitos híbridos, envolvendo fibras sintéticas e naturais, vem sendo incentivado buscando-se melhorar o desempenho estrutural dos compósitos a base só de fibras vegetais. As diferenças entre as propriedades físicas, químicas e mecânicas dessas fibras, principalmente frente às condições ambientais adversas, como a presença de umidade e radiação ultravioleta, vem se tornando uma preocupação a mais na resposta final desses compósitos. No presente trabalho de investigação apresenta-se um estudo comparativo da resistência e rigidez entre dois compósitos, ambos de matriz poliéster ortoftálica, sendo um reforçado com fibras de vidro-E (**CV**) e o outro híbrido reforçado com fibras vegetais de curauá e fibra de vidro-E (**CH**). Todo o estudo comparativo teve como base a influência da exposição à radiação UV e vapor d'água aquecido nos compósitos, simulando o envelhecimento ambiental. As condições de ensaios são aceleradas através do uso da câmara de envelhecimento. Os compósitos serão avaliados através de ensaios mecânicos estáticos de tração uniaxial e flexão em três pontos. Os compósitos de fibra de vidro e híbridos são de fabricação industrial utilizando o processo de laminação manual (hand lay-up) e foram desenvolvidos na forma de compósitos. Todos foram projetados para atender possíveis aplicações estruturais, como reservatórios e tubulações. Os reforços utilizados nos compósitos foram na formas de mantas de fibras vidro-E curtas ($450\text{g/m}^2 - 5\text{cm}$) e mechas de fios contínuos (cujo título foi de 0,9 dtex) para as fibras de curauá. Os resultados obtidos mostram claramente a influência do envelhecimento ambiental no desempenho mecânico dos compósitos **CV** e **CH**. Também foram analisados aspectos referentes às características finais da fratura para todos os tipos de carregamentos estudados.

Palavras-chaves: Envelhecimento ambiental, fibras vegetais, compósitos híbridos, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The advantages of the use of vegetable fibers on the synthetic fibers, such as glass fibers, in the reinforcements in composites are: low cost, low density, good tenacity, good thermal properties and reduced use of instruments for their treatment or processing. However, problems related to poor performance of some mechanical natural fibers, have hindered its direct use in structural elements. In this sense, the emergence of alternative materials such as hybrids composites, involving natural and synthetic fibers, has been encouraged by seeking to improve the performance of structural composites based only on natural fibers. The differences between the physical, chemical and mechanical properties of these fibers, especially facing the adverse environmental conditions such as the presence of moisture and ultraviolet radiation, is also becoming a concern in the final response of these composites. This piece of research presents a comparative study of the strength and stiffness between two composite, both of orthoftalic polyester matrix, one reinforced with fibers of glass-E (**CV**) and other hybrid reinforced with natural fibers of curauá and fiberglass-E (**CH**). All the comparative study is based on the influence of exposure to UV rays and steam heated water in composites, simulating the aging environment. The conditions for the tests are accelerated through the use of the aging chamber. The composites will be evaluated through tests of uniaxial static mechanical traction and bending on three points. The composite of glass fiber and hybrid manufacturing industry are using the rolling manual (hand lay-up) and have been developed in the form of composites. All were designed to meet possible structural applications such as tanks and pipes. The reinforcements used in composites were in the forms of short fiber glass-E quilts (450g/m^2 - 5cm) of continuous wires and fuses (whose title was of 0.9 dtex) for the curauá fibers. The results clearly show the influence of aging on the environmental mechanical performance of the composite **CV** and **CH**. The issues concerning the final characteristics of the fracture for all types of cargoes studied were also analyzed.

Keywords: Aging environmental, fiber plants, hybrid composites, mechanical properties.

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Neste trabalho teve-se por objetivos avaliar o comportamento mecânico (resistência e rigidez) e característica final da fratura em compósitos poliméricos, submetidos aos ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos sob condições de envelhecimento ambiental.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudo da resistência, rigidez e característica final da fratura em compósito poliméricos submetidos à exposição de raios ultravioleta (UV) e umidade (vapor d'água aquecido), caracterizando o envelhecimento ambiental;
- Estudos comparativos dos tipos de carregamentos aplicados e dos tipos de fibras utilizadas: compósito híbrido e só a base de fibras de vidro;
- Acelerar as condições ambientais adversas através da utilização da “câmara de envelhecimento”;
- Estudo do comportamento da adesão entre as camadas através de estudos micrográficos, principalmente entre as camadas de fibras sintéticas e vegetais;
- Análise da característica final da fratura para todas as condições estudadas.

1. INTRODUÇÃO

Em compósitos híbridos dois ou mais tipos de fibras são usados como reforços em um ou mais tipos de resinas. A idéia principal consiste em que a hibridização atenderia a determinadas propriedades que um só tipo de fibra e/ou matriz não atenderia. Há alguns anos esses compósitos vêm sendo estudados e inicialmente a ênfase era dada aos reforçados com fibras sintéticas (Mander et al., 1981; Fernando et al., 1988; Dickson et al., 1988; Maron et al., 1989). Só nos últimos anos ênfase tem sido dada ao estudo da hibridização de compósitos envolvendo fibras sintéticas e vegetais (Moe et al., 2002; Seena et al., 2002; Aquino et al., 2007). A expectativa era que, devido ao baixo desempenho mecânico de algumas fibras vegetais, a sua união com fibras de desempenho mais elevado (sintéticas) pudesse dar origem a materiais com maiores probabilidades de aplicações estruturais. Em geral, os estudos desenvolvidos com base no uso de fibras naturais se restringem aos plásticos reforçados, sejam à base de resinas termofixas ou termoplásticas (Joseph et al., 2002; Valadez et al., 1999; Singleton N. et al. 2003; Dipa et al; 2002), porém sempre com pouca definição com relação à aplicação do produto final.

Para esse tipo de compósito também pouco se conhece sobre o seu comportamento mecânico frente as mais diversas condições de serviço, principalmente quando se trata de condições ambientais adversas, tais como, presença de radiação ultravioleta e de umidade.

A proposta deste trabalho consiste em avaliar o desempenho mecânico de um compósito laminado polimérico híbrido, associando fibras sintéticas (vidro-E) e naturais vegetais (curauá), submetido a condições de envelhecimento ambiental (**CHE**), sendo este caracterizado pela exposição a raios UV e vapor d'água aquecido. Para melhor entendimento do processo, um compósito polimérico somente a base de fibras sintéticas (vidro-E), (**CVE**) também foi submetido às mesmas condições de ensaios para efeito de estudo comparativo.

O estudo comparativo tem como base a análise das propriedades mecânicas do laminado híbrido e do laminado unicamente de fibras de vidro (sendo este último já tradicionalmente usado na indústria na confecção de alguns tipos de reservatórios) tanto para o estado original (sem envelhecimento – **CV** e **CH**) quanto para o estado envelhecido (**CVE** e **CHE**).

Essas condições ambientais adversas podem ser encontradas em aplicações com vários tipos de ambientes e condições de trabalho, tais como tubulações, estruturas náuticas e

qualquer outra aplicação onde a estrutura fique exposta ao meio ambiente. Sendo assim, é de fundamental importância estudar o comportamento com relação aos mecanismos de degradação do compósito, numa visão de possíveis aplicações em ambientes externos, sob a ação do sol, chuva e umidade noturna. Nesse trabalho de investigação as condições ambientais acima citadas foram aceleradas através do uso de uma câmara de envelhecimento.

A fibra de curauá foi escolhida por apresentar propriedades físicas e mecânicas que superam às das fibras de sisal e juta (Oliveira, 2005; Leão, 2001), bastante comuns neste tipo de compósito (Silva et al., 2004; Aquino, et al., 2005). Além disso, há também os aspectos sociais já que a fibra de curauá, originária da Amazônia, representa um alto potencial para a agricultura e o incentivo ao seu uso pode ser um fator importante para desenvolvimento econômico da região Amazônica. Entre as bases de dados pesquisadas algumas referências sobre compósitos híbridos com fibras vegetais e sintéticas foram encontradas (Twe e Liao, 2003; Aquino et al., 2005; Sreekala et al., 2002; Seena et al., 2002; Kalaprasad e Kuruvilla, 1997).

A fibra de vidro foi escolhida pelo seu baixo custo e potencial de aplicação em elementos estruturais. Nas bases de dados pesquisadas não foram encontradas referências sobre o comportamento de compósitos híbridos com fibras de curauá, principalmente em condições ambientais adversas. Um fator importante no aspecto do custo industrial do compósito foi à utilização das fibras de curauá "in-natura", ou seja, sem nenhum tratamento adicional no sentido de melhorar a aderência interfacial. Outro fator importante é saber que a fibra de curauá tem a capacidade de absorver a mesma quantidade de resina que, por exemplo, às de vidro, não acarretando dessa forma custos adicionais com relação ao processo de fabricação.

Todos os compósitos são de fabricação industrial, obtidos através do processo de laminação manual (hand lay-up) e utilizando a resina poliéster ortoftálica como matriz. Possuem o mesmo número de camadas, 07 (sete) ao total, sendo que o compósito híbrido é formado por 04 (quatro) camadas de mantas de fibras de vidro-E ($450\text{g/m}^2 - 5\text{cm}$) intercaladas com 03 (três) camadas de fibras contínuas de curauá (cujo título foi de 0,9 dtex), enquanto que o outro compósito é constituído por 07 (sete) camadas do mesmo tipo de mantas de fibras de vidro-E do compósito híbrido.

Análises das propriedades mecânicas de resistência e rigidez foram realizadas a partir dos ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos para os dois compósitos.

Todo o estudo descrito acima foi completado com as análises macroscópicas e microscópicas das características finais da fratura para todos os ensaios, configurações e situações ambientais adversas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Introdução

Na atualidade há uma tendência mundial em busca de recursos naturais que venham a beneficiar a humanidade, não somente na criação de novos produtos, mas também na oportunidade da criação de postos de trabalho e geração de renda através do desenvolvimento de novas tecnologias.

O Brasil não foge deste princípio, portanto o atual interesse nos compósitos com fibras naturais, sejam elas de origem vegetal, mineral ou animal, deve-se principalmente, a sua crescente preocupação com a preservação do meio ambiente e socialização. Há um grande interesse na busca por fibras naturais que possam substituir adequadamente as fibras sintéticas como, por exemplo, a fibra de vidro. Uma possível solução para suprir esta deficiência é o processo de hibridização; utilizando dois ou mais diferentes tipos de fibras, as vantagens encontradas em um tipo podem complementar as desvantagens da outra.

Fibras vegetais, usualmente definidas somente como fibras naturais, são atualmente muito utilizadas como reforços em compósitos poliméricos devido ao seu baixo custo, serem biodegradáveis, o que condiz com o atual apelo à preservação ambiental e utilização de matéria renovável. Devido a sua inerente natureza rica em hidroxilas, as fibras vegetais são particularmente úteis em sistemas termorrígidos, tal como o poliuretano, onde o grupo hidroxila das fibras pode reagir com o grupo isocianato do poliuretano, poliuretanos são polímeros muito versáteis que, pela escolha adequada dos seus elementos, podem ser preparados como um termoplástico, termorrígido, elastômero, espuma rígida ou adesivo.

As principais aplicações desses compósitos estão na construção civil, indústrias de móveis, embalagens e no ramo automotivo, geralmente utilizado como material funcional ou para carregamentos de leve e médio porte (Suddell et al., 2002; Dahlke et al., 1998).

No Brasil, uma alternativa econômica está relacionada ao fato do país ter sua economia baseada na agricultura, onde a matéria-prima obtida de fontes renováveis, tais como o sisal, a cana-de-açúcar, o abacaxi, o curauá, a juta (fibras duras e longas), que podem ser utilizadas em compósitos poliméricos como alternativas às fibras sintéticas, é largamente disponível.

As fibras vegetais são uma alternativa ecológica em relação à biodegradabilidade destas, o que favorece a decomposição dos compósitos aos quais estão associados após sua vida útil, e ao fato destes resíduos não serem poluentes, que são aspectos considerados vantajosos para algumas aplicações (Nothenberg, 1996).

Uma importante característica dos compósitos poliméricos é o efeito sinérgico observado no sistema, onde as propriedades finais são misturas melhoradas das propriedades individuais de seus componentes. Como as fibras vegetais têm, comparativamente, boas propriedades mecânicas específicas (resistência/peso, módulo elástico/peso), isso faz delas um componente viável para a aplicação em compósitos. A madeira é um exemplo natural de compósito, onde temos a celulose como reforço e a lignina como matriz (Franco & Vega, 1997).

A principal limitação em encontrar novas aplicações para compósitos de fibras vegetais, principalmente aplicações estruturais, deve-se ao baixo desempenho mecânico e alta absorção de umidade destas fibras (Espert et al., 2004; Joseph et al., 2002). Uma alternativa para minimizar este problema é o processo de hibridização com a associação de fibras naturais e sintéticas. A fibra de vidro apresenta-se como uma boa alternativa para a hibridização; vários trabalhos reportam que a mesma tem um bom efeito de reforçamento quando associadas com as fibras de juta, sisal e coco (Pavithan apud Oliveira, 2005; Clark e Ansell, 1986; Mohan e Kishore, 1985). Além disto, as fibras de vidro são praticamente impermeáveis à água podendo atuar como “barreira” para minimizar o contato das fibras naturais, de natureza hidrofílica, com a água (Bledzik e Gassan, 1999).

Dependendo da aplicação do compósito o estudo da degradação natural pode ser de fundamental importância, principalmente quando a degradação é combinada com calor, radiação solar, poluição e cargas estáticas ou de fadiga; condições que conduzem ao envelhecimento do material com decréscimo das propriedades de resistência e rigidez.

Sabe-se que a água pode afetar a matriz, as fibras e mesmo a interface causando perda de aderência entre matriz e fibra e influenciando na própria integridade do compósito. A matriz polimérica absorve água por um processo de difusão volumétrica; a cinética de absorção geralmente segue a lei de Fick (MARIATTI, 2005).

2.2 - Materiais compósitos

Segundo a norma ASTM D3878-95, compósito é uma substância constituindo de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, que são combinados para formar um material de engenharia útil com certas propriedades que não se encontram nos materiais isoladamente. A denominação destes materiais é bastante diversificada, podendo ser tratados na literatura como: compostos, conjugados ou compósitos (Mano, 1991).

Os compósitos possuem dois ou mais constituintes fisicamente distintos numa escala microscópica, separados por uma interface, sendo muito importante à especificação destes constituintes. A matriz é o constituinte contínuo, mas nem sempre presente em maior quantidade. O segundo constituinte, disperso na matriz, é citado como uma fase de reforço, que atua aprimorando as propriedades mecânicas da matriz (Mathews, 1994).

Um dos tipos de matrizes mais utilizadas são os polímeros sintéticos. O processamento de um compósito de matriz polimérica não envolve, necessariamente, altas pressões e não requer altas temperaturas. Também, os problemas associados com a degradação do reforço durante a manufatura são menos significativos para os compósitos com matrizes poliméricas do que para os compósitos com outras matrizes (metálicas, concreto, entre outros). Ainda, os equipamentos necessários para se obter compósitos com matrizes poliméricas, em sua maioria, são simples de usar. Por estas razões, os compósitos com matrizes poliméricas desenvolveram-se rapidamente e logo se tornaram aceitos para aplicações estruturais (Mathews, 1994).

A qualidade da interface entre a matriz e o reforço é um fator de grande importância no desempenho mecânico do compósito. Para que ocorra interação entre componentes de naturezas químicas diferentes e de quaisquer dimensões ou forma, é essencial a existência de uma área de contato entre elas. Quanto maior for essa área, maior a possibilidade de ocorrer entre os dois componentes uma interação de natureza física, química ou físico-química (Mano, 1991).

A interface envolve a existência de uma região de transição química e física ou gradiente na fronteira. Em um compósito reforçado com fibras, por exemplo, pode-se dizer que existem três fases: a superfície da fibra, a interface fibra/matriz e a matriz (Yosomiya, 1989). As características da interface dependem da união na interface, da configuração, da estrutura ao redor da interface e das propriedades físicas e químicas dos constituintes. Como

resultado, a interface tem uma forte influência na propriedade do compósito (Yosomiya, 1989).

Em geral as ligações na interface são descritas em termos de forças intermoleculares e energia livre na superfície. Na prática, os fatores que influem na interação interfacial são: (1) umidade, (2) reação química, (3) adsorção e difusão, (4) camada de tensão residual, (5) morfologia da superfície e (6) efeito da rugosidade (Yosomiya, 1989).

Os materiais compósitos são usualmente classificados pela natureza dos materiais que os compõem e estão divididos em duas grandes categorias: materiais compósitos naturais e sintéticos, conforme mostrado na tabela 2.1. Dentre os materiais compósitos sintéticos, existem ainda uma subdivisão que os classifica em microcompósitos e macrocompósitos.

Tabela 2.1 - Classificação dos materiais compósitos segundo a natureza dos constituintes, (Hull, 1988).

NATUREZA DOS MATERIAIS		EXEMPLOS
Materiais Compósitos	Naturais	- Madeira; - Ossos - Músculos;
	Sintéticos	
	Microcompósitos	- Plástico reforçado;
	Macrocompósitos	- Concreto Armado;

Hull (1988) faz uma abordagem quanto aos materiais compósitos microcompósitos, tomando como base o tamanho, forma e distribuição das duas ou mais fases. Contudo, a exemplo deste material (plástico reforçado) temos a combinação da alta resistência aliada à grande flexibilidade, na qual se pode ressaltar a alta resistência da fibra ao ser utilizada numa matriz de baixa rigidez, onde as fibras estão alinhadas na direção do carregamento.

Foi citado ainda que com o conhecimento básico do comportamento dos materiais de reforço dos compósitos é possível superar alguns problemas que influenciam no desenvolvimento destes materiais, tais como:

- a quebra da fibra quando utilizada em matrizes termoplásticas;

- a variação das propriedades devido à umidade e variação da temperatura;
- o volume ideal de fibras para a fabricação do produto;
- o projeto do produto para que o mesmo tenha a capacidade de absorver energia;
- o desenvolvimento de materiais com resistência à tração e a corrosão;
- a resistência ao desgaste, entre outros.

Dentro da classe dos materiais microcompósitos, os que mais se destacam com relação ao grande número de aplicações estruturais, são os compósitos fibrosos a base de matriz polimérica. Na tabela 2.2. ilustra-se alguns exemplos desse tipo de material.

Tabela 2.2 - Classificação dos materiais compósitos sintéticos microcompósitos, quanto à natureza da matriz (Antequera et al., 1991).

CLASSIFICAÇÃO	TIPOS DE MATRIZES	TIPOS DE REFORÇOS
- Materiais compósitos de matriz polimérica.	Termoplásticas	Fibras de vidro;
	Termofixas	Fibras de carbono;
		Fibras de aramida;
		Fibras de boro;
		Fibras vegetais;

Já segundo Hull (1988), a mais relevante classificação dos materiais compósitos é quanto ao tamanho, forma e distribuição dos reforços como mostrado na tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Classificação dos materiais compósitos sintéticos microcompósitos, quanto à forma, ao tamanho e distribuição dos reforços (Hull, 1988).

FORMA	TAMANHO	DISTRIBUIÇÃO
Fibras imersas em matrizes	Continua	Alinhada
	Curta	Aleatória
Particulados imersos em matrizes	Indefinido	Aleatória
Estrutura laminar	Indefinido	Ordenada
		Aleatória
Multicomponentes (híbridos)	Indefinido	Ordenada
		Aleatória

2.2.1 - Materiais compósitos fibrosos

Materiais compósitos com reforços de fibras consistem normalmente de fibras de alto módulo de elasticidade e resistência mecânica, envolvida na matriz com interfaces distintas entre elas. Desta forma, tanto as fibras quanto a matriz, conservam suas identidades químicas e físicas e ainda produzem uma combinação de propriedades que não podem ser obtidas com um dos constituintes isolado. Em geral, as fibras responsabilizam por melhorar a resistência mecânica do material, enquanto a matriz é responsável por mantê-las na posição e direção desejada, agindo como um meio transportador de carga e protegendo as fibras de danos ambientais decorrentes, por exemplos, de altas temperaturas e umidade (Matthews, 1994).

Para a aplicação em materiais compósitos pode-se utilizar fibras longas ou curtas, distribuída de modo aleatório ou orientadas, podem ser utilizadas de modo disperso ou na forma de mantas (com fibras curtas ou longas) e em tecidos. As fibras também podem se apresentar na forma de construção tridimensional; construção cilíndrica tridimensional e construção interlock (pré-formas) (Chou et al., 1986; Bannister, 2001; Tsai et al., 2000), conforme ilustrado nas figuras 2.1 e 2.2.

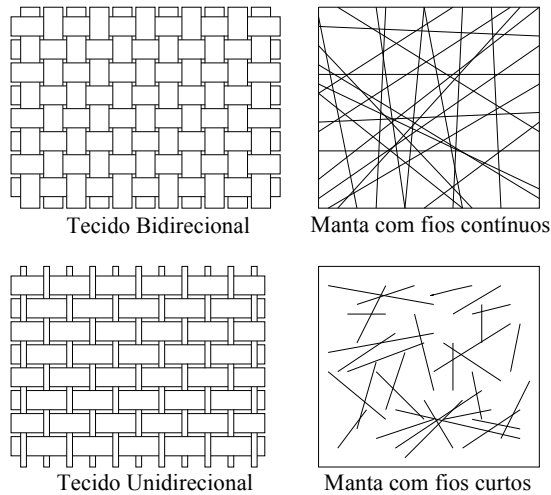


Figura 2.1 - Formas possíveis de utilização de fibras na fabricação de materiais compostos (Chou et al., 1986).

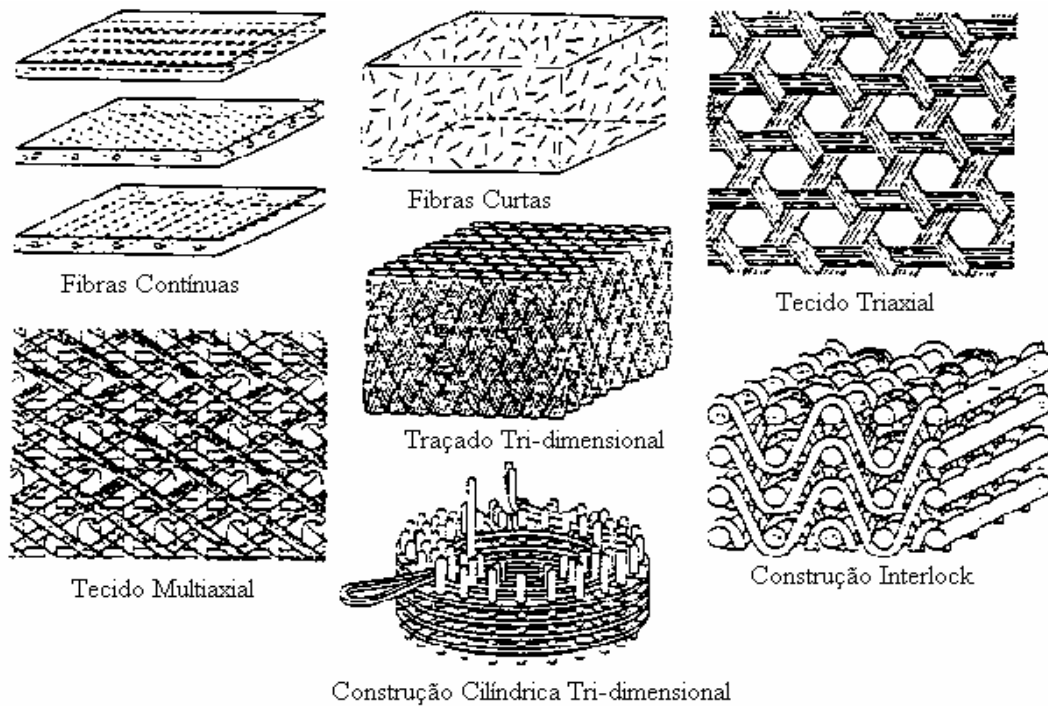


Figura 2.2 - Possíveis formas de utilização de fibras na fabricação de materiais compostos (Chou et al., 1986).

Atualmente as fibras sintéticas mais utilizadas como reforço em compostos poliméricos são as fibras de vidro, de carbono, de kevlar e de boro. As fibras de vidro se destacam devido as suas excelentes propriedades físicas e mecânicas aliadas a um baixo custo. Ressalta-se, também, um crescimento acentuado da utilização das fibras naturais (a maioria de

origem vegetal), principalmente em aplicações estruturais de pequeno e médio desempenho (Silva et al., 2000).

Um reforço fibroso é caracterizado por possuir comprimento muito maior que a sua dimensão na secção transversal. Entretanto, a relação entre o comprimento e o diâmetro, conhecida como razão de aspecto (L/d), pode variar consideravelmente. Quando a meta principal é o aumento da resistência, o reforço fibroso deve ter alta razão de aspecto de forma que a carga seja transferida através da interface. Por ser o responsável pelo transporte de carga, o reforço deve ser o componente mais forte e possuir módulo elástico maior que o da matriz (Matthews, 1994).

Compósitos de multicamadas correspondem a uma outra categoria de compósitos reforçados com fibras. Estes são classificados como laminados ou híbridos. Os compósitos são feitos por empilhamentos de camadas (também chamados placas, usualmente unidirecionais) em uma seqüência específica. Os híbridos usam mais de um tipo de fibra (Matthews, 1994).

Apesar do grande número de pesquisas que vêm sendo executadas visando ampliar o seu uso, as fibras vegetais ainda não se apresentam como uma escolha imediata para reforço de matrizes poliméricas.

2.2.2 - Materiais compósitos híbridos

O atual interesse nos compósitos com fibras naturais deve-se, principalmente, a crescente preocupação mundial com a preservação ambiental. Há um grande interesse na busca por fibras naturais que possam substituir adequadamente as fibras sintéticas como, por exemplo, a fibra de vidro.

Compósitos com fibras naturais têm potencial para aplicação em componentes sujeitos aos carregamentos leves ou moderados. Podem substituir polímeros ou mesmo compósitos com fibras de vidro em muitas situações. As principais aplicações estão: na construção civil, indústria de móveis, embalagens e no ramo automotivo. Portas e partes laterais de automóveis já são feitas com compósitos de fibras naturais e resina fenólica, poliéster ou polipropileno (Schuh e Gayer, 1996; Dahlke et al., 1998 e Suddell et al., 2002). As principais vantagens, neste caso, são as reduções de custo e peso dos veículos (Suddell et al., 2002).

As maiores limitações na utilização das fibras naturais estão no seu baixo desempenho mecânico e alta absorção de umidade (Joseph et al., 2002; Singleton et al., 2003; Dipa et al., 2002 e Espert et al., 2004). Uma alternativa promissora para minimizar ou mesmo resolver este problema é o processo de hibridização com a associação de fibras naturais e sintéticas. Estas últimas, em geral, são materiais relativamente inertes, imunes ao ataque biológico e com boa resistência a alguns agentes químicos e solventes (Twe e Liao, 2003; Twe et al., 2002; Kalaprasad e Kuruvilla, 1997). A fibra de vidro apresenta-se como uma boa alternativa para hibridização. Vários trabalhos reportam que a mesma tem um bom efeito de reforçamento quando associadas com as fibras de juta, sisal e coco (Mohan e Kishore, 1985; Clark e Ansell, 1986; Pavithan Apud Oliveira, 2005).

Além disso, quando as fibras naturais são substituídas pelas fibras de vidro a absorção de umidade decresce e em conseqüência umidade influência de modo menos significativo as propriedades mecânicas (Bledzik e Gassan, 1999). As fibras de vidro, impermeáveis, podem atuar como “barreira” minimizando o contato das fibras vegetais, hidrofílicas, com a água.

Os materiais compósitos híbridos apresentam na sua estrutura, combinações de vários tipos de reforços, combinando fibras e partículas no mesmo material ou ainda combinando mais de um tipo de fibra ou de partícula no mesmo material.

Aplicações dos materiais compósitos reforçados

Os principais tipos de aplicações de compósitos são (Saint Gobain Industries, 2006):

- Indústria aeroespacial - estabilidade é um importante critério para todos os materiais usados na indústria aeroespacial. Materiais compósitos combinam baixo peso com a habilidade de suportar grandes carregamentos e proporciona uma excelente resistência a impulsos e impactos. As principais aplicações nesta área são: compartimentos de bagagens, banheiros de aviões e hélices de helicópteros;
- Resistência à corrosão e aplicações industriais – há um grande número para o uso de materiais compósitos no mercado baseado na resistência à corrosão. Ao contrário de outros materiais, compósitos são ideais para ambientes corrosivos e hostis. Aplicações neste Mercado incluem todos os tipos de tubulações: oleodutos,

tanques subterrâneos de petróleo, hastes de sucção, água, tubulações de drenagem e irrigação (água potável, sistemas de drenagem de tempestades), controle de inundação e estruturas de navegação em canais (portas de represas, dutos), estrutura de produção de energia para óleo e produção de gás (plataformas marítimas, dutos) dentre outros equipamentos.

- Indústria naval – materiais compósitos podem ser usados em uma grande variedade de aplicações no mercado naval, incluindo os materiais usados na construção, manutenção, reparos e na equipagem de barcos de corrida, barcos à vela entre outros. Os materiais compósitos proporcionam grandes benefícios às aplicações no ramo naval, bem como: alta resistência, peso reduzido, resistência à corrosão, estabilidade dimensional, e flexibilidade no desenvolvimento de projetos.
- Automotiva – na área automotiva os materiais compósitos podem ser usados em inúmeras aplicações, tais como: painéis exteriores de portas, radiadores, componentes de ignição, capôs, coletores de admissão construção de bugue e veículos de corrida como os carros de fórmula, por exemplo. Os benefícios do uso de compósitos incluem maior eficiência no consumo de combustível, resistência à corrosão, baixo peso e alta resistência. Materiais compósitos representam um baixo custo na produção de peças e acessórios. Atualmente os acessórios de tuning tem sido uma aplicação em ascensão no ramo automotivo devido à grande flexibilidade de forma proporcionada pelos materiais compósitos, pára-choques, saias, esportivos, aerofólios, acessórios de interiores entre outros tem sido fabricados;
- Construção civil – aplicações em construção e infra-estrutura é sempre um sinal de que a indústria de compósitos está indo bem. Aplicações em banheiros, suportes de lâmpadas painéis decorativos, cortinas, etc. Materiais compósitos são ideais para o uso em construções por possuírem estabilidade dimensional, alta resistência, peso reduzido, resistência ao impacto, baixa inflamabilidade (dependendo da escolha da resina utilizada), baixa manutenção e flexibilidade em projetos. Das paredes exteriores e telhados, para o interior, há uma numerosa aplicação em compósitos visíveis ou não, Utilizados em construções de escolas, industriais, e agrícolas, escritórios, estádios, aeroportos, entre outros;

- Infra-estrutura – nas reformas e criação de estruturas os materiais compósitos destacam-se com um grande número de benefícios para várias aplicações:
 - Em construções de pontes, proporcionam uma alta capacidade de carregamento com material de baixo peso. Eliminam o custo com equipamentos pesados e o tempo de construção é diminuído. Compósitos apresentam alta durabilidade; eles não são atacados pela corrosão como o aço ou deterioram como madeira, o custo de manutenção e restauração é reduzido.
 - Reforço em produtos de concreto (postes, barras de reforços, vigas...);
 - Restauração de estruturas (Pontes, vigas, tubulações realizadas no local);
 - Segurança de rodovias (sinalizações, postes e suportes, barreiras de ruído);
 - Reforços de pavimentos.

- Elétrica e eletrônica - aplicações de materiais compósitos em elétrica e eletrônica incluem caixas de junção (compósitos dielétricos), placas de componentes, maletas de computadores, copiadoras e fax.

- Esporte e lazer - os materiais compósitos podem ser encontrados em produtos de recreação e em artigos esportivos. Estes produtos incluem esquis para água e neve, pranchas para a prática esportiva, caiaques, tacos de golfe, varas de pescar, piscinas e raquetes de tênis, por exemplo.

Aplicações dos materiais compósitos reforçados com fibras vegetais

Os compósitos reforçados com fibras sintéticas têm larga aplicação em diversos setores industriais, como embalagens, construção civil, automotiva, etc. Muitos desses materiais, no final de sua vida útil são dispostos em aterros ou lixões, e mesmo incinerados, representando uma forma de poluição por sua combustão incompleta, armazenamento inadequado, constituindo-se num grave problema ambiental. A substituição das fibras sintéticas por fibras naturais, tem alguns aspectos positivos, como, exemplo pode-se citar sua biodegradabilidade,

degradação ao fogo; apresentam ainda características interessantes como durabilidade, resistência e estabilidade (Joly et al., 1996).

Algumas aplicações das fibras naturais podem ser relacionadas conforme se mostra abaixo:

- Têxteis geológicos – mantas flexíveis de fibras de caule ou folhas, com um entrelaçamento físico das fibras através de cardagem e agulhamento. Essas mantas podem ser de qualquer densidade. Essas mantas são aplicadas em encostas, como liberadoras lentas de fertilizantes e/ou defensivos, ou como substrato para sementes. Podem ainda melhorar o desempenho estrutural de solo (English, 1994). Podem ser usadas mesmo como contra piso em estradas para manter a separação entre duas camadas de diferentes materiais;
- Filtros – podem ser usados como elementos filtrantes de ar, na remoção de particulados ou mesmo como substratos para reação entre elementos químicos adicionado às mantas e químicos que se objetiva remover do ar;
- Absorvente – uso de fibras lignocelulósicas para remover metais pesados, agrotóxicos, corantes, traços de elementos químicos, para purificação de solventes e retirado óleo de água pluviais em cidades e rodovias. É relatado que o “kenaf” absorve seletivamente o óleo em oceanos (Rowell, 1994);
- Compósitos estruturais – compósito desenvolvido para receber carga, como sustentação de janelas, paredes, teto e escadas. Nesse caso pode-se fazer uso, por exemplo, de compensados, chapas de partículas e compósitos à base de polietileno e fibras vegetais extrudados na forma de perfis diversos;
- Compósitos não-estruturais – materiais não sujeitos a cargas, portanto sem necessidades de se basear em códigos e/ou normas de construção, sendo, portanto mais baratos;
- Produto moldado – segue o mesmo processo de construção das mantas geológicas, com a adição de uma resina termofixa que mantém a forma do material. Esta configuração tem aplicações diversas, principalmente embalagens, e usos estruturais e não-estruturais;

- Embalagens – “containeres” de fibras vegetais para frutas e verduras, assim como sacos de produtos agrícolas. Podem ser de uso único, sofrerem um colapso em sua estrutura para reduzir o volume no transporte e retornarem à forma anterior para re-processamento e/ou reciclagem;
- Combinação com outros recursos – mistura de fibras vegetais com outros materiais como fibra de vidro, metais, plásticos e outros materiais sintéticos (Rowell, 1994).

As vantagens do uso de fibras naturais sobre as sintéticas tradicionais como reforços em compósitos são: propriedade de resistência específica aceitável, baixo custo, baixa densidade, boa tenacidade, boa propriedade de isolante térmico, e uso reduzido de instrumentos para tratamento ou processamento da mesma (Mano 1991).

2.2.3 - Matrizes poliméricas

A matriz nos materiais compósitos tem por finalidades básicas atuar como um meio de transferência de carga para os reforços através do cisalhamento e proteger o reforço da abrasão mútua, danos e meios de degradação (Correia, 1988).

Como já mencionado, as matrizes se classificam em: orgânicas (poliméricas), metálicas e cerâmicas. As matrizes poliméricas são as mais utilizadas devido à versatilidade de formulação e baixo custo de processamento, quando comparadas com outras matrizes (Vincenzine, 1995).

Comumente as matrizes poliméricas são classificadas de acordo com os métodos de preparação da estrutura química e do comportamento mecânico.

Quanto ao método de preparação da estrutura química, os polímeros podem ser classificados em etapas. As reações de polimerização podem gerar diferentes tipos de cadeias poliméricas, que são classificadas como:

- I – Cadeia linear sem ramificações;
- II – Cadeia linear com ramificações;
- III – Cadeia com ligações cruzadas, tridimensionais ou reticuladas.

As variações estruturais implicam diretamente nas propriedades físico-químicas dos polímeros, principalmente no que se refere à solubilidade e fusão. As matrizes poliméricas, de acordo com as características de fusão, podem ser classificadas em termoplásticas ou termofixas. Esta classificação está relacionada com o comportamento a diferentes temperaturas dessas matrizes, o que por sua vez está relacionado às estruturas químicas das mesmas (Vincenzine, 1995).

Em função das características estruturais dos termoplásticos e dos termofixos podem-se explicar algumas propriedades como a possibilidade de reciclagem dos termoplásticos e a baixa resistência ao impacto dos termofixos, quando na ausência de um agente de reforço (Vincenzine, 1995).

Matrizes termofixas

As matrizes termofixas são materiais poliméricos, cuja polimerização leva a uma estrutura tridimensional. Ocorrem várias ligações químicas covalentes entre diferentes cadeias, de modo que não é mais possível ocorrer um escorregamento entre as moléculas. O mecanismo de cura processa-se através de combinações químicas com agentes de cura, pela ação de catalisadores ou oxigênio do ar. Um ciclo ótimo de cura para qualquer processo é determinado empiricamente. Entre as variáveis a serem consideradas incluem-se o tipo e a concentração de agentes de cura, acelerador ou catalisador, tempo e temperatura, cura única ou com pós cura e a interação destes fatores. Normalmente a propriedade de cada resina é otimizada independentemente e a prática usual é estabelecer condições que resultem numa combinação de propriedades desejada.

As resinas termofixas isotrópicas, quando curadas, não podem mais ser fundidas ou dissolvidas. Portanto, elas perdem suas propriedades elásticas quando aquecidas na temperatura de distorção, tornando-a limitada para uso de componentes estruturais; porém, tem melhor estabilidade dimensional, resistência ao calor; resistência química e elétrica do que as resinas termoplásticas.

Geralmente a cura das resinas termofixas ocorre à temperatura ambiente, porém pode ocorrer sob temperatura e tempo controlados, tentando desta forma obter propriedades ótimas.

O processo de cura dos materiais compósitos à base de matrizes termofixas é exotérmico e devido às variações de temperatura envolvidas e nos diferentes coeficientes de expansão térmica entre a matriz e o reforço, surgem tensões residuais no material. Estas tensões, também conhecidas como “tensões de cura”, costumam favorecer o aparecimento de microtrincas quando da sollicitação de cargas externas (Correia, 1988) e (Hull, 1988).

Resina de poliéster

Poliéster é o nome dado a uma categoria de materiais obtidos por meio de uma reação de condensação entre um poliálcool e um ácido policarboxílico. São polímeros sintéticos versáteis, sendo encontrados comercialmente como fibras, plásticos, filmes e resinas. Dependendo de sua formulação, ausência ou presença de duplas ligações entre os átomos de carbono (insaturações) que formam sua cadeia molecular, os mesmos podem ser classificados em saturados e insaturados. Os poliésteres saturados geram polímeros termoplásticos enquanto os insaturados sofrem reações de cura e geram resinas termofixas.

Os poliésteres insaturados são usados industrialmente em combinações com reforços fibrosos, como vidro, amianto, etc. Em termos técnicos e econômicos, os melhores resultados para as aplicações de engenharia são obtidos quando combinado com fibras de vidro, etc.

As resinas de poliéster possuem uma gama de propriedades, caracterizando-a como a mais polivalente entre todas as resinas termofixas, quanto as suas aplicações. Algumas dessas propriedades podem ser ressaltadas:

- Excelente estabilidade dimensional;
- Excelente resistência a ambientes quimicamente agressivos;
- ótimas propriedades elétricas, isolante;
- Fácil pigmentação;
- Não liberação de materiais voláteis durante a cura (sem estireno);
- Cura a frio;
- Permite a utilização de moldes simples e baratos;
- Fácil modificação para aplicações especiais.

O principal tipo de resina de poliéster é a ortoftálica, que é a mais comum, usada para aplicações gerais que não exigem alta inércia química. (Antequera et al., 1991) e (carvalho, 1992):

2.2.4 - Reforços fibrosos

Os compósitos podem ser reforçados com fibras embutidas na matriz. Dessa forma, ambas, fibras e matriz, conservam suas identidades química e física e, ainda, produzem uma combinação de propriedades que não podem ser conseguidas com um dos constituintes agindo sozinho. Em geral, as fibras são os principais membros de transporte de cargas, enquanto a matriz as mantém na localização e direção desejada, agindo como um transportador médio de carga e protegendo as fibras de danos ambientais, por exemplo, a altas temperaturas e umidade (Mallick, 1988).

As propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos reforçados com fibras dependem de vários fatores, sendo os principais: módulo e resistência da fibra, estabilidade química da resina, resistência interfacial, diâmetro e comprimento das fibras, fração volumétrica e forma de distribuição das fibras na matriz. Nos compósitos com fibras descontínuas com distribuição aleatória o comprimento e a fração volumétrica são parâmetros importantes no seu desempenho (Joseph, 1996).

A eficiência de um compósito também depende da transferência de carga entre a matriz e a fibra. Isto pode ser maximizado intensificando-se a interação e adesão entre as duas fases e também pela maximização do comprimento da fibra no compósito. O uso de filamentos pode resultar em uma melhor distribuição. Entretanto, fibras longas algumas vezes causam o aumento na quantidade de agrupamentos, que resultam em áreas com alta concentração de fibras e áreas com excesso de matriz, o que reduz a eficiência do compósito. A dispersão das fibras na matriz é fator fundamental no desempenho do compósito. A mistura de fibra polar e higroscópica com uma matriz não polar e hidrofóbica pode resultar em dificuldades na dispersão, resultando em agrupamentos de fibras que impossibilitam a produção de compósitos com boas propriedades (Rowell, 1997).

A descontinuidade da fibra natural, quando usada como reforço, exerce uma forte influência na resistência à tração e na tenacidade dos compósitos. Fatores como comprimento e orientação das fibras são determinantes na melhoria das propriedades dos mesmos. Um exemplo é a resistência à tração de compósitos com fibras descontinuas que é menor, quando comparado a compósitos com fibras contínuas (Zarate, 2000).

Para que o compósito se beneficie do nível máximo de resistência da fibra, o comprimento da fibra (L_f) deve ser igual ou maior do que seu comprimento crítico (L_c), definido como o comprimento mínimo de fibra requerido para obter a maior resistência à fratura do compósito (Zarate, 2000).

2.2.4.1 - Fibras de vidro

As fibras de vidro ocupam posição de grande importância na indústria de plásticos, que as consideram como um dos principais agentes de reforço empregados para obtenção de materiais compósitos. Comercializados para esta finalidade desde a década de 40, as fibras de vidro têm permitido o uso crescente dos plásticos reforçados em aplicações antes reservados exclusivamente aos metais e suas ligas (Aquino e Carvalho, 1992).

Segundo Aquino e Carvalho (1992), as principais características das fibras de vidro, que as tornam tão atraentes proporcionando vantagens significativas são:

- Quando modelado o compósito, a fibra apresenta excelente aderência em relação à matriz;
- Material com baixo custo de aquisição;
- Boa trabalhabilidade o que facilita o seu processamento;
- Alta resistência à tração – comparada com outras fibras têxteis, sua resistência à tração específica (por densidade) é superior a maioria delas.
- Resistência ao calor e ao fogo – devido sua origem inorgânica (mineral), as fibras de vidro são incombustíveis. Por seu alto ponto de fusão, estas são indicadas para aplicações em meios com temperatura elevada.

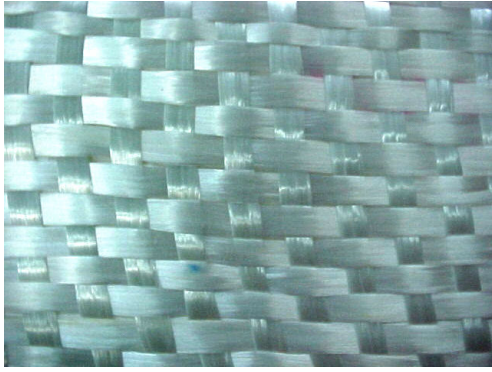
- Resistência química elevada – não sofre nenhum tipo de ataque ou degradação por parte dos agentes químicos.
- Resistência à umidade – as fibras de vidro não absorvem umidade, portanto não se dilatam ou desintegram além de manter em sua máxima resistência mecânica na presença de umidade.
- Resistência térmica – estas fibras apresentam um coeficiente de dilatação linear térmico muito baixo e um baixo coeficiente de condutividade térmica, a que garante um excelente desempenho em ambientes com variações térmicas bruscas.
- Resistência elétrica – por não serem condutoras, as fibras de vidro são ideais para serem usadas como isolantes elétricos.

A composição do vidro é um fator determinante nas propriedades das fibras de vidro. A fibra de vidro-E representa mais de 90% dos reforços nos materiais compósitos de uso geral. Possuem baixo teor de álcali e excelentes propriedades elétricas, isolantes, além de boas propriedades de resistência, rigidez e desgaste.

As fibras de vidro são comercializadas nas mais diferentes formas, com destaque para:

- Tecidos – são constituídos a partir de mechas de fios (roving) de títulos iguais ou diferentes em trama e urdume. Comercialmente são encontradas em dois tipos:
 - Tecidos unidirecionais – onde o número de fios é predominantemente mais elevado em um sentido e os fios estão dispostos em paralelo e unidos entre si, por fios de dimensões muito pequenas, permitindo a obtenção de elevadas propriedades mecânicas na direção das fibras;
 - Tecidos bidirecionais – os fios estão dispostos a 90° uns sobre os outros, na forma de trama e urdume.
- Mantas – são constituídos a partir de fibras curtas de aproximadamente 5 cm. As fibras estão dispostas de forma aleatória em várias camadas ao longo do tecido.

Na figura 2.3 ilustra-se as formas mais comuns de comercialização da fibra de vidro-E nos plásticos reforçados em geral.



(a)



(b)

Figura 2.3 - (a): Tecido bidirecional de fibras de vidro; (b): Manta de fibras de vidro (Aquino Carvalho, 1992).

2.2.4.2 - Fibras naturais e vegetais

As fibras naturais são de origem orgânica, nesta classe, estão inclusas as de origem vegetal, tais como, a juta, coco, algodão e o sisal entre outras. São matérias-primas muito importantes para a indústria em geral, e também muito usadas na fabricação de artigos artesanais, como é o caso do Agave sisalana.

As fibras vegetais são classificadas de acordo com a sua origem nas plantas e podem ser agrupadas em:

- Fibras de caule - ou das partes internas das cascas, em feixe, também chamadas fibras duras para uso têxtil;
- Fibras de folha - que correm no sentido do comprimento das folhas de monocotiledôneas, também referidas como fibras duras;
- Fibras de semente - principalmente o algodão, constituindo as principais fontes de fibras vegetais;
- Fibras de fruto - entre as quais, a de coco.

Existem cerca de 250.000 espécies de plantas superiores, mas menos de 0,1% são comercialmente importantes como fontes de fibras (Young, 1994). Na tabela 2.4 apresenta-se uma classificação mais detalhada dessas fibras.

Tabela 2.4 - Principais fontes de fibras vegetais (Young, 1994).

Parte do Vegetal	Caule	Folhas	Sementes	Frutos	Lenhosas (madeira)
Espécie	Linho	Sisal	Algodão	Coco	Pinheiro
	Juta	Rami	Kapoc	Paina	Eucalipto
	Cânhamo	Curauá			
	Kenaf	Bananeira			
	Bagaço de cana	Abacaxi			
		Curauá			

Fisicamente as fibras vegetais são compostas de várias fibrilas, microfibrilas em matrizes de lamelas e lamelas médias. O mecanismo de ligação das fibras é, portanto, mecânico e químico, unido pelo material ligante da planta. As fibras são constituídas por um número de células que apresentam um tubo de polígonos irregulares com cavidades centrais ocas, cujo espaço é ocupado por um protoplasma celular denominado lúmen. Estas células representam a última divisão da fibra, repousando lado a lado e sobrepostas (Hummerfard e Rebemfield, apud Oliveira, 2005).

Como desvantagens, há inicialmente a baixa temperatura de processamento devido à possibilidade de degradação e/ou emissões voláteis a temperaturas mais elevadas, que podem afetar as propriedades do compósito. A temperatura de processamento é limitada a aproximadamente 200°C embora seja possível usar maiores temperaturas por curtos períodos. No caso de compósitos com resinas termofixas essa característica não é limitante, uma vez que a cura das resinas ocorre, geralmente, em temperaturas inferiores. Uma segunda desvantagem é a alta absorção de umidade que pode causar o inchaço das fibras e influir na estabilidade dimensional do compósito.

A deterioração das fibras surge como resultado da perda de aderência química ou mecânica, ou seja, pela quebra das ligações de hidrogênio das moléculas celulares, deterioração das microfibrilas e/ou fibrilas da fibro-célula. A deterioração das fibras pode surgir também da deterioração das lamelas e/ou lamelas médias, (Toledo, 1993). A longa exposição das fibras vegetal a ambientes úmidos leva à sua decomposição biológica. Isso surge como resultado da desintegração gradual das lamelas, conduzindo à separação das

paredes das células. A maioria dos ambientes agressivos conduz ao mecanismo de ataque químico. Eles causam deterioração da fibra atacando quimicamente as microfibrilas e/ou lamelas coloidais. Se forem as microfibrilas que são afetadas, isso implica em ataque químico direto nas moléculas de celulose de que elas são feitas. Se forem os colóides que são atacados, isto implica em ataque químico na lignina, pectina, hemicelulose e outros, (Toledo, 1993).

Quanto à composição química, as fibras vegetais são constituídas essencialmente por celulose e lignina, associada a outros materiais em pequenas quantidades.

A composição química das principais fibras comerciais é apresentada na tabela 2.5, que mostra o algodão como a mais pura das fibras com mais de 90% de celulose, enquanto as demais possuem de 70-75% de celulose, dependendo do método de processamento. O “kenaf”, a fibra de coco, a juta contêm altos níveis de lignina, o que contribui para a sua pouca maleabilidade e aspereza. Outro fator importante é a presença de extrativos, pectina, hemicelulose e lignina em quantidade variável, que influenciam bastante nas propriedades finais das fibras (Young, 1994).

Na tabela 2.5 apresentam-se as composições de algumas fibras vegetais. Estes valores são considerados típicos, apesar das variações existentes, em função da origem das fibras e/ou tratamentos a que as mesmas são submetidas.

Tabela 2.5 - Composição química de algumas fibras vegetais (Young, 1994).

Fibras	Celulose (%)	Hemi-celulose (%)	Pectina (%)	Lignina (%)	Extrativos (%)	Graxas e Pó (%)	‘Outros (%)
Algodão	91,80	6,30	-	-	1,10	0,70	0,10
Juta	71,50	13,30	0,20	13,10	1,20	0,60	0,10
Linho	71,20	18,50	2,00	2,20	4,30	1,60	0,20
Sisal	73,10	13,30	0,90	11,00	1,30	0,30	0,10
Rami	68,6	13,1	1,9	0,6	-	0,3	5,5
Coco	36 - 43	0,15 – 0,25	3 - 4	41 - 45	-	-	-
Kenaf	31 - 39	21,5	-	15 - 19	-	-	-

A seguir, um descritivo dos principais componentes de fibras vegetais:

- Celulose: é a mais abundante substância polimérica natural, existindo em maior proporção nas plantas, sua estrutura elementar é a anidrido-D-glicose consistindo de uma cadeia linear de no mínimo 10 mil unidades iguais de celobiose. O grau de polimerização da celulose depende da sua origem e particularmente do método usado na sua separação e purificação. Contudo, existem forças intermoleculares provenientes de pontes de hidrogênio, formadas pelos grupos hidroxilas, resultando em uma estrutura cristalina inerte em solventes comuns, podendo ser dissolvida através de sistemas complexos de soluções aquosas do tipo metal-complexo ou em ácidos minerais concentrados (Mendes, 1992).
- Hemicelulose: é o termo genérico dado aos polissacarídeos das fibras vegetais. São polímeros de glicose, maltose, xilose, galactose e outras hexoses e pentoses, cujo grau de polimerização é inferior ao da celulose. O termo hemicelulose (ou polioses) refere-se a uma mistura de polissacarídeos de cadeia ramificada e baixa massa molecular (cerca de 200 unidades), os quais são intimamente associados com a celulose nos tecidos das plantas. Enquanto a celulose, como substância química, contém exclusivamente a D-glucose (glicose) como unidade fundamental, as polioses são polímeros em cuja composição pode apresentar condensado em proporções variadas de unidades de açúcar, como: β -D-xilose, β -D-manose, β -D-glucose, α -L-galactose, ácido β -D-glucurônico, ácido β -D-galactourônico, ácido α -D-4-O-metilglucurônico (Fengel, 1989). Nas plantas, as polioses são responsáveis pela flexibilidade das mesmas e atuam como agente de ligação entre a celulose e a lignina (Fengel, 1989).
- Pectina: é encontrada em todos os vegetais superiores, sendo um termo genérico usado para grupos de polissacarídeos, caracterizado pelo alto conteúdo de ácido úrico e presença de grupos metil-éster.
- Lignina: é uma substância polimérica amorfa que é encontrada nos tecidos de todas as plantas, com exceção do algodão. É quase impossível separar a lignina das fibras detendo a alteração ou degradação de sua estrutura. Como resultado, sua exata

estrutura é desconhecida. Admite-se a lignina como um polímero de fenil-propano com uma variedade de grupos funcionais. A lignina, após a celulose é o material orgânico de origem vegetal mais abundante que atua como um cimento nas plantas fornecendo rigidez e dureza às mesmas (Fengel, 1989). A lignina é encontrada em muitas plantas do reino vegetal, porém, sua constituição não é a mesma em todas elas. Portanto, a lignina não deve ser considerada como uma substância química única, mas sim como uma classe de materiais correlatos (Fengel, 1989), podendo ser dividida em duas classes: ligninas guaiacila e lignina guaiacila-siringila. Ligninas guaiacila contêm principalmente unidades guaiacila, enquanto ligninas guaiacila-siringila contêm quantidades aproximadamente iguais de unidades guaiacila e siringila. Os dois tipos de lignina contêm, ainda, proporções menores de unidades *p*-hidroxifenila (Paiva, 1999).

- Extrativo vegetal: são substâncias que podem ser extraídas por solventes consistindo em mono e dissacarídeos, graxas, gorduras, e ésteres ácidos de alta massa molecular.

O processamento para separação dessas fibras pode se dar através do apodrecimento controlado, por enzimas ou bactérias (bioquímicos e/ou biológico), que agem na pectina do caule ou da folha. Outros métodos de apodrecimento fazem uso de orvalho, sol, fungos, água. Métodos físicos e químicos geralmente utilizam hidróxido de sódio, carbonato de sódio, detergentes ou ácidos minerais. As alternativas químicas são as mais caras e não produzem fibras de melhor qualidade. (Young, 1994).

Na seleção das fibras para aplicações industriais faz-se necessário o conhecimento de sua composição e estrutura, como também, das características chave para o seu desempenho como: comprimento, resistência, cor, densidade entre outras. De um modo geral as fibras são higroscópicas e suas propriedades mecânicas são determinadas pelas características físicas, as quais sofrem influência do ambiente que foram produzidas, levando a diferentes resultados para um mesmo tipo de fibra. Conseqüentemente, nas análises mais acuradas, deve levar em consideração a procedência das amostras. (Himmerfard e Rebemfield apud Oliveira, 2005).

A alta resistência mecânica específica (com relação à densidade) e baixo custo dessas fibras, aliada à necessidade de busca de novas aplicações de recursos naturais, abundantes em

nosso país, tem atraído a atenção de pesquisadores de diversas áreas para o desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras naturais.

A avaliação dos estudos promovida pela European Commission Industrial Fiber Crops revela que o uso das fibras naturais como elemento de reforço na indústria de materiais compósitos tem se mostrado muito satisfatório, tendo em vista o aproveitamento de matérias-primas antes restritas somente ao setor têxtil (Science Research Development, 1994).

Fibra de curauá (*Ananás erectifolius*)

O curauá é uma monocotiledônea pertencente à família das bromélias, gênero *Ananás*, espécie *Ananás erectifolius*. Suas folhas são duras, eretas e possuem uma superfície plana (Caraschi, 1999). O curauá pode ser encontrado próximo aos rios Xingu, Tocantins, Tapajós, Marcuru, Trombetas, Paru, Acara e Guama, em áreas onde o índice pluviométrico é de 2000 mm/ano aproximadamente, que é o índice mínimo necessário para o cultivo da planta (Caraschi, 1999). Na figura 2.4 (a) e (b) mostram-se o cultivo e o processo de secagem das fibras de curauá na região norte do país.

A fibra de curauá vem despertando grande interesse pelo fato ser cultivada em uma área particularmente sensível quanto às questões ambientais, a Amazônia. Além de ser cultivada na Amazônia, podendo vir a representar uma grande alternativa a população local em substituição à exploração da floresta tropical, ainda pode ser cultivada em grande escala em reservas indígenas, tanto isoladamente ou consorciada com outras culturas como a mandioca, pois esses povos já possuem larga tradição de cultivo dessa cultura. Atualmente, a cultura do curauá está em vias de ser introduzida na região do vale do Ribeira, Sul de São Paulo (Ledo, 2005).

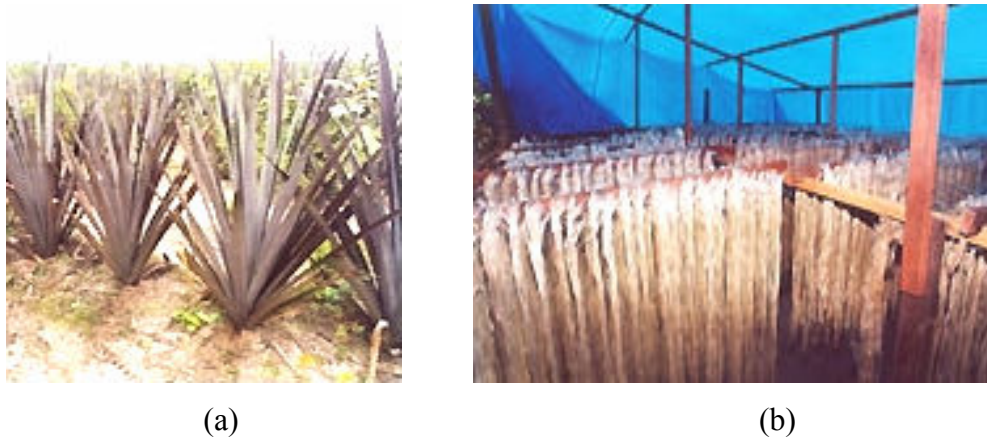


Figura 2.4 - (a) Cultivo da fibra de curauá; (b) Secagem da fibra de curauá (Revista Agro Amazônia, 2003).

Existem quatro tipos conhecidos de curauá: o branco, que possui folhas verde-claras, cujo broto possui uma coloração luminosa e várias fibras resistentes; a púrpura (roxo), que possui folha roxo-avermelhado com melhor desenvolvimento que o curauá branco, o vermelho e o branco brilhante. As fibras são especialmente indicadas para a fabricação de barbantes e cordas finas (Melo, 1981).

O curauá é uma planta rizomatosa, sem raiz pivotante e com sistema radicular fasciculado e superficial. O caule atinge no máximo 1,5 m de altura. As folhas são eretas, dispostas circuncentricamente, nas dimensões de 5 cm de largura, 0,5 cm de espessura e cerca de 1,5 m de comprimento; com bordos lisos, e exceto quando a planta está velha, sem espinhos. A frutificação normalmente ocorre na idade de um ano, exceto quando a planta é desfolhada, o que atrasa sua frutificação. Porém ao frutificar, a planta entra em sua senescência e morre. Entre as bainhas das folhas, ou diretamente dos rizomas, brotam rebentos (Ledo, 2005).

A primeira colheita é feita no primeiro ano da planta após o replantio, com outras colheitas econômicas, em números de três, a cada seis meses. A colheita rende 24 folhas por planta, cerca de 2 kg de fibra em média, o rendimento de fibra seca é de aproximadamente 6%, independente da variedade do curauá. A colheita é manual, através de puxões, geralmente às tardes, quando o sereno ajuda ao desfibramento das folhas (Ledo, 2005). O desfibramento é manual e consiste nas operações de desfibramento, propriamente dito, e de secagem, amaciamento e clarificação das fibras. O desfibramento consiste na eliminação da mucilagem (polpa) que envolve as folhas, e deve ser feito preferencialmente logo após a colheita. Ao

contrário da juta e da malva, a desfibrilação é somente mecânica, sem a presença de bactérias (Ledo, 2005).

No Brasil as fibras de curauá são produzidas principalmente no estado do Pará onde comunidades locais cultivam a fibra em consórcio com outras culturas, como mandioca, hortaliças e feijão. O governo do Pará vem incentivando a implantação de novos projetos por meio de mecanismos fiscais e financeiros. Em 2004, a Pematec Triangel, uma indústria de componentes automobilísticos, implantou em Santarém (Pará) uma unidade industrial para a produção de mantas agulhadas para fabricação do teto e tampa de bagageiro de veículos da Volkswagen. A fábrica utiliza também fibras de malva e juta para fabricar um tipo de carpete usado como forração e isolante térmico-acústico de automóveis e caminhões. A empresa projeta atingir, no final do próximo ano, a capacidade total da fábrica, que é de 4.800 toneladas por ano de mantas de fibra. Isso vai triplicar o número de pequenos produtores de curauá na região (www.pematec.com.br em 06/10/2007).

Após o desfibramento, as fibras são secas ao ar livre, por 2-3 dias, não devendo ser expostas a chuvas, pois isso provocaria a presença de fungos apodrecedores. A remoção total da mucilagem, através do atrito das folhas umas às outras, garante uma maior maciez das fibras (Ledo, 2005). Na figura 2.5 mostra-se uma fibra de curauá típica após limpeza.

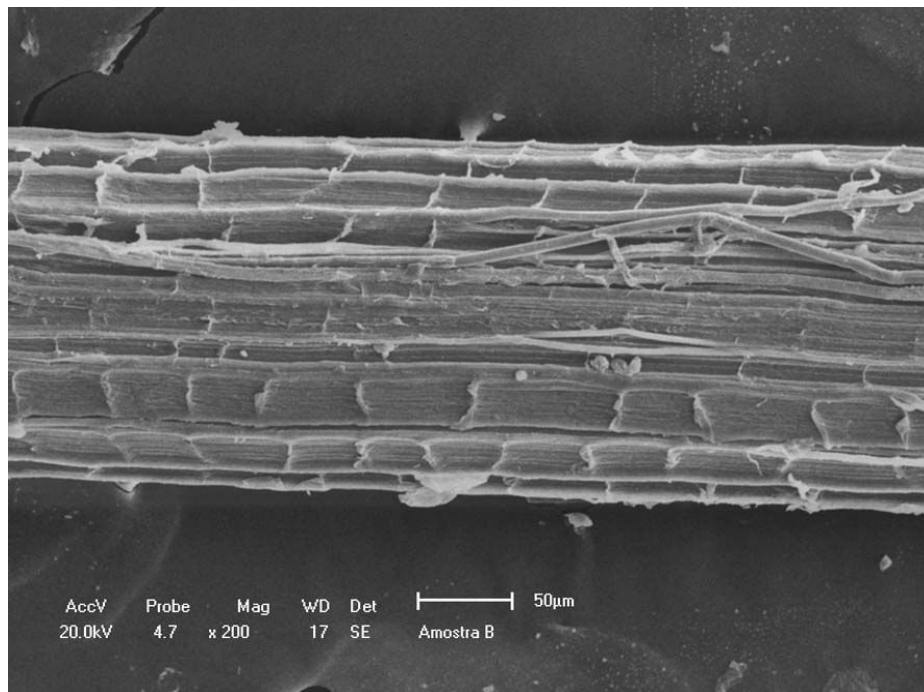


Figura 2.5 - Aspecto microscópico de uma fibra de curauá típica

O rendimento do curauá plantado isoladamente consiste em 5% de fibras secas por quilograma de folhas verdes, o que resulta em uma produção de 2,4 t/hc de fibras secas. Para o plantio consorciado como a mandioca, o rendimento cai para 1,6 t/hc. Todavia, com o desfibramento mecânico esse rendimento aumenta para 10% de fibras secas (Ledo, 2005). Uma outra característica do curauá é o seu alto teor de celulose, cerca de 79,82%, um pouco acima dos valores fornecidos na tabela 2.6. Esse valor foi fornecido pela empresa Toro Industria e Comércio Ltda., de Diadema, SP.

As propriedades físicas e mecânicas da fibra de curauá superam às das fibras de sisal, juta e coco, como pode ser visto na tabela 2.6, que apresenta as propriedades mecânicas das fibras mais utilizadas em compósitos poliméricos, incluindo a fibra de vidro para comparação. A composição química de algumas fibras vegetais é apresentada na tabela 2.7.

Tabela 2.6 - Composição química de fibra do curauá (Ledo, 2005).

CARACTERIZACAO	%
Umidade	7,92
Cinzas*	0,79
Solubilidade em NaOH 1%**	19,30
Solubilidade em água quente*	1,03
Solubilidade em ciclohexano/etanol *	0,48
Holocelulose*	91,80
Celulose*	70,70
Polioses**	21,10
Lignina Klason solúvel*	1,57
Lignina Klason insolúvel*	9,57
Lignina Klason total*	11,10
Grau de Cristalização*	75,60

* Determinação realizada em relação às fibras livres de umidade ** Determinado pela diferença entre holocelulose e celulose.

Tabela 2.7 – Propriedades mecânicas e características das fibras vegetais mais utilizadas em compósitos poliméricos (Leão e Caraschi 2001; Mohanty et al. 2000; Bledzik e Gassan 1999; Baley 1997).

Fibra	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)
Curauá	97	-	439 - 834	10,5 - 27,1	3,2 - 4,5
Juta	200	1,3	393 – 773	26,5	1,5 – 1,8
Sisal	50 - 300	1,45	511 – 635	9,4 – 22	3 - 7
Coco	100 - 450	1,15 – 1,45	131 - 175	4 – 13	15 - 40
Vidro-E	9-15	2,6	3400	73	3,5 - 4

2.2.5 - Processos de fabricação de compósitos poliméricos termofixos

A fabricação de um compósito polimérico termofixos, não importando o tipo de molde utilizado, é realizada em três etapas principais:

- Impregnação do reforço (fibras) pela resina (polímero);
- Adaptação do material compósito ao molde, obtendo-se, desse modo, à forma e dimensão desejada;
- Cura do material compósito (endurecimento da resina) e desmolde da peça final.

Estas etapas podem ser realizadas segundo diferentes procedimentos, cuja seleção se efetua em função de parâmetros como: forma, dimensão, propriedades características mecânicas desejadas, séries de fabricação.

Dentro da categoria de processos de fabricação com molde aberto pode-se citar a moldagem manual (hand lay-up), a moldagem à pistola (spray-up), a moldagem por centrifugação e a moldagem por enrolamento (filament winding).

2.2.5.1 - Processo de fabricação por moldagem manual (hand lay-up)

No processo de laminação manual, o reforço pode ser de fibras contínuas, curtas, mantas ou tecidos, que são colocados manualmente sobre o molde e impregnados com a resina previamente preparada. A resina, no estado líquido, é aplicada manualmente com rolos de

pintar ou pincéis. Durante cerca de 20 a 30 minutos a resina ainda permanece líquida. Esse intervalo de tempo é aproveitado para assentar as fibras nos molde e remover as bolhas de ar com roletes compactadores. A operação de roletagem também é feita manualmente (Carvalho, 1992).

É um processo simples com baixo custo de ferramentas e equipamentos, aplicável à produção de pequenas quantidades de peças e/ou peças de grande porte hand lay-up, possui o inconveniente de uma baixa produção, maior necessidade de mão de obra e bom acabamento em apenas uma das faces da peça.

2.2.6 – Propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras

É interessante para a indústria que seja feita uma previsão das propriedades mecânicas durante o projeto e a fabricação dos compósitos. Para tal, varias equações semi-empíricas são encontradas em literatura (Carvalho, 1992). Infelizmente, muitas vezes a complexidade dos processos de fabricação faz com que os resultados obtidos experimentalmente não coincidam com aqueles previstos.

Para melhorar o desempenho do compósito pode-se modificar a fibra ou a matriz. A modificação em uma matriz termofixa pode gerar aumento da resistência ao impacto, mas pode também aumentar a absorção de água ou, por outro lado tornar o material mais quebradiço. Já a modificação química das fibras de forma controlada, pode melhorar a adesão fibra-matriz. Enfim, faz-se necessário combinar, as propriedades da matriz e do reforço buscando um compósito de qualidade (Paiva et al., 1999).

Quase todo o desenvolvimento de compósitos, até os dias atuais, tem como principal objetivo à aplicação estrutural. Portanto, as propriedades mecânicas são as que despertaram maiores interesses. Dentre as propriedades de maior interesse, destaca-se o módulo de Elasticidade ou módulo de Young, que está diretamente relacionado com a rigidez do compósito (Hage, 1989).

O módulo de elasticidade depende diretamente da fração em volume de fibra e matriz. Como o módulo da fibra é normalmente superior ao da matriz, conforme se aumenta a fração de fibras espera-se um aumento no módulo do compósito. No entanto, outros fatores devem ser considerados, como o comprimento das fibras; fibras muito curtas terão poucos pontos de

contato com a matriz, podendo se desprender mais facilmente; já as fibras muito longas tornam mais difícil uma distribuição homogênea. A intensidade da adesão interfacial é também fator de extrema importância (Van, 1990; Hage, 1984 apud Paiva et al, 1999).

Quando as fibras de elevado módulo e resistência são embebidas numa matriz frágil (baixa resistência e módulo, comparados com a fibra), espera-se que a resistência do compósito seja devida, principalmente, a resistência das fibras. O módulo elástico será primeiramente controlado pelas fibras, mas também será afetado pela matriz, e a deformação de falha será determinada pelo módulo relativo da fibra e da matriz.

Um fator importante a ser destacado é o comprimento crítico no qual a fibra suporta a tensão máxima. Em geral, comprimentos inferiores a 1,0 cm falharão sem corresponder à resistência máxima da fibra (Hage, 1989).

2.2.7 – Compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro

A fibra de vidro é amplamente utilizada como um material de reforço por diversas razões (Callister, 1994):

- É facilmente misturada à matriz durante o processo de cura;
- Se adequa às várias técnicas de fabricação de compósitos;
- Quando adicionado a uma matriz plástica, produz um compósito com resistência específica muito elevada;
- Na interface fibra-matriz, para vários tipos de resina, reage quimicamente com a fibra de modo a melhorar a resistência do compósito.

As características superficiais das fibras de vidro são extremamente importantes porque mesmo pequenas falhas podem afetar as suas propriedades em tração. Falhas de superfície são introduzidas facilmente friccionando a superfície com um outro material duro. As fibras recém obtidas são normalmente revestidas, durante a fabricação, com um material que as protege de danos e interações indesejáveis, além de promover melhor interação entre a fibra e a matriz.

Um grande número de resinas pode ser utilizado como matrizes em compósitos com fibras de vidro, sendo as resinas poliésteres mais comuns. Alguns compósitos comerciais

reforçados com fibras de vidro utilizam uma matriz de nylon, gerando um material de extrema resistência e alta resistência ao impacto.

2.2.8 – Compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais

O objetivo de se produzir um compósito baseado em fibras naturais vegetais, consiste em se uniformizar suas características, e produzir um novo material no sentido técnico da palavra (Rowell, 1990).

As vantagens na utilização das fibras vegetais em compósitos poliméricos incluem: altas propriedades mecânicas específicas (com relação ao peso), baixo custo, baixa densidade, biodegradabilidade. As principais limitações são tais como o baixo desempenho mecânico e a alta absorção de umidade devido a sua natureza hidrofílica, com efeito deletério em praticamente todas as propriedades, principalmente na estabilidade dimensional do compósito (Joseph 2002, Singleton 2003, Dipa 2002, Espert 2004).

Uma forma bastante promissora de melhorar o desempenho dos compósitos reforçados por fibras vegetais é a hibridização com a adição de fibras sintéticas, em geral materiais relativamente inertes, imunes ao ataque biológico e com boa resistência a alguns agentes químicos e solventes (Twe et al. 2003, Sreekala 2002, Twe et al. 2002, Seena 2002, Kalaprasad et al. 1997). Utilizando dois ou mais diferentes tipos de fibras, as vantagens encontradas em um tipo podem complementar as desvantagens da outra. Assim, controlando as demais variáveis influentes, um bom equilíbrio entre desempenho e custo pode ser alcançado.

Compósitos reforçados com fibras naturais podem ser moldados e produzidos nas mais diversas formas, utilizando-se da tecnologia, modificações das fibras e dos agentes ligantes. Há alternativa de melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras vegetais, tais como a impregnação. Pode-se utilizar a incorporação de monômeros nas matrizes, no preenchimento dos vazios dos lignocelulósicos, melhorando com isso a resistência à compressão e a resistência à abrasão. Além disso, impõem-se restrições à livre movimentação de água para o interior, limitando com isso as condições de biodeterioração. Grupos tóxicos podem ser ligados a esses polímeros e com isso se obtém um material resistente ao apodrecimento (Meyer, 1981).

Dentre os vários tipos de fibras estudadas, a juta apresenta a maior tendência ao inchamento (12-15%), em chapas produzidas pela Siempelkamp Company (Kozlowski et al., 1993), mostrando que há necessidade de se estabilizar essas fibras, através de modificação química, ou com tratamentos superficiais.

Na Tabela 2.8, ilustram-se dados comparativos entre várias propriedades de algumas fibras vegetais e sintéticas, inclusive a fibra de vidro-E. Os mesmos foram coletados de várias fontes bibliográficas e já citados no presente texto.

Há uma grande quantidade de compósitos preparados a partir de uma matriz polimérica com fibras vegetais (Bledzki, et al., 1999). Esses compósitos resultam em uma combinação única de matérias com varias propriedades tais como: alto módulo de resistência, módulo de resistência específicas e alta resistência à fadiga e ao impacto. Produtos fabricados com materiais similares, como compósitos de matriz polimérica com fibras sintéticas, têm sua utilização bastante restrita devida ao preço, o que torna o uso desses materiais praticamente justificado para aplicações específicas, como nas industriais de aeronaves e automóveis (Mitra, 1998).

Tabela 2.8 - Comparação entre várias propriedades de algumas fibras vegetais e sintéticas.

Fibra	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)
Algodão	16 – 21	1,5 – 1,6	287 – 597	5,5 – 12,6	7 – 8
Juta	200	1,3	393 – 773	26,5	1,5 – 1,8
Linho	---	1,5	345 – 1035	27,6	2,7 – 3,2
Cânhamo	---	---	690	---	1,6
Rami	---	1,5	400 – 938	61,4 – 128	3,6 – 3,8
Sisal	50 - 300	1,45	511 – 635	9,4 – 22	3 - 7
Coco	100 - 450	1,15 – 1,45	131 - 175	4 – 13	15 - 40
Curauá/ro	49 - 93	1,2	665 - 1300	20 - 33	---
Curauá/br	60 - 100	1,2	859 – 1404	20 – 36	---
Vidro – E	8 - 14	2,5	2000 - 3500	70	1,8 – 3,2
Kevlar-49	12	1,48	2800 – 3792	131	2,2 – 2,8
Carbono IM8	5	1,8 – 1,9	4300 - 5171	270 – 310	1,4 – 1,8

Fibras naturais como o sisal, juta e coco têm atraído a atenção de pesquisadores, em função da sua disponibilidade, por serem recursos renováveis, terem preços acessíveis e por melhorarem as propriedades mecânicas dos compósitos em que são usados como agentes de reforço (Mitra, 1998).

A alta resistência das fibras vegetais não tem sido explorada intensivamente em compósitos, com reforços de fibras, por serem higroscópicas e por terem pouca molhabilidade com as resinas de matrizes poliméricas. Para o seu uso, se faz necessário um amplo estudo de modificadores químicos e físicos a fim de viabilizar a sua aplicação industrial, essas características são decorrentes da presença de grupos hidroxila e grupos polares em vários constituintes da fibra, principalmente celulose e lignina (Rana, 1998).

Gassan et al. (1997), fizeram uma análise de diferentes propriedades mecânicas em compósitos de poliéster reforçado com juta não tratada, e obtiveram resultados superiores quando comparados com compósitos de poliéster reforçado com madeira e inferiores se comparados aos compósitos de poliéster reforçado com fibras sintéticas.

2.2.9 – Problemas relativos à utilização de fibras vegetais em compósitos poliméricos

Apesar do grande número de pesquisas desenvolvidas, existem vários problemas relacionados à estrutura das fibras que dificultam sua utilização, tais como (Toledo, 1993 apud Silva, 1999):

- Baixo módulo de elasticidade comparada às fibras sintéticas;
- Alta absorção de umidade;
- Susceptibilidade ao ataque de fungos e insetos;
- Baixa durabilidade em meio alcalino;
- Variação de propriedades para um mesmo tipo de fibra;
- Compatibilidade da interface fibra-matriz.

A rugosidade superficial é uma característica inerente às fibras vegetais que favorece a adesão em resina polimérica, porém, sua impregnação ainda continua difícil, o que dificulta sua utilização em ambiente úmido. Mas, o que leva pesquisadores em todo o Brasil a estudar a

sua utilização é a abundância da mesma em nosso país, levando em consideração o baixo custo de aquisição da fibra (D'Arsie, 1986 apud Fonseca, 1998).

Outro aspecto que se deve destacar é que todas as fibras têxteis são higroscópicas, ou seja, absorvem menor ou maior quantidade de água do ar, sem ficarem molhadas. Por isso, a quantidade de água que uma determinada fibra vai absorver depende da quantidade de água presente na atmosfera em que a mesma se encontra, esta absorção é menor à medida que se estabelece um equilíbrio entre as fibras e o ar (Araújo, 1984).

Quando ocorre absorção d'água aquecido pelas fibras com posterior secagem, há uma retração da fibra, o que prejudica a interação na interface fibra-matriz, prejudicando conseqüentemente as propriedades mecânicas do compósito.

2.2.10 – Fatores influentes nas propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras

São vários os fatores que influenciam as propriedades mecânicas dos compósitos em geral: processo de fabricação, ângulo de fibra, configuração do compósito, percentual de fibra, tipo de resina, presença de vazios, formas de carregamentos, mecanismo de dano, a qualidade de interface, a presença de condições adversas de umidade e temperaturas e principalmente as propriedades dos elementos constituintes (Tavares, 1999; Aquino, 1997), (Freire Jr., 2001; Aquino, 1998), (Aquino, 1999), (Margaria, 1997; Aquino, 1996).

As propriedades mecânicas de um compósito são dependentes da orientação das fibras, no qual o desempenho estrutural pode ser avaliado por análises mecânicas na direção do alinhamento das fibras em diferentes frações de volume das fibras (Joseph et al, 2003).

Métodos envolvendo testes mecânicos vêm sendo largamente utilizados na investigação da estrutura e do comportamento viscoelástico de materiais poliméricos, com o objetivo de determinar sua rigidez e características de umidade para varias aplicações (Joseph et al, 2003).

As propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibras curtas de sisal, contendo fibras tratadas e fibras não tratadas, vêm sendo estudadas levando em consideração o carregamento e o comprimento da fibra, tratamentos químicos, frequência e temperatura. Pela incorporação de fibras curta de sisal no polipropileno, observaram diferenças nestas

propriedades e, também, que os compósitos utilizando fibras tratadas apresentaram uma melhoria nas propriedades quando comparados com o sistema não tratado.

Com relação à interface, quando a ligação matriz-fibra é fraca pode ocorrer uma diminuição da resistência à oxidação por facilitar a exposição da fibra e ainda, estimular a oxidação no interior do compósito. Nem sempre uma melhoria na adesão promove aumento na resistência do compósito, principalmente com relação ao impacto. O ideal seria uma combinação de propriedades para se obter compósitos resistentes e que apresentem reprodutibilidade de propriedades durante os testes ou ensaios mecânicos (Paiva et al, 1999).

Outro fator diz respeito à combinação de um compósito, ou seja, a forma como estão arrançados os componentes, número de camadas, e a forma como as fibras estão orientadas e distribuídas, que juntamente com o seu comprimento, são determinantes nas propriedades mecânicas dos compósitos. Todos esses parâmetros influenciam na distribuição das tensões quando os mesmos são submetidos a carregamentos externos de tração, compressão e cisalhamento (Herakovich, 1997; Davies et al., 1999; Nakamura et al., 2000).

Em geral, os compósitos termofixos (ou termorrígidos) contendo fibras vegetais apresentam uma melhoria em suas propriedades mecânicas com o aumento do comprimento das fibras até um certo limite. Estudos mostram que pode ocorrer diminuição nos valores de propriedades, como a resistência à tração, proveniente do aumento do comprimento das fibras, devido ao contato fibra-fibra que ocorre quando a fibra, impregnada com resina líquida, é prensada em moldes na obtenção de compósitos, sejam em forma de placas ou compósitos (Joseph et al., 1996 apud Paiva et al., 1999).

A presença de umidade afeta o módulo de elasticidade. Observou-se que a influência da umidade não ocorre unicamente quando o material está úmido, mas, em caso adverso, quando este perde a sua umidade muitas vezes proveniente das próprias condições de armazenamento (POMIÈS et al, 1995 e MCBANGOLURI et al, 2000).

Em compósitos usados, por exemplo, em embalagens, construção civil e em tratamentos de água residual, a absorção de água é um fator muito importante, pois ela afeta as propriedades físicas desses materiais. Esse fato pode comprometer a estrutura da matriz e da interface fibra-matriz, resultando em uma troca de propriedades de massa como a estabilidade dimensional, além das propriedades mecânicas e elétricas (SREEKALA et al, 2002).

Outro fator importante que afeta a umidade dos compósitos é a hidrofília dos componentes individuais e dos arranjos estruturais das fibras dentro da matriz. As fibras naturais que contém lignocelulose são altamente hidrofílicas e a sua incorporação em matrizes poliméricas, portanto, gera um aumento na capacidade de absorção de água do material. Estudos feitos em fibras de palmeira mostraram que a mesma contém 65% de celulose e 19% de lignina, e isso faz com que a mesma seja altamente hidrofílica devido a polaridade existente entre os grupos hidroxil livres da celulose e da lignina, por causa da presença de ligações de Hidrogênio, que podem segurar as moléculas de água (SREEKALA et al, 2002).

O mecanismo de absorção é diferente em fibras incorporadas em compósitos. A água penetra pela interface e pode se difundir pela estrutura porosa da superfície de fibras. A área de seção transversal do compósito é a região na qual a absorção de água é maior, mas a interface fibra-matriz é, também, uma região onde ocorre a absorção, e neste caso, o comportamento da absorção depende da adesão entre fibra e a matriz (SREEKALA et al, 2002).

Além dos fatores mencionados anteriormente, outros fatores também influenciam as propriedades mecânicas dos materiais compósitos, como por exemplo, a exposição destes à ambiente corrosivo.

2.2.11 – Degradação de polímeros e compósitos

Degradação de polímeros é qualquer reação destrutiva que pode ser causada por agentes químicos, físicos ou mecânicos ou em simultaneidade. A degradação causa uma modificação irreversível nas propriedades dos materiais poliméricos, sendo evidenciada pela deterioração progressiva destas propriedades, incluindo o aspecto visual. Em alguns casos as reações de degradação podem ser desejáveis, como por exemplo, para rejeitos poliméricos não recicláveis, como sacos de lixo, fraldas e embalagens de curta duração. Porém, em geral, as reações de degradação são indesejáveis.

Nos compósitos poliméricos pode ocorrer a degradação da matriz polimérica, do reforço ou do sistema como um todo. Na ausência de luz e à temperatura ambiente, a maioria dos polímeros é estável por longos períodos de tempo. No entanto, sob a luz do sol a taxa de oxidação dos polímeros é acelerada e este efeito pode ser exacerbado pela presença de

poluentes atmosféricos, como o nitrogênio e óxidos de enxofre, que são componentes freqüentes da atmosfera industrial. Neste caso, a degradação ocorre devido aos fenômenos de fotólise, decomposição química ocasionada pela luz, e foto-oxidação. Em geral, a fotólise conduz primariamente à insaturação no polímero, por outro lado a foto-oxidação conduz à produção de aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos (Grassie 1985).

As fibras vegetais podem sofrer degradação devido a agentes biológicos, meios ácidos e alcalinos, absorção de umidade, radiação ultravioleta e temperatura. Os componentes lignocelulósicos das fibras vegetais respondem de diferentes formas aos meios citados. O processo de degradação fotoquímica por luz ultravioleta (UV), por exemplo, ocorre quando as fibras são expostas a ambientes externos. A degradação ocorre inicialmente na lignina, que é responsável pela mudança de cor da fibra. Em comparação a lignina, a celulose é muito menos suscetível a degradação UV, em contrapartida, a hemicelulose e a celulose são mais suscetíveis a altas temperaturas (Mohanty 2000).

Como já comentado as fibras naturais são de natureza hidrófila. Nos compósitos com fibras vegetais as moléculas de água absorvidas pelas fibras atuam como plastificantes atuando nas fibras, na matriz e na interface simultaneamente. Pode ocorrer descolamento na interface fibra/resina pelo desenvolvimento de bolsas de pressão osmótica na superfície da fibra devido ao lixiviamento de substâncias solúveis em água da superfície da fibra. Desta forma, a degradação do compósito ocorre devido não apenas a degradação dos constituintes individuais, matriz e fibra, mas também devido a perda de interação entre eles (Twe 2003). Além de causar a diminuição das propriedades mecânicas à umidade pode ainda expor o compósito à ação de bactérias e fungos.

Referências aos processos de degradação sob a ação simultânea de temperatura e umidade são encontradas na literatura (Cândido 2000, Costa 2002, Weistman 2000). Os tópicos geralmente discutidos referem-se à diminuição da temperatura de transição vítrea, devido ao efeito plastificante da umidade absorvida, e da resistência da interface fibra/matriz. Esses efeitos podem ser reversíveis quando a exposição ocorre por um período de curta duração. Porém, quando a exposição ocorre por tempos prolongados com a combinação de umidade e mudanças de temperatura, os efeitos podem ser irreversíveis, causando a degradação química da matriz e o descolamento da interface (Bradley 1995).

Para avaliar a degradação de polímeros e compósitos em condições de serviço, o mesmo é submetido a ensaios de envelhecimento acelerado ou natural.

Nos ensaios de envelhecimento natural o compósito é exposto às condições ambientais próximas da real condição de uso do material. Geralmente, utiliza-se expor os corpos-de-prova em bancadas com inclinação voltada para o norte magnético (Silva, 2002). A grande vantagem deste ensaio é justamente a proximidade com a real condição de uso do material. Entretanto, o ensaio é lento e exige longo tempo de exposição para que os fatores da degradação possam agir no material (Silva, 2002).

Os ensaios de envelhecimento acelerado possuem a vantagem da rapidez, fornecendo dados sobre o provável desempenho do material ao longo da sua vida útil. Nestes ensaios, são simuladas as condições de exposição do material, porém com intensidades elevadas, de modo a acelerar o processo de degradação. Apesar de vantagem da rapidez, pode fornecer resultados imprecisos, em função de mecanismos paralelos ocorridos nas amostras (Silva, 2002).

Nos ensaios acelerados os processos normalmente estudados são a termooxidação, uso contínuo em temperaturas elevadas, e fotooxidação, exposição à radiação ultravioleta. Os processos de degradação podem ser monitorados pelas mudanças no estado físico e propriedades mecânicas do material. Os ensaios mecânicos convencionais (tração e flexão) e as técnicas de análises térmicas mostram-se bastante úteis para este fim.

A radiação ultravioleta é um dos fatores mais efetivos para a degradação de materiais orgânicos através de fotooxidação. Esse é um fator decisivo com respeito ao tempo de vida de polímeros que são expostos ao tempo. A radiação ultravioleta causa modificações químicas irreversíveis que afetam as propriedades mecânicas de materiais orgânicos. Essa degradação pode tornar os materiais quebradiços com perda de resistência e mudança de cor (Berre e Lala, 1989)

2.2.12 – Mecanismo de dano

Durante a utilização do material compósito, o mesmo pode ser submetido a vários tipos de tensões, as quais dão origem a um mecanismo complexo com vários tipos de fratura, definido como “dano”, devido ao prejuízo ocorrido nas propriedades mecânicas dos mesmos durante o carregamento (Reifsnider, 1980). O tipo e a forma de dano podem ser influenciados

por diversos fatores, como o tipo e o sentido da carga aplicada, as propriedades físicas, químicas e mecânicas da fibra e da matriz, o processo de fabricação, a configuração do material compósito, os percentuais de fibra, matriz e vazios, a umidade absorvida e a temperatura de trabalho (Margaria et. al., 1997; Yang et. al., 2000; Felipe et. al., 1999).

Devido a grande variedade de fatores é extremamente difícil prever onde e como um dano se forma e, até mesmo, a sua propagação em um material compósito. A literatura mostra que, mesmo variando apenas um dos fatores acima mencionados, haverá variações significativas na formação e propagação do dano (Hamelin, 1988; Hull, 1987).

Segundo a literatura (Hamelin, 1988; Naik et. al., 1999; Hull, 1987; Margaria et. al., 1997; Felipe et. al., 1999; Yang et. al., 2000), os principais tipos de danos encontrados nos materiais compósitos são:

- Fissuração na matriz – ocorrência de uma ou mais fissuras na matriz do material compósito (fratura coesiva na matriz) conforme observado na figura 2.6.

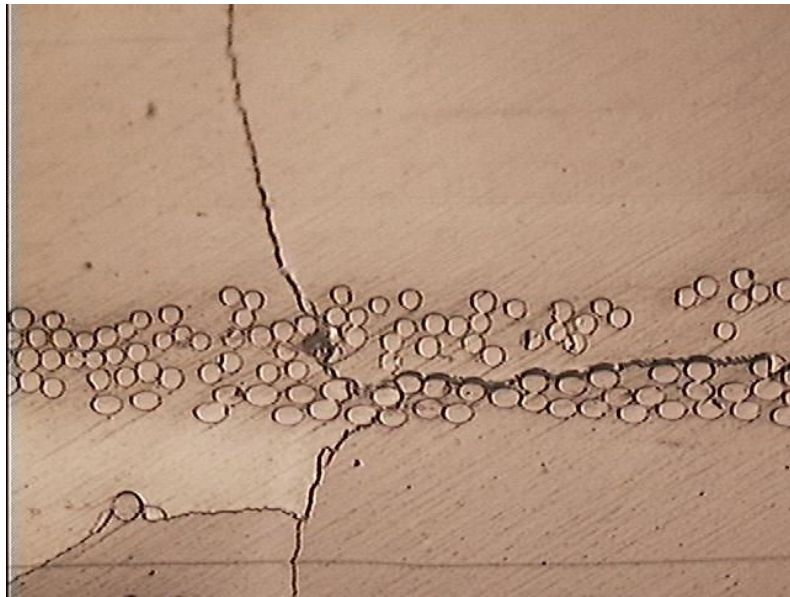


Figura 2.6 – Fissuração em matriz polimérica. Fonte: base de pesquisa em compósitos, 2005.

- Ruptura da fibra – ocorrência da ruptura transversal ou longitudinal da fibra (fratura coesiva na fibra) conforme observado na figura 2.7

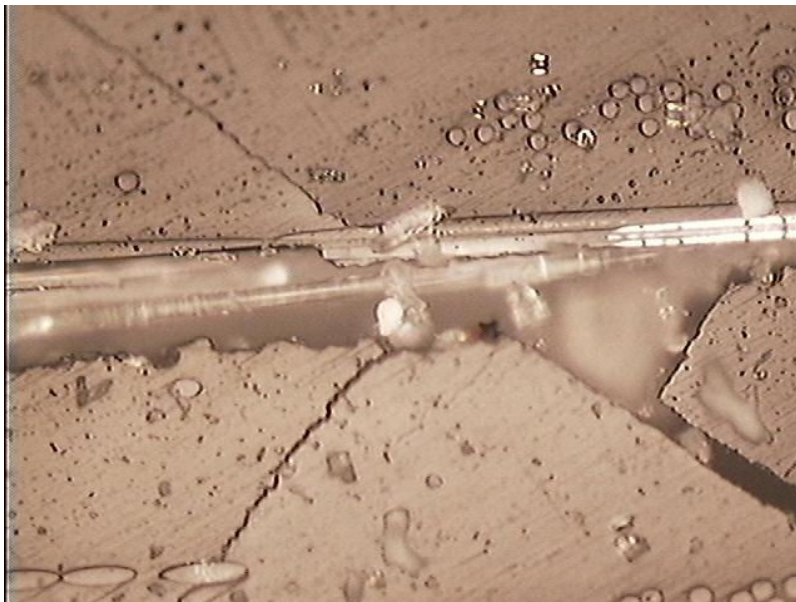


Figura 2.7 – Ruptura das fibras de vidro. Fonte: base de pesquisa em compósitos, 2005 (200x)

- Desaderência fibra/matriz – descolamento na interface entre fibra e matriz (fratura adesiva) conforme observado na figura 2.8.

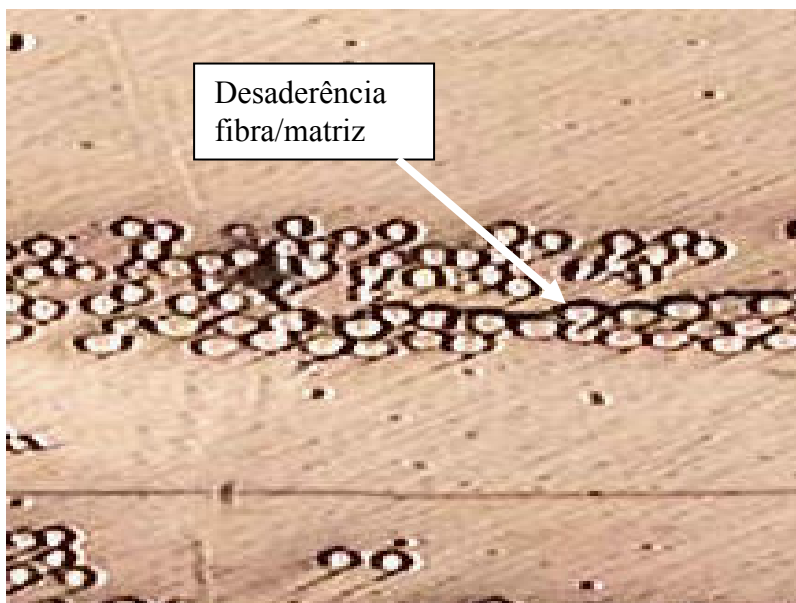


Figura 2.8 – Desaderência fibras de vidro/matriz. Fonte: base de pesquisa em compósitos, 2006.

- Delaminação – desaderência entre as camadas de um compósito laminado conforme observado na figura 2.9.

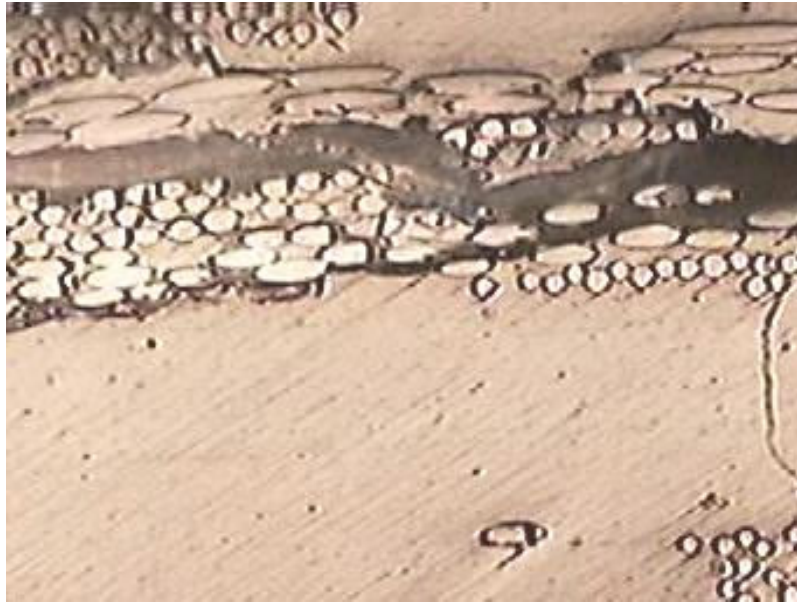


Figura 2.9 – Delaminação entre as camadas de fibras. Fonte: base de pesquisa em compósitos, 2006.

- Microflambagem – deformação ocasionada nas fibras do laminado quando submetido a esforços de compressão formando pequenas desaderências na interface fibra/matriz conforme observado na figura 2.10.

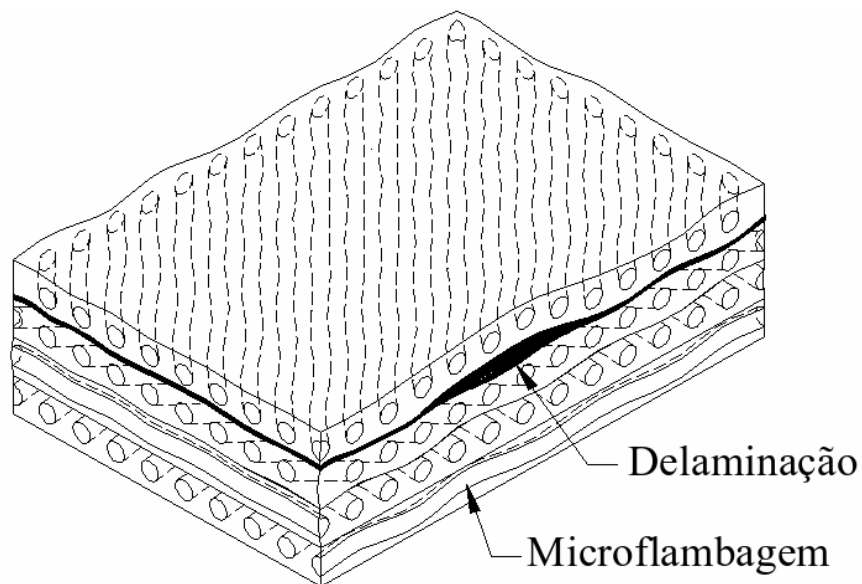


Figura 2.10 – Microflambagem em fibras. Fonte: base de pesquisa em compósitos, 2007.

A fissuração na matriz, a ruptura de fibra e a desaderência fibra matriz são tipos de danos que podem ocorrer em qualquer material compósito fibroso, porém a delaminação ocorre em compósitos laminados. Com exceção da microflambagem (que só ocorre com a aplicação de cargas compressivas), os demais tipos de danos aqui descritos, são encontrados em diversos tipos de carga aplicada (Hamelin, 1988; Yang et. al., 2000).

É importante salientar que o aumento do dano no material compósito prejudica as propriedades mecânicas do laminado de modo que ocorre um decréscimo das suas constantes elásticas (Hamelin, 1988; Margaria et. al., 1997; Felipe et. al., 1999; Yang et. al., 2000).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresentam-se com detalhes todos os procedimentos experimentais usados, ressaltando os materiais e métodos utilizados nesse trabalho.

3.1 – Materiais utilizados nos laminados compósitos

- Manta de fibra de vidro-E

Foram utilizados como reforço para confecção dos laminados compósitos, mantas de fibras de vidro-E, com uma gramatura de 450 g/m^2 , fornecidos pela Tecniplas Indústria e Comércio Ltda.

- Fibra de curauá

As fibras de curauá (variedade denominada de curauá roxo) foram obtidas através de contatos com pesquisadores da Embrapa da Amazônia e foram utilizadas na forma de mantas de fibras contínuas. Para a fabricação destas mantas inicialmente foi feita uma seleção das fibras de maior comprimento. Estas foram penteadas manualmente com uma carda, separadas em mechas, cortadas com 65 cm de comprimento e pesadas em uma balança de precisão. O peso aproximado de cada mecha foi de 1,2 g o que corresponde a 0,9 dtex. Ao final as mechas foram alinhadas, lado a lado, e fixadas em fita adesiva formando uma manta de fibras contínuas com 65 cm de largura e 95 cm de comprimento. Vale salientar que as fibras foram utilizadas “in natura”, sem qualquer tratamento prévio, no intuito de não adicionar novos custos à produção do laminado.

- Resina poliéster

Foi utilizada como matriz plástica para confecção dos laminados compósitos, a resina de poliéster insaturada ortoftálica, sem o uso adicional de estireno. Como agente do sistema catalítico (cura a temperatura ambiente) foi usado o MEEK (metil-etil-ketona).

3.2 – Processo de fabricação e configuração do laminado de fibra de vidro-E (CV)

O processo de fabricação utilizado para a confecção do laminado de fibra de vidro-E foi o de moldagem manual (**hand lay-up**). O laminado foi obtido na forma de 01 (uma) placa constituída por sete camadas de mantas de fibras de vidro-E. A configuração é apresentada na figura 3.1. A área da placa foi de 0,60 m², e com espessura de aproximadamente 6,0 (seis) mm. A mesma foi fabricada pela Tecniplas Indústria e Comercio Ltda.

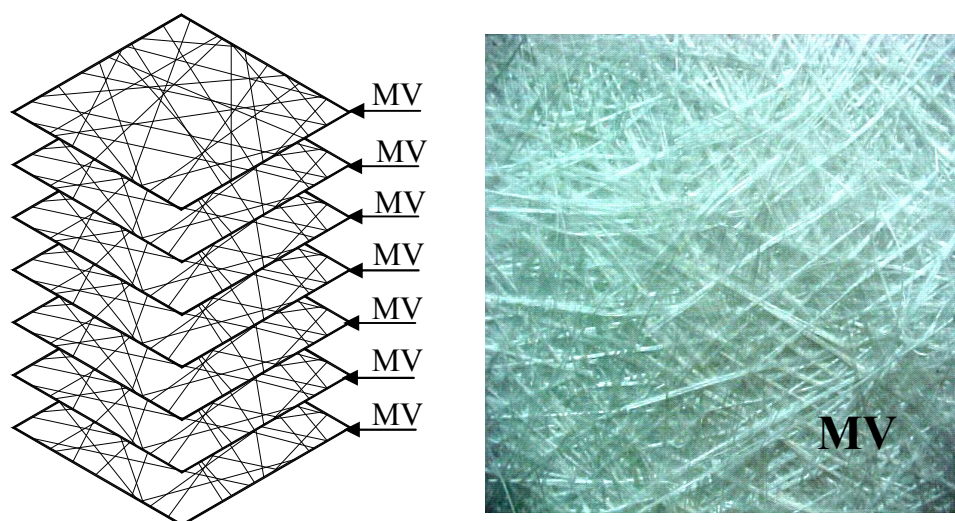


Figura 3.1 - Configuração do laminado de fibra de vidro-E. MV – Manta de fibras curtas de vidro- E.

A configuração do compósito laminado de fibra de vidro-E foi a seguinte:

$$(MV / MV / MV / MV / MV / MV / MV)$$

Onde: **MV** = mantas de fibras curtas (450 g/m² - 5 cm) de fibras de Vidro-E.

3.3 - Processo de fabricação e configuração do laminado híbrido

O processo de fabricação utilizado nesse trabalho foi o de moldagem manual (**hand lay-up**), no qual foi obtida 01 (uma) placa tipo laminado de compósito híbrido de fibras de

curauá e vidro-E, com 0,62 m² de área e com espessura de aproximadamente 6,0 (seis) mm. A mesma foi fabricada pela Tecniplas Indústria e Comercio Ltda.

3.3.1 – Compósito laminado híbrido de fibras de curauá e vidro-E (CH)

A configuração idealizada para o compósito laminado híbrido consiste de quatro camadas de mantas de fibras de vidro-E, intercaladas com três camadas de fibras contínuas de curauá. Um esquema da configuração é apresentado na figura 3.2.

A escolha desta configuração se deve, em parte, ao processo de fabricação utilizado, o hand lay-up. O uso de mantas de fibras de vidro nas camadas externas facilita o processo de laminação e assegura uma espessura mais uniforme ao laminado. Outros aspectos importantes quanto à configuração são discutidos na continuidade do texto.

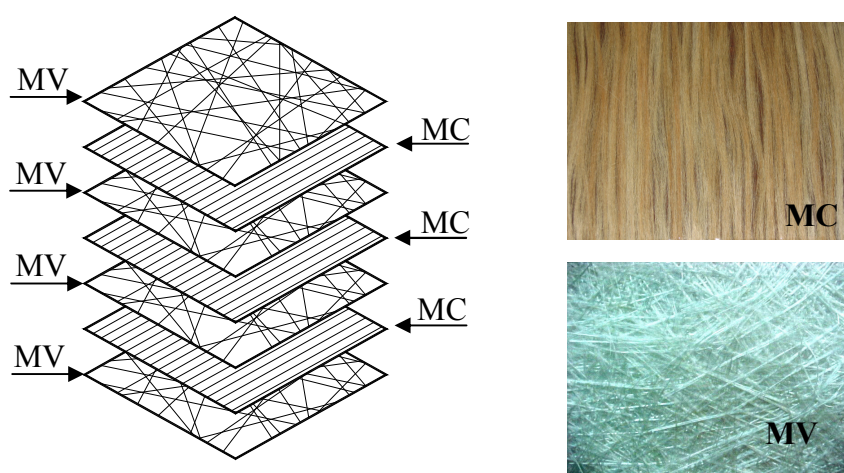


Figura 3.2 - Configuração do laminado híbrido vidro/curauá. **MV** – Manta de fibras curtas de vidro- E. **MC** – Manta de fibras contínuas de curauá.

Ressalva se faz para a adoção de simetria na distribuição das camadas do **CH**, resultando com isso uma distribuição uniforme das tensões interlaminares ao longo da espessura dos corpos-de-prova durante a realização dos ensaios mecânicos. A configuração do compósito laminado híbrido de fibras de curauá e vidro-E é a seguinte:

$$(MV / MC / MV / MC / MV / MC / MV)$$

Onde: **MC** = manta de mechas unidirecionais e contínuas de fibras de Curauá e **MV** = mantas de fibras curtas (5 cm) de fibras de Vidro-E.

3.4 - Determinação da densidade e fração volumétrica dos componentes

A densidade volumétrica dos compósitos foi determinada pelo método, imersão dos corpos-de-prova, segundo a norma ASTM D792-91, utilizando-se um total de 5 amostras. A fração volumétrica de fibras, resina e vazios foi determinada através de um ensaio de calcinação (Cahn 1993). Neste ensaio, 5 amostras de 2 x 2 cm, previamente medidas e pesadas, são levadas a um forno na temperatura de aproximadamente 650°C durante cerca de 40 minutos. Nesta temperatura a resina é queimada restando apenas as fibras de vidro. De posse dos valores de densidade dos componentes (obtidos pelo fabricante) e das medidas das dimensões e peso do compósito (antes da queima), determinam-se as frações volumétricas. No caso do laminado híbrido é possível determinar apenas o teor de fibras de vidro, pois a fibra vegetal é queimada juntamente com a resina tornando impossível discriminar a fração volumétrica da resina, da fibra de curauá e dos vazios.

3.5 – Corte e confecção dos corpos-de-prova

Para efetuar o corte dos corpos-de-prova, utilizou-se um disco de corte adiamantado (DIFER D252), a seco, de forma a evitar um possível “arranque” de fibras ou quaisquer outros tipos de danos.

Para uma melhor obtenção dos corpos-de-prova, foi retirada uma rebarba de 5,0 cm, nas laterais, em todas as placas dos compósitos, com intuito de eliminar possíveis descontinuidades e mau acabamento, como por exemplo, variações da espessura e maiores percentuais de defeitos internos provenientes do processo de fabricação.

Todos os corpos-de-prova referentes à placa de **CH** foram cortados seguindo um sentido previamente definido e no caso do **CH**, as mechas de fibras de curauá, se apresentam com direções das fibras sempre paralelas (0°) à direção de aplicação da carga. Um sentido pré-definido de corte também foi usado para **CV**, mesmo tendo a manta de fibras de vidro uma distribuição aleatória das mesmas.

Para obtenção das dimensões dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de tração uniaxial foi adotado à norma ASTM D3039/D-00. Estas dimensões estão demonstradas na figura 3.3.

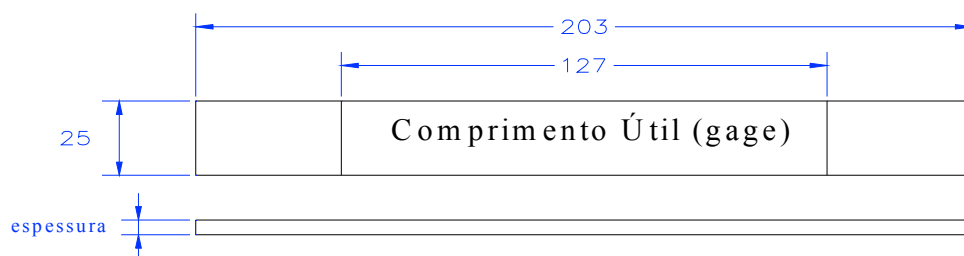


Figura 3.3 – Desenho esquemático dos CPs para o ensaio de tração uniaxial.

Já para as dimensões dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de flexão em três pontos, foi adotada a norma ASTM D790-90. Estas dimensões estão demonstradas na figura 3.4.

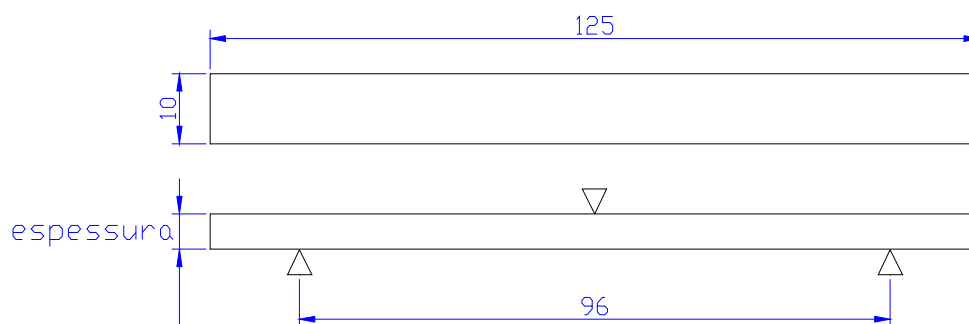


Figura 3.4 – Desenho esquemático dos CPs para o ensaio de flexão em três pontos.

Após o corte dos corpos-de-prova, estes foram submetidos a desbastes do sobre-material, e posteriormente submetidos aos procedimentos de lixamento e polimento nas faces cortadas. Para tanto, utilizou lixas d'água aquecido de números 150, 180, 240, 320, 400 e 600, e o polimento foi feito em uma politriz motorizada, utilizando como abrasivo a alumina de 0,01 micron.

Estes foram submetidos ao procedimento de medições, onde as dimensões de cada corpo-de-prova foram obtidas utilizando-se um paquímetro digital do fabricante Starret com precisão de 0,01 mm. Como a espessura dos corpos-de-prova apresentava variações em função do processo de fabricação utilizado, se fez necessário à realização de pelo menos cinco medidas, para obtenção do valor médio para cada corpo-de-prova.

3.5.1 – Análises macroscópica e microscópica dos corpos-de-prova

Esta análise foi feita nos corpos-de-prova, com o intuito de analisar o acabamento final das peças cortadas e polidas, no tocante às falhas e defeitos oriundos do processo de fabricação. As análises foram baseadas nas normas (ASTM D 2562-70, 1977) e (ASTM D 2563-70, 1977), que tratam da classificação dos defeitos visuais em moldados em Plástico Reforçado por Fibras de Vidro (PRFV).

3.6 – Ensaio de envelhecimento

O objetivo do ensaio de envelhecimento é avaliar a influência do meio na degradação das propriedades mecânicas do compósito. Neste projeto, os compósitos foram submetidos à condição de envelhecimento em câmara por ação de raios UV e vapor d'água (envelhecimento acelerado). Todos os corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento acelerado foram ensaiados em ciclo, alternados, diários de radiação (18 horas) e vapor d'água (6 horas) até atingir o tempo estimado (escolhido) através da norma ASTM G-53 – 96, que foi de 1512h de radiação UV-A e UV-B.

A temperatura no interior da câmara de envelhecimento e no ambiente de teste foi medida diariamente. A temperatura média do ambiente foi de 29 °C, já a temperatura média no interior do equipamento com a emissão de vapor foi de 61 °C, com variação de ± 5 °C. As condições de umidade foi para emissão de vapor d'água com 95 % de umidade relativa. A temperatura média na área de radiação foi de 60 °C, com variação de ± 3 °C.

3.7 – Construção da câmara de envelhecimento acelerado

Equipamentos para experimentos de envelhecimento acelerado de polímeros estão disponíveis no mercado a um custo relativamente elevado e nem sempre atendem de modo adequado às condições específicas dos projetos de pesquisa.

Assim, optou-se neste trabalho pela construção de um simulador ambiental para envelhecimento acelerado de polímeros e compósitos poliméricos, seguindo as recomendações da norma ASTM G53-96 e de um artigo da literatura (Saron 2000). O equipamento foi

construído com recursos do Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica através da parceria com o projeto DCR (Programa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico Regional) – CNPq e servirá para o fortalecimento da pesquisa em polímeros e compósitos na UFRN atendendo a diversos outros projetos. Alguns detalhes da construção do equipamento são apresentados a seguir.

O equipamento é relativamente simples e foi construído a um custo reduzido. Consiste, basicamente, em uma câmara onde os corpos-de-prova são expostos a duas condições ambientais em ciclos alternados: radiação UV (simulando a luz solar) e vapor de água (simulando a questão da umidade).

Antes de iniciar o envelhecimento todos os corpos-de-prova são secos em estufa a 50 ± 2 °C por vinte e quatro horas. Após esse período as amostras são rapidamente removidas da estufa e pesadas em balança analítica. Em seguida, esses corpos-de-prova são transferidos para a câmara de envelhecimento e iniciado o condicionamento.

Semanalmente todos os corpos-de-prova são removidos da câmara por pequenos intervalos de tempo para fazer a medição da perda de massa em uma balança analítica, com precisão de 0,1 mg. O efeito dessa remoção sobre a perda de massa é desprezado.

Visando manter a umidade absorvida na emissão de vapor d'água, até a pesagem dos CPs, adotou-se o seguinte procedimento: Era realizada uma operação de remoção dos corpos-de-prova, semanalmente, com rapidez e as amostras imediatamente armazenadas em uma embalagem plástica, envolvidas por um pano úmido, para evitar que o contato com o ar ambiente interferisse no conteúdo de perda de massa.

Os ciclos de exposição à radiação UV e vapor de água são alternados e independentes. Apenas uma face do corpo-de-prova sofre os efeitos da degradação, conforme recomenda a norma ASTM G53-96. Durante a exposição aos raios UV as lâmpadas são acionadas e a câmara é mantida completamente fechada. Durante a exposição à umidade as lâmpadas (com emissão característica UVA e UVB) são desligadas e a face oposta do corpo-de-prova (que não está sofrendo degradação) é refrigerada pelo ar ambiente. A umidade é gerada pelo aquecimento (por resistência elétrica blindada) e evaporação da água contida em reservatórios posicionados na base da câmara, sob os corpos-de-prova. Vale salientar que ventoinhas permanecem acionadas a qualquer ciclo, para melhor dissipação de calor e uniformidade da temperatura ao comprimento do equipamento.

A câmara é composta por três módulos básicos (ver figura 3.5). No primeiro têm-se as chaves de controle para acionamento das lâmpadas, resistência elétrica e ventoinha (para circulação de ar no interior da câmara). O segundo é o corpo principal da câmara onde são posicionadas as quatro lâmpadas e os corpos-de-prova, e o terceiro é a base da câmara onde são colocados dois reservatórios de água. Os reatores, a fiação e demais componentes utilizados na instalação elétrica são acondicionados na parte traseira do módulo 2.

O equipamento foi projetado para corpos-de-prova de tração, flexão e compressão, dimensionados conforme normas da ASTM, porém, é possível, com algumas alterações, acondicionar corpos-de-prova com dimensões diferentes das inicialmente projetadas. Nas fotos abaixo, mostram-se detalhes do equipamento construído.

Na figura 3.5 é mostrado uma visão geral do equipamento. Na figura 3.6 é mostrado um dos reservatórios de água que são acondicionados no módulo 3, sob os corpos-de-prova. Nas figuras 3.7 e 3.8 são mostrados detalhes do módulo 2. As áreas ao redor dos corpos-de-prova contêm placas de vidro transparente que permitem a visualização do ambiente interno da câmara e monitoramento do ensaio. A umidade relativa e temperatura da câmara são monitoradas durante todo o ensaio.

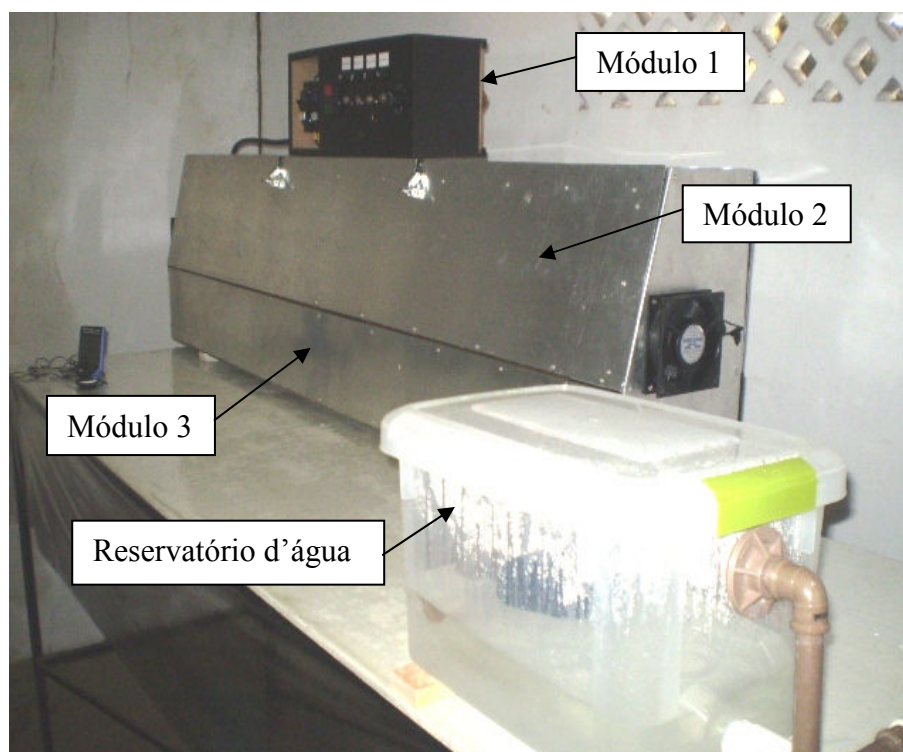


Figura 3.5 – Visão geral da câmara de envelhecimento



Reservatório de água com resistência elétrica

Figura 3.6 – Reservatório de água – Câmara de envelhecimento.



Quatro lâmpadas

Chaves de controle

Ventoinha

Porta

Figura 3.7 – Câmara de envelhecimento aberta – Visão geral.

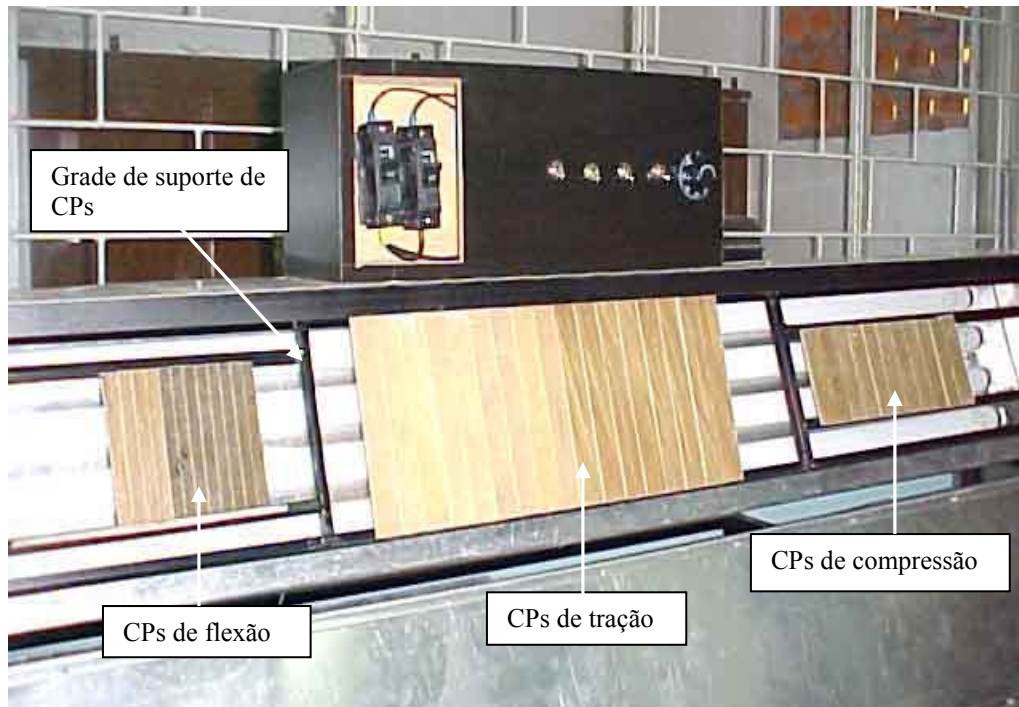


Figura 3.8 – Detalhes do módulo 2 – Câmara de envelhecimento.

3.8 – Ensaios mecânicos

Para determinar as propriedades mecânicas dos laminados compósitos, os corpos-de-prova foram selecionados e ensaiados à tração uniaxial (ASTM D3039/D-00) e flexão em três pontos (ASTM D790-90).

Ressalva se faz para o cálculo do módulo elástico, ou seja, o mesmo é determinado considerando os valores de tensão e deformação até 50% da carga de ruptura de forma a evitar influência do início do dano no mesmo. Esse procedimento foi adotado para cálculo de todos os módulos elásticos independente do carregamento e tipo de configuração.

As dispersões calculadas em todos os parâmetros estudados e para se referem ao “erro absoluto”, ou seja, diferença em relação aos valores obtidos nos ensaios e a média dos resultados.

Os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais do CTGÁS (LEM/CTGÁS) e no Laboratório de Ensaio Mecânico – CCET/UFRN.

3.8.1 – Ensaio de tração uniaxial

O ensaio de tração uniaxial foi realizado com o objetivo de determinar o limite de resistência à tração, o módulo de elasticidade longitudinal (medido na direção de aplicação da carga) e o alongamento na fratura dos compósitos híbridos (**CH**) e de fibra de vidro (**CV**) nas condições envelhecidas e não-envelhecidas (estado original). Para os ensaios foi utilizada uma máquina de ensaios mecânicos marca SHIMADZU, modelo AG-1, com células de cargas de 250 KN e 100KN, respectivamente, com uma velocidade de ensaio de 1,0 mm/minuto, em ambos os laboratórios. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente ($25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$).

Durante a realização dos ensaios, foram tomados alguns cuidados especiais, tais como ajustes dos corpos-de-prova nas garras da máquina, para minimizar os problemas de “arraste” no início do carregamento e garantir, dimensões precisas do comprimento útil do CP.

Foram ensaiados 8 (oito) CPs de ambas as configurações e condições de ensaios, onde foram selecionados como ensaios válidos, os corpos-de-prova que romperam dentro do comprimento útil do mesmo, ou seja, com comportamento final de acordo com a norma ASTM D3039/D-00. Esses corpos-de-prova foram utilizados para os cálculos dos valores médios tanto com relação à resistência última quanto à rigidez e o alongamento na fratura.

A resistência última à tração foi definida como sendo a tensão referente à fratura do corpo-de-prova. Depois da obtenção dos dados, foi usado um programa computacional desenvolvido para o ambiente MATLAB, para cálculo do módulo de elasticidade na direção da carga aplicada, ressaltando-se que os valores adotados para o cálculo do mesmo correspondem aos valores referentes até aproximadamente 50% da tensão última do material. Esse cuidado foi tomado para evitar uma possível influência do dano no cálculo do módulo elástico.

3.8.2 – Ensaio de flexão em três pontos

O objetivo do ensaio de flexão em três pontos é a determinação da resistência à flexão, rigidez (módulo de elasticidade) e deflexão máxima dos **CH** e **CV**. Para este ensaio foi utilizada uma máquina de ensaios mecânicos marca SHIMADZU, modelo AG-1, equipada com dispositivo para ensaio de flexão em três pontos, com células de cargas de 50 KN e

100KN, respectivamente, uma velocidade de carregamento de 2,6 mm/min, em ambos os laboratórios. Semelhante ao estudo efetuado para a tração, os ensaios de flexão em três pontos foram realizados também para as duas condições ambientais, ou seja, ensaiados nas condições de material envelhecido e não-envelhecido na mesma quantidade citada anteriormente.

A resistência à flexão foi definida como sendo a tensão originada da carga responsável pela fratura do corpo-de-prova. A mesma é medida na superfície inferior (onde atuam as tensões de tração) do corpo-de-prova. Os valores referentes à rigidez (módulo de elasticidade) foram determinados utilizando o mesmo procedimento descrito para os ensaios de tração uniaxial. Os valores da resistência à flexão, da rigidez e da deflexão máxima foram determinados através das equações normalizadas através da norma ASTM D790-90. Todos os ensaios foram realizados na temperatura de $25\text{ °C} \pm 2$.

3.9 – Análise da Fratura

Após a realização dos ensaios, os corpos-de-prova foram submetidos a um estudo das características finais da fratura (dano) ocorridas em cada um. Consistiu de uma análise macroscópica da falha, com o objetivo de conhecer a formação e a distribuição do dano ao longo do comprimento do corpo-de-prova. A análise da fratura de todos os ensaios foi realizada no Laboratório de Ensaio de Materiais do CTGÁS (LEM/CTGÁS).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma análise detalhada da microestrutura dos compósitos **CV** e **CH**, de forma a evidenciar a influência do processo de fabricação empregado na confecção dos materiais compósitos e outros parâmetros importantes nas características finais do produto, tais como a presença de bolhas e vazios, qualidade das interfaces do laminado, dentre outras. Em seguida são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos para as duas configurações pesquisadas. Esses resultados são tanto para os materiais envelhecidos (**CHE** e **CVE**) como os para os materiais não-envelhecidos (**CH** e **CV**). Além disso, também são expostos estudos das características da fratura obtidas, em nível macroscópico, nos ensaios acima relacionados.

4.1 – Estudo da microestrutura dos compósitos CH e CV no estado não-envelhecido.

Por meio de microscopia ótica e eletrônica de varredura foram realizados estudos apurados da microestrutura dos compósitos referidos com o objetivo de observar a influência do processo de fabricação **hand lay-up** na qualidade das interfaces e, conseqüentemente, na resistência mecânica dos compósitos híbridos.

A figura 4.1 demonstra aspectos da microestrutura do **CH**, feita através de microscópio óptico, ressaltando a configuração do compósito.

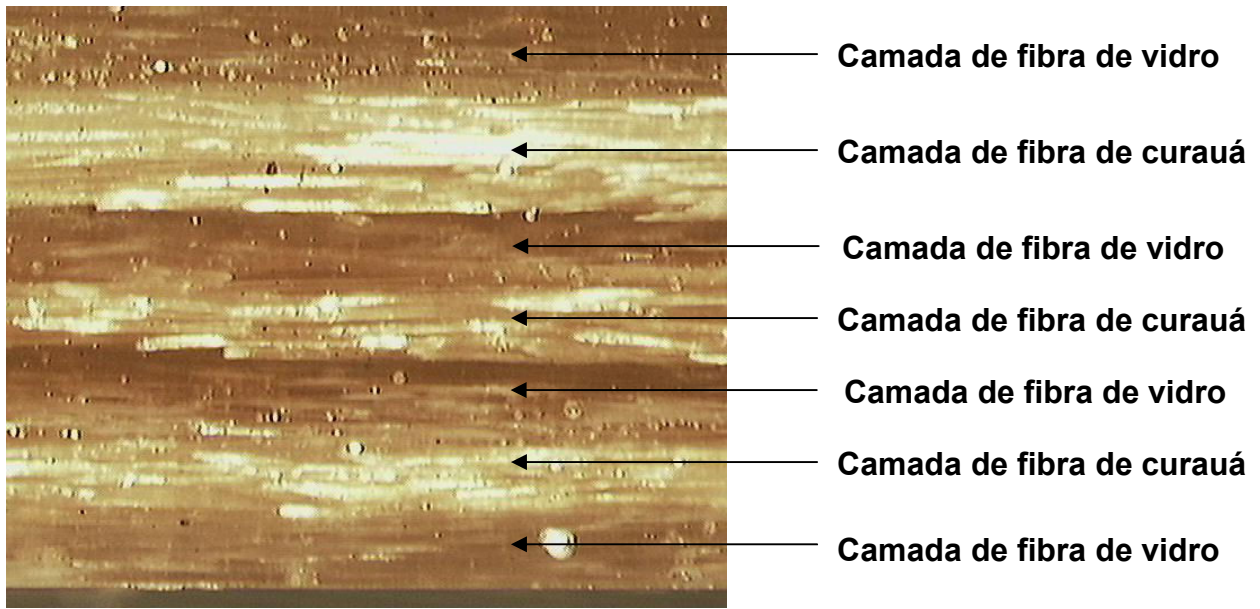


Figura 4.1 – Configuração do CH - Corte em sua secção transversal (7x).

O comportamento da resina com relação ao processo de impregnação, por exemplo, regiões com concentração de resina ou com concentração de fibras e a existência de defeitos oriundos do processo de fabricação, como bolhas e vazios, desalinhamento das fibras contínuas de curauá, podem ser observados nas figuras 4.2, 4.3 e 4.4.

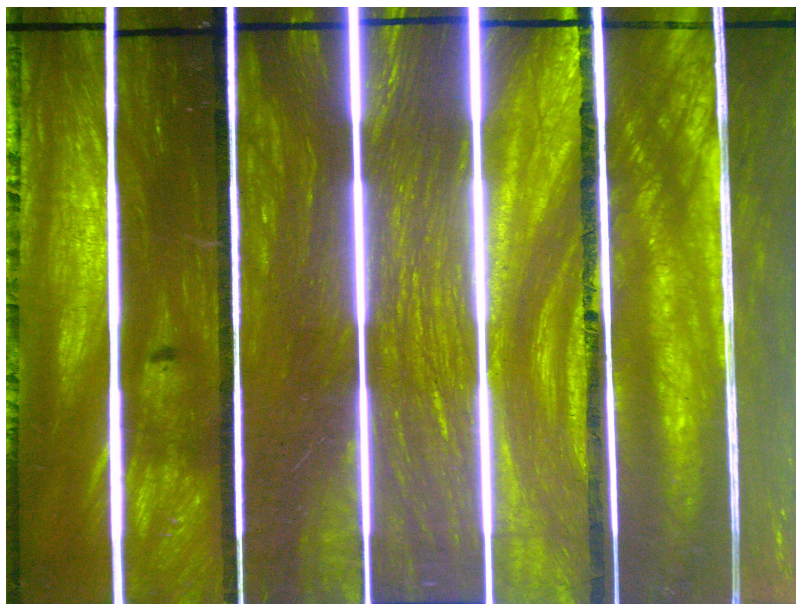


Figura 4.2 – Desalinhamento das fibras de curauá após a confecção do compósito CH.

A figura 4.3 evidencia a presença de várias bolhas em todo o compósito, por consequência do processo de fabricação.

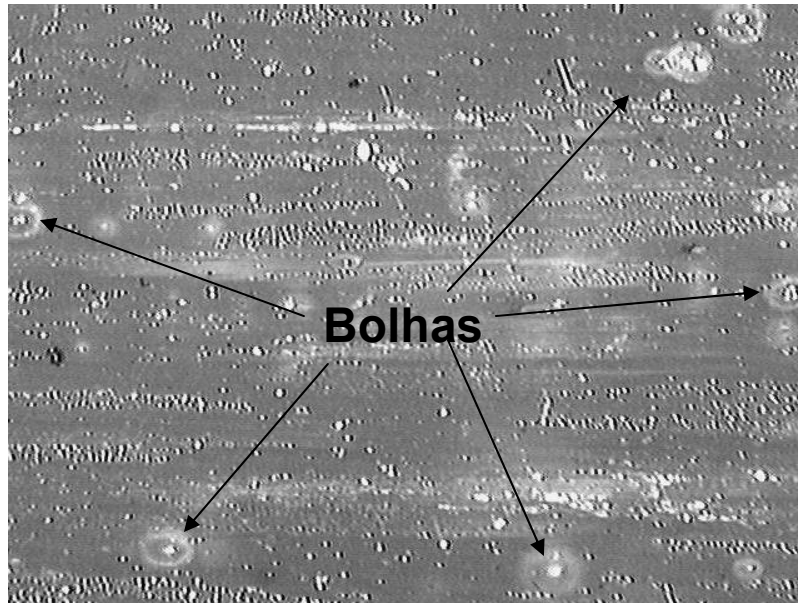


Figura 4.3 – Presença de bolhas no composto vidro (25x).

Com base nessas representações, é observado que o processo de fabricação escolhido, extremamente artesanal, origina distribuição não uniforme das fibras (desalinhamento com relação á aplicação da carga), ocasionando áreas ricas em fibras e outras ricas em resina, o que influencia as propriedades mecânicas do composto laminado **CH**.

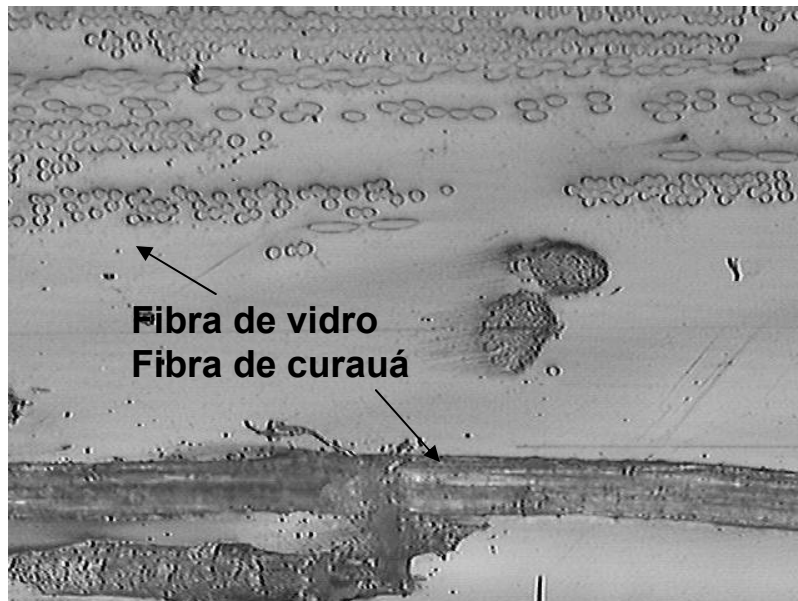


Figura 4.4 – Distribuição das fibras de vidro e de curauá e interface ricas em resina após a impregnação (100x).

4.2 – Densidade volumétrica e percentual de volume de fibras

A densidade volumétrica dos compósitos é apresentada na tabela 4.1. Como esperado, a substituição da fibra de vidro pela fibra natural promoveu decréscimo na densidade do laminado híbrido (diferença de 5,4% comparada ao **CV**), devido à menor densidade volumétrica da fibra natural.

Tabela 4.1 – Densidade volumétrica dos compósitos.

Laminado	CV	CH
Densidade (g/cm ³)	1,47	1,39

Os resultados do ensaio de calcinação são apresentados na figura 4.5. O compósito de fibra de vidro possui um baixo teor de fibras e conseqüentemente um alto percentual de resina o que condiz com os valores geralmente obtidos em processos de laminação manual e utilizando mantas de fibras curtas. Já o teor de vazios pode ser considerado baixo. O teor de fibra de vidro no **CH** foi de 12,6% (5% a menos que no **CV**), não sendo possível determinar a fração volumétrica da resina, da fibra de curauá e dos vazios. Em uma análise qualitativa da microestrutura (por microscopia ótica) foi possível observar que o percentual de vazios foi próximo para os dois compósitos.

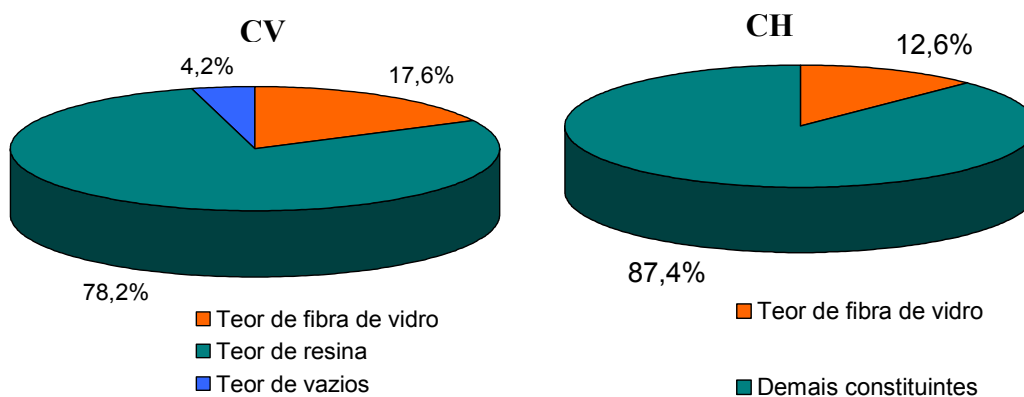


Figura 4.5 – Resultados do ensaio de calcinação para o **CV** e **CH**.

4.3 – Estudo da perda de massa causada pelo envelhecimento acelerado.

Os percentuais de perda de massa dos compósitos expostos ao envelhecimento são apresentados na figura 4.6. Os mesmos são resultados de valores médios obtidos nos corpos-de-prova através de pesagem semanal. O cálculo da perda em cada laminado, após 1512 horas de exposição à radiação UV intercaladas com um período de 6 horas de exposição de vapor d'água, é definido pela lei de difusão de Fick como porcentagem em massa seca, expressa pela equação:

$$M\% = \left| \frac{Ma - Ms}{Ms} \right| * 100$$

Onde: Ma = massa da amostra (g)

Ms = massa da amostra seca (g)

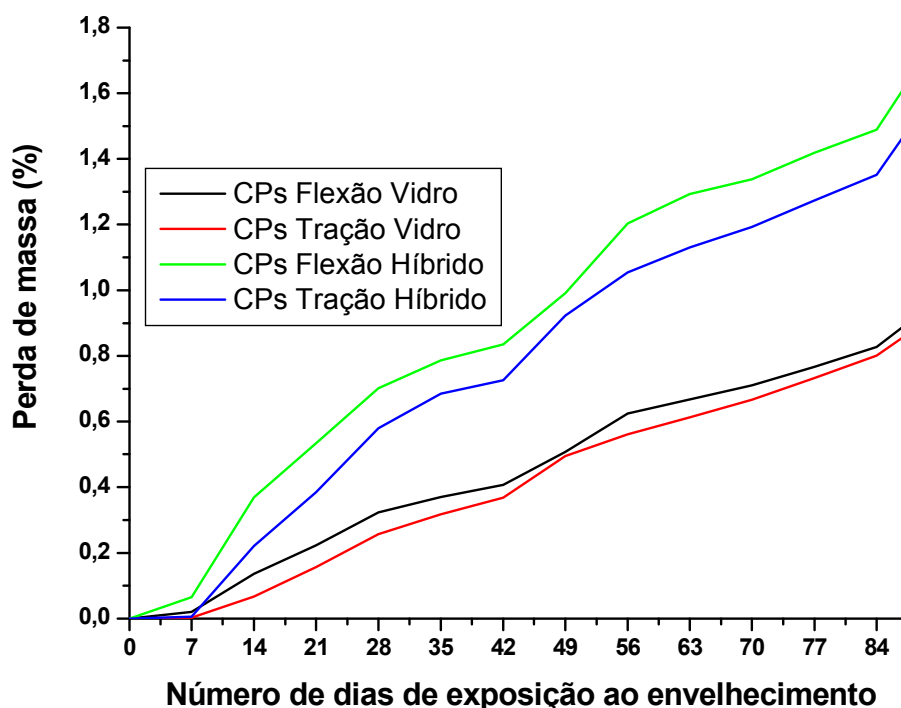


Figura 4.6 – Perda de massa no ensaio de envelhecimento acelerado.

Como esperado, o laminado híbrido obteve uma perda maior devido principalmente a degradação acentuada da fibra de curauá, pois esta é de origem orgânica, em relação a fibra de vidro. Esta perda ocorre, também, devido à degradação da resina e conseqüente perda de pequenas quantidades de fibra localizadas na face exposta ao envelhecimento, conforme mostrado na figura 4.7.

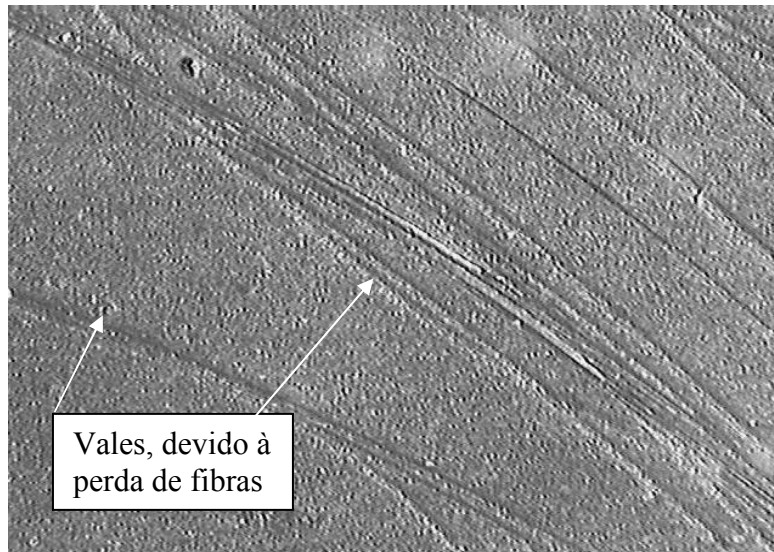


Figura 4.7 – Perda de fibras na face exposta ao envelhecimento (30x).

A microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram às técnicas escolhidas para investigar a influência do condicionamento de envelhecimento no mecanismo de adesão interfacial fibra/resina dos compósitos. Na figura 4.8 mostra-se a degradação da colagem interfacial fibra/resina do laminado submetido ao condicionamento na câmara de envelhecimento, onde os compósitos sofrem, em algumas partes, a degradação na interface fibra/matriz. Isto sugere que a absorção da umidade ocorre por difusão nesta região.

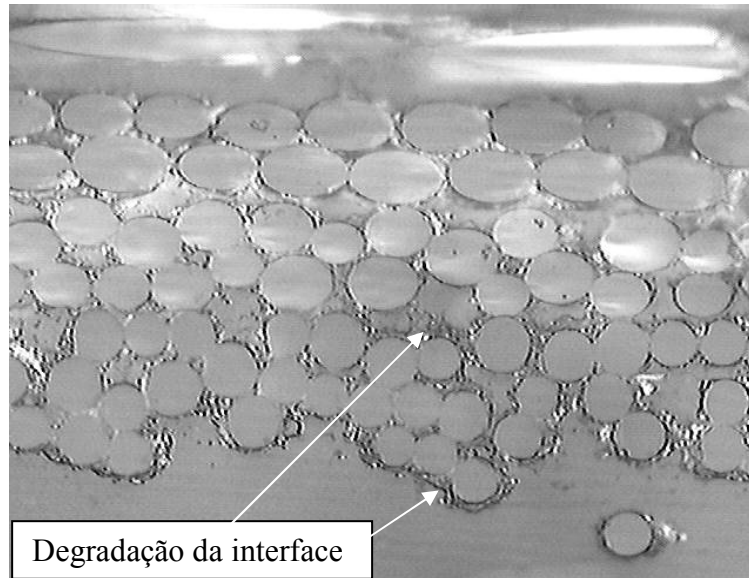


Figura 4.8 – Degradação da interface fibra/matriz (500x).

Também é verificado que o tipo de degradação originada pela radiação é diretamente na região de exposição, onde este tipo de degradação só se propaga quando a região anteriormente exposta é totalmente degradada. Mostra-se na figura 4.9 uma região não degradada pela radiação UV, já que a mesma encontra-se em uma camada interna do laminado e adjacente à camada exposta a essa radiação.

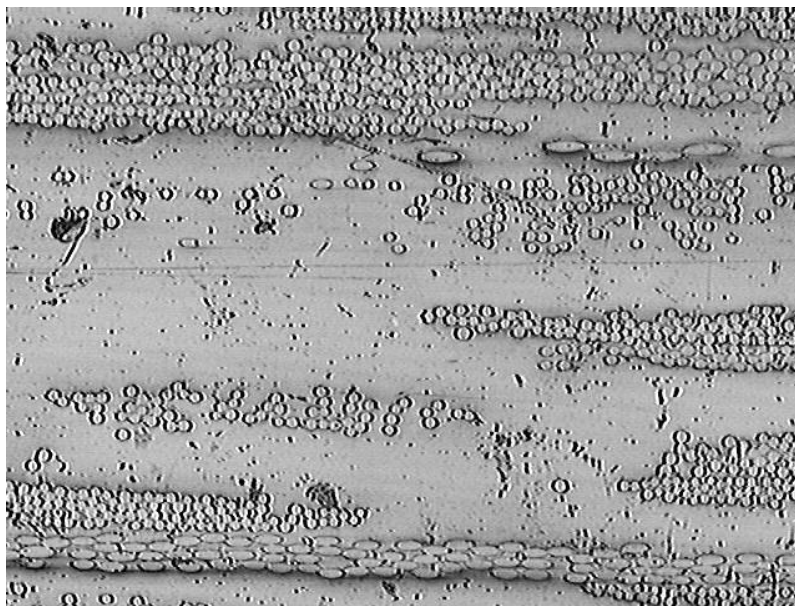


Figura 4.9 – Região não afetada pela radiação UV. CVE - (100x).

Já na região onde sofre a radiação, a degradação é facilmente perceptível, pois a sua coloração e rugosidade são alteradas, conforme mostrado na figura 4.10.

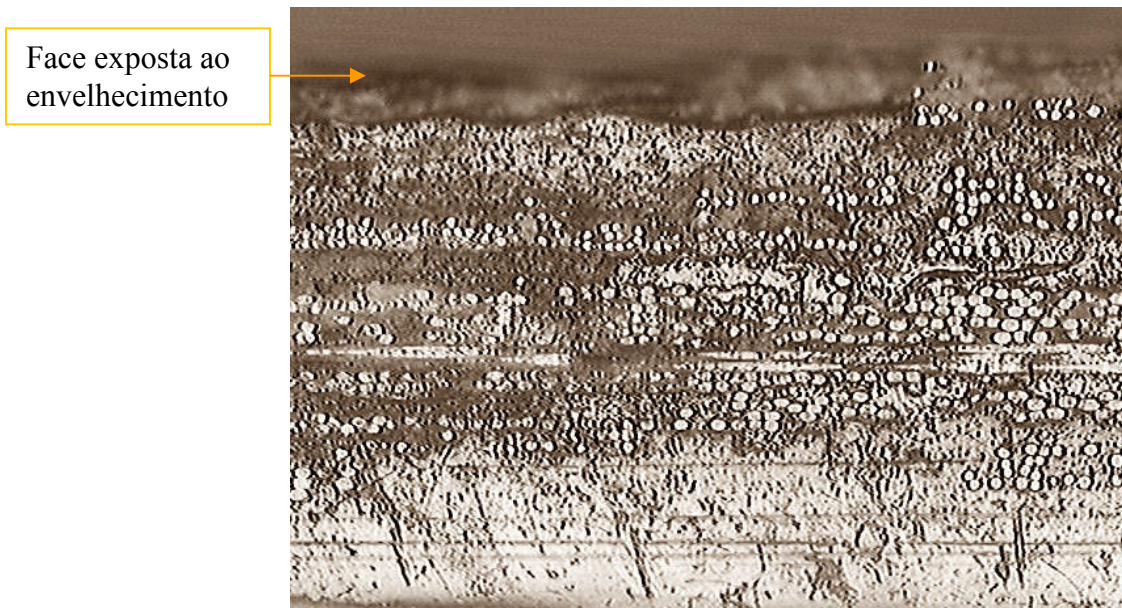


Figura 4.10 – Região afetada pela radiação, seção transversal do corpo-de-prova (100x).

Conclui-se que o processo de envelhecimento por ciclos de radiação e vapor d'água aquecido fragilizam a interface fibra/resina. Isto sugere que a retirada da umidade absorvida na operação com vapor d'água, pode ter provocado o encolhimento da matriz pela alteração dos volumes livres do polímero.

4.4 – Ensaio de tração uniaxial no compósito laminado de fibra de vidro (CV) no estado original

Os valores médios obtidos para a resistência última à tração, para o módulo de elasticidade longitudinal (medido na direção de aplicação da carga) e para a deformação de ruptura, para o CV, são mostrados na tabela 4.2, bem como as dispersões percentuais que de modo geral são baixas. Essa característica é peculiar aos compósitos poliméricos somente a base de fibras de vidro. Ressalta-se que as dispersões se referem à diferença absoluta entre os resultados obtidos para cada parâmetro.

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas do CV - Tração uniaxial.

Propriedades mecânicas	Valores médios	Dispersões (%)
Resistência última (MPa)	93,89	7,47
Módulo de elasticidade (GPa)	2,21	4,07
Deformação de ruptura (%)	4,00	7,5

4.4.1 – Característica da fratura do CV submetido à tração uniaxial

Na figura 4.11 são apresentados corpos-de-prova pós-ensaio do compósito CV. Observa-se que a fratura foi bastante localizada, permanecendo o corpo-de-prova sem grandes variações nas regiões distantes da fratura final.



Figura 4.11 – CPs pós-ensaio do compósito CV submetidos à tração uniaxial.

A fratura do compósito CV ocorreu de forma frágil com uma deformação de no máximo 4%. Na Figura 4.12 é mostrada uma micrografia ótica de uma região próxima à fratura final, onde é possível visualizar a propagação de uma microfissura entre as camadas de fibras de vidro. Inicialmente a mesma se propaga perpendicularmente à direção da carga e logo em seguida a mesma propaga-se no sentido do carregamento (longitudinalmente), onde há um “descolamento” da fibra com relação à matriz, caracterizando uma fratura adesiva.

O compósito CV não apresentou delaminação entre as camadas, fato já esperado uma vez que o mesmo é formado apenas por mantas de fibras de vidro o que origina pouca discrepância entre as tensões interlaminares.

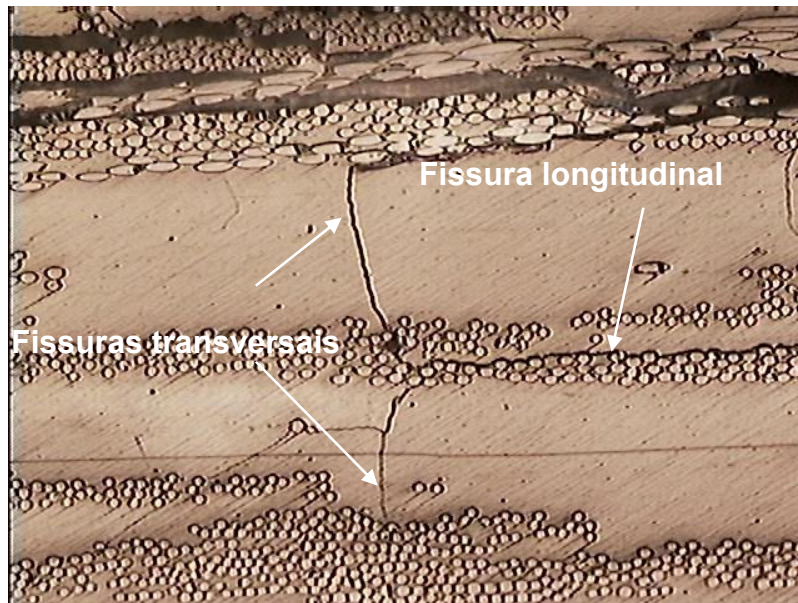


Figura 4.12 – Região próxima à fratura final de tração uniaxial CV (100x).

4.5 – Ensaio de tração uniaxial no compósito híbrido (CH) na condição seca

Os valores médios obtidos para resistência última à tração, para módulo de elasticidade longitudinal e para deformação de ruptura, são mostrados na tabela 4.3, bem como, os respectivos percentuais de dispersão. Observa-se da tabela 4.3 que as dispersões em geral são consideradas baixas para o caso de presença de hibridização, ou seja, presença de fibras com propriedades físicas e mecânicas bem diferentes. Esse fato é suficiente para se esperar uma influência direta na resposta do compósito híbrido. No caso do CH pode-se concluir que a qualidade das interfaces entre as camadas do laminado e, bem como, entre as fibras de curauá e a matriz, prestaram relevante papel nos dados encontrados para as dispersões.

Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas do CH - Tração uniaxial.

Propriedades mecânicas	Valores médios	Dispersões (%)
Resistência última (MPa)	92,15	6,69
Módulo de elasticidade (GPa)	2,34	4,27
Deformação de ruptura (%)	3,68	7,20

4.5.1 – Característica da Fratura do CH submetido à tração uniaxial

Na Figura 4.13 é demonstrado que a fratura no laminado **CH** ocorreu de forma frágil, perpendicular ao sentido da aplicação da carga e dentro da área útil do corpo-de-prova, comportamento semelhante ao descrito anteriormente no laminado de fibra de vidro (**CV**).



Figura 4.13 – CPs de tração uniaxial - **CH** após-ensaio.

Na figura 4.14 apresenta-se a superfície de fratura de um corpo-de-prova de tração do **CH** onde as camadas de fibras de vidro e curauá são facilmente identificadas. A fratura apresenta-se totalmente plana com relação à direção de aplicação da carga, caracterizando uma fratura frágil ou quebradiça e extremamente localizada. Um maior detalhamento do comportamento descrito anteriormente é observado na figura 4.15, obtida por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Observa-se ainda a ausência de delaminação entre as camadas. Onde também é possível observar a presença de vários “furos” ocasionados pelo arranque de fibras de curauá da matriz, ou seja, desaderência na interface fibra/matriz. Observa-se, também, a ruptura das fibras de vidro e de curauá bem como a ausência de delaminação entre as camadas.

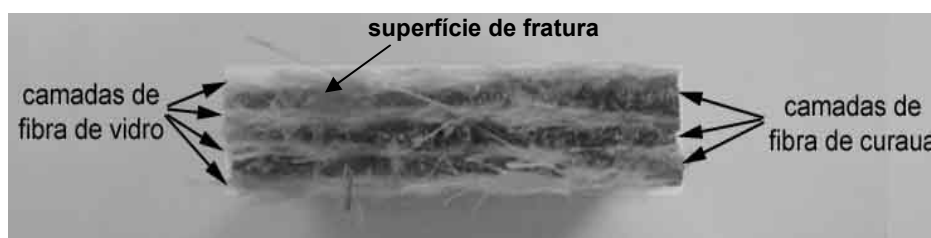


Figura 4.14 – Superfície de fratura - Tração uniaxial **CH**.

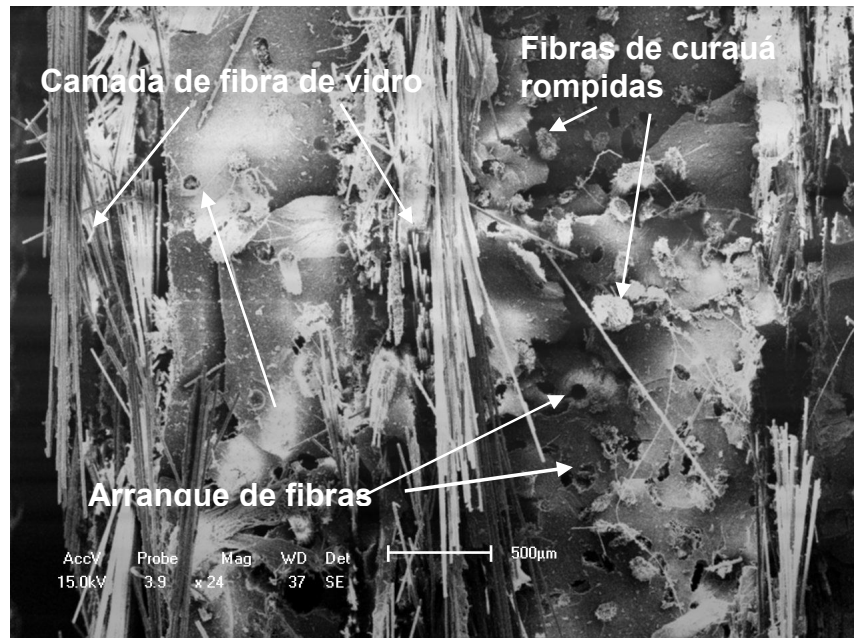


Figura 4.15 – Superfície de fratura de um CP de tração do CH obtida através de MEV.

Estas características são de suma importância na avaliação do laminado híbrido, pois mostram que há uma boa aderência entre as camadas de fibras de vidro (mantas) e curauá (contínuas), apesar da forte discrepância entre as propriedades mecânicas destas. Este comportamento está intrinsecamente relacionado com a distribuição das tensões interlaminares (entre camadas). Neste sentido, ressalta-se a importância da configuração idealizada para o laminado híbrido.

Em uma análise micrográfica da fratura, na figura 4.16 é mostrada a propagação de microfissuras internas às camadas de fibras de curauá, onde se verifica que ocorreu em alguns casos, o não rompimento desta. Observa-se, também a presença de fratura adesiva (desaderência na interface fibra/matriz) e fraturas coesivas na matriz e nas fibras de vidro. Essa característica de fratura é mais bem observada na figura 4.17.

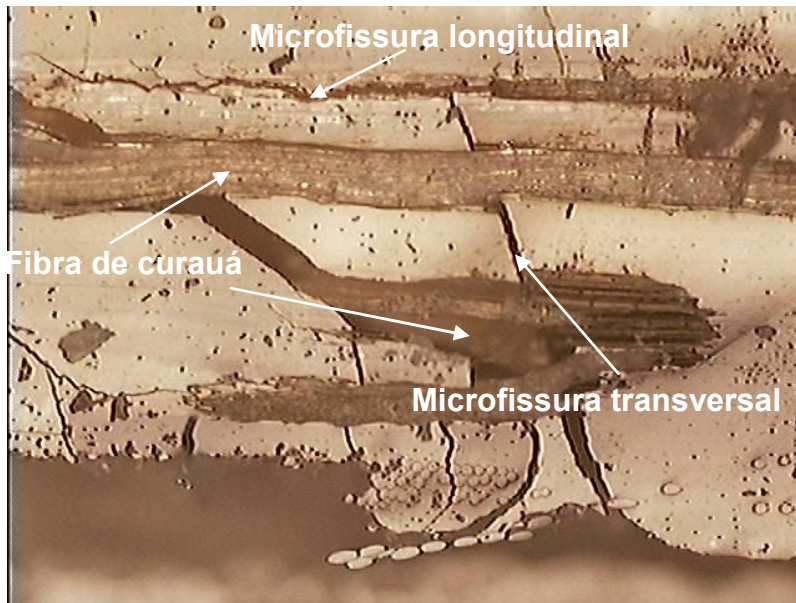


Figura 4.16 – Região próxima à fratura no **CH** (200x)

Outro aspecto observado na característica da fratura diz respeito à aderência interfacial. Na figura 4.18 observa-se a boa aderência entre a matriz e a fibra de vidro. Isso é demonstrado que mesmo após a fratura a fibra de vidro continua bem impregnada.

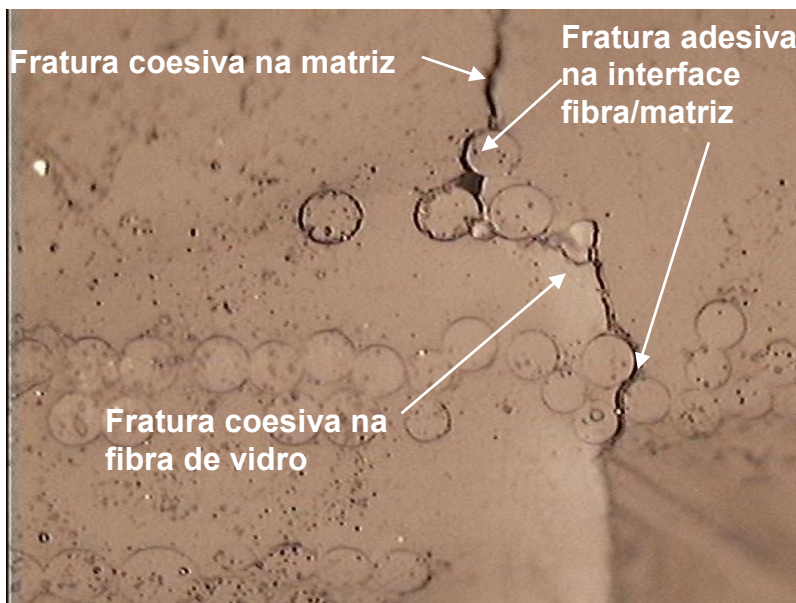


Figura 4.17 – Presença de fratura adesiva e coesiva no **CH** (500x)

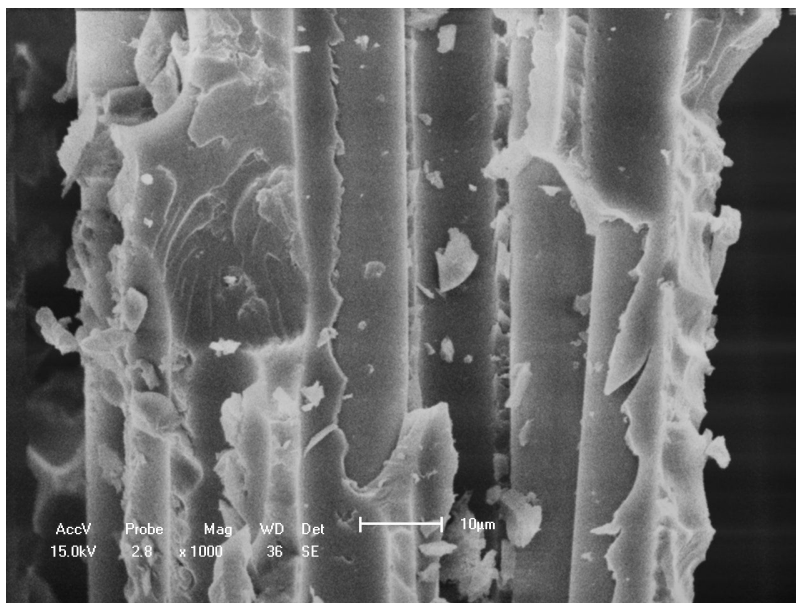


Figura 4.18 – Aspecto da aderência da resina á fibra de vidro no compósito híbrido (CH).

4.6 - Ensaio de flexão em três pontos no laminado de fibra de vidro (CV) no estado original

Os valores médios obtidos para a resistência à flexão, para módulo de elasticidade e para deflexão máxima, são mostrados na tabela 4.4, bem como, os respectivos percentuais de dispersão. Igual que na tração uniaxial as dispersões encontradas nos ensaios de flexão em três pontos também são consideradas baixas.

Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas do CV - Flexão em três pontos.

Propriedades mecânicas	Valores médios	Dispersões (%)
Resistência última (MPa)	152,39	9,86
Módulo de elasticidade (GPa)	6,81	5,8
Deflexão Máxima (%)	2,43	5,76

4.6.1 – Característica da fratura do CV submetido à flexão em três pontos

Todos os corpos-de-prova apresentaram fratura característica por flexão, ou seja, fratura na camada externa tracionada. Foi registrada, também, a presença de cisalhamento na

linha neutra ocasionando fenda longitudinal nesta. Já na análise microscópica da fratura, foram observadas fraturas coesivas na matriz e presença de fratura adesiva, ou seja, desaderência na interface fibra/matriz, como pode ser observado na figura 4.19.

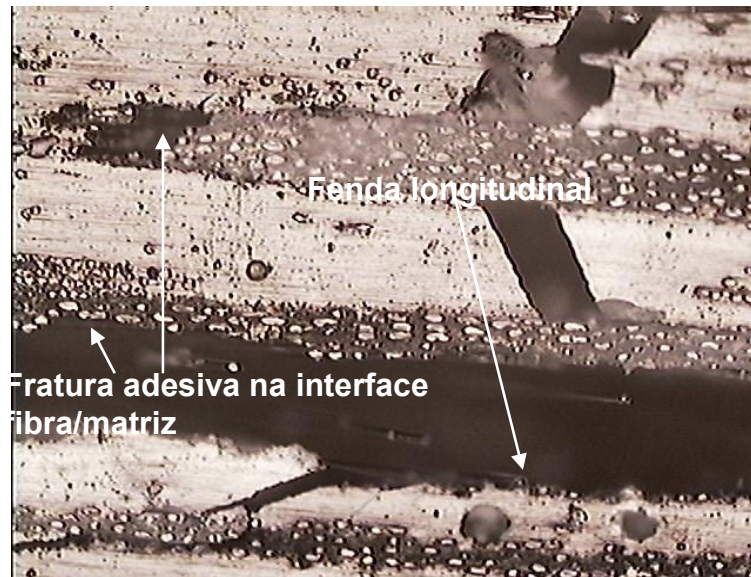


Figura 4.19 – Fenda longitudinal na linha neutra no CV (100x)

A fratura também foi caracterizada pela presença de uma fenda transversal originada na região trativa se propagando por várias camadas até a linha neutra, como pode ser observado com mais detalhe na figura 4.20.



Figura 4.20 – Fenda transversal na linha neutra no CV (50x)

O dano mais forte é observado nas camadas tracionadas. Não foi observada a presença de dano na região submetida à compressão.

4.7 - Ensaio de flexão em três pontos do laminado híbrido (CH) no estado original

Os valores médios obtidos para a resistência última à flexão, para módulo de elasticidade e para deflexão máxima, para CH, são mostrados na tabela 4.5, bem como, os percentuais de dispersão. Destaque se faz para os baixos valores encontrados para as dispersões, uma vez que a discrepância entre as propriedades mecânicas das fibras é grande o que pode levar à presença de grandes tensões interlaminares e conseqüentemente influir no comportamento final do compósito.

Tabela 4.5 - Propriedades mecânicas do CH - Flexão em três pontos.

Propriedades mecânicas	Valores médios	Dispersões (%)
Resistência última (MPa)	143,92	4,24
Módulo de elasticidade (GPa)	7,4	6,82
Deflexão Máxima (%)	2,03	6,4

4.7.1 – Característica da fratura do CH submetido à flexão em três pontos

A fratura do compósito laminado híbrido foi caracterizada pela presença de fratura por tração na camada externa de fibra de vidro, ver figura 21 a e b. A fratura foi bastante localizada não sendo observado delaminação entre as camadas. É possível visualizar a fratura na face trativa do corpo-de-prova e, bem como, sua propagação para o interior do mesmo em direção à linha neutra, caracterizando tipicamente fratura por flexão em três pontos.

Fendas longitudinais internas, e na segunda camada de fibra de vidro também foram detectadas. Estas fendas estão restritas na região de fratura final. Foi verificada, também, a existência de fratura transversal se propagando até a camada central de curauá.

Na figura 4.22 é evidenciada a presença de fratura adesiva, ou seja, desaderência na interface fibra/matriz na camada de fibra de vidro.

Neste ensaio foi observado, em alguns corpos-de-prova, que a fratura transversal se propaga até a camada de fibra de vidro, após a camada central de curauá, ou seja, a fenda transversal vai até a região comprimida. Este fenômeno é observado na figura 4.23.

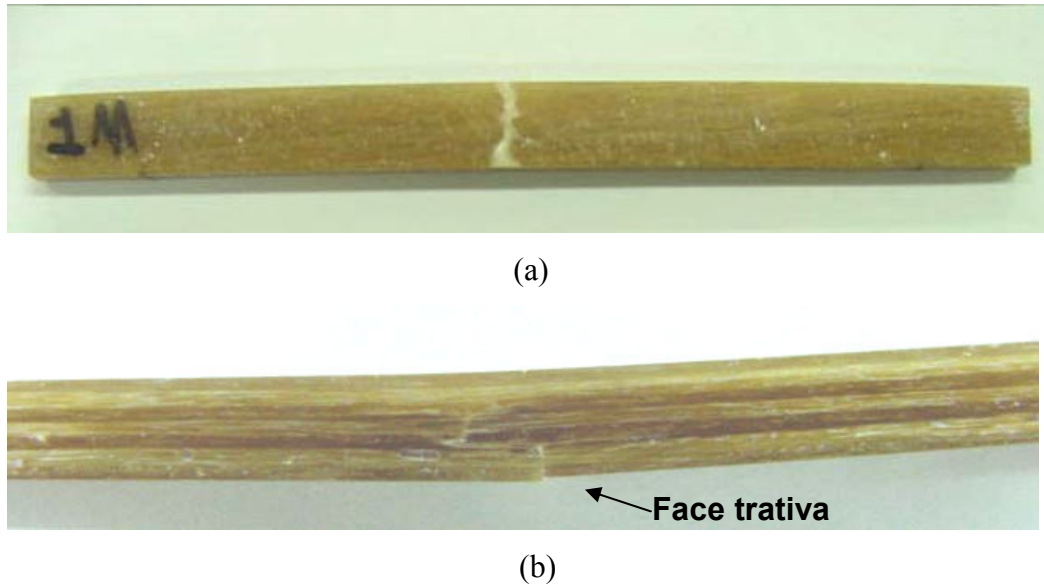


Figura 4.21 – CPs de flexão em três pontos pós-ensaio. (a) Largura e (b) lateral.

Não é observado dano nas camadas submetidas à compressão, somente às submetidas à tração. Estas características demonstram um bom desempenho dos compósitos frente ao carregamento em flexão em três pontos, e também que o processo de hibridização, ou seja, utilização de fibras naturais, não afeta tal comportamento.

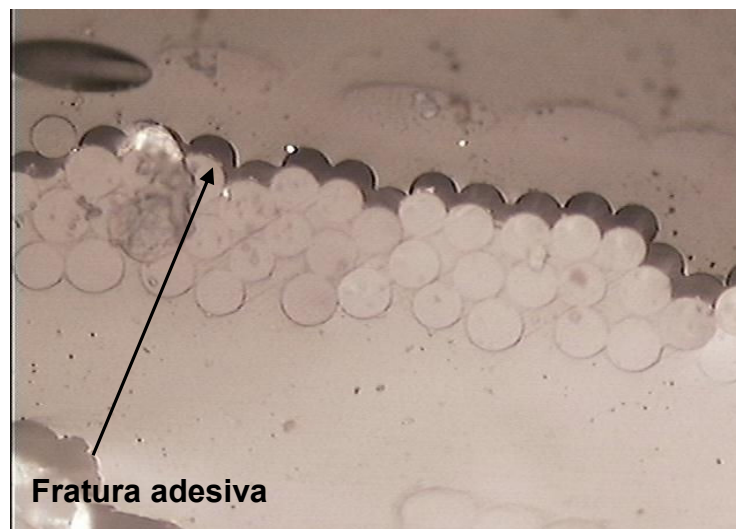


Figura 4.22 – Fratura adesiva na interface de fibra de vidro/matriz (500x)

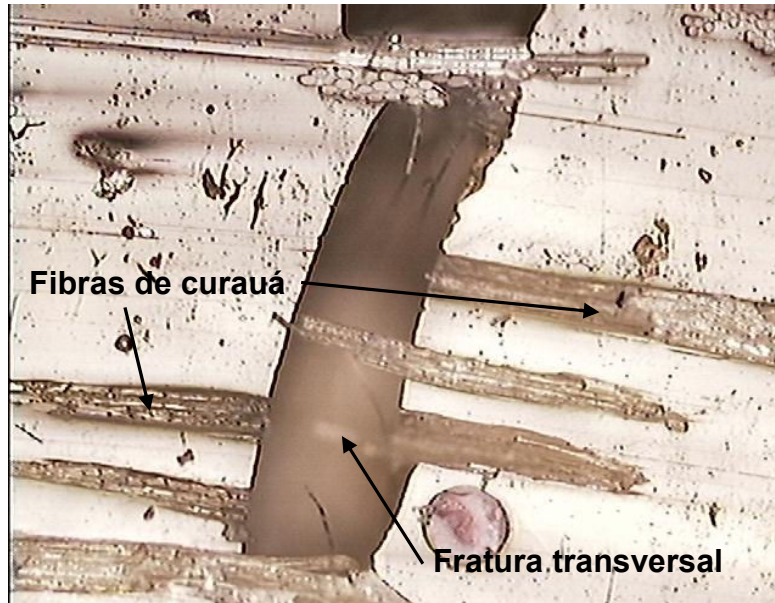
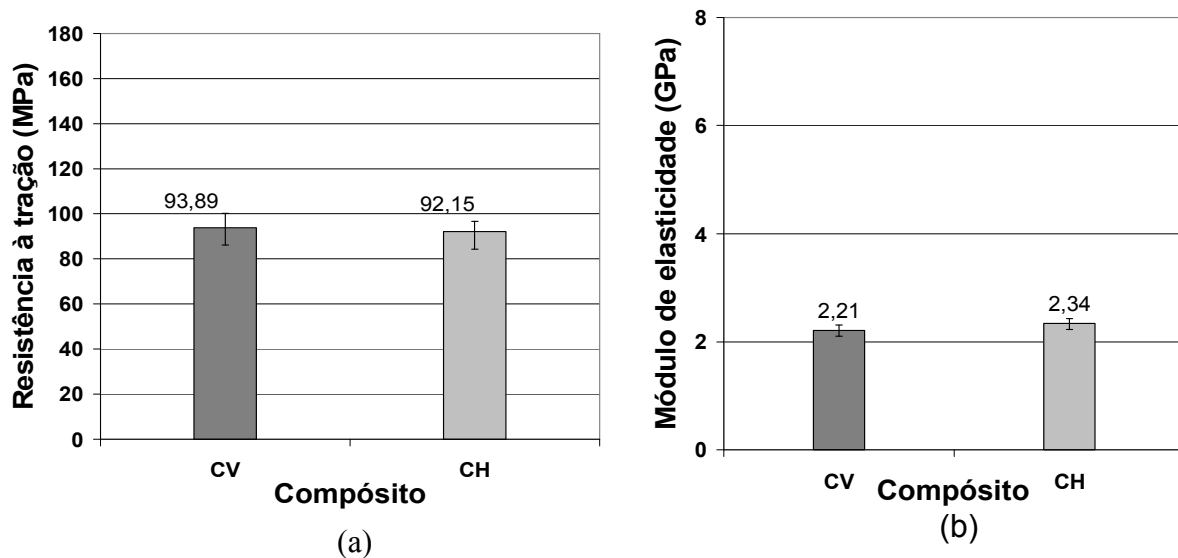


Figura 4.23 – Fenda transversal interna até a camada de fibra de vidro após a central de Curauá (200x)

4.8 – Comportamento em tração uniaxial do CV e CH no estado original

As propriedades mecânicas de resistência última à tração, módulo de elasticidade na direção de carga aplicada e deformação de ruptura (alongamento) são apresentadas na figura. 4.24. O desempenho do laminado híbrido foi muito próximo ao do laminado de fibras de vidro. Houve redução da resistência última (1,9%), aumento do módulo elástico (5,6%) e conseqüente redução da deformação (8,0%). Estes percentuais estão próximos das dispersões apresentadas pelos resultados e caracterizadas pelas barras verticais nos diagramas de barras.



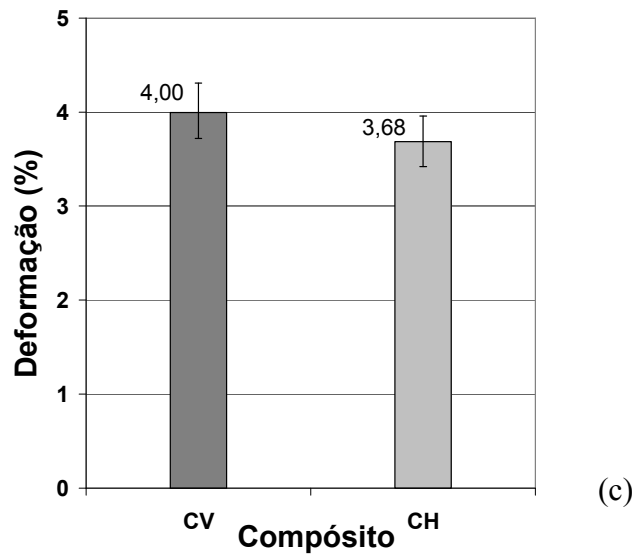


Figura 4.24 – Propriedades mecânicas em tração uniaxial dos compósitos de fibra de vidro e híbrido. (a) Resistência última à tração, (b) Módulo de elasticidade, (c) Deformação de ruptura (alongamento).

Considerando a substituição parcial das fibras de vidro por fibras naturais de menor resistência mecânica, pode-se dizer que os resultados obtidos para o laminado híbrido são satisfatórios. Este desempenho, obviamente, está também relacionado ao fato das fibras de curauá estarem alinhadas na direção do carregamento, onde se obtém a melhor eficiência na transferência de carga matriz/fibra.

4.9 – Comportamento em flexão em três pontos do CV e CH no estado original

As propriedades de resistência última à flexão, módulo elástico em flexão e deflexão máxima são apresentadas na figura 4.25. Tal como verificado no ensaio de tração o desempenho do laminado híbrido foi próximo ao do laminado de fibras de vidro. Neste caso, houve redução da resistência à flexão (5,5%), aumento do módulo elástico em flexão (8,6%) e redução da deflexão máxima (16,4%). No caso da resistência à flexão e do módulo elástico em flexão os percentuais de diferença estão na faixa das dispersões apresentadas pelos resultados (ver barras de erros nos gráficos da figura 4.25).

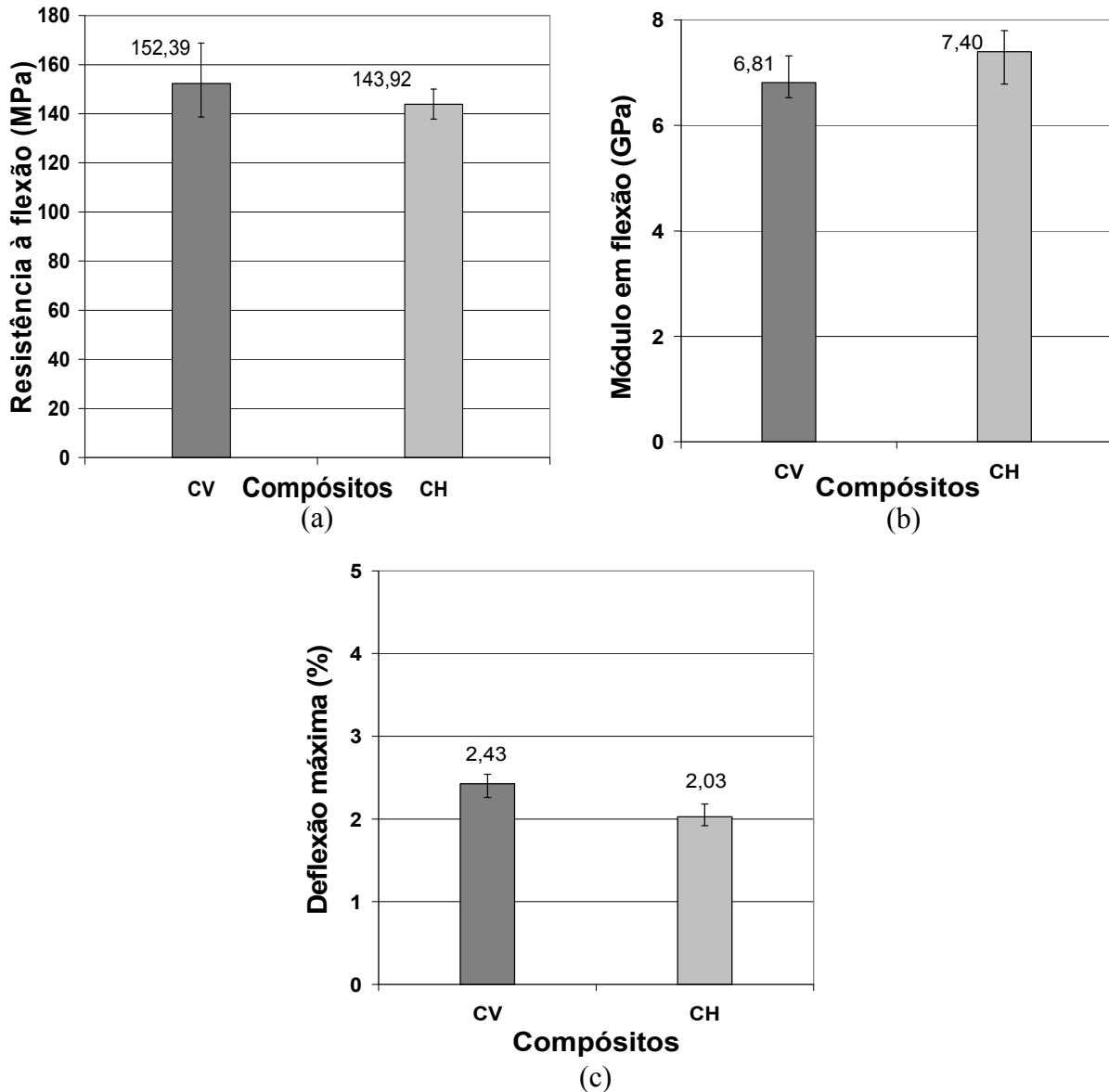


Figura 4.25 – Propriedades mecânicas em flexão dos compósitos: híbrido e de fibra de vidro. (a) Resistência à flexão, (b) Módulo de elasticidade em flexão, (c) Deflexão máxima.

Tal como no carregamento trativo, o bom desempenho do laminado híbrido na flexão em três pontos está relacionado ao uso das fibras contínuas de curauá, que maximizam a transferência de carga fibra/matriz, e também à forma de distribuição das camadas no laminado. Sabe-se que as camadas externas do laminado são muito influentes no comportamento em flexão, sendo assim foram utilizadas, propositadamente, mantas de fibras de vidro nestas camadas. Além de garantir um melhor desempenho mecânico ao laminado, às fibras de vidro são relativamente inertes ao ataque biológico, são impermeáveis à umidade e

possuem boa resistência a alguns agentes químicos e solventes (Twe, Liao, 2003; Kalaprasad e Kuruvilla, 1997), desta forma agem como “barreira” química protegendo as camadas internas de fibras naturais da ação do ambiente.

4.10 – Ensaio de tração uniaxial no compósito laminado de fibra de vidro no estado envelhecido (CVE)

Os CPs de prova após serem submetidos ao ensaio de envelhecimento acelerado foram ensaiados de acordo com o mesmo procedimento realizado aos CPs no estado original. Os valores médios obtidos para a resistência última à tração, para o módulo de elasticidade longitudinal (medido na direção de aplicação da carga) e para a deformação de ruptura (alongamento), para o CVE, são mostrados na tabela 4.6, bem como os percentuais de dispersões.

Essas dispersões são, também, consideradas baixas uma vez tratar-se de um compósito híbrido e submetido a um processo de envelhecimento ambiental acelerado, fatos que poderiam de alguma forma alterar tal característica.

Tabela 4.6 - Propriedades mecânicas CVE - Tração uniaxial.

Propriedades mecânicas	Valores médios	Dispersões (%)
Resistência última (MPa)	87,34	5,34
Módulo de elasticidade (GPa)	2,69	3,90
Deformação de ruptura (%)	3,12	10,74

4.10.1 – Característica da fratura do CVE submetido à tração uniaxial

Na figura 4.26 são apresentados corpos-de-prova pós-ensaio do laminado CVE. Observa-se que a fratura final foi localizada e a face do laminado exposta ao envelhecimento acelerado possui fibras de vidro aparentes devido à degradação da matriz (resina).

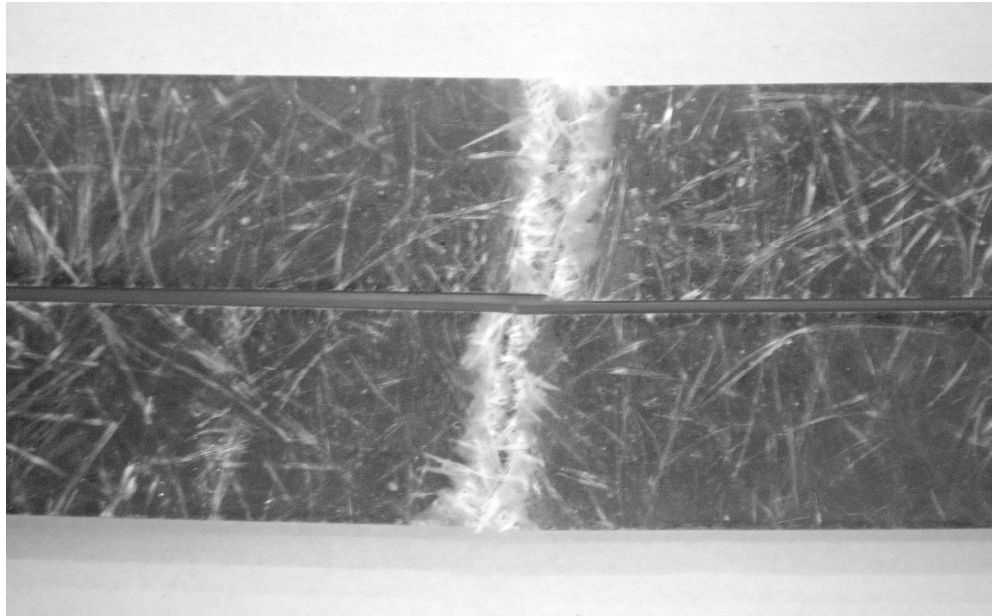


Figura 4.26 – Dois CPs de tração uniaxial de CVE pós-ensaio. Fibras de vidro aparentes na camada exposta ao envelhecimento.

Observa-se na figura 4.27 fissuras transversais à aplicação da carga ao longo de todo o comprimento da área útil do CP, o que não ocorreu nos CPs não-envelhecidos.

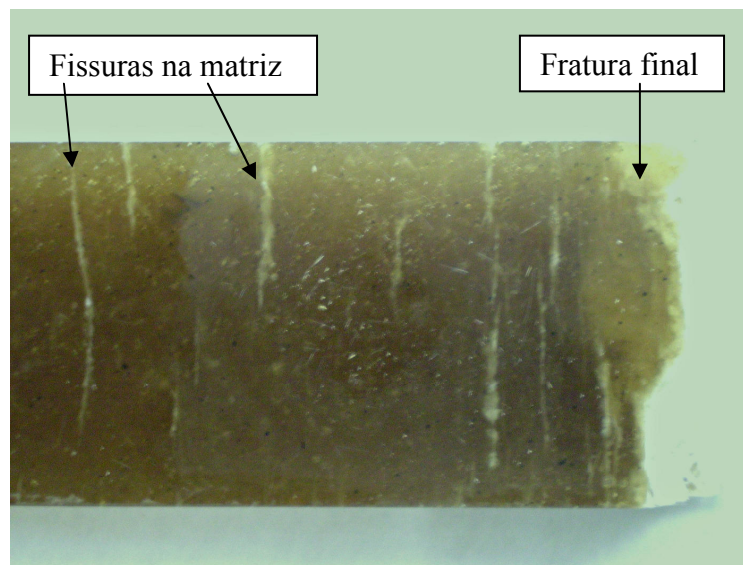


Figura 4.27 – Região de fratura final e fissuras na matriz

A fratura do compósito de fibras de vidro ocorreu de forma frágil com uma deformação de no máximo 3,12 %. Na figura 4.28 é mostrada uma micrografia ótica de uma região

próxima à fratura onde é possível visualizar a propagação de uma microfissura entre fibras de vidro com propagação perpendicular a aplicação da carga.

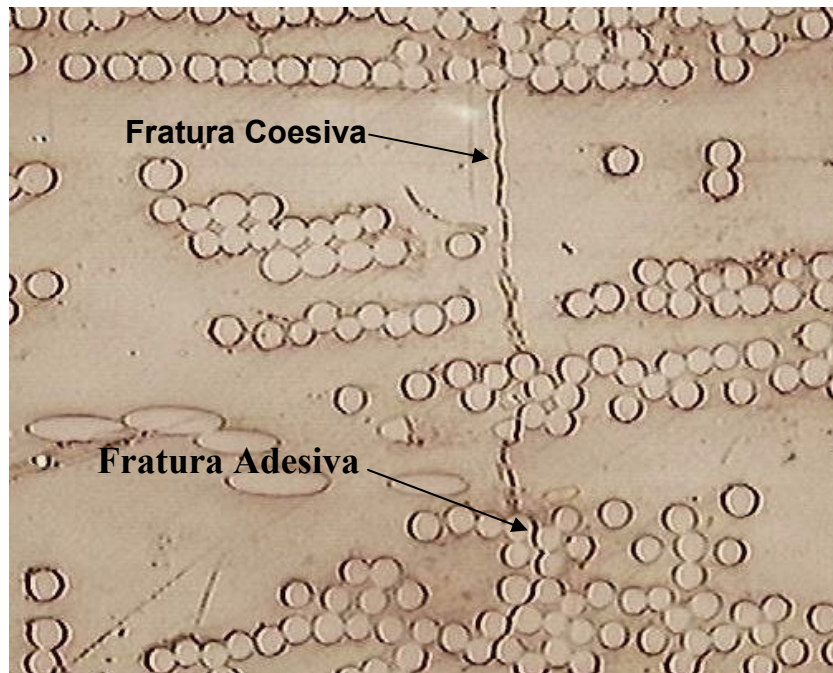


Figura 4.28 – Região próxima à fratura final na tração uniaxial CVE (200x).

Observa-se que as fraturas são dos tipos coesiva na matriz e adesiva na interface fibra/matriz, ou seja, onde há um “descolamento” da fibra com relação à matriz. O laminado de fibra de vidro (CVE) não apresentou delaminação entre as camadas.

Um estudo mais detalhado da influência do processo de envelhecimento na característica da fratura final do CVE pode ser visto através da Microscopia Eletrônica de Varredura. A figura 4.29 mostra a camada do corpo-de-prova submetida ao processo de envelhecimento, onde se observa a presença, em grande quantidade quando comparada ao CV, de feixes de fibras de vidro sem aderência da resina caracterizando a fratura adesiva devido à degradação da resina.

Na figura 4.30 pode-se destacar além da fratura adesiva a presença de “furos” na resina causada pelo processo de arranque de fibras.

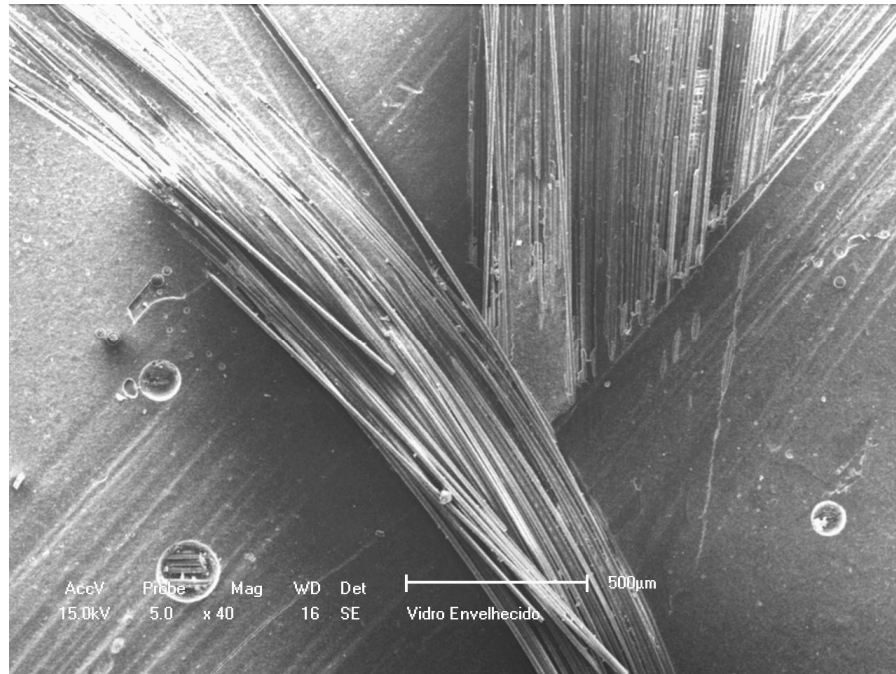


Figura 4.29 – Fratura adesiva na superfície exposta ao envelhecimento do CVE

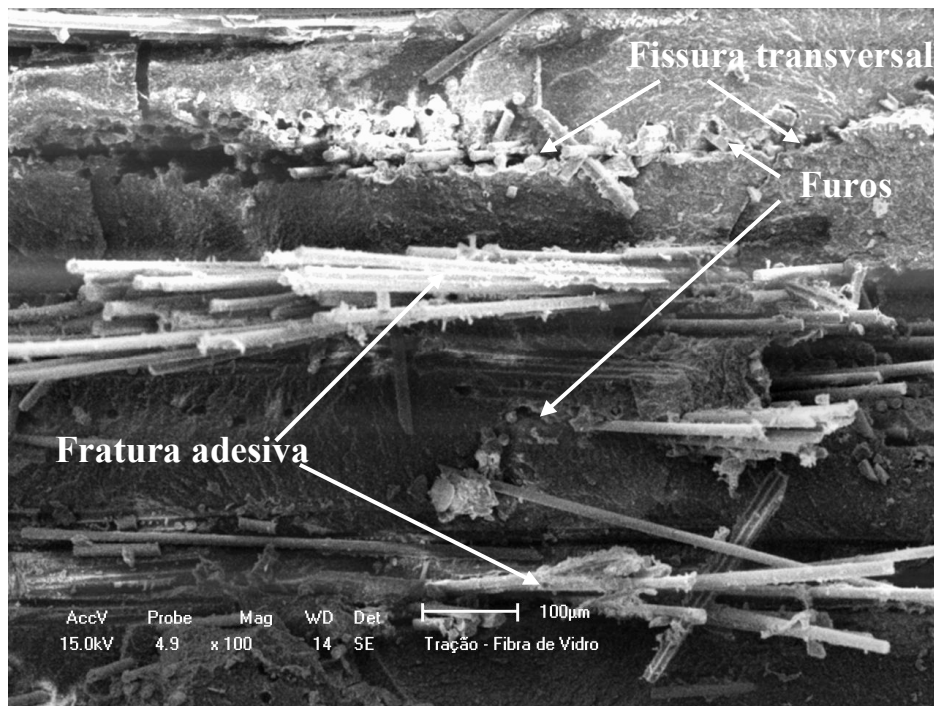


Figura 4.30 – Região de fratura do CVE

4.11 – Ensaio de tração uniaxial no compósito híbrido no estado envelhecido (CHE)

Os valores médios obtidos para resistência última à tração, para módulo de elasticidade longitudinal e para deformação de ruptura, são mostrados na tabela 4.7, bem como, os respectivos percentuais de dispersão. Observa-se da tabela 4.7 que as dispersões em geral são consideradas baixas para o caso de presença de hibridização, no entanto houve um acréscimo geral de 26 % se comparado ao do estado original. No caso do **CHE** pode-se concluir que a qualidade das interfaces entre as camadas do laminado e bem como entre as fibras de curauá e a matriz, prestaram relevante papel nos dados encontrados para as dispersões.

Tabela 4.7 - Propriedades mecânicas do **CHE** - Tração uniaxial.

Propriedades mecânicas	Valores médios	Dispersões%
Resistência última (MPa)	71,53	8,34
Módulo de elasticidade (GPa)	2,31	6,71
Deformação de ruptura (%)	3,06	9,31

4.11.1 – Característica da fratura do CHE submetido à tração uniaxial

Na figura 4.31 apresenta-se dois corpos-de-prova fraturados em tração uniaxial do laminado CHE onde a camada de fibra de vidro encontra-se parcialmente exposta devido à degradação da matriz. A fratura apresenta-se totalmente perpendicular com relação à direção de aplicação da carga, caracterizando uma fratura frágil ou quebradiça e extremamente localizada. Esse comportamento é igual ao descrito anteriormente para o laminado híbrido no estado original (**CH**).

Um maior detalhamento do comportamento descrito anteriormente é observado na figura 4.32, obtida por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

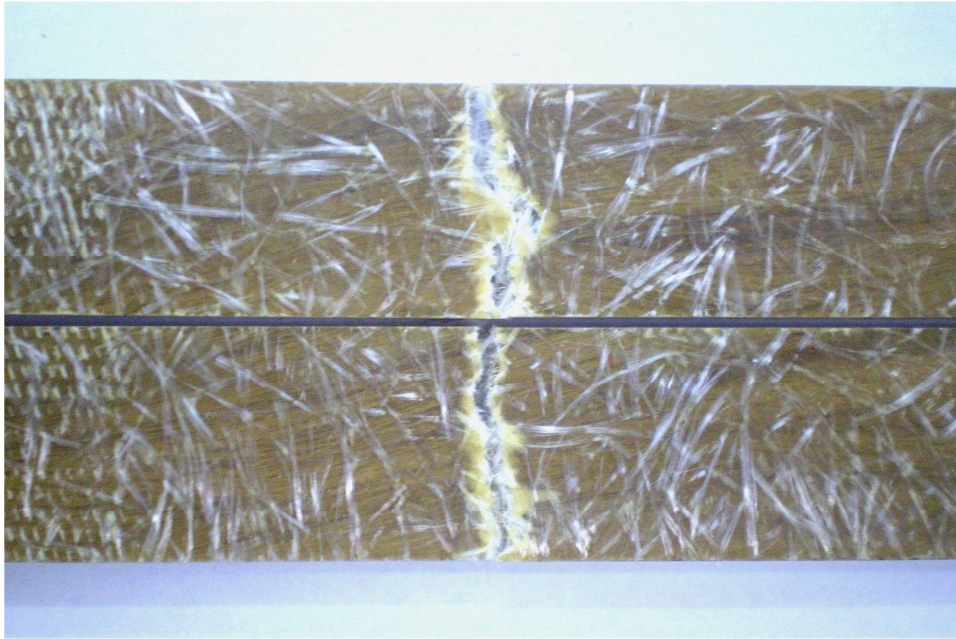


Figura 4.31 – Dois CPs do compósito **CHE** após ensaio de tração uniaxial.

Na mesma é possível observar a presença de vários “furos” ocasionados pelo arranque de fibras de curauá da matriz, ou seja, desaderência na interface fibra/matriz. Observa-se, também, a ruptura das fibras de vidro e de curauá bem como a ausência de delaminação entre as camadas.

Estas características são de suma importância na avaliação do laminado híbrido, pois mostram que há uma boa aderência entre as camadas de fibras de vidro (mantas) e curauá (contínuas), apesar da forte discrepância entre as propriedades mecânicas destas.

Em uma análise micrográfica da fratura, na figura 4.33 é mostrada a propagação de microfissuras perpendicular à aplicação da carga, onde se verifica que ocorreu em alguns casos, o não rompimento da fibra de curauá. Observa-se, também a presença de fratura adesiva (desaderência na interface fibra/matriz).

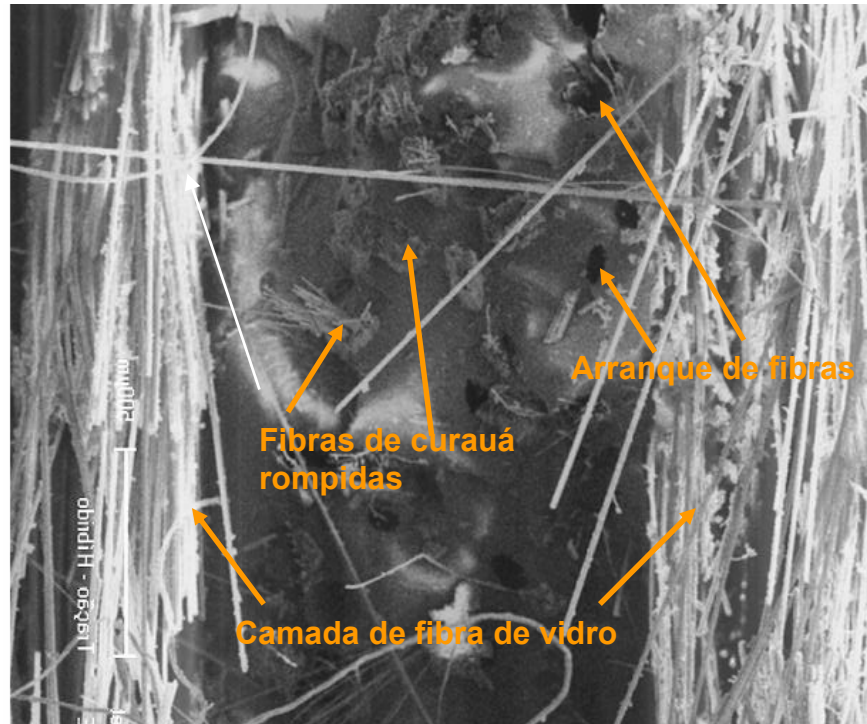


Figura 4.32 – Superfície de fratura de um CP de tração do CHE obtida através de MEV.

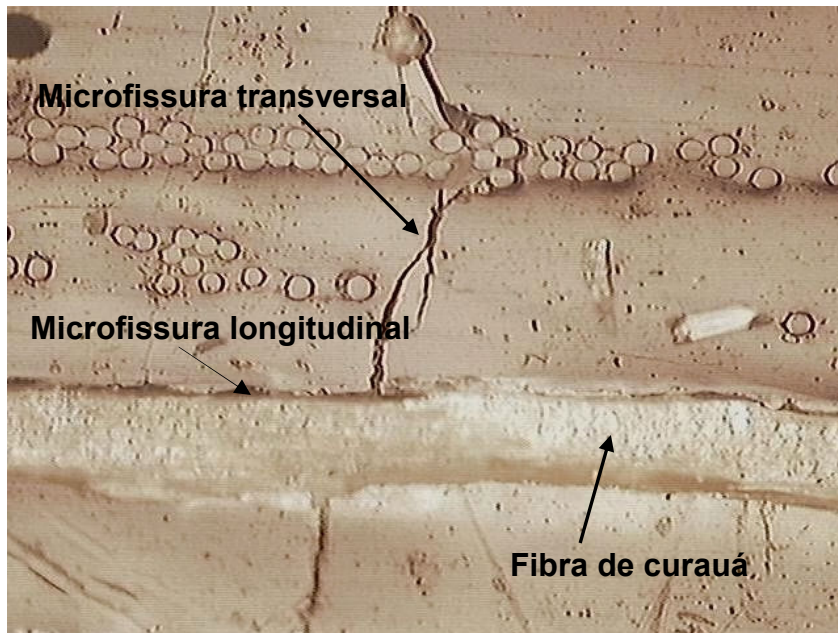


Figura 4.33 – Região próxima à fratura no CHE (200x)

Outro aspecto observado na característica da fratura diz respeito à aderência interfacial. Na figura 4.34 observa-se baixa aderência entre a matriz e a fibra de vidro. Este fenômeno ocorre devido ao ataque do envelhecimento ser principalmente na região de interface

fibra/matriz. O mesmo ocorre para a interface fibra de curauá/matriz, onde a quantidade de resina impregnada nas fibras após-ensaio é bastante pequena só intensificando a explicação anterior, pois as fibras de origem vegetal sofrem mais às ações do envelhecimento, conforme mostrado na figura 4.35.

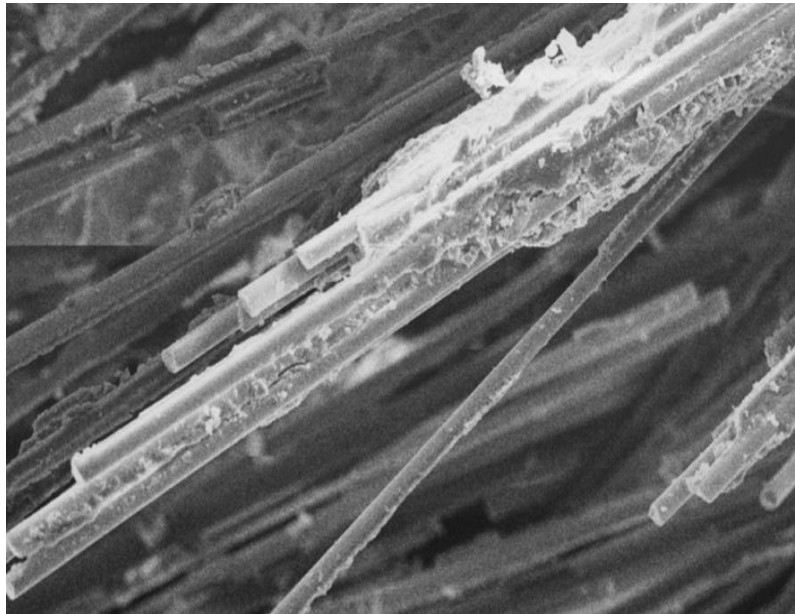


Figura 4.34 – Aspecto da aderência da resina à fibra de vidro no CHE.

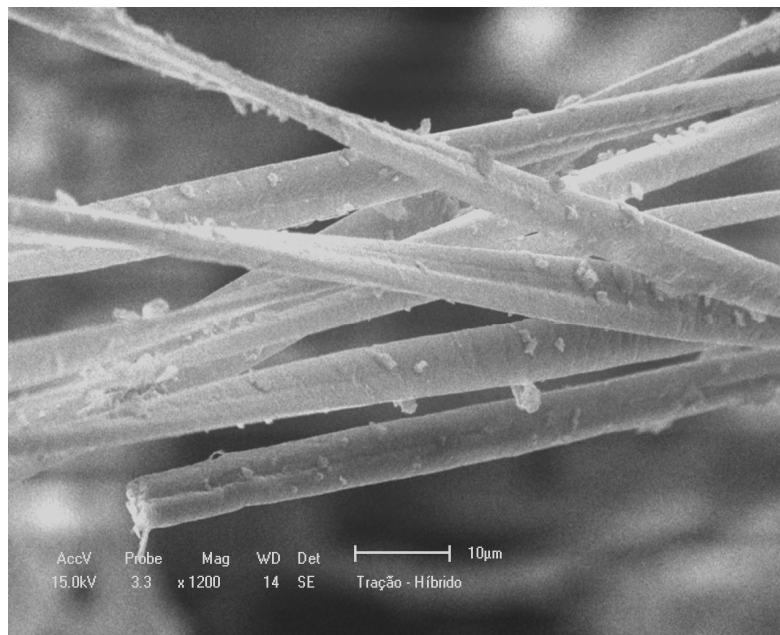


Figura 4.35 – Aspecto da aderência da resina à fibra de curauá no CHE.

4.12 - Ensaio de flexão em três pontos no laminado de fibra de vidro no estado envelhecido (CVE)

Os valores médios obtidos para a resistência à flexão, para módulo de elasticidade e para deflexão máxima, são mostrados na tabela 4.8, bem como, os seus percentuais de dispersão. A mesma característica dos baixos valores de dispersão também é observada para esse ensaio.

Tabela 4.8 - Propriedades mecânicas do CVE - Flexão em três pontos.

Propriedades mecânicas	Valores médios	Dispersões (%)
Resistência última (MPa)	181,72	8,05
Módulo de elasticidade (GPa)	7,36	10,53
Deflexão máxima (%)	2,13	7,51

4.12.1 – Característica da fratura do CVE submetido à flexão em três pontos

Todos os corpos-de-prova apresentaram fratura característica por flexão, ou seja, fratura na camada externa tracionada. Foi registrada, também, a presença de cisalhamento na segunda camada de fibra de vidro ocasionando fenda longitudinal nesta. Já na análise microscópica da fratura, foram observadas presenças de fratura adesiva, ou seja, desaderência na interface fibra/matriz, como pode ser observado na figura 4.36.



Figura 4.36 – Fenda longitudinal na segunda camada de fibras de vidro no CVE (100x)

A fratura também foi caracterizada pela presença de fissura transversal originada na região trativa se propagando por várias camadas até a linha neutra. A mesma provoca em sua propagação fraturas adesivas fibra/matriz e coesiva na matriz e nas fibras, como pode ser observado com mais detalhe na figura 4.37.

O dano mais forte é observado nas camadas tracionadas. Não foi observada a presença de dano na região submetida à compressão.

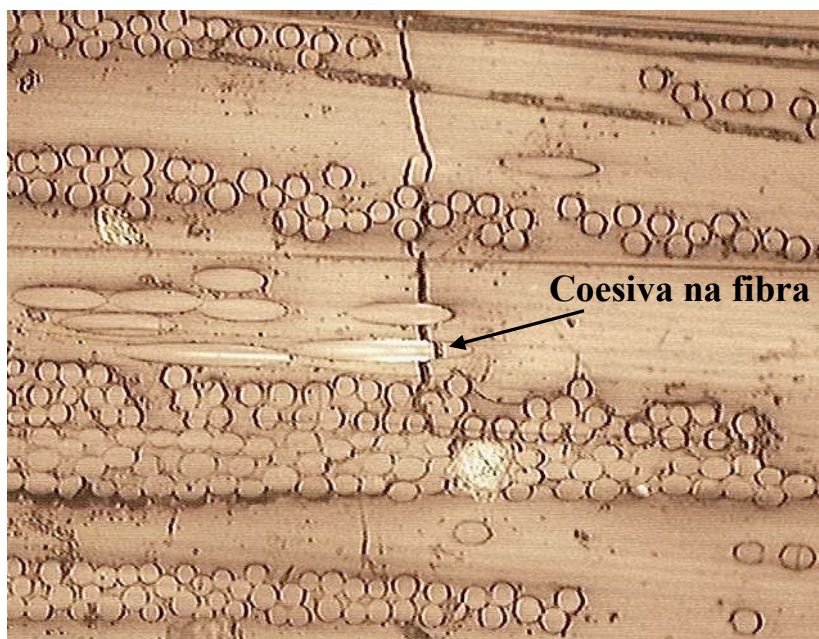


Figura 4.37 – Fissura transversal na camada tracionada no **CVE** originando uma fratura adesiva na interface fibra/matriz (200x).

Um estudo mais detalhado da influência do processo de envelhecimento na característica da fratura final sob o carregamento de flexão em três pontos do **CVE**, pode ser visto através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Figura 4.38 pode-se destacar além da fratura adesiva, a propagação de fendas longitudinais, próximo à região de fratura, e defeitos do processo de fabricação como bolhas, vazios, no **CVE**.

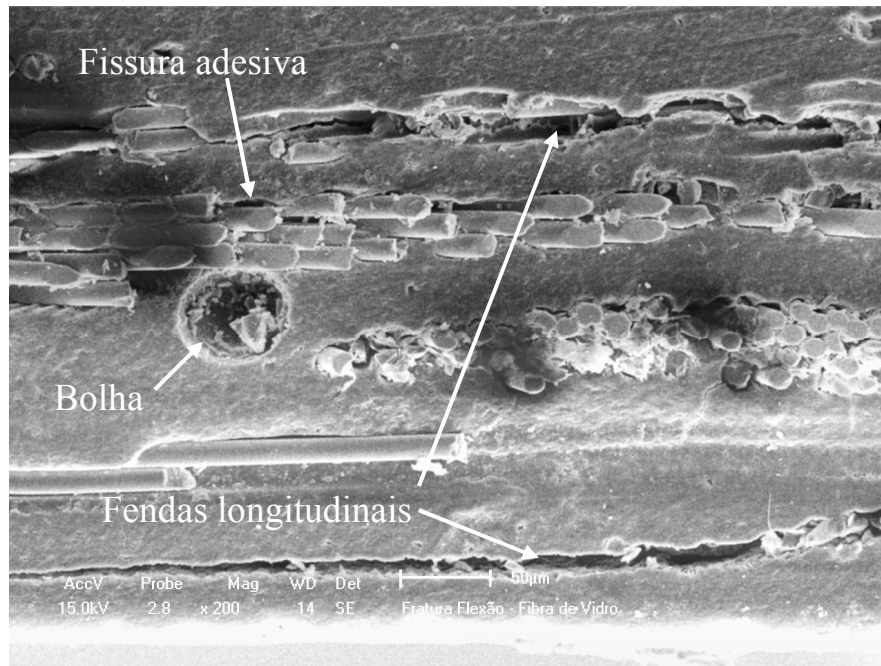


Figura 4.38 – Região de fratura do CVE após ensaio de flexão em três pontos

4.13 - Ensaio de flexão em três pontos do compósito CHE no estado envelhecido

Os valores médios obtidos para a resistência última à flexão, para módulo de elasticidade e para deflexão máxima, para CHE, são mostrados na tabela 4.9, bem como, os percentuais de dispersão. A mesma característica dos baixos valores de dispersão também é observada para esse ensaio, apesar de um pequeno acréscimo com relação ao CH.

Tabela 4.9 - Propriedades mecânicas do CHE - Flexão em três pontos.

Propriedades mecânicas	Valores médios	Dispersões (%)
Resistência última (MPa)	127,12	7,94
Módulo de elasticidade (GPa)	6,97	5,45
Deflexão máxima (%)	1,73	12,14

4.13.1 – Característica da fratura do CHE submetido à flexão em três pontos

A fratura do compósito laminado híbrido foi caracterizada pela presença de fratura por tração na camada externa de fibra de vidro, ver figuras 4.39 a e b. A fratura foi bastante localizada não sendo observado delaminação entre as camadas. É possível visualizar a fratura

na face trativa do corpo-de-prova e, bem como, sua propagação para o interior do mesmo em direção à linha neutra, caracterizando tipicamente fratura por flexão em três pontos.

Fendas longitudinais e transversais internas, e na segunda camada de fibra de vidro também foram detectadas. Estas fendas estão restritas na região de fratura final. Foi verificada, também, a existência de fratura transversal se propagando até a camada central de curauá.

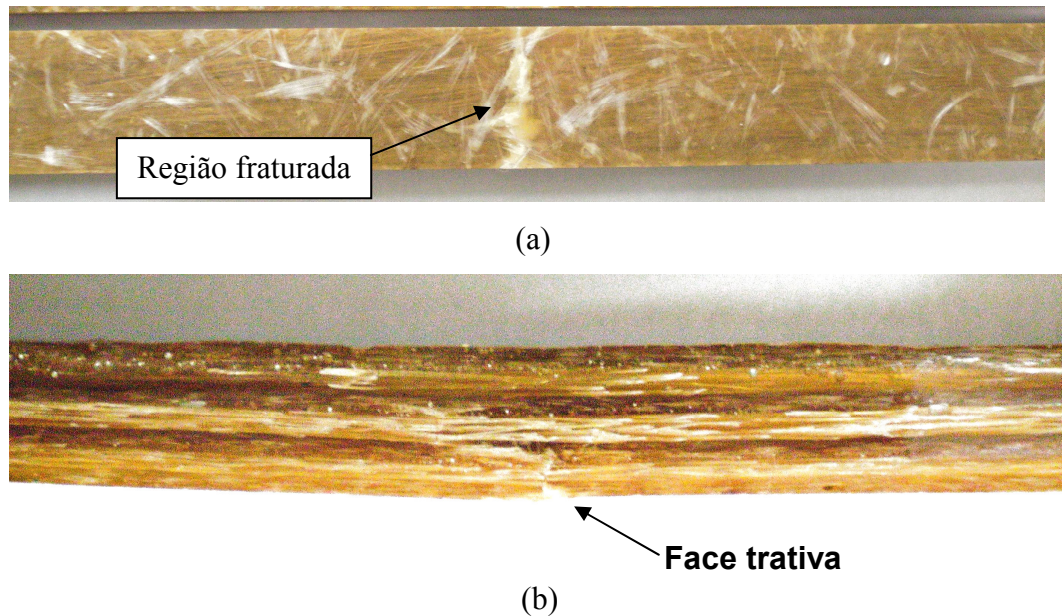


Figura 4.39 a e b – CPs de flexão em três pontos pós-ensaio do compósito **CHE**. (a) Largura e (b) lateral.

Não é observado dano nas camadas submetidas à compressão, somente às submetidas à tração. Estas características demonstram um bom desempenho dos compósitos frente ao carregamento em flexão em três pontos, e também que o processo de hibridização, ou seja, utilização de fibras naturais, não afeta tal comportamento.

Fendas transversais se propagam, na maioria dos casos, com fendas longitudinais na camada de fibra de vidro causando fraturas adesivas entre fibra/matriz, conforme demonstrado na figura 4.40.

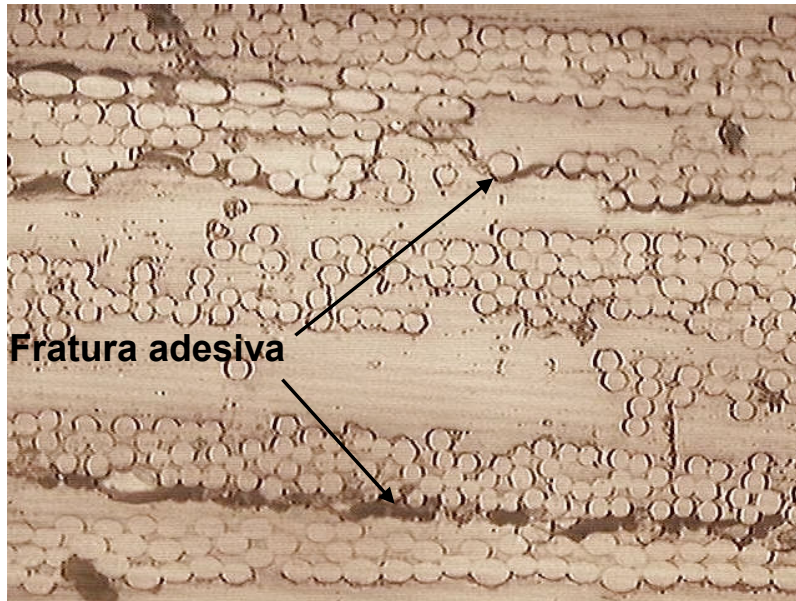


Figura 4.40 – Fratura adesiva na interface de fibra de vidro/matriz (200x)

Na figura 4.41 é evidenciada a presença de fendas transversais, estas fendas se propagam até a camada central de fibras curauá. Na maioria dos casos a fibra de curauá não é rompida.

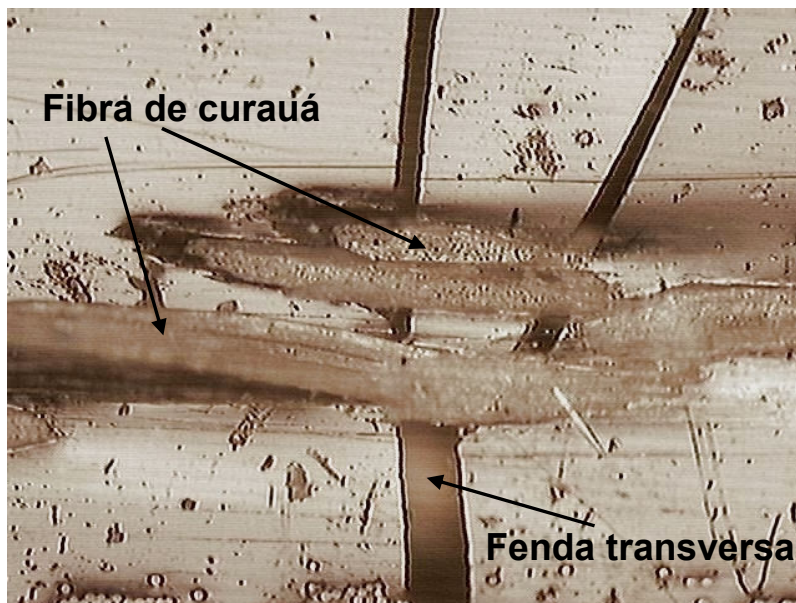


Figura 4.41 – Fenda transversal interna até a camada de fibra de curauá (100x)

Na figura 4.42 é mostrada uma fratura adesiva na fibra de curauá, onde esta fica deformada após o esforço mecânico do ensaio. Algumas fibras soltam-se da resina ficando com a característica que foi submetida à fratura adesiva, e onde se observa, também, que as

mesmas se apresentam distorcidas devido principalmente à radiação UV juntamente com a elevação da temperatura.

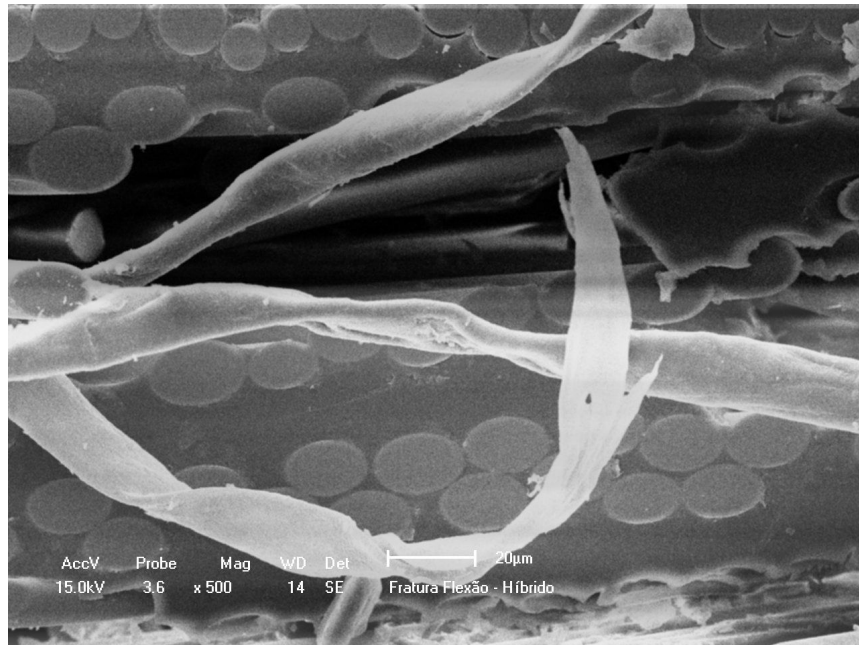
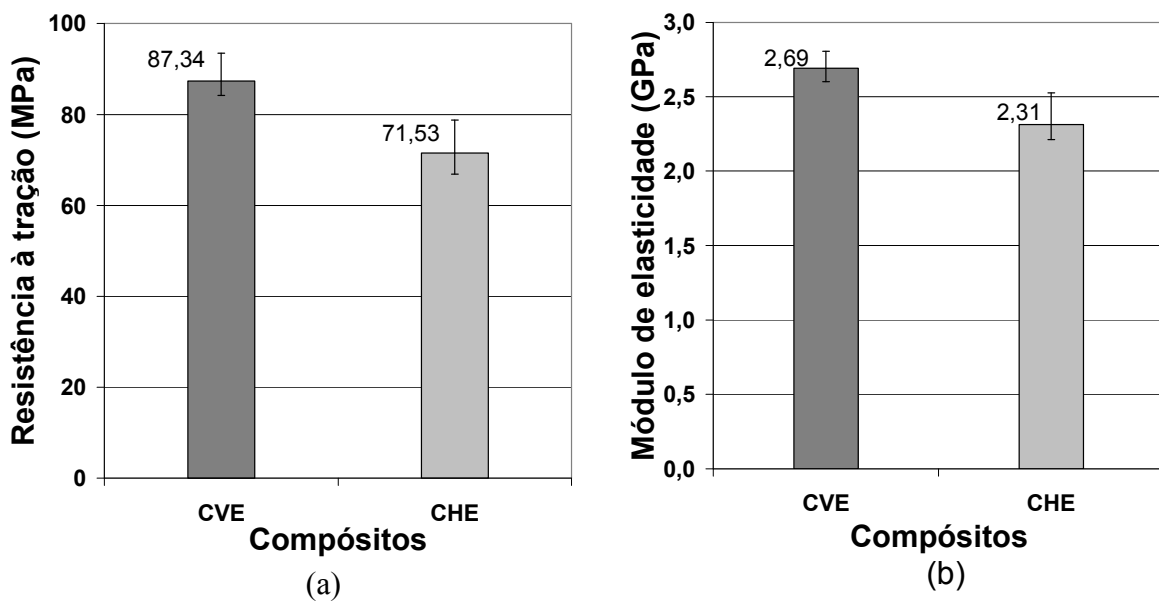


Figura 4.42 – Característica da fibra de curauá após ensaio de flexão em três pontos no CHE.

4.14 – Comparativo entre a tração uniaxial do CVE e CHE – Influência da configuração no envelhecimento

As propriedades mecânicas de resistência última à tração, módulo de elasticidade na direção de carga aplicada e deformação de ruptura são apresentadas na figura. 4.43.



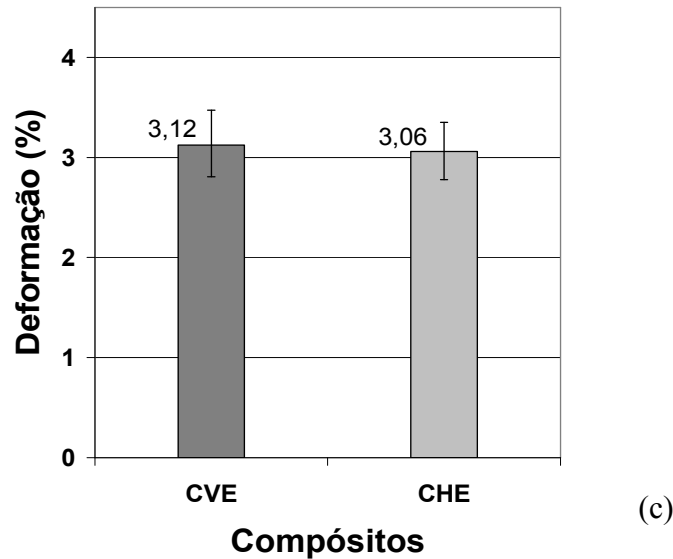


Figura 4.43 – Propriedades mecânicas em tração uniaxial dos compósitos de fibra de vidro e híbrido envelhecidos. (a) Resistência última à tração, (b) Módulo de elasticidade, (c) Deformação (alongamento).

O desempenho do laminado híbrido é inferior ao do laminado de fibras de vidro, devido às fibras de curauá sofrerem maior influência do envelhecimento se comparado às fibras de vidro. Houve redução da resistência (18,10 %), redução do módulo elástico (14,06 %) e redução do alongamento (2,05 %).

Considerando a substituição parcial das fibras de vidro por fibras naturais de menor resistência mecânica, pode-se dizer que o resultado obtido para o laminado híbrido foi satisfatório. Este desempenho, obviamente, está também relacionado ao fato das fibras de curauá estarem alinhadas na direção do carregamento, onde se obtém a melhor eficiência na transferência de carga matriz/fibra, mas estas sofrem com maior intensidade os fatores ambientais.

4.14.1 – Comparativo entre a flexão em três pontos do CVE e CHE

Neste caso, houve redução da resistência à flexão (30,0 %), redução do módulo elástico em flexão (5,38%) e redução da deflexão máxima (18,76 %). No caso da resistência à flexão e do módulo elástico em flexão os percentuais de diferença não estão na faixa das dispersões apresentadas pelos resultados (ver barras de erros nos gráficos da figura 4.44).

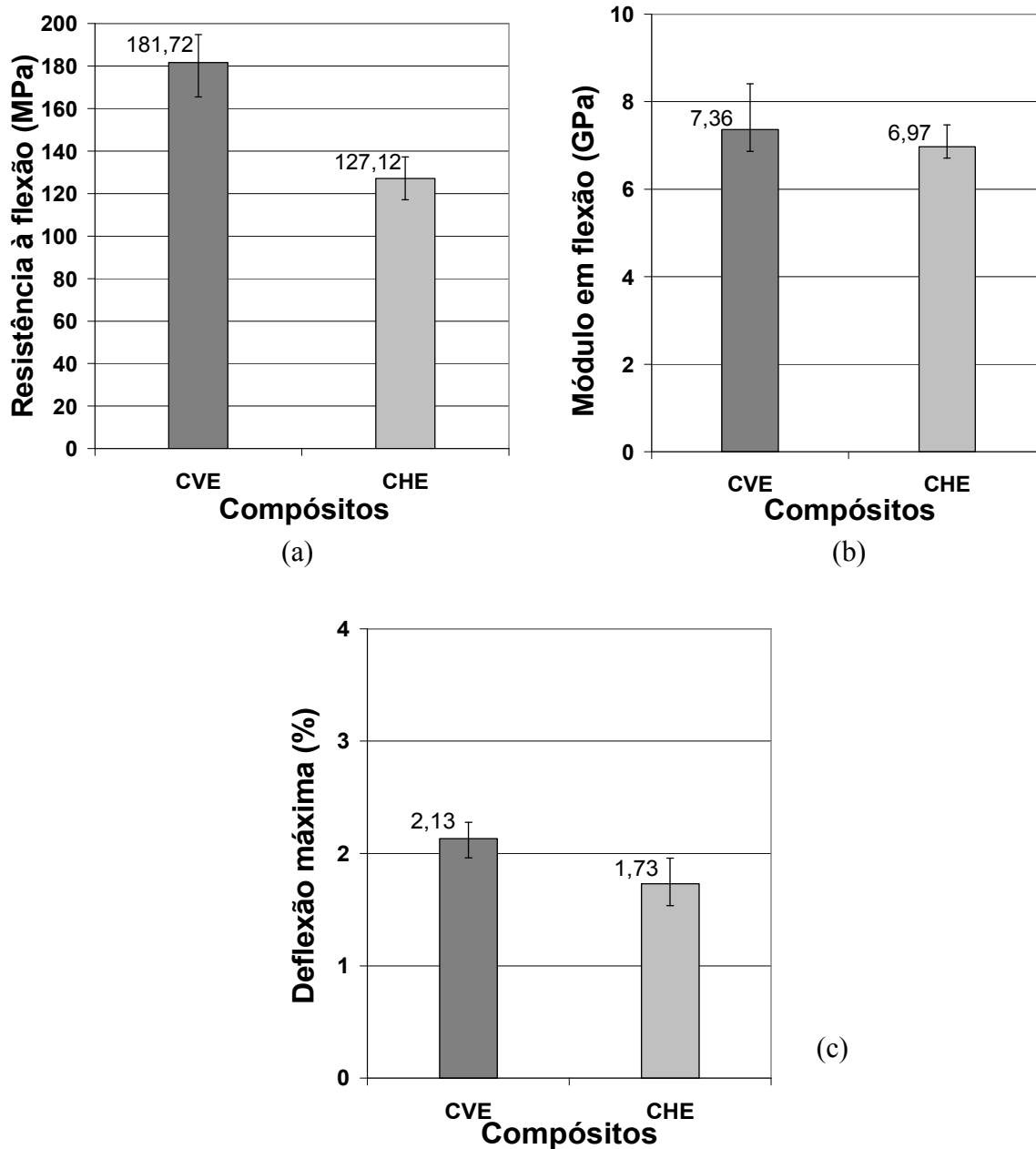


Figura 4.44 – Propriedades mecânicas em flexão dos compósitos híbrido e de fibra de vidro envelhecidos. (a) Resistência à flexão, (b) Módulo de elasticidade em flexão, (c) Deflexão máxima.

Sabe-se que as camadas externas do laminado são muito influentes no comportamento em flexão, sendo assim foram utilizadas, propositadamente, mantas de fibras de vidro nestas camadas.

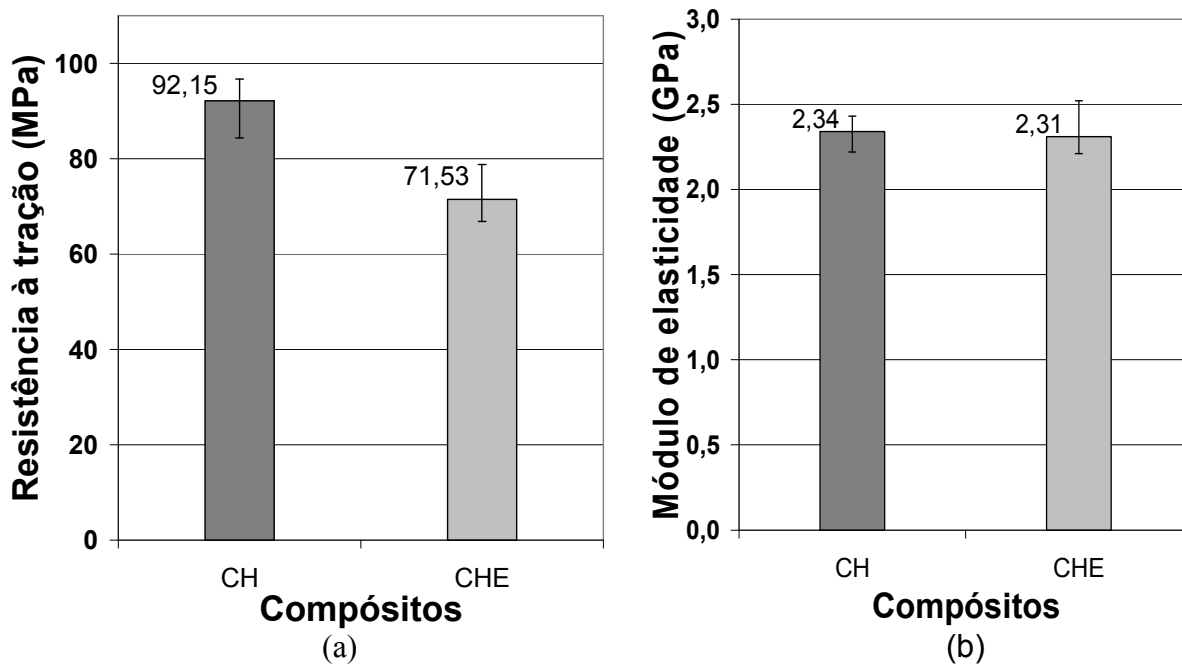
Além de garantir um melhor desempenho mecânico ao laminado, às fibras de vidro são relativamente inertes ao ataque ambiental, são impermeáveis à umidade e possuem boa

resistência a alguns agentes químicos e solventes (Twe e Liao, 2003; Kalaprasad e Kuruvilla, 1997), desta forma age como “barreira” química protegendo as camadas internas de fibras naturais da ação do ambiente.

4.15 – Comparativo entre a tração uniaxial do CH e CHE – Influência do envelhecimento

Um comparativo das propriedades mecânicas de resistência última à tração uniaxial, módulo de elasticidade na direção de carga aplicada e deformação de ruptura é apresentado na figura. 4.45.

O desempenho do laminado **CHE** é inferior ao do laminado **CH**. Houve redução da resistência (22,38 %), redução do módulo elástico (1,28 %) e redução do alongamento (16,85 %). O alto alongamento observado no **CH** pode ser entendido como origem da alta resistência do mesmo e bem como do processo mais lento da fratura.



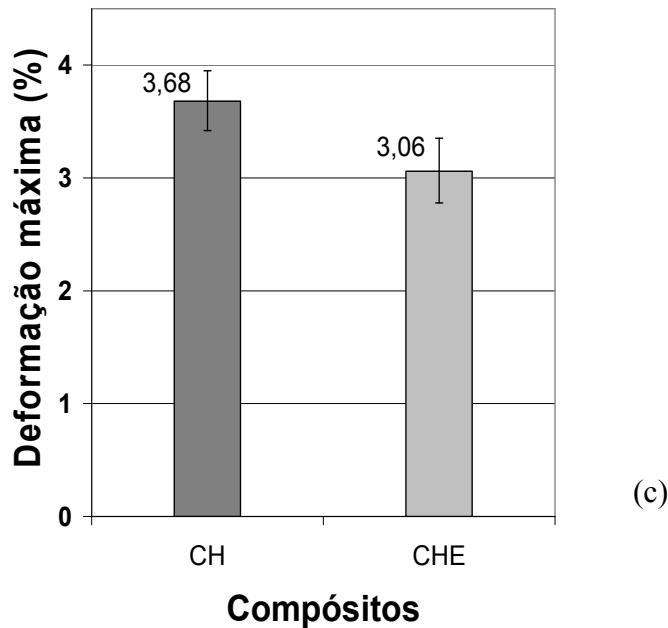


Figura 4.45 – Propriedades mecânicas em tração uniaxial dos compósitos **CH** e **CHE**. (a) Resistência última à tração, (b) Módulo de elasticidade, (c) Deformação máxima (alongamento).

Considerando a substituição parcial das fibras de vidro por fibras naturais de menor resistência mecânica, pode-se dizer que o resultado obtido para o laminado híbrido foi bom. Este desempenho, obviamente, está também relacionado ao fato das fibras de curauá estarem alinhadas na direção do carregamento, bem como, a face exposta ao envelhecimento ser composta de fibras de vidro formando uma “barreira” de proteção para a camada de fibras de curauá.

4.15.1 – Comparativo entre a flexão em três pontos do CH e CHE

Neste caso, houve redução da resistência à flexão (11,67 %), redução do módulo elástico em flexão (5,81%) e redução da deflexão máxima (14,78 %). Os percentuais de diferença estão na faixa das dispersões apresentadas pelos gráficos, vale salientar que estes valores de dispersões são considerados baixos (ver barras de erros nos gráficos da figura 4.46).

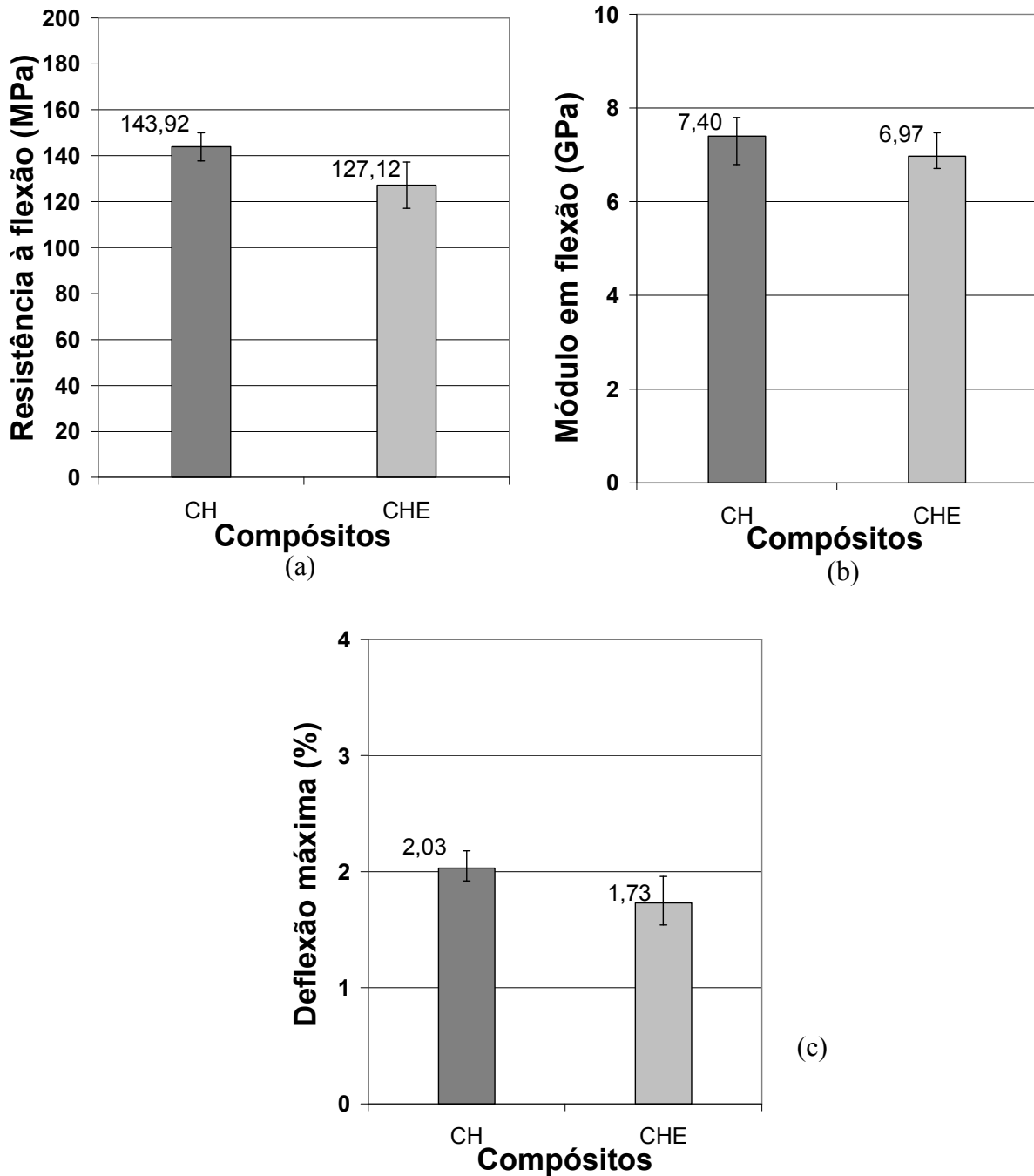


Figura 4.46 – Propriedades mecânicas em flexão dos compósitos CH e CHE. (a) Resistência à flexão, (b) Módulo de elasticidade em flexão, (c) Deflexão máxima.

Além de garantir um melhor desempenho mecânico ao laminado, às fibras de vidro são relativamente inertes ao ataque ambiental, por esses motivos que o compósito híbrido é composto de camadas de fibras de vidro nas extremidades, e esta foi à face exposta ao envelhecimento.

4.16 – Comparativo entre a tração uniaxial do CV e CVE – Influência do envelhecimento

O estudo comparativo das propriedades mecânicas de resistência última à tração, módulo de elasticidade na direção de carga aplicada e deformação de ruptura é apresentado na figura. 4.47. O desempenho do laminado **CVE** é inferior ao do laminado de fibras de **CV** na resistência e alongamento, enquanto que no módulo, observa-se um ganho. Resumindo, houve redução da resistência (6,98 %), aumento do módulo elástico (20,36 %) e redução do alongamento (22 %).

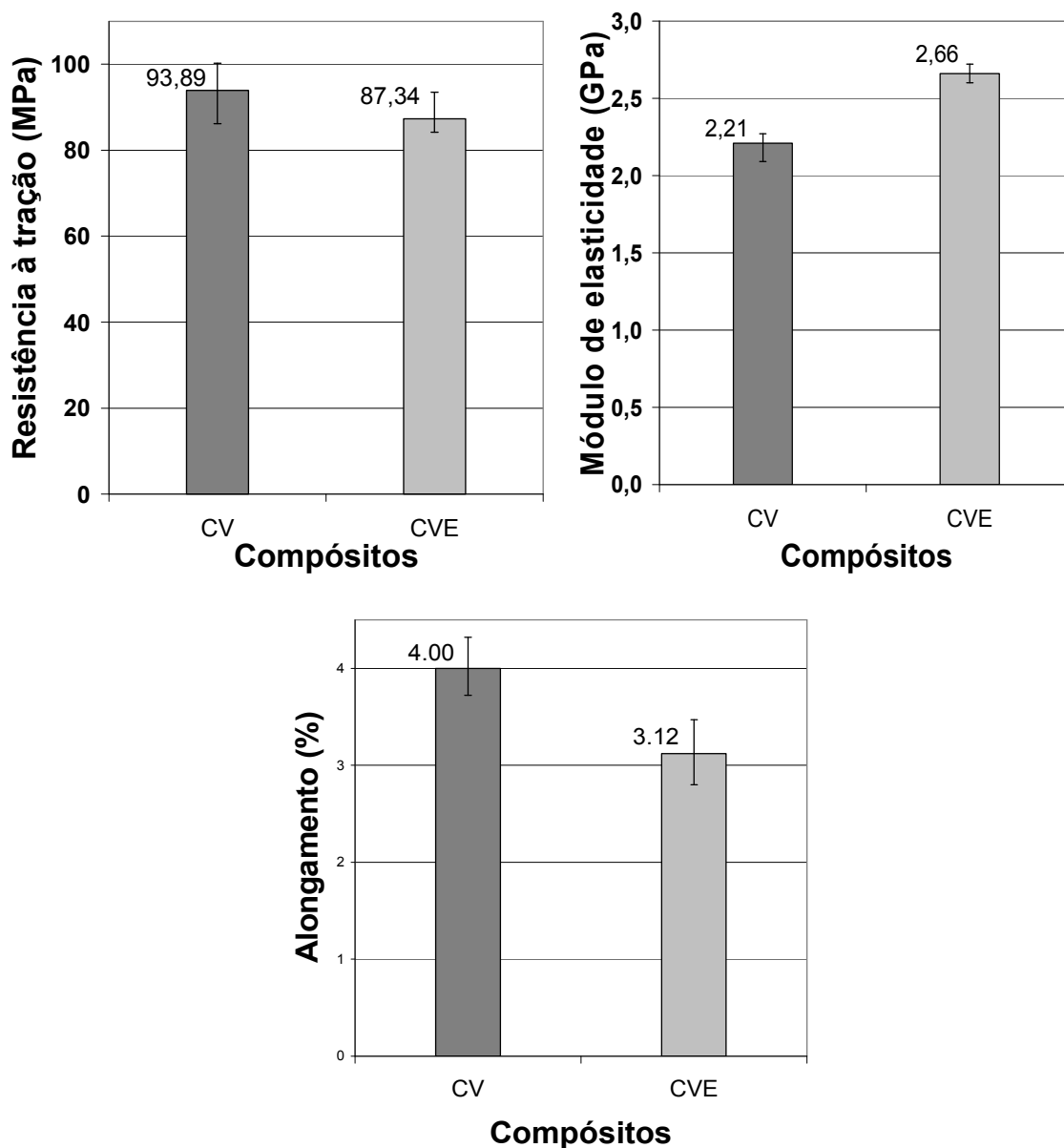


Figura 4.47 – Propriedades mecânicas em tração uniaxial dos compostos **CV** e **CVE**. Resistência última à tração, módulo de elasticidade e máximo alongamento.

Considerando o efeito causado no compósito após ensaio de envelhecimento acelerado, onde o material adquire um aumento na rigidez, pois este apresentou redução da deformação máxima para os compósitos **CHE** e **CVE**.

4.16.1 – Comparativo entre a flexão em três pontos do CV e CVE

Para esse caso em especial o compósito de vidro envelhecido mudou seu comportamento principalmente em termos da resistência última. Neste caso, para o mesmo houve aumento da resistência à flexão (19,25 %), aumento do módulo elástico em flexão (8,08 %) e redução da deflexão máxima (12,35 %). Os percentuais de diferença estão apresentados pelos gráficos (ver barras de erros nos gráficos da figura 4.48).

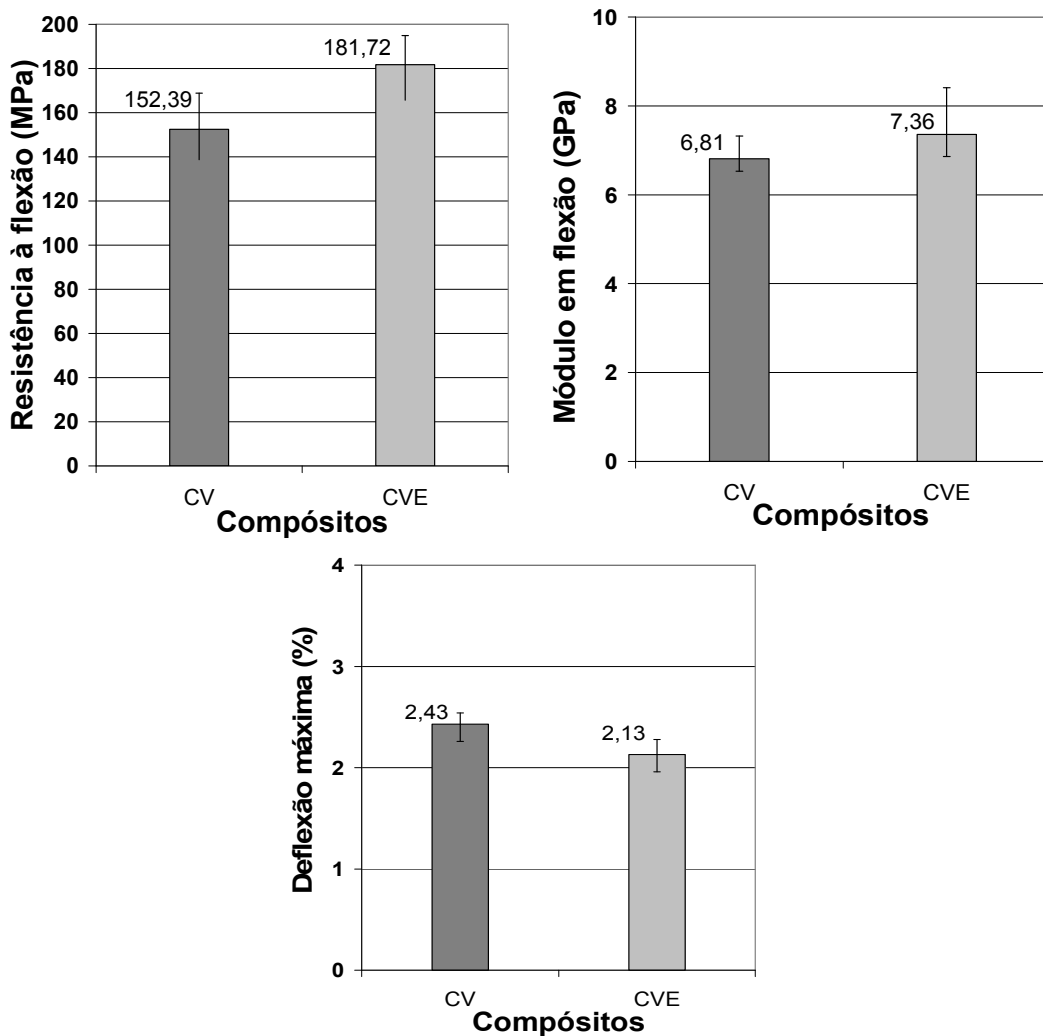


Figura 4.48 – Propriedades mecânicas em flexão dos CV e CVE. Resistência à flexão, módulo de elasticidade em flexão e deflexão máxima.

Sabe-se que as camadas externas do laminado são muito influentes no comportamento em flexão, e no caso do CVE a camada exposta ao envelhecimento, após ensaio, ficou rica em fibras de vidro, ou seja, um aumento do percentual de volume de fibras comparado ao da resina. Além desse aspecto ressalta-se o não comprometimento das fibras de vidro com relação ao ataque do envelhecimento acelerado (as mesmas são consideradas impermeáveis, por exemplo). Neste sentido, um laminado mais rígido foi gerado e provavelmente devido a estes fenômenos houve um acréscimo, também, na resistência à flexão em três pontos.

4.17 – Visão geral do comportamento mecânico dos compósitos submetidos ao processo de envelhecimento acelerado

As fibras sintéticas ou naturais quando expostas à radiação UV podem levar a uma melhora da aderência interfacial fibra/matriz se a intensidade e tempo da exposição não ocasionarem a degradação das fibras (Abdullah and Abedin, 2006). Nesse caso as fibras são expostas antes da impregnação da resina e tem como objetivo o tratamento superficial das mesmas.

Quando a exposição de radiação UV se dá no próprio compósito, o processo desencadeado é outro, pois se tem a resina como a primeira “barreira“ a receber a radiação e a degradação desta, mesmo para pouca intensidade e pouco tempo de exposição, é inevitável. Se a intensidade de radiação é suficiente para ultrapassar a barreira da resina (já degradada) e atinge a fibra, o processo desencadeado muda, já que o compósito de alguma forma foi afetado pela degradação da resina. No entanto, a intensidade dos efeitos nas propriedades físicas e mecânicas do compósito passa a depender, também, da intensidade e do tempo de radiação nas fibras. Nesse caso, a capacidade de transferência de carga agora se processa de uma interface degradada, mesmo que o fenômeno seja restrito a uma única e/ou poucas camadas, para o reforço. Agora a resposta do compósito, quanto à radiação, vai depender de fatores importantes como dos tipos de sistemas fibra/matriz e de carregamentos envolvidos.

Nos compósitos poliméricos, outros fatores importantes envolvendo condições ambientais adversas dizem respeito à absorção de umidade e temperatura. Quando os mesmos são submetidos ao ataque de umidade e simultaneamente ao de alta temperatura, costumam aumentar suas perdas com relação às propriedades mecânicas, aumento esse devido em grande

parte, ao aumento da cinética da difusividade causada pelo aumento da temperatura (Ravi Kumar, 2004).

Quando juntamente com a radiação UV também se tem à exposição simultânea de umidade e aumento de temperatura, todo o processo de desempenho mecânico do compósito se torna mais complexo devido a múltiplas reações envolvidas. Separar as responsabilidades de cada evento na resposta final do compósito se torna praticamente impossível. Mais algumas explicações podem surgir sobre o entendimento do processo a partir de um estudo com o envolvimento por separado de adversidade. Nesse trabalho de investigação algumas conclusões foram possíveis devido, principalmente ao estudo detalhado da fratura.

Na figura a 4.49 é mostrada uma visão global da influência tanto do processo de envelhecimento ambiental quanto do tipo de configuração dos compósitos.

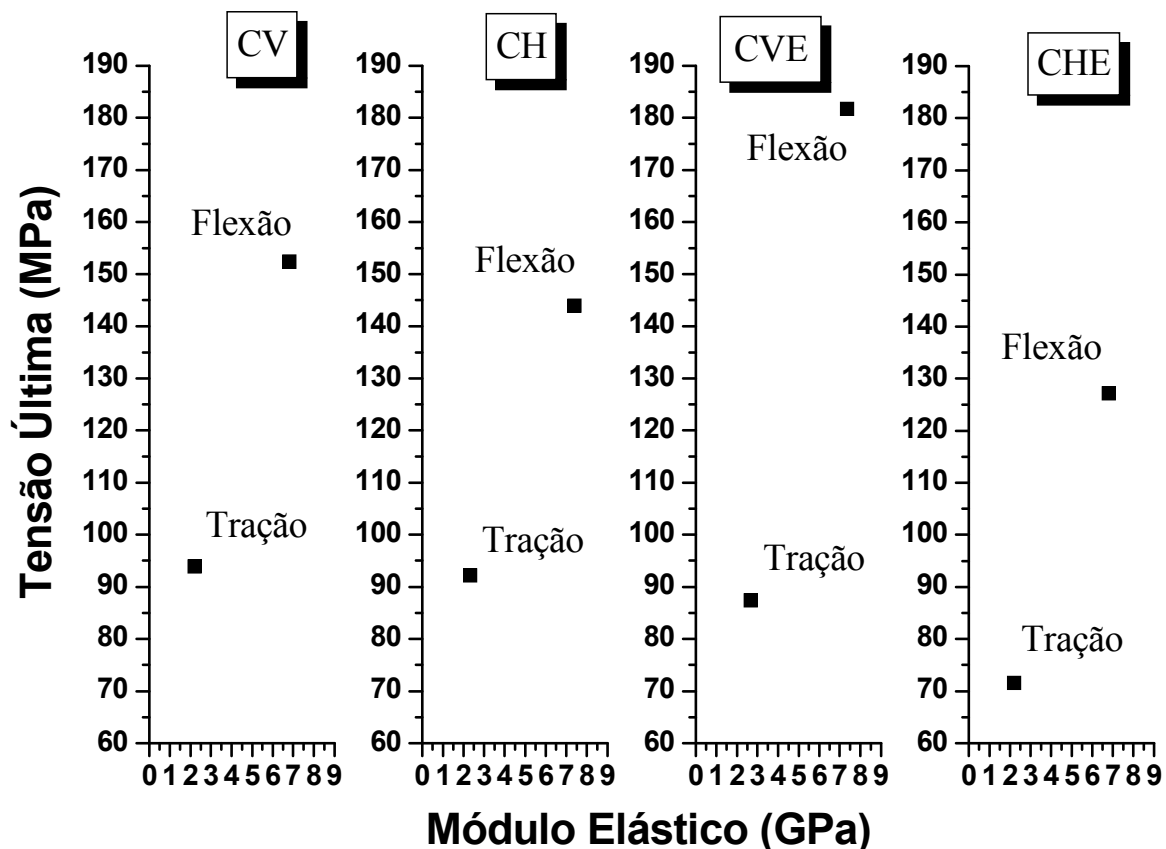


Figura 4.49 – Comportamento mecânico dos compósitos CV, CH, CVE e CHE em diferentes carregamentos.

5. CONCLUSÕES

- As densidades volumétricas dos compósitos **CV** e **CH** apresentam praticamente os mesmos valores (diferença de 6%), o que acarreta pouca influência na resistência e módulo elástico específicos;
- A diferença entre as resistências últimas do **CV** e do **CH** na tração é muito pequena e igual a 1,85 %, enquanto que na flexão é igual a 5,55 % em favor do **CV**, porém o **CH** ganha, na tração 5,57 % e na flexão igual a 8,60 %, no módulo elástico, se tornando mais rígido tanto na tração uniaxial quanto na flexão em três pontos;
- É viável a utilização do compósito híbrido (**CH**) em aplicações estruturais com mesmo porte do compósito somente à base de fibras de vidro (**CV**);
- A escolha da fibra de curauá como alternativa (substituição parcial) à fibra de vidro foi fundamental para os bons resultados encontrados;
- O laminado híbrido obteve uma perda de massa superior ao laminado vidro de 43 %, devido principalmente a degradação acentuada das fibras de curauá.
- Houve uma perda das propriedades mecânicas de resistência e rigidez dos compósitos **CV** e **CH** principalmente na tração uniaxial devido ao processo de envelhecimento;
- Quanto à carga de flexão em três pontos, para o **CV**, houve um ganho de 19,25 % com o envelhecimento na resistência e ganho de 8,08 % no módulo elástico, enquanto que na tração houve um ganho de 20,36 % no módulo e pouca perda na resistência (7%), inclusive dentro da dispersão.
- O **CH** comparado ao **CV** sofreu mais com relação ao envelhecimento para todas as propriedades mecânicas estudadas. Esse fato se deve a presença da fibra natural que por ser orgânica, pode ter a degradação intensificada, de acordo com a intensidade e tempo de exposição aos raios UV e vapor d'água;

- Devido ao ganho observado nos módulos elásticos dos compósitos com o processo de envelhecimento, a aplicabilidade dos mesmos em estruturas que requerem maior rigidez, pode ser viável desde que a redução na resistência última à tração seja considerada;

- A análise detalhada da fratura mostra um forte processo de degradação da resina na camada exposta ao envelhecimento influenciando diretamente na qualidade da interface fibra/matriz, e no não comprometimento das fibras de vidro. Conseqüentemente, uma influência direta nas respostas mecânicas finais dos compósitos.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1- Estudos em carregamentos de fadiga de baixo ciclo para o caso dos dois compósitos **CV** e **CH**, sob condições ambientais adversas.
- 2- Estudo dos efeitos de cada tipo de envelhecimento em separado.
- 3- Estudo do envelhecimento para diferentes tipos de resina.
- 4- Estudos em carregamento de compressão e impacto para diferentes tipos de resina e compósitos.
- 5- Estudos para diferentes tempos de exposição ao envelhecimento em compósitos.
- 6- Estudo do envelhecimento em lâminas de compósitos para visualização da profundidade do ataque.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH-AL-KAFI AND M. Z. ABEDIN. Study on the mechanical properties of jute/glass fiber-reinforced unsaturated polyester hybrid composites: effect of surface modification by ultraviolet radiation. v.25; p. 575-587;2006.
- ADAMS R. D. AND SINGH M. M. The effect of immersion in sea water on the dynamic properties of fibre-reinforced flexibilised epoxy composites. Composite Structures. v. 31; p. 119-127; 1995.
- AGOPYAN, V.; SAVASTANO JR., H. Uso de materiais à base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira. In: SEMINARIO IBEROAMERICANO 1997 DE MATERIAIS FIBRORREFORZADOS, 1. Y REUNION DEL PROYECTO PIP VIII.5 CYTED, 3. Cali, 1997. Memórias. Cali, Cytcd/Universidad del Valle, 1997. p.23-40. (Artículo 03).
- AHMED S. AND JONES F. R. A review of particulate reinforcement theories for polymer composites. Journal of Material Science, vol 25, pp. 4933-4942, 1990.
- AL-QURESHI, H. A. - Composite Materials: Fabrication and Analysis – Ed. 2., São José dos Campos, 1983.
- AL-QURESHI, H. A. - Denominações de concentração de tensões e propriedades mecânicas dos materiais plásticos reforçados. IV CONGRESSO BRASILEIRO DE PLASTICOS REFORÇADOS, Anais, São Paulo: (S.n.): 1986.
- ALVAREZ V. A. ET AL. Mechanical properties and water absorption behavior of composites made from a biodegradable matrix and alkaline-treated sisal fibers. Journal of Composite Materials. V. 37; p.1575-1588; 2003.
- ANDRADE, Wilson – Diretor da CISAF-EXPORTADORA – entrevista sobre Sisal. Natal, entrevista à Viviane Muniz Fonseca, julho de 1998.
- ANTEQUERA, P.; JIMENES, L. & MIRAVETE, A. Los Materiales Compuestos de fibra de vidro – Universidad de Zaragoza, Espana, 1991.
- AQUINO, E. M. F. – Estudo da umidade na resistência e fratura de compósitos tubulares. IV Congresso de engenharia mecânica N/NE. Recife, 1996.
- AQUINO, E. M. F. Estudo do impacto de baixa velocidade em placas sanduíches de plástico reforçado. V Congresso de engenharia mecânica N/NE. Vol. 1, ceará, 1998.
- AQUINO, E. M. F. et al. Propriedades mecânicas e mecanismo de dano em compósitos fibrosos tipo sanduíche. Anais XV Cobem. SP. v 1;p. 1-10; 1999.

- AQUINO, E. M. F. et al. Strength/stiffness study in composite laminated tubes. Second International congress on metallurgy and materials. SP. v 1; p. 1-8; 1997.
- AQUINO, E. M. F. Identificação do modo de fratura de compósitos poliésteres – Vidro-E. 13° CBCIMAT. Vol. 1, Paraná, 1998.
- AQUINO, E. M. F. Propriedades mecânicas e mecanismo de danos em compósitos fibrosos tipo sanduíche. XV COBEM. Vol. 1, São Paulo, 1999.
- AQUINO, E.M.F. – Analisis del cComportamiento Mecanico de Laminados Quasi-Isotropos PRFV – Tesi doctoral, Universidad Politcnica de Madrid, Madrid, p. 184,1992.
- AQUINO, E.M.F. AND MARGARIA, G. Influence of moisture absorption on the mechanical properties of polyester/fibre glass-E composites. Proceedings of Second international congress on metallurgical and materials technology, São Paulo, Brazil, 1997.
- AQUINO, E.M.F.; Rodrigues, L.P.S. Oliveira, W; and Silva, R.V. Moisture Effect on degradation of Jute/Glass Hydrid Composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 27, No. 1, 219-233 (2007).
- ARAÚJO, M.; CASTRO, E. M. M. Manual de engenharia têxtil. Fundação Calouste Gulbenkian. 1984, Lisboa.
- ASTM D 638 – 90. “Standard Test Method for Tensile Properties of plastics”, Philadelphia, 1990.
- ASTM D 790 - 90. “Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials”, Philadelphia, 1990.
- BALEY, C. et al. Composites – A French-English Bilingual Magazine, Oxford, n.22, p.28-34, Juillet-Août, 1997.
- BANNISTER, M.: “Challenges for Composites into the next Millennium – a Reinforcement Perspective”, Composites – Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 32, pp. 901-910, 2001.
- BARKAKATY, B. C. – Some Structural Aspects of. Sisal Fibers, Journal of Applied Polymer Science, vol.20, 2921, 1976.
- BLEDSKI, A. K.; GASSAN, J. Composites Reinforced with Cellulose Based Fibers. Porg. Polym. Sci., .24, p221-274, 1999.
- BLEDZIK A. K. AND GASSAN J. Progress in Polymer Science. v. 24; p. 221-274; 1999.

- BONFIM, R. F. S. Fibras sintéticas e o futuro da economia da juta. Amazonas, SUDAM, 1968. 63p.
- BONNIAU P. AND BUNSELL A. R. A comparative study of water absorption theories applied to glass epoxy composites. *Journal of Composite Material*. v. 15; p.272; 1981.
- CAHN J. W. ; HANDWERKER, C. A. Equilibrium geometries of anisotropic surfaces and interfaces, vol. 162, no 1-2 (41 ref.), pp. 83-95 (1993).
- CALLISTER Jr., W. D. – *Materials Science and Engineering – An Introduction*. Third Editton, John Wilen Sons, INC, New York, 1994.
- CÂNDIDO, G. M. Influência do Condicionamento Ambiental na Resistência à Delaminação de Bordas Livre em Compósitos Avançados. São Jose dos Campos: ITA/CTA, 2001. Dissertação de Doutorado.
- CÂNDIDO, G. M.; ALMEIDA, S. F. M.; REZENDE, M. C. Processamento de Laminados de Compósitos Poliméricos Avançados com Bordas moldadas. *Polimeros: Ciência e Tecnologia*, v.10, n.1, p.31-41, 2000.
- CARASCHI, J.C.; LEÃO, A.L. Chemical and Thermal Characterization of Curauá fiber. In: *INTERNATINAL CONFERENCE ON FRONTIERS OF POLYMERS AND ADVANCED MATERIAILS*, 5., Pozna, 1999. Proceedings. Poznan, s.ed., 1999. p.13-14.
- CARVALHO, A. *Fiberglass x Corrosão – Especificação, Instalação e manutenção de equipamentos de Fiberglass para Ambientes Agressivos*, ASPLAR, 425 p., São Paulo, 1992.
- CHIAVERINI, V. *Tecnologia Mecânica*, v. II, 2ª Ed., Mc Graw-Hill, São Paulo, 1986.
- CHOU, T.W.; McCullough, R.L.; Pipes, R.B.: “Composites”, *Scientific American*, Vol. 254, 193p, 1986.
- CLARK R. A. AND ANSELL M. P. *Journal of Material Science*. v. 21; p. 269-276; 1986.
- CORREIA, A. Z. – *Métodos e Processos para Fabricação de Materiais Compósitos – EMBRAER*, 56P., São Paulo, 1988.
- COSTA, R. *Compósitos poliéster-juta efeitos de modificações químicas no reforço e na matriz poliéster*. Tese de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 137 p, 1997.
- DAHLKE B. ET AL. *Journal of cellular plastics*. v.34; p. 361-379; 1998.
- DARWISH, D.; *Los Plásticos Reforzados com Fibras de Vidrio*; 2ª Edição. Buenos Aires: editora Americale; 1986.

- DAVIES ET AL. Sea water aging of glass reinforced composites: Shear behavior and damage modeling. *Journal of Composite Materials*. v. 35; p. 1343-1371; 2001.
- DAVIES, P., Petton, D. Na experimental study of scale effects in marine composites. *composites Part A – Applied science and manufacturing*. Vol. 30. págs: 267-275. 1999.
- DIPA, R et al. Dynamic Mechanical and Thermal Analysis of Vinylester-Resin-Matriz Composites Reinforced with Untreated and Alkali-treated Jute Fibres, *Composites Science Technology*,62: 911-917 (2002).
- ENGLISH, B. e J. P. SCHNEIDER. Paper Fiber/low-Density Polyethylene Composites from Recycled Paper Mill Waste: Preliminary Results. In: *Proc. Of 1994 TAPPI Recycling Symposium*. 10p, 1994.
- ENGLISH, B.; Clmeons, C.M.; Strak, N.; and Schneider, J.P., *Waste-Wood-Derived Fillers for Plastics*. USDA Forest Service Forest Products Laboratory General Technical Report FPL-GTR 91. 15p, 1996.
- ESPERT ET AL. Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties. *Composites Part A*. v. 35(11); p. 1267-1276; 2004.
- FELIPE, R.N.B. *Moldagem a vácuo de plástico reforçado. Parâmetros de controle e propriedades dos moldados em PRFV*. Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 107 p, 1997.
- FENGEL, D., WEGENER, G. *Wood: Chemistry, ultra structure, reactions*. Berlin, Walter de Gruyter, 615p, 1989.
- FERNANDES, N.S; *Avaliação Termoanalítica do Sistema Bromo/Antimônio como Retardante de Chama em compósitos de Poliéster Instaurado*. Natal; 1997. Dissertação (Mestrado) UFRN.
- FERNANDO, G. et al. Fatigue Behavior of Hybrid Composites: Part 1:Carbon/Kevlar Hybrids, *Jornal of Materials Science*, 23: 3732-3743, (1998).
- FONSECA, V. M. *Estudo comparativo das propriedades mecânicas em compósitos poliéster/sisal quimicamente tratado*. Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 81 p, 1998.
- FRANCO, P. H.; M.A. VEGA, *Effect of Fiber Treatment on the Mechanical Properties of LDPE-Henequen Cellulosic fiber Composites*. *J. Appl. Polym. Sci.*, 65 (1): 197-207, 1997.
- FREIRE Jr., R. C. S. *Estudo da prevenção de falha por fadiga em laminado de plástico reforçado com fibras de vidro*. Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 133 p, 2001.

- GASSAN, J. BLENDZKI, A. K. the influence of fiber-surface treatment on the mechanical properties of jute-polypropylene. *Composites*, v.28A, p.1001-1005, 1997.
- GATENHOLM, P. Interfacial Adhesion and Dispersion in Biobased Composites. Molecular Interactions Between Cellulose and Other Polymers. In: FROLLINI, E.; LEÃO, A. L.; MATTOSO, L. H. C. *Lignocellulosic Plastics Composites*. São Carlos, USP/UNESP, 1997. p.53-59.
- GAUTHIER, R.; JOLY, A. C. C.; GAUTHIER, H.; ESCOUBES, M. Interfaces in polyolefin/cellulosic fiber composites: chemical coupling, morphology, correlation with adhesion and aging in moisture. *Polymer Composites*, v.19 n.3, p.287-300, 1998.
- GAY, D. – *Matériaux Composites* – Paris: Edittions Hermès, 569P., 1991.
- GELLERSTED, F.; GATENHOLM, P. Surface Properties of Lignocellulosic Fibers Bearing Carboxylic Groups. *Cellulose*, v.6, p.103-274, 1999.
- GELLERT E. P. AND TURLEY D. M. Seawater immersion ageing of glass-fibre reinforced polymer laminates for marine applications. *Composites: Part A*. v. 30; p. 1259-1265; 1999.
- GRASSIE, N.; SCOTT, G *Polymer degradation and stabilisation*. Cambridge [Cambridgeshire]; New York: Cambridge University Press;1985.
- GU, J.; WU, H. F.; KAMPE, S. L.; LU, G. Q. Volume fraction effects on interfacial adhesion strength of glass-fibers polymer composites. *Materials Science and Engineering*, v.277A, p.237-243, 2000.
- HAGE, E. Jr. *Compósitos e blends poliméricas*. Campinas, Instituto latino americano e IBM Brasil, 1989, 203p.
- HAMELIM, P.”Comportement Mecanique des Materiaus et des structures Composites – Application au Dimensionnement et à la Conception de Pieces Composites”, Cooperation Scientique et Technique Franco-Vietnamience – Materiaus Macromoleculaires et composites, 1988.
- HANCOX, N.L.; - *Hight Performace Composites With Resin Matrices; Handbok Of Composites*, Amsterdam: Elsevier Science Publisher; v.4, p.1-29; 1991.
- HERAKOVICH, C. T. – *Mechanics of firous composites*. 460p, 1997.
- HOMMA, A. K. O. A civilização da juta na Amazônia: expansão e declínio. In: *Amazônia: meio ambiente e desenvolvimento agrícola*. Brasília, Embrapa/SP, 1998. p.13-67.

- HULL, D. An Introduction to Composite Materials. Ed. Cambridge University Press, Cambridge, 246 p., 1988.
- JOLY, C; M. KOFMAN; e R. GAUTHIER, Polypropylene/Cellulosic Fiber Composites: Chemical treatment of the Cellulose Assuming Compatibilization Between 22 the two Materials. J. Pure Appl. Chem. A33 (12): 1981-1996.
- JOSEPH, K. Effect of Chemical Treatment on Tensile Properties of Short Sisal Fiber-Reinforced Polyethylene Composites, Polymer, 37:4139 (1996).
- JOSEPH, P. V. ET AL., “Environmental Effects on the Degradation Behavior of Sisal Fibre Reinforced Polypropylene Composites”, Composites Science and Technology, vol. 68, pp. 1357-1372, 2002.
- JOSEPH, P. V., Mathew, G., Joseph, K., Groeninckx, G., Thomas, S. – Dynamic mechanical properties of short sisal fiber reinforced polypropylene composites. Composites: Part A, vol. 34. págs: 275-290. 2003.
- KALAPRASAD, G. E KURUVILLA, J., “Influence of short glass fibre addition on the mechanical properties of sisal reinforced low density polyethylene composites”, Journal of composite materials, vol. 31, n. 5, pp. 509-527, 1997.
- KOZLOWSKI, R.; MIELENIK, B.; and PRZEPIERA, A. 1993. Plant Residues as Raw Materials for Particleboards. Institute of Natural Fibers, Poznań, Poland. April 12-14, 1993.
- KURUVILA, J.; SIBY, V.; KALAPRASAD, G.; SABU, T.; PRASANNAKUMARI, L.; KOSHY, P.; PAVITHRAN, C. – Influence of interfacial adhesion on the mechanical properties and fracture behavior of short sisal fiber reinforced polymer composites. European Polymer Journal, v.32, n.10, p. 1243-1250, 1996.
- LADCHUMANANANDASIVM, R. Apostila – Ciências dos Polímeros e Engenharia de Fibras I, Capítulo 2, março, 2002, 39 p.
- LEÃO, A. L.- Produção de compósitos à base de fibras naturais para utilização na industrial automobilística.
- LEÃO, A. L.; CARASCHI, J. C. Curauá fiber – A Tropical Natural Fibers From Amazon Potential and Applications in Composites. In: FROLLINI, E.; LEÃO, A. L.; MATTOSO, L. H. C. Natural Polymer and Agrofibras Based Composites. São Carlos, USP/UNESP, 2000, p.257-271.
- LEDO, I. A. M. s.d. – O cultivo do curauá no Lago Grande da França. Banco de Credito da Amazônia S/A 24 p.
- LI X. AND WEISTMAN Y. J. Sea-water effects on foam-cored composite sandwich lay-ups. Composites Part B. v. 35; p. 451-459; 2004.

- LIAO, K. ET AL, Effects of environmental aging on the properties of pultruded GFRP, Composites Part A, 30:485-493, 1999.
- M. MARIATTI* AND P. K. CHUM, Effect of Laminate Configuration on the Properties of Glass Fiber-reinforced Plastics (GFRPs) Mixed Composites Journal of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES, Vol. 24, No. 16/2005 1713, 2005.
- MALLICK, P. K. – Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design. New York, Marcel Dekker, 312p, 1988.
- MANDER, P.W. et al. The Strength of Hybrid Glass/Carbon Fibre Composites: Part 1: Failure Strain Enhancement and Failure Mode, Journal of Materials Science, 16(8): 233-2245, (1981).
- MANO, E. B. Polímeros como materiais de engenharia, São Paulo. Ed. Edgard Blucher, 1991.
- MARCOVICH ET AL. Dependence of the mechanical properties of woodflour-polymer composites on the moisture content. Journal of Applied Polymer Science. v. 68; p. 2069-2076; 1998.
- MARGARIA, G., Aquino, E. M. F. Influence of moisture on the mechanical properties of polyester/fibre glass-E composite. Second International Congress on Metallurgy and materials. Sao Paulo, 1997.
- MARIATTI M. AND CHUM P. K. Effect of laminate configuration on the properties of glass fiber-reinforced plastics (GFRPs) mixed composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites. v. 24; p. 1713-1721; 2005.
- MARON, G et al. Fatigue Behavior and Dependent Properties of Aramid Fibre/Carbon Fibre hybrid Composites, Composites, 20(6): 537-544, (1989).
- MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. – Composite materials: engineering and science, Great Britain, Chapman & Hall, 470 p, 1994.
- MELO, P. S. C. Curauá: Recomendações Técnicas. Marituba, Emater-Pará, s.d. 22p. /Apostila/MEYER, J.A., Wood-Polymer materials: State of the Art. Wood Science, 14(2): 49-54, 1981.
- MENDES, T. M. F. F. – Propriedades de Resistência à Tração e ao Impacto de Compósitos Poliéster Sisal – Um estudo Comparativo – Dissertação de Mestrado, UFRN, 123 p., Natal, 1992.
- MILES, D. C. & BRITON, J. H. – Tecnologia dos polímeros – 588 p., Ed. Universidade de São Paulo, 1975.

- MITRA, B. C.; BASAK R. K.; SARKAR, M. Studies on Jute-reinforced composites, its limitations, and some solutions through Chemical modifications of fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, v.6, n.2, p. 329338, 1998.
- MITRA, B. C.; BASAK, R. K.; SARKAR, M. Studies on Jute-reinforced composites, its limitations, and some solutions through Chemical modifications of fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, v.67, n.6, p.1093-1100, 1998.
- MOE, M. T. et al. Effect of Environmental Aging on the Mechanical Properties of Bamboo-Glass Fibre Reinforced Polymer Matrix Hybrid Composites, *Composites Part A*, 33: 43-52, 2002.
- MOHAN, R., KISHORE, A. J., Reinforced Plastic Composites, v.4, pp. 186-194.
- MOHANTY^a K.; MISTRA, M. Studies on jute fibers in composites: a literature review. *Polymer Plastic Tecnology Engeering*, v. 34, n.5, p. 729-792, 1995.
- MOHANTY, A. K. et al. *Macromolecular Materials and Engineering*, v.276/277, p.1-24, 2000.
- NAIK, N. K.; KUMAR, R. S.; “Compressive Strength of Unidirecional Composites: Evaluation and comparison of Prediction Moldes”, *Composite structures*, v. 46, p. 299-308, 1999.
- NAKAMURA, T., Wu, L. C. Effects of ply arrangement on compressive failure of layered structures. *Engineering fracture mechanics*. Vol. 67. Págs. 421-443. 2000.
- NASSAR, N. L. *Bibliografia da Juta*. Brasília, Embrapa/DID,19980. 34p.
- NOTHENBERG, M. – Cresce o interesse pelo uso de fibras naturais – *Revista Plástico Moderno*, Ed. QD. Ltda., n. 263, p. 6-15, 1996.
- OLIVEIRA, W., 2005, “Comportamento mecânico e Característica da Fratura em Compósitos Híbridos”, *Dissertação de mestrado*, UFRN, Natal-RN, Brazil.
- OLIVEIRA, W; *Comportamento Mecânico e Característica da Fratura em Compósitos Híbridos*. Natal, 124p, 2005.
- PAIVA, J. M. F.; Frollini, E. Matriz termofixa fenólica em compósitos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. *Polímeros: Ciências e Tecnologia*. Págs. 78 a 87. Abr/Jun – 1999.
- PAIVA, J. M. F.; Trindade, W. G.; Frollini, E. Compósitos de matriz termofixa fenólica reforçados com fibras vegetais. *Polímeros: Ciências e Tecnologia*. p.170 -76. Out/Dez – 1999.

- PIMENTA, M. J. A.; FROLLINI, E – Lignin: utilization as a “macromonomer” in the synthesis of phenolic type resins. *Anais Associação Brasileira de Química*, v.46, n.1, p.43-49, 1997.
- POLYMERS AND COMPOSITES, 3., São Pedro, 2000. Proceedings. São Paulo, USP/UNESP/Embrapa, p.362-366, 2000.
- RANA, A. K., Mandal, A., Bandyopadhyay, S. short jute fiber reinforced polypropylene composite: effect of compatibiliser, impact modifier and fiber loading. *Composites Science and Tecnology*. Vol. 63. Págs: 801 – 806, 2003.
- RANA, A. K.; MANDAL, A.; MITRA, B. C.; JACOBSON, R.; BANERJEE, A. N. Short jute fiber-reinforced polypropylene composites: effetc of compatibilizer. *Journal of Applied Polymer Science*, v.6, n.2, p.329-338, 1998.
- RAVI KUMAR, N. L.; An evaluation of the effects of type and temperature of aqueous media on the compressive strength of glass-epoxy composites. v.23, n.16, p.1717-1727, 2004
- REBENFIELD, L.; Fiber; *Encyclopedia Of Polymer And Tecnology*; (s.l.): John Willey E Sons Inc.; v., p. 522-533, (1998).
- REIFSNIDER, K. L. *Damage in composite materials*. 280p. 1982.
- Revista Agro Amazônia, 2003, disponível em: <http://www.revistaagromazonia.com.br/13-fibras.htm>. Pesquisada em: 03/09/2003.
- Revista Agro Amazônia, Ed.2, Abril/2002, disponível em: <http://www.revistaagromazonia.com.br/curauá.htm>. Pesquisada em: 03/09/2003.
- Revista Agro Amazônia, Ed.8, Outubro/2002, disponível em: <http://www.revistaagromazonia.com.br/08-fibras.htm>. Pesquisada em: 03/09/2003.
- ROWELL, R. M., Opportunities for Lignocellulosic Materials and Composites. In: *Emerging Technologies for Materials and Chemicals from Biomass: Proc. of Symposium; 1990 August 26-31; Washington, DC*. Washington, DC: American Chemical 21 Society; 1990. Chap. 2. ACS Symposium Series 476. pp. 12-27, 1990.
- ROWELL, R.M, Potentials for Composites from Jute and Allied fibers. In: *International Symposium on Biocomposites ans Blends on jute and allied Fibers*. Calcutta, India. Pp.1-7, 1994.
- ROWELL, R.M.; SANADI, A.R.; CAULFIED, D. F.; JACOBSON, R. E. – Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities. In: *LIGNOCELLULOSIC – Plastics Composites*. São Paulo, USP/UNESP, p. 23-51, 1997.

- SCIDA D ET AL. The effect of ageing on the damage events en woven-fibre composite materials under different loading conditions. *Composite Science and Technology*. v. 62; p. 551-557; 2002.
- SEENA, Y. ET AL., “A Comparison of the Mechanical Properties of Phenol Formaldehyde Composites Reinforced with Banana Fibres and Glass Fibres”, *Composites Science and Technology*, vol. 62, pp. 1857-1868, 2002.
- SENA, J. C. A.; COLARES, R. S. Informações básicas sobre a cultura do curauá Emater-Santarém/Pa, 1996.
- SHUT, T.; GAYER, U. Automotive Applications of Natural Fiber Composites. Benefits for the environment and Competitiveness with Man-Made Materials. In: FROLLINI, E; LEÃO, A.L.; MATTOSO, L. H. C. *Lignocellulosic-Plastics Composites*. São Carlos, USP/UNESP, 1997. p.181-195.
- SILVA, L.C.F.; Análise das Propriedades Mecânicas e Térmicas de Tijolos Solo-Cimento com e sem Adição de Pó da Fibra do Coco. Tese de mestrado, UFRN, 148 p, 1999.
- SILVA, L.C.F.; MENDES, J.U.L.; LADCHUMANANANDASIVAM, R.: “Análise das Propriedades Mecânicas e Térmicas de Tijolos Solo-Cimento com e sem Adição de Pó da Fibra do Coco”, Congresso Nacional de engenharia Mecânica, 6 p, 2000.
- SILVA, R. V., SPINELLI, D., BOSE FILHO, W. W., CLARO NETO, S., CHIERICE, G. O., TARPANI, J. R., “Fracture toughness of natural fibres/castor oil polyurethane composites”, *Composite Science and Technology*, (In Press, Corrected Proof), 2005.
- SINGLETON, A. C. N. et al. On the Mechanical properties, deformation and fracture of a natural fibre/recycled polymer composite. *Composites- Part B*, vol. 34, p. 519-526, 2003.
- Site Governo do Estado do Pará, disponível em www.pematec.com.br em 06/10/2007.
- Site saint gobain, disponível em <http://www.saintgobain.com>. Pesquisado em 01/08/2006.
- SMITH, W. F. *Princípios de Ciências Engenharia dos Materiais*, Ed. McGraw-Hill, v.II, (19.).
- SREEKALA, M. S. ET AL., “The Mechanical Performance of Hybrid Phenol-Formaldehyde-based Composites Reinforced with Glass and Oil Palm Fibers”, *Composites Science and Technology*, vol. 62, p.. 239-253, 2002.
- SUDDLELL, B.C., Evans, W. J., Isaac, D. H., Crosky, A., in: *IV International Symposium on Natural Polymers and Composites*, São Pedro, Brazil, 2002.
- TANAKA, I.A. – Estudo de propriedades de compósitos de matriz termorrígida fenólica reforçada com fibras de juta. São Carlos, 2001.

- TAVARES, R. N.; Aquino, E. M.. F. Controle da moldagem a vácuo melhora a qualidade das peças de plásticos reforçado. *Plástico Industrial*. Vol 04/Dezembro, 1999.
- THOMASON JL. The interface region in glass fibre-reinforced epoxy resin composites: 2. Water absorption, voids and the interface. *Composites* 1995;26(7):477.
- TOLEDO FILHO, R. D. – Reforços Naturais – Estrutura e Propriedades Mecânicas Curso de Pós-Graduação , PUC – Rio de Janeiro, 1993.
- TRINDADE, W. G. – Preparação de compósitos de matriz fenólica e lignina fenol reforçada com fibras de curauá modificada superficialmente. São Carlos, 88p 2000. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- TSAI, K.-h.; CHIU, C.-H.; WU, T.-H.: Fatigue Behavior of 3D multi-Layer Angle Interlock Woven Composite Plates, *Composites Science and Tecnology*, Vol. 60, pp. 241-248, 2000.
- TWE, M. M. e Liao, K. Durability of bamboo-glass fiber reingorced polymer matrix hybrid composites, *Composites Science and Tecnology*, vol. 63, p. 375-387, 2003.
- TWE, M. M. et al, “Effects of environmental aging on the mechanical properties of bamboo-glass fibre reinforced polymer matrix hybrid composites”, *Composites Part A*, vol. 33, pp. 43-52, 2002.
- VAN VLACK, L. H. – Elements of Materials science and engineering. Ann arbor, Addison-Wesley, 498p, 1989.
- VINCENZINE, P. – Advanced structural fiber composites. Itália, Techna Faenza, 623 p, 1995.
- VLACK, L. H. – Princípios de Ciências dos Materiais – Edgard Blucher, 8 ed., São Paulo, 1988.
- YANG, b.; KOSEY, V.; ADANUR, S.; KUMAR, S.: “Bending, compression and Shear Behavior of Woven Glass Fiber-Epoxy Composites”, *Composites – Part B: Engineering*, v.31, p.715-721, 2000.
- YOSOMIYA, R.; MORIMITO, K.; NAKAJIMA, A.; IKADA, Y.; SUZUKI, TOSHIO. – Adhesion and Bonding in Composites. New York, , Marcell Dekker, 357p, 1989.
- YOUNG, R.A, Fibers (Vegetable).Kirk-Othmer encyclopedia of chemical Tecnology 4th. Ed. Volume 10. J.Wiley & Sons, Inc. pp.727-744, 1994.
- ZARATE, C.N.; ARANGUREM, M. I.; REBOREDO, M. M. – Effects of fiber length in resol/sisal composites. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NATURAL

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)