

MATERIAIS COMPÓSITOS

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Pode-se dizer que compósito é uma mistura de dois ou mais componentes ou fases distintas. No entanto, esta definição não é suficiente e três outros critérios têm de ser satisfeitos antes deste material ser considerado um compósito. O primeiro é que os componentes devem estar presentes em proporções razoáveis, ou seja, superior a 5%. Em segundo, as fases

constituintes devem ter diferentes propriedades e, portanto, as propriedades do compósito são sensivelmente diferentes das propriedades dos constituintes. Por último, compósito é produzido por misturas e combinações dos componentes por diversos meios (MATTHEWS e RAWLINGS, 1994).

Na segunda metade do século XX, poucas pesquisas na área da mecânica puderam confrontar com a modelagem de sólidos heterogêneos, na sustentação do desenvolvimento de compósitos e de seu uso em numerosas aplicações estruturais.

Com uma breve introdução na área da aviação e aeroespacial de alto desempenho, nos barcos e nos equipamentos de esportes, na construção naval, na fabricação de pontes e de veículos, os compósitos permitiram a produção de dispositivos inteiramente novos (DVORAK, 2000).

Observa-se na Figura 1 uma proposta de classificação de compósitos dada por Levy e Pardini (2006). Tecnicamente, os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase dispersa encontra-se na forma de uma fibra. Resistência e/ou rigidez alta são as características perseguidas frequentemente, sendo expressas em termos de resistência específica e módulo específico.

A maioria dos compósitos é desenvolvida visando à melhoria das propriedades mecânicas, como rigidez, resistência e tenacidade, sendo às vezes explorada combinadamente outras propriedades, como resistência às condições ambientais e em altas temperaturas. Sendo assim, a análise dos compósitos normalmente é concentrada nas propriedades mecânicas.

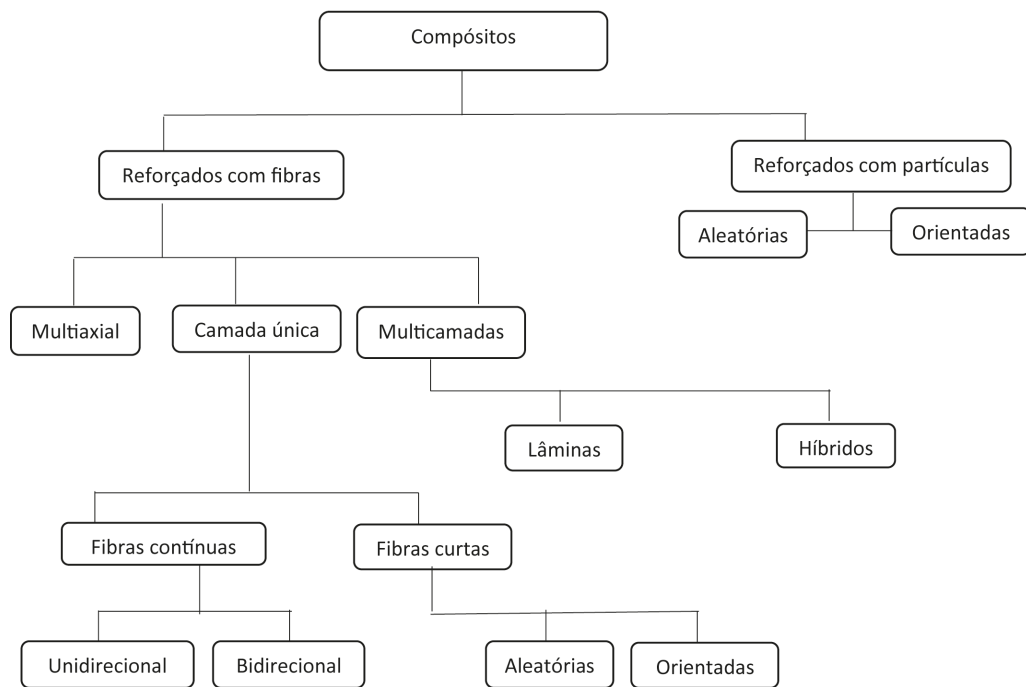


Figura 1 Proposta de classificação hierárquica dos materiais compósitos.

Os compósitos, em relação aos materiais estruturais isotrópicos tradicionais (materiais metálicos), apresentam um grau de complexidade inerente muito maior. Por outro lado, as propriedades dos compósitos são influenciadas por um número de fatores e variáveis, possibilitando a liberdade de ajustes na fabricação do material, dotando-o de propriedades adequadas à necessidade e atendendo a um requisito específico de projeto (LEVY e PARDINI, 2006).

A matriz mais utilizada para materiais compósitos é a polimérica. As razões para isto são duas:

- I. Em geral, as propriedades mecânicas dos polímeros são inadequadas para várias aplicações. As suas resistências são muito inferiores

se comparadas com as de metais e cerâmicos. Isto significa que existe um grande benefício potencial usando o processo de reforço em materiais poliméricos e;

- II. O processamento de compósitos poliméricos não necessita de altas pressões e de altas temperaturas.

Uma classificação simples para as matrizes poliméricas as divide em termorrígidos, termoplásticos e elastômeros sendo todas importantes para compósitos (MATTHEWS e RAWLINGS, 1994).

A utilização de cargas e reforços pela indústria de plásticos não apenas tem alcançado volumes expressivos como também vem mudando o perfil da indústria pela ampliação do espectro de aplicação de diversos polímeros.

Compósitos de polímeros reforçados com fibras curtas são muito atrativos devido à sua facilidade de fabricação, economia e propriedades mecânicas superiores. Processos de injeção e extrusão são frequentemente usados para fabricação destes compósitos (FU; LAUKE; MADER; YUE; HU, 2000).

Desta forma, houve uma necessidade de aumentar o entendimento sobre as influências dos parâmetros que controlam as relações entre propriedades e estrutura destes compósitos carregados com fibras (THOMASON, 2002).

As principais razões para modificações de plásticos com cargas são:

- Aumento da resistência ao calor;
- Redução de custo;

- Aumento da rigidez;
- Redução da contração;
- Alteração das propriedades elétricas;
- Redução da flamabilidade;
- Modificação do peso específico;
- Aumento da resistência à compressão;
- Maior capacidade de lubrificação;
- Redução da permeabilidade;
- Aumento da resistência ao impacto e
- Maior estabilidade dimensional.

O sucesso dos compósitos fibrosos com matriz termorrígida ou termoplástica, em grande parte como substitutos para os metais, resulta do maior aperfeiçoamento das propriedades mecânicas dos compósitos em comparação com o material da matriz.

Uma vantagem que os compósitos de matriz polimérica têm sobre os metais é a sua baixa densidade. O benefício da baixa densidade torna-se aparente quando o módulo específico (Módulo de Young por unidade de massa) e a resistência específica (resistência mecânica por unidade de massa) são considerados. Este é um fator de grande importância na mudança de componentes, especialmente quando os resultados com a redução do peso levam a uma maior eficiência energética e, consequentemente, a uma redução de custos (MATTHEWS e RAWLINGS, 1994).

A fabricação e as propriedades dos compósitos são fortemente influenciadas pelas proporções e propriedades da matriz e do reforço. As

proporções podem ser expressas através da fração mássica (W_f), que é relevante para a fabricação, ou através da fração volumétrica (V_f), que é comumente utilizada nos cálculos do teor de fibras (MATTHEWS e RAWLINGS, 1994).

A maioria das propriedades dos compósitos é uma função complexa das propriedades das fases constituintes, onde os componentes normalmente interagem de uma maneira sinérgica, de modo a proporcionar uma melhor combinação de propriedades. A resistência química e características da interface entre as fibras e a matriz são importantes para determinar as propriedades do compósito (MATTHEWS e RAWLINGS, 1994).

2.1.1 Interface, interfase e adesão

Em compósitos, a interface, interfase e adesão influenciam nas propriedades mecânicas, como resistência à tração, resistência ao impacto, resistência à flexão e à fadiga, e são considerados fatores importantes.

A interface é referida como a ligação considerada de espessura zero entre a superfície da fibra e da matriz. A resistência da ligação interfacial deve ser suficiente para a carga ser transferida da matriz para as fibras para que o compósito seja mais forte e resistente do que a matriz sem reforço. A região de interfase é a área imediatamente adjacente à interface, estendida a uma distância finita na matriz polimérica (Figura 2).

Do ponto de vista mecânico, é considerada contínua em termos de transferir tensões entre a fibra e a matriz. Uma vez que a matriz recebe o material de reforço, ocorre um contato íntimo entre elas, podendo haver adesão. Diferentes tipos de adesão podem ser formadas, ou seja, para

uma certa combinação de materiais, um mecanismo de adesão pode ocorrer, como adesões mecânica, eletrostática, química e por interdifusão. Os tipos de adesão dependem de alguns fatores como a presença de impurezas ou adição de agentes de acoplamento (MATTHEWS e RAWLINGS, 1994).

O desenvolvimento de uma ligação química ou interação física, na região interfacial, promove a adesão necessária entre fibra/matriz, produzindo compósitos com melhores propriedades. Muitas vezes é preciso aumentar a adesão entre as duas superfícies com utilização de agentes de acoplamentos ou modificadores de superfície (LEVY e PARDINI, 2006). O comportamento tensão-deformação de muitos polímeros reforçados pode ser alterado por promotores de adesão e agentes de acoplamento como os silanos que alteram a adesão e a natureza da interface reforço/matriz.

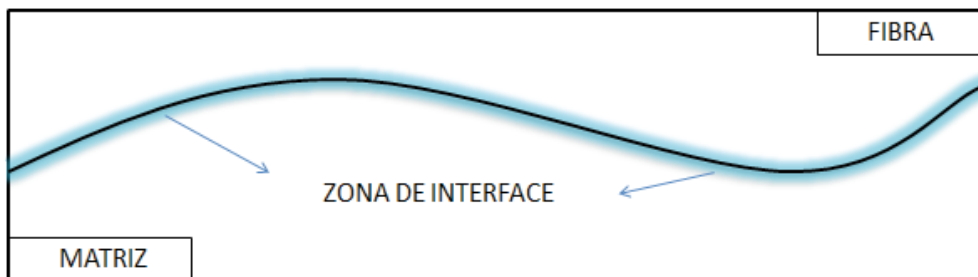


Figura 2 Região de interface e interfase entre fibra e matriz.

Fonte: NOHARA; KAWAMOTO; NOHARA; REZENDE, 2007.

2.1.2 Processos de fabricação de materiais compósitos

A taxa de crescimento de compósitos com matriz termoplástica é consideravelmente maior que para compósitos de matriz termorrígida. Isto ocorre devido ao grande uso de peças na indústria automobilística e a possibilidade de uma taxa de produção mais rápida com termoplásticos

do que com a maioria das resinas termorrígidas (BUNSELL e RENARD, 2005).

Os termoplásticos podem ser reprocessados e reciclados, não precisam ser estocados à baixa temperatura e são mais resistentes a ataques químicos que os termorrígidos, reduzindo assim os custos. Os polímeros termoplásticos têm sido uma alternativa de aplicação em estruturas devido à maior tenacidade à fratura, resistência ao impacto e tolerância a danos em relação aos polímeros termorrígidos (BUNSELL e RENARD, 2005).

Normalmente o processamento de polímeros termoplásticos ocorre com a aplicação de temperatura associado à aplicação de pressão. Os termoplásticos amorfos são conformados acima das suas temperaturas de transição vítrea, enquanto que os semicristalinos são processados acima de suas temperaturas de fusão. A escolha do método de conformação para um determinado polímero depende de vários fatores, tais como:

- Se o polímero é termoplástico ou termorrígido.
- Geometria e tamanho da peça.

Métodos de fabricação são geralmente determinados a partir das propriedades reológicas do polímero e a primeira consideração é se o material é termoplástico ou se é termorrígido. Outras considerações importantes incluem a temperatura de amolecimento, a estabilidade, o tamanho e a forma do produto final.

A utilização desses polímeros como matriz em compósitos varia em função do tipo de fibra utilizada e do processo empregado, sendo que os termoplásticos são usados principalmente com fibras curtas e em moldagem por injeção. Os termoplásticos são colocados em conta-

to com o reforço quando fundidos, podendo apresentar certa dificuldades com algumas matrizes termoplásticas, devido a alta viscosidade do polímero.

As propriedades dos termoplásticos são influenciadas pelo grau de cristalinidade, pela morfologia e pela orientação da rede polimérica, as quais são diretamente relacionadas às condições de processamento (LEVY e PARDINI, 2006). Quando o polímero é reforçado, o compósito formado apresenta propriedades dependentes das características da resina e das fibras (BUNSELL e RENARD, 2005).

No processamento desses compósitos, podem ser utilizados processos convencionais de extrusão ou injeção, tendo como ponto de partida a composição do reforço/matriz (LEVY e PARDINI, 2006). O processo de fabricação dos termoplásticos reforçados com fibras consiste basicamente de uma pré-mistura em uma câmara de mistura, onde primeiramente se adiciona o polímero e, após sua fusão, adiciona-se as fibras. Esta pré-mistura pode passar por um processo de homogeneização através de uma extrusora ou ser diretamente moldada por injeção. Estes compósitos também podem ser fabricados por moldagem por compressão.

Os polímeros termorrígidos são mais utilizados para uso estrutural em materiais compósitos por apresentarem algumas vantagens em relação aos termoplásticos, tais como alta rigidez, elevada estabilidade térmica, alta estabilidade dimensional, boas propriedades de isolamento elétrico e térmico, resistência à fluência e relaxação. As resinas termorrígidas mais usadas e mais baratas são os poliésteres, poliuretanos, vinil-éster e resinas fenólicas; as quais são usadas principalmente para compor compósitos reforçados com fibras de vidro. As resinas epóxi são mais caras e além das aplicações estruturais, também são muito utilizadas em aplicações

aeroespaciais por possuírem melhores propriedades mecânicas e melhores resistências à umidade do que os poliésteres, poliuretanos e as resinas vinílicas (SILVA, 2014).

Os polímeros termorrígidos, macromoléculas de cadeia reticulada, são polimerizados durante o processamento, não podendo ser reciclados devido à decomposição térmica. Esses polímeros são comercializados principalmente para fabricação de compósitos, além de uso como adesivo e revestimento. O processamento desses compósitos pode ser realizado em moldes de simples confecção e a disposição dos constituintes pode ser feita à mão ou automaticamente. A cura ou endurecimento da resina pode ocorrer com ou sem auxílio de pressão, temperatura ou vácuo. As propriedades alcançadas por esses materiais consagraram o uso dos materiais compósitos. A produção desses materiais ainda é limitada em função do maior tempo de produção. Ainda assim são muitos utilizados por apresentarem propriedades mecânicas elevadas (SANTOS, 2006).

2.2 FIBRAS VEGETAIS UTILIZADAS EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

As fibras naturais são classificadas quanto a sua origem em: vegetal, mineral e animal. As fibras utilizadas neste trabalho são de origem vegetal, sendo assim, estas fibras são obtidas dos caules, folhas, frutos ou sementes de vegetais (MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2005).

A utilização de fibras vegetais em substituição às fibras sintéticas é uma escolha muito importante, pelo fato da fibra ser biodegradável, baixo custo em relação as fibras sintéticas, ser de fonte renovável e o mais importante é provocar um menor impacto no meio ambiente. Um dos

países que possuem a maior extensão territorial cultivável e biomassa do mundo é o Brasil, e se tais recursos forem bem explorados, o mesmo se torna um grande potencial. As fibras vegetais; possuem menor densidade do que as fibras sintéticas e causam menor desgaste nos equipamentos de processamento de compósitos (MATTOSO *et al*, 1996).

O uso de fibras lignocelulósicas como reforço para materiais poliméricos aumentou durante os últimos anos, substituindo as fibras sintéticas, especialmente as fibras de vidro, em compósitos utilizados em diferentes setores industriais como o automobilístico e a construção civil, apresentando diversas vantagens quando comparados a materiais tradicionais (BEG e PICKERING, 2008). Algumas dessas vantagens são:

- ser proveniente de fonte renováveis;
- disponibilidade contínua;
- biodegradabilidade;
- baixo custo;
- baixa densidade;
- propriedades específicas interessantes;
- a natureza abrasiva das fibras vegetais é muito menor do que a fibra de vidro, oferecendo vantagens quanto ao processamento e a reciclagem (MALKAPURAM; KUMAR; NEGI, 2009).

As fibras vegetais podem ser classificadas segundo a parte do vegetal da qual são extraídas, conforme mostra a Figura 3. As fibras oriundas do caule ou das folhas da planta são as mais usadas como fase dispersa em compósitos poliméricos.

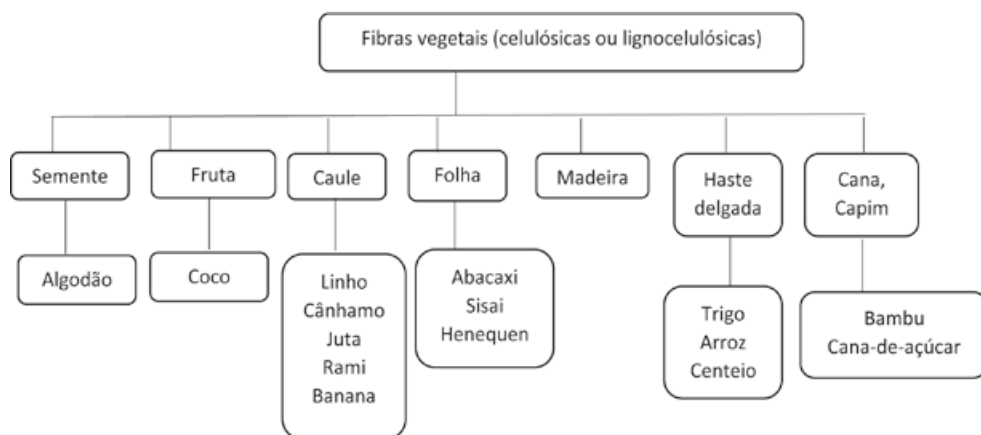


Figura 3 Classificação das fibras vegetais

Fonte: HERRERA-FRANCO e VALADEZ-GONZÁLES, 2005; MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2005.

Diversas fibras vegetais tais como rami, juta, sisal, bambu e banana são usadas como reforços substituindo fibras convencionais, como as fibras de vidro. Linho, kenaf, cânhamo, e farinha de madeira são relatados como adequados para aplicação como cargas e componentes de absorção de impacto em veículos. Algumas destas fibras estão apresentadas na Figura 4 (HERRERA-FRANCO e VALADEZ-GONZÁLES, 2005), (BOURMAUD e BAILEY, 2009).

As propriedades físicas, mecânicas e químicas destas fibras vegetais são fortemente dependentes da colheita, influenciadas pelo clima, localização, características do solo, condições do tempo, entre outros fatores. De fato, as propriedades também são afetadas pelo processamento das fibras e pela sua incorporação em compósitos, com relação ao manuseio, à impregnação e à consolidação.

Além disso, as fibras naturais apresentam algumas desvantagens como pobre molhabilidade pelo polímero, incompatibilidade com algumas matrizes poliméricas e alta absorção de umidade (MANCHADO; ARROYO; BIAGIOTTI; KENNY, 2003); (BEG; PICKERING, 2008).

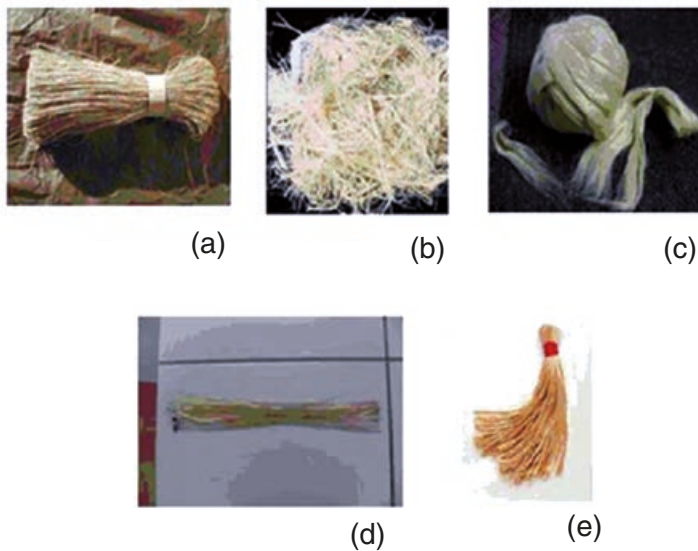


Figura 4 Fibras utilizadas em compósitos poliméricos. a) rami; b) kenaf; C) cânhamo; d) bananeira e e) juta.

Fonte: HERRERA-FRANCO e VALADEZ-GONZÁLES, 2005; BOURMAUD e BAILEY, 2009.

Estas dificuldades podem ser minimizadas por tratamentos físicos com plasma e corona ou tratamentos químicos com anidrido maleico, organosilanos, isocianatos, hidróxido de sódio, permanganatos, peróxido entre outros (MARCONCINI; ITO; JR; MATTOSO, 2007).

A Tabela 1 apresenta os valores médios dos constituintes de fibras brasileiras utilizadas na fabricação de compósitos poliméricos.

Tabela 1 Composição química de algumas fibras naturais.

Fibra	α -celulose(%)	Hemicelulose(%)	Lignina(%)	Cinza(%)	Extravios(%)
Bagaço de cana-de-açúcar	54.3-55.2	16.8-29.7	25.3-24.3	1.1	0.7-3.5
Bambu	33-45	30	20-25	-	-
Banana	60-65	6-8	5-10	1.2	-

Juta	60	22.1	15.9	1.0	-
Rami	80-85	3-4	0.5	-	6.4
Piçava	31.6	-	48.4	-	-
Palha de arroz	51-70	-	12-16	15-20	9-14
Curauá	70.7-73.6	21.1	7.5-11.1	0.79-0.9	2.5-2.8
Abacaxi	83	-	12	-	-
Sisal	74-75.2	10-13.9	7.6-7.98	-	-
Algodão	90	6	-	-	0.4

Fonte: Adaptado de SATYANARAYANA et al. 2007.

A Tabela 2 mostra as propriedades mecânicas de algumas fibras vegetais, podendo ser observado que as fibras possuem resistência à tração satisfatória, sendo utilizadas como reforços para materiais poliméricos.

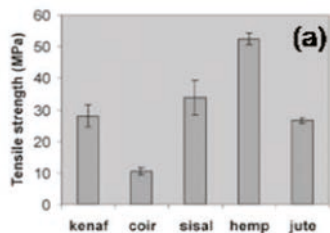
Tabela 2 Propriedades mecânicas de algumas fibras naturais.

Fibra	Resistência à tração (MPa)	Elongação na ruptura (%)	Módulo de Young (Mpa)
Algodão	264-654	3.0-7.0	4.980-10.920
Fio de lã	120-174	25-35	2.340-3.420
Seda	252-528	20-25	7.320-11.220
Linho	300-900	2.7-3.2	24.000
Juta	342-672	1.7-1.8	43.800

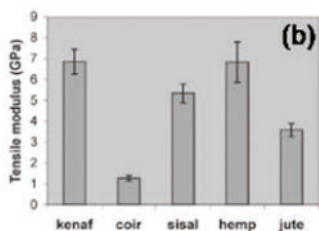
Fonte: JOSEPH; JOSEPH; THOMAS, 1999.

Wambua *et al.* (2003), estudaram as propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno reforçados com diferentes fibras naturais, como kenaf, coco, sisal, cânhamo e juta (Figura 5). Compósitos de kenaf, cânhamo e sisal mostraram resistência à tração e módulos comparáveis, mas na propriedade de impacto o sisal apresentou melhor desempenho que as demais fibras. Compósitos reforçados com fibra de coco mostra-

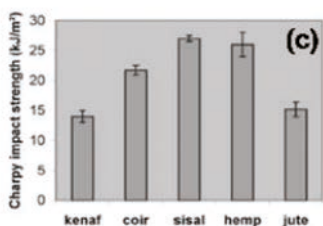
ram baixas propriedades mecânicas, porém a resistência ao impacto foi maior que para os compósitos reforçados com juta e kenaf.



a) resistência à tração



b) módulo de tração



c) resistência ao impacto

Figura 5 Propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com diferentes fibras naturais.

Fonte: Descrita no texto (Wambua, 2003). Disponível em: <<http://www.science-direct.com/science/article/pii/S0266353803000964#FIGGR4>>.

Os compósitos reforçados com fibras vegetais tem sido uma área atraente para pesquisadores e indústrias, onde atualmente se torna uma necessidade à agregação de valores aos resíduos gerados pela população, criando materiais alternativos eficientes e de baixo custo, aproveitando os próprios recursos naturais, e preservando o meio ambiente.

2.3 COMPÓSITOS DE MATRIZES POLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRAS VEGETAIS

Dentre os materiais compósitos, o reforço tipo fibra tem despertado grande interesse em engenheiros da indústria de diversos setores como automotiva, da construção, mecânica, metalúrgica, farmacêutica, naval, aeronáutica, aeroespacial, entre outras. Uma vez que a forma fibrosa de um material possui elevada resistência à tração e alto módulo de elasticidade, este tipo de material é usado atualmente como material de engenharia em combinação com uma matriz que, além de envolver e proteger a fibra deforma sob a ação de uma força e lhe distribui a tensão, impedindo a propagação de falhas (SCHWARTZ, 1984).

Um critério decisivo para a escolha do tipo adequado de fibra é o seu módulo de elasticidade. Uma comparação entre os valores de resistência de diversas fibras naturais com relação os correspondentes às fibras de vidro mostrou que, por exemplo, os valores absolutos característicos das fibras tropicais eram de apenas metade do nível correspondente aos valores característicos da fibra de vidro. Contudo, devido ao fato de sua densidade ser aproximadamente 45% menor, as fibras naturais apresenta níveis de resistência específica comparáveis aos da fibra de vidro (BARBOSA, 2011).

Compósitos de polímeros com fibras vegetais vêm sendo também apontados como alternativas com potencial econômico para a fixação de carbono na natureza, reduzindo a emissão de CO₂ na atmosfera durante o seu ciclo de produção, processamento e utilização, ganhando assim um incremento de seu potencial econômico devido a possibilidade de comércio de créditos de carbono para a cadeia produtiva (MARINELLI; MONTEIRO; AMBRÓSIO; BRANCIFORTI; KOBAYASHI; NOBRE, 2008).

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

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais têm recebido uma atenção especial, e essa atenção é devido às vantagens que as fibras naturais possuem quando comparadas às fibras sintéticas, tais como: baixa densidade, baixo custo, são provenientes de fontes renováveis, não são tóxicas, são biodegradáveis, podem ser incineradas e, principalmente, são consideradas sustentáveis (GUIMARÃES *et al.*, 2009).

Wolcott (2003) ressaltou em seu trabalho que os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais, são competitivos em custos de produção quando comparados com produtos de madeira, desde que se prefira o uso de plásticos reciclados nos compósitos, devido a seu baixo custo e boa processabilidade.

Os processos de mistura e de formulação dos compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras vegetais são principalmente realizados em duas etapas. A primeira etapa é feita a incorporação das fibras à matriz. Já na segunda etapa, o compósito é moldado na forma do produto final (BEDIN, 2014).

Para se formular um compósito de matriz polimérica e de fibras vegetais, a compatibilidade entre eles possui um papel determinante nas propriedades finais do compósito, pois é através da interface que ocorre a

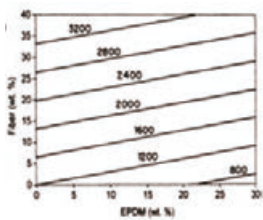
transferência de carga da matriz para a fibra. Quando há uma má interação fibra/matriz, a interface é a região mais fraca do material, local onde ocorre a falha, que acaba comprometendo o reforço do compósito, devido à transferência ineficiente de esforços na interface fibra/matriz (LI; HU; YU, 2008). Muitos trabalhos indicam que a modificação superficial das fibras naturais antes de ser incorporada como reforço em matrizes poliméricas reduz a diferença de polaridade e melhora a compatibilidade entre fibra e matriz.

A matriz polimérica é responsável pela distribuição da tensão aplicada ao compósito, porém as fibras naturais degradam em temperaturas elevadas, portanto a escolha do polímero é limitada principalmente pela temperatura necessária ao processamento, pois é necessário a escolha de uma matriz polimérica e de um tipo de fibra natural que não degrade em seu processamento. De acordo com a disponibilidade, baixo custo e facilidade de processamento a temperaturas não tão elevadas, a matriz polimérica mais utilizada é o polietileno (VELDE e KIEKENS, 2001).

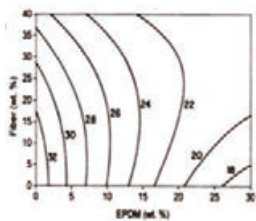
Fibras vegetais apresentam um papel importante no desenvolvimento de compósitos “verdes”, com uma matriz biodegradável e de bom desempenho, podendo ser um material chave para minimizar os problemas ecológicos e ambientais atuais. O que se espera que ocorra com a introdução de compósitos “verdes” no mercado é a redução de problemas de controle de resíduos na agricultura, poluição ambiental, entre outros. Além disso, esse tipo de material pode encontrar várias aplicações nos campos da engenharia, eletrônica e automotiva. Baixo peso, diminuição do desgaste de máquinas, baixa abrasividade, baixo risco à saúde durante o processamento, são outras vantagens dos compósitos “verdes” (GODA; SREEKALA; GOMES; KAJI; OHGI, 2006).

2.3.1 Propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais

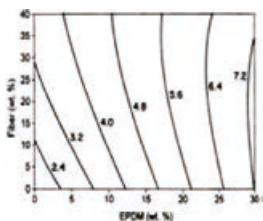
Como o PP apresenta pobre resistência ao impacto, especialmente em baixas temperaturas, proporciona limitações quanto as suas aplicações. Modificadores de impacto são utilizados para diminuir esta deficiência, sendo o terpolímero de etileno-propileno-dieno (EPDM) o mais eficiente. Biagiotti et al (2003) avaliaram as propriedades mecânicas de resistência à tração, resistência à flexão, resistência ao impacto e o comportamento morfológico de compósitos ternários de PP/EPDM reforçado com fibra de linho. Os resultados mostram que as fibras de linho comportam-se como um agente de reforço efetivo nestes sistemas. De fato, um considerável aumento dessas propriedades na presença de fibras foi observado, conforme mostra a Figura 6.



a) Módulo de tração (MPa)



b) Resistência à tração (MPa)



c) Resistência ao impacto (kJ/m)

Figura 6 Curvas de níveis em função da composição do compósito.

Fonte: BIAGIOTTI 2003.

Estudos morfológicos foram realizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde se pode observar (Figura 7) uma pobre adesão entre as fibras de linho e a matriz estudada. É assumido que a estrutura hidrofílica das fibras vegetais não é quimicamente compatível com a matriz do polímero hidrofóbico (BIAGIOTTI; MANCHADO; ARROYO; KENNY, 2003).

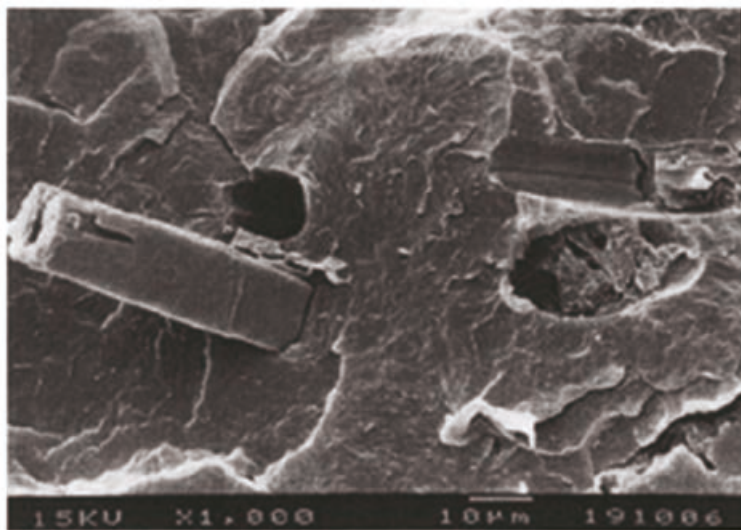


Figura 7 Superfície de fratura de compósitos de PP reforçado com 20% de fibras de linho.

Manchado *et al* (2003) avaliaram o efeito da compatibilidade entre fibra vegetal, polipropileno (PP) e blendas de polipropileno com um terpolímero de etileno-propileno-dieno (EPDM) e a funcionalização de ambas as matrizes com anidrido maleico (MA). A incorporação de pequenas quantidades deste polímero melhorou consideravelmente a adesão interfacial fibra-matriz, e conseqüentemente as propriedades mecânicas do compósito.

A morfologia do PP é um fator importante na sua utilização como matriz para termoplástico reforçado. Por ser um polímero semicristalino, apresenta estrutura esferulítica (Figura 8(a)) formada por blocos de cristais na forma de lamelas. A cristalinidade da cadeia polimérica é um crítico, definindo a morfologia final. No estudo de termoplásticos reforçados, deve ser considerado que a morfologia do PP pode ser afetada pela presença das fibras. Desta maneira, o fenômeno pode ser responsável por modificações significativas nas propriedades mecânicas dos compósitos. Porém, se um grande número de núcleos é formado na interface da fibra, o desenvolvimento (crescimento) lateral dos esferulitos é impedido, ocorrendo um crescimento em colunas ou a transcristalização na superfície da fibra, conforme observado na Figura 8(b). O mecanismo de transcristalização ainda não é totalmente entendido, mas observou-se que a presença de regiões de transcristalinidade na superfície da fibra pode melhorar as propriedades de alguns polímeros reforçados com fibras (MANCHADO; TORRE; KENNY, 2001).

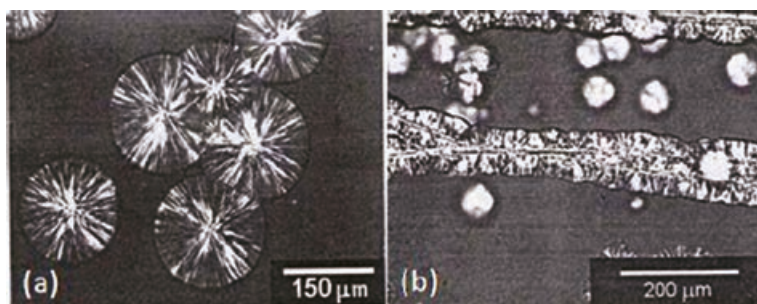


Figura 8 Micrografias do crescimento dos esferulitos a 130 °C: a) PP puro depois de 2430s; b) Composito PP/Linho (80/20 wt%), fenômeno de transcristalização, depois de 180s.

Fonte: MANCHADO et al, 2003.

Em 2013, Ndlovu e colaboradores estudaram o comportamento mecânico de compósitos de polietileno de baixa densidade (PEBD) com fi-

bras de madeira, e obteve valores de módulos de tração entre 0,08 GPa para o polímero virgem, até 0,4 GPa, para compósitos com 30% de fibras de madeira. O autor comenta que os valores tão baixos, estão relacionados a baixa interação fibra/matriz, que deve ser compensando com um agente compatibilizante ou com tratamento químico das fibras.

Em outro trabalho foi realizada a moldagem por compressão e a caracterização de compósitos de matriz poliéster insaturada reforçados por fibras de curauá. Alguns resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3, sendo que Giacomini *et al.* (2000) concluíram que as propriedades mecânicas encontradas não atenderam às especificações exigidas pela Mercedes-Benz. Entretanto, foram sugeridas alternativas para solucionar as dificuldades, como a modificação das características dos equipamentos, a formulação da resina e a necessidade de incorporar maior teor de fibras ou mudar o tipo de reforço.

Tabela 3 Propriedades mecânicas de compósitos com fibras de curauá.

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

Monteiro *et al.* (2006) investigaram as propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster ortoftálica reforçada com até 30% em peso de fibras contínuas e alinhadas de curauá. Foram realizados ensaios de flexão e a superfície fraturada foi observada por MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura). Segundo os autores, os resultados mostraram resistência superior à obtida por outros pesquisadores em compósitos com fibras curtas e não-orientadas, como esperado.

Segundo Santos *et al.* (2007), o interesse recente pelo uso de fibras vegetais como reforço de polímeros tem aumentado devido às vantagens ambientais e tecnológicas únicas que podem ser obtidas. Neste trabalho, foi avaliado o uso de fibras de curauá em compósitos com poliamida-6 (PA-6) em substituição à fibra de vidro. Foram preparados por extrusão compósitos com diferentes teores de fibra, 20, 30 e 40% em peso e com comprimento médio de fibra de 0,1 ou 10 mm, sendo moldados por injeção. As propriedades em tração e flexão desses compósitos foram melhores do que os sem carga, mas inferiores aos de poliamida-6 reforçados com fibra de vidro. No entanto, a resistência ao impacto e a temperatura de deflexão térmica foram similares aos compósitos de PA-6 com fibra de vidro, apresentando menos densidade, permitindo sua utilização em aplicações específicas e não-críticas.

Segundo Mishra *et al.* (2003), os materiais compósitos baseados em reforços compostos por dois ou mais tipos de fibras em uma matriz, ou seja, os compósitos híbridos, podem apresentar uma grande diversidade de propriedades. Pesquisas revelam que o comportamento mecânico dos compósitos híbridos aparenta ser uma simples média ponderada das propriedades dos componentes individuais, porém, podem apresentar um balanço mais favorável entre as vantagens e as desvantagens inerentes a todos os materiais compósitos.

Compósitos híbridos podem ser projetados pela combinação de fibras sintéticas e fibras naturais em uma matriz e pela combinação de duas fibras naturais (às vezes denominadas de biofibras) em uma matriz. A hibridização com fibra de vidro é um método desenvolvido para incrementar as propriedades mecânicas dos compósitos com fibras naturais, sendo que o grau de resistência depende do *design* e da construção do compósito (JOHN e THOMAS, 2008). É geralmente aceito que as pro-

priedades dos compósitos híbridos são controladas por fatores como a natureza da matriz, o comprimento e a composição relativa dos reforços, a orientação, a interface fibra-matriz, o grau de entrelaçamento entre as fibras o *design* da hibridização, entre outros.

John e Thomas (2008) avaliaram experimentalmente o potencial de reforço obtido com a incorporação de fibras vegetais (abacaxi e sisal) formando compósitos híbridos com fibras de vidro e matriz de poliéster. Adicionando-se pequenos teores de fibra de vidro às fibras vegetais, observou-se melhora nas propriedades mecânicas desses compósitos. A superfície das fibras de sisal também foi modificada com diferentes tratamentos químicos, proporcionando melhora nas propriedades mecânicas dos compósitos híbridos, assim como, menor absorção de umidade.

Costa *et al.* (2012) ainda obtiveram informações sobre as propriedades mecânicas de compósitos de fibra de malva com diferentes espessuras, e observaram resultados semelhantes de resistência à tração, independentemente da espessura, como apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 Resultados dos ensaios de tração dos compósitos de malva.

Reforço	Fração Mássica Reforço (FM) %	Resist. Tração (σ) (Mpa) Média (Descio Padrão)
Malva 2,5 mm	5,84	25,91 (\pm 2,62)
Malva 7,5 mm	3,57	25,12 (\pm 2,29)
Malva 12,5 mm	3,82	25,10 (\pm 1,45)

Compósitos de PP reforçados com fibras vegetais (sisal, kenaf, cânhamo, juta e coco) foram processados por compressão, utilizando-se o método de empilhamento de filmes de polipropileno. As propriedades mecânicas dos compósitos com as diferentes fibras vegetais foram testadas e

comparadas a compósitos feitos com mantas de fibra de vidro. Kenaf, cânhamo e sisal apresentaram propriedades semelhantes em tensão e módulo, mas na resistência ao impacto os compósitos com cânhamo apresentaram-se melhores do que os reforçados com kenaf. Em geral, as propriedades específicas encontradas para os compósitos com fibras vegetais foram mais favoráveis que nos compósitos de fibra de vidro (WAMBUA; IVENS; VERPOEST, 2003).

Araújo *et al.* (2008) prepararam compósitos com fibras de curauá e polietileno de alta densidade (PEAD) por extrusão com dois diferentes agentes de acoplamento. O polietileno graftizado com anidrido maleico afetou a estabilidade do compósito mais acentuadamente do que o polietileno graftizado com co-vinil acetato. Os resultados também indicaram que uma forte interação fibra-matriz se opõe ao aumento de cristalinidade causado pela fibra.

