



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Elaine Cristina Andrade

**Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos Reforçados  
com Fibras de Babaçu (*Orrbignya speciosa*):  
Caracterização Morfológica e Mecânica**

Marabá - PA  
2010

Elaine Cristina Andrade

**Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos Reforçados com  
Fibras de Babaçu (*Orrbignya speciosa*): Caracterização  
Morfológica e Mecânica**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Múcio Marcos Silva Nóbrega.

Marabá - PA

2010

Elaine Cristina Andrade

**Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos Reforçados com  
Fibras de Babaçu (*Orrbignya speciosa*): Caracterização  
Morfológica e Mecânica**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade  
Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às  
exigências para obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Múcio Marcos Silva Nóbrega.

Data de aprovação: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

Conceito: \_\_\_\_\_

Bancada Examinadora:

---

Prof. Dr. Múcio Marcos Silva Nóbrega  
Doutor em Engenharia de Processos  
ORIENTADOR – UFPA

---

Prof. M.Sc. Clesianu Rodrigues de Lima  
EXAMINADOR – UFPA

---

Prof. Dr. Elias Fagury Neto  
EXAMINADOR – UFPA

À minha mãe, Cinobilina.  
À minha madrinha, Esmeralda.  
Às minhas tias, Arlenne e Lidyanne.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Múcio Marcos Silva Nóbrega, pelos ensinamentos, empenho e paciência durante toda esta jornada.

À professora Maricely Uría Toro, pela dedicação e apoio para a realização deste trabalho.

Ao professor Marcus Vinícius Lia Fook, pela contribuição direta na realização do ensaio de impacto Izod na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

Ao professor Roberto Tetsuo Fujyama, pela grande disponibilidade em oferecer o laboratório de Mecânica na Universidade Federal do Pará – UFPA, Campus de Belém para a realização do ensaio de tração.

Ao Izael, um novo amigo, que se dispôs em me ajudar na realização do ensaio de tração.

Ao professor Cláudio Nery Lamarão, que cedeu o Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura na Universidade Federal do Pará – UFPA, Instituto de Geociências, Campus de Belém para realização da análise morfológica.

À minha família, em especial, minha mãe e madrinha que sempre me apoiaram em todos os momentos.

Aos meus amigos da Faculdade que de alguma maneira me ajudaram diretamente e indiretamente.

À Universidade Federal do Pará, pela formação em Engenharia de Materiais.

## RESUMO

A busca por materiais ecologicamente corretos visando minimizar os problemas ambientais tem se tornado uma grande preocupação nos últimos anos. A utilização das fibras vegetais como substitutas de diversos reforços sintéticos ou de cargas minerais em compósitos poliméricos tem apresentado um grande potencial de aplicação tecnológica. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento, caracterização morfológica e mecânica de compósitos poliméricos reforçados com fibras de coco Babaçu. Foram confeccionadas placas do compósito com diferentes teores de reforço fibroso para estudo das propriedades mecânicas em tração e impacto de acordo com as normas ASTM D-3039 e D-256, respectivamente. Realizou-se um tratamento alcalino com diferentes concentrações de NaOH nas fibras a fim de avaliar o desempenho mecânico dos compósitos. As alterações na morfologia de superfície de fratura dos compósitos foram avaliadas através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As fibras vegetais utilizadas neste trabalho são originárias da região Sudeste do Estado do Pará e como matriz polimérica foi utilizada a resina poliéster insaturada.

**Palavras-chave:** Compósitos poliméricos; Fibras de Babaçu; Propriedades mecânicas; Tratamento alcalino.

## **ABSTRACT**

The search for ecologically correct materials to minimize environmental problems has become a great concern in recent years. The use of vegetable fibers such as synthetic substitutes for various reinforcements and loads of minerals in polymer composites have shown great potential for technological application. This work aims at the development, morphological characterization and mechanical of a polymeric composites reinforceds with fibers of Babaçu coconut. There were made composite plates with different levels of fibrous reinforcement to study the mechanical properties in tensile and impact according to ASTM-D 3039 and D-256, respectively. Was performed an alkaline treatment with different concentrations of NaOH in the fibers to assess the mechanical performance of composites. Changes in the morphology of fracture surface of composites were evaluated by Scanning Electron Microscopy (SEM). The vegetable fiber used in this work is from the Southeast of Pará State and the polymeric matrix used was unsaturated polyester resin.

**Keywords:** Polymeric composites; Babaçu fibers; Mechanical properties; Alkaline treatment.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Compósitos com diferentes reforços: a) fibras curtas aleatórias; b) partículas; c) laminados; d) partículas lamelares; e) fibras longas desalinhas	17
<b>Figura 2</b>	Módulo de elasticidade de compósito com fibra alinhada sob solicitação longitudinal (E <sub>lc</sub> ) e transversal (E <sub>tc</sub> ) em função da fração volumétrica das fibras no compósito (V <sub>f</sub> )	19
<b>Figura 3</b>	Representação de diagramas de tensão versus deformação de um compósito unidirecional e de seus constituintes: a) sob solicitação longitudinal e b) sob solicitação transversal	21
<b>Figura 4</b>	Deformação na matriz em volta da extremidade das fibras	22
<b>Figura 5</b>	Estrutura molecular de um poliéster	26
<b>Figura 6</b>	Peróxido orgânico de metil etil cetona	27
<b>Figura 7</b>	Estrutura e fórmula química do octoato de cobalto	28
<b>Figura 8</b>	Agente de acoplamento amino propril trietóxi silano	32
<b>Figura 9</b>	Representação esquemática de uma fissura através de um material compósito reforçado com fibras	33
<b>Figura 10</b>	Estrutura química de constituintes de fibras vegetais: a) celulose, um polímero linear; b) lignina, um polímero reticulado; c) pectina, molécula linear	37
<b>Figura 11</b>	Representação de uma fibra-celular onde estão presentes as paredes primárias, secundárias, terciárias, e suas constituições, o lúmen e o ângulo espiral	38
<b>Figura 12</b>	Microfibrila constituída de porções cristalinas, as micelas, que são formadas por segmentos de moléculas de celulose ordenadas	39
<b>Figura 13</b>	Representação das moléculas de celulose ordenadas por pontes de hidrogênio intermoleculares e intramoleculares	39
<b>Figura 14</b>	(a) Cacho de coco Babaçu e (b) fibras retiradas da casca do coco Babaçu	43
<b>Figura 15</b>	(a) Molde metálico utilizado para confecção dos compósitos e (b) compósitos com diferentes teores de fibras de Babaçu	44
<b>Figura 16</b>	Prensa hidráulica com capacidade máxima de 15 Toneladas	45
<b>Figura 17</b>	Compósitos de Babaçu com diferentes teores de tratamento químico	46
<b>Figura 18</b>	Máquina universal EMIC DL 10 KN	47
<b>Figura 19</b>	Resistência à tração dos compósitos em função do teor de fibras de Babaçu não tratadas	49
<b>Figura 20</b>	Resistência ao impacto dos compósitos em função do teor de fibras de Babaçu não tratadas	49
<b>Figura 21</b>	Módulo de Young dos compósitos em função do teor de fibras de Babaçu não tratadas	50
<b>Figura 22</b>	Alongamento na ruptura dos compósitos em função do teor de fibras de Babaçu não tratadas	51
<b>Figura 23</b>	Resistência à tração dos compósitos em função da concentração de NaOH	52
<b>Figura 24</b>	Módulo de Young dos compósitos em função da concentração de NaOH	52
<b>Figura 25</b>	Alongamento na ruptura dos compósitos em função da concentração de NaOH	53



<b>Figura 26</b>	(a), (b) e (c) Micrografia obtida por MEV da superfície de fratura dos compósitos reforçados com 41,76% de fibras de Babaçu não tratadas. 420, 450 e 450x respectivamente	55
<b>Figura 27</b>	(a), (b) e (c) Micrografia obtida por MEV da superfície de fratura dos compósitos reforçados com 45,58% de fibras de Babaçu tratadas com 5% de NaOH. 260, 300 e 290x respectivamente	56
<b>Figura 28</b>	(a), (b) e (c) Micrografia obtida por MEV da superfície de fratura dos compósitos reforçados com 46,06% de fibras de Babaçu tratadas com 10% de NaOH. 270, 410 e 290x respectivamente	57

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1</b>	Propriedades mecânicas dos compósitos com reforço de fibras de Babaçu sem tratamento. Pós-cura por 48 horas a 50 °C	48
<b>Tabela 2</b>	Propriedades mecânicas dos compósitos com reforço de fibras de Babaçu mercerizadas. Pós-cura por 48 horas a 50 °C	51

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	12
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	16
2.1	COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	16
2.2	MATRIZ POLIMÉRICA	23
<b>2.2.1</b>	<b>Resina poliéster</b>	25
<b>2.2.2</b>	<b>Agentes de cura</b>	27
2.3	REFORÇO	28
2.4	INTERFACE FIBRA – MATRIZ	30
2.5	MERCERIZAÇÃO	34
2.6	FIBRAS VEGETAIS	35
<b>2.6.1</b>	<b>Aspecto químico da fibra</b>	36
<b>2.6.2</b>	<b>Estrutura das fibras</b>	37
2.7	COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS POR FIBRAS VEGETAIS	39
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b>	43
3.1	CONFECÇÃO DOS COMPÓSITOS	43
3.2	PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS	43
<b>3.2.1</b>	<b>Tratamento químico das fibras</b>	45
3.3	CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E ENSAIOS MECÂNICOS	46
3.4	CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DOS COMPÓSITOS	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	48
4.1	ENSAIOS MECÂNICOS	48
<b>4.1.1</b>	<b>Fibras não tratadas</b>	48
<b>4.1.2</b>	<b>Fibras mercerizadas</b>	51
4.2	MORFOLOGIA DOS COMPÓSITOS	53
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	58
	<b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</b>	59
	<b>REFERÊNCIAS</b>	60

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos reforçados com fibras tornou-se cada vez mais comum em muitas aplicações devido às suas excelentes propriedades mecânicas ao longo dos materiais metálicos convencionais <sup>(1)</sup>. Atualmente, o potencial das fibras de celulose utilizadas como reforço em plásticos está sendo a abundância de material de pesquisa. Todos os pesquisadores que trabalham na área de fibras naturais e seus derivados, afirmam que ao contrário das tradicionais fontes de energia, ou seja, carvão, petróleo e gás, os quais são limitados; fibras lignocelulósicas são renováveis, desta maneira, por serem também biodegradáveis estão gradualmente a ganharem mais importância na indústria <sup>(2,3)</sup>.

Boas propriedades mecânicas combinadas com baixa densidade, tornam as fibras naturais um bom componente para a aplicação em compósitos e desenvolvimentos de materiais de baixo custo, tais como divisórias, cestos, luminárias, etc. Além de melhorar as propriedades mecânicas dos materiais, a substituição de polímeros com fibras naturais, diminui o custo do produto e reduz o uso de materiais provenientes de fontes não-renováveis (a exemplo, resina poliéster utilizada no presente trabalho) <sup>(3,4)</sup>. Também deve ser mencionado que a natureza oca, de fibras vegetais, pode conceder o isolamento acústico ou dependendo do tipo de matriz, promover determinadas propriedades de amortecimento <sup>(5)</sup>.

Ao contrário das fibras de engenharia tradicional, por exemplo, vidro e fibra de carbono, juntamente com cargas minerais, as fibras lignocelulósicas são capazes de transmitir ao compósito certos benefícios, tais como menor densidade, menos desgaste da máquina produzido pelos reforços minerais, ausência de riscos para a saúde e um alto grau de flexibilidade; além disso, promovem ao compósito, resistência relativamente elevada e rigidez <sup>(6,7)</sup>.

As fibras vegetais apresentam algumas dificuldades para serem utilizadas como cargas para materiais poliméricos, dentre elas podem-se citar: a temperatura de degradação e elevada higroscopicidade. A temperatura de degradação das fibras vegetais é relativamente baixa, em torno de 200 °C. Nesta temperatura pode ocorrer tanto a degradação propriamente dita, quanto a liberação de voláteis, diminuindo as

propriedades mecânicas dos compósitos. Sendo assim, seu uso fica limitado a materiais plásticos com baixa temperatura de processamento, como por exemplo: polietileno, polipropileno, policloreto de vinila e poliestireno. Em relação à higroscopicidade, a absorção de umidade pode resultar em inchamento das fibras o que pode comprometer a estabilidade dimensional do compósito e diminuir a interação fibra/matriz, fragilizando o compósito, exigindo assim a utilização adequada de tratamentos físicos e químicos para aumentar a aderência entre a fibra e a matriz, uma vez que a interface desempenha um papel importante nas propriedades físicas e mecânicas de materiais compósitos <sup>(8-10)</sup>.

A principal desvantagem da fibra natural pode ser sua natureza hidrofílica, o que diminui a compatibilidade com a hidrofóbica matriz polimérica. Nestes campos de composição, portanto mais da pesquisa se concentrou na melhoria interfacial <sup>(11)</sup>. O papel da matriz em compósitos reforçados com fibras é transferir a carga para as fibras duras através de esforços de cisalhamento na interface. Este processo requer uma boa ligação entre a matriz polimérica e as fibras. Má aderência na interface significa que a plena capacidade do composto não pode ser explorada e deixa-o vulnerável a ataques ambientais que pode enfraquecê-lo, reduzindo assim sua vida útil <sup>(2)</sup>.

Diversos tipos de tratamento superficial distintos com sofisticação, custo, tecnologia e eficácia, foram propostos para melhorar a adesão fibra/matriz em compósitos poliméricos lignocelulósicos. Dentre estes, um dos métodos mais populares é a modificação superficial das fibras por tratamento alcalino, realizado com hidróxido de sódio. Isto porque este tipo de modificação, além de apresentar baixo custo, facilidade de operação e eficácia, leva à remoção de hemicelulose, lignina, e contaminantes como ceras e sais minerais, levando ao aumento da cristalinidade, redução do diâmetro e da densidade das fibras, separando as microfibrilas de celulose e expondo as fibras a um contato mais íntimo com o polímero, atuando na interface fibra/matriz. E é nessa região em que ocorre o contato entre os componentes do compósito e a qual está intimamente ligada à propriedade mecânica do compósito, pois se houver adesão inadequada o desempenho do compósito será comprometido pelo surgimento de falhas. <sup>(12,13)</sup>.

As fibras utilizadas neste trabalho foram extraídas da planta *Orrbignya speciosa* da família botânica *Palmae*. O Babaçu é o fruto de uma palmeira nativa da região Norte do Brasil e que apresenta em seu interior várias sementes ou amêndoas de onde é extraído o óleo de coco Babaçu, o qual é muito utilizado para fins alimentícios e na fabricação de margarinas. Este óleo apresenta propriedades semelhantes ao óleo de dendê (ou palma), apresentando alto teor de ácido láurico. Outra aplicação que vem ganhando destaque é a produção de álcool de Babaçu a partir das sementes <sup>(14)</sup>.

A casca do coco, devidamente preparada, fornece um eficiente carvão, fonte exclusiva de combustível em várias regiões do Norte e Nordeste do Brasil. A população local realiza freqüentemente o processo de produção do carvão de Babaçu durante a noite. O processo é realizado queimando-se lentamente o coco em caieiras cobertas por folhas e terra, a casca do Babaçu produz uma vasta fumaça aproveitada como repelente de insetos. Outros produtos de aplicação industrial podem ser derivados da casca do coco do Babaçu, tais como etanol, metanol, coque, carvão reativado, gases combustíveis, ácido acético e alcatrão <sup>(15)</sup>.

Apesar de tantas e tão variadas utilidades, por sua ocorrência não controlada do ponto de vista econômico e agrícola, o Babaçu continua a ser tratado como um recurso marginal, permanecendo apenas como parte integrante dos sistemas tradicionais e de subsistência. O Babaçu é uma cultura extrativista, não havendo plantações comerciais <sup>(15)</sup>.

Diante do exposto a motivação principal deste trabalho é o fato das fibras de Babaçu serem nativas do Norte Brasileiro, apresentem propriedades mecânicas que indicam boas aplicações em compósitos poliméricos e serem fator de desenvolvimento regional contribuindo para a amenização dos impactos ambientais. A investigação da sua utilização como reforço em compósitos de matriz polimérica quase não foi encontrada na literatura.

Este trabalho tem o objetivo de desenvolver novos compósitos à base de poliéster insaturado, reforçados por fibras curtas de Babaçu in natura e tratadas quimicamente; estudar suas propriedades mecânicas em tração e impacto para

diferentes teores fibrosos e avaliar as alterações na morfologia da superfície de fratura dos compósitos através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

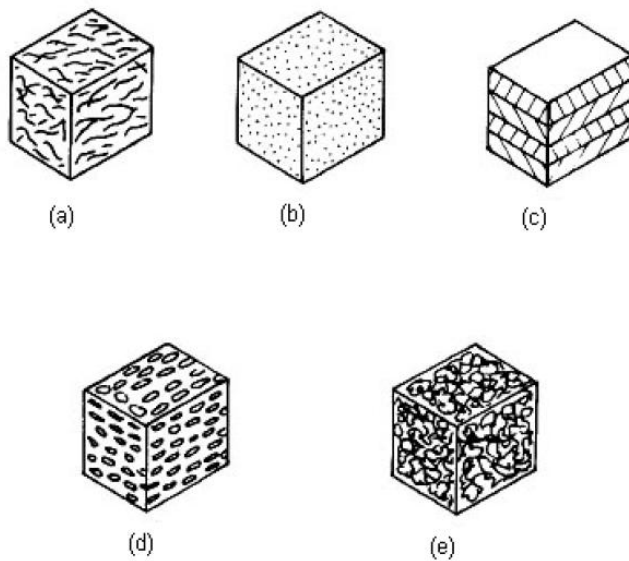
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Os materiais compósitos são formados por uma estrutura de reforço inserida em uma matriz. Pode-se considerar, de maneira geral, um compósito como sendo um material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades das fases que o constituem de tal forma que é obtida uma melhor combinação de propriedades. O reforço geralmente é feito a partir de fibras, que apresentam alta resistência à tração, enquanto a matriz tem a função de manter as fibras unidas, permitindo que as tensões sejam transferidas da matriz para as fibras, resultando no material reforçado. Tecnicamente, esses compósitos reforçados com fibra são os mais importantes, pois apresentam alta resistência e rigidez em relação ao seu peso <sup>(16)</sup>.

Os compósitos podem ser classificados de acordo com o tipo de matriz polimérica, tipo do reforço utilizado e com a geometria ou a forma dos reforços presentes. Materiais com características orgânicas podem ser conjugados com aqueles de natureza inorgânica. Componentes na forma de fibras (longas ou curtas), partículas globulares, plaquetárias ou escamas (Figura 1), podem ser incorporadas à matrizes dúcteis ou frágeis de maneira aleatória ou em laminados orientados, gerando compósitos com diferentes estruturas e propriedades <sup>(17)</sup>.





**Figura 1** - Compósitos com diferentes reforços: a) fibras curtas aleatórias; b) partículas; c) laminados; d) partículas lamelares; e) fibras longas desalinhasadas.

Fonte: NÓBREGA, (2007).

Os materiais compósitos também são convencionalmente classificados de acordo com a sua natureza química e física da matriz em: cerâmicos, metálicos e poliméricos. Os materiais cerâmicos são inorgânicos e têm, como características principais, elevada resistência ao calor e sua extrema fragilidade; os materiais metálicos apresentam, como características gerais, ductilidade e excelentes condutividades térmica e elétrica. A grande limitação do uso de metais em compósitos é a sua elevada densidade e custo do processo de fabricação. Os materiais poliméricos, por sua vez destacam-se pela sua baixa densidade, fácil conformação e elevada resistividade elétrica <sup>(17)</sup>.

O componente de reforço no compósito pode estar na forma particulada, na forma de laminados ou de fibras. O maior volume de aplicação de reforço envolve fibras, filamentos ou monofilamentos. O aspecto unidirecional da fibra permite a fabricação da estrutura do reforço, através das facilidades têxteis a que as fibras podem ser submetidas, como: tecidos; não-tecidos (nonwoven); mechas (roving); fios e outros <sup>(17)</sup>.

A fibra de vidro é o reforço mais utilizado em compósitos de matriz polimérica por diversas razões: é facilmente produzida, pode ser utilizada através do emprego de diversas técnicas de fabricação, produz materiais com alta resistência específica, e quando associada com diferentes resinas, possui uma inércia química que torna o

compósito útil para aplicações em meio a uma variedade de ambientes corrosivos (16).

Os compósitos podem ser estruturados com as fibras orientadas de forma contínua ou descontínua, ou ainda com as fibras aleatoriamente distribuídas na matriz. As fibras orientadas podem estar dispostas independentemente na matriz ou estruturadas em tecidos. As fibras aleatórias podem estar dispostas ao acaso na matriz como um todo ou restritas a planos, normalmente em forma de mantas. As propriedades mecânicas são mais eficazes quando as fibras estão alinhadas continuamente e a solicitação mecânica é aplicada na direção longitudinal do alinhamento das mesmas. Considerando fibra e matriz de comportamento linear elástico, o módulo de elasticidade longitudinal do compósito unidirecional ( $E_{lc}$ ) é dado pela regra da mistura (18):

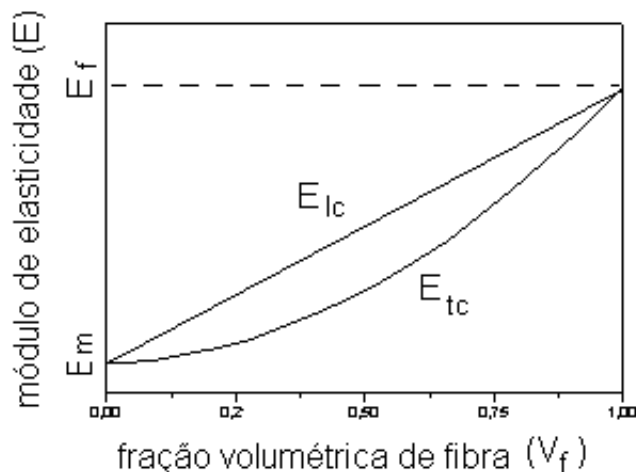
$$E_{lc} = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (2.1)$$

onde  $E_f$  e  $E_m$  são os módulos de elasticidade das fibras e da matriz,  $V_f$  e  $V_m$  as frações volumétricas das fibras e da matriz.

As propriedades mecânicas são limitadas quando as fibras estão alinhadas continuamente e a solicitação mecânica é aplicada na direção transversal. Para fibra e matriz de comportamento linear elástico, o módulo elástico transversal do compósito unidirecional ( $E_{tc}$ ) é dado pela associação em paralelo dos módulos (18):

$$E_{tc} = \frac{E_m \cdot E_f}{E_m \cdot V_f + E_f \cdot V_m} \quad (2.2)$$

A Figura 2 representa graficamente as Equações 2.1 e 2.2. É necessário lembrar que o módulo de elasticidade de materiais monolíticos não depende da direção solicitada (18).



**Figura 2** - Módulo de elasticidade de compósito com fibra alinhada sob solicitação longitudinal ( $E_{lc}$ ) e transversal ( $E_{tc}$ ) em função da fração volumétrica das fibras no compósito ( $V_f$ ).

Fonte: FAGURY, (2005).

Para prever a resistência de um compósito com uma dada fração volumétrica de fibras é necessário considerar algumas hipóteses, tais como, as fibras estão paralelas; a distribuição das fibras é regular; as fibras têm diâmetros iguais e propriedades uniformes; as fibras estão perfeitamente aderidas à matriz. Assim, a carga suportada longitudinalmente pelo compósito corresponde à carga suportada longitudinalmente pelas fibras somada a carga suportada longitudinalmente pela matriz. Levando em consideração as hipóteses citadas e que uma fase não pode esticar mais do que a outra durante uma solicitação constante, a deformação longitudinal do compósito ( $\epsilon_{lc}$ ) é igual à deformação longitudinal da matriz ( $\epsilon_{lm}$ ), e igual à deformação longitudinal das fibras ( $\epsilon_{lf}$ )<sup>(18)</sup>:

$$\epsilon_{lc} = \epsilon_{lm} = \epsilon_{lf} \quad (2.3)$$

ou seja, quando a solicitação mecânica é aplicada na direção longitudinal do alinhamento das fibras ocorre uma condição de isodeformação.

Para um corpo de seção transversal constante, a tensão corresponde à carga aplicada pela área solicitada. Logo a Equação 2.3 prova-se que quando a tensão sob tração atua na direção longitudinal do alinhamento das fibras a tensão longitudinal suportada pelo compósito ( $\sigma_{lc}$ ), obedece à regra da mistura<sup>(18)</sup>:

$$\sigma_{lc} = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m \quad (2.4)$$

onde  $\sigma_f$  e  $\sigma_m$  correspondem a resistência à tração da fibra e da matriz respectivamente.

Para equacionar a aplicação da carga de tração sob uma lâmina unidirecional na direção transversal são necessárias hipóteses adicionais, tais como a matriz transfere carga para a fibra; a concentração de tensão na interface é desprezível; um elemento representativo tem frações volumétricas equivalentes à do compósito. O deslocamento na direção transversal suportado pelo elemento representativo do compósito é aditivo, corresponde ao deslocamento na direção transversal suportado pelas fibras somado ao deslocamento na direção transversal suportado pela matriz. A deformação transversal ( $\epsilon_t$ ) dos constituintes do compósito corresponde ao deslocamento transversal dividido pela distância inicial multiplicado pela área da seção longitudinal e dividindo pelo volume do compósito. Assim, a deformação sofrida pelo compósito quando a sollicitação mecânica é aplicada na direção transversal obedece à regra da mistura <sup>(18)</sup>:

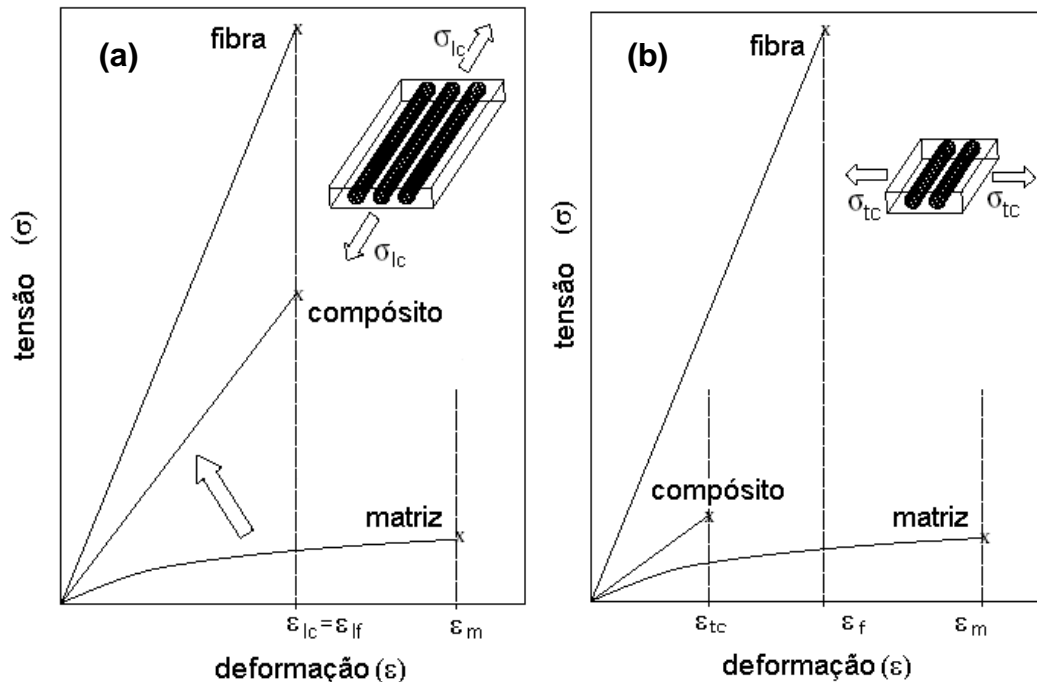
$$\epsilon_{tc} = \epsilon_f \cdot V_f + \epsilon_m \cdot V_m \quad (2.5)$$

Lembrando que a deformação na região elástica depende do módulo do material, a tensão suportada pelos constituintes do compósito na região elástica é igual, ou seja, quando a sollicitação mecânica é aplicada na direção transversal ao alinhamento das fibras ocorre uma condição de isotensão inferior à tensão longitudinal suportada pelo compósito <sup>(18)</sup>.

$$\sigma_{tc} > \sigma_{lc} \quad (2.6)$$

onde  $\sigma_{tc}$  é a tensão transversal suportada pelo compósito. Desta forma, a resistência de um compósito, com uma fração volumétrica de fibras  $V_f$ , é máxima quando a tensão é aplicada na direção longitudinal de orientação das fibras, condições de isodeformação, na qual o compósito terá menor resistência que a fibra e menor deformação do que a matriz. Para o mesmo compósito quando a tensão é

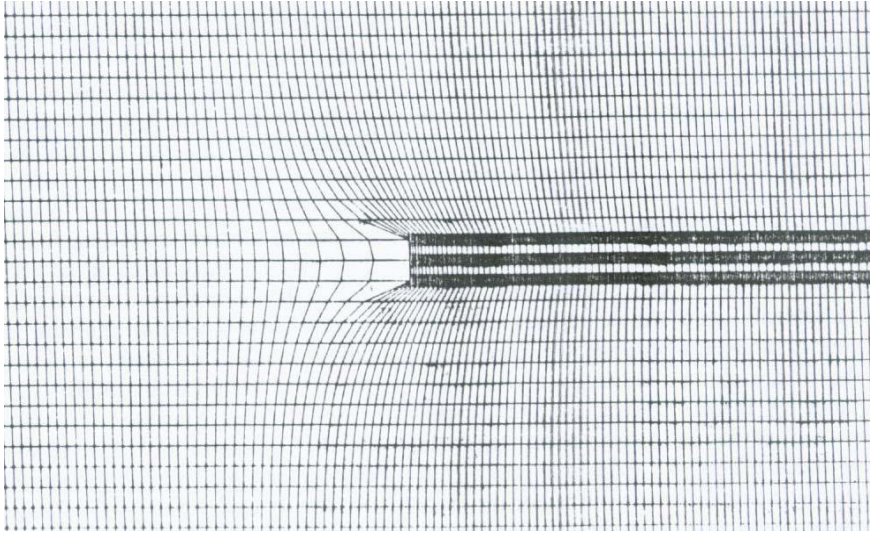
aplicada na direção transversal de orientação das fibras, condições de isotensão, o efeito de reforço concedido pela fibra ao compósito será menos eficiente, conforme esquemas da Figura 3 <sup>(18)</sup>.



**Figura 3** - Representação de diagramas de tensão versus deformação de um compósito unidirecional e de seus constituintes: a) sob solicação longitudinal e b) sob solicação transversal.

Fonte: FAGURY, (2005).

Ressaltando, a melhor combinação das propriedades mecânicas do compósito é obtida quando as fibras estão orientadas na direção longitudinal, com distribuição uniforme e com a máxima fração volumétrica alcançada. Porém as características mecânicas do compósito não dependem apenas das propriedades da fibra, mas também da capacidade da matriz transferir a carga aplicada. A magnitude da ligação interfacial entre as fases fibra e matriz é importante para a extensão dessa transmissão. Sob aplicação de uma tensão, essa ligação fibra-matriz cessa nas extremidades de uma fibra, produzindo concentração de tensão e deformação na matriz como esquematizado na Figura 4 <sup>(18)</sup>.



**Figura 4** - Deformação na matriz em volta da extremidade das fibras.  
Fonte: FAGURY, (2005).

As fibras ao serem incorporadas em uma matriz necessitam de um comprimento mínimo para que o compósito apresente eficiente propriedade mecânica. Esse comprimento crítico ( $l_c$ ) depende do diâmetro da fibra ( $d$ ), da resistência à tração da fibra ( $\sigma_f$ ), e da força de ligação entre a fibra e a matriz, que pode ser avaliada pela tensão limite de escoamento cisalhante do compósito ( $\tau_c$ )<sup>(18)</sup>.

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2 \cdot \tau_c} \quad (2.7)$$

Se a fibra não estiver em um comprimento mínimo necessário ocorrerão pontos de concentrações de tensões que se localizam nas extremidades das fibras, que são potenciais iniciadores de trincas locais na interface ou na matriz, inviabilizando a atuação da fibra como reforço<sup>(18)</sup>.

Algumas solicitações mecânicas não possuem sentido preferencial, como as contrações volumétricas térmicas, químicas ou higroscópicas, e nessa situação a distribuição aleatória é mais adequada do que reforçar uma direção específica. A distribuição aleatória das fibras também é utilizada para reduzir os efeitos e riscos dos materiais com acentuado grau de anisotropia. Em geral a obtenção de fibras curtas é realizada por corte de fibras longas, sendo que em diversos processos industriais as fibras de reforço necessariamente são curtas<sup>(18)</sup>.

O processo de produção de materiais é um fator condicionante de arranjo das fibras, por exemplo, a moldagem por injeção de elementos plásticos, compósitos constituídos de fibra e matriz de polímero termoplástico, envolve o fluxo da resina fundida através de dutos e orifícios para o preenchimento de moldes. Nestes as fibras misturadas nas resinas devem ser de dimensões que não impeçam o fluxo. Outro processamento de compósito que envolve fibras curtas é a projeção simultânea das fibras e resinas líquidas por pistola em moldes abertos <sup>(18)</sup>.

## 2.2 MATRIZ POLIMÉRICA

As resinas que são usadas como matrizes em compósitos reforçados com fibras podem ser classificadas em dois tipos, termorrígidas e termoplásticas, de acordo com a influência da temperatura nas suas características <sup>(16)</sup>.

Os polímeros termoplásticos, macromoléculas de cadeia linear ou ramificada, normalmente são fundidos durante o processamento e podem ser reciclados, pois fundem e retornam ao seu estado anterior sem degradação do material <sup>(18)</sup>.

Os polímeros termorrígidos, macromoléculas de cadeia reticulada, são polimerizados durante o processamento, são formados por uma reação química interna onde a resina e endurecedor ou resina e iniciador são misturados e então sofrem uma reação química não reversível para formar um produto duro e infusível <sup>(16,18)</sup>.

Os sistemas de resinas para uso em materiais compósitos requerem as seguintes características: boas propriedades mecânicas, adesivas e de tenacidade e boa resistência à degradação ambiental <sup>(16)</sup>.

A característica mais importante da resina matriz é a capacidade de absorver energia e reduzir as concentrações de tensões, pelo fornecimento de tenacidade à fratura ou ductilidade, maximizando a tolerância a danos de impacto e o tempo de durabilidade do compósito <sup>(16)</sup>.

O desempenho termo-mecânico, esperado dos compósitos, é governado pela resistência das resinas ao calor. Deste modo, espera-se que a resina da matriz forneça características ótimas ao compósito, dentro da faixa de temperatura recomendada <sup>(16)</sup>.

Embora existam vários tipos de resinas usadas em compósitos para indústria, a maioria das partes estruturais é feita principalmente com resina termofixa, ou seja, que necessitam de uma reação de cura. Dentre essas resinas a poliéster, vinil éster e epóxi são as mais utilizadas <sup>(16)</sup>.

A escolha da matriz depende da aplicabilidade do compósito e das propriedades desejadas. Industrialmente, as matrizes de termoplásticos são mais viáveis, pelo número de peças que podem ser produzidas em curto espaço de tempo, com um número reduzido de mão de obra qualificada <sup>(18)</sup>.

Os termoplásticos, e por consequência os compósitos de termoplásticos, podem ser moldados por injeção, extrusão ou por outras técnicas de moldagem por aquecimento. As maiores restrições de peças de termoplásticos são as dimensões e o custo de equipamentos de processo, quanto maior a peça, maior susceptibilidade ao empenamento e mais caro o equipamento de processo <sup>(18)</sup>.

Os termorrígidos 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 de compósitos. A produção desses materiais é limitada pelo tempo de produção <sup>(18)</sup>.

Podemos citar como exemplo de matrizes de termoplástico: polietileno, poliestireno e polipropileno; e de termorrígido: epóxi, poliéster e poliuretano <sup>(18)</sup>.



### 2.2.1 Resina poliéster

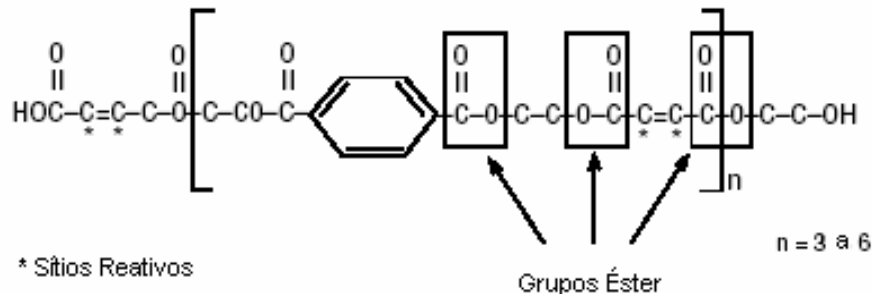
As resinas poliéster possuem grupos éster como elementos fundamentais em suas cadeias moleculares. Resultam da reação de condensação de um diol com um diácido e, dependendo do tipo do ácido empregado, o poliéster pode ser saturado (termoplástico) ou insaturado (termofixo) <sup>(17)</sup>.

Os poliésteres saturados são obtidos pela reação entre um diol e um diácido saturado, resultando num produto termoplástico, cuja cadeia molecular é composta apenas por ligações simples entre átomos de carbono. Possuem moléculas longas e lineares, e não são sujeitos a reações de reticulação, podendo ser encontrados em forma de fibras ou filmes <sup>(17)</sup>.

Os poliésteres insaturados são obtidos a partir de diácidos insaturados, um diácido saturado e um diol, resultando num pré-polímero, cuja cadeia molecular é composta por ligações simples e duplas entre os átomos de carbono. O pré-polímero é diluído num monômero vinílico inibido para facilitar sua estocagem e posterior utilização. Inicialmente o sistema encontra-se no estado líquido e após a adição de um agente de cura, as ligações duplas no pré-polímero são ativadas e o monômero vinílico polimeriza formando “pontes” entre as cadeias do pré-polímero se solidificam formando uma estrutura termofixa irreversível, reticulada e infusível <sup>(17)</sup>.

Um poliéster insaturado apresenta uma estrutura composta geralmente de três componentes básicos: ácidos saturados, ácidos insaturados e glicóis. No caso de um poliéster de uso geral, estes componentes consistem de ácido ou anidrido ftálico, ácido fumárico ou anidrido maléico, propileno glicol e um monômero vinílico, comumente o estireno. Cada um desses componentes tem uma função básica na obtenção da resina poliéster (Figura 5). O ácido insaturado fornece os pontos reativos para as ligações cruzadas; o ácido saturado determina o grau de espaçamento ou concentração das moléculas do ácido insaturado ao longo da cadeia do poliéster, e o glicol, naturalmente, proporciona os meios para a esterificação e a ponte entre os ácidos para formar o polímero. O monômero vinílico dissolve o polímero formado durante a reação de esterificação e serve de ponte de

ligação (reticulação) entre os pontos de insaturação presentes na cadeia do poliéster (17).



**Figura 5** - Estrutura molecular de um poliéster.

Fonte: SOBRINHO, (2005).

Muitas resinas poliéster são viscosas, consistindo de líquidos claros de uma solução de poliéster em um monômero que é normalmente estireno. A adição de estireno em quantidades acima de 50% ajuda a produzir uma resina de fácil manuseio pela redução da viscosidade (16).

Essas resinas são geralmente frágeis devido à alta densidade de reticulações, e o seu extenso uso tem resultado num grande interesse na modificação desses sistemas com termoplásticos dúcteis de alto desempenho como uma alternativa para melhorar sua tenacidade sem sacrificar outras propriedades úteis, tais como temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e dureza (16).

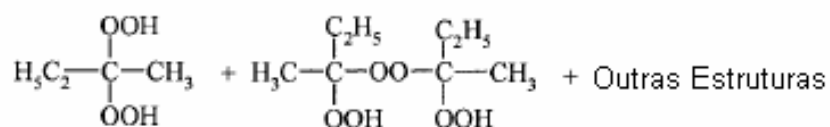
A resina poliéster geralmente tem propriedades adesivas mais baixas em comparação com a resina vinil éster e epóxi. A resina vinil éster mostra certa superioridade em relação a poliéster, mas os sistemas epóxi apresentam melhor desempenho e são, portanto, freqüentemente encontradas em muitos adesivos de alta resistência (16).

Um outro aspecto relevante para a seleção de um sistema de resina é o custo. Dados comerciais mostram que dentre as três resinas citadas como mais utilizadas em compósitos para indústria, a resina epóxi apresenta maior valor de custo, aproximadamente 1,5 vezes maior que o custo da resina vinil éster e 3,5 vezes maior que o custo da resina poliéster (16).

### 2.2.2 Agentes de cura

Para a cura de resinas vinil éster, os iniciadores utilizados geralmente são peróxidos orgânicos e hidroperóxidos, incluindo peróxido de metil etil cetona, peróxido de benzoila e hidroperóxido de cumeno. Porém, a cura de uma resina poliéster insaturada, como são classificadas as resinas vinil éster, em temperatura ambiente pode não ser realizada por um peróxido orgânico sozinho, a rápida decomposição dos iniciadores pode ocorrer por aquecimento ou pelo uso de promotores, tais como aminas terciárias e sais de metais como octoato ou naftanato de cobalto, ou seja, para que o peróxido desempenhe suas funções, é necessário um promotor de cura ou acelerador que promova a sua decomposição. O peróxido de metil-etil-cetona decompõe-se na presença de octoato de cobalto ou naftanato de cobalto. Essa combinação do peróxido com seu respectivo acelerador é chamada de sistema de polimerização <sup>(16)</sup>.

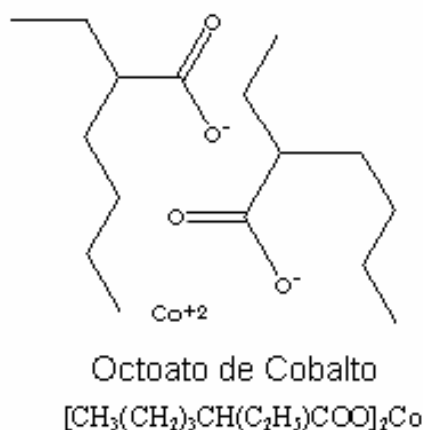
O MEKP (*Methyl Ethyl Ketone Peroxide*) não possui fórmula quimicamente definida, sendo conhecido comercialmente como uma mistura de vários peróxidos e hidroperóxidos. A diferença de atividade entre os iniciadores se dá pela diferença de proporção desses peróxidos e hidroperóxidos, que varia de fabricante para fabricante. A Figura 6 mostra o exemplo de um peróxido orgânico e a Figura 7 mostra a estrutura e fórmula química do octoato de cobalto <sup>(16)</sup>.



#### MEKP

**Figura 6** - Peróxido orgânico de metil etil cetona.

Fonte: SOBRINHO, (2005).



**Figura 7** - Estrutura e fórmula química do octoato de cobalto.  
 Fonte: SOBRINHO, (2005).

### 2.3 REFORÇO

Reforços são os constituintes que aumentam determinadas propriedades do compósito em relação à matriz polimérica. A fase dispersa ou reforço tem uma função estrutural e é a responsável pela resistência do compósito. A geometria do reforço é um dos principais parâmetros a ser considerado, visto que as propriedades mecânicas destes materiais dependem da forma e das dimensões do reforço. De acordo com as características do reforço os materiais compósitos podem ser classificados em compósitos particulados com orientação preferencial ou aleatória, e compósitos fibrosos podendo ser constituídos por uma única camada ou por várias camadas de fibras. Estes últimos são chamados de laminados quando as camadas são constituídas pelo mesmo material <sup>(17,19)</sup>.

Podem ser considerados reforços desde cargas minerais, muitas vezes incorporadas aos polímeros com o intuito de reduzir custos, até fibras de ultra-alta resistência. As cargas minerais proporcionam aumentos na rigidez, dureza e, algumas vezes, na resistência e temperatura de distorção térmica; os elastômeros proporcionam aumento na resistência ao impacto de matrizes poliméricas frágeis; as fibras, pelas suas características de elevada razão  $L/d$ , são os principais responsáveis pelo aumento nas propriedades mecânicas dos compósitos <sup>(17)</sup>.

Os reforços podem ser classificados como segue:

a) Quanto à sua natureza:

- duros para promover aumento à dureza e a resistência à abrasão;
- resistentes à ruptura para proporcionar elevada resistência à tração, à flexão e ao cisalhamento;
- rígidos para incrementar o módulo elástico;
- flexíveis para aumentar a resistência ao impacto;
- resistentes termicamente para aumentar a estabilidade térmica.

b) Quanto às características geométricas:

- particulados;
- fibrosos;
- laminados.

As características do reforço que têm maior influência sobre as propriedades de compósitos são: constituição química, tamanho e razão de aspecto. A adesão entre os componentes de um compósito é de fundamental importância para que o reforço possa exercer sua função de forma efetiva e os esforços aplicados sejam divididos entre as duas fases <sup>(17)</sup>.

A quantidade do reforço é uma das principais variáveis a ser considerada no desenvolvimento do compósito. A qualidade do compósito final é função, dentre outros requisitos, do comprimento, razão de aspecto e dispersão do reforço na matriz polimérica e do grau de cristalinidade do compósito. No caso de compósitos reforçados por fibras longas ou contínuas, a qualidade do produto final também depende do método e condições de moldagem dos componentes <sup>(17)</sup>.

Quando se utilizam cargas fibrosas, as tensões aplicadas ao sistema são transferidas pelo polímero à fibra por um mecanismo de transferência de tensão por cisalhamento. Para que haja transferência efetiva de tensões é necessário que a interface seja forte, ou seja, que haja boa adesão entre os componentes <sup>(17)</sup>.

Fibras podem ser usadas como reforço em plásticos sempre que há a necessidade de propriedades mecânicas elevadas combinadas com baixo peso. No que diz respeito ao uso de fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos, o interesse maior é a substituição parcial ou total das fibras de vidro, extensamente usadas, além da obtenção de vantagens do ponto de vista de peso, custo e adesão fibra-matriz, especificamente com matrizes polares <sup>(17)</sup>. As fibras naturais apresentam menores propriedades mecânicas que as fibras de vidro, porém suas propriedades específicas são equivalentes. Elas apresentam elevada razão de aspecto e eficiente transferência de tensões e dão um incremento acentuado nas propriedades mecânicas dos compósitos <sup>(18)</sup>.

Este desenvolvimento tem ocorrido porque os reforços lignocelulósicos oferecem várias vantagens em relação aos inorgânicos, isto é, baixa densidade, alta deformabilidade, baixa abrasividade aos moldes e aos equipamentos de mistura, apresentando ainda baixo custo. Além disso, os reforços baseados em cargas ou fibras lignocelulósicas são derivados de recursos renováveis <sup>(20)</sup>.

É bem conhecido que a compatibilidade do material lignocelulósico com a matriz possui um papel fundamental na determinação das propriedades do compósito. Os materiais lignocelulósicos possuem grupos hidroxila polares na superfície devido predominantemente à celulose e à lignina, sendo que estes grupos polares têm grande facilidade em interagir com matrizes poliméricas polares, como no caso de resinas fenólicas <sup>(20)</sup>.

#### 2.4 INTERFACE FIBRA – MATRIZ

A área de contato entre os componentes do compósito é a região chamada interface, que atua transferindo a carga recebida pela matriz para o reforço fibroso. Como cada fibra forma uma interface individual com a matriz, a área interfacial é muito larga. As ligações interfaciais são resultado da boa molhabilidade da fibra pela matriz, assim como a formação de ligações químicas entre as fibras e a superfície da matriz <sup>(18)</sup>.

A propriedade da interface é única para cada sistema fibra-matriz. A adesão entre a fibra e matriz pode ser atribuída a alguns fatores: adsorção e umidade,

adesão mecânica, interdifusão, atração eletrostática e às ligações químicas. A força final de ligação reflete alguma reação química ocorrida entre as fibras, entre as fibras e o agente de acoplamento e entre a fibra e a resina, durante o processo <sup>(18)</sup>.

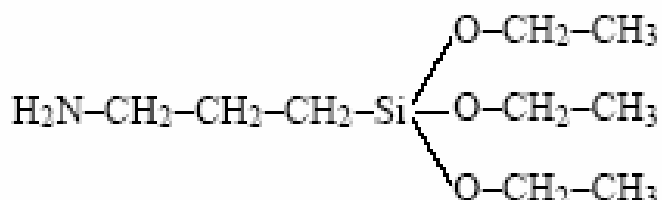
Dados da literatura sobre o desempenho de materiais compósitos reforçados com fibras mostram que o comprimento crítico (ou a razão de aspecto crítica) das fibras depende da fração volumétrica destas nos compósitos. Em geral, quanto maior a razão de aspecto menor é a fração volumétrica crítica. A resistência de compósitos com baixa fração volumétrica de fibra é pouco influenciada pela fibra. Nesse caso, as fibras agem como defeitos e fragilizam a matriz, reduzindo a resistência mecânica do compósito. Acima de uma fração crítica a resistência dos compósitos aumenta com o aumento do teor de fibras na matriz <sup>(21)</sup>.

Agentes de acoplamento/compatibilização para promoção de uma melhor interface fibra/matriz e auxiliares de fluxo para aumento da processabilidade também devem ser utilizados. Cargas como talcos também poderão ser utilizadas para aumentar ainda mais a rigidez destes compósitos. Agentes de expansão poderão ainda ser testados com o objetivo de diminuir a densidade dos compostos <sup>(21)</sup>. Também como tentativa de se melhorar a adesão interfacial fibra-matriz tem-se por objetivo realizar o tratamento de todas as fibras com ar ionizado, para posteriormente moldar os compósitos <sup>(20)</sup>.

A adesão da resina nas fibras de reforço é de extrema importância para garantir a transferência de cargas, aplicadas externamente, da matriz para as fibras. Sabe-se bem que as propriedades de alto desempenho dos materiais compósitos reforçados com fibras não são simplesmente devido à soma das propriedades de seus constituintes. O desempenho final desses compósitos é fortemente influenciado pela natureza da interface fibra-matriz (adesão) <sup>(16)</sup>.

Tratamentos na superfície de fibras e partículas de reforço são métodos comuns para melhorar as propriedades gerais de adesão, pelo aumento das interações eletrostáticas e/ou facilitando a ligação química entre a fibra e a matriz. Os agentes acoplantes mais comumente usados são os compostos organossilício bifuncionais, chamados silanos. Os agentes de acoplamento silanos mais utilizados

em fibras de vidro têm três grupos funcionais alcóxi hidrolisáveis. Esses grupos permitem que os silanos reajam com o vidro formando um sistema de multicamadas sobre a sua superfície. A Figura 8 mostra a estrutura molecular de um agente de acoplamento com três grupos funcionais <sup>(16)</sup>.



**Figura 8** - Agente de acoplamento amino propil trietóxi silano.  
Fonte: SOBRINHO, (2005).

Na realidade, o desenvolvimento de termorrígidos mais resistentes deve levar a um balanceamento de propriedades. Uma modificação na matriz pode aumentar a resistência ao impacto, mas também aumentar a absorção de água. Pode, ainda, deslocar a transição vítrea para maiores temperaturas, mas por outro lado pode tornar o material mais quebradiço. Já a modificação química das fibras pode melhorar a adesão fibra-matriz <sup>(20)</sup>.

Nem sempre uma adesão mais intensa na interface fibra-matriz levará a uma maior resistência ao impacto, pois um “golpe” na interface não irá liberar a fibra da matriz e se a adesão for muito forte a “trinca” (microfibrilamento) pode se propagar pela matriz. Se a adesão não for muito forte, a fibra é liberada (mecanismo “pullout”) e a energia do impacto é absorvida <sup>(20)</sup>.

Quando a ligação matriz-fibra (interface) 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 <sup>(20)</sup>.

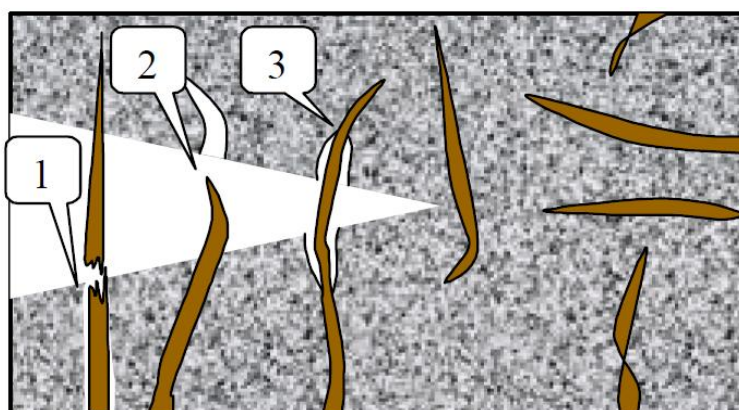
A presença de micro-trincas na matriz polimérica de um material compósito reduz as propriedades finais da resina, e conseqüentemente a do compósito. Em um ambiente tal como água ou ar úmido, a resina micro-trincada absorverá consideravelmente mais água do que uma resina não trincada, ocasionando um aumento de peso, ataque de umidade sobre a resina e a interface matriz/reforço do



compósito, perda de rigidez e, com o tempo, uma eventual queda nas propriedades finais do material <sup>(16)</sup>.

Uma importante propriedade de um sistema de resina é a resistência à degradação pelo ingresso de água. Todas as resinas absorvem alguma umidade, adicionando peso aos laminados, mas o que é mais significativo é como a água absorvida afeta a resina e a ligação resina/fibra em um laminado, levando a uma gradual perda nas propriedades mecânicas. Ambas as resinas, poliéster e vinil éster, são mais propensas à degradação pela água devido à presença de grupos éster hidrolisáveis <sup>(16)</sup>.

A Figura 9 mostra a representação de uma fissura atravessando um compósito reforçado com fibras, onde: o número (1) representa uma fibra rompida; o (2) representa um fibra arrancada; enquanto o (3) representa uma fibra íntegra, se deformando e atravessando a fissura. O número (2) exemplifica um caso onde a fibra escorrega da matriz. No caso apresentado da fibra (3), a mesma se apresenta íntegra, absorvendo parcialmente a energia a qual o material está submetido. Deve-se atentar para o caso de deslocamento apresentado na interface, que pode ocorrer pela movimentação das fibras devido á variação de umidade <sup>(22)</sup>.



**Figura 9** - Representação esquemática de uma fissura através de um material compósito reforçado com fibras.

Fonte: SILVA, (2002).

Dessa forma, a estrutura interna dos compósitos e a sua interação, a qual, por sua vez, é função da aderência entre a fibra e a matriz, influem de forma significativa no seu desempenho e na sua durabilidade. Considerando fibras de mesma

natureza, a aderência é influenciada em grande parte pelas características da zona de transição <sup>(22)</sup>.

A maior aderência pode ser conseguida através da melhora do desempenho da zona de transição entre as fibras e a matriz, fazendo com que as duas fases trabalhem solidariamente. Alguns fatores podem contribuir para o melhor desempenho da zona de transição, destacando-se entre eles a morfologia e a rugosidade das fibras, sua absorção e porosidade. Características da matriz, como a presença de portlandita em grandes quantidades nos seus produtos hidratados, também podem influir negativamente na aderência fibra-matriz <sup>(22)</sup>.

Dados da literatura reportam que, no caso específico das fibras vegetais, há um deslocamento da interface fibra-matriz, ocorrido pela variação dimensional gerada pela perda de água absorvida durante a moldagem. Isto favorece uma concentração de portlandita na zona de transição <sup>(22)</sup>.

Como o arrancamento da fibra é considerado fator preponderante na ruptura do compósito, o comprimento de ancoragem da fibra na matriz é outro fator que também deverá ser levado em consideração. Essa ancoragem pode ser otimizada empregando-se fibras de superfície rugosa, com maiores relações de aspecto e isentas de impurezas na superfície. A presença de fibras lisas pode diminuir a aderência <sup>(22)</sup>.

## 2.5 MERCERIZAÇÃO

Mercerização é denominada como sendo um tratamento químico a base de NaOH para tratar fibras celulósicas, melhorando as características adesivas das superfícies das fibras devido a remoção de impurezas naturais e artificiais das superfícies. Portanto, a tensão superficial e conseqüentemente a molhabilidade (“wettability”) das fibras mercerizadas se torna mais alta, melhorando também a ligação através de uma forma mecânica de entrelaçamento entre a matriz e a superfície rugosa das fibras <sup>(20)</sup>.

O efeito do tratamento químico na superfície da fibra reduz a absorção de umidade, pois aumenta a hidrofobicidade da superfície devido a ligações de longas cadeias de hidrocarbonetos. A adição desses agentes penetram na parede celular através dos poros superficiais, depositando-se na região interfibrilar restringindo a entrada de água <sup>(18)</sup>.

A mercerização também proporciona o desfibrilamento das fibras, ou seja, a desagregação das fibras em microfibras, aumentando assim a área superficial efetiva disponível para o contato com a matriz líquida. Dados da literatura descrevem que muitos compósitos nos quais foram utilizadas fibras mercerizadas, as propriedades mecânicas foram superiores àqueles nos quais foram utilizadas fibras não-tratadas <sup>(21)</sup>.

## 2.6 FIBRAS VEGETAIS

As fibras naturais se caracterizam pela sua diversidade e características inerentes à sua origem, sendo classificadas em origem animal, como a lã e a seda, vegetal, como o linho, juta, rami, sisal, algodão, entre outras e mineral como o asbesto e a zeólita <sup>(23)</sup>.

As fibras vegetais são estruturas alongadas de secção transversal vazada e arredondadas, são distribuídas por o todo vegetal podendo ser classificadas de acordo com a origem anatômica como fibras de talo, fibras de folha, fibras de lenho e fibras de superfície. As fibras de talo ocorrem no floema que fica na entrecasca do talo, por exemplo, as fibras de juta, rami, linho, algodão, e piaçava. As fibras de folha são extraídas das folhas dos vegetais, podemos citar as de sisal, curauá, abacaxi, banana e palma. As fibras de lenho são obtidas do lenho como no caso as fibras de bambu e as fibras de bagaço de cana. As fibras de superfície formam uma camada protetora de caules, folhas, frutos e sementes das plantas, como as fibras de açai, coco e as fibras de algodão <sup>(18)</sup>.

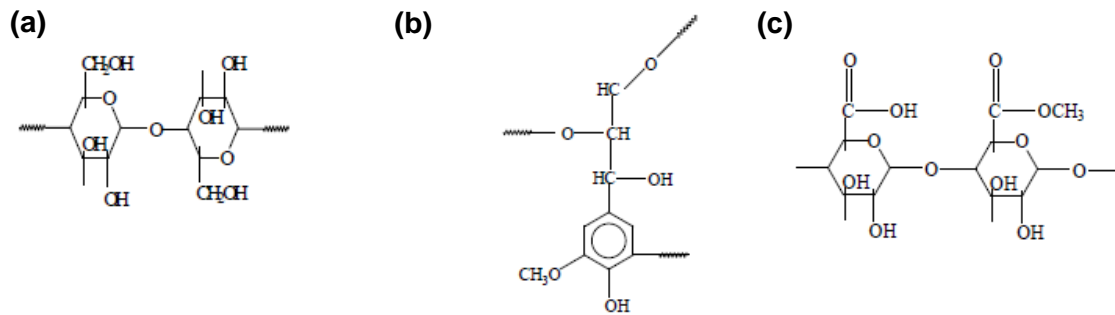
### 2.6.1 Aspecto químico da fibra

As fibras vegetais são basicamente constituídas de celulose, hemicelulose, lignina, além de pequenas quantidades de pectina, sais inorgânicos, substâncias nitrogenadas, corantes naturais, que são incluídos no que se denomina de fração de solúveis. Na Figura 10 estão esquematizadas estruturas de celulose, lignina e pectina <sup>(18)</sup>.

Celulose é um polímero linear cristalino formado por unidades  $\beta$ -D glicopiranosas unidas por ligações glicosídicas  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4). Os grupos laterais possuem reatividades distintas, o grupo C1-OH é derivado da formação do anel através da ligação hemiacetal intramolecular, possui propriedades redutoras, enquanto que o C4-OH é um grupo alcoólico não redutor. Os anéis de glicose adotam conformação mais estável em forma de cadeia com grupos hidroxila na posição equatorial, a formação das ligações hidrogênio entre os átomos adjacentes, oxigênio e hidrogênio, forçam o arranjo linear da macromolécula <sup>(18)</sup>.

Hemicelulose é uma variedade de moléculas complexas, amorfas e de unidades:  $\beta$ -D-xilose,  $\beta$ -D-manose,  $\beta$ -D-glicose,  $\alpha$ -L-arabinose,  $\alpha$ -D-galactose, ácido  $\beta$ -D-glicurônico ou ácido  $\alpha$ -D-4, O-metilglicurônico. Essas unidades são formadas por cadeias de carbono, com um grupo hidroxila ligado a cada átomo de carbono, exceto aqueles que podem estar na forma de carbonila ou em ligação hemiacetal. Tanto os grupos hidroxila quanto carbonila, são hidrofílicos, absorvem água, o que favorece a solubilidade de hemicelulose <sup>(18)</sup>.

Lignina é uma macromolécula formada por um sistema aromático, muito reticulado de elevado peso molecular, amorfo, composto de unidades fenilpropano. Pectina consiste em cadeia linear de unidades de  $\alpha$ -D-ácidos galacturônicos, com graus variáveis de éster metílico <sup>(18)</sup>.



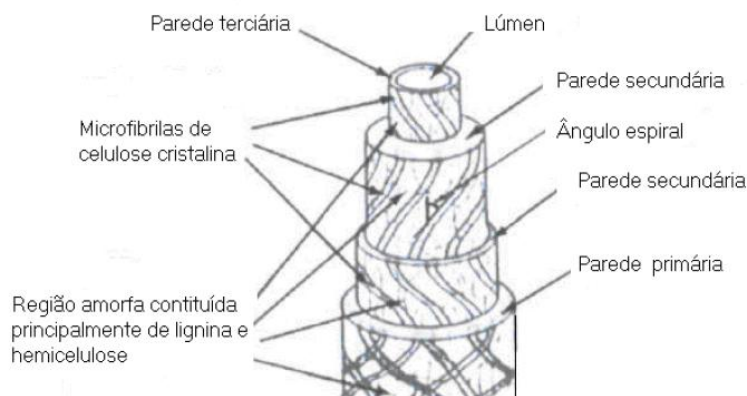
**Figura 10** - Estrutura química de constituintes de fibras vegetais: a) celulose; um polímero linear; b) lignina, um polímero reticulado; c) pectina, molécula linear.  
 Fonte: FAGURY, (2005).

### 2.6.2 Estrutura das fibras

Botanicamente, as “fibras” são células vegetais esclerenquimatosas de forma tipicamente prosenquimatosas, isto é, apresentam comprimento excessivamente maior que a largura, estes comprimentos são muito variados <sup>(18)</sup>.

Cada fibra-celular individual tem estrutura complexa formada por paredes celulares que circundam o lúmen. Essas paredes recebem denominações sucessivas da parte externa para interna: primária, secundária, e assim por diante <sup>(18)</sup>.

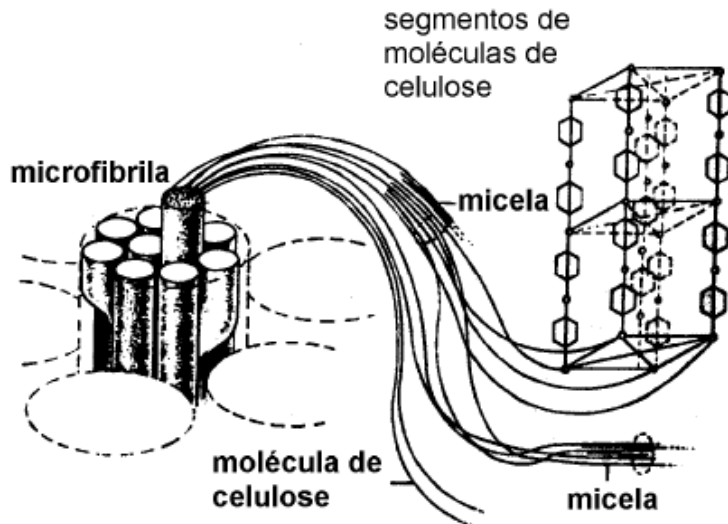
As paredes são constituídas de camadas formadas por feixes de microfibrilas que crescem no vegetal em forma de espiral, com diferentes orientações angulares. A Figura 11 é representativa de uma fibra-celular, a qual pode conter regiões de seção transversal circular, oval ou achatada <sup>(18)</sup>.



**Figura 11** - Representação de uma fibra-celular onde estão presentes as paredes primárias, secundárias, terciárias, e suas constituições, o lúmen e o ângulo espiral.  
 Fonte: FAGURY, (2005).

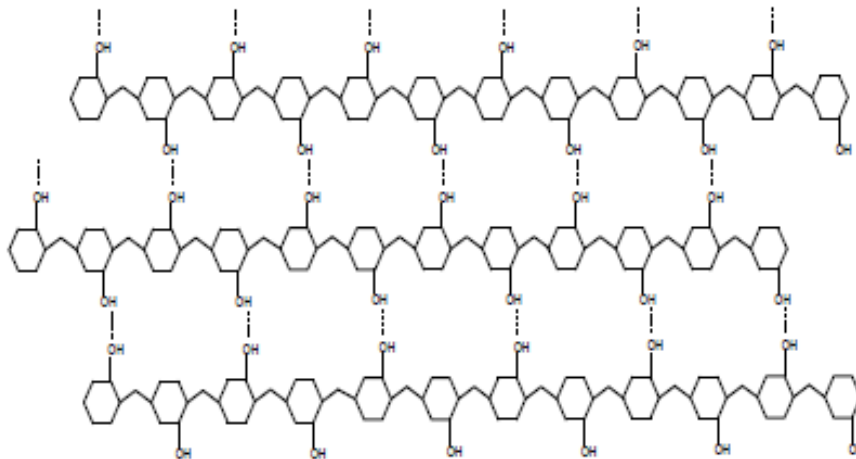
O principal componente das microfibrilas é a celulose, as microfibrilas de celulose estão interligadas por uma rede de moléculas de hemicelulose. A rede celulose-hemicelulose é permeada por pectinas. Outro importante constituinte das paredes é a lignina, substância hidrofóbica impregnada principalmente nas camadas próximas à superfície, e que tem função de sustentação <sup>(18)</sup>. Assim, a lignina influencia a estrutura, propriedades e morfologia das fibras vegetais. As ceras podem ser eliminadas por extração com solventes orgânicos. Elas são responsáveis pelas características de molhabilidade e adesão das fibras <sup>(24)</sup>.

As microfibrilas são compostas por micelas as quais são cristais de moléculas de celulose na ordem de Angstroms, ordenadas paralelamente em diferentes estruturas alotrópicas. A Figura 12 esquematiza feixe de microfibrilas, miscelas e uma estrutura cristalina de celulose <sup>(18)</sup>.



**Figura 12** - Microfibrila constituída de porções cristalinas, as micelas, que são formadas por segmentos de moléculas de celulose ordenadas.  
Fonte: FAGURY, (2005).

As moléculas de celulose se ordenam por terem forte tendência para formar pontes de hidrogênio intermoleculares e intramoleculares, representada na Figura 13 (18).



**Figura 13** - Representação das moléculas de celulose ordenadas por pontes de hidrogênio intermoleculares e intramoleculares.  
Fonte: FAGURY, (2005).

## 2.7 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS POR FIBRAS VEGETAIS

A crescente utilização dos compósitos poliméricos ocasionou um grande avanço tecnológico em diversas áreas da engenharia, como por exemplo, na indústria aeroespacial, na automobilística, na náutica e na da construção civil.

Elevada resistência específica, elevado módulo específico e ótima resistência química são atrativos que os compósitos poliméricos oferecem frente aos materiais metálicos. A capacidade de resistência mecânica do material está intimamente ligada ao reforço utilizado para fabricação do compósito, proporcionado pelo elevado desempenho que as fibras apresentam, bem como pela orientação que é dada ao mesmo na construção do material <sup>(25)</sup>.

ANDRADE e NÓBREGA (2010) estudaram as propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibras curtas de Açai (*Euterpe oleracea*). Vários teores de fibras foram incorporados à matriz termofixa para analisar o comportamento das propriedades mecânicas em tração e flexão de acordo com as normas ASTM D-3039 e D-790, respectivamente. A propriedade de alongamento na ruptura medida no ensaio de tração foi maior para todos os materiais com um aumento percentual de 4,5%. Para todos os teores de fibras estudados não houve aumento nas propriedades de resistência à tração e flexão, o que pode estar associado a uma fraca adesão fibra/matriz ou até mesmo a maneira como as fibras estão dispersas na matriz.

CAVALCANTE e CARVALHO (2009) utilizaram diversas técnicas para preparar compósitos PP/juta com dois fios de juta e duas matrizes PP distintos. Os resultados demonstram que a incorporação de fibras longas, alinhadas e contínuas em matriz termoplástica (polipropileno) levou a aumentos significativos na resistência à tração (>139%), no módulo de elasticidade em tração e em flexão (>264 e 234%, respectivamente) e diminuição da resistência ao impacto, em relação à matriz. Compósitos manufacturados com fios mais finos tenderam a ser mais rígidos enquanto os produzidos com o fio mais espesso foram mais resistentes. Matrizes mais fluidas tenderam a gerar compósitos com melhores propriedades.

SILVA e FROLLINI (2009) desenvolveram compósitos a partir de resina fenólica e bagaço de cana de açúcar, queimado e não queimado. Análises térmicas (TG e DMTA) dos compósitos apresentaram resultados satisfatórios, e valores de resistência ao impacto próximos. As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos compósitos revelaram que, no geral, todos os compósitos apresentaram uma interação satisfatória entre fibras e matriz, independente da porcentagem de



fibras e comprimento, assim como independentemente da natureza do bagaço. Em linhas gerais, as propriedades dos compósitos reforçados com bagaço de cana de açúcar, queimado ou não, se apresentaram em patamares próximos, indicando que, pelo menos para a abordagem feita até o momento, a queima da fibra não altera suas propriedades como reforço de forma significativa.

TARGA et al. (2009) prepararam compósitos de fibra de juta e resina de poliéster insaturado através de três métodos de fabricação: i) laminação manual, ii) moldagem por compressão, e iii) moldagem por infusão a vácuo. As áreas das seções transversais das fibras foram caracterizadas por microscopia óptica, permitindo assim calcular a resistência à tração e módulo elástico. A resistência à tração dos compósitos e da resina de poliéster insaturado foi comparada com valores teóricos calculados a partir da Regra das Misturas Modificada. As técnicas de fabricação dos compósitos, além de fornecerem diferentes frações volumétricas de fibras, afetam a adesão interfacial fibra-matriz, influenciando assim nas propriedades finais do material.

MULINARI et al. (2009) desenvolveram materiais compósitos PEAD/ fibras de celulose usando um misturador termocinético. Para melhorar a adesão entre as fibras de celulose e o PEAD, foi feita uma modificação nas fibras usando oxicloreto de zircônio. A superfície química das fibras modificadas foi avaliada usando a técnica de MEV. Os efeitos da modificação sobre as propriedades mecânicas dos materiais compósitos foram investigados. As superfícies fraturadas dos compósitos ensaiados foram analisadas e o mecanismo de fratura dos compósitos também foi discutido. Os resultados indicam que os compósitos reforçados com fibras de celulose modificada apresentaram melhor resistência ao impacto comparado aos compósitos reforçados com fibras de celulose não modificadas. A quantidade de fibras afeta a resistência ao impacto destes materiais.

CARVALHO et al. (2009) avaliaram as propriedades térmicas das fibras de coco verde *in natura* e tratadas quimicamente com solução de NaOH 10% m/v. A termogravimetria foi realizada com o objetivo de verificar a influência do tratamento químico na estabilidade térmica e na temperatura de degradação das fibras. Com os resultados obtidos foi possível verificar que o tratamento realizado proporcionou

melhor estabilidade térmica até a temperatura de aproximadamente 300 °C, além de aumentar em torno de 6% a temperatura de início de degradação. Desta forma o tratamento químico proporciona uma maior viabilidade no uso de fibras naturais na fabricação de compósitos poliméricos.

FORNARI e FORNARI JR (2009) avaliaram a tensão da fibra de piaçava embutida em matriz polimérica de poliéster do tipo ortoftálico em relação a sua área de contato. As fibras de piaçava foram embutidas com diferentes profundidades na matriz polimérica e posteriormente ensaiadas por ensaio de tração. Os resultados deste experimento demonstraram que a força de atração entre a fibra de piaçava natural, isto é sem tratamento e a resina poliéster ortoftálica acelerada com sal de cobalto e usando como iniciador de reticulação metil etil cetona, tem uma relação linear com a área de contato entre a fibra e o polímero. Os ensaios mostraram que pode-se estabelecer uma relação linear entre área (A) e força de arrancamento (F) igual a  $A(F) = 0,25F + 20$ . As fibras de piaçava não apresentaram uma área de seção transversal uniforme e os resultados obtidos neste trabalho se basearam em uma área média, calculada a partir de seis medidas aleatórias.

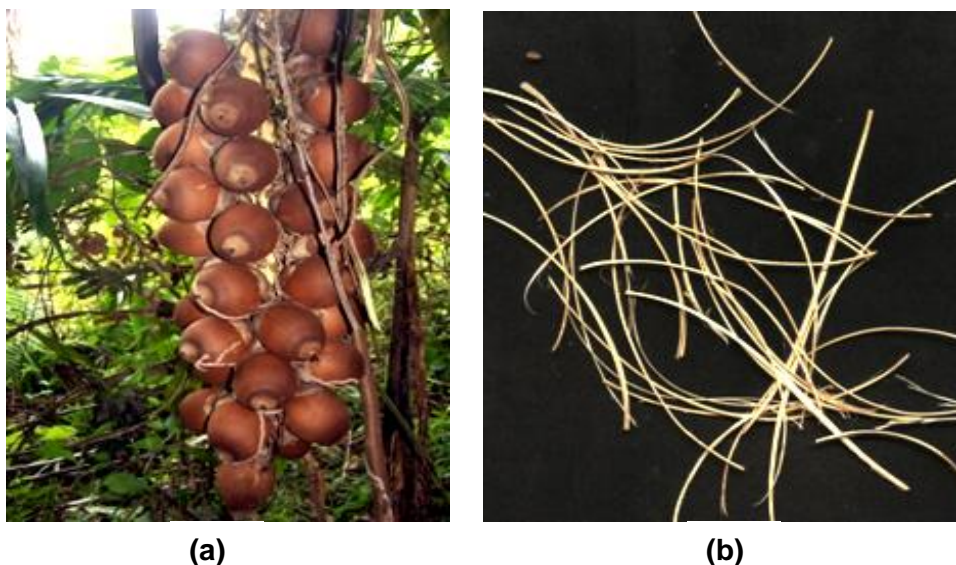
CARVALHO et al. (2009) avaliaram a influência do tratamento alcalino (mercerização) das fibras de bananeira nas propriedades físico-químicas e mecânicas dos compósitos com poli(cloreto de vinila) (PVC). Para este tratamento foram preparadas soluções com hidróxido de sódio (NaOH) nas concentrações de 2, 5 e 10 % e os tempos de imersão das fibras de 2, 4 e 6 horas. Utilizando a fibra de bananeira tratada, como reforço para produção de compósitos com PVC, verifica-se a obtenção de resultados significativos em relação à redução na absorção de umidade e uma melhora de desempenho mecânico em relação à resistência à tração em comparação aos compósitos com as fibras de bananeira não tratadas. A utilização da mercerização como tratamento para fibras de bananeira é mais uma alternativa viável de uso de fibras naturais como reforço para polímeros.

### 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

#### 3.1 CONFECÇÃO DOS COMPÓSITOS

Para a confecção dos compósitos, foi utilizada como matriz polimérica uma resina poliéster insaturada GAMA 313, fabricada pela Embrapol, do tipo ortoftálica pré-acelerada, reticulada com estireno. Utilizou-se como iniciador o Peróxido de Metil-Etil-Cetona (MEK-P) em concentração de 1% em peso.

As fibras de Babaçu mostrada na Figura 14 são provenientes da região Sudeste do estado do Pará e foram obtidas pelo método de maceração, as quais são classificadas como fibras curtas. As fibras foram secas em estufa a 100 °C por 2 horas.



**Figura 14** - (a) Cacho de coco Babaçu e (b) fibras retiradas da casca do coco Babaçu.

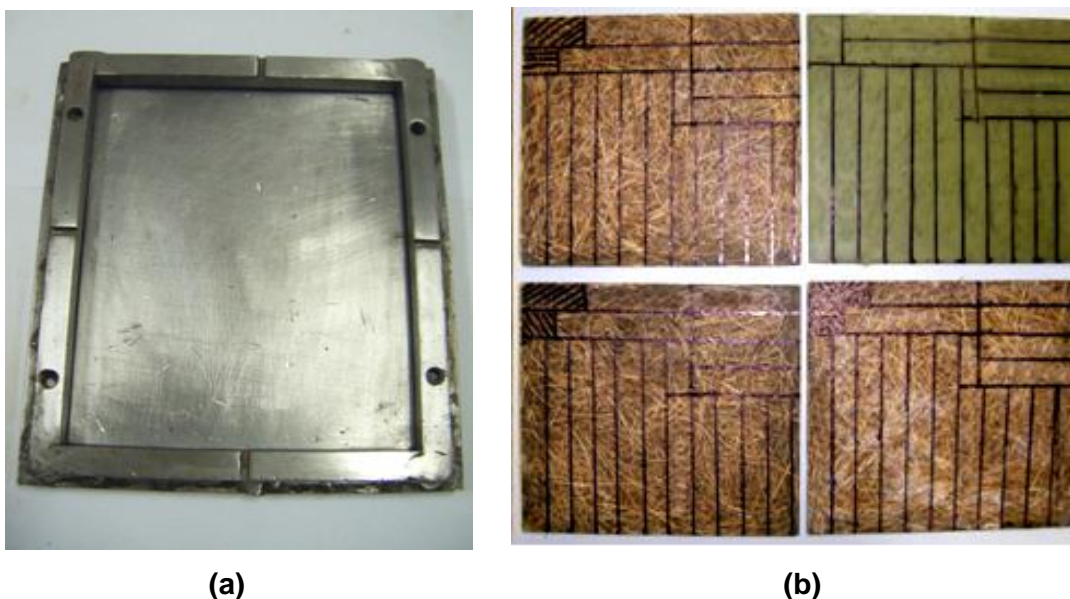
#### 3.2 PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Compósitos com teores variados de fibras in natura foram preparados por moldagem à compressão. O teor de fibras foi determinado por análise gravimétrica, utilizando o seguinte procedimento: pesou-se 30, 40 e 50g de fibras de Babaçu previamente secas, depois pesou-se a placa do compósito produzido. Com os pesos obtidos determinou-se o teor de fibras (em massa) da seguinte forma:

$$T_F (\%) = (P_T/P_L) \times 100$$

Onde  $T_F$  é o teor de fibras,  $P_T$  é o peso (g) das fibras e o  $P_L$  é o peso (g) da placa.

O molde mostrado na Figura 15(a) foi untado com cera de polimento automobilístico para auxiliar à desmoldagem. O catalisador MEK-P foi acrescentado à resina e parte desta mistura vertida no molde. As fibras de Babaçu previamente pesadas e secas foram colocadas no molde de maneira aleatória e pressionadas com auxílio de uma espátula para garantir a sua total impregnação. Por fim, verteu-se um excesso de resina, quando a resina estava próxima do ponto de gelificação o molde foi fechado e colocado em uma prensa hidráulica (Figura 16) com 8 toneladas de força de fechamento por 8 horas, a temperatura ambiente. As placas mostradas na Figura 15(b) obtidas foram submetidas a pós-cura por 48 horas a 50 °C, para posterior usinagem dos corpos de prova.



**Figura 15** - (a) Molde metálico utilizado para confecção dos compósitos e (b) compósitos com diferentes teores de fibras de Babaçu.

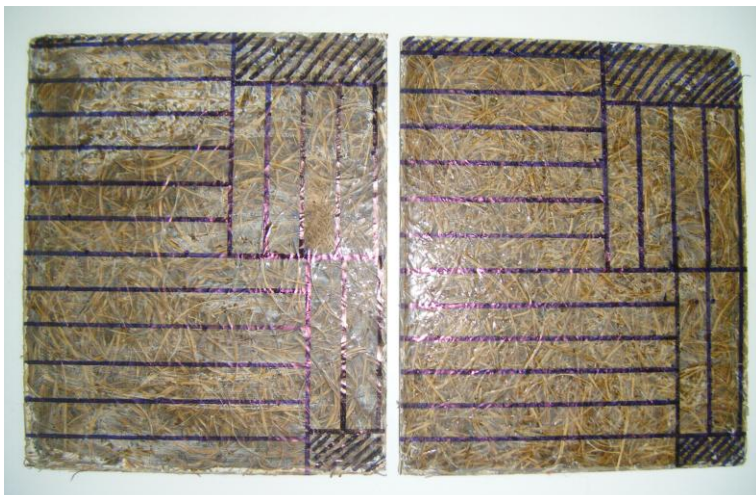


Figura 16 - Prensa hidráulica com capacidade máxima de 15 Toneladas.

### 3.2.1 Tratamento químico das fibras

O tratamento químico das fibras de Babaçu foi feito com hidróxido de sódio (NaOH), solução a 5 e 10% em temperatura ambiente durante 1 hora. Após esse tempo as fibras foram lavadas com água até equilibrar o pH e então foram secas em estufa com circulação de ar em temperatura de 100 °C, pelo período de 4 horas. Utilizou-se 100 g de fibras para a realização do tratamento, sendo 50 g para cada concentração de NaOH.

Foram produzidas duas placas, cada uma com 50 g de fibras nas diferentes concentrações. O procedimento utilizado para a preparação dos compósitos com fibras tratadas foi semelhante à do utilizado para as fibras in natura. As placas mostradas na Figura 17 obtidas foram submetidas a pós-cura por 48 horas a 50 °C, para posterior usinagem dos corpos de prova.



**Figura 17** - Compósitos de Babaçu com diferentes teores de tratamento químico.

### 3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E ENSAIOS MECÂNICOS

Os corpos de prova confeccionados com fibras tratadas e não tratadas foram serrados manualmente a partir das placas produzidas por compressão. Para avaliação da influência do teor de fibra nas propriedades mecânicas foram realizados ensaios mecânicos de tração e impacto.

O ensaio de tração foi conduzido em uma máquina universal EMIC DL 10 KN (Figura 18), em temperatura ambiente com uma velocidade de 1mm/min tendo como base a norma ASTM D-3039. O ensaio de impacto Izod foi realizado em uma máquina Ceast Resil 5.5 operando com um martelo de 5.5 J segundo a norma ASTM D-256.



**Figura 18** - Máquina universal EMIC DL 10 KN.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DOS COMPÓSITOS

Foram realizadas análises por MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), após ensaio de tração, em amostras dos compósitos com fibras não tratadas e tratadas para uma mesma quantidade de fibras inseridas na matriz termofixa. O equipamento utilizado foi um MEV modelo LEO-1430. As amostras foram metalizadas com platina e o tempo de recobrimento foi de 2,0 minutos. As condições de análises para as imagens de elétrons secundários foram: corrente do feixe de elétrons = 90  $\mu$ A, voltagem de aceleração constante = 10 KV, distância de trabalho = 15-12 mm.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ENSAIOS MECÂNICOS

Os resultados obtidos nos ensaios de impacto e nas propriedades medidas nos ensaios de tração, tais como: limite de resistência à tração, módulo de Young e alongamento na ruptura estão apresentados nas Tabelas 1 e 2 para corpos de prova com fibras não tratadas e tratadas respectivamente.

#### 4.1.1 Fibras não tratadas

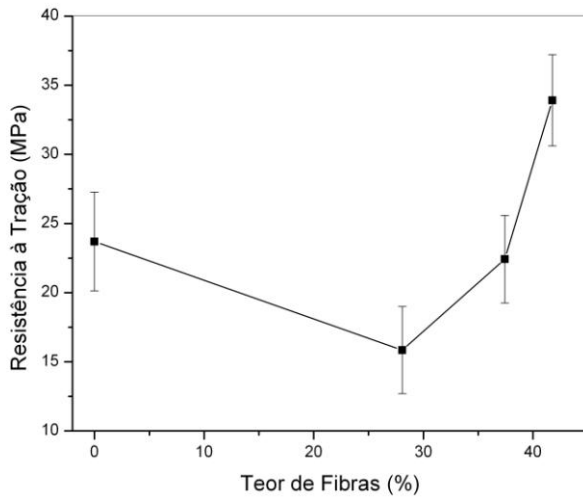
**Tabela 1** - Propriedades mecânicas dos compósitos com reforço de fibras de Babaçu sem tratamento. Pós-cura por 48 horas a 50 °C.

Teor de Fibra de Babaçu (%)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência ao Impacto Izod (J/m)	Módulo de Young (GPa)	Alongamento na Ruptura (%)
0	23,70 ± 3,57	72,46 ± 25,00	2,13 ± 0,08	1,27 ± 0,33
28,07	15,85 ± 3,15	423,25 ± 133,80	2,36 ± 0,11	1,96 ± 0,51
37,42	22,42 ± 3,16	497,96 ± 32,50	2,35 ± 0,15	2,84 ± 0,69
41,76	33,91 ± 3,30	559,24 ± 59,70	2,71 ± 0,13	3,61 ± 0,28

É observado na Figura 19 que a resistência à tração dos compósitos reforçados com fibras curtas de Babaçu in natura apresentaram resistências superiores à da matriz para teores de fibras acima de 38%. A resistência à tração para teores inferiores, não superaram à da matriz poliéster. Este fato pode estar associado à orientação aleatória das fibras e devido à atuação das fibras como defeito no compósito para as composições abaixo de 38%; fator este que vem comprovar a existência de um volume crítico de fibras de Babaçu que atuam como reforço. Este volume crítico varia com a natureza da fibra e da matriz, com a razão de aspecto da fibra, e com a adesão interfacial fibra/matriz <sup>(34)</sup>. Os dados obtidos estão de acordo com os reportados na literatura para sistemas afins, onde acredita-se que o desempenho superior dos compósitos reforçados com teores de fibras acima de 38% em relação à matriz esteja associado tanto ao menor diâmetro médio

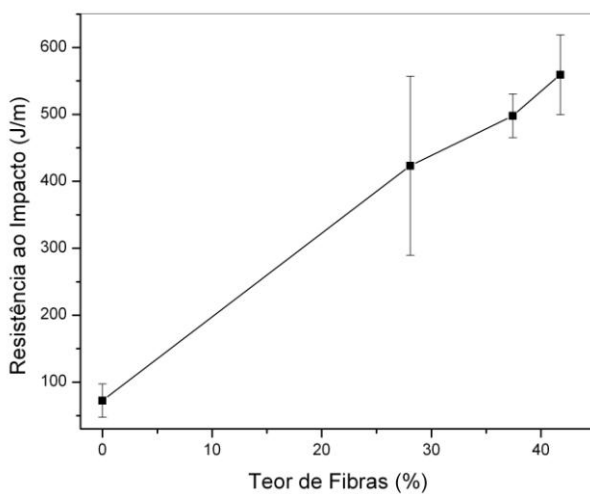


da fibras, que promovem o aumento nas áreas de contato fibra/matriz, quanto às propriedades mecânicas individuais das fibras <sup>(4)</sup>.



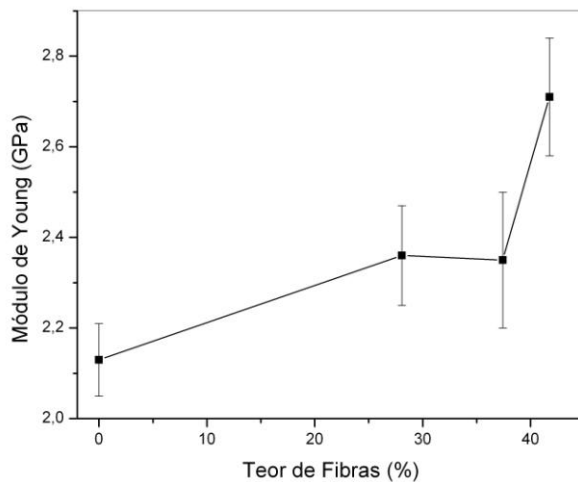
**Figura 19** - Resistência à tração dos compósitos em função do teor de fibras de Babaçu não tratadas.

A Figura 20 mostra o comportamento da resistência ao impacto dos compósitos em função do teor de fibras. Fica evidenciado o aumento da resistência ao impacto para todos os teores de fibras. Os resultados indicam uma boa adesão das fibras pela matriz, provocando um aumento da eficiência de transferência de tensão para as fibras durante o impacto, conseqüentemente elevando a resistência do compósito.



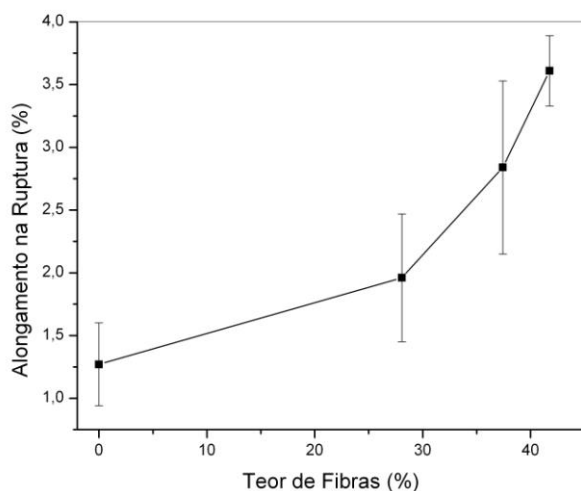
**Figura 20** - Resistência ao impacto dos compósitos em função do teor de fibras de Babaçu não tratadas.

Os resultados obtidos para o módulo de Young ou módulo de elasticidade, podem ser observados na Figura 21. À medida que o teor de fibras de Babaçu é aumentado na matriz poliéster verifica-se uma elevação no módulo de elasticidade. Tal ocorrência é explicada pelo fato das fibras diminuírem o movimento livre das cadeias poliméricas e também por apresentar maior rigidez que a matriz, resultando num aumento do módulo de elasticidade do compósito com o teor de fibras.



**Figura 21** - Módulo de Young dos compósitos em função do teor de fibras de Babaçu não tratadas.

Na Figura 22 podemos perceber que a incorporação das fibras na matriz poliéster provocou um aumento no alongamento do compósito e mostrou-se maior que a da matriz pura para todos os teores de fibras estudados. O aumento percentual observado foi de 2,3%, comportamento semelhante ao encontrado na literatura <sup>(26)</sup>, podendo-se atribuir este resultado a boa adesão fibra-matriz e ao aumento da tenacidade do compósito.



**Figura 22** - Alongamento na ruptura dos compósitos em função do teor de fibras de Babaçu não tratadas.

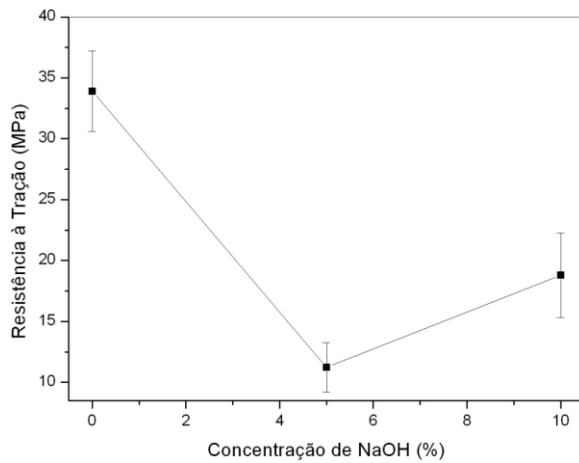
#### 4.1.2 Fibras mercerizadas

**Tabela 2** - Propriedades mecânicas dos compósitos com reforço de fibras de Babaçu mercerizadas. Pós-cura por 48 horas a 50 °C.

Teor de Fibra de Babaçu (%)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alongamento na Ruptura (%)
45,58 (5% NaOH)	11,22 ± 2,02	0,28 ± 0,09	6,88 ± 1,02
46,06 (10% NaOH)	18,80 ± 3,46	0,41 ± 0,01	7,92 ± 0,41

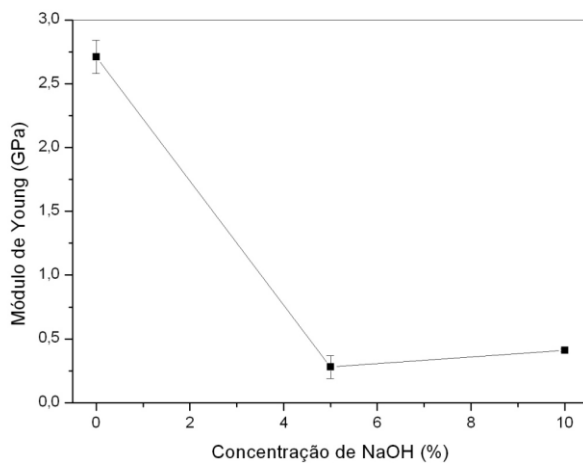
Os resultados dos ensaios de resistência à tração dos compósitos com fibras sem tratamento e as mercerizadas com concentrações de 5 e 10% NaOH por 1 hora são apresentados nas Figuras 23, 24 e 25.

Observou-se que o limite de resistência à tração (Figura 23) dos compósitos com fibras não tratadas foi superior em relação aos compósitos confeccionados com fibras mercerizadas para diferentes concentrações de NaOH.



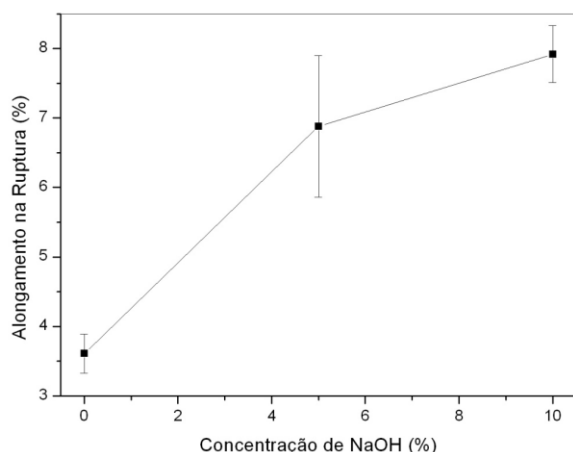
**Figura 23** - Resistência à tração dos compósitos em função da concentração de NaOH.

Para o módulo de elasticidade (Figura 24), observou-se também que as fibras tratadas provocaram no compósito um desempenho inferior em comparação com as fibras in natura.



**Figura 24** - Módulo de Young dos compósitos em função da concentração de NaOH.

Os resultados para o alongamento na ruptura (Figura 25) mostraram que, qualquer que seja a concentração de NaOH empregado na fibra ocorre um acentuado aumento desta propriedade nos compósitos. O aumento percentual foi de 4,3%.



**Figura 25** - Alongamento na ruptura dos compósitos em função da concentração de NaOH.

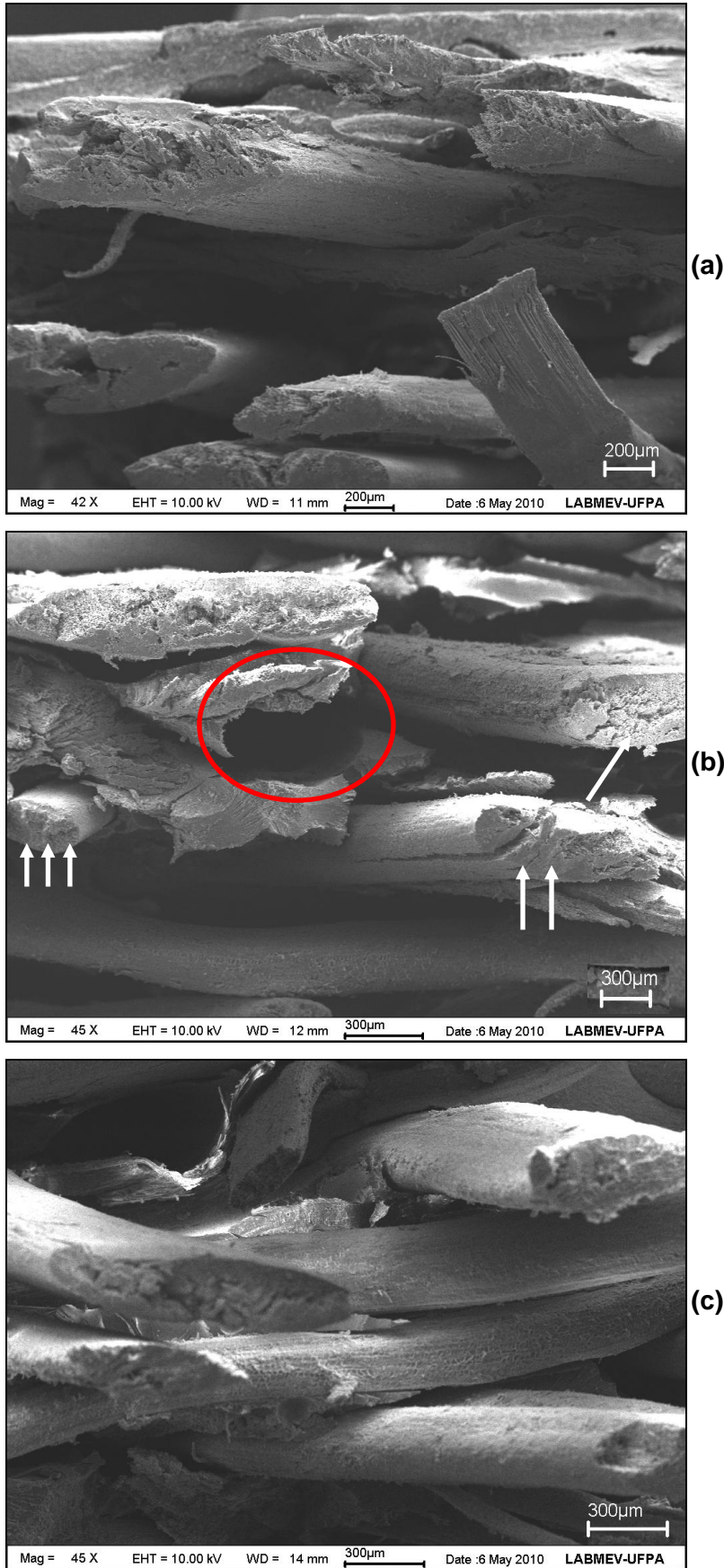
## 4.2 MORFOLOGIA DOS COMPÓSITOS

As Figuras 26, 27 e 28 apresentam as imagens obtidas através da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura, onde podemos observar a morfologia dos compósitos com fibras não tratadas e tratadas com concentração de 5 e 10% de NaOH respectivamente, após o ensaio de tração.

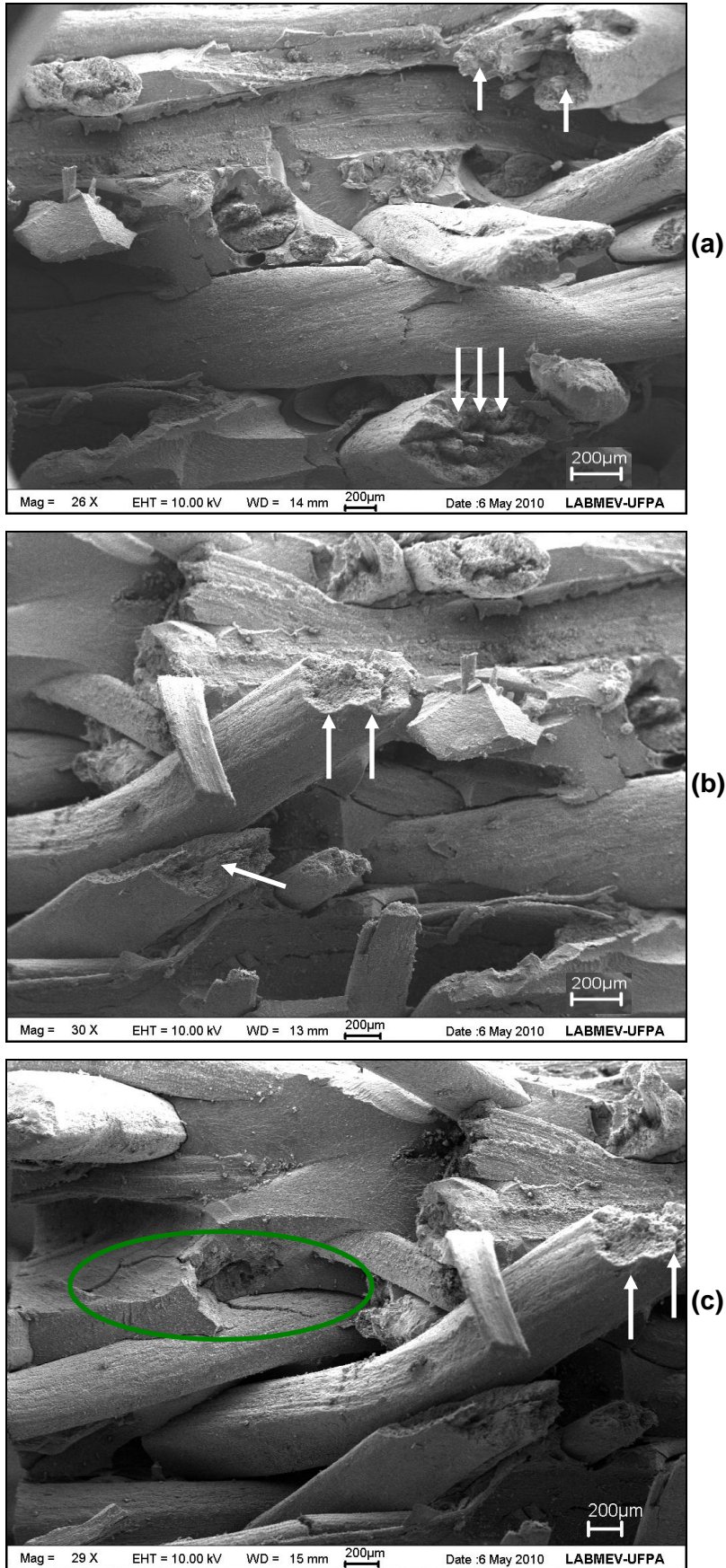
Na Figura 26(a) e (c), onde as fibras de Babaçu não receberam nenhum tratamento, podemos perceber que as fibras não estão totalmente recobertas pela resina (polímero termofixo), indicando que não há uma boa adesão fibra/matriz. Na Figura 26(b) observa-se dois mecanismos de fratura, tais como quebra de fibra indicada pelas setas brancas (quando há uma certa adesão) e o mecanismo “pullout” indicado pelo círculo vermelho, ou seja, fibras são liberadas da matriz quando a adesão é pouco intensa. Em um detalhe do mesmo compósito na Figura 26(b), observamos que uma fibra sacada e a relativa adesão fibra/matriz garantiu uma resistência ao impacto Izod eficaz (559,24 J/m) em relação à matriz polimérica.

Pode-se observar que as Figuras 27 e 28(a), (b) e (c) respectivamente, apresentaram fraturas das fibras de Babaçu durante o ensaio de tração, como é comum nas fibras lignocelulósicas, a ponta da fratura indicada pelas setas brancas é formada por inúmeras fibrilas que devem ser rompidas individualmente para separação final. Pode ser verificado que o compósito apresenta uma certa adesão

entre as fibras e a matriz, pois as fibras não estão soltas. A micrografia representada na Figura 27(c) mostra que as fibras apesar de estarem cobertas com resina, iniciou um processo de trinca longitudinal, a qual se estende até a resina poliéster, sendo indicada pelo círculo verde. Na Figura 28(a) e (c) houve mecanismo “pullout” indicado pelos círculos vermelhos.

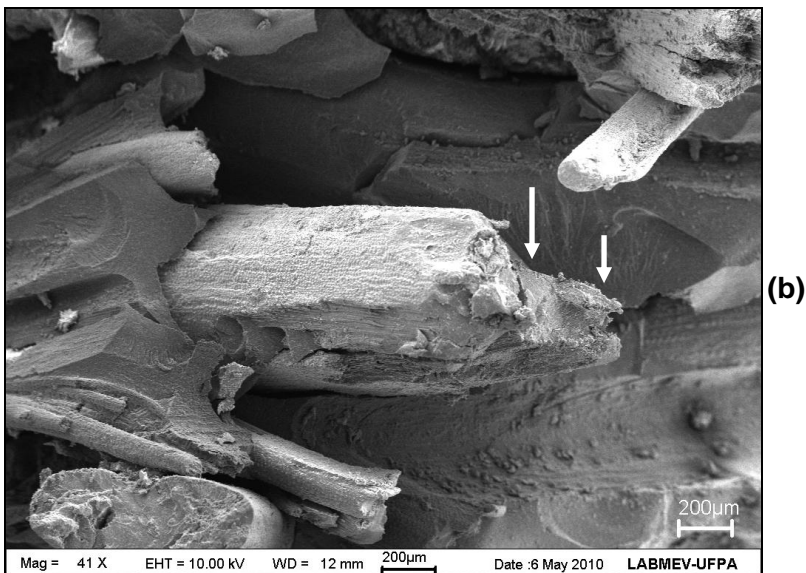
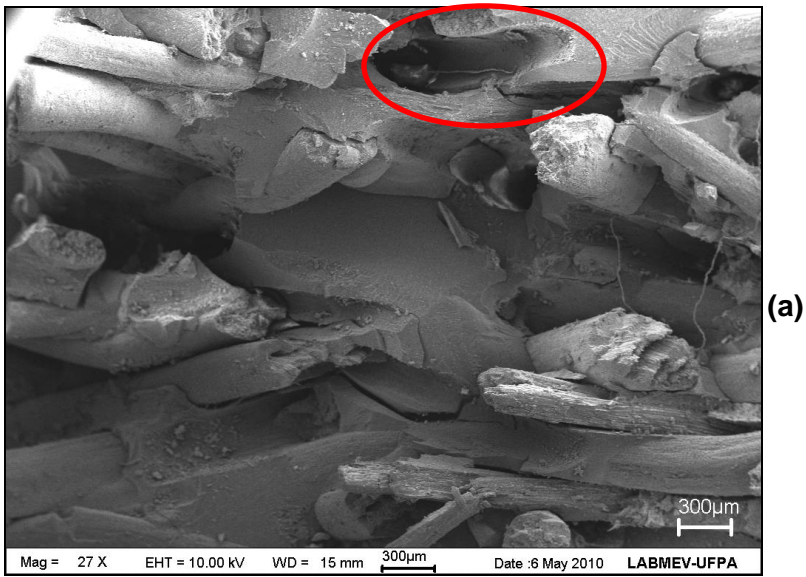


**Figura 26** - (a), (b) e (c) Micrografia obtida por MEV da superfície de fratura dos compósitos reforçados com 41,76% de fibras de Babaçu não tratadas. 420, 450 e 450x respectivamente.



**Figura 27** - (a), (b) e (c) Micrografia obtida por MEV da superfície de fratura dos compósitos reforçados com 45,58% de fibras de Babaçu tratadas com 5% de NaOH. 260, 300 e 290x respectivamente.





**Figura 28** - (a), (b) e (c) Micrografia obtida por MEV da superfície de fratura dos compósitos reforçados com 46,06% de fibras de Babaçu tratadas com 10% de NaOH. 270, 410 e 290x respectivamente.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Houve aumento na resistência à tração dos compósitos para teores acima de 38% de fibras sem tratamento, corroborando a existência de um volume crítico de fibras que atuam como reforço no compósito. O módulo de Young aumentou substancialmente com o aumento do teor de fibras não tratadas, provocado pela maior rigidez das fibras. Os valores medidos no alongamento na ruptura mostram que a incorporação das fibras na matriz poliéster é proporcional ao aumento no teor de fibras não tratadas. O tratamento de mercerização das fibras contribuiu para elevar esta propriedade dos compósitos de resina poliéster/fibras de Babaçu estudados. As propriedades mecânicas em impacto dos compósitos reforçados com fibras de Babaçu in natura aumentaram com o teor de fibras empregadas, o que foi associado à boa adesão fibra-matriz elevando a tenacidade do compósito. A morfologia dos compósitos para as fibras tratadas e não tratadas foram semelhantes.

A resistência à tração dos compósitos com fibras tratadas para as duas concentrações de NaOH analisadas foi inferior em relação aos compósitos com fibras não tratadas; uma das possíveis razões para este comportamento está diretamente ligada a degradação das fibras provocada pelo tratamento de mercerização nas variantes concentração e tempo. Estes resultados preliminares indicam que fibras de coco Babaçu podem ser utilizadas em compósitos poliméricos, para aplicações onde seja necessário médio desempenho mecânico.

## SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Estudar o efeito da variação da concentração de NaOH e tempo de mercerização nas propriedades mecânicas de compósitos poliéster/fibra de Babaçu;
- Estudar o efeito da sorção de água nas propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras tratadas e não tratadas, assim como aplicar modelagem e simulação na sorção de água;
- Desenvolver compósitos híbridos, isto é, compósitos reforçados simultaneamente com fibras de Babaçu e outra fibra vegetal ou ainda reforço cerâmico;
- Modificar a razão de aspecto da fibra de Babaçu.

## REFERÊNCIAS

- 1 ICTEN, B. M. Repeated Impact Behavior of Glass/Epoxy Laminates. *Polymer Composites*. 2009, xx, 1563-1569.
- 2 WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?. *Composites Science and Technology*. 2003, 63, 1259-1264.
- 3 MEGIATTO JR, J. D.; SILVA, C. G.; RAMIRES, E. C.; FROLLINI, E. Thermoset matrix reinforced with sisal fibers: Effect of the cure cycle on the properties of the biobased composite. *Polymer Testing*. 2009, 28, 793-800.
- 4 ANDRADE, E. C.; NÓBREGA, M. M. S. Compósitos de Matriz Poliéster Reforçados com Fibras de Babaçu *Orrbignya speciosa*: Caracterização Mecânica. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros. Anais... Foz do Iguaçu, PR: CBPol, 2009. 1 CD.
- 5 FRANCO, P. J. H.; GONZÁLEZ, A. V. Mechanical properties of continuous natural fibre-reinforced polymer composites. *Composites: Part A*. 2004, 35, 339-345.
- 6 FRANCO, P. J. H.; GONZÁLEZ, A. V. A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. *Composites: Part B*. 2005, 36, 597-608.
- 7 JOSEPH, S.; SREEKALA, M. S.; OOMMEN, Z.; KOSHY, P.; THOMAS, S. A comparison of the mechanical properties of phenol formaldehyde composites reinforced with banana fibres and glass fibres. *Composites Science and Technology*. 2002, 62, 1857-1868.
- 8 CAVALCANTE, J. M. F.; CARVALHO, L. H. Estudo Comparativo das Propriedades Mecânicas de Compósitos PP/Fios Alinhados e Contínuos de Juta. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros. Anais... Foz do Iguaçu, PR: CBPol, 2009. 1 CD.
- 9 DHAKAL, H.N.; ZHANG, Z. Y.; RICHARDSON, M. O. W. Effect of water absorption on the properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composites Science and Technology*. 2007, 67, 1674-1683.
- 10 LI, Y.; MAI, Y. W.; YE, L. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. *Composites Science and Technology*. 2000, 60, 2037-2055.

- 11 LEE, S. H.; WANG, S. Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent. *Composites: Part A*. 2006, 37, 80-91.
- 12 ARAÚJO, S. S.; SANTOS, T. T.; SILVA, S. M. L.; CARVALHO, L. H. Efeito da Modificação da Fibra nas Propriedades Mecânicas de Compósitos PP/Sisal Processados por Extrusão. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros. Anais... Foz do Iguaçu, PR: CBPol, 2009. 1 CD.
- 13 FERNANDES, R. I. M. et al. Estudo da Modificação Química nas Fibras Provenientes da Coroa do Abacaxi. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros. Anais... Foz do Iguaçu, PR: CBPol, 2009. 1 CD.
- 14 <<http://www.campestre.com.br/oleo-de-coco-babacu.shtml>>; 2010 [acessado em Maio de 2010].
- 15 <<http://www.biodieselbr.com/plantas/babacu/babacu.htm>>; 2010 [acessado em Maio de 2010].
- 16 SOBRINHO, L. L. Desenvolvimento de Matriz Polimérica para Material Compósito Visando o Reforço de Dutos de Aços. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro. (COPPE/UFRJ), 137f, 2005.
- 17 NÓBREGA, M. M. S. Compósitos de Matriz Poliéster com Fibras de Caroá *Neoglaziovia variegata*: caracterização mecânica e sorção de água. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande. PB, 117f, 2007.
- 18 FAGURY, R. V. G. Avaliação de Fibras Naturais para a Fabricação de Compósitos: açaí, coco e juta. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica na Área de Materiais e Processos, Universidade Federal do Pará. PA, 83f, 2005.
- 19 SABARIZ, A. et. al. Propriedades Mecânicas de Compósitos Formados por Matriz Epoxídica Reforçada com Fibras Vegetais. 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Anais... Foz do Iguaçu, PR: CBCIMat, 2006.
- 20 PAIVA, J. M. F. et al. Compósitos de Matriz Termofixa Fenólica Reforçada com Fibras Vegetais. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 9, nº 4, p. 170-176, 1999.

- 21 MARINELLI, A. L. et al. Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras Vegetais Naturais da Biodiversidade: uma contribuição para sustentabilidade amazônica, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 18, nº 2, p. 92-99, 2008.
- 22 SILVA, A. C. Estudo da Durabilidade de Compósitos Reforçados com Fibras de Celulose. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil na Área de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. SP, 145f, 2002.
- 23 ANNUNCIADO, T. R. Estudo da *Chorisia speciosa* e Outras Fibras Vegetais como Sorventes para o Setor de Petróleo. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná. PR, 106f, 2005.
- 24 SANTOS, P. A.; GIRIOLI, J. C. Uso de Fibras Vegetais como Agente de Reforço para Termoplásticos. Society of Plastics Engineers (SPE Brasil), Newsletter, Edição nº 6, Agosto/2008.
- 25 LEITÃO, E. S. et. al. Caracterização Mecânica de Compósitos Poliméricos Bobinados em Diversas Orientações do Reforço. 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Anais... Foz do Iguaçu, PR: CBCIMat, 2006.
- 26 ANDRADE, E. C.; NÓBREGA, M. M. S. Estudo das Propriedades Mecânicas de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Açai (*Euterpe oleracea*). 65º Congresso Internacional da ABM (Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração). Anais... Rio de Janeiro, RJ: ABM, 2010. 1 CD.
- 27 CAVALCANTE, J. M. F.; CARVALHO, L. H. Estudo das Propriedades Mecânicas de Compósitos PP/Fios Alinhados e Contínuos de Juta. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros. Anais... Foz do Iguaçu, PR: CBPol, 2009. 1 CD.
- 28 SILVA, C. G.; FROLLINI, E. Fibras de Bagaço de Cana de Açúcar Queimadas e Não Queimadas em Compósitos de Matriz Termorrígida. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros. Anais... Foz do Iguaçu, PR: CBPol, 2009. 1 CD.
- 29 TARGA, G. et al. Produção e Caracterização Mecânica de um Compósito de Fibra de Juta e Resina de Poliéster Insaturado. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros. Anais... Foz do Iguaçu, PR: CBPol, 2009. 1 CD.
- 30 MULLINARI, D. R. et al. Resistência ao Impacto dos Compósitos PEAD Reforçados com Fibras de Celulose do Bagaço de Cana-de-açúcar. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros. Anais... Foz do Iguaçu, PR: CBPol, 2009. 1 CD.

- 31 CARVALHO, K. C. C. et al. Efeito do Tratamento Químico nas Propriedades Térmicas de Fibras Curtas de Coco Verde. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros. Anais... Foz do Iguaçu, PR: CBPol, 2009. 1 CD.
- 32 FORNARI, C. I.; FORNARI JR, C. C. M. Tensão de Cisalhamento de Fibra de Piaçava em Poliéster Ortoftálico. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros. Anais... Foz do Iguaçu, PR: CBPol, 2009. 1 CD.
- 33 CARVALHO, S. B.; BECKER, D.; BALZER, P. S. Compósitos de Poli (Cloro de Vinila) e Fibra de Bananeira: Estudo da influência do Tratamento Alcalino da Fibra de Bananeira nas Propriedades do Compósito. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros. Anais... Foz do Iguaçu, PR: CBPol, 2009. 1 CD.
- 34 IOZZI, M. A. et al. Estudo da Influência de Tratamentos Químicos das Fibras de Sisal nas Propriedades de Compósitos com Borracha Nitrílica, Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 20, nº 1, p. 25-32, 2010.