



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGEM**

**SISTANLEY JONES LIMA BISPO**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE  
BIOCOMPÓSITOS DE POLIPROPILENO REFORÇADOS  
COM FIBRAS NATURAIS**

Natal  
2011

**SISTANLEY JONES LIMA BISPO**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE  
BIOCOMPÓSITOS DE POLIPROPILENO REFORÇADOS  
COM FIBRAS NATURAIS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire Júnior

Co-orientador (a): Prof. Dra. Eve Maria Freire de Aquino

Natal  
2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGEM**

**TERMO DE APROVAÇÃO**

**SISTANLEY JONES LIMA BISPO**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE BIOCOMPÓSITOS  
DE POLIPROPILENO REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito parcial para a obtenção do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA,**

tendo sido aprovada em sua forma final.

**Banca Examinadora**

---

**Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire Júnior – Orientador**

---

**Prof. Dra. Eve Maria Freire de Aquino - Co-orientador (a)**

---

**Prof. Dr. Luiz Claudio Ferreira da Silva - Membro Interno**

---

**Prof. Dr. Marco Antonio dos Santos - Membro Externo**

**Natal, Junho de 2011.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela energia de continuar em frente.

Aos meus pais, que entendem que o caminho é árduo e não me deixaram desanimar.

Ao Dr. Raimundo Silvério Freire Júnior, professor orientador desta pesquisa, pela força, disponibilidade, incentivo e socialização do seu conhecimento.

À Dra. Eve Maria Freire de Aquino, professora, co-orientadora, pela oportunidade de poder traçar novos conhecimentos.

Aos amigos, irmãos e companheiros, pela compreensão de poder estar ausente em alguns momentos.

Ao amigo e colega de profissão, Nelson Rios Daltro, pelo incentivo, e crença de que as coisas podem acontecer.

Aos professores, Rui Santana e Mirtânia Antunes Leão, por acreditar que este seria capaz, motivando em todo momento, sem nunca deixar para trás palavras de companheirismo e conforto.

À companheira, por estar sempre ao lado nas horas difíceis.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) / UFRN, por fazer acontecer o curso.

À Dra. Núbia Moura Ribeiro da Coordenação de Pós-Graduação e Pesquisa do IFBA-BA pela utilização dos laboratórios e ajuda no acesso ao processo.

À engenheira Zora, pela utilização do laboratório de ensaio do SENAI/CIMATEC.

Em fim, a todos que direta e indiretamente ajudaram na realização desta dissertação, e torceram incondicionalmente.

***“O conhecimento é irresistível”***

***Autor desconhecido.***

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VI
LISTA DE TABELAS .....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGRAS .....	X
RESUMO .....	XI
ABSTRACT .....	XII
INTRODUÇÃO .....	1
JUSTIFICATIVA .....	4
OBJETIVOS .....	5
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
1.1 FIBRAS .....	6
1.2 POLÍMEROS .....	17
1.3 COMPÓSITOS .....	28
2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	33
2.1 MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS .....	33
2.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS BIOCOMPÓSITOS .....	34
2.3 ENSAIOS REALIZADOS .....	43
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	49
3.1 ANÁLISES DOS ÍNDICE DE FLUIDEZ (IF) .....	49
3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO DO POLIPROPILENO REPROCESSADO .....	51
3.3 ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS PP REPROCESSADO .....	51
3.4 BIOCOMPÓSITOS DE POLIPROPILENO COM FIBRA DE CURAUÁ .....	52
3.5 BIOCOMPÓSITOS DE POLIPROPILENO COM FIBRA DE LICURI .....	61
3.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS BIOCOMPÓSITOS .....	69
4. CONCLUSÕES .....	75
5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	77
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Lamela média.....	11
Figura 1.2: Árvore de licuri (Syagrus coronata).....	13
Figura 1.3: Fibras de licuri (syagrus coronata) ainda não processada .....	14
Figuras 1.4: Fibras de curauá (a) e (b) .....	15
Figura 1.5: Fibras de curauá prontas para impregnação em plástico reforçado. ....	16
Figura 1.6: Unidade de repetição, monômero e polímero.....	17
Figura 1.7: Esquema de uma extrusora.....	25
Figura 1.8: Esquema de um processo de fabricação de grãos por extrusão .....	26
Figura 1.9: Esquema de uma injetora.....	27
Figura 2.1: Polipropileno oferecido pela Quattor Petroquímica.....	33
Figura 2.2: Fibras de curauá picotadas e condicionadas em bandejas de alumínio.....	35
Figura 2.3: Fibras de licuri picotadas e condicionadas em bandejas de alumínio.....	36
Figura 2.4: Estufa da PALLEY .....	37
Figura 2.5: Extrusora utilizada na obtenção dos biocompósitos .....	38
Figura 2.6: Abertura lateral por onde foram adicionadas as fibras picotadas .....	39
Figura 2.7: Saída da mistura pelos furos da matriz da extrusora.....	39
Figura 2.8 (a): Reservatório com água onde as misturas foram solidificadas .....	40
Figura 2.8 (b): Cordões sendo enviados para o granulador.....	40
Figura 2.9: Biocompósitos granulados utilizados na preparação dos corpos de prova na Injetora ROMI.....	40
Figura 2.10: Injetora da ROMI utilizada na preparação dos corpos de prova.....	41
Figura 2.11 (a): Injetora .....	41
Figura 2.11 (b): Molde .....	41
Figura 2.11 (c): Corpos de prova retirados do molde .....	41
Figura 2.11 (d): Corpos de prova prontos para ensaios .....	41
Figura 2.12 (a): Peso impulsionando os grãos fundidos a passar por um orifício padrão .....	42
Figura 2.12 (b): Massa fundida passando pelo orifício padrão .....	42
Figura 2.13 (a): O peso encosta na base de encosto .....	43
Figura 2.13 (b): Aparelho DIGITROL (balança analítica) utilizada para medir a massa passante do orifício padrão .....	43
Figura 2.14: Máquina universal de ensaios, tração - EMIC.....	43

Figura 2.15: Corpo de prova para o ensaio de tração .....	44
Figura 2.16: Máquina de impacto - EMIC. ....	45
Figura 2.17: Corpo de prova para o ensaio de impacto .....	45
Figura 2.18: Máquina de medição de HDT da VICAT.....	46
Figura 2.19: Ponto de carregamento da máquina de medição de HDT da VICAT.....	46
Figura 2.20: Representação do esquema de um ensaio HDT .....	47
Figura 2.21: Máquina de flexão da SHIMADZU.....	48
Figura 2.22: Corpo de prova para o ensaio de flexão. ....	48
Figura 3.1: Índice de fluidez dos biocompósitos de curauá, licuri e do PP puro e PP reprocessado .....	50
Figura 3.2: Ensaio de tração do PP reprocessado com velocidade 5mm/min .....	51
Figura 3.3: Ensaio de flexão em três pontos do pp reprocessado.....	52
Figura 3.4: Ensaio de tração do biocompósito - curauá 5%.....	53
Figura 3.5: Ensaio de tração do biocompósito - curauá 10% .....	53
Figura 3.6: Ensaio de tração do biocompósito - curauá 20% .....	54
Figura 3.7: Ensaio de tração dos biocompósitos de curauá e pp reprocessado .....	55
Figura 3.8: Ensaio de flexão em três pontos do biocompósito de curauá 5% .....	56
Figura 3.9: Ensaio de flexão em três pontos do biocompósito de curauá 10% .....	57
Figura 3.10: Ensaio de flexão em três pontos do biocompósito de curauá 20% .....	57
Figura 3.11: Valores médios de ensaio de flexão para os biocompósitos de curauá e pp reprocessado .....	59
Figura 3.12: Temperatura de distorção térmica dos biocompósitos de curauá .....	60
Figura 3.13: Resistência ao impacto dos biocompósitos de curauá.....	61
Figura 3.14: Ensaio de tração do biocompósito com 5% de licuri .....	62
Figura 3.15: Ensaio de tração do biocompósito com 10% de licuri .....	62
Figura 3.16: Ensaio de tração dos biocompósitos de licuri e PP reprocessado .....	63
Figura 3.17: Ensaio de flexão em três pontos do biocompósito de licuri 5% .....	65
Figura 3.18: Ensaio de flexão em três pontos do biocompósito de licuri 10% .....	65
Figura 3.19: Ensaio de flexão para os biocompósitos de licuri e PP reprocessado .....	66
Figura 3.20: Temperatura de distorção térmica dos biocompósitos de licuri e do PP reprocessado .....	67
Figura 3.21: Resistência ao impacto dos biocompósitos de licuri.....	69
Figura 3.22: Valores da tensão máxima dos biocompósitos ensaiados à tração .....	70
Figura 3.23: Valores da tensão de escoamento dos biocompósitos ensaiados à tração.....	70



Figura 3.24: Valores da tensão de ruptura dos biocompósitos ensaiados à tração .....	71
Figura 3.25: Valores do módulo de elasticidade dos biocompósitos ensaiados à tração.....	71
Figura 3.26: Média dos valores da tensão máxima encontradas no ensaio de flexão .....	72
Figura 3.27: Média dos valores do módulo de elasticidade encontrados nos ensaios de flexão... .....	72
Figura 3.28: Temperatura de distorção térmica dos biocompósitos de licuri e de curaúá .....	73
Figura 3.29: Resistência ao impacto para as amostras obtidas.....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Composição da fibra de licuri .....	14
Tabela 1.2: Propriedades físicas e mecânicas das fibras de licuri .....	14
Tabela 1.3: Composição da fibra de curauá .....	16
Tabela 1.4: Propriedades físicas e mecânicas das fibras de curauá.....	16
Tabela 1.5: Tipos de nomes comerciais do polipropileno .....	22
Tabela 1.6: Propriedades gerais do PP puro.....	23
Tabela 1.7: Propriedades do PP KM6100 .....	23
Tabela 2.1: Composição de amostras .....	34
Tabela 2.2: Especificação do KM6100.....	36
Tabela 3.1: Média dos valores encontrados dos grãos submetidos à análise de IF.....	49
Tabela 3.2: Resultados do polipropileno reprocessado obtidos do ensaio de tração.....	51
Tabela 3.3: Média dos valores encontrados no ensaio de flexão em três pontos .....	51
Tabela 3.4: Resultados do polipropileno e dos biocompósitos a base de fibra de curauá obtidos no ensaio de tração .....	54
Tabela 3.5: Resultados do polipropileno e dos biocompósitos a base de fibra de curauá obtidos no ensaio de tração de flexão em três pontos.....	58
Tabela 3.6: Valores medidos da temperatura de distorção térmica .....	60
Tabela 3.7: Resultados obtidos no ensaio de impacto .....	60
Tabela 3.8: Resultados do polipropileno e dos biocompósitos a base de fibra de licuri obtidos no ensaio de tração .....	63
Tabela 3.9: Resultados do polipropileno e dos biocompósitos a base de fibra de licuri obtidos no ensaio no ensaio de flexão em três pontos.....	66
Tabela 3.10: Valores medidos da temperatura de distorção térmica .....	67
Tabela 3.11: Resultados obtidos no ensaio de impacto .....	68

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**ASTM** – American Society for Testing and Materials

**CP** – Corpo de prova

**E** – Módulo de elasticidade longitudinal

**HDT** – “Heat deflection temperature”, Temperatura de deflexão ao calor

**IF** – Índice de fluidez

**ISO** – International Organization for Standardization

**PP** – Polipropileno

**$\sigma$**  – Limite de resistência à tração

**$\epsilon$**  – Deformação longitudinal de ruptura

## RESUMO

Esta pesquisa apresenta uma abordagem da adição de fibras de licuri e curauá em uma matriz de resina de polipropileno, essa como uma proposta alternativa de reforço aos compósitos poliméricos. Teores de fibras de 0 %, 5 %, 10 %, e 20 % foram analisados para verificação de suas propriedades mecânicas comparando-as, inclusive com as propriedades do polipropileno. Os biocompósitos granulados foram preparados em uma extrusora. Os corpos de prova foram moldados por injeção e submetidos aos ensaios mecânicos de tração uniaxial, flexão em três pontos, impacto, além de ensaios térmicos (HDT). Estes biocompósitos também foram submetidos a ensaio físico-químico de índice de fluidez (IF). Observou-se que os biocompósitos de PP com 20% curauá obteve maior aumento no módulo de elasticidade, e uma maior diminuição na resistência ao impacto. No comportamento mecânico, para todos os biocompósitos, houve acréscimos nos valores do limite de escoamento e tensão de ruptura quando ensaiados por tração uniaxial, à medida que se adicionavam as fibras. Outro ponto importante foi o aumento da resistência à flexão. Verificou-se também que a adição de fibras reduziu a degradação térmica da mistura fibras naturais / polipropileno.

**Palavras - chaves:** Compósitos poliméricos granulados, fibras de licuri, fibras de curauá, propriedades mecânicas, extrusão.

## ABSTRACT

This research presents an approach to the addition of curauá fibers and licuri fibers in a polypropylene resin matrix, such as an alternative proposal to reinforce the polymeric composites. Fiber content of 0 %, 5 %, 10 %, and 20% were analyzed for verification of their mechanical properties comparing them, inclusive with the properties of polypropylene. The granulated biocomposites had been prepared in an extrusora. The test bodies had been molded by injection and submitted to the mechanical essays uniaxial traction, flexion on three points, impact, in addition to thermal tests (HDT). These biocomposites had been also subjected the essay physicist-chemistry index of fluidity (IF). It was observed that the biocomposites of PP with 20% curauá, obtained bigger increase in the modulus of elasticity and a bigger reduction in the resistance to the impact. In the mechanical behavior, for all the biocomposites, these were increases in values of the limit of drainage and tension of rupture, when tested by uniaxial traction, as they added the fibers. Another important point was the increase of the resistance the flexion. It was also noted that the addition of fibers reduced the thermal degradation of the mixture natural fibers / polypropylene.

Keywords: Polymeric composites granulated, licuri fibers, curauá fibers, mechanical properties, drawing.

## INTRODUÇÃO

Os processos industriais vêm passando por mudanças constantes em obediência a legislação vigente, mais precisamente à dos recursos naturais, que visa garantir a preservação do meio ambiente, e o bem estar da população. Outro aspecto é a necessidade de se organizar internamente para conseguir a sustentabilidade e crescimento econômico. Há dificuldade de buscar novas soluções em materiais, principalmente quando se quer provar a versatilidade do produto. À medida que as aplicações e serviços se tornam mais sofisticadas, fica mais difícil um único material satisfazer todas as expectativas de demanda tecnológica.

A sociedade, as empresas e o homem com visão no futuro, se esforçam para atender a demanda tecnológica, empenham-se em desenvolver diferentes materiais, através de suas propriedades, com intuito de alcançar novas características ao produto. Para isso, muitos pesquisadores concentram esforços e recursos, com o objetivo de identificar e combinar elementos para formação de novos materiais, ênfase em “compósitos a base de resinas e fibras naturais”, também denominados de “biocompósitos, que são compósitos, onde uma ou mais fases deriva de origem biológica (FOWLER et al., 2006)”, que atendam ao mercado. Contudo, as fibras de origem vegetal apresentam alguns problemas.

Segundo Ghavami & Toledo, 1992, a fibra vegetal possui algumas desvantagens, como baixo módulo de elasticidade, alta absorção de água, se não for tratada pode sofrer ataques de fungos e insetos, além de apresentar grande variabilidade em suas propriedades para uma mesma espécie de fibra vegetal. Entretanto, as fibras vegetais são recursos naturais renováveis, biodegradáveis, e de baixo custo de produção quando comparada com outros tipos de fibras, por exemplo, as de origem sintéticas. Isto faz com que os pesquisadores se interessem cada vez mais por este tipo de fibra, com o objetivo de vencer as inconveniências comentadas anteriormente.

Os compósitos são materiais constituídos de uma mistura ou combinação de dois ou mais constituintes. A matriz, que permite a união da estrutura do material compósito, preenchendo os espaços vazios que ficam entre o material de reforço, mantendo-os em suas posições relativas; e os reforços que possuem o papel de conferir as propriedades mecânicas do material compósito. E quando mencionam os biocompósitos, o material de reforço inclui-se as fibras vegetais como algodão, linho, cânhamo, e a matriz de resinas termoplásticas: polietileno, poliestireno, e polipropileno, e resinas termofixas: poliéster e epóxi (FOWLER et al., 2006).

Os materiais biocompósitos aparecem como alternativa aos materiais ditos convencionais, pois as variedades de pesquisas têm mostrado que se podem adquirir novas formas e/ou composição, propriedades e/ou melhorar as que tinham.

Pensando desse modo, os órgãos de pesquisas e desenvolvimento de produtos incentivam aos pesquisadores uma busca de novos materiais alternativos que melhore o desempenho estrutural utilizando inclusive compósitos à base de fibras naturais.

Relacionada à leveza e facilidade de transporte, considera que os produtos fabricados a partir dos compósitos apresentam um baixo peso específico, devido ao peso específico das resinas e das fibras de reforço. As fibras vegetais são úteis na indústria automobilística, para o revestimento interno de automóveis, ônibus e caminhões, e na construção civil (MOTHÉ & ARAÚJO, 2004). Além disso, as fortes pressões das comunidades, tanto nacional, quanto internacional, políticas, econômicas, e ambientais em volta do uso de materiais sustentáveis, força a sociedade a buscar alternativas que não agrida ainda mais o meio ambiente, na qual é foco deste trabalho.

Este trabalho de investigação pretende realizar, inicialmente, um estudo das propriedades mecânicas dos dois novos biocompósitos desenvolvidos a base de fibras naturais (fibras de licuri e de curauá) em matriz de polipropileno, através do processo de extrusão. A avaliação do desempenho mecânico (resistência, módulo elástico e deformação na ruptura) dos biocompósitos será efetuada através de um estudo comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial, impacto e flexão em três pontos, com os obtidos para o polipropileno reprocessado e já em uso pela indústria.

A resina termoplástica do tipo polipropileno foi escolhida como matriz polimérica por se tratar de um polímero de amplo uso, e de fácil reciclagem. O material preparado nesta pesquisa, biocompósitos granulados, é não degradável com possibilidade de ser reciclado.

O presente trabalho utilizou a metodologia de experimentos (ensaios) para atingir os objetivos propostos pela pesquisa. Foi realizada uma revisão bibliográfica, utilizados arquivos técnicos de uma empresa termoplástica, fluxograma de processo aliado às observações de laboratórios. O biocompósito foi desenvolvido em laboratórios de polímeros do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial da Bahia (SENAI-BA), através de processo de extrusão/granulação e injeção.

A influência da adição de fibras naturais na viscosidade do compósito é estabelecida a partir dos ensaios de índice de fluidez (IF), e pela temperatura, pelos ensaios térmicos (HDT).



## JUSTIFICATIVA

No decorrer dos anos o consumo de resinas termoplásticas cresceu em todo mundo. Com isso, houve uma demanda das mesmas no mercado, obrigando as empresas a aumentarem as suas produções. Algumas efetuaram estudos de viabilidade das antigas fábricas, outras em novas indústrias. Contudo, atender a demanda do mercado que exige cada vez mais material com elevada resistência mecânica e que não degrade o meio ambiente, é que surgiram os materiais compósitos. Uma emergente preocupação ambiental no que diz respeito à reciclagem de materiais tem incentivado a utilização de fibras naturais em compósitos (ROWELL, 1994).

Dentre as vantagens do uso de fibras naturais sobre as fibras sintéticas, no reforço de compósitos estão: biodegradabilidade, baixo custo, baixa densidade, boa tenacidade, boas propriedades térmicas, baixo conteúdo energético e uso reduzido de instrumentos para o seu tratamento ou processamento. Segundo a Associação Brasileira de Materiais Compósitos (site ABMACO, 2010), compósitos são sinônimos de produtos feitos sob medida. Decidir pela utilização de um compósito é ter à sua disposição a possibilidade de resolver seus problemas de engenharia com um produto feito sob medida, isto é, um produto fabricado na medida certa e exata de sua necessidade.

Os compósitos fabricados nesta pesquisa surgem como uma alternativa para suprir as expectativas do mercado que exige cada vez mais produtos leves, resistentes, e que possam ser reciclados. Os biocompósitos estão dentro dessa classe de materiais, ou seja, quando em sua concepção pelo menos um de seus componentes tem origem natural, (DASH et al. 2002).

Normalmente quando se adiciona fibras o objetivo é alterar as várias propriedades do material, dentre elas as propriedades mecânicas e químicas dos biocompósitos. Os novos biocompósitos fabricados neste trabalho visam verificar a influência da adição de fibras sobre as características mecânicas e viscosidade do polímero termoplástico.

O reprocessamento pode provocar em polímeros termoplásticos ganhos ou perdas mecânicas devido à degradação térmica. Esta pesquisa também visa verificar a influência da introdução das fibras naturais na degradação térmica do polipropileno com o novo compósito formado.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GERAL**

O principal objetivo desse trabalho de investigação é a obtenção e caracterização de novos biocompósitos não degradáveis, com possibilidade de serem reciclados. Os mesmos consistem de matriz termoplástica (PP) reforçado com fibras naturais de curauá e licuri.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ❖ Desenvolvimento de novos biocompósitos a base de matriz de polipropileno envolvendo fibras de licuri e fibras de curauá como reforços – “CRT” (compósitos com resinas termoplásticas);
- ❖ Desenvolvimento da matéria-prima, em forma de: biocompósitos poliméricos granulados envolvendo diferentes percentuais de fibras de curauá e biocompósitos poliméricos granulados envolvendo diferentes percentuais de fibras de licuri;
- ❖ Determinação da resistência e rigidez dos biocompósitos desenvolvidos através dos ensaios de impacto, tração uniaxial e flexão em três pontos;
- ❖ Desenvolvimento de um estudo comparativo envolvendo as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios acima mencionados;
- ❖ Estudo da possibilidade de um possível processo de reciclagem dos biocompósitos, através da análise do índice de fluidez;
- ❖ Estudo da influência da temperatura, através do ensaio térmico (HDT).

# **CAPÍTULO - 1**

## **1. FIBRAS, POLÍMEROS E COMPÓSITOS**

Neste capítulo é feita uma breve revisão bibliográfica, sobre as fibras naturais mais utilizadas na atualidade, bem como as fibras utilizadas neste estudo. Os temas referentes aos materiais poliméricos também serão revisados, bem como o uso e união destes materiais formando compósitos e biocompósitos.

### **1.1 FIBRAS**

Fibras é um termo geral que designa um corpo flexível, de reduzida seção transversal e elevada razão entre o comprimento e o diâmetro (superior a 100), podendo ou não ser polimérico (MANO & MENDES, 1999). As fibras podem ser divididas em dois grupos principais, fibras naturais e fibras sintéticas (PERSSON et al., 1984).

#### **1.1.1 Fibras sintéticas**

As fibras artificiais: Rayom, Viscose, Acetato (ABRAFAS, 1999 apud CUNHA et al., 2001) são fibras produzidas pelo homem, porém, utilizando como matéria-prima polímeros naturais como a celulose, estes polímeros são regenerados dando origem a novas fibras, como: modal, acetato, e viscose.

O processo de produção das fibras artificiais consiste na transformação química de matérias-primas naturais. A partir das lâminas de celulose, o rayom acetato e o rayom viscose seguem fluxos diferentes. A viscose passa por banho de soda caustica e, em seguida, por subprocessos de moagem, sulfurização e maturação e, finalmente é extrudada e assume a forma de filamento contínuo ou fibra cortada. O acetato passa inicialmente por um banho de ácido sulfúrico, diluição em acetona, extrusão e por uma operação de evaporação da acetona (CUNHA et al., 2001).

As fibras sintéticas são produzidas pelo homem usando como matéria-prima produtos químicos, de empresas petroquímicas como: polipropileno, poliéster, poliamida, poliacrílico, elastano, olefínica, entre outros. (ABRAFAS, 1999 apud CUNHA et al., 2001).

Seguindo a tendência mundial, a partir dos anos 70 à produção brasileira de fibras sintéticas vem ganhando importância no cenário nacional, ultrapassando a produção de fibras artificiais principalmente pela redução de seu custo de produção. O processo produtivo pouco favorável e a qualidade inferior das fibras artificiais também influenciaram esta troca de posição (OLIVEIRA, 1996, LEÃO, 2008).

O processo de produção das fibras sintéticas se inicia com a transformação da nafta petroquímica, um derivado de petróleo, em benzeno, eteno, p-xileno e propeno, produtos intermediários da chamada primeira geração petroquímica e insumos básicos para a produção destas fibras (CUNHA et al., 2001).

Entre as fibras existentes, as de vidro e carbono se destacam:

- As fibras de vidro são as mais utilizadas, devido principalmente ao seu baixo custo, alta resistência à tração e grande inércia química. As composições típicas de fibras de vidro utilizadas na manufatura de compósitos são os dos tipos E, C e S. A fabricação das fibras de vidro se dá pelo processo de fundição, logo em seguida passagem pela fieira. Elas são isotrópicas e, portanto, o módulo de elasticidade nas direções axial e transversal ao filamento é idêntico. Tem condutividade térmica equivalente a 1,3 W/m.K e calor específico de 850 J/kg.K. Possuem alguns inconvenientes como: baixo módulo de elasticidade, auto-abrasividade e baixa resistência à fadiga quando agregada a compósitos.
- As fibras de carbono são manufaturadas pela pirólise controlada de precursores orgânicos em forma de fibras. Os precursores mais comuns, entretanto, são a poliacrilonitrila, fibras de celulose, piches de petróleo e alcatrão de hulha. As fibras de carbono podem ser classificadas quanto ao tipo de precursor, ao módulo de elasticidade (ultra-alto módulo – UHM; alto módulo – HM; módulo intermediário – IM; baixo módulo – LM), à resistência à tração (ultra-alta resistência – UHS; alta resistência – HS), e quanto à temperatura de tratamento térmico final (Tipo I – 2000°C, II – 1500°C, e III – 1000°C). Todas as pesquisas direcionadas à obtenção de fibras de carbono estabelecem que as propriedades mecânicas sejam melhoradas pelo aumento da cristalinidade e orientação, e pela redução dos defeitos na fibra. Um dos inconvenientes é a qualidade da adesão entre

os compósitos convencionais matriz polimérica/fibra de carbono, se faz necessário estabelecer um tratamento superficial, pois em caso de fratura do componente não ocorra deslocamento das fibras na interface.

As fibras de aramidas pertencem a uma classe de resistência ao calor, uma abreviação do termo “aromático” poliamida e refere-se a uma categoria de fibras sintéticas, que consiste em Kevlar e Twaron. São usadas em aplicações aeroespaciais, militares, construção naval, compósitos balísticos, pneus de bicicleta e como o amianto substituto. Entre as suas características podem-se citar (site WIKIMEDIA, 2011):

- Boa resistência à abrasão;
- Boa resistência aos solventes orgânicos;
- Baixa inflamabilidade;
- Sensíveis aos ácidos e sais;
- Boa resistência aos choques e ao calor.

### **1.1.2 Fibras naturais**

As fibras naturais são aquelas encontradas na natureza e dividem-se: fibras de origem mineral (asbesto), animal (lã, e seda) e vegetal (sisal, juta, abacaxi, curauá, entre outros). As fibras vegetais são as de maior interesse econômico, devido à grande diversidade da flora mundial e por ser uma fonte renovável de recursos. São tradicionalmente utilizadas para produção de fios, cordas, sacarias, mantas, tapetes, artefatos de decoração, entre outros. (MORASSI, 1994).

Para Finkler et al., 2005, as vantagens de se utilizar fibras naturais em relação a materiais tradicionais reforçantes, tais como fibras de vidro, talco e mica, são: baixo custo, alta tenacidade, boas propriedades mecânicas e térmicas, redução do desgaste de máquina, facilidade de separação e biodegradabilidade, dentre outras. Já foram relatados na literatura compósitos reforçados com fibra de madeira com propriedades específicas similares aos compósitos de polipropileno com fibra de vidro.

#### **1.1.2.1 Fibras animais**

Podem-se citar dois tipos de fibras animais: fibras de lã e fibras de seda. A lã é derivada do pêlo da ovelha que, depois de tosquiado, é processado industrialmente para usos têxteis,

limpeza, e coloração. O tecido feito de lã serve como isolante térmico, não esquentando tanto sob o sol (mantém a temperatura do corpo em média 5 a 8 graus mais baixa em comparação com tecidos sintéticos expostos ao sol), e é naturalmente elástico, portanto mais confortável e não amassa. Já a seda, é uma fibra protéica usada na indústria têxtil. Obtém-se a partir dos casulos do bicho-da-seda por um processo designado de sericultura. A fibra de seda natural é filamento contínuo da proteína, produzido pelas lagartas de certos tipos de mariposas, sendo uma das matérias-primas mais caras. As lagartas expõem através das glândulas o líquido da seda (a fibroína) envolvido por uma goma (a sericina) que se solidificam imediatamente quando em contato com o ar. São aplicados em tecidos de seda, devido a sua leveza, brilho e maciez. São usados principalmente em camisas, vestidos, blusas, gravatas, xales, luvas. (site PROVOPAR, 2008).

#### **1.1.2.2 Fibras minerais**

O asbesto (da palavra grega asbestus, significando indestrutível, imortal, inextinguível), também conhecido como amianto (do grego amíantus, puro, sem sujidade, sem mácula), é uma designação comercial genérica para a variedade fibrosa de seis minerais metamórficos de ocorrência natural e utilizados em vários produtos comerciais. Trata-se de um material com grande flexibilidade e resistência mecânica, química, térmica e elétrica muito elevada e que, além disso, pode ser tecido (site WIKIMEDIA, 2009).

O asbesto é constituído por feixes de fibras. Estes feixes, por seu lado, são constituídos por fibras extremamente finas e longas facilmente separáveis umas das outras, com tendência a produzir um pó de partículas muito pequenas que flutuam no ar e aderem às roupas. As fibras podem ser facilmente inaladas ou engolidas, podendo causar graves problemas de saúde (site WIKIMEDIA, 2009).

#### **1.1.2.3 Fibras vegetais**

O uso das fibras naturais de origem vegetal em compósitos envolve atualmente aspectos ambientais, sociais e econômicos que necessitam ser salientados. Entre 1830 e 1930, a população mundial elevou-se de cerca de um bilhão para dois bilhões de habitantes (Pardini, 2006; Rowel et al., 1997). Por outro lado, o crescimento demográfico mundial médio é tal que, a cada onze anos, há um crescimento populacional superior a um bilhão de pessoas. Aliado a esses fatos, caminha-se para uma escassez progressiva de recursos energéticos e minerais em geral, além do êxodo

rural. Neste cenário, a busca por matérias-primas renováveis e de baixo custo tem sido um fator de significativa importância no direcionamento das pesquisas que envolvem o uso de fibras vegetais em compósitos (PARDINI, 2006; KURUVILLA & MATTOSO, 2000; OKSMAN et al., 2000; KESSLER et al., 2000; BLEDZKI et al., 1996; SAVASTANO JR et al., 1994)

Conforme Pardini (2006), as principais vantagens das fibras vegetais, são as seguintes:

- Baixa massa específica;
- Maciez e abrasividade reduzida;
- Recicláveis, não tóxicas e biodegradáveis;
- Baixo custo;
- Estimulam empregos na zona rural;
- Baixo consumo de energia na produção.

Conforme Pardini (2006), entre as desvantagens e limitações pode-se citar:

- Baixas temperaturas de processamento, isto é, não toleram mais que 200 °C durante a consolidação no interior da matriz de um compósito;
- Acentuada variabilidade nas propriedades mecânicas e baixa estabilidade dimensional;
- Alta sensibilidade a efeitos ambientais, tais como variações de temperatura e umidade;
- As de origem vegetal sofrem significativas influências referentes ao solo, à época da colheita, ao processamento após a colheita e à localização relativa no corpo da planta;
- Apresentam seções transversais e geometria complexa e não uniforme;
- Propriedades mecânicas modestas em relação aos materiais estruturais tradicionais.

Outras vantagens das fibras vegetais em relação aos reforços convencionais (como as fibras de vidro), entre outras, são: baixo custo, baixa densidade, algumas com elevada tenacidade, propriedades aceitáveis de resistência mecânica específica, desgaste reduzido da ferramenta de corte, baixa irritação respiratória, biodegradabilidade, melhores propriedades térmicas, baixo conteúdo energético e uso reduzido de instrumentos para o seu tratamento ou processamento (RANA et al., 1998; NARAYAN, 1994; apud PAIVA et al., 1999).

As células vegetais são dotadas externamente de uma parede celular. Esta parede celular é rígida, constituída basicamente de celulose, um carboidrato dotado de plasticidade, elasticidade, resistência a tração e decomposição por microorganismo, higrofilia, transparência. Esta parede é fina e elástica nas células vegetais mais jovens, recebendo o nome de parede primária. Nas

células adultas, esta parede sofre um espessamento, que pode formar, internamente à parede primária, uma parede secundária, composta de lignina, hemicelulose e suberina.

A lignina (substância que se deposita nas paredes das células vegetais, conferindo a esta notável rigidez (FERREIRA, 2010)), parede espessa formada por várias microfibrilas que formam espirais ao longo do eixo da fibra, tendo um lumen no centro, atua como material de cimentação, unindo as microfibrilas e a hemicelulose como interface entre a microfibrila de celulose e a lignina.

Os principais componentes químicos das fibras vegetais são substâncias polares, tais como a celulose, a hemicelulose (ou polioses) e a lignina, com menores percentuais de outros componentes como pectina, cera e substâncias solúveis em água. A composição química varia ligeiramente de acordo com a região de cultivo, tipo de solo e condições climáticas. Em relação às cinzas, RIBEIRO (2001), menciona: minerais e carbonatos formados pela queima; umidade; água livre e de cristalização. Hemicelulose são polissacarídeos ramificados, uniões de certos açúcares com cinco carbonos podem citar o xilano e a calose. Suberina são compostos graxos que impede a passagem da água e de gases, impermeabilizando as células, protegendo assim os troncos.

A formação da parede secundária não é uniforme, o que pode ser constatado por locais onde ocorre interrupção da sua formação, as chamadas pontuações. Nas células adultas, onde ocorre um espessamento proeminente da parede secundária, o lúmen celular vai ficando gradativamente reduzido e a parede vai perdendo sua permeabilidade. Entre uma célula e outra temos a lamela média, formada por uma fina camada de pectatos de cálcio. Esta lamela média (figura 1.1) funciona como um cimento, unindo as células (CHIARADIA, 2003).

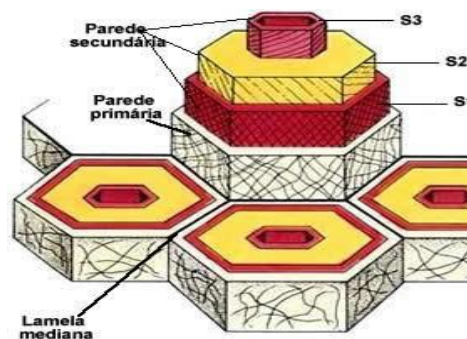


Figura 1.1– Lamela média (RAVEN, et al., 2001)



As células que estão em contato direto com o ar podem apresentar uma camada externa à parede primária, denominada de cutícula, formada por cutina e cera. A cera da carnaúba, por exemplo, vem da cutícula da epiderme das folhas desta planta (CHIARADIA, 2003).

No interior de uma célula adulta apresenta o citoplasma como uma fina camada que reveste a parede celular internamente (CHIARADIA, 2003).

Segundo Bledkzi & Gassan, 1999, extrativos: são compostos orgânicos (terpenóides, ácidos graxos, flavonóides, esteróides e outros compostos aromáticos) que não fazem parte da parede celular lignocelulósicas. São chamados de extrativos devido à sua facilidade de serem extraídos com água, solventes orgânicos neutros, ou volatilizados a vapor. Na sua maioria, esses materiais podem ser separados da porção lignocelulósicas por extração com solventes orgânicos e água. Esses constituintes são freqüentemente responsáveis por determinadas características da planta como: cor, sabor, cheiro e resistência natural ao apodrecimento.

Segundo YOUNG, 1997, apud LEÃO 2008, as fibras vegetais são agrupadas em cinco tipos, dependendo da parte e do tipo de vegetal do qual foi retirada e podem ser classificadas em:

- Fibras de Gramíneas: retiradas das hastes das plantas monocotiledôneas, tendo como exemplo os cereais (trigo, aveia, cevada, arroz e outros), além do junco, bambu e bagaço de cana;
- Fibras de Folhas: retiradas ao longo do comprimento das folhas, exemplos típicos incluem a abacá, sisal e henequém;
- Fibras de Caule: São de maços retirados do interior da casca (caule) de hastes de plantas, tendo como exemplos, linho, Juta, cânhamo e kenaf;
- Fibras de Sementes e Frutos: Os exemplos mais comuns são o algodão, a paina e a esponja de *Luffa cylindrica*;
- Fibras de Madeiras: São fibras provenientes do xilema de vegetais (angiospermas e gimnospermas), tendo como exemplos os eucaliptos, abetuos, pinus, entre outros.

#### **1.1.2.3.1 Licuri**

*Syagrus coronata* (Martius) Beccari pertence à subfamília Arecoideae, tribo Cocoeae, subtribo Butineae (NOBLICK, 1986). Essa subfamília é a maior entre as Arecaceae, reunindo atualmente 115 gêneros e 1500 espécies (UHL et al., 1995, apud LEÃO, 2008).

O licuri (*Syagrus coronata*, vide figura 1.2) Beccari pertence à família das Palmáceas (*Cocos coronata*) e ocorre desde o norte de Minas Gerais até o sul de Pernambuco, abrangendo toda a área oriental e central da Bahia, ocupando também os estados de Sergipe e Alagoas (NOBLICK, 1986, apud LEÃO, 2008) em regiões de serras e vales, sendo seus frutos ricos em cálcio, magnésio, cobre e zinco.

Dos diversos nomes pelos qual a espécie é conhecida popularmente, licuri é o nome mais utilizado no sertão baiano. A altura da palmeira varia de 6 a 10 m e as folhas com mais ou menos 3 m de comprimento, embora floresça e frutifique o ano todo, a despeito de pequenas variações, os meses de março, junho e julho apresentam maior frutificação, caracterizando o período da safra (BONDAR, 1938; NOBLICK, 1986, apud LEÃO 2008).

A espécie tem uma nítida preferência pelas regiões secas e áridas das caatingas, com uma área de distribuição que abrange do norte de Minas Gerais, ocupando toda a porção oriental e central da Bahia, até o sul de Pernambuco, incluindo os Estados de Sergipe e Alagoas (NOBLICK, 1986, apud LEÃO 2008).



Figura 1.2 – Árvore de licuri (*syagrus coronata*) (site INSA, 2009)

A árvore de licuri é essencial na região agreste, pois seus frutos e sementes são comestíveis e formam a base alimentar de muitas aves silvestres. A ararinha-azul-de-lear, por exemplo, é uma das espécies mais conhecidas e preciosas que faz uso desse coquinho.

A árvore de licuri é uma das principais palmeiras da região semi-árida do nordeste do Brasil, onde é nativo. Suas folhas também são muito utilizadas para confecção de artesanatos por mulheres e crianças em todo semi-árido baiano. A figura 1.3 mostra as fibras do licuri ainda não processada para impregnação em plástico reforçado.



Figura 1.3 – Fibras de licuri (*syagrus coronata*) ainda não processadas (LEÃO, 2008)

Segundo Leão (2008), a tabela 1.1 mostra a composição da fibra de licuri determinada pela caracterização da mesma.

Tabela 1.1 – Composição da fibra de licuri (LEÃO, 2008)

<i>Componente</i>	<i>Valor médio (%)</i>
$\alpha$ -Celulose	53,21
Hemicelulose	11,61
Lignina	20,69
Extrativos	20,86
Solúveis em água fria	17,60
Cinzas	2,86
Umidade	8,08
Cera	12,72

Conforme Leão (2008), a tabela 1.2 apresenta os dados extraídos (fibra de licuri) de um estudo comparativo entre as propriedades mecânicas das fibras.

Tabela 1.2 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras de licuri (Leão, 2008)

<i>Fibra</i>	<i>Diâmetro (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Densidade (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>	<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>
Licuri	132 – 165	0,53 – 0,56	369,8– 902,0	4,5 – 43,25

### 1.1.2.3.2 Curauá

O curauá é uma planta da família das Bromeliaceas, gênero *Ananas* e espécie *Ananas Erectifolius*. Dentre as fibras naturais comumente utilizadas em compósitos poliméricos, a fibra de curauá vem ganhando destaque por ser originária e cultivada na Amazônia, região de destaque nas questões de preservação do meio ambiente. Além de apresentar propriedades físicas e mecânicas que superam às das fibras de sisal e juta, mais conhecidas e utilizadas (OLIVEIRA, 2005).

Planta característica da Amazônia paraense, o curauá, (figuras 1.4 a e b), cresce, até em solo arenoso e pouco fértil chegando a atingir entre 1,0 m e 1,5 m de altura. A propriedade mais conhecida dessa planta foi descoberta pelos povos primitivos da floresta. Os índios já usavam a fibra resistente contida dentro das folhas longas e duras do curauá para amarrar embarcações, fazer redes e cestas (RAMALHO, 2005).

O curauá já é utilizado pela indústria automobilística para construção de lona de freios e outras peças para veículos em substituição à fibra de vidro. Outro fator importante relacionado ao curauá é que o mesmo possui 100% de aproveitamento, e isso despertou interesse de produtores nacionais e até do exterior. Mudanças foram plantadas no vale da Ribeira no interior paulista e também em solos japoneses, sul-africanos e até na Malásia, mas sem sucesso, porque a planta não resiste a baixas temperaturas. O curauá é fiel às suas origens amazônicas e só se desenvolve em clima quente e úmido (RAMALHO, 2005).



(a)



(b)

Figuras 1.4 (a) Fibras de curauá (*ananas erectifolius*) (b) detalhe da folha (site PEMATEC, 2010)

As fibras de curauá são originadas das folhas e podem apresentar comprimentos variando de 40 a 60 cm. Os tipos de fibras de curauá mais conhecidos são as dos tipos: roxo e branco. A figura 1.5, mostra as fibras já limpas e “penteadas” e prontas para serem usadas com reforço (Leão, 2008).



Figura 1.5 – Fibras de curauá prontas para impregnação em plástico reforçado (LEÃO, 2008)

Mostra-se na tabela 1.3 mostra a composição da fibra de curauá (OLIVEIRA, 2005).

Tabela 1.3 – Composição da fibra de curauá (OLIVEIRA, 2005)

<i>Componente</i>	<i>Valor médio (%)</i>
$\alpha$ -Celulose	70,7 – 73,6
Hemicelulose	9,9
Lignina	7,5 – 11,1

Conforme AQUINO (2008), a tabela 1.4 apresenta os dados extraídos (fibra de curauá) de um estudo comparativo entre as propriedades mecânicas das fibras.

Tabela 1.4 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras de curauá (AQUINO, 2008)

<i>Fibra</i>	<i>Diâmetro (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Densidade (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>	<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>
Curauá	49 – 100	—	665 – 1404	20 – 36



## 1.2 POLÍMEROS

É uma macromolécula composta por muitas unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. A palavra polímero origina-se do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição) (CANEVALORO, 2002). Uma unidade repetida é algumas vezes chamada de mero. "Mero" se origina da palavra grega meros, que significa parte; o termo polímero foi criado para significar "muitos meros" (CALLISTER, Jr. 2008). Um mero é conhecido com monômero (molécula) que é a matéria-prima para formação do polímero. Segundo Eloisa & Luís 1999, monômeros são micromoléculas; são compostos químicos suscetíveis de reagir para formar polímeros. A figura 1.6 mostra as representações simbólicas da unidade de mero (monômero) e o polímero.

Segundo Andrade et al., 2001, polímero: substância constituída de moléculas caracterizadas pela repetição de uma ou mais espécies de átomos ou grupos de átomos (unidades constitucionais) ligados uns aos outros em quantidade suficiente para fornecer um conjunto de propriedades que não variam acentuadamente com a adição ou a remoção de uma ou algumas unidades constitucionais de suas moléculas.

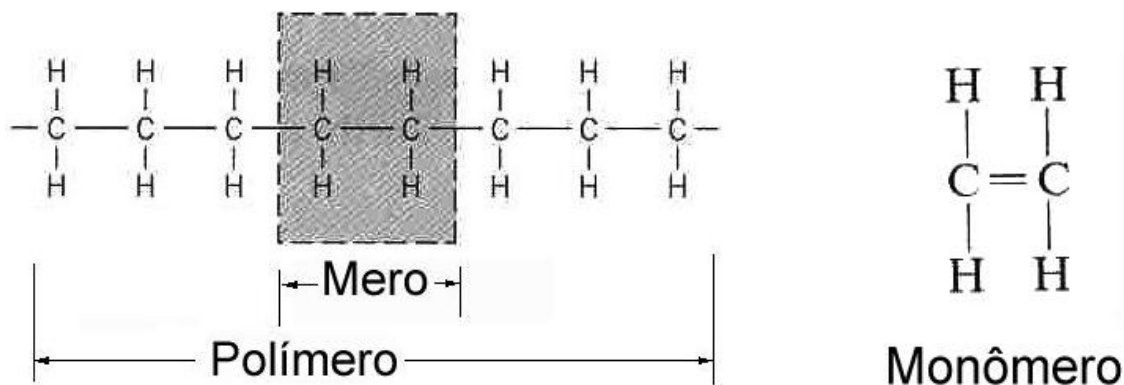


Figura 1.6 – Unidade de repetição, monômero e polímero (CALLISTER, Jr. 2008)

O processo pelo qual os monômeros são ligados uns aos outros para gerar cadeias compostas por unidades repetidas (polímero) é conhecido como polimerização. Para Andrade et al., 2001, polimerização: processo de conversão de um monômero ou de uma mistura de monômeros em um polímero. A síntese dessas grandes moléculas (polímeros) é denominada polimerização (CALLISTER, Jr. 2008).

Segundo Mano (2007), por reações de polimerização entendem-se aquelas em que substâncias simples (monômeros) reagem entre si, combinando suas moléculas e formando

moléculas maiores, caracterizadas pela repetição de uma unidade básica (“mero”). As reações através das quais a polimerização ocorre, são agrupadas em dois tipos: por adição e por condensação. A reação por adição – reação em cadeia - é um processo pelo qual as unidades monoméricas são unidas, uma de cada vez, de modo semelhante a uma cadeia, para formar uma macromolécula linear. A composição da molécula resultante é um múltiplo exato daquela do monômero reagente original. Exemplos: polietileno, polipropileno, cloreto de polivinila, poliestireno, entre outros. A reação por condensação – reação em estágios – consiste na formação de polímeros através de reações químicas intermoleculares que ocorrem passo a passo e que podem envolver mais do que uma espécie de monômero. Nenhuma das espécies reagentes possui a fórmula química da unidade repetida, e a reação intermolecular ocorre toda vez que uma unidade repetida é formada. Como exemplo pode-se citar os poliésteres, fenóis-formaldeídos, náilon, e os policarbonatos.

Durante a polimerização ocorre a formação de um átomo de carbono assimétrico, que pode dar origem às seguintes configurações: *isotática*, na qual os grupos laterais metila têm a mesma configuração quando a cadeia está na conformação ziguezague; *sindiotática*, o grupo metila se apresenta em uma sucessão regular de configuração alternativa em relação ao plano da cadeia; e *atática*, o grupo metila está distribuído aleatoriamente (CANEVALORO, 2002). Durante a polimerização podem surgir três casos: ou todos os átomos de carbono assimétrico gerados têm a mesma configuração, neste caso, o polímero é chamado *isotático*; ou têm alternância de configuração, e o polímero é designado *sindiotático*; ou não têm qualquer ordem, dispondo-se as configurações ao acaso, tratando-se então de um polímero *atático ou heterotático* (MANO & MENDES, 1999).

Em relação ao comportamento em temperaturas elevadas, os polímeros são classificados em termoplásticos ou termofixos. Os primeiros possuem estruturas lineares; eles amolecem quando são aquecidos e endurecem quando resfriados. De maneira contrária, os termofixos, uma vez endurecidos, não irão amolecer ao serem aquecidos; as suas estruturas possuem ligações cruzadas e em rede (CALLISTER, Jr., 2008).

Para que uma micromolécula possa dar origem a um polímero, é essencial que sua estrutura química apresente funcionalidade igual a 2, isto é, apresente dois locais suscetíveis de permitir o crescimento da cadeia. Se a substância tem grupamentos funcionais que propiciem o crescimento da molécula por apenas um ponto, não é gerado polímero; se houver dois pontos, isto é, a funcionalidade da molécula é 2, o polímero resultante terá cadeias lineares, com ou sem

ramificações e comportamento termoplástico. Se os grupos funcionais permitam reação por 3 ou mais pontos, o polímero resultante poderá conter ligações cruzadas, apresentando estrutura reticulada, tendo comportamento de termorrígido (MANO & MENDES, 1999).

### **1.2.1 Matriz Polimérica**

A fase matriz dos compósitos fibrosos pode ser um metal, um polímero ou uma cerâmica. Em geral, os metais e os polímeros são os mais usados como os materiais na fabricação de compósitos, devido a sua maior ductilidade; Já para os compósitos com matriz cerâmica, o componente de reforço é adicionado para melhorar a tenacidade à fratura (CALLISTER Jr., 2008).

O objetivo da matriz é manter o reforço preso a uma unidade estrutural, protegendo-o de danos, transferindo e distribuindo a carga recebida ao reforço e, em muitos casos, contribuem com propriedades como ductilidade, dureza e isolamento elétrico. A ligação de interface entre o reforço e a matriz é desejável, de modo que a matriz seja capaz de estabelecer ligação química ou mecânica com o reforço. Além disso, deve haver compatibilidade química entre a matriz e o reforço para que não ocorram reações indesejáveis na interface entre ambos.

Outro fator importante é que a matriz deve ser dúctil. Além disso, o módulo de elasticidade da fibra deve ser muito maior do que aquele da matriz. A segunda função da matriz é a de proteger as fibras individuais contra danos superficiais em decorrência da abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente. Tais interações podem introduzir defeitos superficiais que são capazes de formar trincas, as quais podem levar a falha sob baixos níveis de tensão de tração. Finalmente, a matriz separa as fibras e, em virtude de sua relativa baixa dureza e plasticidade, previne a propagação de trincas frágeis de uma fibra para outra, o que poderia resultar em uma falha catastrófica; em outras palavras, a fase matriz serve como uma barreira contra a propagação de trincas (CALLISTER Jr., 2008).

Conforme Correia (1988), a matriz nos materiais compósitos, além de dar a forma ao produto final, tem por finalidade básica atuar como um meio de transferência de carga para os reforços, através da área de contato entre a fibra e a matriz, e proteger o reforço da abrasão mútua, danos e meios de degradação.

Um dos parâmetros mais importantes em materiais compósitos, com uma ou mais fases contínuas é a interface entre o reforço e a matriz, por ser a região onde ocorre o contato entre os componentes do compósito. A região interfacial é a primeira responsável pela transferência da



solicitação mecânica da matriz para o reforço. A adesão inadequada entre as fases envolvidas na interface poderá provocar o início de falhas, comprometendo o desempenho do compósito. Portanto além das propriedades individuais de cada componente do compósito, a interface deve ser a mais adequada possível para aperfeiçoar a combinação das propriedades envolvidas. A preocupação com a interface fez com que a tecnologia de fabricação de materiais compósitos desenvolvesse processos e/ou produtos para facilitar a acoplagem dos componentes na região interfacial (LEÃO, 2008).

### **1.2.1.1 Tipos de matrizes poliméricas**

Podem-se mencionar dois tipos de matrizes poliméricas: matrizes termoplásticas (alternativa de aplicação em estruturas, devido à maior tenacidade à fratura, maior resistência ao impacto, maior tolerância a danos, e podem ser reciclados); e matrizes termorrígidas (quando se deseja compósitos estruturais, boa resistência ao calor, entre outros) (PARDINI & NETO, 2006).

As matrizes termoplásticas são sensíveis ao calor (perdem suas propriedades mecânicas), sofre o processo de fluência, quando se aplica cargas, as propriedades finais dependem do processo de fabricação e do peso molecular, podem ser fundidas facilmente, e assim podem ser recicladas, são anisotrópicas, enquanto que, as matrizes termofixas, não perdem suas propriedades com o aumento da temperatura possuem baixo custo, fácil manuseio e processamento, são isotrópicas, não podem ser recicladas (não podem ser fundidas). Estas resinas como componente matricial tem o papel de manter a orientação das fibras e seu espaçamento, transmitirem as forças de cisalhamento entre as camadas de fibras (para que o compósito resista a dobras e torções) e proteger a fibra de danos superficiais (MANO, 2007).

Segundo Figueiredo et al., 2006, os termoplásticos são relativamente moles e dúcteis e compõem-se da maioria dos polímeros lineares e aqueles que possuem algumas estruturas ramificadas com cadeias flexíveis. Enquanto que, os polímeros termofixos são geralmente mais duros, fortes e frágeis do que os termoplásticos, e possuem melhor estabilidade dimensional.

As matrizes termoplásticas à temperatura ambiente estão em estado sólidos, podem ser recicladas, e o processo se dá por aquecimento, fusão e resfriamento. Já, as matrizes termofixas devem passar pelo processo de polimerização (cura), na qual se utiliza de catalizadores e aceleradores, e após o processo o polímero obtido não pode ser mais fundido, devido a formação de cadeias moleculares tridimensionais, ou seja, um termoplástico não é de fácil reciclabilidade como ocorre nos materiais termoplásticos (ANDRADE et al., 2001)). Ainda, nas matrizes

termoplásticas, são inúmeras as vantagens, como: tempo de estocagem, moldagem, resistência, custo de processamento, baixa densidade, transparência e possibilidade de reciclagem (FUNG et al, 2003, SAWYER et al, 1996, apud TIO, 2007).

### **1.2.1.2 Resina polipropileno**

Os anos 50 são marcados pela popularização da tecnologia de polímeros e pelo surgimento do Polipropileno (PP), espumas de poliuretano, polietileno linear, poliacetais e policarbonatos (site ABIQUIM, 2010). No Brasil, o polipropileno se colocou no 2º termoplástico mais produzido e consumido em 2008, ficando atrás do polietileno (site ABIQUIM, 2009).

Inicialmente polimerizar o propeno usando processos de alta pressão deu origem a líquidos oleosos ou sólidos elásticos de pouco ou nenhum valor comercial. Este resultado era devido à formação de polímeros unicamente atáticos. No entanto, com a descoberta de catalisadores estereoespecíficos de polimerização, à base de titânio e alumínio, foi possível obter polipropileno do tipo isotático, de alto peso molecular e cristalino. Esses catalisadores são hoje denominados de catalisadores Ziegler-Natta (MOORE, 1996).

O Polipropileno é obtido pela polimerização do propeno em meio solvente (em reatores do tipo: vasos, tubulares, entre outros), no qual se encontra em suspensão com compostos a base de titânio e alumínio formando um sistema catalítico. Após a polimerização a lama obtida é submetida a diversas etapas de tratamento, (lavagem, extração, secagem e transferência) obtendo-se daí o polipropileno em forma de pó, que após extrudado e misturado com aditivos (antioxidantes e outros) é granulado, homogeneizado em silos especiais e ensacado para comercialização (MANUAL DE POLIPROPILENO, 2007). Segundo Mano & Mendes 1999, a preparação se dá em dois meios: poliadição em lama. Monômero: catalisador de Ziegler-Natta, heptano, 60° C, 20 PSI; poliadição em fase gasosa. Monômero, catalisador de Ziegler-Natta, 70 – 80° C, 230 – 260 PSI.

Segundo Andrade et al., 2001, catalisador Ziegler-Natta é um sistema catalítico formado por um composto de metal de transição dos grupos IV ao VIII (catalisador) e compostos alquil-metálicos de metais dos grupos I ao III (cocatalisador – composto que faz parte de um sistema catalítico, que tem o objetivo de promover a ativação de um catalisador) da tabela periódica, empregados em polimerizações por coordenação de olefinas.

Polioléfinas, tais como polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD) e polipropileno (PP) e poliésteres, como poli (tereftalado de etileno) (PET),

são as duas classes de resinas termoplásticas mais consumidas, e que estão disponíveis em grandes quantidades a partir do descarte doméstico. Sendo desafiadora, tecnológica e ambientalmente correta, a reciclagem destes materiais e sua caracterização mecânica antevendo a possibilidade de um novo ciclo de vida na forma de novos produtos (ABPOL, 2006).

#### 1.2.1.2.1 Características físicas gerais

O PP assim conhecido é um termoplástico branco e opaco com cristalinidade em torno de 60 a 70 %. Possui um equilíbrio entre resistência ao impacto e rigidez, resistência à distorção em altas temperaturas, sendo que suas propriedades mecânicas dependem largamente do peso molecular, da distribuição do peso molecular, da estereoregularidade da cadeia e das condições de processo. Possui excelente resistência ao ataque químico por ácidos, álcalis e sais, mesmo em elevadas temperaturas. Não é solúvel em hidrocarbonetos simples e hidrocarbonetos clorados à temperatura ambiente, mas é bastante solúvel a temperaturas superiores a 80°C. Não é tóxico. É um sólido combustível e gera gases asfixiantes na queima (MANUAL DE POLIPROPILENO, 2007).

Segundo Paiva & Wiebeck (2004), o polipropileno é um termoplástico, branco e opaco. E dependendo da cristalinidade pode ser transparente; se de baixa cristalinidade é biorientado, possui alto brilho.

O polipropileno tem outros nomes no comércio, a tabela 1.5 relaciona os nomes comerciais do mesmo com suas características (CALLISTER Jr., 2008).

Tabela 1.5 – Tipos de nomes comerciais do polipropileno (CALLISTER, Jr., 2008)

<b>Nomes Comerciais</b>	<b>Principais Características de Aplicação</b>	<b>Aplicações Típicas</b>
Herculon Meraklon Moplen Poly-pro Pro-fax Propak Propathene	Resistente à distorção térmica; Excelentes isolantes elétricos; Excelente resistência à fadiga; Quimicamente inerte; Relativamente barato; Relativamente ruim à luz UV.	Garrafas esterilizáveis, filmes para embalagens, gabinetes de televisores, malas de bagagem.

#### 1.2.1.2.2 Propriedades do polipropileno

Na tabela 1.6 mostram-se as propriedades gerais do polipropileno (PP puro).

Tabela 1.6 – Propriedades gerais do PP puro (MANUAL DE POLIPROPILENO, 2007)

<b>Propriedades</b>	<b>Valores Típicos</b>
Peso Molecular, g/mol	80.000 - 500.000
Densidade Volumétrica, g/cm <sup>3</sup>	0,90 - 0,91
Índice de Fluidez a 190°C (ASTM D 1238a), g/10min	0,50 – 45
Índice de Refração	1,49
Temperatura de Transição Vítrea (Tg), ° C	4 – 12
Temperatura de Fusão (Tm), ° C	165 – 175
Temperatura de Amolecimento, ° C	150
Tensão de Ruptura à Tração MPa (BS.2782, Pt.3)	30 – 35
Elongação à Tração % (BS.2782, Pt.3)	50 – 600
Resistência ao Impacto (Izod) J	1 – 10
Dureza (Shore) escala D	71 – 75
Constante Dielétrica	2,0 - 2,15

O polipropileno se divide em vários produtos (identificados por códigos) em função de determinados fatores, entre eles, destaca-se o índice de fluidez - IF. Estes são especificados por faixa de IF, por exemplo: o código “GE7100” tem valores entre 0,6 a 1,0 g/10min, WS6100 entre 26 e 34 g/10min, e KM6100 entre 2,5 e 4,5 g/10min. O KM6100 é foco desta pesquisa, a tabela 1.7 mostra as suas propriedades.

Tabela 1.7 – Propriedades do PP KM6100 (MANUAL DE POLIPROPILENO, 2007)

<b>PROPRIEDADES PP - KM 6100</b>	<b>VALORES TÍPICOS</b>
Índice de Fluidez (230 °C/2,16 kg), g/10 min.	2,5 a 4,5
Densidade Volumétrica (23 °C), g/cm <sup>3</sup>	0,905
Módulo de Elasticidade, MPa	1015
Resistência à Tração no Escoamento (50 mm/min.), MPa	36
Alongamento no Escoamento (50 mm/min.), %	9
Módulo de Flexão (1,3 mm/min.), MPa	1550
Resistência ao Impacto Izod 23 °C, J/m	45
Dureza Shore D (1s)	73
Temperatura de Amolecimento Vicat (10 N/Taxa A), °C	154
Temperatura de Distorção Térmica (0,45 MPa), °C	105

### 1.2.1.2.3 Transformação no processamento

Neste item foi descrito o processo de fabricação por extrusão e injeção. Processos utilizados na fabricação dos compósitos, que se seguem:

#### 1 - Extrusão

Baseia-se na moldagem do polipropileno no seu estado fundido tendo sua configuração, dimensão e acabamento definidos pelas características da matriz ou molde utilizado. Extrusão é um processo contínuo de transformação de termoplásticos, no qual o material polimérico é fundido por ação de calor e pressão e, conduzido por meio de parafuso, passa por uma matriz com o perfil desejado (ANDRADE et al., 2001).

Segundo Callister Jr. (2008), o processo de extrusão consiste na moldagem de um termoplástico viscoso, sob pressão através de uma matriz aberta. Uma rosca transportadora ou parafuso sem fim transporta o material peletizado através de uma câmara, onde ele é sucessivamente compactado, fundido e conformado como uma carga contínua de um fluido viscoso. A extrusão ocorre quando a massa fundida é forçada através de um orifício na matriz. A solidificação do segmento extrudado é acelerada por sopradores de ar, por borrifo de água ou por um banho. Esta técnica está especialmente adaptada para a produção de segmentos contínuos com seção transversal de geometria constante – por exemplo, barras, tubos, mangueiras, lâminas e filamentos.

O processo de extrusão é efetuado por meio de um equipamento denominado extrusora, conforme esquema apresentada na figura 1.7. Podem se citar os seguintes componentes:

- Funil: direciona os grãos e/ou pó para entrada da extrusora;
- Redutor: reduz o efeito de velocidade de rotação do motor;
- Resistências elétricas: aquece o corpo do cilindro;
- Termopar: mede a temperatura do sistema;
- Matriz: dar forma (tubos, chapas e perfis) na resina fundida;
- Cilindro: promove troca térmica entre as resistências elétricas e a resina;
- Motor elétrico: aciona o parafuso plastificador;
- Parafuso plastificador: promove a mistura e deslocamento da resina para extremidade da extrusora.

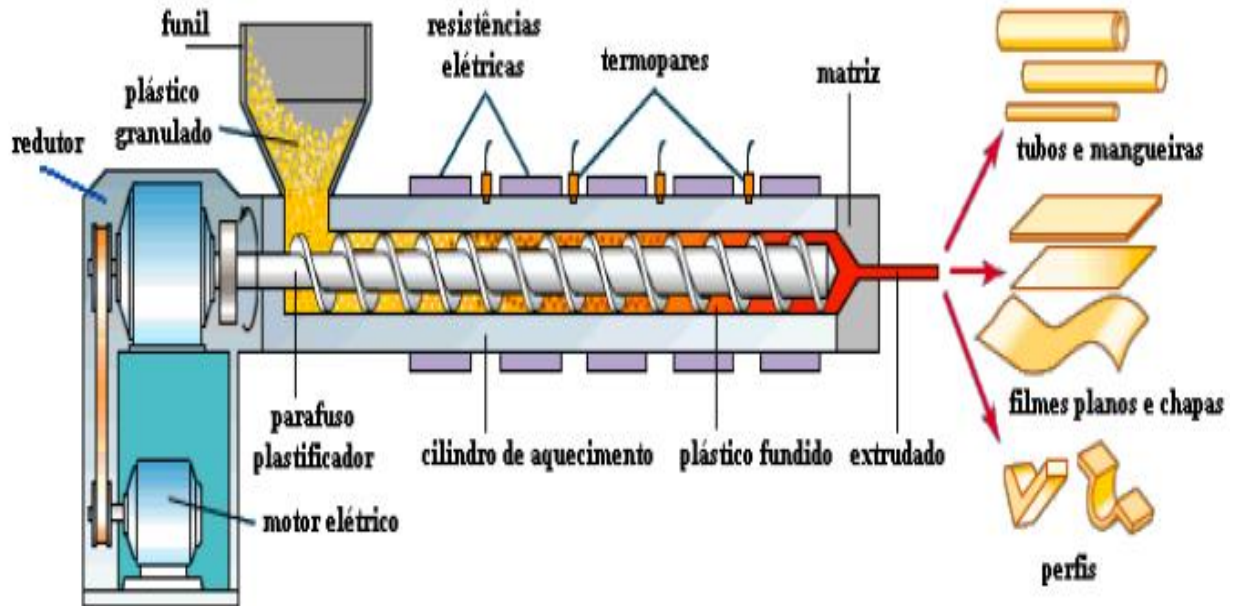


Figura 1.7 – Esquema de uma extrusora (MIOTTO, apud FEITOSA, 2008)

Segundo Paiva & Wiebeck (2004), a extrusora tem a função de conformar o material plástico. Durante a reciclagem de material impuro, a mesma deve possuir uma tela para reter impurezas. O material plástico sai em forma de “cordão”. Atualmente, existem extrusoras que fazem o corte do material na saída da mesma, conhecidas como extrusoras com corte na cabeça.

## 2 - Processo de peletização por extrusão

O processo de peletização, vide figura 1.8, consiste basicamente em três fases. A primeira fase direciona a resina, geralmente em forma de pó, adicionada de maneira gradual por dosadores, a passar por um cilindro aquecido por resistências elétricas ou vapor, onde se fundem. A segunda fase, a resina fundente (massa aquecida), na extremidade da extrusora atravessa os orifícios do cabeçote (matriz), ganhando forma de “cordões”, estes são direcionados para um reservatório com água. Os guias com polias mantêm os “cordões aquecidos” mergulhado, solidificando-os. Na fase final do processamento os “cordões” solidificados e resfriados são arrastados pelo movimento de corte do peletizador (granulador), onde os mesmos são triturados, em forma de pellets. Estes seguem para uma peneira, devido variação na dimensão dos pellets, onde são separados, finos dos longos. Pois, há processo que esta variação é prejudicial.

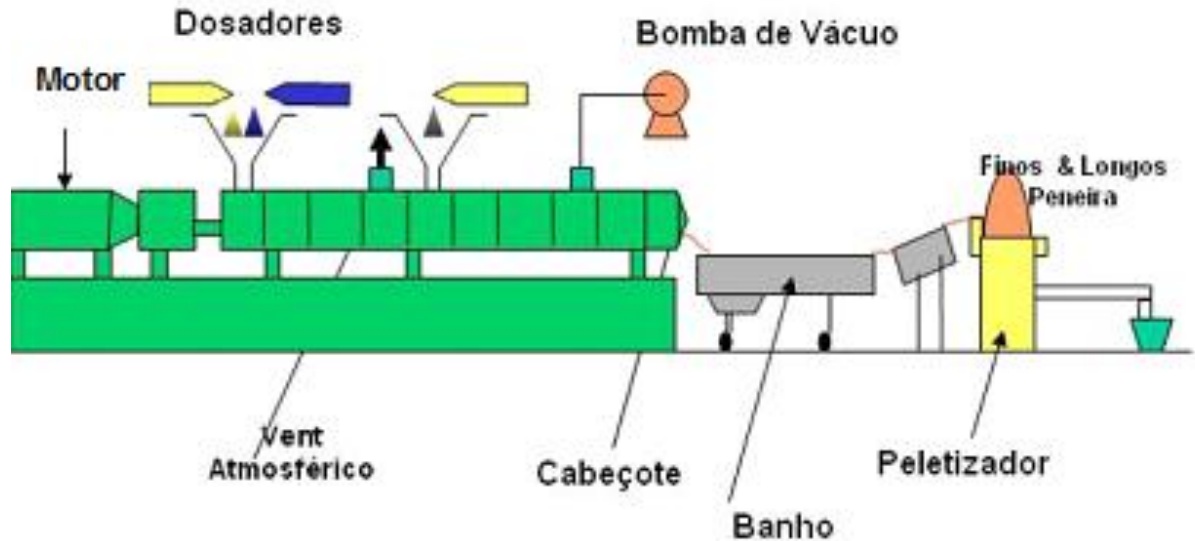


Figura 1.8 – Esquema de um processo de fabricação de grãos por extrusão (MOURA & GRAMOLELLI Jr., 2008)

Apos a extrusão, o material pode sofrer modificação de suas características físicas e mecânicas através de outros processos, como o corte e o estiramento, para então ser devidamente acondicionado. Cabe mencionar que a matéria prima normalmente é depositada no funil a temperatura ambiente, através de dosadoras industriais, escoando ate o canhão unicamente por gravidade (BRIDGE, 1997).

Nos diversos estágios deste processo faz-se necessário o controle da temperatura, pressão e vazão do material, fatores que influenciam diretamente nas características finais do perfilado. Apesar da relevância de todas as variáveis, o domínio da temperatura da massa fundente e fator determinante dada sua elevada influencia na maleabilidade, resistência a tração e torção, alongamento e aspecto visual do produto (BRIDGE, 1997).

### 3 - Injeção

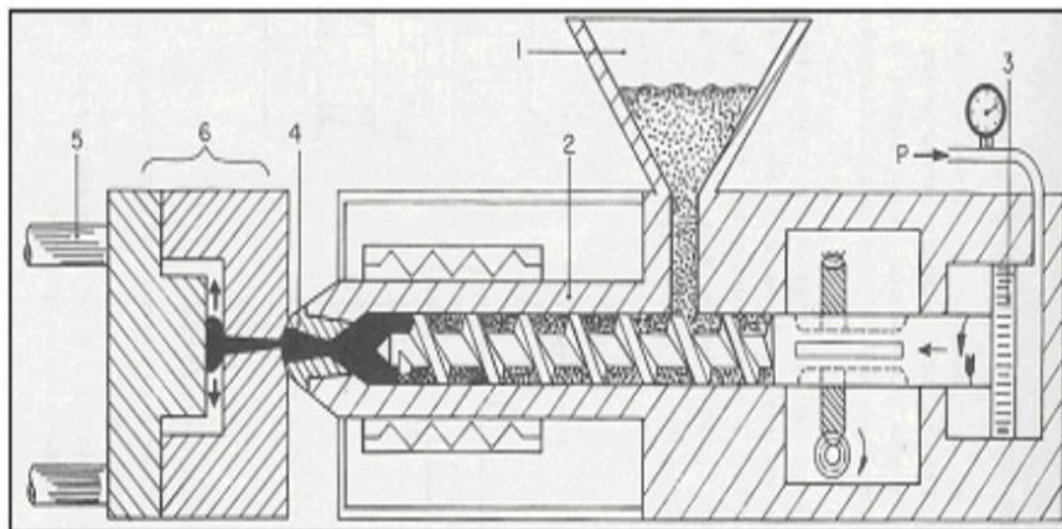
Segundo Andrade et al., 2001, injeção é um processo de transformação de termoplástico, no qual o material polimérico é fundido por ação de calor e pressão e, por meio de um êmbulo, chega a um molde com o formado desejado.

Baseia-se na moldagem do polipropileno no seu estado fundido tendo sua configuração, dimensão e acabamento definidos pelas características do molde utilizado.

Segundo Callister Jr. (2008), o processo de injeção consiste em sistema análogo para os polímeros à fundição.

A alimentação da injetora, material granulado, conforme figura 1.9, é dar a partir de uma moega de carregamento para o interior de um cilindro, através do movimento de um êmbolo ou pistão. Essa carga é empurrada para frente, para o interior de uma câmara de aquecimento, onde ela é forçada ao redor de um espalhador, proporcionando um melhor contato com a parede aquecida. Como resultado, o material termoplástico se funde para formar um líquido viscoso. Em seguida o plástico fundido é impelido, novamente pelo movimento de um pistão através de um bico injetor para o interior da cavidade fechada do molde; a pressão é mantida até que o material moldado tenha solidificado. Finalmente, o molde é aberto, a peça é ejetada, o molde é fechado e todo o ciclo é repetido. Provavelmente, a característica mais excepcional dessa técnica seja a velocidade na qual as peças podem ser produzidas.

Para os termoplásticos, a solidificação da carga injetada é quase que imediata; consequentemente, os tempos do ciclo para esse processo são curtos. Os polímeros termofixos também podem ser moldados por injeção; a cura ocorre enquanto o material está sob pressão em um molde aquecido, o que resulta em ciclos com tempos mais longos do que para os termoplásticos.



1. Reservatório para matéria-prima 2. Canhão 3. Cilindro de injeção  
4. Bico de injeção 5. Sistema de fecho e abertura do molde 6. Molde

Figura 1.9 – Esquema de uma injetora (SANTOS & MARTINS, 2004)

#### 1.2.1.2.4 Uso do polipropileno

O polipropileno é utilizado para a fabricação de brinquedos, pára-choques e painéis de automóveis, bancos de ônibus, pás de ventilador, utensílios domésticos, sacaria, redes de pesca,



cordas de uso naval, tubos para carga de caneta esferográfica, tubos para construção civil, material hospitalar. Na indústria de alimentos, para a fabricação de embalagens. A técnica de moldagem a sopro possibilita a produção de garrafas (principalmente para água mineral), que não sofrem fragilização ambiental e têm boa elasticidade. O Polipropileno de altíssima fluidez é usado na fabricação de carpetes. O elevado ponto de amolecimento do polipropileno e sua inércia química permitem o seu uso na fabricação de dutos, revestimentos de tanques e tubulações para a indústria química (MANUAL DE POLIPROPILENO, 2007).

Segundo Paiva & Wiebeck (2004), o polipropileno pode ser aplicado em pára-choque de carros, carcaças de eletrodomésticos, recipientes, fitas para lacre de embalagens, brinquedos, sacos, carpetes, bocal de pistolas para aplicação de aerossóis, material hospitalar, seringas de injeção descartáveis, frascos de iogurtes e potes de manteiga, caixas de baterias para carros, peças termoformadas em geral. Relata que o PP possui efeito “dobradiça”, ou seja, podemos fazer peças com dobras no próprio material (tampas dobráveis, estojos escolares e para óculos, caixas para fitas vídeo).

O polipropileno utilizado no matriz polimérica, KM 6100, é utilizado: em peças injetadas de altíssima rigidez, potes para envase a quente, peças técnicas. Utensílios domésticos, peças para indústria automobilística, embalagens, tampas flip-top e com dobradiças integradas, compósitos (site FORTYMIL, 2010).

### **1.3 COMPÓSITOS**

O desenvolvimento industrial do século XIX e do início do século XX foi afetado a partir de materiais com pouca melhoria, cujo comportamento podia ser descrito por leis relativamente simples (MARINHO, 2005).

O lançamento dos grandes programas tecnológicos e as mudanças impostas aos materiais pela crise de energia e pela evolução do mercado levou à constatação de que a maioria dos materiais tradicionais havia chegado ao limite (MARINHO, 2005).

A procura de performances técnicas que aliassem otimização e leveza motivou a concepção e utilização de materiais específicos, adaptados à solução tecnológica dos problemas impostos. Assim, surgiram materiais reforçados, heterogêneos, chamados compósitos (MARINHO, 2005).

Os compósitos compreendem uma classe de materiais que a cada dia ganha mais importância tecnológica. Uma prancha de surfe é um exemplo típico de um compósito onde

fibras de vidro são adicionadas em um polímero. Quando um material é preparado usando materiais de natureza distinta é denominado compósito (MOITA NETO, 2006).

Os compósitos podem ser fabricados de modo a impregnar o reforço com uma determinada matriz de tal forma que ao final do processo o componente sólido, com geometria definida, esteja praticamente em condições de ser utilizado (PARDINI, 2006).

### **1.3.1 Definições**

Compósito pode ser definido como material heterogêneo, multifásico, formado por, pelo menos, uma fase contínua e outra descontínua. A fase contínua é um polímero responsável pela transferência de esforços e denominada matriz polimérica. A fase descontínua, responsável pela resistência ao esforço é conhecida como componente estrutural (ANDRADE et al., 2001).

Materiais compósitos são aqueles que possuem pelo menos dois componentes ou duas fases, com propriedades físicas e químicas nitidamente distintas, em sua composição. Separadamente os constituintes do compósito mantêm suas características, porem quando misturados eles formam um composto com propriedades impossíveis de se obter com apenas um deles (site WIKIMEDIA, 2010).

Segundo Callister Jr., 2008, os compósitos com matriz polimérica (*PMC*) consistem em uma resina polimérica como a matriz, com fibras como meio de reforço.

No compósito pode-se distinguir uma fase de reforço, normalmente na forma filamentar, e outro aglutinante (a matriz), a qual permite que os reforços transfiram esforços mecânicos entre si e trabalhem de forma integrada (PARDINI, 2006).

### **1.3.2 Composição**

Os compostos fibrosos são constituídos por matrizes, de caráter contínuo, como os termoplásticos e termorrígidos, e por fibras vegetais, animais ou minerais (dispersas), de forma descontínua (fibra curta) e contínua (fibra longa) (site SUBSTECH, 2010).

### **1.3.3 Característica**

A característica básica dos compósitos é combinar, a nível macroscópico, pelo menos, duas fases distintas denominadas de matriz e reforço. Os compósitos obtidos a partir de reforços contínuos apresentam um excelente desempenho estrutural, considerando-se a resistência e a rigidez específicas. Estes materiais são muito resistentes a vários tipos de corrosão, e se

comparados às ligas metálicas estruturais são mais leve (por fatores superiores a até 4 vezes) (PARDINI, 2006).

Pode se citar outras características, tais como: leveza (devido ao peso específico das resinas e das fibras de reforço); apresentam alta durabilidade; facilidade na manutenção; e facilmente adaptáveis aos processos em utilização.

#### **1.3.4 Propriedades dos compósitos**

As propriedades dos compósitos são decorrentes do tipo de interação entre a matriz e o componente estrutural (ANDRADE et al, 2001).

A preparação de materiais compósitos visa imprimir novas propriedades aos materiais. O concreto que apresenta uma boa resistência à compressão e baixa resistência à tração pode formar um compósito com o aço, que tem boa resistência a tração. O casamento destas propriedades no concreto armado permite construir verdadeiras obras de arte de engenharia (MOITA NETO, 2006).

Sendo um material multifásico, um compósito exhibe além das propriedades inerentes de cada constituinte, propriedades intermediárias decorrentes da formação de uma região interfacial. As propriedades do compósito é uma função de fatores como a geometria da fase dispersa, distribuição, orientação e também da compatibilidade interfacial entre os constituintes da mistura (MOITA NETO, 2006).

#### **1.3.5 Relações reforço-matriz**

Segundo Marinho (2005), os materiais conjugados apresentam, para um peso reduzido, propriedades mecânicas particularmente interessantes. No entanto, seu desenvolvimento via de encontro a diversos problemas, pois sua performance condiciona-se às propriedades intrínsecas dos materiais constituintes do compósito e dependem, também, da adesão, ou seja, das interações que ocorrem entre o reforço e a matriz. Efetivamente, entre os fatores que governam a performance de um compósito, a adesão entre a matriz e o reforço desempenha um papel indiscutivelmente preponderante. Esse fenômeno se relaciona com a intensidade das forças intermoleculares na interface reforço-matriz e os parâmetros que o influenciam são numerosos, uma vez que dependem da natureza, intensidade e número de ligações interfaciais, assim como da estrutura dos constituintes e dos defeitos na interface.

É essencial que as forças de ligação adesivas entre a fibra e a matriz sejam grandes, para minimizar o arrancamento das fibras. É com frequência que a matriz determina a máxima temperatura de serviço, uma vez que ela normalmente amolece, funde ou degrada em uma temperatura muito mais baixa do que a fibra de reforço (CALLISTER Jr., 2008).

Segundo Andrade et al., 2001, adesão, é uma designação da propriedade responsável pela ligação de duas superfícies, baseada na ação de interações químicas ou físicas.

Para Mano & Mendes, 1999, adesão é o fenômeno que mantém superfícies juntas através de forças interfaciais; pode ser definida como a força de atração, ou energia de ligação, entre moléculas. Essas forças interfaciais podem ser mecânicas (encaixe), eletrostáticas (cargas elétricas), ou de atração molecular (forças de valência).

Conforme Marinho (2005), os parâmetros que influenciam a adesão entre matriz e reforço podem ser divididos em três classes:

- 1 – Os que se relacionam ao reforço (natureza e composição, preço e espessura);
- 2 – Os que concernem à matriz (propriedades reológicas, envelhecimento, história prévia);
- 3 – Os que se referem à interface (espessura, forças interfaciais, molhabilidade do reforço pela matriz, influência das impurezas e da água).

Relata Marinho, 2005, sobre os modelos de adesão, são eles: adesão mecânica, que consiste em um fenômeno de ancoramento mecânico da matriz nos poros e reentrâncias do reforço, após o endurecimento; e adesão específica, pode-se citar os modelos eletrostáticos (baseia-se nos fenômenos elétricos observados durante a separação de sólidos), de difusão interfacial, de adsorção termodinâmica, das ligações químicas e de Bikerman (esse modelo envolve uma camada interfacial de fraca coesão. Um sistema de dois sólidos aderidos não pode dar origem a uma ruptura aparentemente interfacial, a não ser onde a junção é falha, ou melhor, locais com ar ocluso, impurezas ou falha de homogeneidade no peso molecular da resina).

Segundo Mano (2007) a interface, formada entre a matriz e o reforço, tem influência dominante sobre as características do compósito. É comum melhorar a interface através do tratamento do componente estrutural com um agente compatibilizante. Por exemplo, fibras de vidro são tratadas com silanos, para melhor compatibilização às matrizes de poliéster.

### **1.3.7 Compósitos a base de fibras naturais (biocompósitos)**

A fabricação de compósitos a base de fibras naturais, biocompósitos, está se tornando frequente, pois possibilita uniformizar as características de ambos e formar novo material. Com

as novas tecnologias, a possibilidade de alterações das fibras, além dos meios ligantes se torna possível produzir compósitos com injeção de fibras naturais em diversas formas, promovendo soluções operacionais relacionadas com as propriedades físicas e mecânicas, dureza, densidade, e degradação, causada por raios ultravioleta, ácidos e bases.

Há alternativa de melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras vegetais, tais como a impregnação. Pode-se utilizar a incorporação de monômeros nas matrizes, no preenchimento dos vazios dos lignocelulósicos, melhorando com isso a resistência à compressão e a resistência à abrasão (dureza). Além disso, impõem-se restrições à livre movimentação de água para o interior, limitando com isso as condições de biodeterioração. Grupos tóxicos podem ser ligados a esses polímeros e com isso se obtém um material resistente ao apodrecimento (MEYER, 1981).

Na fabricação de compósitos, a escolha da fibra é principalmente baseada nos requisitos de projeto do produto final. As propriedades mecânicas finais dos compósitos são influenciadas não só pelo tipo de fibra, mas também pela atividade química superficial das mesmas, isto é, os grupos químicos superficiais presentes, ou mesmo por sua topografia superficial (PARDINI & NETO, 2006).

Entre as fibras naturais utilizadas em compósitos o amianto se destaca por apresentar valores elevados de resistência e rigidez, porém há restrições, devida associação ao desenvolvimento de doenças (câncer). Já, entre as mais citadas na literatura nas últimas décadas encontra-se o sisal, onde as folhas têm estrutura do tipo sanduíche, e a partir de cada uma delas pode-se extrair de 700 a 1400 fibras, que variam de 0,5 a 1 metro em comprimento (OKSMAN, 2000). Há, entretanto, diversas variedades de fibras naturais que são utilizados em compósitos, pode-se citar a malva, rami, coco, piaçava, entre outros.

## CAPÍTULO – 2

### 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata da metodologia aplicada na pesquisa. Preparo dos componentes e dos biocompósitos, realização dos ensaios para verificação das propriedades físicas e mecânicas, citando os métodos e normas utilizados para obtenção dos resultados.

#### 2.1 MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS

##### 2.1.1 Matriz polimérica

O homopolímero de polipropileno (KM-6100) foi fornecido pela empresa de resinas, Quattor Petroquímica S/A, com densidade de  $0,9 \text{ g/cm}^3$  e índice de fluidez ( $230^\circ\text{C}/2,16 \text{ kg}$ )  $3,2 \text{ g}/10 \text{ min}$ , adquirido na forma granulada como mostra a figura 2.1.



Figura 2.1 – Polipropileno (PP) oferecido para Quattor Petroquímica

### 2.1.2 Fibras (reforço)

As fibras de curauá utilizadas para a confecção dos biocompósitos foram fornecidas (in natura) pela Pematec, localizada na cidade de Santarém, no estado do Pará.

As fibras de licuri utilizadas são oriundas da cidade de Caldeirão Grande, no semi-árido do estado da Bahia, e retiradas de palmeiras de licuri.

## 2.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DOS BIOCOMPÓSITOS

O polipropileno precisa ser extrudado para se transformar em produto final. Em algumas aplicações podem receber mais aditivos e/ou pigmentos e/ou outros materiais em diversas formas: pó, granulados e líquidos, com intuito de oferecer ao produto acabado uma característica física especial (MANUAL DE POLIPROPILENO, 2007). Houve a necessidade do reprocesso do polipropileno nas mesmas condições de extrusão, onde foram fabricados os biocompósitos, para verificar o comportamento dos produtos após processo, comparando-os.

As amostras foram preparadas, a partir das misturas de “PP” com fibras de licuri e “PP” com fibras de curauá. Os biocompósitos foram obtidos na forma de grãos com as fibras picadas em percentuais de massa mostrados na tabela 2.1. A escolha desses percentuais em peso foi em função da limitação do processo de fabricação, ou seja, que foram possíveis de serem processadas na extrusora.

**Tabela 2.1 – Composição das amostras**

<i>Material</i>	<i>Percentual de fibras</i>
PP reprocessado	0 %
PP/ licuri	5 %
PP/ licuri	10 %
PP/ curauá	5 %
PP/ curauá	10 %
PP/ curauá	20 %

### 2.2.1 Preparação das fibras

As fibras de curauá foram lavadas com água para remover impurezas, penteadas, secadas, e picotadas. Em seguida foram condicionadas em bandejas de alumínio, conforme mostrado na figura 2.2.



Figura 2.2 – Fibras de curauá picotadas e condicionadas em bandeja de alumínio.

As fibras de licuri foram lavadas com água potável para retirada de impurezas e secadas. Foi retirada a cera impregnada nas fibras no laboratório de química do Instituto Federal da Bahia – IFBA.

As fibras foram mergulhadas por diversas vezes em um recipiente contendo hexano (hidrocarboneto, solvente alifático, obtido por destilação de frações do petróleo, possui alto poder extrativo de óleos e gorduras vegetais ou animais e rápida evaporação), por um período de 15 minutos. Aguardaram por 50 minutos na capela de exaustão para secagem. Após secagem na capela, as fibras foram lavadas com água potável aquecida, 75°C, para retirada do hexano, a posterior, as mesmas foram secas à temperatura ambiente.

Para encontrar o valor da cera, impregnada nas fibras, primeiramente foi medido o peso das fibras de licuri in natura em balança analítica, 313,27 gramas, e em seguida foi realizada uma nova medição do peso, 275,32 gramas, na mesma balança analítica após lavagem com hexano e secagem. Logo, obteve-se uma perda de peso de aproximadamente 12% nas fibras, correspondendo à cera retirada das fibras. Após todo este processo as mesmas, foram picotadas e condicionadas em bandeja de alumínio, conforme mostrado na figura 2.3.





Figura 2.3 – Fibras de licuri picotadas e condicionadas em bandeja de alumínio

### 2.2.2 Preparação do PP

O polipropileno granulado utilizado nos biocompósitos foi o KM6100, em saco de 25 kg. A especificação deste produto é demonstrada na tabela 2.2. Utilizada a tecnologia “Slurry” para fabricação.

Tabela 2.2 – Especificação do KM6100 (QUATTOR PETROQUÍMICA)

Propriedades	KM-6100
IF - 2,16 kg / 230°C, g/10min	3,2
Tensão de Escoamento à tração (50 mm/min.), MPa	38
Alongamento no Escoamento à tração (50 mm/min.), %	6,7
Tensão de Ruptura à tração (50 mm/min.), MPa	22,1
Deformação de Ruptura à tração (50 mm/min.), %	157,6
Módulo de Flexão (1,3 mm/min.), MPa	1550
HDT 455 KPa, °C	95,5
Vicat 1 Kg, °C	156,4
XO, %	3,2

### 2.2.3 Obtenção dos biocompósitos granulados

Tanto as fibras picotadas, quanto PP granulado, foram acondicionadas em bandejas de alumínio, seguiram para estufa, conforme mostrado na figura 2.4, sem circulação de ar, a uma

temperatura de 80°C, e por um período de 24 horas para retirada da umidade. Os biocompósitos gerados por esta mistura também passaram pelo mesmo processo de secagem.



Figura 2.4 – Estufa da PALLEY

As bandejas foram retiradas da estufa e pesadas em balança, em seguida adicionadas a extrusora do tipo “IMACON” – dupla rosca, sistema de alimentação volumétrica com capacidade máxima de 2 kg/h (figura 2.5). Os processamentos na extrusora ocorreram a uma carga (mistura) de 1 kg/h. Por exemplo, para os biocompósitos de PP a 5% de fibras de licuri: 50 gramas foi de fibras licurí e 950 gramas de polipropileno granulado, medidos em balança analítica. Efetuou-se purgas a cada passagem pela extrusora, com o intuito de evitar contaminação para os demais materiais. A temperatura média dos barris, aquecida com resistência elétrica, do corpo da extrusora foi de 180°C e rotação de 210 rpm.

Os valores de temperatura e rotação da extrusora foram estabelecidos, com intuito de se evitar formação de bolhas, presentes nos materiais ao aumentar a rotação do eixo. Quando se baixava a rotação do eixo, provocava a baixa fundição e a queima das fibras.



Figura 2.5 – Extrusora utilizada na obtenção dos biocompósitos

O PP foi adicionado na rosca transportadora e as fibras picotadas na abertura lateral, entre a rosca e a extrusora, conforme figura 2.6. Ambas prosseguiram em direção a entrada da extrusora, onde foi promovida a fundição e mistura dos elementos. Ao sair da mesma, por dois pequenos furos e com forma de “cordões” (figura 2.7), foram encaminhados ao reservatório com água com intuito de resfriá-los e solidificá-los, conforme figura 2.8a. Seguindo o processo, estes cordões foram enviados ao granulador, observe na figura 2.8b, onde foram granulados com o equipamento de corte, granulador, formando biocompósitos granulados. Estes foram condicionados em silo receptor, e um “Blender Manual”, onde foi promovida a homogeneização dos mesmos, antes da injeção, para fabricação dos corpos de prova.

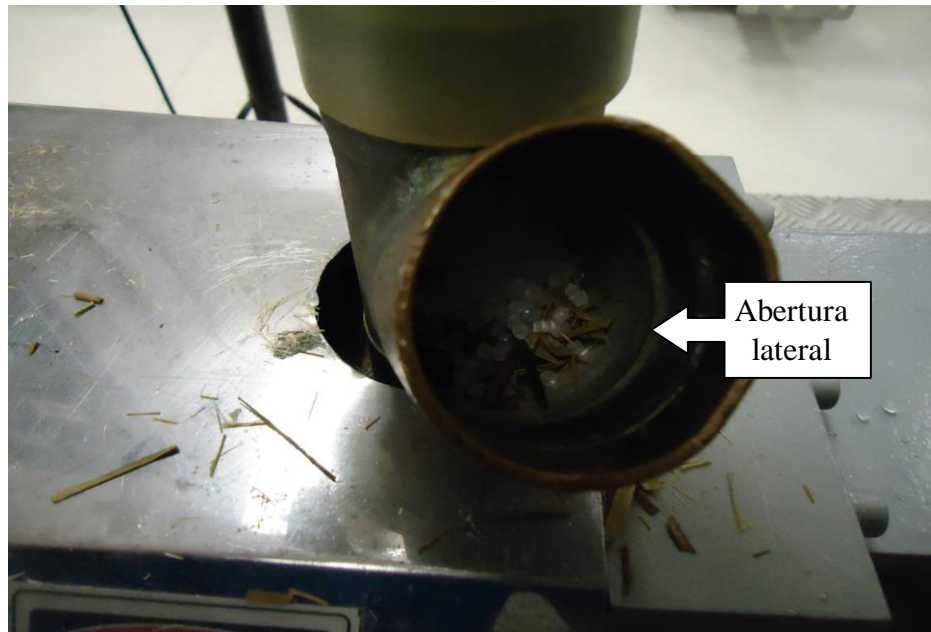


Figura 2.6 – Abertura lateral por onde foram adicionadas as fibras picotadas

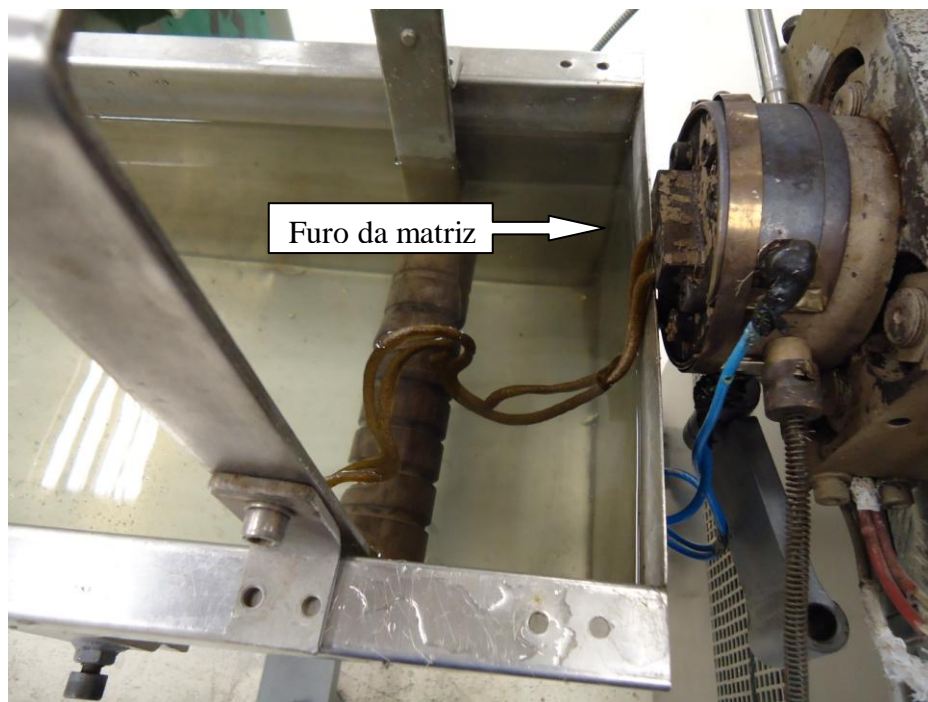


Figura 2.7 – Saída da mistura pelos furos da matriz da extrusora



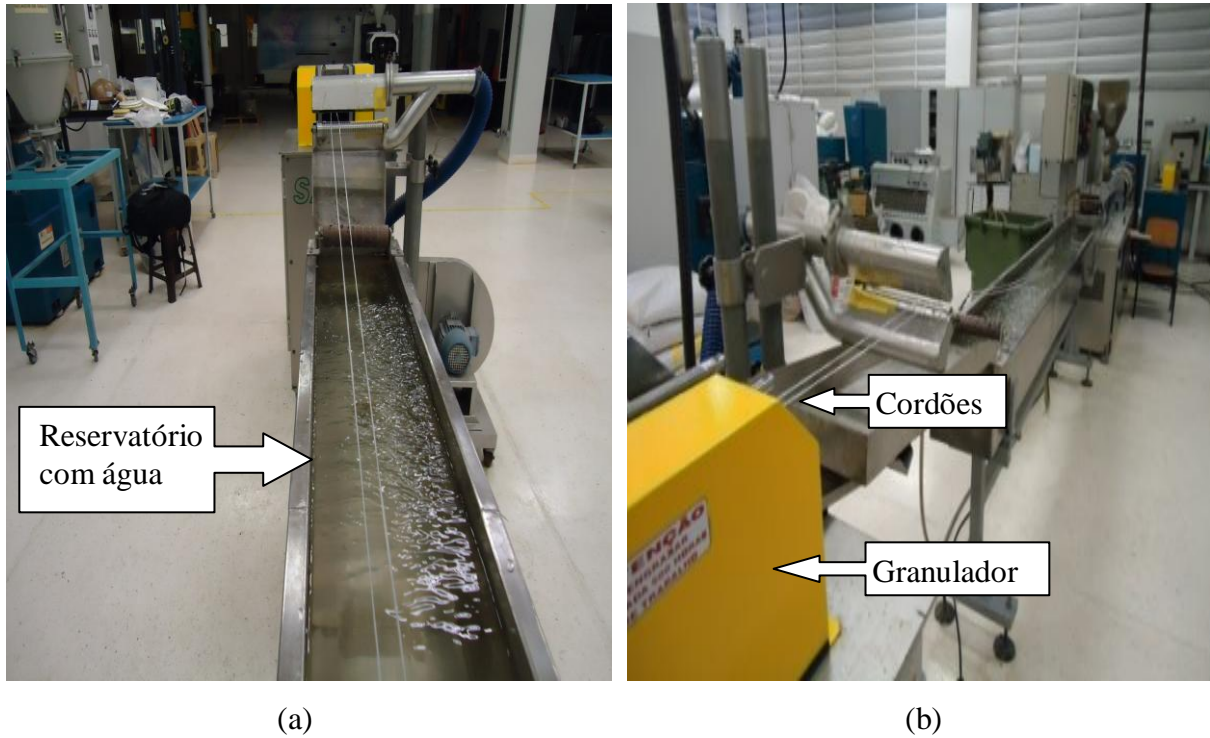


Figura 2.8 (a) – Reservatório com água onde as misturas foram solidificadas; (b) - Cordões sendo enviados para o granulador

Os biocompósitos granulados produzidos, conforme mostra a figura 2.9, foram direcionados para a estufa para retirada da umidade por um período de 24 horas, devido passagem pelo tanque de resfriamento com água. Em seguida, estes foram adicionados em um funil alimentador da injetora do tipo “ROMI”, seguindo a norma ISO527- 93, (figura 2.10).

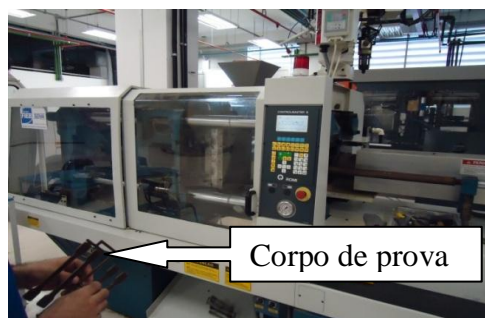


Figura 2.9 – Biocompósitos granulados utilizados para preparação dos corpos de prova na Injetora ROMI

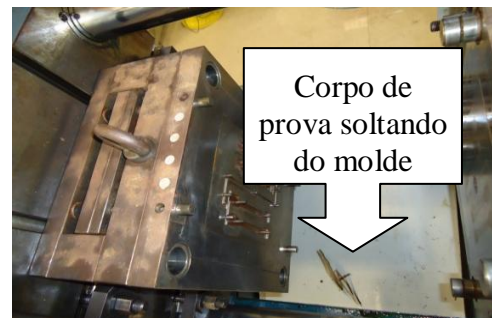


Figura 2.10 – Injetora da ROMI utilizada na preparação dos corpos de prova

Do funil, os grãos, foram direcionados para um molde por um bico direcionados, acionado por um pistão com pressão de 500 bar e velocidade de 120 cm<sup>3</sup>/s para todas as amostras. O processo se sucedeu com uma temperatura de 180 °C em todas as zonas. O ciclo total da injeção ao resfriamento do corpo de prova foi de 30 segundos. A norma utilizada para fabricação dos corpos de prova foi a ISO527 – (1993), (molde / dimensionamento) referente aos ensaios de tração, impacto e flexão de três pontos. A representação da ordem de preparo dos corpos de prova é vista nas figuras 2.11 a, b, c e d.



(a)



(b)



(c)

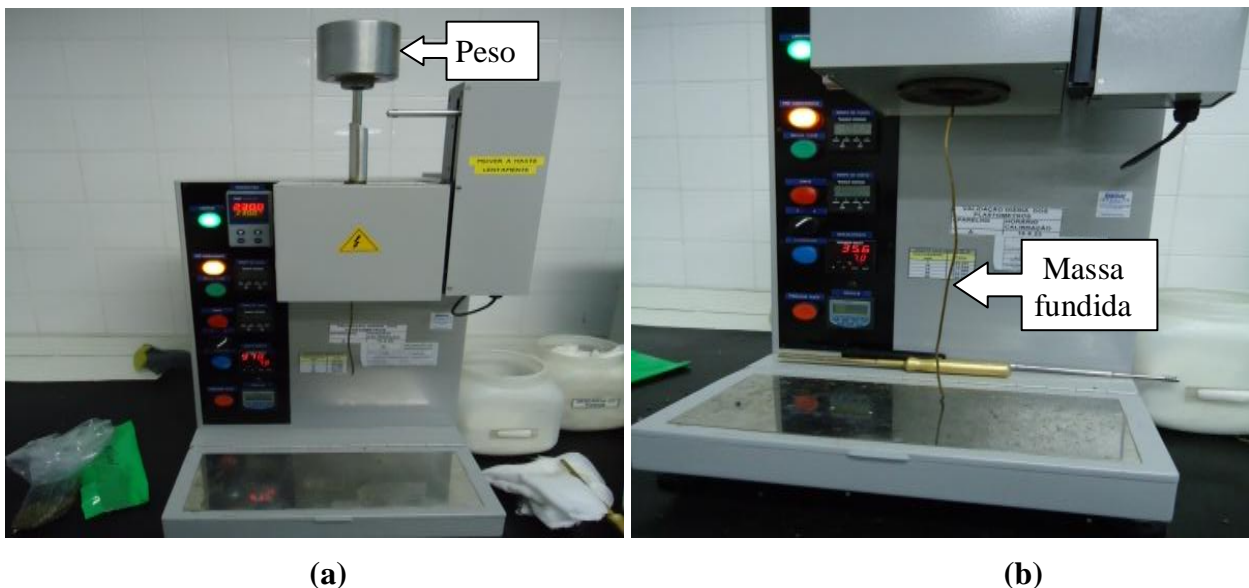


(d)

Figuras 2.11 (a) Injetora; (b) Molde; (c) Corpos de prova retirados do molde; (d) Corpos de prova prontos para ensaios.

## 2.2.4 Índice de fluidez (IF) após reprocessamento

Grãos de todas as composições, inclusive do PP reprocessado, foram separados para verificar a degradação térmica provocada pela extrusora. Na fabricação do polipropileno fornecido pela empresa, os grãos passaram por processo de extrusão em sua unidade industrial. Utilizou-se da análise de índice de fluidez – IF, para comparar a degradação térmica entre as amostras, a escolha está relacionada com a massa molar. Nos polímeros, baixa viscosidade, representa baixa massa molar, ou seja, pequenas cadeias poliméricas. Estes necessitam de menor temperatura e uma menor força, para que passe pelo orifício do plastômetro. O índice de fluidez influencia no desempenho dos polímeros durante os processos e reprocessos de transformação. A depender do tamanho da cadeia, a carga de alimentação da extrusora é limitadora. Com alta massa molar a carga é reduzida para que haja uma fusão satisfatória. Em laboratórios de granulação da empresa fornecedora da matéria-prima efetuaram-se as análises, seguindo padrões e procedimentos da empresa, com base da norma ASTM D1238-1995. O aparelho utilizado para encontrar os valores referentes ao índice de fluidez foi da DIGITROL, com temperatura de trabalho de 230 °C. Nas figuras 2.12 a e b e figuras 2.13 a e b, encontram-se os equipamentos que demonstram os procedimentos usados para a medição do índice de fluidez.



Figuras 2.12 (a) - Peso impulsionando os grãos fundidos a passar por um orifício padrão; (b) - Massa fundida passando pelo orifício padrão.





(a)



(b)

Figuras 2.13 (a) – O peso encosta na base de encosto; (b) – Aparelho DIGITROL (balança analítica) utilizada para medir a massa passante do orifício padrão.

## 2.3 ENSAIOS REALIZADOS

### 2.3.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado pela máquina universal de ensaio, “EMIC”, modelo DL – 2000 no laboratório de polímeros do SENAI-Ba. Capacidade máxima de 20KN. Em seguida, o corpo de prova foi fixado nas garras da máquina, conforme mostra a figura 2.14. O ensaio foi realizado a uma velocidade de 5 mm/min, medindo-se as seguintes propriedades mecânicas: tensão de escoamento, tensão de ruptura e módulo elástico. Mediu-se também a tensão máxima e deformação (%). Os dados gerados foram oriundos do programa “VIRMAQ” que serve para controle e aquisição de dados do equipamento de ensaio universal.



Figura 2.14 – Máquina universal de ensaios, tração – EMIC



Para a confecção dos corpos de prova utilizou-se a norma ISO-527(1993) do tipo gravata com as seguintes dimensões: espessura ( $h$ ) com 4,0 mm; distância entre apertos ( $L$ ), 115,0 mm; comprimento útil ( $L_0$ ), 50,0 mm; comprimento da parte estreita ( $L_1$ ), 78,0 mm; distância entre as partes dos lados paralelos ( $L_2$ ), 104,5 mm; comprimento total ( $L_3$ ), 150,0 mm; largura entre extremidades ( $b_2$ ), 20,0 mm; largura parte estreita ( $b_1$ ), 10,0 mm; e raio ( $r$ ) de 60 mm. As letras correspondentes estão visíveis na figura 2.15.

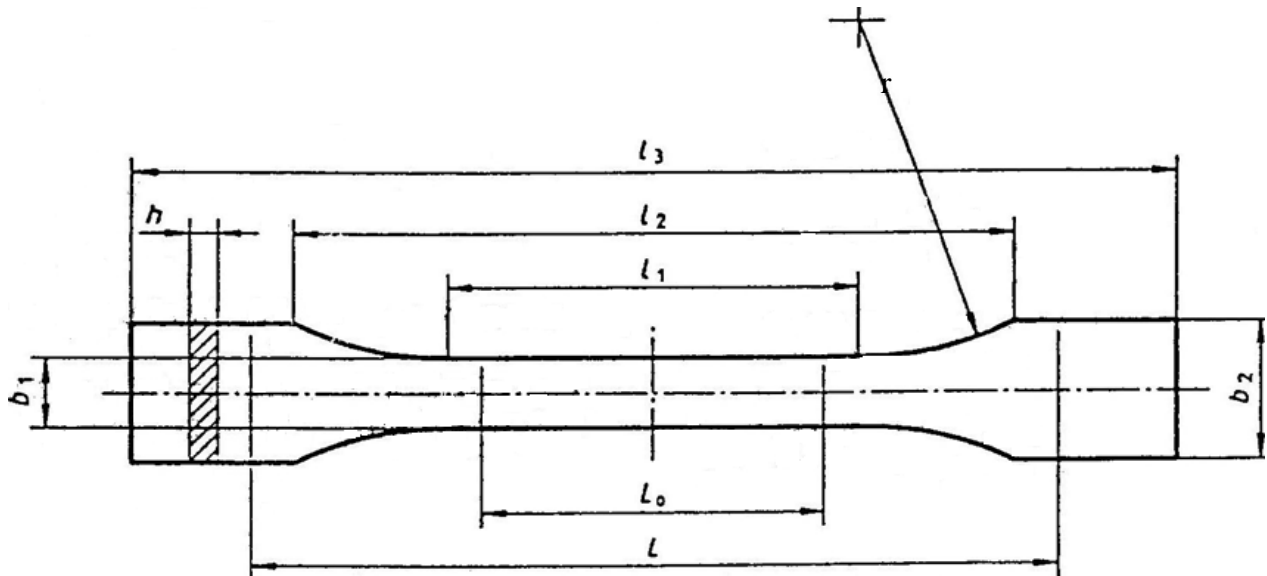


Figura 2.15 – Corpo de prova para o ensaio de tração.

Para o cálculo das propriedades mecânicas do material, utilizou-se ainda a norma ISO-527 (1993), porém devido à verificação de uma região linear e outra não-linear nos gráficos de tensão deformação, calculou-se também a tensão de escoamento do material, para este caso o método adotado foi o do limite Johnson (Souza, 1982)

### 2.3.2 Ensaio de impacto

Os corpos-de-prova, conforme norma ISO-180 (1993), foram submetidos ao ensaio de impacto (IZOD – “Edgewise” (e)) na máquina de impacto (EMIC), no laboratório de polímeros do SENAI-Ba, conforme figura 2.16, onde se obteve como resultado a energia absorvida e após divisão com a área transversal dos corpos de prova, obteve-se a resistência ao impacto.

O corpo-de-prova do tipo retangular tem as seguintes dimensões: espessura ( $h$ ) com 4,0 mm; comprimento total ( $L$ ), 78,0 mm; largura ( $b$ ), 10,0 mm; sem entalhe. Mostra-se na figura 2.17 um desenho do corpo de prova, bem como a direção do impacto realizado, esta direção é

uma das possibilidades de análise e se encontra no item “Edgewise” letra (e) da norma ISO-180 (1993) anteriormente citada.



Figura 2.16 – Máquina de impacto – EMIC

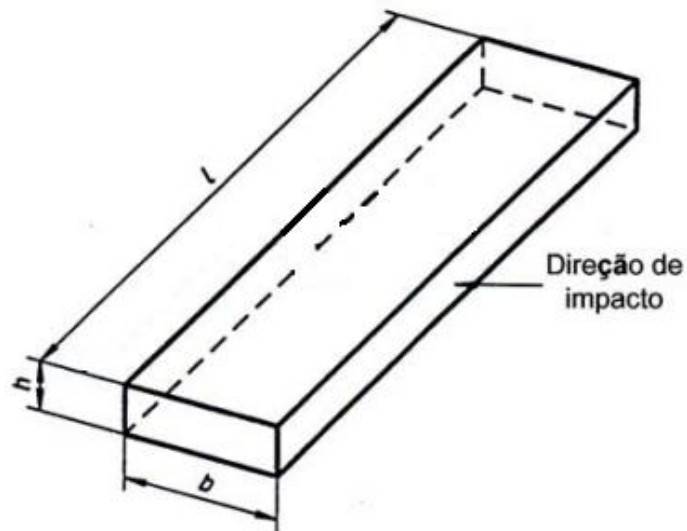


Figura 2.17 – Corpo de prova para o ensaio de impacto – ISO180

### 2.3.3 Ensaio HDT

Para verificação da influência da temperatura nos biocompósitos, utilizou-se dos ensaios térmicos. Medindo-se a Temperatura de Deflexão Térmica (HDT) nos corpos de prova, conforme norma ISO-75 (1993), são imersos sob o efeito de uma carga (450 Pa) em um meio de transferência de calor, a uma taxa de aquecimento de 2°C/min. A temperatura do meio é medida quando a amostra sofre uma deflexão de 0,34 mm, sendo a mesma registrada como a temperatura de deflexão térmica. A figura 2.18 mostra a máquina utilizada no ensaio, HDT 300 VICAT – CEAST localizada no laboratório de polímeros do SENAI-Ba.

O corpo-de-prova (CP) do tipo retangular tem as seguintes dimensões: espessura (h) com 4,0 mm; comprimento total (L) do “CP”, 78,0 mm; distância entre dois apoios fixos (l), 64,0 mm; largura (b), 10,0 mm; deflexão (D), 0,34 mm; e a carga aplicada (f), 450 Pa. Verifica-se o ponto de carregamento na figura 2.19. E na figura 2.20 observa-se um esquema que representa um ensaio de HDT.

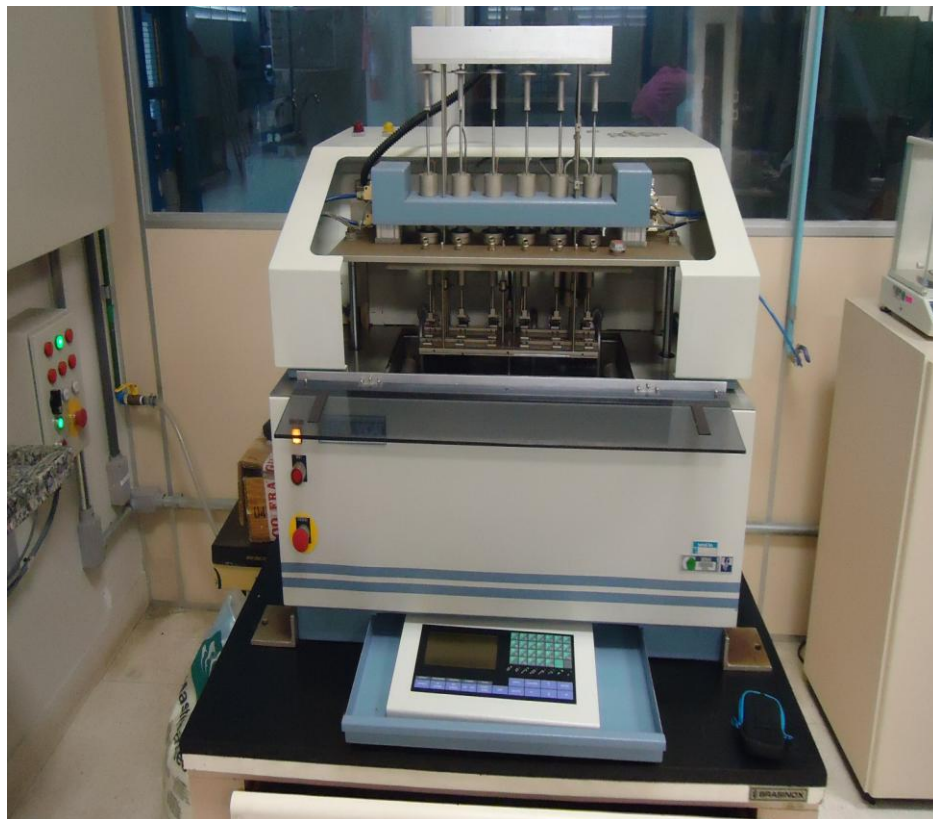


Figura 2.18 – Máquina de medição de HDT da VICAT

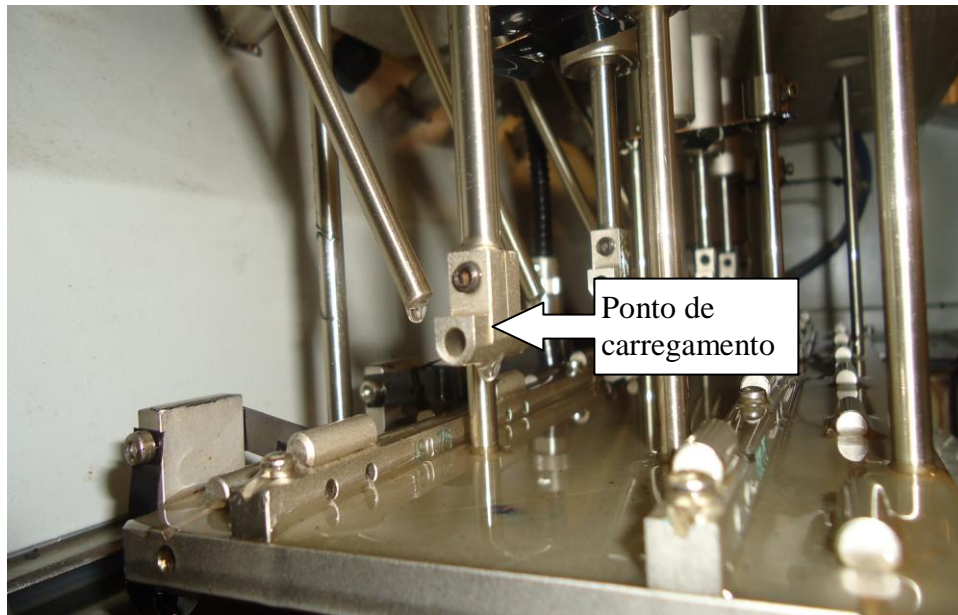


Figura 2.19 – Ponto de carregamento da máquina de medição da HDT da VICAT

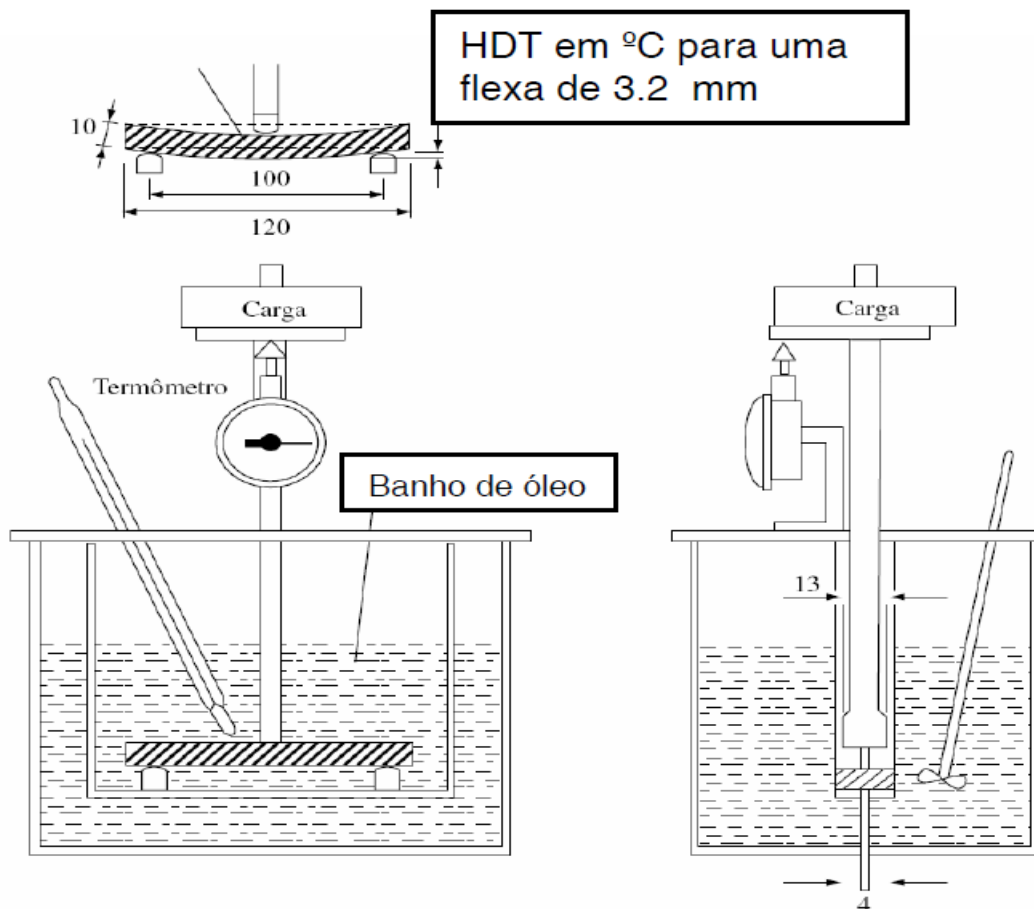


Figura 2.20 – Representação do esquema de um ensaio HDT (CAMARGO, 2006)

### 2.3.4 Ensaio de flexão em três pontos

Os corpos-de-prova para os ensaios de flexão foram obtidos da injetora “ROMI”. Os ensaios foram realizados na máquina de ensaio universal da SHIMADZU, no laboratório de materiais – UFRN, conforme figura 2.21, segundo a norma ISO-178 (1993), com velocidade de ensaio de 1,0 mm/min, e célula de carga de 2KN. Foram realizados oito ensaios para cada configuração analisada.

Os corpos de prova (CP) do ensaio de flexão são do tipo retangular e tem as seguintes dimensões: espessura ( $h$ ) com 4,0 mm; comprimento total ( $L$ ) do “CP”, 78,0 mm; distância entre dois apoios fixos ( $l$ ), 64,0 mm; largura ( $b$ ), 10,0 mm; e ( $F$ ) a força aplicada. As letras correspondentes estão demonstradas na figura 2.22.



Figura 2.21 – Máquina de flexão da SHIMADZU

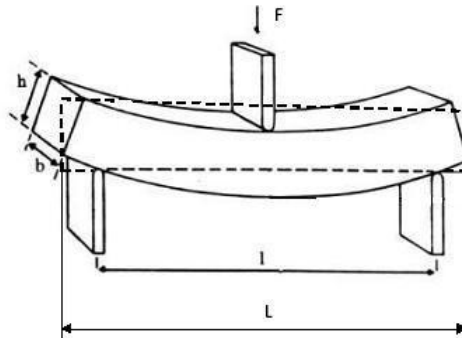


Figura 2.22 – Corpo de prova para o ensaio de flexão.

## CAPÍTULO – 3

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresenta-se neste capítulo os resultados obtidos dos ensaios de tração, impacto, HDT, flexão em três pontos para os biocompósitos produzidos, bem como as análises do índice de fluidez. Também foi feito estudo comparativo das propriedades mecânicas dos biocompósitos com PP reprocessado e entre eles.

#### 3.1 Análises do Índice de Fluidez (IF)

A tabela 3.1 apresenta os resultados das análises dos índices de fluidez. Os valores indicam a viscosidade do polímero fundido, realizados nos grãos de PP reprocessado e nos biocompósitos utilizados.

Tabela 3.1 – Média dos valores encontrados dos grãos submetidos à análise de IF

<i>Composições</i>	<i>Médias dos Valores<sup>*</sup></i> <i>g/10min</i>
PP puro	3,20
PP reprocessado	5,10
PP com 5% de licuri	3,11
PP com 10% de licuri	3,10
PP com 5% de curauá	3,71
PP com 10% de curauá	3,70
PP com 20% de curauá	2,40

<sup>\*</sup>A precisão destes resultados é de +/- 0, 01.

A partir dos resultados apresentados na tabela 3.1, desenvolveu-se o gráfico da figura 3.1, e por este gráfico, percebe-se, que ao comparar o PP puro com o resultado do PP reprocessado, o valor encontrado de IF possuiu um aumento, de 3,2 para 5,1, (variação de 59,4%). Devido à oxidação e degradação térmica, provocada no reprocesso.

Observa-se que os valores obtidos nas misturas de fibras de licuri (5%)/PP e fibras de licuri (10%)/PP possuíram valores próximos da do índice de fluidez do “PP puro”. Entretanto, os

valores obtidos para os biocompósitos com 5% fibras de curauá e biocompósitos com 10% fibras de curauá, foram superiores, em relação aos biocompósitos com reforço de fibras de licuri, (variação percentual 19,3%). Devido composição das fibras. Já o valor encontrado do IF da mistura do PP com 20% de curauá diminuiu a fluidez da mistura, fibras de curauá/PP.

Estes resultados são importantes, pois o uso de fibras naturais reduz a degradação térmica da mistura, fibras naturais/polipropileno durante o seu processamento. Consequência do aumento da adição de carga e redução da resina, na proporção da mistura. Se os maquinários preparados para processar o PP, estiveram especificados para trabalhar com faixa de IF do KM6100, estes biocompósitos não afetaram o desempenho de transformação da resina, durante o processo e reprocesso, viabilizando a utilização dos mesmos, com possibilidade de reciclagem.

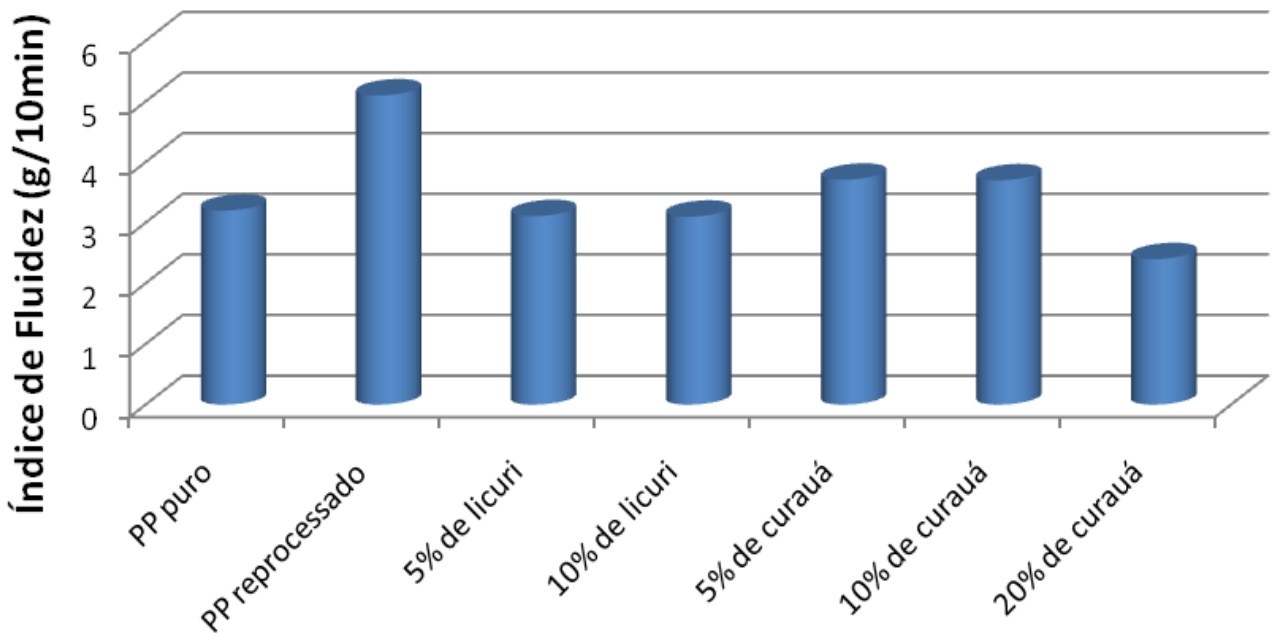


Figura 3.1 – Índice de fluidez dos biocompósitos de curauá e licuri, PP puro e PP reprocessado

Foi observado em outro trabalho, realizado pelo autor Ota (2004), que os dados informados pelo fabricante de polipropileno, Polibrasil, sobre as propriedades dos compósitos com 20 % e 30 % de fibras de vidro, apresentou efeito semelhante aos resultados obtidos para as fibras de curauá e licuri aqui estudados. Os valores apresentados mostram que o acréscimo de fibras de vidro em conjunto com o polipropileno homopolímero (que é diferente do aqui pesquisado, PP Km 6100) diminuiu a fluidez, reduzindo a degradação térmica da mistura.



### 3.2 Ensaio de Tração Uniaxial do Polipropileno Reprocessado

A tabela 3.2 apresenta os resultados do ensaio de tração do PP reprocessado com velocidade de 5,0 mm/min.

Tabela 3.2 – Resultados do polipropileno reprocessado obtidos do ensaio de tração

<i>Tensão Máxima</i>	<i>Tensão de Escoamento</i>	<i>Módulo de Elasticidade</i>
25,94 MPa	16,4 MPa	1082 MPa

Neste ensaio os corpos de prova não romperam, porém possuíram valores de tensão máxima e de escoamento, conforme visualização da figura 3.2.

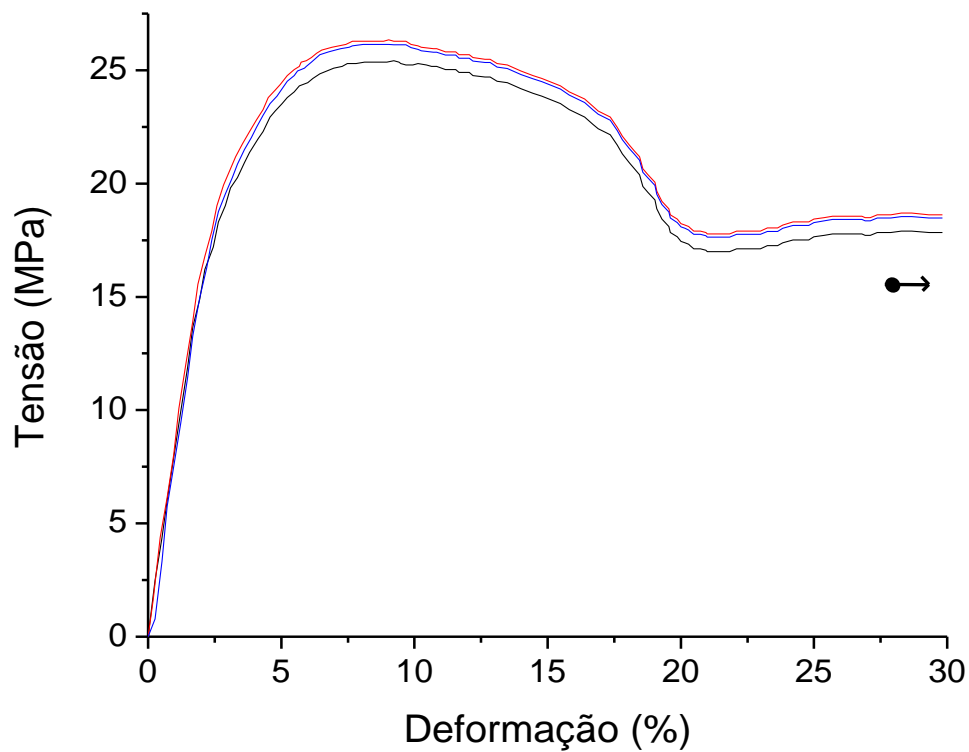


Figura 3.2 – Ensaio de tração do PP reprocessado com velocidade 5 mm/min

### 3.3 Ensaio de Flexão em Três Pontos do Polipropileno Reprocessado

A tabela 3.3 e a figura 3.3 apresentam os resultados do ensaio de flexão em três pontos do PP reprocessado.

Tabela 3.3 – Média dos valores encontrados no ensaio de flexão em três pontos

<i>Tensão Máxima</i>	<i>Módulo de Elasticidade</i>
40,84 MPa	1094 MPa



Aqui também, como ocorreu nos ensaios de tração, os corpos de prova não fraturaram, porém conforme pode ser visto na figura 3.3, se verificou um valor de tensão máxima.

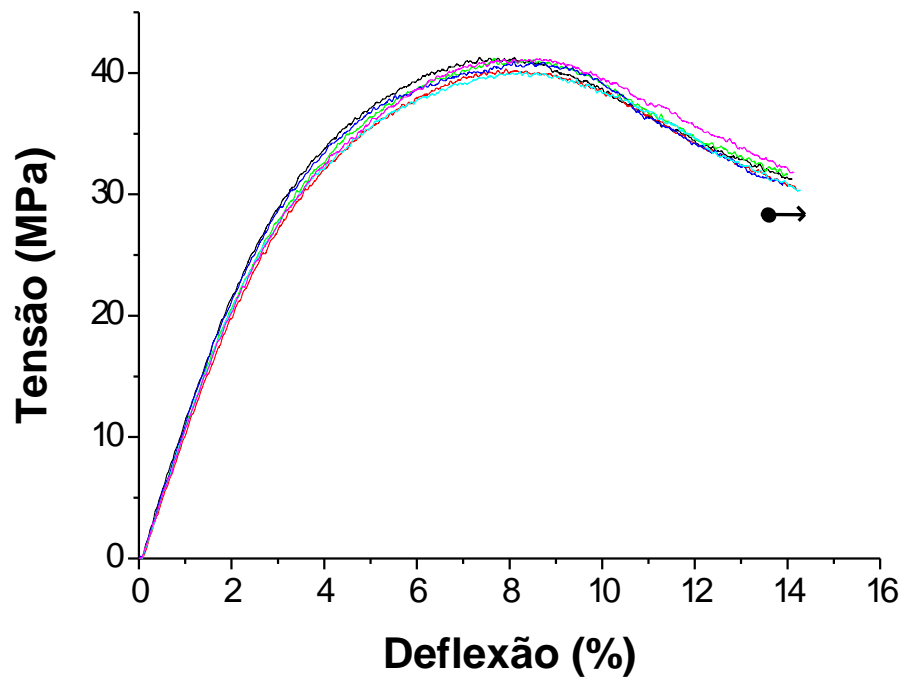


Figura 3.3 – Ensaio de flexão em três pontos do PP reprocessado

### 3.4 Biocompósitos de Polipropileno com Fibra de Curauá

Neste item apresentar-se-á os resultados referentes aos biocompósitos, matriz a base de polipropileno (PP) reforçado com fibra de curauá, onde serão apresentados os ensaios mecânicos de tração uniaxial, flexão em três pontos, de temperatura de distorção térmica (HDT), e de impacto.

#### 3.4.1 Ensaio de tração

Apresentam-se nas figuras 3.4, 3.5 e 3.6, os diagramas tensão versus deformação dos corpos de prova ensaiados à tração, dos biocompósitos com 5 %, 10 % e 20 % de fibras de curauá, respectivamente. Pelos resultados apresentados, percebe-se que a dispersão obtida entre as amostras foi pouco significativa, exceção se faz somente ao valor de deformação de ruptura que varia significativamente.

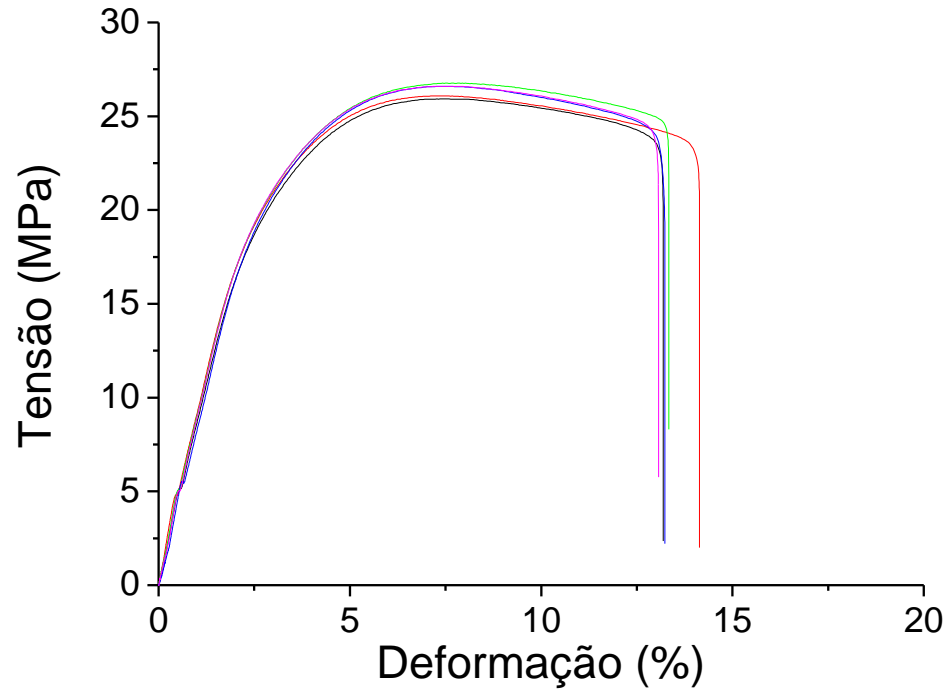


Figura 3.4 – Ensaio de tração do biocompósito - curauá 5%

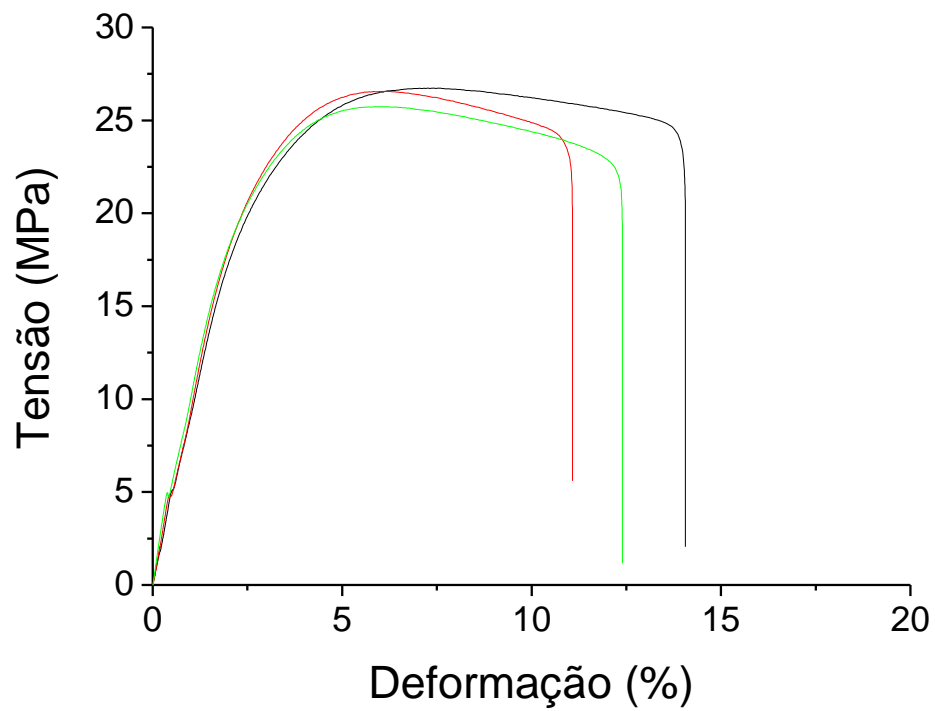


Figura 3.5 – Ensaio de tração do biocompósito - curauá 10%

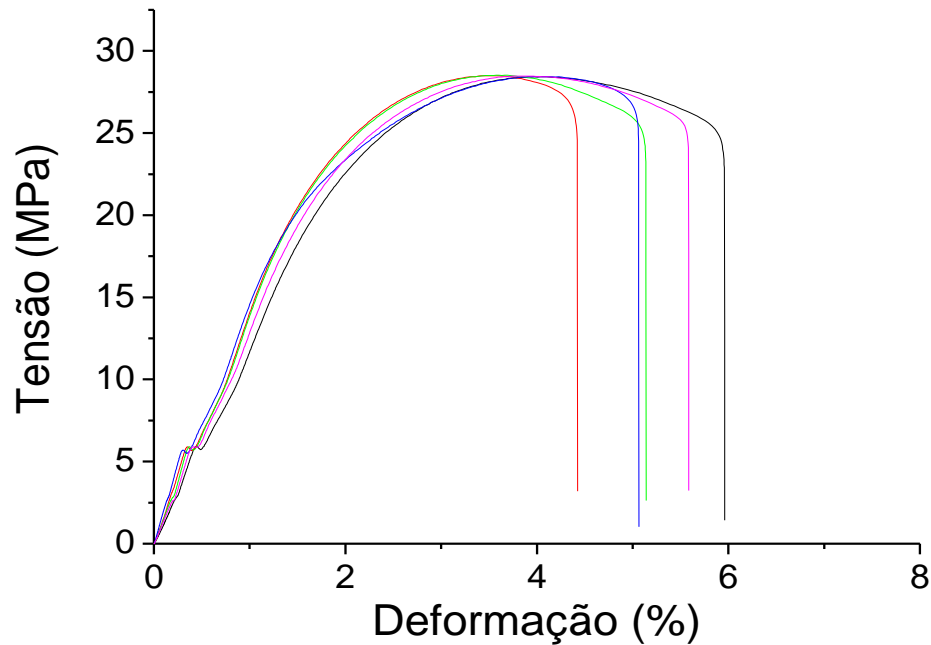


Figura 3.6 – Ensaio de tração do biocompósito - curauá 20%

Apresentam-se na tabela 3.4 os resultados da tensão máxima, tensão de escoamento, tensão de ruptura, deformação de ruptura e do módulo de elasticidade. Observa-se por meio desta tabela que a presença das fibras de curauá no polipropileno não alterou a tensão máxima para os biocompósitos de 5 % a 10 %. Já para os biocompósitos a 20 %, houve um aumento, em torno de 2,53 MPa em relação ao PP (variação percentual de 9,7 %).

Na tensão de escoamento, ocorreu um aumento destes valores com o incremento de fibra de curauá de modo mais significativo, neste caso, a maior variação verificada foi de 5,4 MPa do curauá de 20 % em relação ao PP (variação percentual de 33 %). Verifica-se também para tensão de ruptura, que o biocompósitos com 20% de fibras de curauá obteve um maior incremento de valores em relação ao biocompósitos com 5% de fibras de curauá (variação percentual de 4,2 %).

Tabela 3.4 – Resultados do polipropileno e dos biocompósitos a base de fibra de curauá obtidos no ensaio de tração.

<b>Materiais</b>	<b>Tensão Máxima (MPa)</b>	<b>Tensão de Escoamento (MPa)</b>	<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	<b>Deformação na Ruptura (%)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>
PP reprocessado	25,94	16,4	—	—	1082
Curauá 5%	26,34	17,6	23,97	14,90	1040
Curauá 10%	26,24	18,0	24,21	13,08	1176
Curauá 20%	28,47	21,8	26,07	5,46	1367

Para melhor exemplificar os resultados apresentados, apresentam-se na figura 3.7 as curvas tensão x deformação das médias dos materiais biocompósitos à base de fibra de curauá e do PP reprocessado, na qual se percebe que o aumento do percentual de fibras influencia significativamente na deformação de ruptura e no comportamento à tração do material.

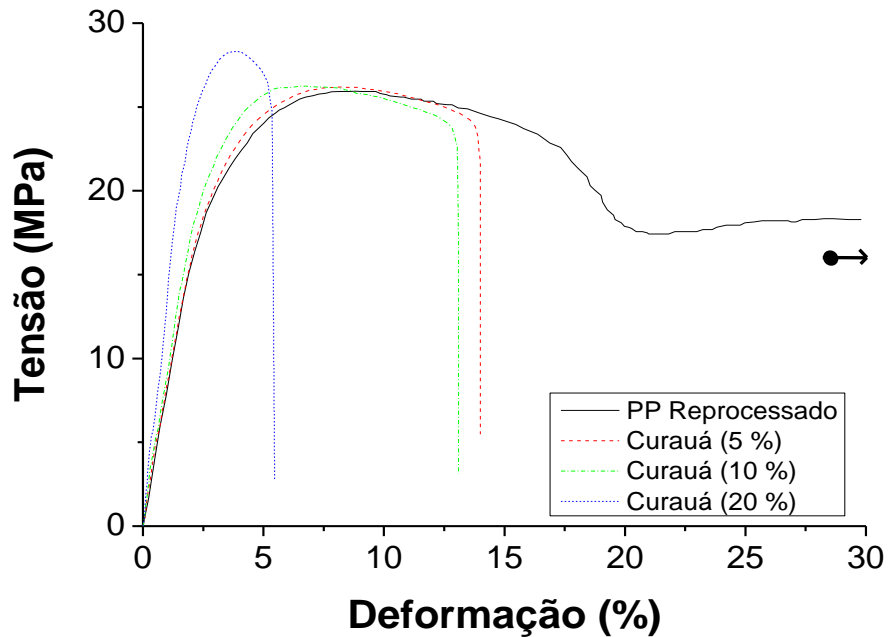


Figura 3.7 – Ensaio de tração dos biocompósitos de curauá e PP reprocessado

Na deformação de ruptura percebeu-se uma diminuição desta com o aumento do percentual de fibra de curauá. Comparando os resultados obtidos dos biocompósitos, já que o PP reprocessado não rompeu, observa-se que houve uma diminuição de 12,2 % para os biocompósitos com 10 % de curauá e 63,4 % para os biocompósitos com 20 % de curauá, em relação aos biocompósitos com 5 % de curauá, por este resultado percebe-se que a adição de fibras reduz a tenacidade do polipropileno. Isso ocorre devido ao polipropileno quando puro escoar facilmente diminuindo a sua seção útil sem a ocorrência de fratura, enquanto que quando combinado a uma fibra o escoamento se torna mais complexo, tendo ainda o inconveniente do aparecimento de tensões residuais na interface fibra matriz.

No caso a rigidez a tração para os biocompósitos a 5% e 10% não houve alterações significativas em relação ao PP. Porém, com o uso de 20% de curauá no compósito, se verificou um aumento na rigidez de 1082 MPa (PP reprocessado) para 1367 MPa, um aumento de aproximadamente 30%.

### 3.4.2 Ensaio de flexão

As figuras 3.8 a 3.10 apresentam os resultados dos diagramas tensão versus deflexão dos biocompósitos de polipropileno a base de fibra de curauá com 5%, 10% e 20%, respectivamente. Pelos resultados apresentados nestas figuras, percebe-se que a dispersão obtida entre as amostras foi pouco significativa para todos biocompósitos à base de fibra de curauá e que somente o comportamento inicial destes biocompósitos podem ser considerado linear. Vale salientar ainda, que apesar de existir um valor de tensão máxima em todos os corpos de prova, nenhum dos materiais sofreu ruptura, devido à grande capacidade de deformação do polipropileno.

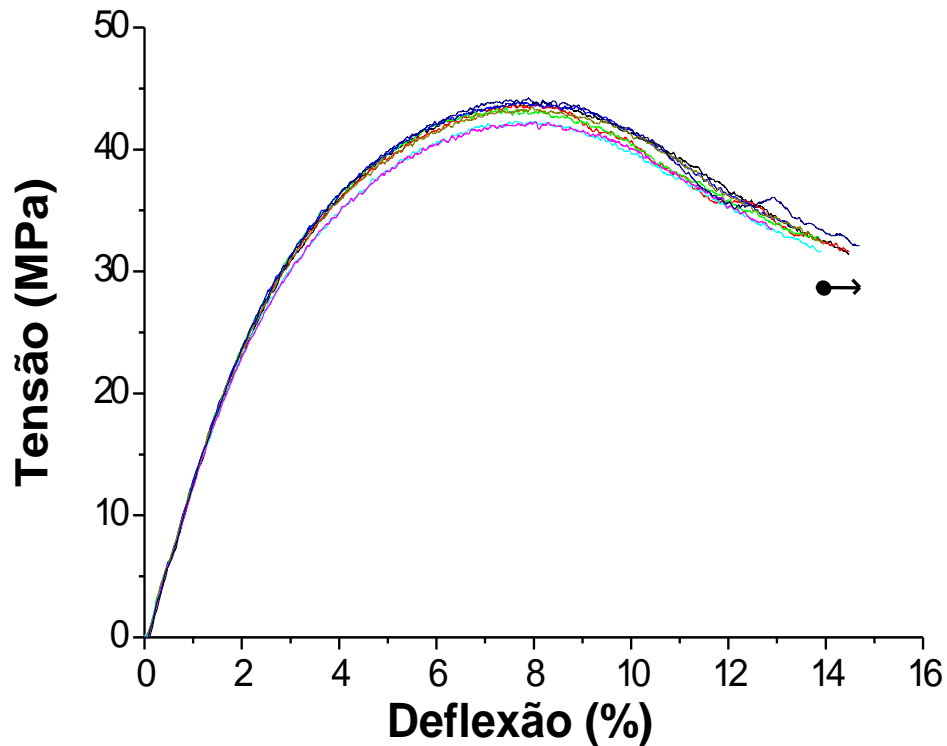


Figura 3.8 – Ensaio de flexão em três pontos do biocompósito de curauá 5%

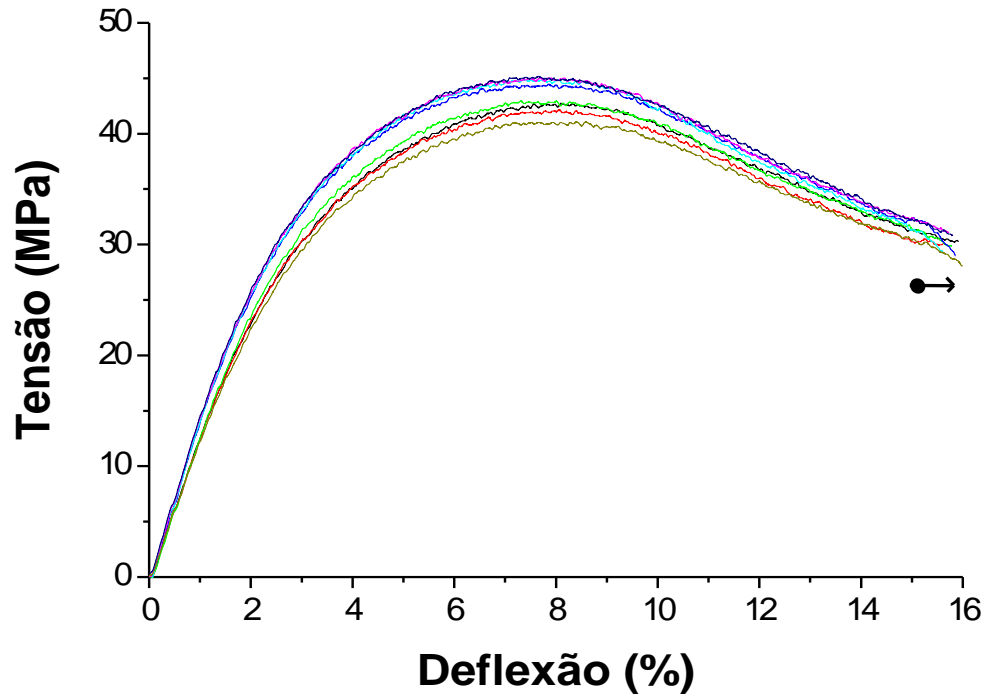


Figura 3.9 – Ensaio de flexão em três pontos do biocompósito de curauá 10%

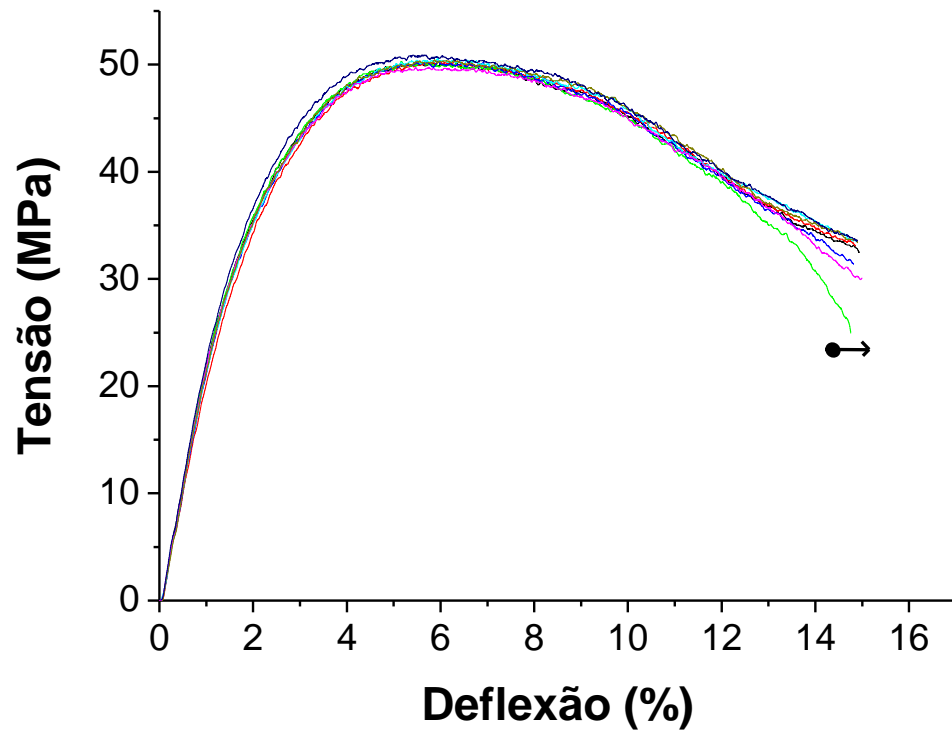


Figura 3.10 – Ensaio de flexão em três pontos do biocompósito de curauá 20%

Apresentam-se na tabela 3.5 os resultados do polipropileno e dos biocompósitos a base de fibra de curauá obtidos no ensaio de flexão em três pontos. A partir destes resultados, percebe-se que o aumento no percentual de fibra aumentou a tensão máxima, na qual o valor subiu de 40,84 MPa no PP reprocessado para 50,34 MPa no biocompósito com 20% curauá, tendo assim um aumento percentual de 23,3%.

Tabela 3.5 – Resultados do polipropileno e dos biocompósitos a base de fibra de curauá obtidas no ensaio de flexão em três pontos.

<i><b>Materiais</b></i>	<i><b>Tensão Máxima (MPa)</b></i>	<i><b>Módulo de Flexão (MPa)</b></i>
PP reprocessado	40,84	1094,68
Curaruá 5%	43,16	1259,73
Curauá 10%	43,57	1300,48
Curauá 20%	50,34	1907,47

Analisando agora a rigidez à flexão este aumento se tornou ainda mais evidente, pois com o uso de 20% de curauá o modulo subiu de 1095 MPa com 0% de fibra (PP reprocessado) para 1907 MPa com 20% de fibra de curauá, um aumento de 74 %. Percebe-se também pelos resultados apresentados na tabela 3.5, que os valores da resistência e rigidez, obtidos para os biocompósitos com 5% de curauá e com 10% são muito próximos. Com uma variação percentual de 0,95% de resistência e 3,2% de rigidez entre os biocompósitos de 5 e 10 %.

Apresenta-se na figura 3.11 um gráfico comparando as curvas médias de PP com curauá e o PP reprocessado, por estes resultados percebe-se o que foi dito anteriormente, que o aumento de 5 para 10 % não influenciou significativamente os resultados obtidos na flexão. Além disso, percebe-se também a importância do alto teor de fibra (20%) no aumento da resistência dos biocompósitos aqui estudados.

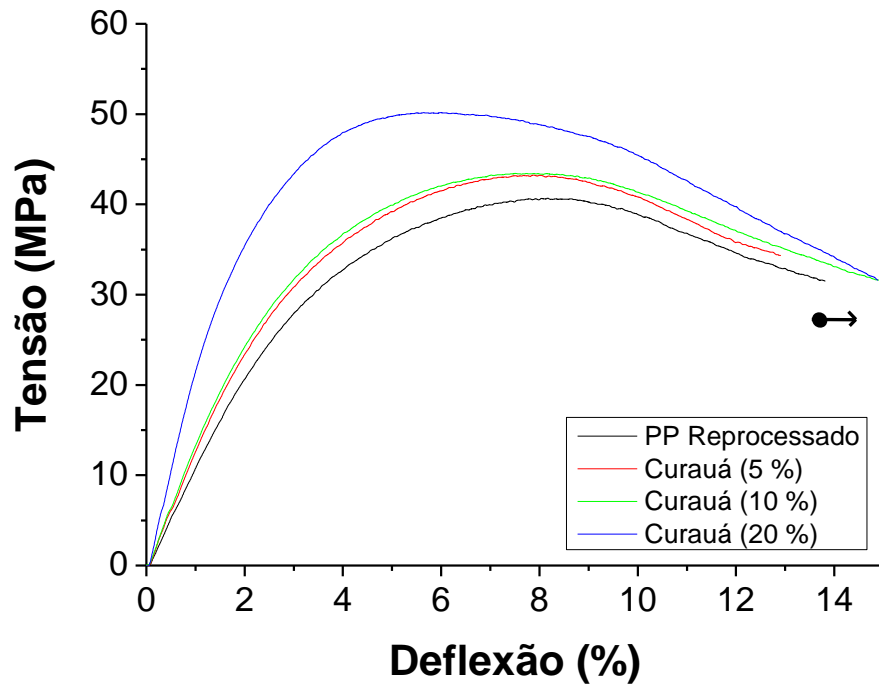


Figura 3.11 - Valores médios de ensaio de flexão para os biocompósitos de curauá e PP reprocessado

### 3.4.3 Ensaio de temperatura de distorção térmica (HDT)

A importância deste ensaio está na capacidade de verificação do quanto o termoplástico, ou material feito a base deste, suporta uma carga de flexão constante com o aumento da temperatura. No momento que o material sofre uma deformação pré-estabelecida em norma (ISO 75, 1993) define-se a temperatura máxima na qual o material pode suportar mantendo sua estabilidade térmica.

Observa-se nos valores encontrados na tabela 3.6 e na figura 3.12 que houve um aumento de temperatura de distorção térmica com o acréscimo de fibra de curauá, comparando-os com PP reprocessado. Este resultado, PP reprocessado, foi possível devido à oxidação e degradação térmica do PP puro ao passar por um novo processamento (extrusão). Fato também comprovado pelo aumento de IF já comentado anteriormente. Após adicionar 20 % de fibras de curauá no PP, obteve-se um aumento significativo de estabilidade térmica que sobe de 75,3 °C para 97 °C (variação percentual de 22,4 %). Estes resultados mostram que o uso de fibra natural mantém as características térmicas do polipropileno independente da temperatura, e o aumento do percentual de fibras permite manter estas características para temperaturas mais elevadas.



Tabela 3.6 - Valores medidos da temperatura de distorção térmica

<i>Composições</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	
	<i>Média</i>	<i>D. P.*</i>
PP reprocessado	75,3	2,8
Curauá 5%	77,3	1,4
Curauá 10%	75,6	2,0
Curauá 20%	97,0	1,2

\* D. P. – Desvio Padrão

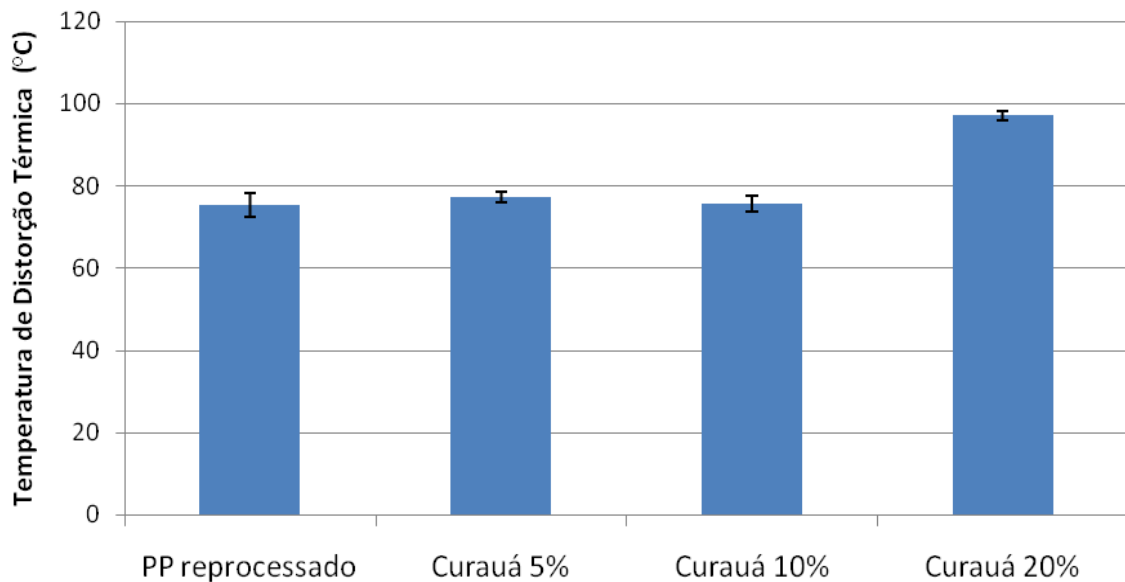


Figura 3.12 – Temperatura de distorção térmica dos biocompósitos de curauá

### 3.4.4 Ensaio de impacto

A tabela 3.7 apresenta os valores médios dos resultados obtidos para os ensaios de resistência ao impacto de biocompósitos a base de curauá.

3.7 – Resultados obtidos no ensaio de impacto

<i>Materiais</i>	<i>Impacto (KJ/m<sup>2</sup>)</i>	<i>D. P.*</i>
Curauá 5%	39,40	3,79
Curauá 10%	29,69	3,00
Curauá 20%	4,20	1,69

\* D. P. – Desvio Padrão

A partir dos resultados obtidos na tabela 3.7, elaborou-se o gráfico de barras da figura 3.13.

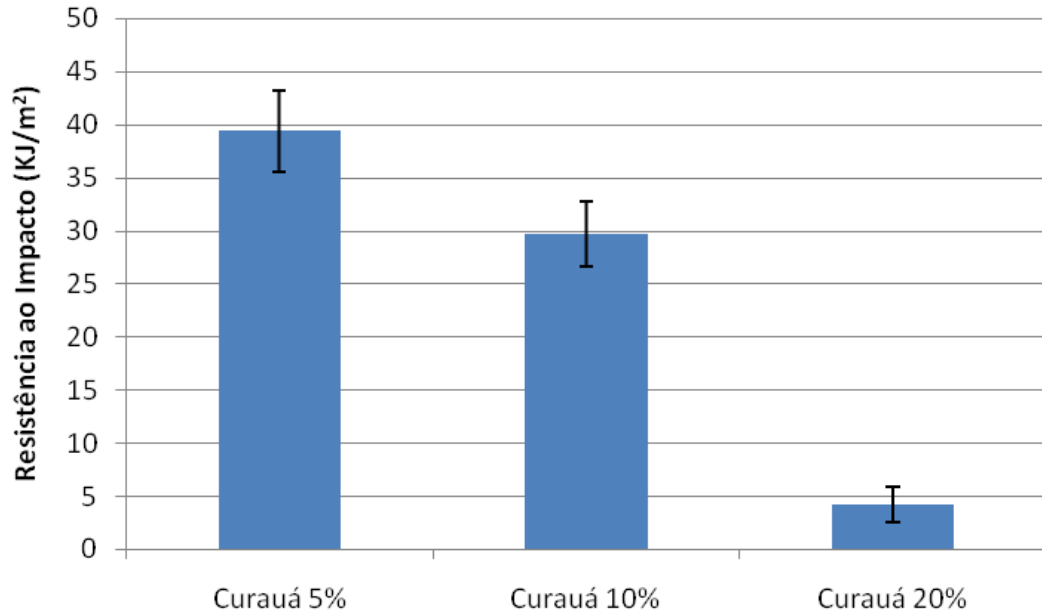


Figura 3.13 – Resistência ao impacto dos biocompósitos de curauá

Fazendo uma análise comparativa, observou-se que a adição de fibras de curauá diminuiu os valores de resistência ao impacto, sendo este decréscimo em torno de 24,6% para os biocompósitos de 10% de curauá e decréscimo de 89,3% para os biocompósitos de 20%, em relação ao biocompósito com 5% de fibra de curauá. Este resultado era esperado já que, como visto no item 3.4.1, verificou-se uma diminuição da deformação de ruptura destes materiais com o aumento do percentual de fibra de curauá diminuindo conseqüentemente sua tenacidade.

É interessante ainda comentar, que a maior redução de resistência ao impacto ocorreu de modo mais significativo para o biocompósito com 20% de fibras de curauá, devido à aproximação do valor crítico de fração volumétrica do material de reforço.

### 3.5 Biocompósitos de Polipropileno com Fibra de Licuri

#### 3.5.1 Ensaio de tração

Apresentam-se na figura 3.14 e 3.15 os diagramas tensão versus deformação dos corpos de prova ensaiados à tração, para os biocompósitos com 5% e 10% de fibras de licuri, respectivamente. Pelos resultados apresentados, percebe-se que a dispersão obtida entre as amostras foi pouco significativa, exceção se faz somente ao valor de deformação de ruptura que varia significativamente.

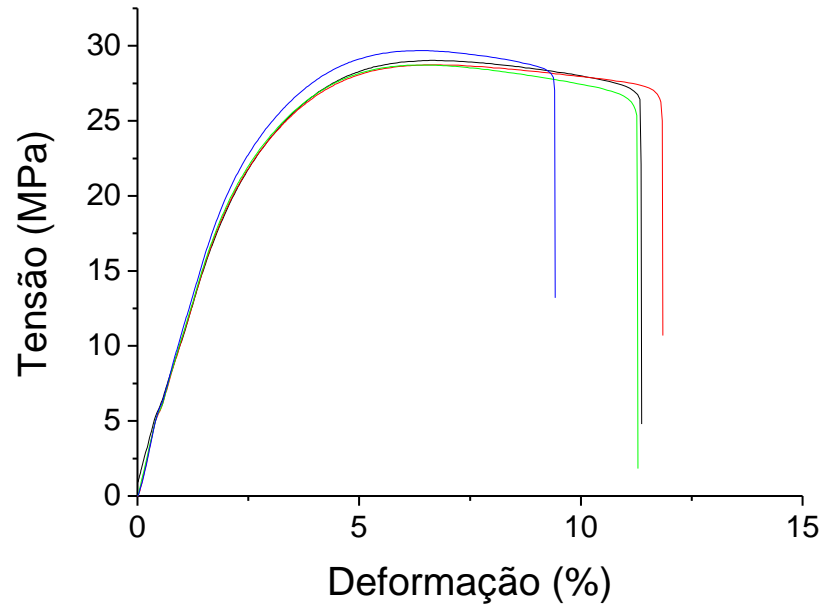


Figura 3.14 – Ensaio de tração do biocompósito com 5 % de licuri.

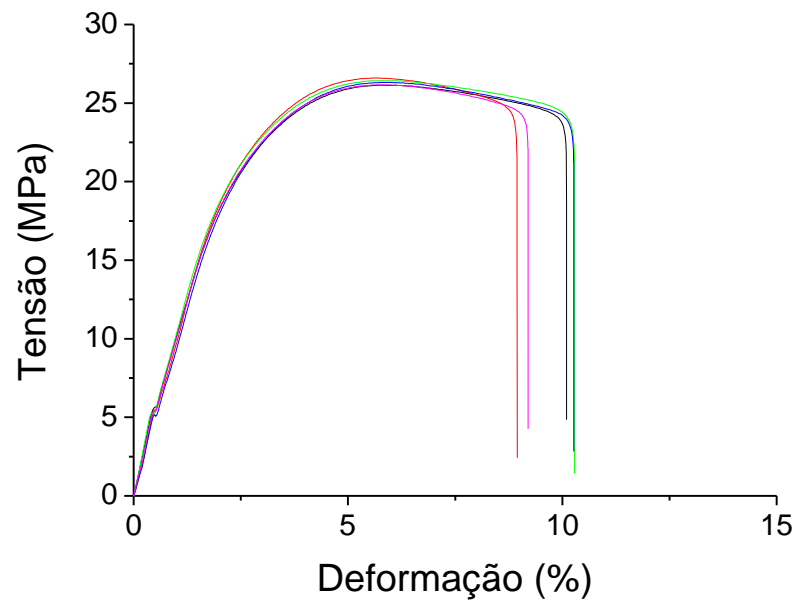


Figura 3.15 – Ensaio de tração do biocompósito com 10 % de licuri.

Apresentam-se na tabela 3.8 os resultados da tensão máxima, tensão de escoamento, tensão de ruptura, deformação de ruptura e do módulo de elasticidade dos biocompósitos a base de licuri com 5 e 10% e do polipropileno. Pode-se observar por meio desta tabela que a presença das fibras de licuri no polipropileno não aumentou significativamente a tensão última para os biocompósitos de 5% a 10% em relação ao PP. Verificou-se também que ocorreu um aumento da

tensão de escoamento, que apesar de ter sido mais significativo do que para a tensão máxima, possuiu como maior variação verificada, um incremento de 1,6 MPa (variação percentual de 9,6 %). Em relação à tensão de ruptura, verifica-se que os biocompósitos comportaram de maneiras idênticas.

Tabela 3.8 – Resultados do polipropileno e dos biocompósitos a base de fibras de licuri obtidos no ensaio de tração.

<b> Materiais</b>	<b>Tensão Máxima (MPa)</b>	<b>Tensão de Escoamento (MPa)</b>	<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	<b>Deformação na Ruptura (%)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>
PP reprocessado	25,94	16,4	—	—	1082
Licuri 5%	26,81	17,8	24,03	13,25	1108
Licuri 10%	26,30	18,0	24,37	10,29	1210

Para melhor exemplificar os resultados apresentados, apresentam-se na figura 3.16 as curvas tensão-deformação médias dos materiais biocompósitos à base de fibra de licuri e do PP reprocessado, na qual se percebe que o aumento do percentual de fibras influencia significativamente na deformação de ruptura e no comportamento à tração do material, porém esta influência é menor na inclinação inicial da curva.

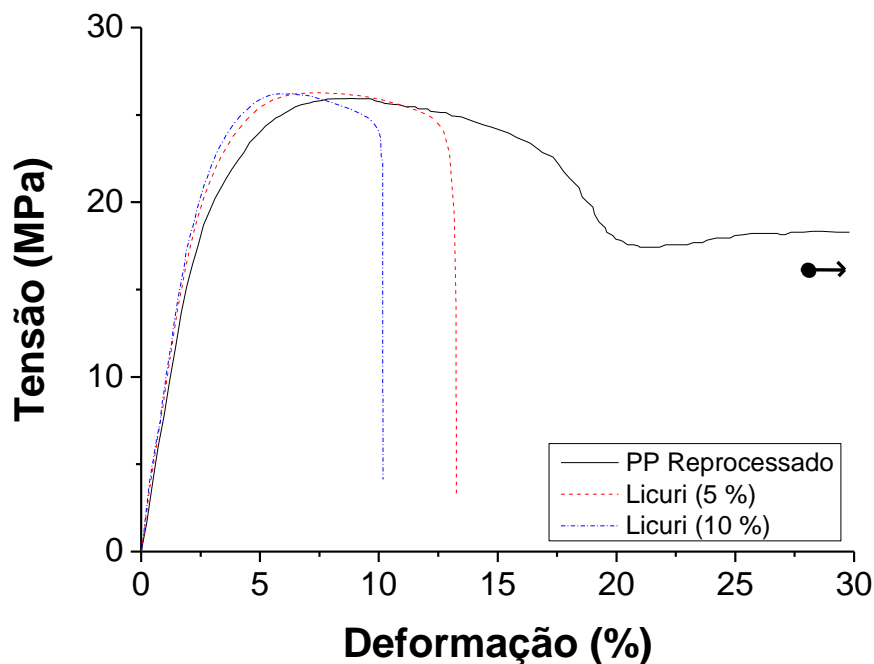


Figura 3.16 – Ensaio de tração dos biocompósitos de licuri e PP reprocessado

Na deformação de ruptura percebeu-se que, assim como ocorreu no curauá, houve uma diminuição deste valor com o aumento do percentual de fibra de licuri. Comparando os resultados obtidos dos biocompósitos, já que o PP reprocessado não rompeu, observa-se que houve uma diminuição de 22,3 % para os biocompósitos com 10 % de licuri, em relação aos biocompósitos com 5 % de licuri, por este resultado percebe-se que a adição de fibras reduz a tenacidade do polipropileno. Estes valores de deformação de ruptura dos biocompósitos foram menores aos obtidos para o biocompósito de curauá, demonstrando que o tipo de fibra influencia neste resultado. A provável influência neste caso se deve provavelmente a fibra de licuri se apresentar com um formato mais retangular, aumentando as tensões na interface fibra-matriz e dificultando desse modo a deformação do biocompósito, enquanto que a fibra de curauá possui um formato mais próximo de um círculo, fazendo com que as tensões na interface fibra-matriz sejam atenuadas.

Analisando ainda a tabela 3.8, percebe-se que houve um aumento na rigidez como o acréscimo de fibra de licuri, subindo de 1082 MPa (PP reprocessado) para 1210 MPa (PP/licuri 10%) um aumento, aproximadamente, de 10% nesta propriedade.

### **3.5.2 Ensaio de flexão**

As figuras 3.17 e 3.18 apresentam os resultados dos diagramas tensão versus deflexão dos biocompósitos de polipropileno a base de fibra de licuri com 5% e 10%, respectivamente. Pelos resultados apresentados nestas figuras, percebe-se que a dispersão obtida entre as amostras não foi expressivo para todos biocompósitos à base de fibra de licuri e que somente o comportamento inicial destes biocompósitos podem ser considerado linear.

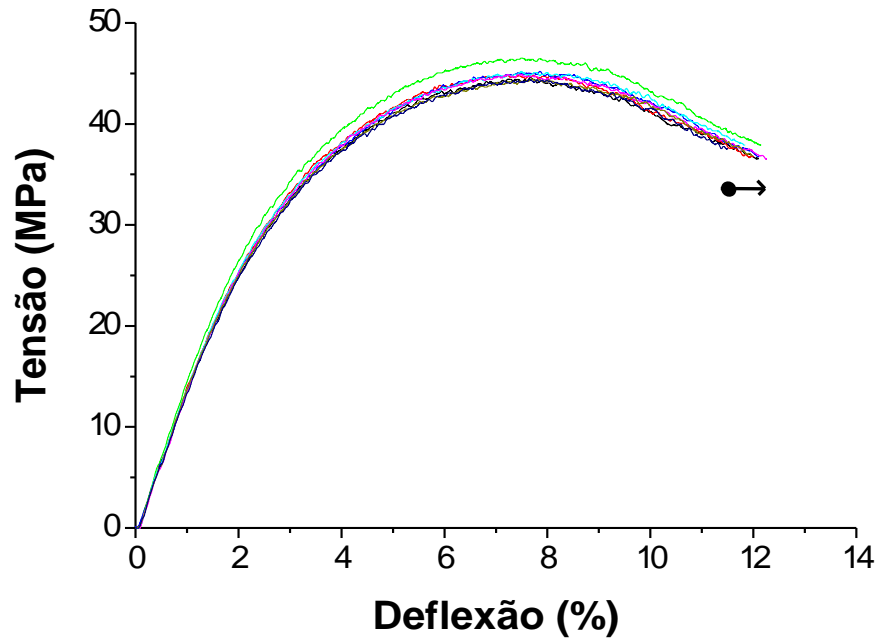


Figura 3.17 – Ensaio de flexão em três pontos do biocompósito de licuri 5%

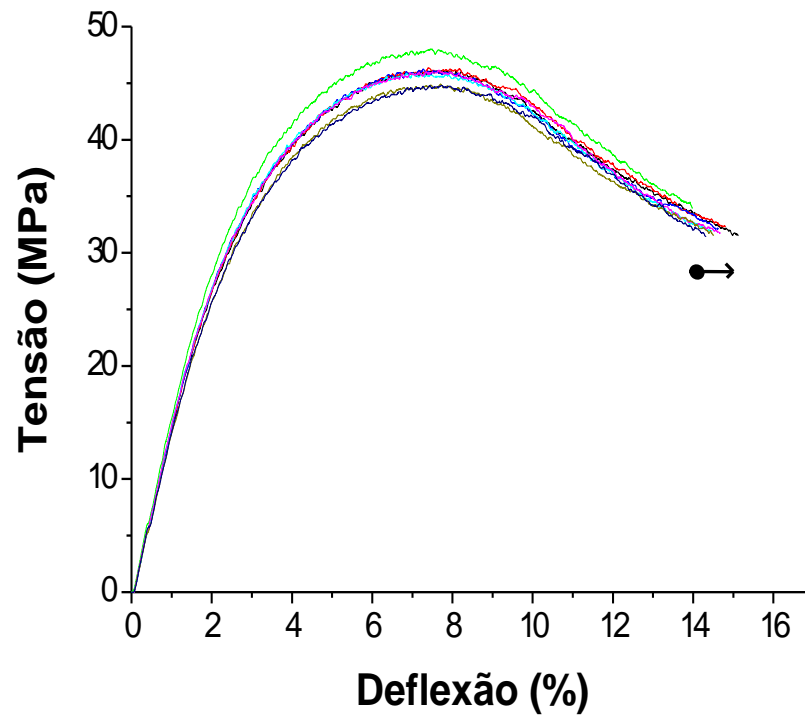


Figura 3.18 – Ensaio de flexão em três pontos do biocompósito de licuri 10%

Apresentam-se na tabela 3.9 os resultados do polipropileno e dos biocompósitos a base de fibra de licuri obtidos no ensaio de flexão em três pontos. A partir destes resultados, percebe-se que o aumento no percentual de fibra aumentou a tensão máxima, na qual o valor subiu de 40,84

MPa no PP reprocessado para 46,06 MPa no biocompósito com 10% de licuri, tendo assim um aumento percentual de 12,8%.

Tabela 3.9 – Resultados do polipropileno e dos biocompósitos a base de fibras de licuri obtidas no ensaio de flexão em três pontos.

<i>Materiais</i>	<i>Tensão Máxima (MPa)</i>	<i>Módulo de Flexão (MPa)</i>
PP reprocessado	40,84	1094,68
Licuri 5%	45,02	1369,57
Licuri 10%	46,06	1455,10

No caso da rigidez à flexão este aumento se tornou ainda mais evidente, pois com o uso de 10% de licuri o módulo aumentou de 1095 MPa no PP puro reprocessado para 1455 MPa, um aumento de 33 %. Percebe-se também pelos resultados apresentados na tabela 3.9, que os valores da resistência e rigidez, obtidos para os biocompósitos com 5% de licuri e com 10% são muito próximos. Com uma variação percentual de 2,3 % de resistência e 6,2% de rigidez entre os biocompósitos de 5 e 10 %.

Apresenta-se na figura 3.19 um gráfico comparando as curvas médias de PP com licuri e o PP reprocessado. Por estes resultados, percebe-se a importância da adição de fibras no aumento da resistência dos biocompósitos aqui estudados.

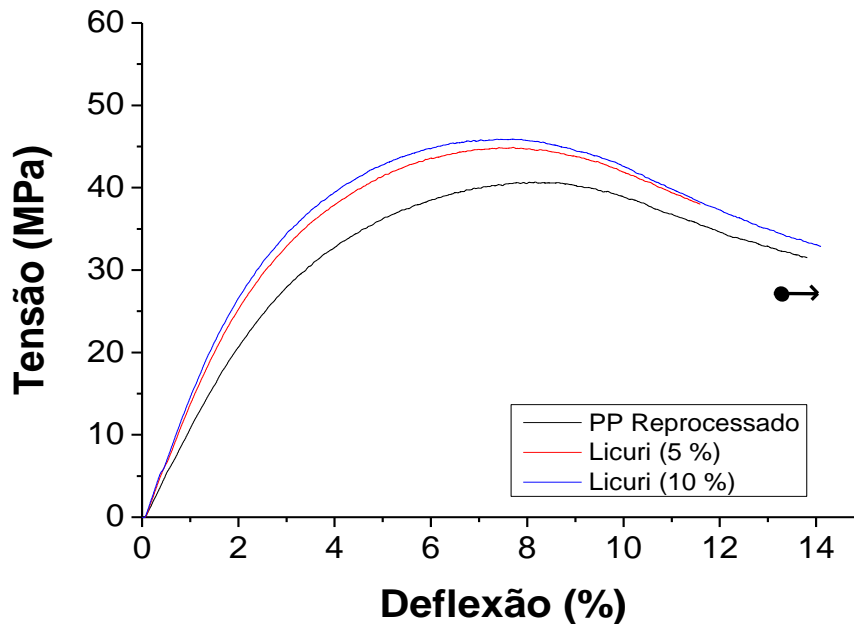


Figura 3.19 – Ensaio de flexão para os biocompósitos de licuri e PP reprocessado

### 3.5.3 Ensaio de temperatura de distorção térmica (HDT)

A tabela 3.10 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de temperatura de distorção térmica para os biocompósitos a base de licuri.

Tabela 3.10 - Valores medidos da temperatura de distorção térmica

<i>Composições</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	
	<i>Média</i>	<i>D. P.*</i>
PP reprocessado	75,3	2,8
Licuri 5%	75,6	10,4
Licuri 10%	85,1	9,8

\* D. P. – Desvio Padrão

A partir dos resultados obtidos na tabela 3.10, elaborou-se o histograma da figura 3.20, para melhor comparação dos resultados.

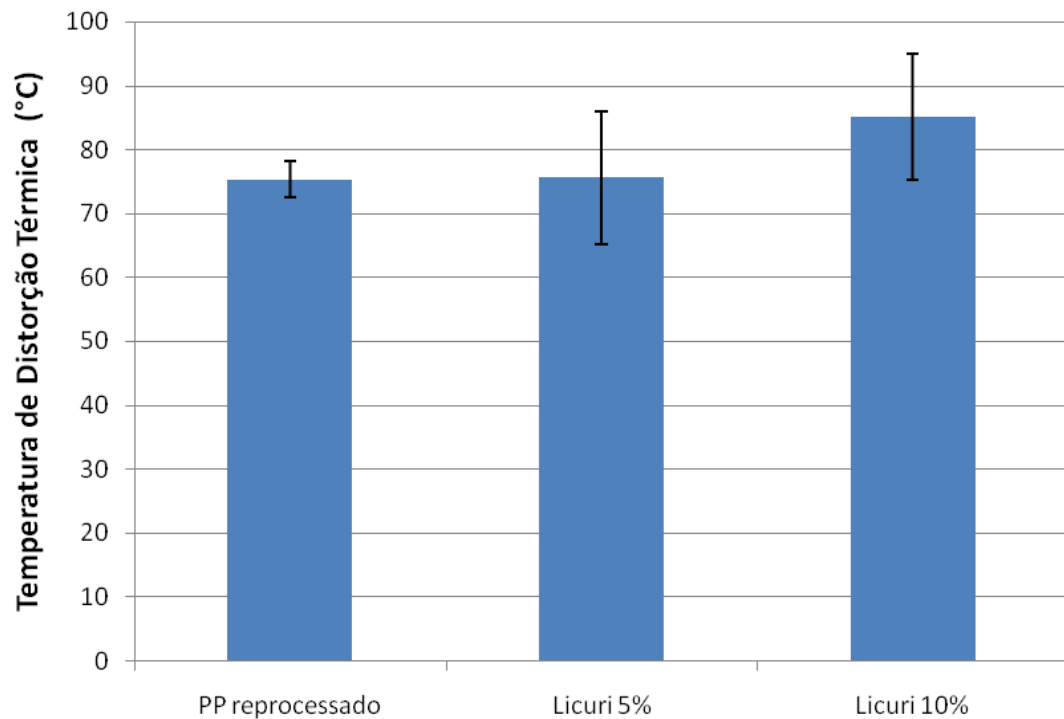


Figura 3.20 – Temperatura de distorção térmica dos biocompósitos de licuri e do PP

Pelos resultados apresentados na figura 3.20, comparando com o PP reprocessado, percebe-se que após adicionar 5 % de fibras de licuri no PP, a temperatura de distorção térmica



não diminuiu e para o biocompósito com 10 % de licuri ocorreu um aumento de estabilidade térmica que sobe de 75,3 °C para 85,1 °C (variação percentual de 11,5 %). Estes resultados mostram que o uso de fibras de licuri mantém as características térmicas, quando comparadas com o polipropileno reprocessado.

Comparando este resultado com o obtido para as fibras de curauá percebe-se que essas duas fibras naturais contribuíram para o aumento da temperatura de distorção térmica, quando comparadas com o PP reprocessado. A grande diferença foi somente no desvio padrão desses resultados, enquanto que para os biocompósitos à base de curauá possuíram uma dispersão muito pequena (na ordem de 2 °C), os biocompósitos à base de licuri tiveram uma dispersão relativamente alta (na ordem de 10 °C). Contudo, mostra-se por estes resultados a importância do uso de fibras naturais como elemento útil na estabilidade térmica desses materiais com a variação da temperatura.

Em outro trabalho pesquisado pelos autores, Jarukumjorn & Suppakarn (2009), encontraram efeito semelhante ao obtido para as fibras de curauá e licuri aqui estudados. No trabalho do referido autor verificou-se que o acréscimo de fibras de sisal em conjunto com o polipropileno P700J (que é diferente do aqui pesquisado, PP Km 6100) aumenta a temperatura de distorção térmica.

### 3.5.4 Ensaio de impacto

A tabela 3.11 apresenta a média dos resultados obtidos para os ensaios de resistência ao impacto de biocompósitos a base de fibras de licuri.

3.11 – Resultados obtidos no ensaio de impacto

<i>Materiais</i>	<i>Impacto (KJ/m<sup>2</sup>)</i>	<i>D. P.*</i>
Licuri 5%	29,51	3,30
Licuri 10%	23,84	3,66

\* D. P. – Desvio Padrão

A partir dos resultados obtidos na tabela 3.11, elaborou-se o histograma da figura 3.21.

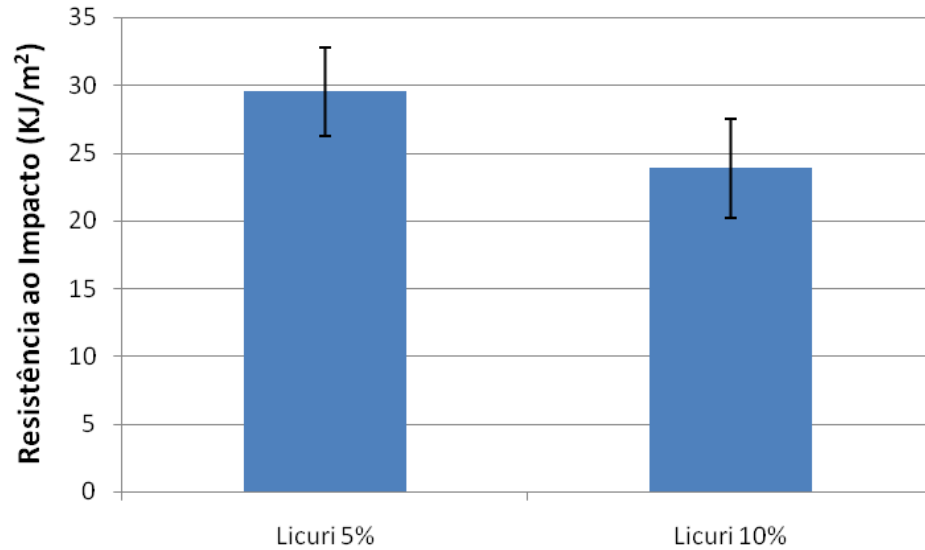


Figura 3.21 – Resistência ao impacto dos biocompósitos de licuri

Comparando com o biocompósito de proporção de 5% de licuri, observou-se que a adição de fibras naturais do tipo licuri diminui os valores de resistência ao impacto, sendo este decréscimo em torno de 19,2% para os biocompósitos com proporção de 10%.

### 3.6 Comparações dos Resultados dos Biocompósitos

#### 3.6.1 Ensaio de tração

Apresentam-se nas figuras 3.22, 3.23, 3.24 e 3.25 os resultados obtidos de tensão máxima, tensão de escoamento, tensão de ruptura, e rigidez dos ensaios de tração, respectivamente, para os biocompósitos a base de licuri e curauá. Percebe-se pelas figuras 3.22, 3.23 e 3.24 que os valores de tensão máxima, tensão de escoamento e tensão de ruptura são praticamente idênticos para os dois materiais e para diferentes percentuais de fibras, ou seja, a variação de percentual de fibras nestas faixas não influencia significativamente o comportamento de resistência a tração do biocompósito.

Analisando a figura 3.25, percebe-se que a rigidez do biocompósito à base de fibra licuri obteve resultados superiores do que o biocompósito à base de fibra de curauá, porém esta variação não foi expressiva.

Estes resultados demonstram que, para os percentuais, o acréscimo de fibras naturais no polipropileno não influencia de maneira significativa em suas propriedades mecânicas, sendo

úteis somente como elementos de melhora em seu reaproveitamento, conforme foi comentado no item 3.1.

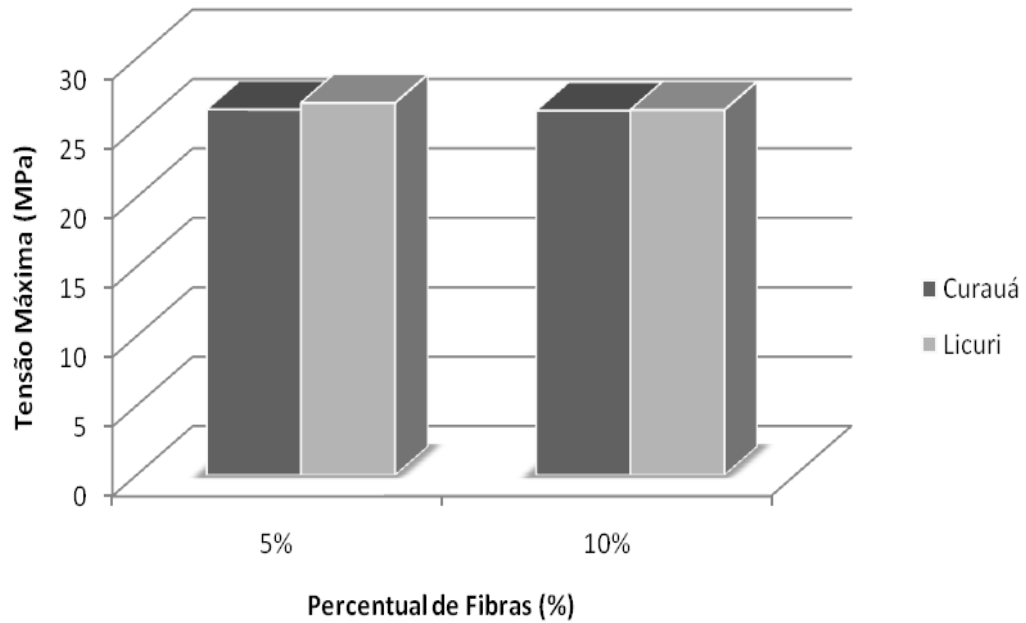


Figura 3.22 – Valores da tensão máxima dos biocompósitos ensaiados à tração.

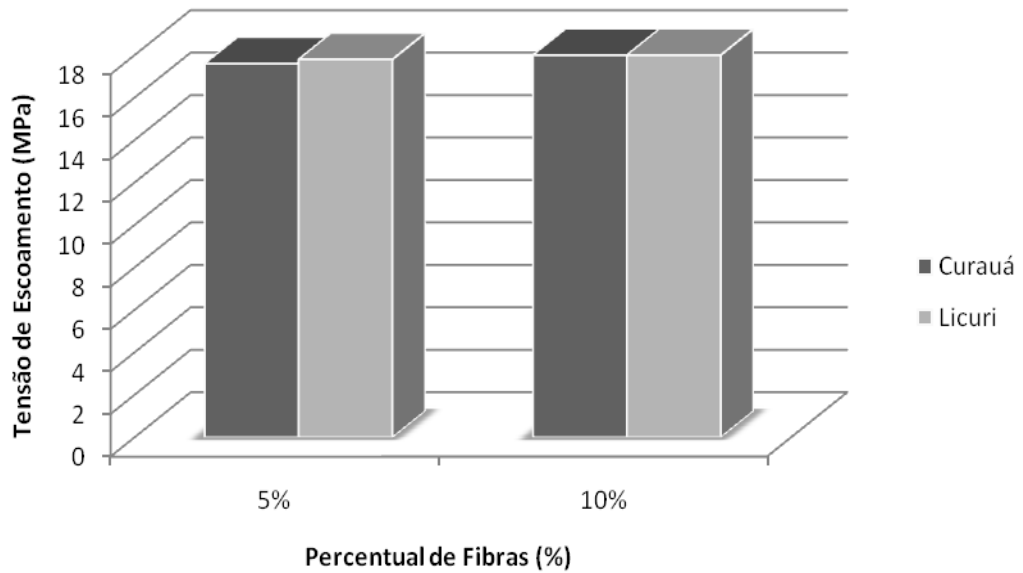


Figura 3.23 – Valores da tensão de escoamento dos biocompósitos ensaiados à tração.

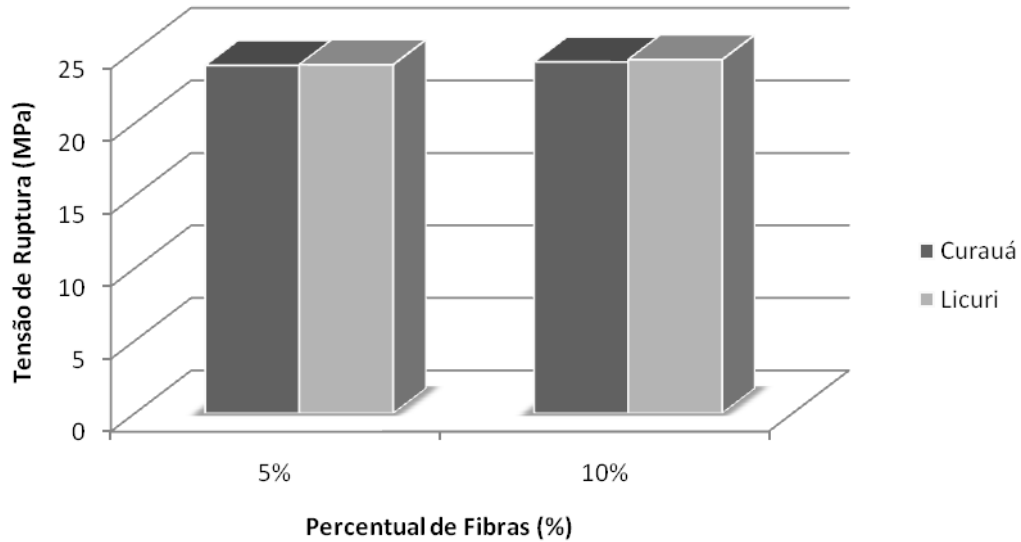


Figura 3.24 – Valores da tensão de ruptura dos biocompósitos ensaiados à tração.

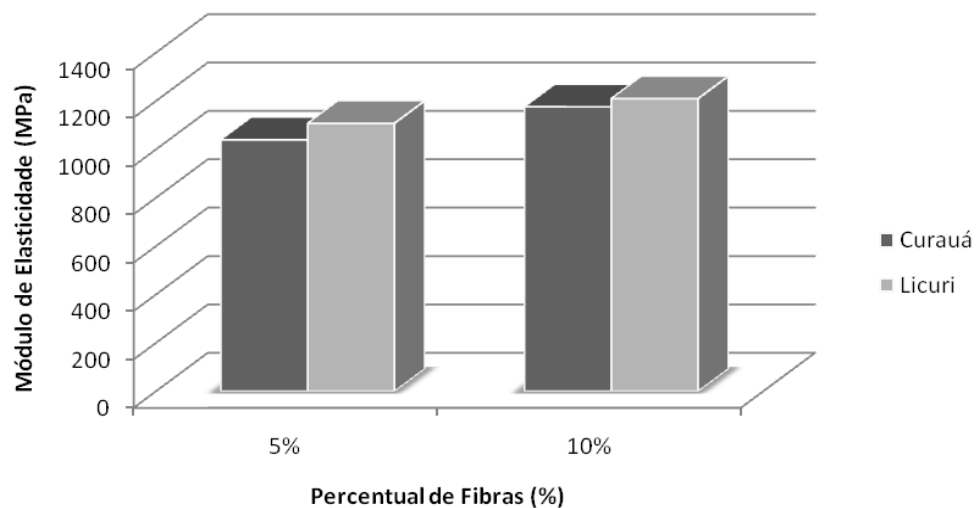


Figura 3.25 – Valores de módulo de elasticidade dos biocompósitos ensaiados à tração.

### 3.6.2 Ensaio de flexão

Apresentam-se nas figuras 3.26 e 3.27 os resultados obtidos de resistência e rigidez para os biocompósitos com 5 e 10% de fibra de curauá e licuri, respectivamente. Por estes resultados, percebe-se que os biocompósitos a base de licuri apresentaram valores superiores do que os biocompósitos à base de curauá. Conforme se verificou no ensaio de tração o aumento foi pouco significativo, onde a maior variação obtida para a resistência foi de 2,5 MPa (variação percentual de 5,43 %) e a rigidez de 155 MPa (variação percentual de 10,63 %) dos biocompósitos com 10% de fibras de licuri em relação ao mesmo valor de fibras de curauá.

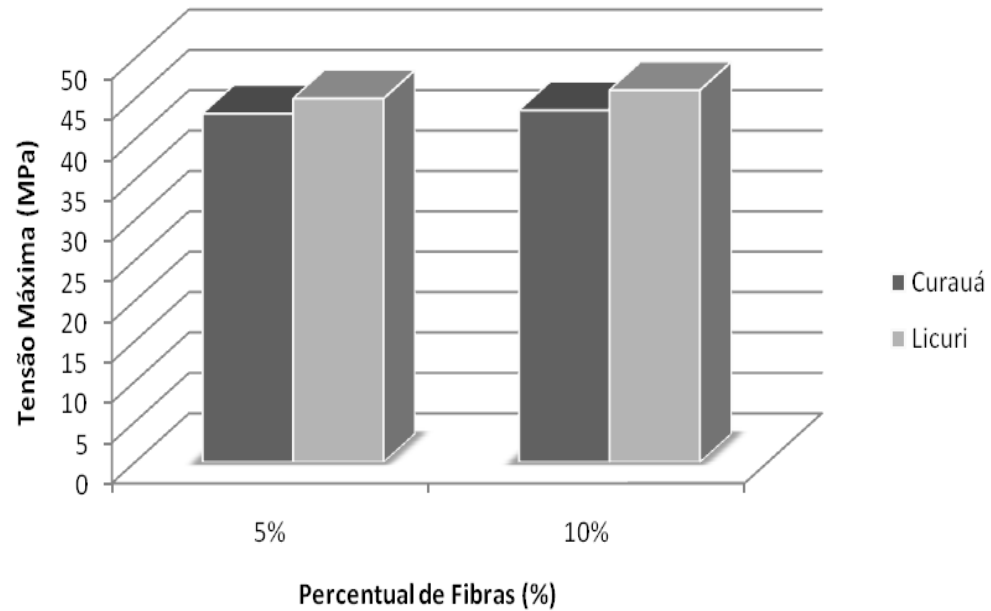


Figura 3.26 – Média dos valores da tensão máxima encontradas no ensaio de flexão

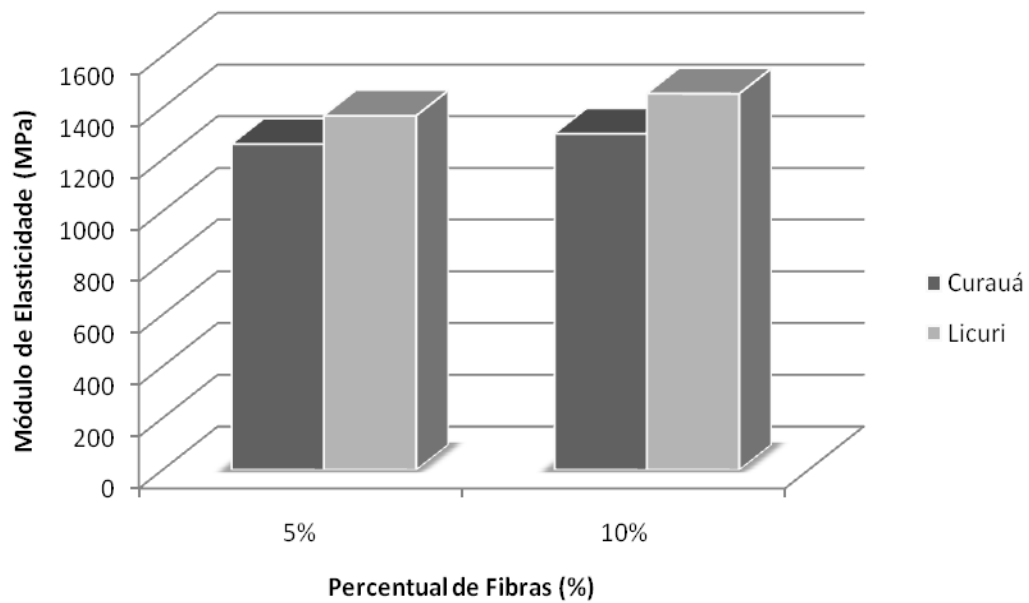


Figura 3.27 – Média dos valores do módulo de elasticidade encontrados nos ensaios de flexão

### 3.6.3 Ensaio de temperatura de distorção térmica (HDT)

A figura 3.28 compara os resultados obtidos no ensaio de HDT para as fibras de curauá e licuri.

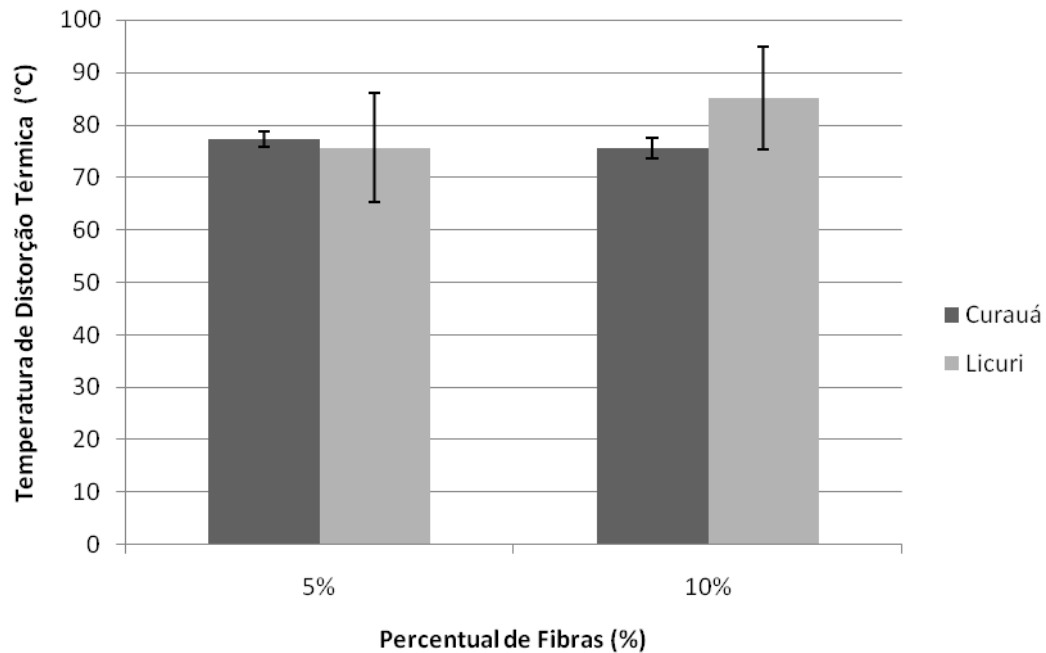


Figura 3.28 – Temperatura de distorção térmica dos biocompósitos de licuri e de curauá

Comparando os valores das médias de temperatura dos biocompósitos através da figura 3.28, pode-se observar que os biocompósitos com composições de 5% e 10% de curauá e de 5% de licuri se comportaram de maneira equivalente. Somente o biocompósito de 10% de licuri apresentou uma temperatura de distorção térmica superior com 10 °C a mais que os anteriores. Entretanto é importante observar que os resultados de impacto para os biocompósitos a base de licuri obtiveram desvios padrão maiores.

### 3.6.4 Ensaio de impacto

A figura 3.29 compara os resultados obtidos no ensaio de impacto para as fibras de curauá e licuri.

Comparando-se os resultados obtidos na figura 3.29, para os dois biocompósitos de composição 5% e 10%, o curauá obteve melhores resultados de resistência ao impacto, sendo 33,5% para os biocompósitos a 5% de fibras, e, 24,5% para os a 10% de fibras. Ou seja, em casos onde se exige uma aplicação cuja tenacidade é um fator a considerar, o curauá possui melhores características, porém o acréscimo em quantidade mais elevada diminuiu significativamente esta propriedade mecânica.

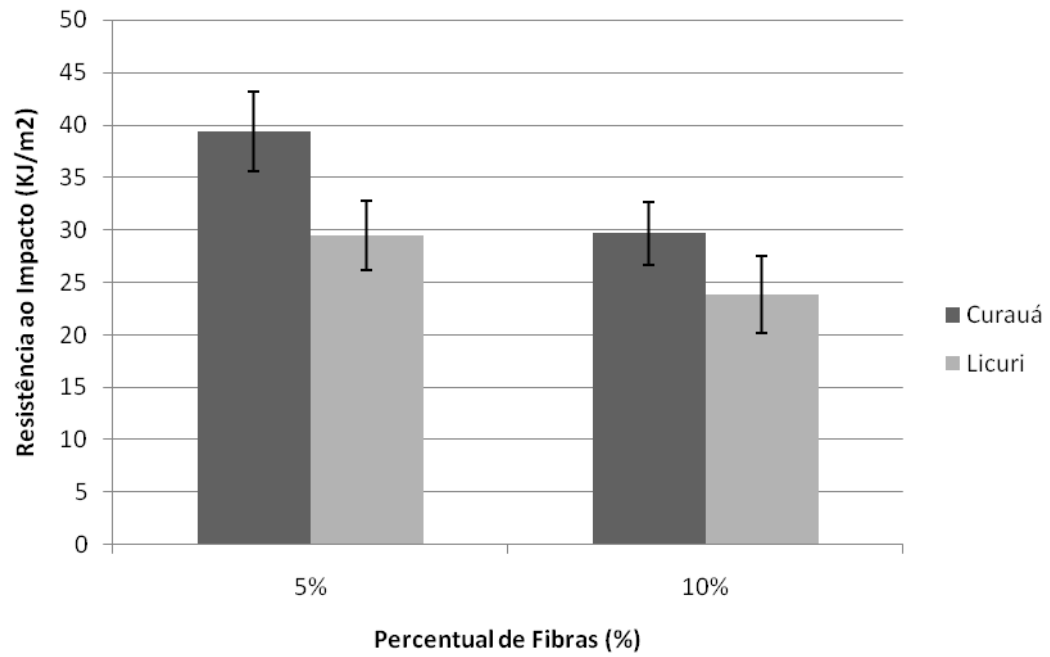


Figura 3.29– Resistências ao impacto para as amostras obtidas

## CAPÍTULO – 4

### 4. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho de investigação, ressalta-se as seguintes observações:

O processamento alcançado com todos os materiais, por meio das etapas descritas, extrusão e injeção, foi adequado. Foi possível fabricar os biocompósitos granulados de PP com fibras naturais e corpos de provas, sem problemas de obstrução na extrusora e queimas de fibras naturais durante a fabricação.

Nas análises dos índices de fluidez apresentada, observa-se que os valores obtidos para os biocompósitos com 5% fibras de curauá e biocompósitos com 10% fibras de curauá, foram superiores, em relação aos biocompósitos com reforço de fibras de licuri, (variação percentual 19,3%). Devido composição das fibras. Já o valor encontrado do IF da mistura do PP com 20% de curauá diminuiu a fluidez da mistura, fibras de curauá/PP. Verifica-se que o uso de fibras naturais reduz a degradação térmica da mistura, fibras naturais/polipropileno durante o seu processamento. Consequência do aumento da adição de carga e redução da resina, na proporção da mistura. Se os maquinários preparados para processar o PP, estiveram especificados para trabalhar com faixa de IF do KM6100, estes biocompósitos não afetaram o desempenho de transformação da resina, durante o processo e reprocesso, viabilizando a utilização dos mesmos, com possibilidade de reciclagem

As propriedades mecânicas dos biocompósitos sob a tração uniaxial tiveram o mesmo comportamento, valores aproximados, na tensão de ruptura, quando comparadas com os biocompósitos com 5% e 10% de fibras de curauá e os biocompósitos com 5% e 10% de fibras de licuri, respectivamente. Já a tensão de escoamento ocorreu um aumento destes valores com o incremento de fibra naturais, de modo mais significativo, neste caso, a maior variação percentual verificada de 33% para os biocompósitos com 20% de fibras de curauá. Em relação à rigidez obteve ganho, o biocompósito de PP com licuri possuiu melhores resultados.



A tensão máxima, no ensaio à tração uniaxial, diferencia-se o biocompósito a 20% de curauá que obteve valor superior quando comparado com PP reprocessado, em torno de 9,7 %.

Quando submetidos aos ensaios de flexão em três pontos, os biocompósitos demonstraram valores maiores em relação ao PP reprocessado. Percebeu-se que o aumento no percentual de fibras naturais aumentou a tensão máxima, um aumento percentual de 23,3% no biocompósito com 20% de fibras de curauá. Observou-se também um aumento na rigidez à flexão, mais evidente, para o biocompósito a 20% de carauá, o módulo subiu em torno de 74%.

No ensaio de HDT observou-se um acréscimo na temperatura para todas as composições com adição de fibras naturais (licuri e curauá), quando comparadas com PP reprocessado. O biocompósito de 20% de curauá apresentou maior temperatura de distorção térmica. Este mantém a característica térmica do polipropileno, permitindo manter esta característica para temperaturas mais elevadas.

No ensaio de impacto, houve diminuição na resistência, para todos os biocompósitos, reduzindo na medida em que se adicionavam as fibras usadas. Para os compósitos de curauá 20% (maior quantidade adicionada de fibras) à redução mais significativa, decréscimo de 89,3%.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Estudar os biocompósitos preparados com fibras de licuri e curauá por análises macroscópicas e microscópicas ópticas de fratura, a fim de verificar a aderência entre os componentes.

Criar novas composições de biocompósitos, utilizando outra resina termoplástica, com intuito de verificar o comportamento mecânico e físico.

Obter biocompósitos com percentagens de fibras naturais mais elevados, com o objetivo de determinar limites máximos de desempenho mecânico.

Realizar ensaios mecânicos com produtos recicláveis de biocompósitos, a fim de estudar a viabilidade econômica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAFAS, Associação Brasileira de Produtores de Fibras Artificiais e Sintéticas – **A Indústria Brasileira de Fibras Artificiais e Sintéticas** – São Paulo, 1999.
- ABPOL: Associação Brasileira de Polímeros. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. Vol. 16, nº 4, 2006.
- AQUINO, E.M.F.; SILVA, R.V. **Curaua Fiber: A New Alternative to Polymeric Composites**. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1238 - 95**. Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. Philadelphia: ASTM, 1995.
- ANDRADE, Cristina T., COUTINHO, Fernanda M. B., DIAS, Marcos L., LUCAS, Elizabete F., OLIVEIRA, Clara M. F., TABAK, David. **Dicionários de Polímeros**. Ed. Interciência. Rio de Janeiro, 2001.
- BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. **Composites Reinforced With Cellulose Based Fibers**. Prog. Polym. Sci.. Índia: Elsevier Science. v.24, p.221-272, 1999.
- BLEDZKI, A. K.; REIHMANE, S.; GASSAN, J. **Properties and Modification Methods for Vegetable Fibers for Natural Fiber Composites**. Journal of Applied Polymer Science, v. 59, n. 8, p. 1329-1336, Feb. 1996.
- BONDAR, G. O. **Licurizeiro e suas potencialidades na economia brasileira**. Instituto Central de Fomento Econômico da Bahia. 1938.
- BRIDGE, Ralph. **Polymer extrusion**. SALS Polymer, 1997.
- CALLISTER Jr., William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 7ª Ed., Rio de Janeiro, LTC, 2008.
- CANEVAROLO Jr., Sebastião V. **Ciência dos Polímeros: Um Texto para Tecnólogos e Engenheiros**. Ed. Artliber. São Paulo, 2002.
- CAMARGO, Alexandre Soares de. **Compósitos de Polipropileno Reforçado com Farinha de Madeira para Aplicações em Produtos Moldados por Injeção**. Dissertação. São Paulo, 2006.

- CHIARADIA, Adelheid M. L. **Biologia: Minimanual de Pesquisa**. Ed. Claranto, Minas Gerais 2003.
- CORREIA, A. Z. **Métodos e Processos para Fabricação de Materiais Compósitos**. EMBRAER. São Paulo, 1988.
- CUNHA, José M. M. C. da, ANDRADE, José E. P. de, CORREA, Abidack Raposo, SILVA, Claudio V. Di G. F. **Pólo de Tecelagem Plana de Fibras Artificiais e Sintéticas da Região de Americana**. Área de Operações Industriais, 2001.
- DASH, B.N.; Sarkar M.; Rana, A.K.; Mishra, M.; Mohanty, A.K.; Tripathy, S.S. **Study on Biodegradable Composite Prepared from Jute Felt and Polyesteramide (BAK)**. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 21, No. 16, pp 1493-1511. 2002.
- FEITOSA, Marcos A. F. **Compatibilização de Blenda Polimérica de Poliamida 6,6 / Polietileno de Baixa Densidade Utilizando Radiação Ionizante de Feixe de Elétrons**. Dissertação - USP. São Paulo, 2008.
- FERREIRA, A. B. de H. **Dicionário de Língua Portuguesa**. Ed. Positivo. 5ª ed. Rio de Janeiro, 2010.
- FINKLER, M.; SCAPINI, P.; FREIRE, E.; ZATTERA, A. J.; ZENI, M. Compósitos de HDPE com Resíduos de Fibras Têxteis. Parte I: **Caracterização Mecânica**. Polímeros vol 15. nº 3, São Carlos, 2005.
- FIGUEIREDO, A. D.; AGOPYAN, V. **Polímeros – Propriedades, Aplicações e Sustentabilidade na Construção Civil**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- FOWLER, Paul A.; HUGHES J. Mark; ELIAS, Robert M. **Biocomposites: Technology, Environmental Credentials and Market Forces**. Biocomposites Centre, University of Wales, Bangor LL572UW, UK, 2006.
- FUNG, KL; et al. **An Investigation on the processing of sisal fiber reinforced polypropylene composites**. Composites Science and Technology, v.63, n.9, p. 1255-1258, 2003.
- GERAQUE, Eduardo. **Termoplástico com Curauá**. Agência FAPESP, 2006.
- GHAVAMI, K., TOLEDO FILHO, R. D. **Desenvolvimento de materiais de construção de baixo custo de energia usando fibras naturais, terra e bambu**. Revista Engenharia Agrícola, Ed. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (**ISO75**), Determination of Temperature of Deflection Under Load, 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (**ISO178**), Determination of Flexural Properties, 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (**ISO180**), Determination of Izod Impact Strength, 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (**ISO527**), Determination of, 1993.

JARUKUMJORN, Kasama; SUPPAKARN, Nitinat. **Effect of Fiber Hybridization on Properties of Sisal Fiber – Polypropylene Composites**. Composites: Part B 40 pg 623 – 627, 2009.

KESSLER, R.W., et al. **Factors influencing the extended use of bast fibres in Germany**. In: Symposium of Natural Polymers and Composites – ISNapol, 3, 2000, São Pedro. Proceedings... São Pedro: [s.n.]. 606p. p. 573-581. 2000.

KURUVILLA, J.; MATTOSO, L. H. C. **Sisal fibre reinforced polymers composites, status and future**. Symposium of Natural Polymers and Coposites – ISNapol, 3, 2000, São Pedro. Proceedings... São Pedro: [s.n.]. 606p. p. 333-343. 2000.

LAKATOS, Eva Maria. MARCONI, Marina de Andrade. **Metodologia do Trabalho Científico**. Editora Atlas Ed. 4ª, São Paulo, 2003.

LEÃO, Mirtânia Antunes. **Fibras de Licuri: Um Reforço Alternativo aos Compósitos Poliméricos**. Dissertação de Mestrado. UFRN - Natal / RN, 2008.

MANO, Eloisa Biasotto. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. 4ª Reimpressão. Ed. Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 2007.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. **Introdução a Polímeros**. 2ª edição revisada e ampliada. Ed. Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 1999.

MANUAL DE POLIPROPILENO. **Laboratório: Análises do Produto**. Empresa Termoplástica, 2007.

MARINHO, Jean Richard Dasnoy. **Macromoléculas e Polímeros**. Ed. Manole. São Paulo, 2005.

- MEYER, J. A., **Wood Polymer Materials: State of the Art**. Wood Science, Madison 14(2): 49-54, 1981.
- MOITA NETO, José Machado. **Compósito**. Fundação de Amparo à Pesquisa do Piauí – FAPEPI - 2006. Disponível em <http://www.fapepi.pi.gov.br/ciencia>. Pesquisado em Agosto de 2010.
- MOORE, E. P. (Ed), **Polypropylene Handbook**, Hanser Publishers, (1996).
- MORASSI, O. J. **Fibras Naturais – Aspectos Gerais e Aplicação na Indústria Automobilística**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência de Materiais CBCIMAT, 12, 1994.
- MOTHÉ, C.G.; ARAÚJO, C.R. de. **Thermal and mechanical characterization of polyurethane composites with curauá fibres**. Polímeros, 2004.
- MOURA, Erik W.; GRAMOLELLI Jr., Flávio. **Incorporação de Biocida em Polipropileno**. Revista Engenho; vol 1. Ed. UniAnchieta. São Paulo, 2009.
- NARAYAN, R. **Polimeric Materials from Agricultural Feedstocks**. Polymers from Agricultural Coproducts; Ed. Fishman, Friedman, Huang, American Chemical Society, Washington; p. 26, 1994.
- NOBLICK, L. R. **Palmeiras das Caatingas da Bahia e as Potencialidades econômicas**. Simpósio sobre a Caatinga e sua Exploração Racional. EMBRAPA, P.99-115. Brasília, 1986.
- OKSMAN, K. D., ET AL. **Mechanical properties and morphology of sisal fibre-epoxy composites**. In: Symposium of Natural Polymers and Composites – ISNapol, 3, 2000, São Pedro. Proceedings... São Pedro: [s.n.]. 606p. p. 343-355. 2000
- OLIVEIRA, M. H. **Principais Matérias-Primas Utilizadas na Indústria Têxtil**, Brasil, 1996.
- OLIVEIRA, Walnê de. **Comportamento Mecânico e Característica da Fratura em Compósitos Híbridos**, Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal-RN, 2005.
- OTA, Waldyr Naoki. **Análise de Compósitos de Polipropileno e Fibras de vidro Utilizado pela indústria Automotiva Nacional**. Dissertação. Paraná, 2004.
- PAIVA, Ana Magda, WIEBECK, Hélio. **Reciclagem do plástico: Como fazer reciclagem um Negócio Lucrativo**. Ed. Artiber. São Paulo, 2004.

- PAIVA, J. M. F; Frollini, E. **Matriz Termofixa Fenólica em Compósitos Reforçados com Fibras de Bagaço de Cana-de-açúcar**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 1999.
- PAIVA, J. M. F; TRINDADE, W. G.; Frollini, E. **Compósitos de Matriz Termofixa Fenólica Reforçada com Fibras Vegetais**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 1999.
- PARDINI, Luiz C., LEVY NETO, Flaminio. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. 1. Edição. Ed. Edgard Blucher. São Paulo, 2006.
- PEREIRA, Nilson Casimiro. **Compósitos Polipropileno/Fibras Curtas de Sisal: Preparação, Desempenho Mecânico e Caracterização Estrutural**. Dissertação de Mestrado – UFSCar. São Paulo, 1988.
- PERSSON, H. SKARENDAHL, A. **Natural Fibre Concrete for Roofing Sheets and Other Purposes in: SAREC Report. Natural Fibre Concrete**, SAREC Stockolm, 1984.
- RANA, A.K.; MANDAL, A.; BANDYOPADHYAY, S. **Short jute fiber reinforced polypropylene composites: effect of compatibiliser, impact modifier and fiber loading**. Composites Science and Tecnology, 2003.
- RANA, A.K.; MANDAL, A.; MITRA, B. C.; JACOBSON, R.; BANERJEE, A. N. **SHORT Jute Fiber-reinforced Polypropylene Composites: Effetc of Compatibilizer**. India: Journal of Applied Polymer Science, 1998. V.6, n. 2, p. 329-338.
- RAMALHO, E. **A folha amazônica que virou arte**. Publicação na RFI Global services LTD, 2005.
- RAVEN, P.H.; EVERT, R.F. & EICHCHORN, S. E. **Biologia Vegetal**. 6ª ed. Guanabara Koogan. Rio de Janeiro, 2001
- RIBEIRO, Marinaldo D. **Conceitos Aplicados a Alimentação Animal**. Departamento de Produção Animal – EMV. UFBA, 2001
- ROWELL, R. M. **Utilization of Agriculture-based Fiber for Composites**. In: RADER, C.P., BALDWIN, S. D., CORNELL, D.D. [and others], Ed. **Plastics, rubber, and paper recycling: a pragmatic approach**. National Meeting American Chemical Society, 1994.
- ROWELL, R.M.; SANADI, A.R.; CAUFIED, D.F.; JACOBSON, R. E. – **Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities**. In: Lignocellulosic – Plastics Composites. USP/UNESP. São Paulo, 1997.

SANTOS, Rui; MARTINS, João Guerra. **Materiais de Construção – Plásticos**. Série Materiais. 1ª. Edição. Monografia, 2004.

SAVASTANO Jr., H.; DANTAS, F A. S.; AGOPYAN, V. **Materiais Reforçados com Fibras – Correlação entre a Zona de Transição Fibra-Matriz e as Propriedades Mecânicas**. Botem 67, IPT-SP, 1994.

SHARMA, S. C., KRISHNA, M., H. N. NARASIMHAMURTHY H. N., SANJEEVAMURTHY. **Estudos sobre o desgaste por intempérie dos compostos do polipropileno com fibra de coco e fibra de vidro**. Research and Development, R. V. College of Engineering, Bangalore, India Department of Mechanical Engineering, S.S.I.T., Tumkur, India, 2006.

SAWAYER, L. C.; GRUBB, D. T. **Polymer Microscopy**. 2. Ed. London: Chapman & Hall, 1996. P. 247-248.

SOUZA, S. A.. **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos**. Ed. Edgard Bluched, p. 286,1984.  
Site ABMACO – Associação Brasileira de Materiais Compósitos, 2010. Disponível em: [www.abmaco.org.br/compositos.cfm](http://www.abmaco.org.br/compositos.cfm). Acesso em outubro de 2010;

Site ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química. Disponível em: <http://www.abiquim.org.br>. Acesso em agosto de 2009.

Site ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química. Disponível em: <http://www.abiquim.org.br/resinastermoplásticas/plásticos.asp>. Acesso em agosto de 2010.

Site FORTYMIL. Disponível em: <http://www.fortymil.com.br/pp.pdf>. Acesso em dezembro de 2010.

Site INSA. Disponível em: [HTTP://www.insa.gov.br/index.php/content/view/490.html](http://www.insa.gov.br/index.php/content/view/490.html). Acesso em setembro de 2009.

Site PROVOPAR-PR – Programa do Voluntariado Paranaense. Disponível em: [www.provoparestadual.org.br/site/interna/8/artesanato/21/informações/225/materiaprima](http://www.provoparestadual.org.br/site/interna/8/artesanato/21/informações/225/materiaprima). Acesso em novembro de 2008.

Site PEMATEC TRIANGEL – Fabricante de Peças Automobilísticas, 2010. Disponível em: [www.Pematec.com.br/curauá.htm](http://www.Pematec.com.br/curauá.htm). Acesso em novembro de 2010.



Site SUBSTECH – Substances & Technologies. Composites. Disponível em: [www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=structure\\_of\\_composites](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=structure_of_composites). Acesso em Novembro de 2010.

Site WIKIMEDIA. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/asbesto>. Acesso em outubro de 2009.

Site WIKIMEDIA. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/comp%c3%b3sito>. Acesso em maio de 2010.

Site WIKIMEDIA. Disponível em: <http://es.wikipedia.org/wiki/aramida>. Acesso em maio de 2011.

TIO, Juliana DEL. **Celulose e Celulignina de Bagaço de Cana: Obtenção e Estudo da Biodegradabilidade de Compósitos com Polipropileno**. Dissertação de Mestrado. USP – São Paulo / SP, 2007.

UHL, N. W.; DRANSFIELD, J.; DAVIS, J. I.; LUCKOV, M. A.; HANSEN, K. S. & DOYLE, J. J. 1995. **Phylogenetic Relationships Among Palms: Cladistic Analyses of Morphological and Chloroplast DNA Restriction site Variation**. In *Monocotyledons: Systematics & Evolution* (RUDALL, P. J.; CRIBB, D. F.; CUTLER, E.; HUMPHRIES, C. J.), Royal Botanic Gardens, Kew, p. 623-661.

YOUNG, R. A. **Utilization of Natural Fibers: Characterization, Modification and Applications**. In LEÃO, A. L.; CARVALHO, F. X. and FROLINI, E. Eds. **Lognocellulosic-Plastic Composites**. São Paulo: USP & UNESP, 1997.