



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE POS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS

JORGE ANTÔNIO VIEIRA GONÇALVES

**COMPÓSITOS À BASE DE RESINA EPÓXI REFORÇADOS COM  
FIBRA DE COCO**

SÃO CRISTÓVÃO, SE – BRASIL

FEVEREIRO DE 2010

COMPÓSITOS À BASE DE RESINA EPÓXI REFORÇADOS COM FIBRA DE COCO

Jorge Antônio Vieira Gonçalves

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS E ENGENHARIA DOS MATERIAIS.

Aprovada por:

---

Prof . Marcelo Andrade Macêdo, D.Sc.

---

Prof. Marcelo Massayoshi Ueki, D.Sc.

---

Prof. Eliton Souto de Medeiros, D.Sc.

SÃO CRISTÓVÃO, SE – BRASIL

FEVEREIRO DE 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

G635c Gonçalves, Jorge Antônio Vieira  
Compósitos à base de resina epóxi reforçados com  
fibra de coco / Jorge Antônio Vieira Gonçalves. – São  
Cristóvão, 2010.  
51 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de  
Materiais) - Universidade Federal de Sergipe, Pró-  
Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Programa de  
Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais,  
2010.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Andrade Macedo  
1. Resina epóxi. 2. Fibra de coco. 3. Polímeros. 4.  
Compósitos. I. Título.

CDU 678.686

**Como Flechas na mão de robusto, assim são os filhos dos atribulados.**

(Salmos 126)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom incomensurável da vida, o maior bem da humanidade.

Ao meu adorável filho Dylan, pelos momentos de alegria propiciados com a sua essencial presença.

A minha mãe, Maria Vieira dos Santos, por toda a confiança que sempre depositara em mim, pelo amor incondicional e pela esperança no meu futuro.

Aos irmãos, pelo companheirismo, pelos momentos de alegria, e a Ana Paula pela paciência enquanto eu desempenhava o bom desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Marcelo Macêdo, meu orientador, e a todos os professores P<sup>2</sup>CEM/UFS, por terem me dado a oportunidade de acesso à pesquisa científica, além de todo o apoio que sempre me dedicaram.

A minha linda namorada, Mayka Brito, pela compreensão e dedicação para que eu vencesse mais essa etapa.

Ao estimável amigo Nilson Ferreira, por tudo que me ensinou e pela ajuda imensurável que dedicou, tornando mais fácil a realização deste trabalho, com sua presença sempre amiga e sincera!

Aos grandes amigos, Alexssandro Cordeiro, Roberto Macias, Genilson Souza, Arivaldo (Careca), Fábio Henrique, Vivaldo Bispo, Josafá de Oliveira Filho, por todos os bons conselhos dados ao longo desses anos e pela amizade sincera, que permanece cada vez mais fortalecida pelo decurso do tempo.

Resumo da Dissertação apresentada ao P<sup>2</sup>CEM/UFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## COMPÓSITOS À BASE DE RESINA EPÓXI REFORÇADOS COM FIBRA DE COCO

Jorge Antônio Vieira Gonçalves

Fevereiro/2010

Orientador: Marcelo Andrade Macêdo

Programa: Ciência e Engenharia dos Materiais

Compósitos poliméricos reforçados com fibras sintéticas são de grande interesse na indústria automobilística, merecendo destaque as resinas epoxídicas reforçadas por fibras de vidro. No entanto, estas fibras apresentam comportamento abrasivo causando desgastes dos equipamentos, tornando-se susceptíveis à perda de propriedades, devido à quebra das fibras durante o processamento, alto custo de fabricação. Por sua vez, o interesse de empresas e pesquisadores por compósitos alternativos, que utilizem recursos renováveis, apresentem baixo custo e sejam biodegradáveis, tem aumentado. A utilização de fibras vegetais em termorrígidos nas aplicações comerciais tem sido promissora, tendo em vista que elas não são tóxicas, possuem baixo custo, são de fontes renováveis e atendem as novas exigências de preservação ambiental. Além disso, as fibras vegetais não são abrasivas a equipamentos de processo e geram compósitos com baixa susceptibilidade a perda de propriedades durante o processamento. Entre a grande variedade de fibras vegetais existentes, a fibra de coco (subproduto do coco), abundante no Estado de Sergipe, com diâmetro médio de 0,25 milímetros e densidade inferior a das fibras de vidro, foi estudada como componente de reforço na matriz epóxi (DGEBA), nos teores de 0, 10, 20 e 30% em peso, contínua e orientada aleatoriamente. Estes compósitos foram ensaiados em tração e flexão e sua superfície analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Dentre as propriedades avaliadas, o aumento no teor de reforço provocou um acréscimo significativo da resistência à tração e flexão e do módulo de elasticidade dos compósitos comparados com a resina pura. As observações microestruturais revelaram os mecanismos de falhas que podem ocorrer durante a fratura; e que a superfície singular da fibra de coco contribui para uma boa adesão com a DGEBA (diglicidil éter do bisfenol A).

Abstract of Dissertation presented to P<sup>2</sup>CEM/UFS as part of the requirements for obtaining the degree of Master of Science (M.Sc.)

## COMPOSITE BASED RESIN REINFORCED WITH COCONUT FIBER

Jorge Antônio Vieira Gonçalves

February/2010

Advisor: Marcelo Andrade Macêdo

Department: Materials Science and Engineering

### ABSTRACT

Polymer composites reinforced with fibers are of great interest in the automotive industry, with emphasis to epoxy resin reinforced with glass fibers

However, these fibers exhibit abrasive behavior causing wear of equipment, making it susceptible to the loss of properties due to the breakdown of fibers during processing, high cost of manufacturing.

In turn, the interest of companies and researchers for composite alternatives, using renewable resources, having a low cost and being biodegradable, has increased.

The use of vegetable fibers in thermosetting in commercial applications has been promising, considering that they are not toxic, have low cost, are renewable sources and meet the demands of environmental preservation.

In addition, the vegetable fibers are not abrasive to processing equipment and create composites with low susceptibility to loss of properties during processing.

Among the wide variety of existing plant fibers, coir (coconut product), abundant in the state of Sergipe, with an average diameter of 0.25 mm and lower density than the glass fibers, it was studied as a strengthening component in the epoxy matrix (DGEBA), at the levels of 0, 10, 20 and 30% by weight, continuous and randomly oriented.

These composites were tested in tension and bending and their surface examined by scanning electron microscopy (SEM).

Among the properties evaluated, the increase in the level of reinforcement caused a significant increase in the tensile strength and bending modulus of the composites compared to pure resin.

The microstructural observations revealed the failure mechanisms that can occur during fracture, and that the area of natural coconut fiber contributes to good adhesion with DGEBA (diglycidyl ether of bisphenol A).

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 MOTIVAÇÕES E JUSTIFICATIVA	2
1.3 OBJETIVOS	5
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>6</b>
2.1 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	6
2.2 MATRIZES POLIMÉRICAS	8
2.3 RESINAS EPOXÍDICAS	9
2.4 MODIFICAÇÃO DE SISTEMAS EPÓXI	11
2.4.1 Fibras Vegetais	12
2.4.2 Fibras de coco	15
2.5 COMPRIMENTO CRÍTICO DA FIBRA UTILIZADA	18
2.6 PROPRIEDADES DA INTERFACE	20
2.7 MECANISMOS DE FALHAS	21
2.7.1 Mecanismo de Falhas Coesivas:	22
2.7.2 Fratura da Fibra:	22
2.7.3 Fratura da Matriz:	23
<b>CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL</b>	<b>23</b>
3.1 INTRODUÇÃO	24
3.2 PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS	24
3.3 PROCEDIMENTOS DE PREPARAÇÃO DO COMPÓSITO	26
3.3.1 Resinas Epóxi	26
3.3.2 Componente Estrutural de Reforço	26
3.3.3 Preparação da Resina	28
3.3.4 Método de preparação dos compósitos	28
3.4 CARACTERIZAÇÕES DOS COMPÓSITOS	29
3.4.1 Caracterizações morfológicas	30
3.4.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	30
3.4.2 Ensaio mecânicos	31
3.4.4 Ensaio de Tração:	32

3.4.5	Ensaio de Flexão em três pontos	33
<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADO DAS DISCUSSÕES</b>		<b>35</b>
4.0	ENSAIOS MECÂNICOS	35
4.1	ENSAIOS DE TRAÇÃO	36
4.1.2	ENSAIOS DE FLEXÃO	40
4.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	44
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO</b>		<b>52</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		<b>53</b>

# Capítulo 1

## Introdução e Justificativa

### 1.1 INTRODUÇÃO

A história da humanidade é dividida em eras que, por sua vez, são subdivididas em épocas; sendo algumas destas influenciadas pela disponibilidade de materiais e, nomeadas após os primeiros materiais usados (a idade da pedra, a idade de bronze, e a idade do ferro). Similarmente, podemos afirmar que, com o início do Século XXI, estamos entrando na idade dos polímeros (RUBINSTEN, M. e COLBY, R. H., 2003). E, da mistura física deste material denominado de fase contínua (matriz) com uma fase dispersa (reforço) que pode ser na forma de fibras, mantas ou partículas surge uma nova classe de materiais com características diferentes dos seus constituintes originais, denominados de compósitos (NETO, F. L. e PARADINI, L. C., 2006).

Nos últimos 20 anos, observou-se um maior desenvolvimento de compósitos voltados a aplicações estruturais. Esta evolução está inteiramente ligada à possibilidade da produção de compósitos com excelentes propriedades mecânicas e baixas densidades que podem substituir materiais como a madeira e o aço. A necessidade de aplicação de polímeros termorrígidos de alto desempenho, como matrizes, isolantes e revestimentos, na indústria eletrônica, naval e automobilística, impulsionaram os estudos voltados à produção de compósitos à base do sistema epóxi devido à boa estabilidade térmica, alta resistência mecânica, baixo coeficiente de contração quando curada e excelentes propriedades de adesão deste material. Mas, apenas estas propriedades citadas anteriormente não são capazes de conferir a esse material altas razões módulo/peso e resistência/peso, superiores à de materiais metálicos e cerâmicos. Para

solucionar esta deficiência, o sistema epóxi tem sido modificado com a introdução de agentes reforçantes ou cargas tais como nanopartículas, elastômeros, sílica e silicatos, fibra de vidro e coco etc. Com a introdução destes materiais, a matriz é capaz de manter transmitindo às forças de cisalhamento entre as camadas de reforço de modo que o compósito se torna resistente a esforços de tração e flexão.

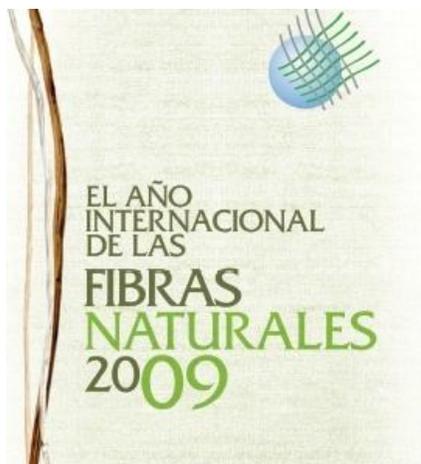
A utilização de fibras naturais, especialmente as fibras lignocelulósica extraída do coco, como modificadores de sistemas epóxi tem atraído a atenção de muitos pesquisadores devido às propriedades finais do sistema formado, seu crescente interesse comercial e diversas aplicações em engenharia.

## **1.2 MOTIVAÇÕES E JUSTIFICATIVA**

Entre 1830 e 1930, a população mundial aumentou aproximadamente de um bilhão para dois bilhões de habitantes, ocasionando escassez nos recursos naturais do planeta, trazendo com isso a conscientização acerca da preservação do meio ambiente, controle de poluição e economia de energia, dando grande importância à utilização de recursos renováveis na fabricação de diversos produtos (NETO, F. L. e PARADINI, L. C., 2006). A substituição industrial de materiais tradicionais por materiais compósitos vem sendo gradualmente executada ao longo das últimas décadas, tendo se intensificado nos últimos 20 anos. Os compósitos têm demonstrado um alto grau de confiabilidade e muitas vantagens sobre os materiais convencionais quando se deseja flexibilidade de projeto e economia na produção. Comparando os materiais compósitos poliméricos, os reforçados com fibras vegetais apresentam vantagens específicas sobre outros compósitos tais como o baixo custo e maleabilidade (SATYANARAYANA, K. *et al.*, 1982).

As fibras vegetais são compostas principalmente de celulose e se apresentam como um material abundante e disponível em praticamente todo o mundo, principalmente no Norte e Nordeste do Brasil. Estes materiais têm sido investigados para uso como reforço em compósitos de matrizes poliméricas, pois aliam propriedades características como biodegradabilidade, fonte renovável e atoxicidade que vão ao encontro à nova ordem mundial de forte apelo ecológico. Entre as fibras vegetais, as de coco têm sido as menos exploradas no que se refere à aplicação em compósitos. Recentemente, Harishet al. (HARISH, S. *et al.*, 2009) relatam sobre a sua utilização como reforço em compósitos à base de epóxi e Monteiro et al. (MONTEIRO, S. N. *et al.*, 2006; MONTEIRO, S. N. *et al.*, 2008) utilizaram estas fibras como reforço em matriz de poliéster confirmando as melhorias nas propriedades de mecânicas deste compósito. Estas vantagens tornaram estes compósitos de fibra de coco os mais apropriados para certos usos industriais como isolantes térmicos, talude para construção de encostas, mantas para proteção de solo e estofamento de automóveis (HOLBERY, J. e HOUSTON, D., 2006).

Segundo a **FAO** (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação), que declarou o ano de 2009 como o ano internacional das fibras naturais (ver figura 1), a produção mundial de fibra de coco está estimada em 605.000 toneladas e as exportações mundiais deste produto nos últimos três anos estiveram em torno de US\$ 205 milhões (SILVA, R. *et al.*, 2009).

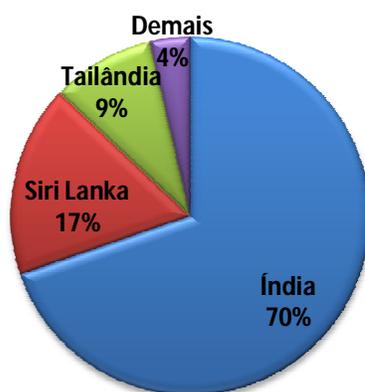


**Figura 1** Cartaz da FAO apresentado 2009 como o ano mundial das fibras vegetais (FAO, 2010).

Da oferta anual de fibra de coco, o Brasil participa com menos 1% deste mercado que é liderado por países asiáticos sendo que a Índia, o maior produtor deste material, tem mais da metade produção mundial conforme mostra a Figura 2.

As vantagens da utilização de fibras de coco em relação às fibras sintéticas vão além do baixo custo, baixa densidade, boas propriedades térmicas e alto módulo específico; pois sua comercialização contribui para o melhor aproveitamento do potencial agrícola brasileiro, criando empregos em áreas de baixo índice de desenvolvimento humano e gerando riquezas.

No Brasil, somente, 12% dos grupos de pesquisa em engenharia de materiais realizam trabalhos com fibras vegetais (SILVA, R. et al., 2009), deste total, menos de 3% destes grupos estão no Nordeste apesar desta região ser responsável por 90% da produção nacional de coco (onde Bahia, Sergipe e Rio Grande do Norte são os maiores produtores)



**Figura 2 – Produção mundial de fibras de coco (Agrianual 2007)**

### **1.3 OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é: (i) propor a utilização das fibras curtas de coco dispostas aleatoriamente como componente estrutural de reforço da resina epóxi para a produção do compósito e comparar as propriedades da resina epóxi reforçada com a fibra de coco em vários teores de reforço (0; 10; 20 e 30%) com a resina epóxi pura, (ii) avaliar os compósitos produzidos quanto a suas propriedades mecânicas, por ensaios de tração e flexão, e interface fibra/matiz, por microscopia eletrônica de varredura.

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

O objetivo do capítulo 2 é fazer uma revisão bibliográfica sobre a fibra de coco e a resina epóxi, que são os elementos constituintes do compósito desenvolvido nesta pesquisa.

#### 2.1 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Os materiais compósitos estão associados, em muitos casos, à tecnologia de ponta, como componentes utilizados em satélite, aeronaves, implantes ortopédicos, veículos de fórmula 1, entre outros. Há, na literatura, muitas definições de compósito sendo que nesta dissertação, definiremos compósitos como uma classe de materiais heterogêneos, tanto em escala microscópica quanto em escala macroscópica, multifásicos, resultantes de uma combinação racional, onde os componentes descontínuos dão a principal resistência ao esforço e os contínuos são o meio de transferência desse esforço, que por sua vez, denomina-se de componente matriz (FREIRE, E. *et al.*, 1994).

Os materiais compósitos podem ser classificados em três grupos principais: os compósitos particulados, fibrosos e os estruturais. Além disso, existem pelo menos duas subdivisões para cada grupo, como mostrado na Figura 2. 1.



**Figura 2. 1 – Esquema de classificação para vários tipos de compósitos (CALLISTER JR, W. D., 2008).**

Muitos materiais compósitos são constituídos por apenas duas fases; uma é denominada **matriz** a outra de **fase dispersa**. As propriedades dos compósitos são em função das características das fases constituintes, de suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa (CALLISTER JR, W. D., 2008). A fase matriz, no nosso caso a resina epóxi, serve para unir as fibras umas as outras, atuar no meio através do qual uma tensão aplicada externamente é transmitida e distribuída para as fibras, manter a integridade estrutural do material através da ligação simultânea com a fase dispersa em virtude de suas características coesivas e adesivas, proteger as fibras individuais contra danos superficiais em decorrência da abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente.

As propriedades dos compósitos dependem de qualquer compósito alguns fatores básicos, tais como: razão de aspecto (relação entre a maior e a menor dimensão de corpo); porosidade da carga; propriedades dos componentes individuais; grau de adesão entre as fases; grau de mistura entre os componentes, bem como o fator importante da interface.

## 2.2 MATRIZES POLIMÉRICAS

Há dois tipos de compósitos poliméricos que são nomeados como termorrígidos ou termofixos e termoplásticos. E, a principal diferença entre cada um está no comportamento destes materiais quando aquecidos, ou seja, os termoplásticos são polímeros capazes de serem moldados várias vezes devido às suas características de se tornarem fluídos quando aquecidos a uma determinada temperatura e depois se solidificarem quando há um decréscimo desta temperatura (CANEVAROLO JR., S. V., 2006). Por outro lado, os termorrígidos não são capazes de se tornarem fluídos pois, durante o processo de cura que é normalmente exotérmico, sofre reações químicas irreversíveis, com a formação de uma grande quantidade de ligações cruzadas (ligações covalentes) entre as cadeias macromoleculares, tornando-se rígido, infusível e insolúvel.

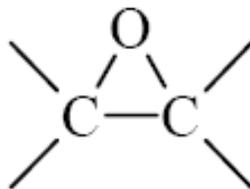
Tradicionalmente, os polímeros termorrígidos (resinas) têm sido empregados para uso estrutural em materiais compósitos por apresentarem algumas vantagens em relação aos termoplásticos, tais como resistência à fluência e à deformação sob carregamento, alta estabilidade dimensional, boas propriedades de isolamento térmico e elétrico e elevada rigidez.

As resinas termorrígidas mais usadas são os poliésteres, vinil-éster, resinas fenólicas e epóxi. Essas resinas respondem por aproximadamente 90% dos sistemas poliméricos utilizados.

As resinas epóxi podem ser misturadas fisicamente com fibras através de métodos de processamento bastante simples para aplicações estruturais, sendo muito utilizadas em aplicações aeroespaciais, por possuírem melhores propriedades mecânicas e melhores resistências à umidade do que as resinas vinil-éster, poliuretanos e poliésteres.

## 2.3 RESINAS EPOXÍDICAS

A palavra epóxi deriva do grego EP (entre) e do inglês OXI (oxigênio) e, literalmente, significa oxigênio entre carbonos. Em outras palavras, corresponde a um grupo constituído por átomos de oxigênio ligados por meio de uma ligação covalente simples a dois átomos de carbono. Quimicamente, define-se epóxi (ou resina epoxídica) como polímeros de alto desempenho caracterizados pela presença de pelo menos dois anéis de três membros conhecidos como epóxi, epóxido, oxirano ou etano epóxi, como mostra a Figura 2.2.



**Figura 2.2– Molécula da resina epóxi (PAIVA JR, C. Z. *et al.*, 2004).**

A resina epoxídica mais comum é o DGEBA (diglicidil éter do bisfenol A), que resulta da reação entre a epocloridrina e o bisfenol A, que possui dois grupos epóxi nas extremidades das cadeias cuja estrutura básica é mostrada na Figura 2.3. O valor do índice “n”, mostrado na figura, indica o grau de polimerização da resina epóxi, que para esta resina, está próximo a zero (0,2). Quando  $n < 1$ , a resina é líquida e; quando for  $n \geq 1$ , temos as resinas semi-sólidas e sólidas (RANGEL, S. A., 2006).

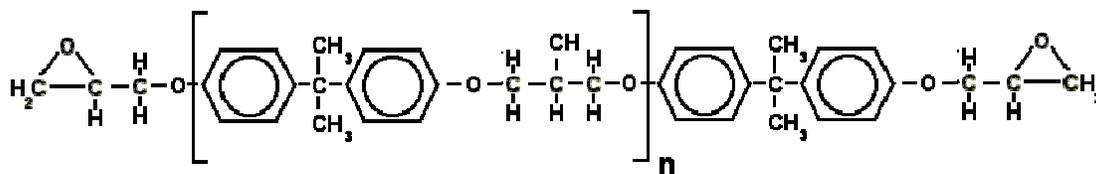


Figura 2.3– Estrutura química de uma resina epóxi (DGEBA).

As resinas epóxi são convertidas em polímeros termorrígidos pela ação de endurecedores (agentes de cura). O termo “cura” é usado para descrever o processo pelo qual um ou mais tipos de reagentes, uma resina e um endurecedor, são transformados de materiais de baixo peso molecular em um material altamente reticulado (SOBRINHO, L. L., 2009). Esta reação pode ser realizada tanto à temperatura ambiente como as altas temperaturas, dependendo dos produtos iniciais utilizados no processo ou das propriedades desejadas do produto final (FONSECA, V. M. *et al.*, 2004).

A polaridade dos grupos éteres e hidroxilas alifáticas da estrutura epoxídica servem para criar forças de interação entre a molécula epóxi e sua superfície adjacente. Isto torna esta matéria propícia para ser usado em aplicações estrutural ou como adesivo, pois é de fácil processamento, possui boa resistência química e térmica. Entretanto, em muitas aplicações, a baixa resistência à fratura deste material configura-se como sua maior deficiência. Após a cura, os sistemas epóxi apresentam pequenas contrações, em média na ordem de 2%. Este comportamento indica que é necessário um baixo grau de rearranjo molecular para formar o sistema curado. Quanto à estabilidade química, a epóxi é um dos termorrígidos mais inertes e possui boa estabilidade dimensional em serviço (ALMEIDA, C. N., 2005).

## 2.4 MODIFICAÇÃO DE SISTEMAS EPÓXI

A resistência das resinas epóxi é um fenômeno complexo que pode ser afetado por muitos fatores, tais como as propriedades dos modificadores, a compatibilidade entre os modificadores e a matriz epóxi e as condições de cura. Os modificadores, também conhecidos como fase dispersa, possuem uma função estrutural que os tornam responsáveis pela resistência do compósito e podem ser classificados como particulados e fibrosos. Diferentes tipos de modificadores fibrosos têm sido estudados para aumentar a resistência ou a ductilidade das resinas epóxi curadas. Logo a fibra tem despertado grandes interesses em pesquisadores e engenheiros da indústria de diversos setores como automotiva, da construção mecânica, metalúrgica, naval, aeronáutica, aeroespacial entre outras.

As fibras, uma das mais importantes formas de reforços de materiais poliméricos, podem ser classificadas de acordo com sua origem em: (i) fibras sintéticas e (ii) fibras naturais. Quando analisadas, as propriedades físicas de uma fibra dependem de sua estrutura química, diâmetro, razão de aspecto, superfície de contato etc. Isto faz com que as fibras sejam macroscopicamente homogêneas, flexíveis, com alta relação entre comprimento e seção transversal.

As fibras naturais são origem de animais, minerais e vegetais; esta última será detalhada mais adiante, por se tratar do material usado neste estudo reforços.

### 2.4.1 Fibras Vegetais

As fibras vegetais possuem boas propriedades mecânicas, durabilidade e rigidez, são fáceis de processar e mais leves do que as fibras sintéticas (VALADEZ-GONZALEZ, A. *et al.*, 1999). No entanto, mostram-se bastante heterogêneas, pois dependem do tipo de solo, das condições climáticas, do tipo de colheita, das folhas, dos frutos ou do caule dos vegetais. Estes tipos de fibras já foram largamente empregados no passado na indústria automobilística, como foi o caso de compósitos de látex de borracha natural reforçado com fibra de coco para uso em estofamentos de automóveis (SILVA, R. *et al.*, 2009). No entanto, a partir da década de 60, tais materiais começaram a ser gradativamente substituídos pelas espumas de poliuretano.

Atualmente, há um grande interesse nos materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais devido à necessidade da indústria automotiva fabricar peças mais leves e mais seguras que não gerem arestas cortantes ao serem rompidas. Ao mesmo tempo, busca-se o aproveitamento de recursos naturais renováveis de importância econômica regional, objetivando-se a conscientização ecológica e os avanços em legislações relativas ao meio-ambiente que exigem o desenvolvimento de produtos menos agressivos e/ou tóxicos. Vale a pena transcrever as diversas vantagens e desvantagens oferecidas pelas fibras vegetais em relação às fibras sintéticas, conforme a seguir:

**Tabela 1 – Comparação das vantagens e desvantagens na utilização de fibras vegetais.**

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Baixa massa específica	Baixas temperaturas de processamento
Maciez e abrasividade reduzida	Propriedades mecânicas acentuadamente variadas
Recicláveis, não tóxicas e biodegradáveis	Forte influência com a época da colheita, tipo de solo, processamento após colheita;
Estimula empregos	Sensibilidade significativa à variação de temperatura e de umidade
Baixo custo, baixo consumo de energia na produção	Seções transversais da fibra variada e de geometria complexa e não uniforme.

As fibras vegetais mais amplamente empregadas em compósitos poliméricos são as de juta, sisal, cânhamo, rami, abacaxi, abacá e curauá. Há grupos de pesquisadores no exterior, em países como a Índia, Paquistão, Egito, Canadá, França, Alemanha, Argentina, México, Colômbia e Venezuela, e também no Brasil, que vem pesquisando e apresentando resultados interessantes na melhoria das propriedades físicas e mecânicas de compósitos, quando reforçados com fibras vegetais (SATYANARAYANA, K. G. *et al.*, 2009).

Segundo Chand et al. (CHAND, N. e HASHMI, S. A. R., 1993), a resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras são diretamente proporcionais ao teor de celulose e inversamente proporcionais ao ângulo das microfibrilas. Outros componentes das fibras, como hemicelulose (LEWIN, M. e GOLDSTEIN, I. S., 1991), ligninas e pectinas influem de maneira decisiva nas propriedades mecânicas, na estrutura, na morfologia, na flexibilidade e na taxa de hidrólise das fibras. Algumas frações de hemiceluloses se tornam parcial ou totalmente solúveis em água depois de terem sido extraídas com soluções alcalinas de hidróxido de sódio e potássio (AZUMA, J. *et al.*, 1985).

Em compósitos, onde fibras são usadas como reforço, ocorrem aumento da resistência mecânica (MUKHERJEE, P. S. e SATYANARAYANA, K. G., 1984), embora um alto teor de reforço possa favorecer a aglomeração de fibras e a baixa dispersão das fibras na matriz. A orientação das fibras também é outro fator significativo nas propriedades mecânicas dos compósitos (AGARWAL, B. D. e BROUTMAN, L. J., 1990).

Wambua et al. (WAMBUA, P. *et al.*, 2003) relatam que as propriedades mecânicas das fibras vegetais como sisal e coco são comparáveis às propriedades da fibra de vidro sendo, em alguns casos, superiores. As fibras de coco são fibras com percentuais baixos de celulose (tabela 2), entretanto, a quantidade de lignina é muito grande, cerca de duas a quatro vezes os valores existentes para a juta e o sisal, sendo indicadas para uso como material de reforço em compósitos, principalmente daqueles submetidos a moldagem a quente (JOSEPH, K. *et al.*, 1999).

**Tabela 2 – Composição de fibras oriundas de cultivo principal e subprodutos da agricultura.**

<b>Fonte de Fibra</b>	<b>Celulose (%)</b>	<b>Hemicelulose (%)</b>	<b>Lignina (%)</b>	<b>Pectina (%)</b>	<b>Cinza (%)</b>	<b>Água (%)</b>
<b>Casca de coco</b>	<b>36-43</b>	<b>0,15-0,20</b>	<b>20-45</b>	<b>3,0</b>	<b>2,7-10,2</b>	<b>10-12</b>
Algodão	82,7	5,7	NA	5,7	NA	10
Juta	64,4	12,0	11,8	0,2	NA	10
Linho	64,1	16,7	2,0	1,8	NA	10
Rami	68,6	13,1	0,6	1,9	NA	10
Sisal	65,8	12,0	9,9	0,8	NA	10
FORAGEM DE MILHO	38-40	28	7-12	NA	3,6-7,0	9
Folha de abacaxi	70-82	18	5-12	NA	0,7-0,9	10-13
Bagaço de cana	32-48	19-24	23-32	NA	1,5-5,0	8,8
Folha da bananeira	60-65	6-8	5-10	NA	4,7	10-15
Palha de trigo	33-38	26-32	17-19	NA	6-8	10
Palha de arroz	28-36	23-28	12-14	NA	14-20	6,5

**FONTE: (GASSAN, J. e BLEDZKI, A. K., 1999; REDDY et al., 2005; REDDY, N. e YANG, Y., 2009)**

**NA: Não avaliado**

### 2.4.2 Fibras de coco

O coqueiro (*Cocos nucifera*) é uma árvore pertencente à família das palmeiras (Palmae) cultivada extensivamente nos trópicos (ISHIZAKI, M. H. *et al.*, 2006). Chegou pela primeira vez, ao Brasil, pelo Estado da Bahia por volta de 1553, em navios portugueses, através de mudas provenientes da ilha de Cabo Verde (BENASSI, A. C., 2006).

Os frutos desta palmeira possuem alguns constituintes, ver Figura 2.4, que têm aproveitamentos variados indo desde o consumo de polpa (albúmen sólido), água-de-coco (albúmen líquido) até as fibras extraídas do mesocarpo.

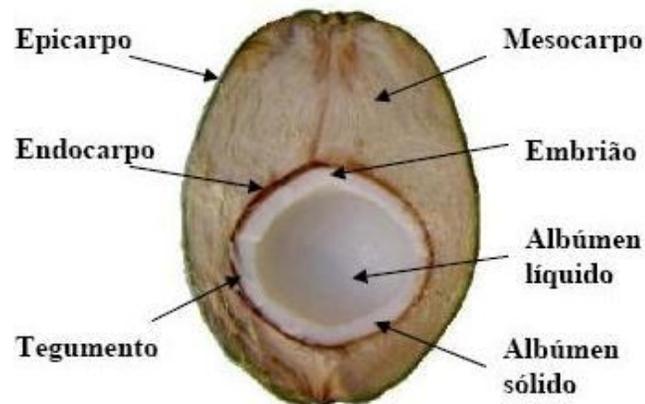
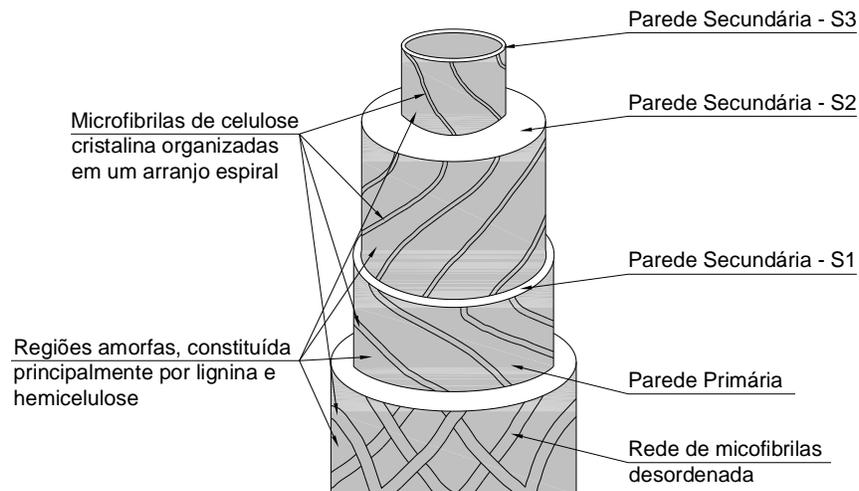


Figura 2.4– Fruto do coqueiro (BENASSI, A. C., 2006).

As fibras de Coco apresentam-se na forma fibrosa de cor castanho-avermelhada, possuindo considerável quantidade de cavidades resultando numa fibra mais resistente, altamente durável e leve (REIS, J. M. L., 2006).

As fibras vegetais podem ser consideradas como compósitos formados por fibrilas de celulose e uma matriz de lignina e hemicelulose (JAYARAMAN, K., 2003). Logo, os principais componentes das fibras são celulose, hemicelulose e lignina. A celulose é o material orgânico mais abundante do planeta, com uma produção anual de mais de 50 bilhões de toneladas (ARAÚJO, J. R. *et al.*, 2008). A hemicelulose é o nome usado para os polissacarídeos que estão associados à celulose, em paredes celulares (GABRIELII, I. *et al.*, 2000). A lignina está associada com a celulose e a hemicelulose na composição de materiais lignocelulósicos. A lignina é um material hidrofóbico com estrutura tridimensional, altamente ramificada, podendo ser classificada como um polifenol (SILVA, R. *et al.*, 2009).

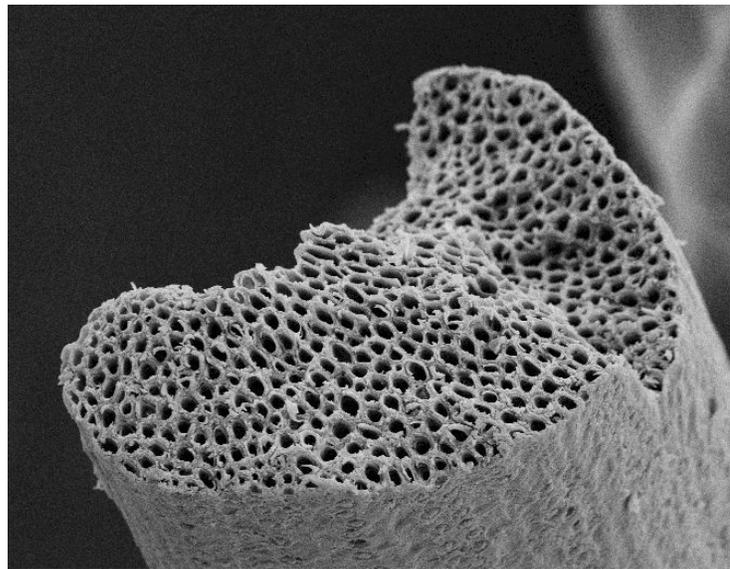
A estrutura mais comum de uma fibra vegetal está representada na Figura 2.5. Cada fibra lignocelulósica tem uma estrutura de camadas complexas; constituída por uma parede fina, que circunda uma parede secundária. A parede secundária é constituída por três camadas (S1, S2 e S3), onde a camada intermediária (S2) determina as propriedades mecânicas da fibra e consiste em uma série de microfibrilas, helicoidalmente formada por longas cadeias de celulose e organizada no sentido da fibra (SILVA, R. *et al.*, 2009).



**Figura 2.5 – Estrutura de uma fibra vegetal**

A Figura 2.6, abaixo apresentada, mostra que a superfície da fibra de coco é coberta de reentrâncias e saliências que podem facilitar a impregnação da matriz epóxi, tendo como consequência desta topografia uma melhor resistência interfacial do sistema epóxi/fibra de coco; além de demonstrar a complexidade das fibras lignocelulósicas.

As fibras de coco nacional têm comprimentos que variam de 10 a 143 mm e diâmetro de aproximadamente 0,25 mm (MONTEIRO, S. N. *et al.*, 2006). Além desses parâmetros, a grande elasticidade e sua boa resistência à tração (tabela 3) em relação a outras fibras vegetais tornam viável o uso da fibra de coco para melhorar as propriedades de compósitos.



**Figura 2.6 – Imagem obtida por MEV de um corte transversal da fibra do coco.**

**Tabela 3– Propriedades mecânicas de fibras vegetais e convencionais usadas com reforço  
(BLEDZKI, A. K. *et al.*, 2002).**

<b>Fibra</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Resist. à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>
Algodão	1,5-1,6	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6
Juta	1,3	1,5-1,8	593-773	26,5
Rami	-	3,6-3,8	400-938	61,4-128
Sisal	1,5	2,0-2,5	511-635	9,4-22,0
<b>Coco</b>	<b>1,2</b>	<b>30,0</b>	<b>175</b>	<b>4,0-6,0</b>
E-vidro	2,5	2,5	2000-3500	70,0
Carbono	1,4	1,4-1,8	4000	230,0-240,0

## 2.5 COMPRIMENTO CRÍTICO DA FIBRA UTILIZADA

A influência do comprimento da fibra e a eficiência de sua ligação com a matriz são fatores essenciais para garantir uma melhor transferência de carga da matriz para as fibras e com isso melhorar as propriedades do compósito. Fibras muito curtas resultam em uma transmissão pouco eficiente da carga externa aplicada sobre a matriz polimérica (MONTEIRO, S. N. *et al.*, 2006). Kelly e Tyson (KELLY, A. e TYSON, W. R., 1965) propuseram um comprimento denominado de crítico, ***lc***, de modo que abaixo deste comprimento não haverá transmissão de carga da matriz para fibra sem o seu rompimento. O valor do comprimento crítico é dado pela equação 1:

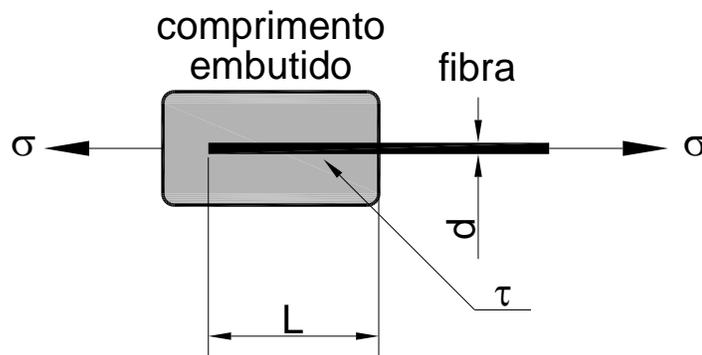
$$lc = d\sigma_f/2\tau \quad (1)$$

Onde  $d$  o diâmetro da fibra,  $\sigma_f$  limite de resistência a tração e  $\tau$  força de ligação entre fibra matriz.

O diâmetro da equação 1 foi reduzido pela metade, por uma dedução mais recente (HULL, D. e T.W., C., 1981), conforme expõe a equação 2, onde  $r$  é o raio da fibra.

$$lc = r\sigma_f/2\tau \quad (2)$$

Fibras contínuas, ou fibras longas possuem normalmente comprimento superior a 15 vezes  $lc$  (CALLISTER JR, W. D., 2008). Kelly e Tyson (KELLY, A., 1966) propuseram um ensaio denominado de “*pullout*”, para a determinação do comprimento crítico e cuja descrição gráfica está mostrada na Figura 2.7.



**Figura 2.7 – Esquema de ensaio de “pullout” proposto por Kelly e Tyson (KELLY, A. e TYSON, W. R., 1965).**

Este ensaio consistiu em embutir a fibra, até um comprimento  $L$ , em uma cápsula do material que simulava a matriz do compósito. O conjunto foi submetido à tração, com as garras da máquina prendendo tanto a ponta livre da fibra quanto a outra extremidade da cápsula. Para valores baixos de  $L$ , a fibra escorregou dentro da cápsula, estes valores estariam abaixo do comprimento crítico (MONTEIRO, S. N. e D'ALMEIDA, J. R. M., 2006).

Segundo Monteiro et al. (MONTEIRO, S. N. e D'ALMEIDA, J. R. M., 2006), o conceito de comprimento crítico de uma fibra é aparentemente mais complexo do que foi originalmente proposto por Kelly e Tyson. Existe uma gama de comprimentos que vai desde o limite,  $l_c$ , para o livre desacoplamento através do total desprendimento da fibra em relação à matriz polimérica, até o comprimento mínimo,  $L_c$ , para não desacoplar a fibra da matriz.

## 2.6 PROPRIEDADES DA INTERFACE

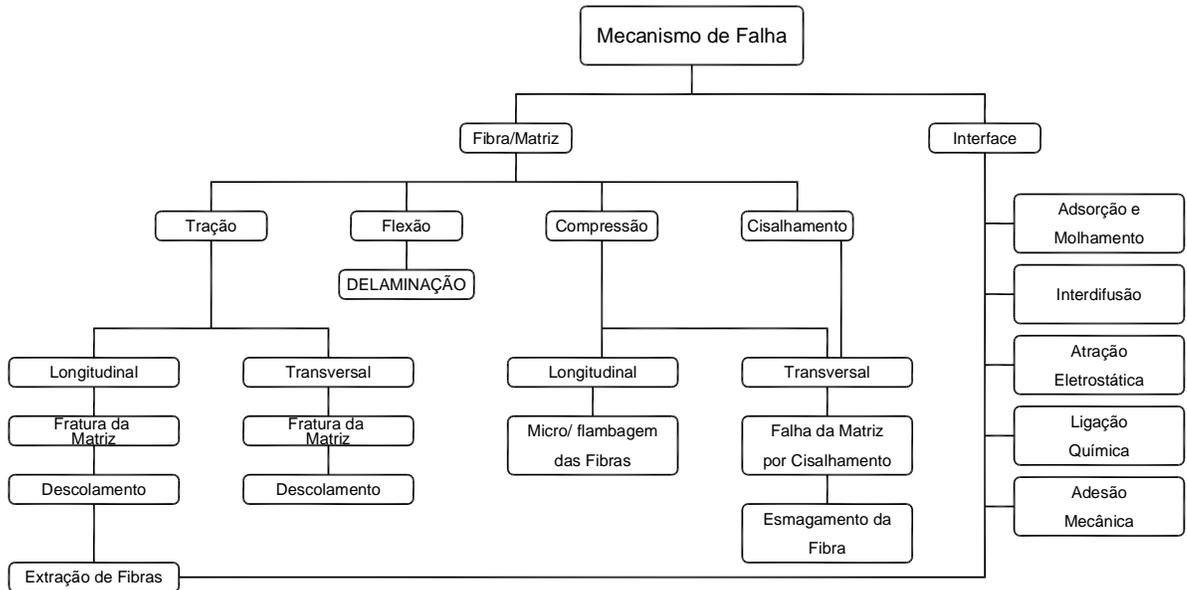
Um dos parâmetros mais importantes em materiais compósitos, com uma ou mais fases contínuas, é a interface entre o reforço e a matriz. Franco (HERRERA-FRANCO, P. J. e DRZAL, L. T., 1992) define a interface entre a fibra e a matriz não como uma descontinuidade das propriedades desses constituintes, mas como um gradiente dessas propriedades. Isto não significa que a interface seja considerada termodinamicamente uma fase, mas é usada para descrever o gradiente na região, que se trata da alteração no valor de uma quantidade por unidade de espaço (MANO, E. B., 1991).

A interface é a região onde ocorre o contato entre os componentes do compósito, sendo a transferência dos esforços aplicados à matriz feita através desta região. Possíveis acúmulos de tensões, dificuldade de adesão ou umidade excessiva também podem influenciar as propriedades mecânicas. A qualidade da interface pode ser determinada por fatores químicos e físicos que, por sua vez, estão relacionados com a área da superfície, pureza do reforço, molhabilidade da matriz e diferenças nas propriedades térmicas e mecânicas dos materiais constituintes (FERREIRA, R. S., 2000). A interação entre os componentes de um compósito da região interfacial depende do grau de contato (molhabilidade) das superfícies na interface, e das forças coesivas (adesividade) nesta região.

No entanto, se a atração entre o aderente e o adesivo (adesão) envolvidos na interface for inadequada, poderão surgir vazios nessa região, provocando fragilização do compósito pela formação de defeitos superficiais que são capazes de formar trincas, as quais podem levar a falhas sob baixos níveis de tensão e tração (FOURCHE, G., 1995).

## 2.7 MECANISMOS DE FALHAS

A interface fibra-matriz, orientação, concentração, adesão, tamanho crítico e a distribuição das fibras possuem uma influência significativa sobre a resistência do compósito reforçado com fibras de coco. Por isso, é de suma importância o estudo dos mecanismos de falhas para este tipo de material. Quando a falha ocorre na interface é denominada falha adesiva e quando ocorre na matriz ou na fibra chama-se falha coesiva. As falhas das fibras na matriz polimérica como descolamento (“*debonding*”) e extração (“*pull-out*”) podem ocorrer simultaneamente ou isoladamente (HULL, D. e T.W., C., 1981; FERREIRA, R. S., 2000). No fluxograma da Figura 2.8, poderemos verificar a relação entre os mecanismos de falhas.



2.8 – Figura Fluxograma da relação entre os mecanismos de falhas (DA SILVA, J. L. G., 1996).

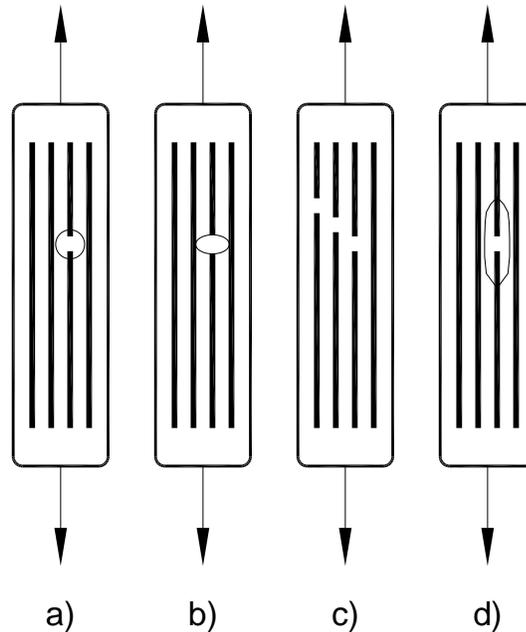
## 2.8 Mecanismo de Falhas Coesivas:

Os compósitos poliméricos, reforçados com fibras e submetidos ao carregamento, podem falhar por tipos e modos diferentes. Inclusive, o mecanismo de falha pode estar relacionado à orientação das fibras e direção de aplicação de carga. As falhas coesivas envolvem a análise da superfície de fratura, podendo determinar origem e causas destas falhas (SMITH, B. W. e GROVE, R. A., 1985; FERREIRA, R. S., 2000).

## 2.9 Fratura da Fibra:

Teoricamente, num compósito polimérico reforçado unidirecionais, considera-se que todas as fibras têm a mesma resistência, e a falha ocorre imediatamente após a fratura da fibra. Na prática, nem todas as fibras apresentam a mesma resistência. O que ocorre é a fratura de algumas poucas fibras quando em baixo carregamento, enquanto que outras fibras suportam altas cargas sem falhar simultaneamente (RABELLO, R., 2007). Uma descrição mais detalhada está descrita abaixo, e ilustrada na Figura 2.9:

- a) Iniciação de microtrincas na matriz devido à alta concentração de tensões nas extremidades da fibra quebrada;
- b) Deformação plástica na matriz; particularmente se a matriz for dúctil;
- c) Falhas de outras fibras na vizinhança da primeira fibra que quebrou;
- d) Descolamento, parcial ou total, da interface fibra-matriz, em virtude das altas tensões de cisalhamento nas extremidades da fibra, que podem provocar “*pull-out*” da fibra (exposição da fibra quebrada).



**Figura 2.9– a) Quebra da fibra, b) Iniciação de trinca na matriz, c) Falhas de fibras vizinhas, d) Descolamento na interface fibra-matriz (SOBRINHO, L. L., 2009).**

### **2.10 Fratura da Matriz:**

No descolamento das fibras da matriz (“*debonding*”), as trincas se propagam paralelamente as fibras, na matriz ou na interface, dependendo da sua resistência. O descolamento é originado pela ramificação das trincas primárias da fratura intralaminar (acontece internamente na camada) da matriz, ou seja, através de trincas secundárias. Este descolamento acontece quando a resistência da interface é inferior à das fibras e, geralmente, é seguido do mecanismo de extração de fibras (“*pull-out*”) (VALADEZ-GONZALEZ, A. *et al.*, 1999). Tanto “*pull-out*” como “*debonding*” aumentam significativamente a energia de fratura (SMITH, B. W. e GROVE, R. A., 1985; FERREIRA, R. S., 2000).

## Capítulo 3

### Descrição Experimental

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Descreveremos, neste capítulo, as técnicas e os procedimentos utilizados para desenvolver a parte experimental da pesquisa apresentada nesta dissertação. Primeiramente, serão descritos o sistema utilizado para fabricação do compósito reforçado com fibra de coco, os procedimentos e os materiais de preparação. Em seguida, serão apresentados os métodos usados para caracterizar as propriedades mecânicas e estruturais e microestruturais dos compósitos.

As caracterizações dos compósitos foram efetuadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), empregada para avaliar a interface fibra matriz, e ensaios mecânicos de tração e flexão seguindo as normas ASTM D3039 e ASTM D790, respectivamente. Estes ensaios mecânicos utilizam a normatização dos corpos de prova, conferindo confiabilidade aos resultados, uma vez que os mesmos obedecem às formas e dimensões especificadas.

#### 3.2 PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Para os ensaios mecânicos de tração e flexão foram cortado um mínimo de cinco corpos de prova. Para garantir as condições homogêneas de preparação, o compósito foi desenvolvido num molde metálico com dimensões internas de 20x15x0,3 cm e dimensões externas de 23x18x2,54 cm. Foram criadas cinco placas para cada composição sendo elas: epóxi puro, epóxi com 10, 20 e 30% de fibra de coco, para retirar ao mesmo tempo de cinco corpos de prova. As dimensões do molde são apresentadas na figura 3.1, a distribuição da

manta feita de fibra de coco disposta no molde metálico pode ser verificada na Figura 3.1, e a placa final de compósito reforçado com fibra de coco pode ser vista na Figura 3.2.

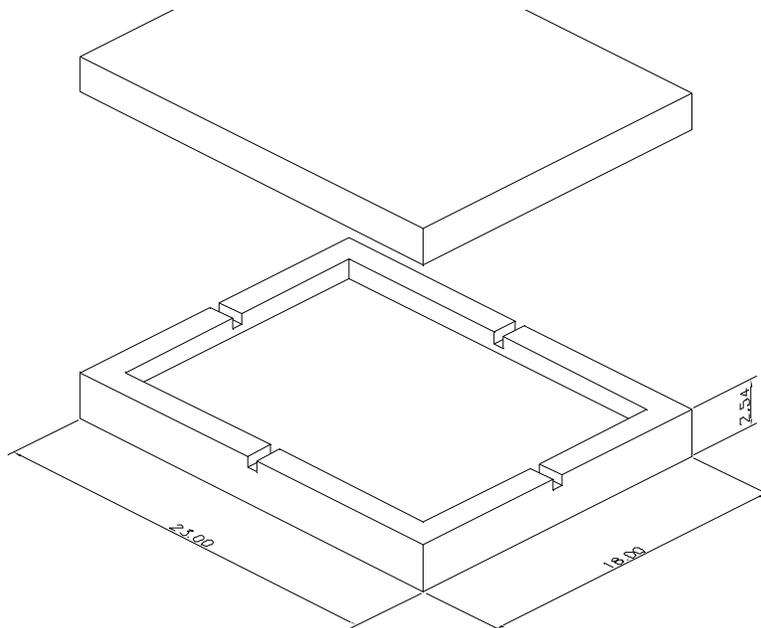


Figura 3.1 – Molde metálico de preparação do compósito



Figura 3.2 – Chapa típica de um compósito epóxi-fibra de coco com 30% de fibra.

O molde metálico foi projetado de forma que o excesso de resina fosse escoado por quatro aberturas ao alcançar a altura 0,36 cm (espessura da placa). O referido molde contém um pino extravassor, na parte inferior, projetado com 5cm de diâmetro, objetivando a retirada da placa de compósito logo após o tempo de cura. E, para suportar e distribuir de maneira uniforme a carga de oito toneladas aplicada pela prensa hidráulica fora desenvolvida uma tampa metálica de 2,54 cm de espessura.

### **3.3 PROCEDIMENTOS DE PREPARAÇÃO DO COMPÓSITO**

#### **3.3.1 Resinas Epóxi**

A resina utilizada na produção do compósito foi a **ARALDITE GY 279** fabricada pelo fabricante **HUNTSMAN INTL**. A ARALDITE GY 279 é uma resina com diluente reativo monofuncional e baixa tendência à cristalização de caráter multiuso. Tais características tornam possível sua aplicação em sistemas de injeção, pisos auto-nivelantes, argamassas, adesivos, massas espatuláveis, formulações livres de solventes etc.

Além da resina, utilizamos também o endurecedor **ARADUR 2963** fabricado pelo fabricante **HUNTSMAN INTL**. Esse produto é considerado um dos endurecedores com melhor solidez à luz por apresentar-se como um revestimento transparente, uma vez que é um produto livre de fenóis e de baixa viscosidade.

#### **3.3.2 Componente Estrutural de Reforço**

O componente de reforço utilizado foi à fibra de coco em forma de manta, disposta de maneira aleatória. A fase dispersa ou reforço tem uma função estrutural que é responsável

pela resistência do compósito. O reforço utilizado neste trabalho é caracterizado de acordo com a orientação, fração volumétrica, comprimento, diâmetro da fibra, idade da planta, a forma como esta planta foi colhida, adesão, fibra matriz, entre outros aspectos.

O processo de obtenção da fibra de coco se realiza da seguinte forma:

1. Coletam-se as cascas nos pontos de consumo;
2. As cascas são transportadas para a usina beneficiadora;
3. Lá chegando, são trituradas e dilaceradas na extrusora;
4. São deixadas durante 15 dias para compostagem em sacos ventilados;
5. As cascas são peneiradas para separar o pó das fibras;
6. As fibras são passadas no batedouro;
7. Deixar secar ao sol por 4 dias;
8. As fibras já podem ser utilizadas.

As fibras longas de coco seco foram cortadas com tesoura em tamanho aproximado 1,5 cm, prensadas de forma a obedecer ao percentual de reforço de 10, 20 e 30% em peso e espalhadas aleatoriamente num molde 20x15x0,3 cm contendo um desmoldante (vaselina) para facilitar a retirada da placa de compósito. Para a prensagem, foi utilizada uma prensa hidráulica SOMAR de 15 toneladas conforme Figura 3.3, com uma carga de oito toneladas aplicada em cada lado da manta durante 1h30m.



**Figura 3.3 – Prensa Hidráulica**

### **3.3.3 Preparação da Resina**

Na preparação da resina epóxi foi utilizada a resina **ARALDITE GY 279** e o endurecedor **ARADUR 2963** (ambos industrializados), nas proporções 150 e 50 ml respectivamente. Segundo o fabricante, esta é a proporção que fornece os melhores desempenhos mecânicos. Estes compostos foram misturados manualmente em um Becker por 20 min. Para evitar o surgimento de bolhas (vazios estruturais) foram depositados primeiro 50 ml de ARADUR 2963 e depois 150 ml de ARALDITE GY 279.

### **3.3.4 Método de preparação dos Compósitos**

O processo de preparação dos compósitos utilizados foi a moldagem por compressão. Primeiro a resina epóxi foi depositada no molde metálico, contendo o componente estrutural de reforço (manta de fibra de coco) e deixada por um tempo de pré-cura de 1,5 h. Em seguida, o molde foi fechado com uma tampa metálica, aplicado uma carga

de oito toneladas por uma prensa hidráulica durante um período de 12 h, à temperatura ambiente, para moldagem da placa de compósito. Tal processo será concluído com a desmolde da peça final.

A Figura 3.4 mostra um fluxograma do processo de fabricação dos compósitos.

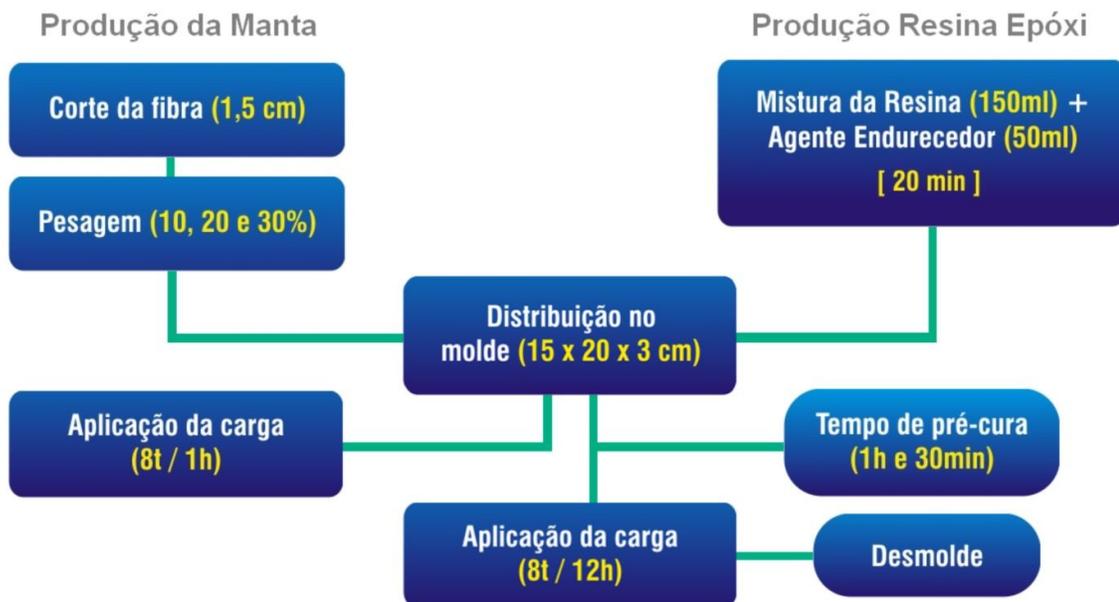


Figura 3.4 – Fluxograma de preparação do compósito

### 3.4 CARACTERIZAÇÕES DOS COMPÓSITOS

Os compósitos foram analisados segundo suas propriedades mecânicas e estruturais através de diferentes técnicas de caracterização que serão descritas a seguir.

### 3.4.1 Caracterizações morfológicas

#### 3.4.1.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi a técnica empregada para avaliar a superfície de fratura (fibra/matriz) do compósito, esta interface desempenha um importante papel nas propriedades mecânicas e físicas do compósito estudado nesse trabalho, porque é através desta interface que ocorre a transferência de carga para a resina epóxi utilizada como matriz para a fibra de coco.

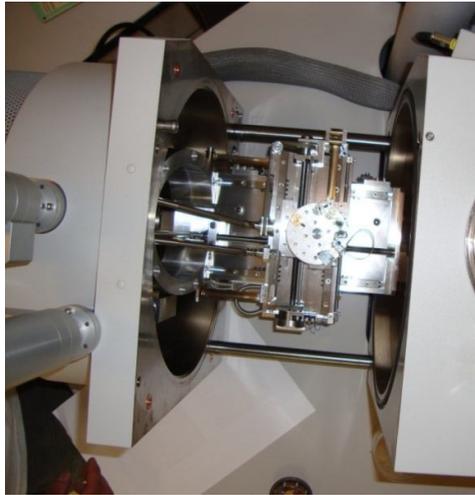
Essa técnica é hoje uma das principais ferramentas disponíveis para o estudo da estrutura fina e da morfologia de materiais sendo capaz de fornecer imagens de alta ampliação e resolução que permitem a obtenção de informações microestruturais de amostras diversas.

A amostra foi revestida por um filme condutor de prata utilizando um sistema *sputtering* da marca BAL-TEC modelo SCD 005 conforme Figura 3.5, com o objetivo de evitar o acúmulo de cargas negativas; esta camada deve ser fina e contínua, menor que 20 nm, para não alterar a topografia da superfície.



**Figura 3.5 – Sistema de sputtering**

Neste trabalho, ver Figura 3.6, o microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado foi um LEO S440, equipado com sistema de microanálise por dispersão de energia (EDS) Link ISIS L300 com detector de SiLi Pentafet, janela ultrafina ATW II, de resolução aferida de 128 eV para 5,9 keV. A análise foi executada com 20 kV de tensão de aceleração de elétrons, utilizando-se o detector de elétrons retro-espalhados.



**Figura 3.6 – Amostras da fibra fraturada no MEV**

### **3.4.2 Ensaios mecânicos**

As propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibra de coco são de grande importância para avaliar o efeito ou a influência de adição das fibras. Valores de propriedades como: resistência à tração, módulo de elasticidade e alongação servirão como base de comparação do desempenho mecânico da resina epóxi pura.

Os valores das propriedades mecânicas foram obtidos através de ensaios mecânicos padronizados dentre os quais utilizamos os ensaios sob **tração e flexão**. Estes ensaios foram realizados num equipamento denominado **Máquina Universal de Ensaios**, esta máquina é formada basicamente por:

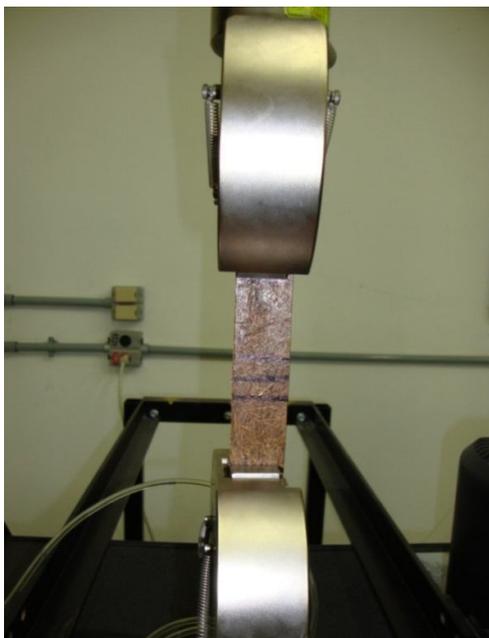
- Duas travessas, sendo uma fixa e outra móvel;
- Uma célula de carga onde é registrada a carga durante o ensaio;
- Um mecanismo de direção, que controla o sentido para cima ou para baixo e a velocidade da travessa móvel;
- Acessórios de fixação dos corpos de prova.

A máquina universal de ensaios de materiais utilizada foi o modelo de coluna dupla, série 5567, ideal para testes que exigem menos de 50 kN de força.

### **3.4.3 Ensaio de Tração:**

No ensaio de tração, ver Figura 3.7, a tensão é medida enquanto a amostra está sendo deformada a uma taxa constante, e tem, tradicionalmente, sido o teste universal mais usado dentro dos ensaios mecânicos. Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Polímeros do PEMM/COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro, conforme a norma ASTM D3039. Os corpos de prova ensaiados foram tracionados a uma velocidade de 2,0 mm/min. Sendo que, para cada compósito avaliado, foram ensaiados cinco corpos de prova que foram cortados com um disco de diamante com diâmetro de 76 mm.

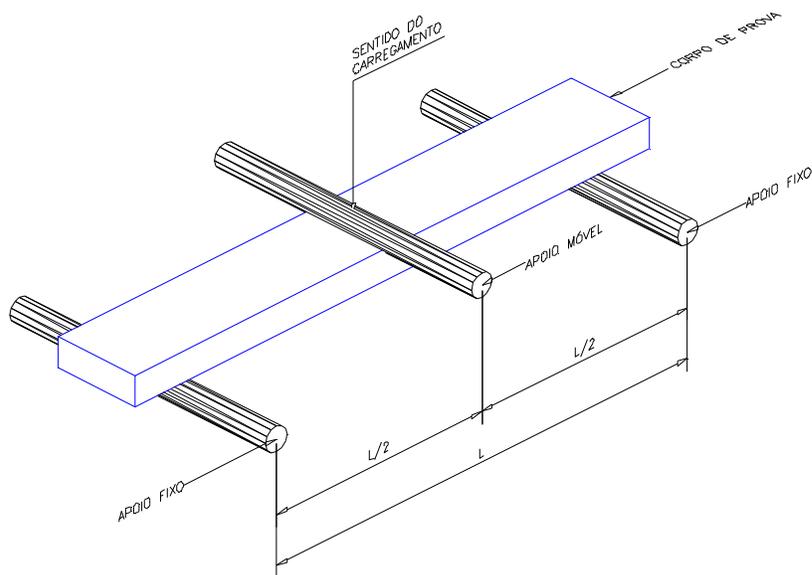
Os ensaios de tração foram realizados segundo a norma ASTM D3039, tendo sido os corpos de prova cortados com formato retangular, largura média de  $27,12 \pm 0,05$  mm, espessura  $3,00 \pm 0,05$  mm, comprimento de  $200 \pm 0,05$  mm, com temperatura de 25 °C, velocidade de 2mm/min. e com célula de carga de 5 kN.



**Figura 3.7 – Realização do ensaio de tração.**

#### **3.4.4 Ensaio de Flexão em três pontos:**

O ensaio de flexão, foi utilizado o método de carregamento composto por um sistema de três pontos. Os corpos de prova forma cortados em formato retangular, conforme norma ASTM D790. Cada corpo de prova foi colocado em dois pontos fixos de superfície cilíndrica para evitar falhas devido às concentrações de tensões, e o carregamento foi realizado por um terceiro apoio móvel posicionado a uma distância média entre os dois apoios fixos, conforme Figura 3.8.



**Figura 3.8 – Ilustra a realização do ensaio de flexão**

Os ensaios de flexão foram realizados no Laboratório de Polímeros do PEMM/COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro conforme a norma ASTM D790. Neste ensaio, os corpos de prova foram flexionados a uma velocidade de 2,0 mm/min e, conseqüentemente, defletidos até a ocorrência da ruptura na superfície oposta ao carregamento. Para cada compósito avaliado, foram ensaiados cinco corpos-de-prova, que foram cortados com um disco de diamante com diâmetro de 76 mm.

## Capítulo 4

### Resultado das Discussões

O objetivo deste capítulo é apresentar e discutir os resultados obtidos na pesquisa que foi desenvolvida, por um período de dois anos, no curso de mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais. Todos os ensaios mecânicos foram realizados conforme as normas **ASTM - Sociedade Americana para Ensaios e Materiais**, nas modalidades ASTM D 3039 e ASTM D 790, para os ensaios de tração e flexão, respectivamente.

Para obter resultados estatisticamente significativos, para os ensaios mecânicos de tração e flexão, foram confeccionadas vinte placas de compósito, sendo cinco placas para cada teor de reforço com 0, 10, 20 e 30% de fibra. Cada placa pôde fornecer cinco corpos de prova, totalizando cem corpos de prova. Após uma análise visual, foram selecionados os melhores quarenta corpos de prova para os ensaios mecânicos.

#### 4.1 ENSAIOS MECÂNICOS

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos dependem de fatores como a temperatura, umidade, quantidade e orientação de fibra utilizada, estrutura do material, condições de ensaios, preparação da amostra, diâmetro médio, comprimento crítico das fibras, microestruturas das fibras. Em resumo, histórico de preparação da amostra, a geometria do corpo de prova e a interação fibra matriz são aspectos fundamentais para os ensaios mecânicos.

## 4.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Nos ensaios de tração foram utilizadas garras de acionamento manual, que possuíam serrilhas na superfície de contato com os corpos de prova, impedindo desta forma o deslizamento durante os ensaios. Todos os dados foram obtidos através do software Bluehill® utilizado na máquina universal, além da biblioteca de métodos de teste ASTM também utilizada.

Inicialmente apresentaremos na Figuras 4. 1 os resultados da resina epóxi pura, onde dois corpos de prova são rompidos antes de atingirem o limite de 10 MPa, estes foram submetidos a um tratamento de pós cura, (tratamento térmico com temperatura de 160 °C). para o limite de resistência à tração. O corpo de prova que obteve melhor desempenho, linha vermelha, obteve um limite de resistência a tração de 11,5 MPa. Estes resultados serão comparados com os compósitos reforçados com fibra de coco em vários teores.

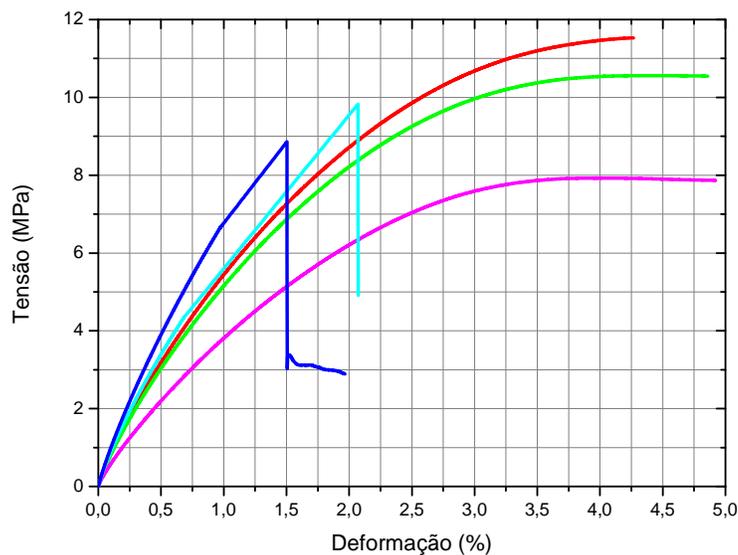
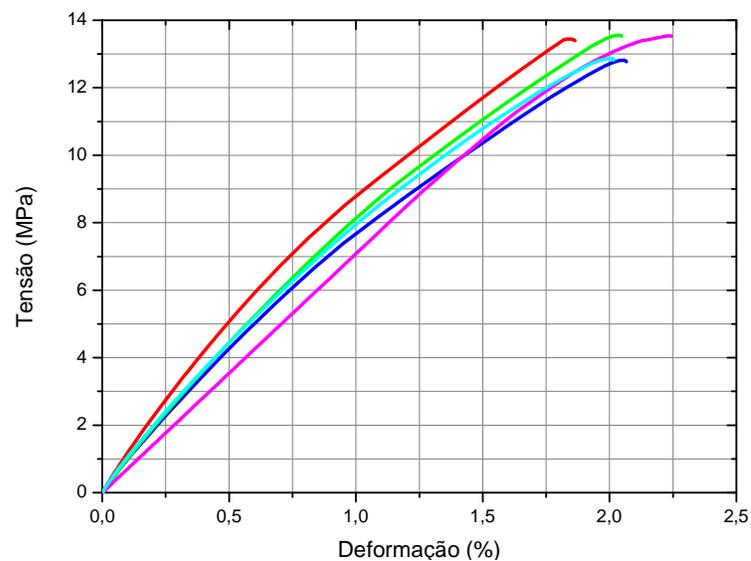


Figura 4.1– Ensaios de Tração versus Deformação da Resina Epóxi pura

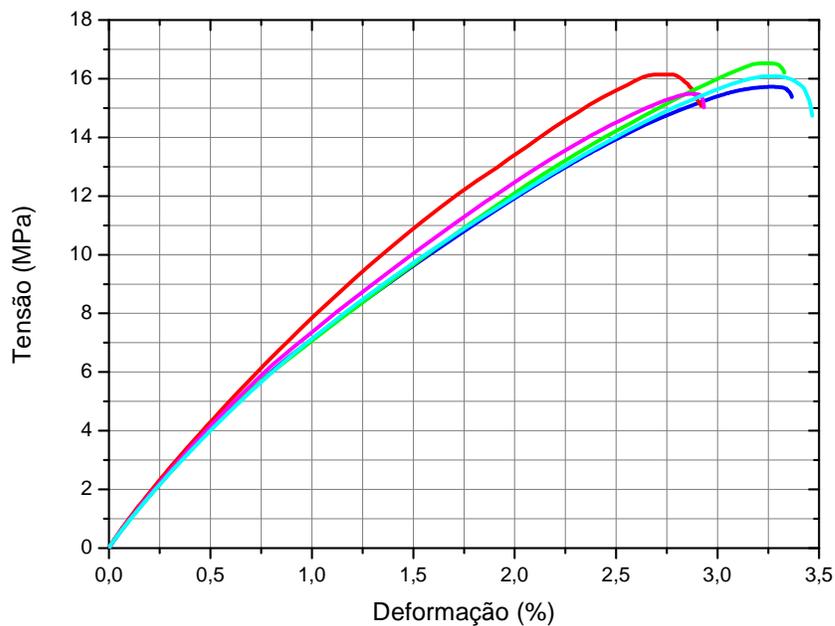
Nos gráficos das Figuras 4. 2 são apresentados os resultados de cinco corpos de prova com 10% de reforço de fibra de coco na matriz polimérica de base epóxi. O corpo de prova

que obteve o melhor desempenho para o limite de resistência à tração foi de 13,6 MPa e maior deformação 2,2 mm, sendo o menor valor encontrado para resistência à tração de 12,8 MPa, obtendo a média de 13,2 MPa. Depois de alcançado o limite de resistência a tração, foi observado que não há deformação significativa, mas sim o rompimento total do corpo de prova, mostrando que os corpos de prova possuem baixa elongação na ruptura, devido ao comportamento frágil característico de compósitos com matriz termofixas.



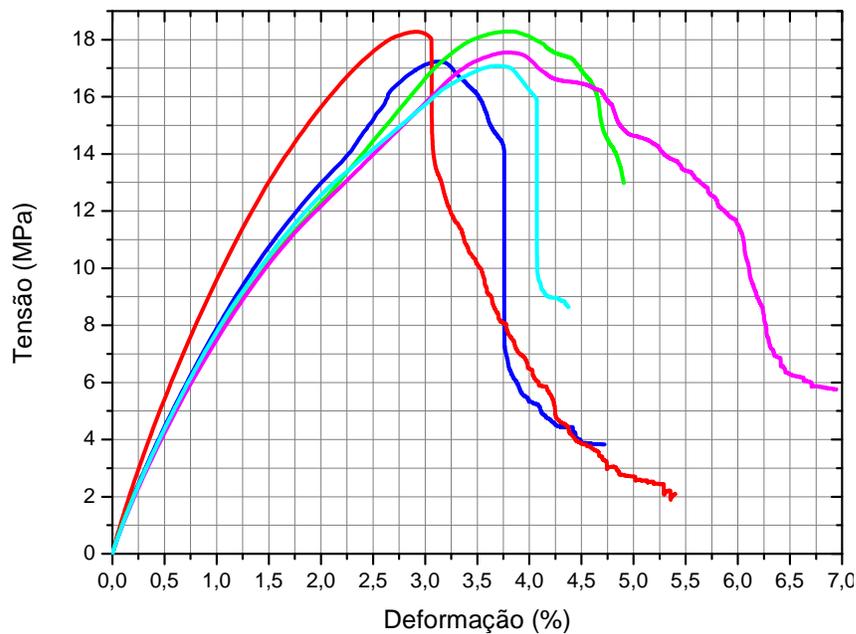
**Figura 4.2 – Ensaio de Tração versus Deformação da Resina Epóxi reforçada com 10% de fibra de coco**

Nas Figuras 4.3 são mostrados os resultados de cinco corpos de prova com 20% de fibra. O corpo de prova que obteve o melhor desempenho para o limite de resistência à tração foi de 16,5 MPa e maior deformação 3,5 mm, sendo o menor valor encontrado para resistência à tração de 16,08 MPa, cuja média entre os corpos encontrada foi de 16,00 MPa. Em média 35% de deformação máxima foram atingidos pelos compósitos reforçados com 20% comparados aos de 10%. Os resultados mostram também que os corpos de provas reforçados com 20% também possuem baixa elongação na ruptura, característica frágil do corpo de prova.



**Figura 4.3 – Ensaio de Tração versus Deformação da Resina Epóxi reforçada com 20% de fibra de coco**

Apresentando os resultados dos corpos de prova com maior teor de reforço (30%), observamos nas Figuras 4.4 que as linhas verde e vermelha apresentam melhor desempenho para o limite de resistência à tração, respectivamente 18,3 MPa e 18,3 MPa. Este resultado é o melhor desempenho entre os corpos de prova, mostra que o aumento no teor de fibra influencia diretamente a resistência à tração, graças a melhor distribuição das cargas. Com a finalidade de observar os mecanismos de falhas, configuramos a parada dos ensaios, após o rompimento total do corpo de prova, ocasião em que observamos que mesmo depois de alcançado o limite de resistência à tração, há uma significativa deformação, causando o rompimento e/ou arrancamento das fibras da matriz polimérica.

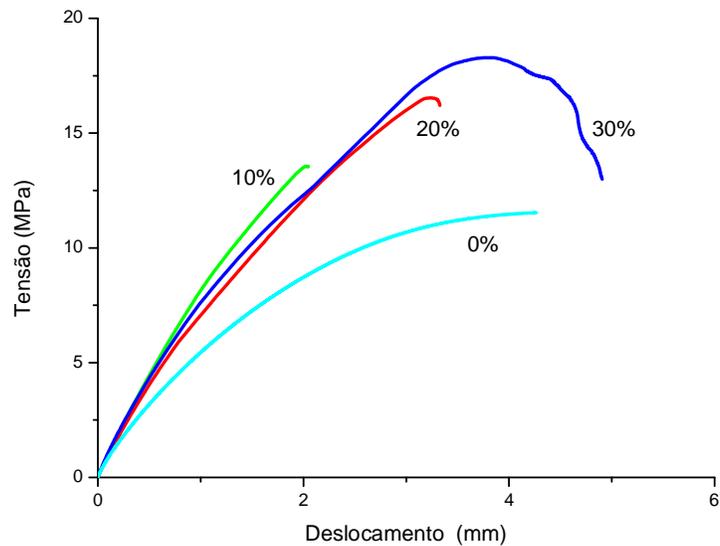


**Figura 4.4 – Ensaio de Tração VS Deformação da Resina Epóxi reforçada com 30% de fibra de coco**

Como podem ser observados na Tabela 4.0 e figura 4.5, para os valores dos ensaios mecânicos de tração, a medida que há um aumento no teor de reforço há também um aumento no valor limite de resistência à tração, indicando que as tensões são mais bem distribuídas, e o compósito platicifica-se pelo fato das fibras serem mais rígidas.

**Tabela 4.0 Resumo dos resultados dos ensaios para o limite de resistência a tração**

COMPÓSITO	CDP1	CDP2	CDP3	CDP4	CDP5	MÉDIA	DESVIO
<b>0%</b>	11,53	10,56	7,93	9,83	8,86	9,7	1,4
<b>10%</b>	13,44	13,56	13,54	12,87	12,82	13,2	0,4
<b>20%</b>	16,14	16,53	15,48	16,08	15,72	16,0	0,4
<b>30%</b>	18,27	17,23	18,29	17,55	17,08	17,7	0,6



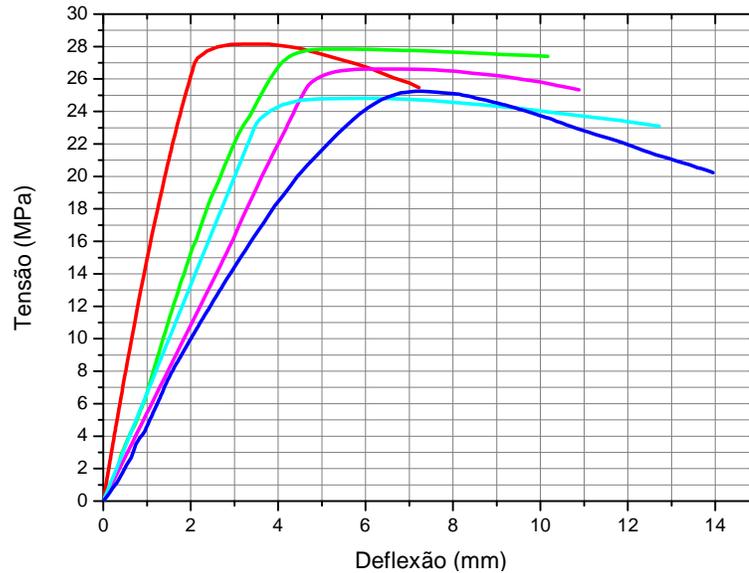
**Figura 4.5 – Resultados suportada pelas amostras 0, 10, 20 e 30% de fibra de coco**

### 4.3 ENSAIOS DE FLEXÃO

Os ensaios de flexão foram realizados segundo a norma ASTM D790, já mencionada anteriormente, com Método I – Procedimento B, temperatura de 25 °C e velocidade de 2mm/min, com espaçamento entre barras de 50mm, utilizando o método de três apoios e célula de carga de 5 kN. O teste foi interrompido quando ocorreu a ruptura na superfície oposta ao carregamento.

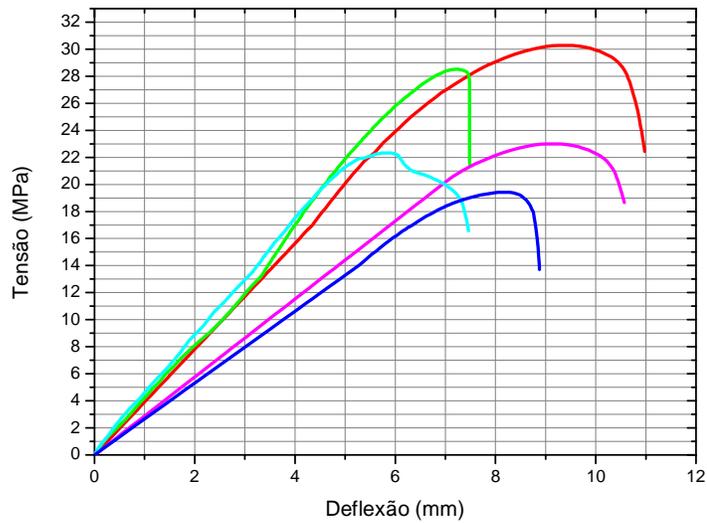
É importante ressaltar que normalmente o valor de resistência à flexão é maior do que a resistência à tração, pois o cálculo da resistência à flexão é baseado no comportamento linear do material. A curva tensão deformação no ensaio de flexão apresenta um comportamento de não-linearidade. Em geral, a resistência à flexão de um material é cerca de 20 a 50% maior do que a resistência à tração (FREIRE, E. *et al.*, 1994).

Na Figura 4.6 são mostrados os resultados de flexão para os cinco corpos da resina epóxi pura. O corpo de prova que obteve o melhor desempenho para a tensão de flexão na ruptura ( $\sigma$ ) foi de 28,14 MPa; já o pior desempenho foi de 25,25 Mpa.



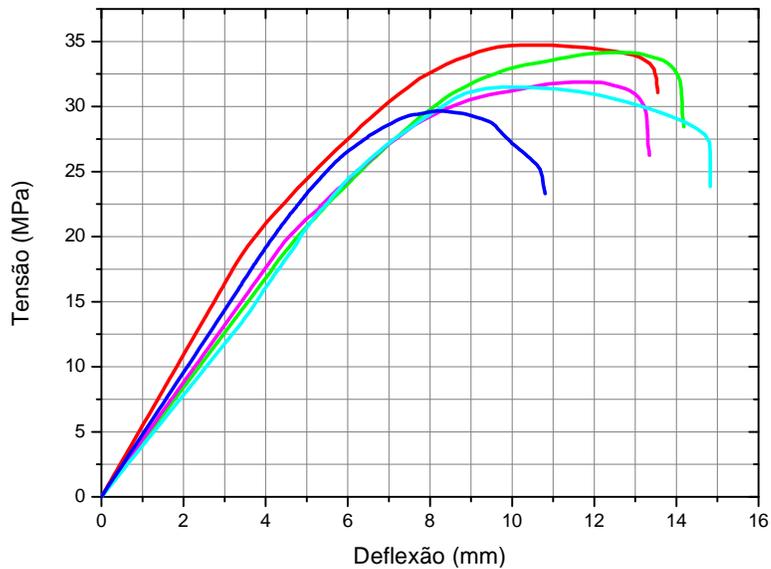
**Figura 4.6 – Curvas Tensão versus deformação obtidas em flexão para a resina pura.**

Na Figura 4.7 são mostrados os resultados de flexão para os cinco corpos de prova com 10% de reforço. O corpo de prova que obteve o melhor desempenho para a tensão de flexão na ruptura ( $\sigma$ ) foi de 30,3 MPa e maior deformação 11,00 mm, sendo o menor valor encontrado para a tensão de flexão na ruptura de 23 MPa. A média entre os corpos de prova encontrada foi de 24,7MPa.



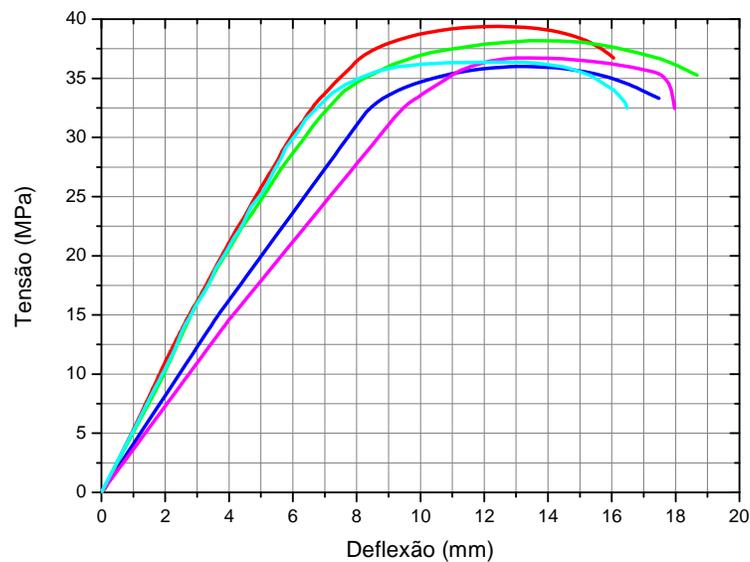
**Figura 4.7 – Curvas Tensão versus deformação obtida em flexão para a resina pura com 10% de reforço**

Na Figura 4.8 são mostrados os resultados de flexão para os cinco corpos de prova com 20% de reforço. O corpo de prova que obteve o melhor desempenho para a tensão de flexão na ruptura ( $\sigma$ ) foi de 34,7 MPa e maior deformação 14,8 mm, sendo o menor valor encontrado para a tensão de flexão na ruptura de 29,7 MPa. A média encontrada entre os corpos foi de 32,4.



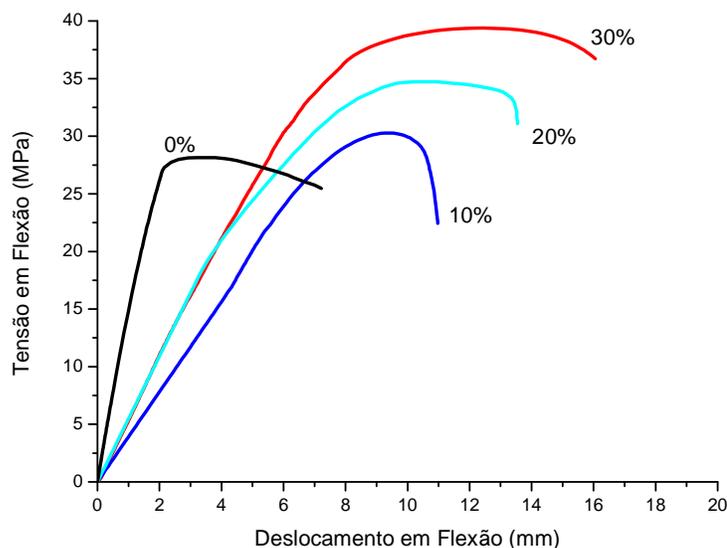
**Figura 4.8– Curvas Tensão versus deformação obtida em flexão para a resina pura com 20% de reforço**

Nas Figuras 4.9 observamos os resultados de flexão para os cinco corpos de prova com 30% de reforço. O melhor desempenho para a tensão de flexão na ruptura ( $\sigma$ ) foi de 39,4 MPa e maior deformação 18,7 mm, sendo o menor valor encontrado para a tensão de flexão na ruptura de 36,71 MPa. A média encontrada entre os corpos foi de 37,3 MPa.



**Figura 4.9 - Curvas Tensão versus deformação obtida em flexão para a resina pura com 30% de reforço.**

Os resultados dos ensaios mecânicos de flexão indicam que a quantidade de fibras favorece a maior resistência à flexão. O compósito com 30% de reforço foi o melhor resultado apresentado, já que comparado ao compósito com 20% de fibra houve um aumento de 15,22%. Já em relação aos de 10% em fibras, o aumento foi na ordem de 51%, mostrado Figura 4.10 e Tabela 5.0.



**Figura 4.10 – Melhores resultados para os ensaios de Flexão com teor de reforço de 0, 10, 20 e 30% de fibra de coco**

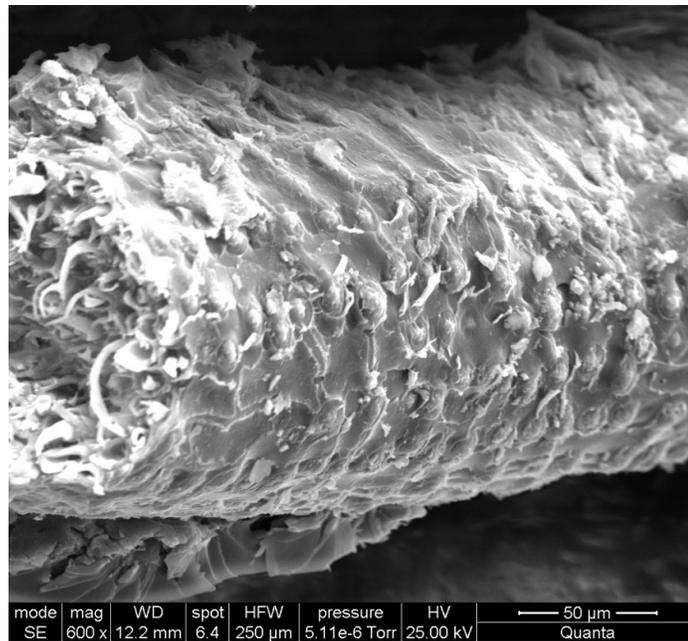
**Tabela 5.0- Resumo dos resultados dos ensaios para o limite de resistência a flexão**

COMPÓSITO	CDP1	CDP2	CDP3	CDP4	CDP5	MÉDIA	DESVIO
0%	28,14	27,85	26,62	24,81	25,25	26,53	1,49
10%	30,28	28,52	23,00	22,33	19,43	24,71	4,53
20%	34,72	34,16	31,89	31,50	29,66	32,39	2,06
30%	39,38	38,18	36,71	36,35	36,00	37,33	1,42

#### 4.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

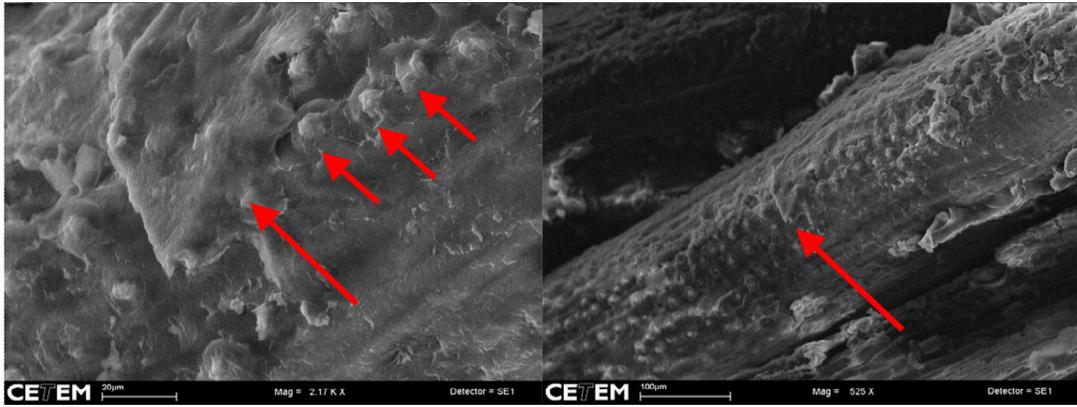
A importância da microscopia eletrônica de varredura para caracterização da fibra vegetal é fundamental para o nosso estudo, pois com o conhecimento da composição química e estrutural desta fibra poderemos analisar através das imagens obtidas o que ocorre na interface fibra matriz.

A Figura 4.11, abaixo apresentada, mostra que a superfície da fibra de coco é coberta de reentrâncias e saliências que podem facilitar a impregnação da matriz epóxi, tendo como consequência desta topografia uma melhor resistência interfacial do sistema epóxi/fibra de coco; além de demonstrar a complexidade das fibras lignocelulósicas.



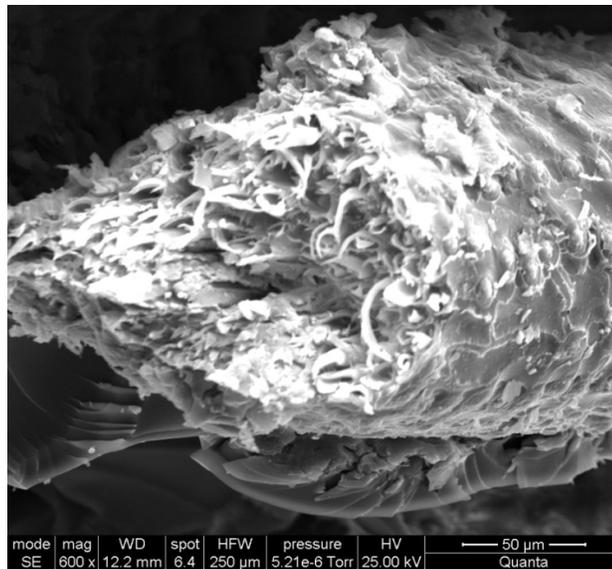
**Figura 4.11 – Corte Longitudinal da fibra de coco**

Na Figura 4.12, observa-se uma camada de resina epóxi, parte mais clara aderida à superfície da fibra, indicando que a resistência da adesão interfacial é bastante alta. Percebe-se também, uma fileira de saliências que podem ser consideradas pontos de concentração de tensão que facilitam a separação das fibrilas, que constituem o feixe que formam a fibra lignocelulósica (MONTEIRO, S. N. *et al.*, 2006).



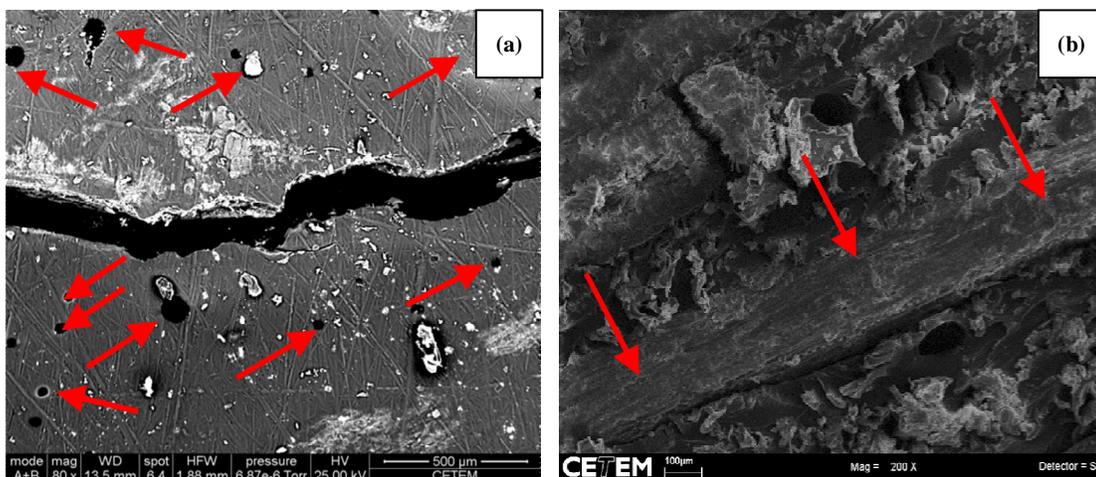
**Figura 4.12 – Detalhamento da Fibra**

A Figura 4.13 mostra o aspecto de uma fibra de coco fraturada após ensaio mecânico, observamos que a extremidade da fibra é formada por inúmeras fibrilas que são rompidas individualmente para a separação final da fibra.



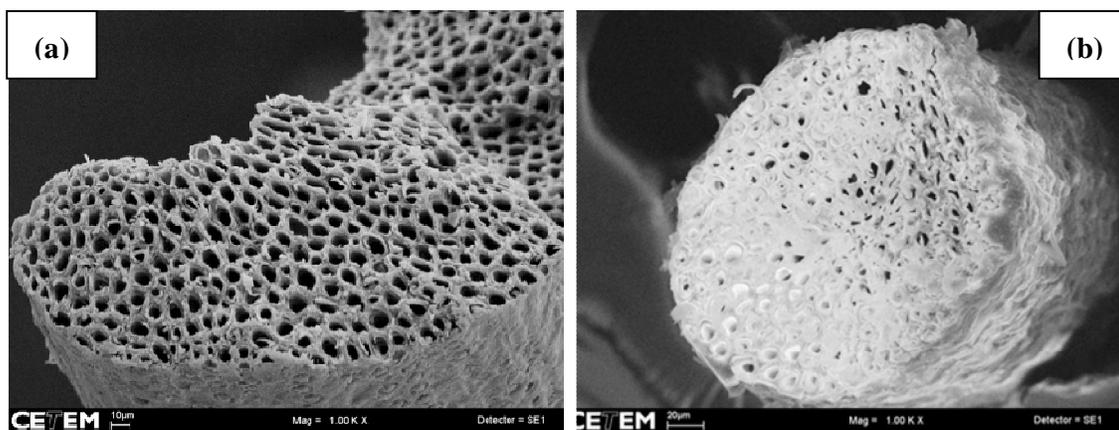
**Figura 4.13 – Região da fratura da fibra de coco**

A fibra de coco é higroscópica, ou seja, possui facilidade de absorção de água. Esta característica age como um agente de separação na interface fibra matriz, causando pontos de vazios na superfície do compósito, que nitidamente são a causa de dois importantes mecanismos de falhas em compósito: o trincamento da matriz e o descolamento (“*debonding*”) da fibra, que estão mostrados na Figuras 4.14(a) e (b), respectivamente.



**Figura 4.14– Imagem de MEV de: (a) trincamento da matriz e (b) região onde ocorreu o desacoplamento**

A Figura 4.15 mostra cortes transversais de duas fibras de coco. A primeira imagem (Figura 4.15(a)) mostra a fibra sem a impregnação da resina epóxi. E na segunda imagem (Figura 4.15(b)), que foi utilizada no compósito reforçado, mostram que os poros transversais são parcialmente impregnados pela resina, comprovando que existe uma boa interação da fibra com a matriz, tanto no sentido longitudinal (vistos na Figura 4.12), como no sentido transversal.



**Figura 4.15 – Imagem de MEV da: (a) fibra de coco in natura e (b) região onde ocorreu a impregnação da resina epóxi**

Nesta pesquisa, os compósitos reforçados com fibras de coco com 30% de reforço obtiveram melhor desempenho para o limite de resistência à tração de 18,29 MPa, bem como 39,38 MPa nos ensaios de flexão. Os resultados foram fundamentados em estudos recentes (HARISH, S. *et al.*, 2009), e demonstram que o aumento no teor com limite superior de 30% no reforço ajuda a melhorar os valores de resistência a tração e flexão, graças à melhor distribuição dos esforços, indicando maior interação da fibra com as cadeias poliméricas. Todos estes valores são superiores aos da resina epóxi sem reforço 11,53 MPa e 28,14 MPa para os ensaios de tração e flexão, respectivamente; mas essa superioridade é inferior quando comparamos com as propriedades de fibras comerciais de vidro ou carbono.

Processo de fratura do compósito apresentou-se bastante complexo, envolvendo os seguintes mecanismos de falhas ruptura da fibra, trincamento da matriz e descolamento da fibra, contudo a estrutura superficial da fibra de coco com reentrâncias e saliências ajuda para que ocorra uma boa adesão interfacial, resultando em compósitos com propriedades mecânicas satisfatórias.

O comprimento utilizado para a fibra foi de 1,5 cm, fundamentado em estudos recentes (ISHIZAKI, M. H. *et al.*, 2006), comprimento este superior ao crítico que causa alguns mecanismos de falha, razão pela qual facilitou na preparação do compósito.

Estes resultados comprovam que existe a possibilidade de desenvolvimento de um compósito de base epóxi/ fibra de coco com boa resistência mecânica.

## Bibliografia

- Agarwal, B. D. e L. J. Broutman. Analysis and performance of fiber composites. New York: Wiley-Interscience. 1990
- Almeida, C. N. Propriedades mecânicas e térmicas do sistema epóxi DGEBA/etilenodiamina modificado com nanoplateformas de silsesquioxano com grupos ésteres. Departamento de Física e Química, Universidade Estadual Paulista, 2005. 81 p.
- Araújo, J. R., W. R. Waldman, *et al.* Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect. Polymer Degradation and Stability, v.93, n.10, p.1770-1775. 2008.
- Azuma, J., T. Nomura, *et al.* Lignin carbohydrate complexes containing phenolic-acids isolated from the culms of bamboo. Agricultural and Biological Chemistry, v.49, n.9, p.2661-2669. 1985.
- Benassi, A. C. Caracterizações biométrica, química e sensorial de frutos de coqueiro variedade anã verde. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Euniversidade Estadual Paulista, 2006. 114 p.
- Bledzki, A. K., V. E. Sperber, *et al.* Natural and Woods fibre reinforcement in polymers. UK: Rapara Review Reports, v.13. 2002. 144 p.
- Callister Jr, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Rio de Janeiro: LTC. 2008. 705 p.
- Canevarolo Jr., S. V. Ciência dos polímeros. São Paulo: Artliber. 2006. 280 p.
- Chand, N. e S. A. R. Hashmi. Mechanical properties of sisal fibre at elevated temperatures. Journal of Materials Science, v. 28 n.24, January, p.6724-6728. 1993.
- Da Silva, J. L. G. Estudo dos mecanismos de molhabilidade do compósito fibra sisal/matriz polimérica. Instituto Tecnológico da Aeronáutica 1996.
- Ferreira, R. S. Modificação da superfície de fibras de carbono por processo de descarga corona e estudo das características de adesão. Faculdade de Engenharia Química Universidade Estadual de Campinas, 2000. 164 p.
- Fonseca, V. M., V. J. F. Jr., *et al.* Evaluation of the mechanical properties of sisal-polyester composites as a function of the polyester matrix formulation. Journal of Applied Polymer Science, v.94, n.3, p.1209-1217. 2004.
- Fourche, G. An overview of the basic aspects of polymer adhesion. I: Fundamentals. Hoboken, NJ, ETATS-UNIS: Wiley Subscription Services, v.35. 1995
- Freire, E., E. E. C. Monteiro, *et al.* Propriedades Mecânicas de Compósitos de Polipropileno com Fibra de Vidro. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.4, n.3, p.25-32. 1994.
- Gabrielii, I., P. Gatenholm, *et al.* Separation, characterization and hydrogel-formation of

- hemicellulose from aspen wood. Carbohydrate Polymers, v.43, n.4, p.367-374. 2000.
- Gassan, J. e A. K. Bledzki. Possibilities for improving the mechanical properties of jute/epoxy composites by alkali treatment of fibres. Composites Science and Technology, v.59, n.9, p.1303-1309. 1999.
- Harish, S., D. P. Michael, *et al.* Mechanical property evaluation of natural fiber coir composite. Materials Characterization, v.60, n.1, p.44-49. 2009.
- Herrera-Franco, P. J. e L. T. Drzal. Comparison of methods for the measurement of fibre/matrix adhesion in composites. Oxford, ROYAUME-UNI: Butterworth-Heinemann, v.23. 1992
- Holbery, J. e D. Houston. Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications. JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, v.58, n.11, p.80-86. 2006.
- Hull, D. e C. T.W. An Introduction to Composite Materials. Cambridge: Cambridge Univers. Press. 1981
- Ishizaki, M. H., L. L. Y. Visconte, *et al.* Caracterização mecânica e morfológica de compósitos de polipropileno e fibras de coco verde: influência do teor de fibra e das condições de mistura. Polímeros, v.16, p.182-186. 2006.
- Jayaraman, K. Manufacturing sisal-polypropylene composites with minimum fibre degradation. Composites Science and Technology, v.63, n.3-4, 2003/3//, p.367-374. 2003.
- Joseph, K., R. D. Tole Do Filho, *et al.* Compósitos poliméricos reforçados com fibras de sisal. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3 n.3, p.367-379. 1999.
- Kelly, A. Strong Solids. Londres: University Press. 1966
- Kelly, A. e W. R. Tyson. High Strength Materials. Nova York: Wiley. 1965
- Lewin, M. e I. S. Goldstein. Wood structure and composition. USA: Marcel Dekker Inc. 1991
- Mano, E. B. Polímeros como materiais de engenharia. São Paulo: Edgard Blücher. 1991
- Monteiro, S. N. e J. R. M. D'almeida. Ensaio de Pullout em fibras lignocelulósicas: uma metodologia de análise. Revista Matéria, v.11, n.3, p.189-196. 2006.
- Monteiro, S. N., L. A. H. Terrones, *et al.* Efeito da Interface Fibra/Matriz Sobre a Resistência de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Coco. Revista Matéria, v.11, n.4, p.395-402. 2006.
- \_\_\_\_\_. Mechanical performance of coir fiber/polyester composites. Polymer Testing, v.27, n.5, p.591-595. 2008.
- Mukherjee, P. S. e K. G. Satyanarayana. Structure and properties of some vegetable fibres. Journal of Materials Science, v.19, n.12, p.3925-3934. 1984.

- Neto, F. L. e L. C. Paradini. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. São Paulo: Editora Edgard Blücher. 2006. 313 p.
- Paiva Jr, C. Z., L. H. De Carvalho, *et al.* Analysis of the tensile strength of polyester/hybrid ramie-cotton fabric composites. Polymer Testing, v.23, n.2, p.131-135. 2004.
- Rabello, R. Aditivação de polímeros. São Paulo: Artliber. 2007. 242 p.
- Rangel, S. A. Nanocompósitos baseados no sistema epoxídico DGEBA/DETA modificado com uma resina epoxídica de silsesquioxano. Departamento de Física e Química, Universidade Estadual Paulista, 2006. 70 p.
- Reddy, Narendra, *et al.* Properties and potential applications of natural cellulose fibers from cornhusks. Cambridge, ROYAUME-UNI: Royal Society of Chemistry, v.7. 2005. 6 p.
- Reddy, N. e Y. Yang. Properties and potential applications of natural cellulose fibers from the bark of cotton stalks. Bioresource Technology, v.100, n.14, p.3563-3569. 2009.
- Reis, J. M. L. Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete. Construction and Building Materials, v.20, n.9, p.673-678. 2006.
- Rubinsten, M. e R. H. Colby. Polymer physics. New York: Oxford University Press. 2003. 440 p.
- Satyanarayana, K., C. K. S. Pillai, *et al.* Structure property studies of fibres from various parts of the coconut tree. Journal of Materials Science, v.17, n.8, Ago, p.2453-62. 1982.
- Satyanarayana, K. G., G. G. C. Arizaga, *et al.* Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers--An overview. Progress in Polymer Science, v.34, n.9, p.982-1021. 2009.
- Silva, R., S. K. Haraguchi, *et al.* Application of lignocellulosic fibers in polymer chemistry and in composites. Quimica Nova, v.32, n.3, p.661-671. 2009.
- Smith, B. W. e R. A. Grove. Failure analysis of continuous fiber reinforced composites. USA: American Society for Metal, v.11. 1985
- Sobrinho, L. L. Desenvolvimento de tubos compósitos para possíveis aplicações como risers. Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009. 150 p.
- Valadez-Gonzalez, A., J. M. Cervantes-Uc, *et al.* Effect of fiber surface treatment on the fiber-matrix bond strength of natural fiber reinforced composites. Composites Part B: Engineering, v.30, n.3, p.309-320. 1999.
- Wambua, P., J. Ivens, *et al.* Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? Composites Science and Technology, v.63, n.9, p.1259-1264. 2003.