



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

SISTANLEY JONES LIMA BISPO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA RECICLAGEM DE
BIOCOMPÓSITOS À BASE DE POLIPROPILENO E FIBRAS DE
CURAUÁ.**

Natal - RN
2016

SISTANLEY JONES LIMA BISPO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA RECICLAGEM DE
BIOCOMPÓSITOS À BASE DE POLIPROPILENO E FIBRAS DE
CURAUÁ.**

Tese 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 Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Silvério Freire Júnior.

Natal - RN
Junho/2016

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Bispo, Sistanley Jones Lima.

Estudo da viabilidade da reciclagem de biocompósitos à base de polipropileno e fibras de curauá / Sistanley Jones Lima Bispo. - Natal, RN, 2016.

116 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Silvério Freire Júnior.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Compósitos poliméricos granulados - Tese. 2. Polipropileno - Tese. 3. Propriedades mecânicas - Tese. I. Freire Júnior, Raimundo Silvério. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 620.1

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

TERMO DE APROVAÇÃO

SISTANLEY JONES LIMA BISPO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA RECICLAGEM DE BIOCAMPÓSITOS À
BASE DE POLIPROPILENO E FIBRAS DE CURAUÁ.**

Tese de Doutorado 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

DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

Tendo sido aprovada em sua forma final.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Raimundo Silvério Freire Júnior - Presidente

Prof. Dr. Anderson Clayton Alves de Melo (UFRN)

Prof. Dr. Raimundo Nonato Barbosa Felipe (IFRN)

Prof. Dra. Renata Carla Tavares Santos Felipe (IFRN)

Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior (UFCEG)

Natal, junho de 2016.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela energia e pelos caminhos traçados para continuar em frente.

A minha esposa, por estar sempre ao meu lado nos momentos de compreensão e incentivos.

Ao Dr. Raimundo Silvério Freire Júnior, amigo e professor orientador desta tese, pela paciência, força, incentivo e socialização de seu conhecimento para conclusão deste trabalho. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio à tese aqui apresentada seriam praticamente impossíveis.

Aos meus Pais, por entenderem das ausências em momentos importantes.

Ao amigo e Tecnólogo de Polímeros, Everton Silva dos Santos pela colaboração na preparação dos materiais e ensaios no SENAI/CIMATEC – BA.

À engenheira e professora, Pollyana da Silva Melo, por disponibilizar o laboratório de ensaios mecânicos no SENAI/CIMATEC – BA.

Ao técnico Carlos, pelo apoio e colaboração nos trabalhos no laboratório de ensaios mecânicos no SENAI/CIMATEC – BA.

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

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

Enfim, a todos que colaboraram na realização desta tese, e torceram incondicionalmente.

“O conhecimento é irresistível.”
(Autor desconhecido)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGRAS	XI
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
INTRODUÇÃO	1
JUSTIFICATIVA	3
OBJETIVOS	4
CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA	5
1. REVISÃO BIBIOGRÁFICA	6
1.1 COMPÓSITOS	6
1.2 MATRIZ POLIMÉRICA	18
1.3 REFORÇO	33
1.4 ESTUDO DO REPROCESSAMENTO DE TERMOPLÁSTICO E COMPÓSITOS	42
2. MATERIAIS E MÉTODOS	45
2.1 MATERIAS-PRIMAS UTILIZADAS	45
2.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DOS BIOCOMPÓSITOS	46
2.3 ENSAIOS REALIZADOS	54
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
3.1 ANÁLISES DO ÍNDICE DE FLUIDEZ (IF)	61
3.2 ENSAIOS REALIZADOS NO PP PURO REPROCESSADO	63
3.2.1 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL DO PP PURO REPROCESSADO	63
3.2.2 ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS DO PP PURO REPROCESSADO	66
3.3 ENSAIOS REALIZADOS NOS BIOCOMPÓSITOS DE PP COM FIBRAS DE CURAUÁ	68
3.3.1 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL	68
3.3.2 ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS	78
3.3.3 ENSAIO DE IMPACTO	81

3.3.4 ENSAIO MORFOLÓGICA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	83
4. CONCLUSÕES	89
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
REFERÊNCIAS	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema de processo para formação dos biocompósitos.....	11
Figura 1.2: Fluxograma horizontal e vertical dos mecanismos de falhas	16
Figura 1.3: Fratura adesiva e coesiva no laminado.....	17
Figura 1.4: Características da fratura do corpo de prova submetido à tração uniaxial	17
Figura 1.5: Unidade de repetição química do polipropileno.	18
Figura 1.6: Curva de tensão/deformação do PP KM 6100.....	26
Figura 1.7: Esquema de uma extrusora.....	28
Figura 1.8: Fabricação de biocompósitos por extrusão.....	29
Figura 1.9: Esquema de um processo de fabricação de grãos por extrusão	30
Figura 1.10: Esquema de uma injetora.....	31
Figura 1.11: Lamela média.....	38
Figura 1.12: Fibras de curauá (a) e (b).....	40
Figura 1.13: Fibras de curauá prontas para impregnação em plásticos reforçado.....	41
Figura 1.14: IF e PM em função dos ciclos de RPS.	42
Figura 1.15: IF em função do número de extrusões	43
Figura 1.16: ME do compósito (PP / cânhamo) em função do número de ciclos de injeção.....	44
Figura 2.1: Fibras de curauá picotadas.....	47
Figura 2.2: Estufa Palley	47
Figura 2.3: Misturador rotativo	48
Figura 2.4: Extrusora utilizada na obtenção dos biocompósitos	48
Figura 2.5: Abertura superior onde foram adicionados os materiais	50
Figura 2.6 (a) e (b): Saídas da mistura pelos dois furos da matriz da extrusora.	50
Figura 2.7: (a) Reservatório com água onde as misturas foram solidificadas; (b) Cordões sendo enviados para o granulador.	51
Figura 2.8: (a) Grãos de biocompósitos de PP com fibras de curauá homogeneizados; (b) Grãos de biocompósitos de PP com fibras de curauá homogeneizados em embalagens plásticas.....	52

Figura 2.9: Biocompósitos granulados utilizados para preparação dos corpos de prova na injetora Romi.....	52
Figura 2.10: Injetora da ROMI utilizada na preparação dos corpos de prova.....	53
Figura 2.11: Molde.....	53
Figura 2.12: Corpos de prova	54
Figura 2.13: Peso impulsionando os grãos fundidos no orifício padrão.....	55
Figura 2.14: Máquina universal.....	56
Figura 2.15: Corpo de prova para o ensaio de tração	56
Figura 2.16: Máquina de impacto.....	57
Figura 2.17: Corpo de prova para o ensaio de impacto sem entalhe	58
Figura 2.18: Corpo de prova para o ensaio de flexão	58
Figura 2.19: (a) Máquina de metalização DENTON VACUUM; (b) Corpos de prova metalizados.....	59
Figura 2.20: Microscópio eletrônico de varredura (MEV)	60
Figura 3.1: Índice de fluidez dos PP puro e biocompósitos de curauá reprocessados.....	62
Figura 3.2: Tensão máxima do polipropileno puro reprocessados.	64
Figura 3.3: Módulo de elasticidade do polipropileno puro reprocessados.....	65
Figura 3.4: Ensaio de tração do PP com velocidade 50 mm/min – reprocessamento I.	65
Figura 3.5: Ensaio de tração do PP com velocidade 50 mm/min – reprocessamento V.....	66
Figura 3.6: Tensão máxima do polipropileno puro reprocessados.	67
Figura 3.7: Módulo de elasticidade do polipropileno puro reprocessados.....	68
Figura 3.8: Ensaio de tração do biocompósito com 10% de curauá – reprocessamento I.	69
Figura 3.9: Ensaio de tração do biocompósito com 10% de curauá – reprocessamento V.....	69
Figura 3.10: Ensaio de tração do biocompósito com 20% de curauá – reprocessamento I.....	70
Figura 3.11: Ensaio de tração do biocompósito com 20% de curauá – reprocessamento II.....	70
Figura 3.12: Ensaio de tração do biocompósito com 20% de curauá – reprocessamento III.....	71
Figura 3.13: Ensaio de tração do biocompósito com 20% de curauá – reprocessamento IV	71
Figura 3.14: Ensaio de tração do biocompósito com 20% de curauá – reprocessamento V.....	72
Figura 3.15: Ensaio de tração do biocompósito com 30% de curauá – reprocessamento I.....	72
Figura 3.16: Ensaio de tração do biocompósito com 30% de curauá – reprocessamento V.....	73
Figura 3.17: Tensão máxima dos biocompósitos de fibras de curauá reprocessados.	75
Figura 3.18: Módulo de elasticidade dos biocompósitos de fibras de curauá reprocessados.	76

Figura 3.19: Deformação de ruptura dos biocompósitos de fibras de curauá reprocessados.	77
Figura 3.20: Tensão máxima dos biocompósitos de fibras de curauá reprocessados.	80
Figura 3.21: Módulo de elasticidade dos biocompósitos de fibras de curauá reprocessados.	80
Figura 3.22: Resistência ao impacto dos biocompósitos com 10% de curauá reprocessados.	82
Figura 3.23: Resistência ao impacto dos biocompósitos com 20% de curauá reprocessados.	82
Figura 3.24: Resistência ao impacto dos biocompósitos com 30% de curauá reprocessados.	83
Figura 3.25: (a) Reprocessamento I com 10% de fibras de curauá; (b) Reprocessamento V com 10% de fibras de curauá	84
Figura 3.26: (a) Reprocessamento I com 30% de fibras de curauá; (b) Reprocessamento V com 30% de fibras de curauá	85
Figura 3.27: (a) Reprocessamento I com 20% de fibras de curauá; (b) Reprocessamento V com 20% de fibras de curauá	86
Figura 3.28 (a) e (b): Falta de aderência, fibra com fissura transversal.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Propriedades gerais do PP puro.....	25
Tabela 1.2: Propriedades do PP.....	27
Tabela 1.3: Comparativo entre as propriedades das fibras de origens vegetais e sintéticas.....	37
Tabela 1.4: Composição da fibra de curauá.....	41
Tabela 1.5: Propriedades físicas e mecânicas das fibras de curauá.....	41
Tabela 1.6: Valores da tensão de escoamento do PP puro reprocessado.....	43
Tabela 2.1: Especificação do PP HP 550 K.....	45
Tabela 2.2: Composição das amostras.....	46
Tabela 2.3: Perfil de temperatura do corpo da extrusora.....	49
Tabela 3.1: Média dos valores encontrados dos grãos submetidos à análise de IF.....	61
Tabela 3.2: Resultados do polipropileno reprocessado obtidos do ensaio de tração.....	64
Tabela 3.3: Resultados do polipropileno reprocessado obtidos do ensaio de flexão.....	67
Tabela 3.4: Ensaio de tração dos biocompósitos PP/10% de fibras de curauá reprocessados ...	74
Tabela 3.5: Ensaio de tração dos biocompósitos PP/20% de fibras de curauá reprocessados ...	74
Tabela 3.6: Ensaio de tração dos biocompósitos PP/30% de fibras de curauá reprocessados ...	74
Tabela 3.7: Ensaio de flexão dos biocompósitos PP/10% de fibras de curauá reprocessados ...	78
Tabela 3.8: Ensaio de flexão dos biocompósitos PP/20% de fibras de curauá reprocessados ...	79
Tabela 3.9: Ensaio de flexão dos biocompósitos PP/30% de fibras de curauá reprocessados ...	79
Tabela 3.10: Ensaio de impacto dos biocompósitos PP/10% de fibras de curauá reprocessados	81
Tabela 3.11: Ensaio de impacto dos biocompósitos PP/20% de fibras de curauá reprocessados	81
Tabela 3.12: Ensaio de impacto dos biocompósitos PP/30% de fibras de curauá reprocessados	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – American Society for Testing and Materials.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

CP – Corpo de prova.

ET – Ensaio de tração uniaxial.

E – Módulo de elasticidade longitudinal.

IF – Índice de fluidez.

ISO – International Organization for Standardization.

ME – Módulo de elasticidade.

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura.

PP – Polipropileno.

PM – Peso molecular.

RPS – Reprocessamentos.

σ – Limite de resistência à tração.

ϵ – Deformação longitudinal de ruptura.

RESUMO

Esta pesquisa apresenta uma abordagem a cerca do processo de reciclagem do polipropileno reforçado com fibras de curauá reprocessado. Sendo uma proposta alternativa de reforço aos compósitos poliméricos. Teores de 10 %, 20 % e 30 % de fibras nos biocompósitos foram analisados para verificação de suas propriedades mecânicas comparando-as, inclusive com as propriedades do polipropileno (PP). Os biocompósitos granulados foram preparados por processo de extrusão, e os corpos de prova foram fabricados por processo de injeção e submetidos aos ensaios mecânicos de tração uniaxial, flexão em três pontos e impacto. Para verificação de danos aos corpos de prova utilizou-se da análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Estes biocompósitos também foram submetidos a ensaios físico - químicos de índice de fluidez (IF). Observou-se que os biocompósitos de polipropileno com 30 % de fibras de curauá apresentaram maior módulo de elasticidade tanto para tração, quanto para flexão e menor resistência ao impacto. Para todos os biocompósitos, os valores encontrados nos ensaios de tração para os limites de escoamento e tensão máxima tiveram valores aproximados à medida que se adicionavam as fibras de curauá. Outro ponto relevante foi o aumento da resistência à flexão no biocompósito à medida que promovia a adição de fibras de curauá e redução à medida que foram reprocessados, também houve redução da degradação térmica das misturas polipropileno e fibras de curauá, e o não comprometimento de uma forma em geral, da fabricação dos biocompósitos, quando analisados por microscopia eletrônica de varredura.

Palavras chave: Compósitos poliméricos granulados, polipropileno, fibras de curauá, propriedades mecânicas, extrusão, injeção.

ABSTRACT

This research presents an approach about the polypropylene recycling process reinforced with curauá reprocessed fibers. As an alternative proposal reinforcement to polymeric composites. Levels of 10 %, 20 % and 30 % of fibers in the biocomposites were analyzed to check their mechanical properties comparing them, even with the properties of polypropylene (PP). Pellets biocomposites were prepared by the extrusion process, and the specimens were manufactured by injection process and subjected to mechanical tests of uniaxial tensile, three point bending and impact. To check for damage to the specimens was used to analysis by scanning electron microscopy (SEM). These biocomposites were also subjected to testing physical – chemistry of index of fluidity (IF). It was observed that the polypropylene biocomposites with 30 % curauá fibers showed higher elastic modulus for both traction and to flexion and less resistance to impact. For all biocomposites, the values found in tensile tests to the limits of flow and maximum voltage have approximate values as they were added the curauá fibers. Another important point was increased resistance to bending in biocomposite as promoting the addition of curauá fibers and decrease as they were reprocessed also decreased thermal degradation of the polypropylene blends and curauá fibers, and no impairment of so in general, the production of biocomposites, when analyzed by scanning electron microscopy.

Keywords: Polymeric composites granulated, polypropylene, curauá fibers, mechanical properties, extrusion, injection.

INTRODUÇÃO

A procura de novos produtos que atendam aos normativos ambientais faz com que se busquem alternativas de processos de fabricação de materiais sustentáveis e recicláveis, reduzindo energia em etapas de produção durante a formação de matérias primas. Entretanto ainda encontram-se dificuldades em novas soluções de 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 e ambiental.

De acordo com Mohanty e Drzal (2005), Marinelli (2008), Santos (2012) e Ligowski (2015), desenvolveram diferentes materiais renováveis e/ou recicláveis, por meio de suas propriedades, com propósito de alcançar novas características ao produto, concentrando 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.

Segundo Pardini (2006), a utilização de fibras naturais em um compósito tem como propósito principal, salvo algumas exceções, fazer com que o mesmo atue como uma carga de material reciclável e de baixo custo à matriz, do que realmente reforça-la mecanicamente de forma significativa, além disso, envolvem aspectos ambientais, sociais e econômicos, uma vez que estes recursos são renováveis, biodegradáveis, e de baixo custo de fabricação.

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

Os materiais biocompósitos surgem como uma das alternativas aos materiais ditos convencionais, pois várias pesquisas vêm mostrando que se podem adquirir novas formas e/ou composições e propriedades.

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 e ARAÚJO, 2004). Além disso, as fortes pressões de comunidades, tanto nacional, quanto internacional, políticas, econômicas, e ambientais pelo uso de materiais sustentáveis, força a sociedade a buscar alternativas que não agrida ainda mais o meio ambiente.

Esta tese visou o estudo das propriedades mecânicas de biocompósitos desenvolvidos à base de fibras de curauá com matriz de polipropileno, por meio do processo de fabricação do tipo extrusão, no qual aumentou-se o percentual de carga na matriz. A avaliação do desempenho mecânico (resistência, módulo elástico e deformação na ruptura) dos novos biocompósitos foi efetuada por meio de um estudo comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial, flexão em três pontos e impacto, com os obtidos no polipropileno reprocessado e já em uso pela indústria.

JUSTIFICATIVA

Os biocompósitos granulados produzidos nesta tese surgem como uma alternativa para suprir as expectativas do mercado que exige cada vez mais produtos sustentáveis, leves, resistentes e recicláveis.

Esta tese se justifica em função da crescente preocupação do homem com o meio ambiente devido à contaminação do solo pelos materiais que possuem um período longo de degradação, fazendo com que o consumo de produtos recicláveis crescesse em todo mundo, levando a uma conscientização ecológica por parte da população com a preservação do meio ambiente, e por parte das indústrias o incentivo a produção de produtos biodegradáveis, com redução no consumo de energia e matérias primas utilizadas na fabricação dos produtos.

A matriz termoplástica foi escolhida por se tratar de um polímero de amplo uso em processo de extrusão e injeção, reprocessamento e de fácil reciclabilidade, e o material de reforço foi selecionado devido aos recursos renováveis, de fácil aplicabilidade, baixo custo, e por não ter a necessidade de tratamento especial de limpeza. Este processo de fabricação promoverá geração de renda para os trabalhadores rurais, benefícios sociais e econômicos, redução de impacto ambiental com a diminuição de resíduos, além de atendimento a legislação ambiental.

Para verificar a reciclabilidade dos materiais biocompósitos foi necessário realizar diversos reprocessamentos com intuito de analisar ganhos ou perdas mecânicas e físico-químicas, devido à degradação térmica que sofre os polímeros.

Foram necessários estudos nos biocompósitos com a finalidade de verificar a influência da adição de fibras de curauá na matriz termoplástica do tipo polipropileno e dos reprocessamentos nas características mecânicas e físico-químicas no processo por extrusão.

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

O principal objetivo desse trabalho de investigação é a obtenção e caracterização de novos biocompósitos granulados não degradáveis, com possibilidade de serem reciclados. Constituído de matriz termoplástica de polipropileno reforçado com fibras de curauá.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Desenvolvimento de biocompósitos com matriz de polipropileno e adição de fibras de curauá como reforço;
- ❖ Desenvolvimento de matéria-prima em forma de biocompósitos poliméricos granulados envolvendo 0 %, 10 %, 20 % e 30 % de fibras de curauá;
- ❖ Determinação da resistência e rigidez dos biocompósitos desenvolvidos por meio dos ensaios de tração uniaxial, flexão em três pontos e de impacto;
- ❖ Estudo comparativo envolvendo as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios acima mencionados;
- ❖ Estudos dos reprocessamentos possibilitando uma reciclagem dos biocompósitos através de análise do índice de fluidez (IF);
- ❖ Estudo do comportamento da adesão entre as fibras de curauá e a matriz de polipropileno, através de verificações visuais e Microscópicas Eletrônica de Varredura (MEV);
- ❖ Análise microscópica do mecanismo de dano (fratura) dos corpos de prova dos ensaios de impacto.

CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

As principais contribuições desta tese no estado da arte do estudo de biocompósitos à base de fibra natural com termoplástico podem ser listadas a seguir:

- ❖ Confirmação de que o uso de fibras naturais facilita o reprocessamento de um termoplástico consequentemente facilitando sua reciclagem;
- ❖ Comprovação que o uso de fibras naturais picotadas não diminui e até aumenta algumas das propriedades mecânicas dos termoplásticos;
- ❖ Comprovação que estas propriedades não são diminuídas significativamente com o seu reprocessamento;
- ❖ Confirmação de que o uso de fibras naturais no reprocessamento com termoplásticos diminui o índice de fluidez dos biocompósitos em relação ao termoplástico puro;
- ❖ Comprovação de que o reprocessamento do biocompósito aumenta a deformação de ruptura e a energia de impacto do mesmo.

CAPÍTULO - 1

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feito uma breve revisão bibliográfica sobre os compósitos, matriz polimérica, fibras naturais mais utilizadas na atualidade, bem como as fibras utilizadas neste estudo, e reciclagem de materiais compósitos.

1.1 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, e com 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.

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, onde as fibras de vidro são adicionadas em um polímero, preparado com materiais de natureza distintos (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).

Segundo Shackelford (2008), os compósitos devem ser selecionados de modo que devam fornecer as melhores propriedades de cada componente, sendo que a combinação desses dois materiais forneçam produtos superiores a qualquer um deles isolados.

1.1.1 Definições

Compósito é 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).

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).

Segundo Marinucci (2011), materiais compósitos são formados por dois ou mais componentes ou materiais distintos ou fases constituintes que apresentem nítida diferença nas propriedades físicas e químicas, mostrando uma fase descontínua comumente os reforços e uma fase contínua a matriz.

Segundo Smith e Hashemi (2012), a maioria dos materiais compósitos consiste em um material de enchimento ou de reforço apropriado e uma resina aglutinadora adequada a fim de que se obtenham as características específicas e as propriedades desejadas. Ainda afirma que um material compósito é formado por uma mistura ou combinação de dois ou mais micro ou macro constituintes que diferem na forma e na composição química e que, em sua essência, são insolúveis uns nos outros.

Um material compósito é formado por uma mistura ou combinação de dois ou mais micro ou macro constituintes que diferem na forma e na composição química e que, em sua essência são insolúveis uns nos outros (SMITH e HASHEMI, 2012).

Segundo Marinucci (2011), na fabricação de materiais compósitos utilizam-se os polímeros termofixos e os termoplásticos como matrizes, e as fibras como elementos de reforços. Sendo que a escolha da matriz depende da aplicação final do compósito, utilizando matrizes poliméricas para aplicações em materiais que trabalhem com temperaturas menores de 200 °C.

1.1.2 Propriedades dos compósitos

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 a algumas ligas metálicas estruturais são mais leve (PARDINI, 2006).

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

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 à 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).

Segundo Marinucci (2011), as propriedades dos compósitos estão diretamente associadas com as propriedades dos elementos constituintes do material, tais como propriedades da fibra e da matriz, concentração ou frações volumétricas, interface e adesão fibra/matriz, disposição das camadas e orientação, bem como pela geometria do filamento, tal como forma e tamanho.

1.1.3 Relação 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, sendo a matriz quem determina a temperatura máxima de serviço, uma vez que ela normalmente amolece, funde ou degrada em uma temperatura muito mais baixa do que a fibra de reforço (CALLISTER, 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 e 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 – Relacionado ao reforço (natureza e composição, preço e espessura);
- 2 – Respeito à matriz (propriedades reológicas e envelhecimento);
- 3 – Referente à interface (espessura, forças interfaciais, molhabilidade do reforço pela matriz, influência das impurezas e da água).

Marinho (2005) descreveu que os modelos de adesão podem ser a adesão mecânica, que consiste em um fenômeno de ancoramento mecânico da matriz nos poros e reentrâncias do reforço, após o endurecimento e adesão específica como os modelos eletrostáticos (baseados 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, podendo melhorar a interface através do tratamento do componente estrutural com um agente compatibilizante, por exemplo, fibras de vidro são tratadas com silanos, para melhor a compatibilização entre elas e às matrizes de poliéster.

Em função disto, é importante conhecer as propriedades da interface da relação reforço / matriz, que são específicas para cada material empregado, sendo essencial conduzir um entendimento das propriedades físicas e mecânicas dos materiais compósitos (MARINUCCI, 2011).

1.1.4 Compósitos a base de fibras naturais (biocompósitos)

Segundo Balaji (2015), biocompósitos são materiais formados por uma matriz e um reforço de fibras naturais, como juta, coco, sisal, abacaxi, rami, bambu, banana e do bagaço de cana de açúcar, cujas fibras são de baixos custos com altas propriedades específicas, baixa densidade e biodegradáveis.

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).

A fabricação de compósitos à base de fibras naturais, biocompósitos, está se tornando frequente, pois possibilita uniformizar as características de ambos e formaram 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, utilizando a incorporação de monômeros nas matrizes, no preenchimento dos espaços 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).

Balaji (2015) descreveu que milhares de toneladas de bagaços de fibras são produzidos, mas a maioria dos seus resíduos não tem qualquer utilização aplicável. Estes resíduos podem ser utilizados para preparação de compósitos poliméricos reforçados com fibras para uso comercial, evidenciado através de um esquemático de um processo para formação dos biocompósitos (figura 1.1).

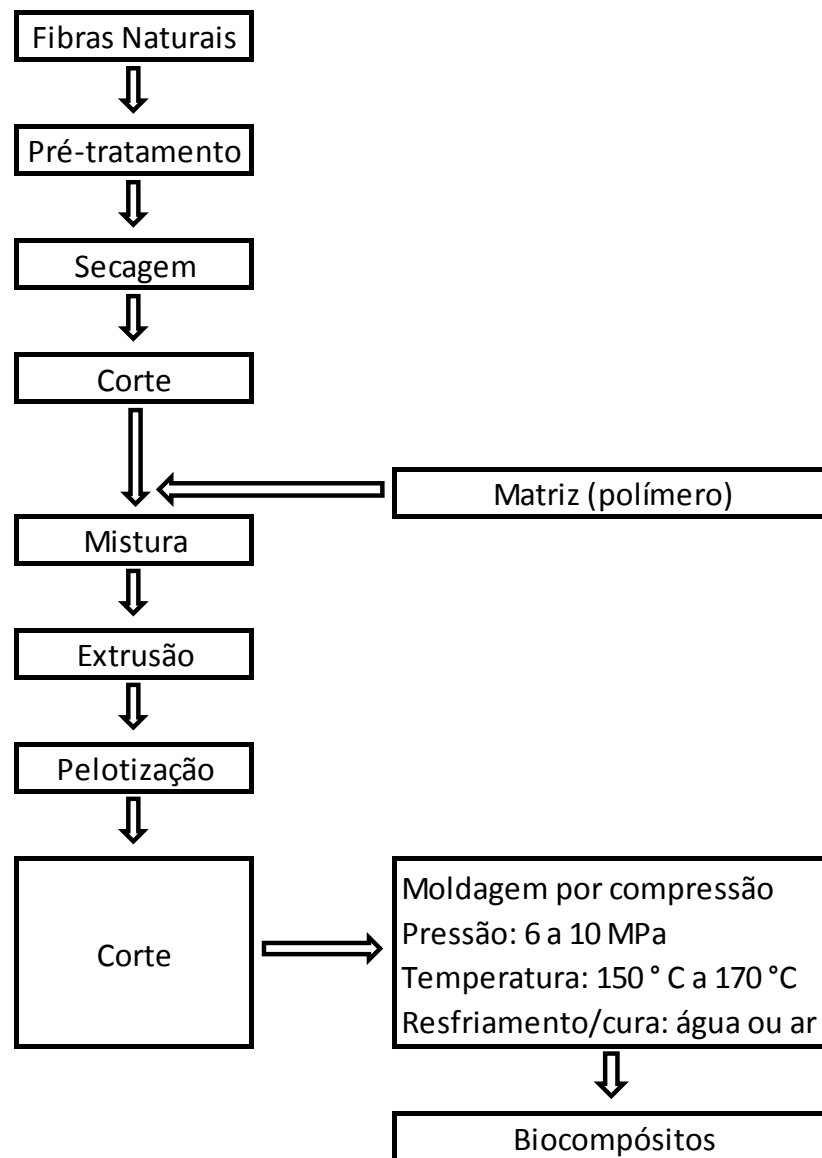


Figura 1.1 – Esquema de processo para formação dos biocompósitos (Adaptado de BALAJI, 2015).

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. (PARDINI e 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.

1.1.5 Propriedades mecânicas dos compósitos fabricados à base de fibras naturais

Para se colocar um produto no mercado é preciso caracterizá-lo, analisar as propriedades mecânicas durante as etapas de fabricação dos compósitos. Segundo Hage (1989), quase todo o desenvolvimento de compósitos, até os dias atuais, apresentam como principal objetivo a aplicação estrutural. Portanto, as propriedades que despertam maior interesse são mecânicas. Dentre as características mecânicas mais importantes dos compósitos destaca-se o módulo elástico ou módulo de Young, módulo este que está diretamente relacionado com a rigidez do compósito.

Outro ponto importante em relação ao módulo de elasticidade do compósito é a relação da fração em volume de fibra e da matriz. Como o módulo da fibra é em geral superior ao da matriz, conforme for aumentando a fração de fibra o módulo do compósito vai aumentando. No entanto, outros fatores devem ser considerados, como: comprimento da fibra, ou seja, fibras muito curtas não terão muitos pontos de contato com a matriz podendo se desprender, e fibras muito longas tornam mais difícil uma distribuição homogênea. A intensidade de adesão na interface é também um fator de grande relevância (HAGE, 1984; PAIVA *et al.*, 1999).

Marinucci (2011), descreveu que as propriedades mecânicas dos compósitos são dependentes das propriedades da matriz e da fibra, sendo também importante caracterizar o produto final, por meio do ensaio de tração, o mais comum entre os ensaios normalizados para caracterização mecânica de materiais permitindo a determinação de propriedades, como resistência, módulo de elasticidade, deformações longitudinais e transversais.

1.1.6 Fatores que influenciam nas propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras

São vários os fatores que influenciam as propriedades mecânicas dos compósitos em geral: processo de fabricação, ângulo de fibra, configuração do compósito, percentual de fibra, tipo de resina, presença de vazios, formas de carregamentos, mecanismo de dano, a qualidade de

interface, a presença de condições adversas de umidade e temperaturas e principalmente as propriedades dos elementos constituintes (BARROS, 2006).

As propriedades mecânicas de um compósito são dependentes da orientação das fibras, no qual o desempenho estrutural pode ser avaliado por análises mecânicas na direção do alinhamento das fibras em diferentes frações de volume das fibras (JOSEPH *et al.*, 2003; BARROS, 2006).

As propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibras curtas de sisal, contendo fibras tratadas e fibras não tratadas, vêm sendo estudadas levando em consideração o carregamento e o comprimento da fibra, tratamento químicos, frequência e temperatura. Pela incorporação de fibras curta de sisal no polipropileno (PP), observaram diferenças nestas propriedades e, também, que os compósitos utilizando fibras naturais tratadas apresentaram uma melhoria nas propriedades mecânicas quando comparados com as fibras não tratadas (BARROS, 2006).

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

Segundo Pardini (2006), os principais fatores que influenciam as propriedades mecânicas e mecanismos de falha em compósitos com reforço de fibras são as propriedades do reforço e da matriz, fração volumétrica de reforço (fibras), orientação do reforço e comprimento do mesmo e a propriedades da interface reforço/matriz.

Segundo Baliqi (2015), o desempenho dos biocompósitos depende de vários fatores, incluindo a composição química das fibras, dimensões celulares, ângulo microfibrilar, defeitos, estrutura, propriedades físicas e mecânicas e também a interação da fibra com a matriz polimérica.

Em relação aos equipamentos de transformação (MARINUCCI, 2011), descreveu que deve ser estabelecido com critério o processo de corte e os parâmetros de velocidade de fabricação dos corpos de prova que serão utilizados nos ensaios de caracterização do compósito, pois podem ocorrer falhas como microtrincas, influenciando nos resultados das propriedades mecânicas.

1.1.7 Reciclagem dos biocompósitos

O aumento da aplicação da tecnologia dos materiais compósitos a base de polímeros no século XX, como exemplos de peças manufaturadas de compósitos de matriz polimérica em partes automotivas, ocorre em paralelo o crescimento dos resíduos destes materiais, logo é essencial o desenvolvimento de processos de reciclagem para materiais compósitos, entretanto é indispensável treinamentos para os operadores de produção, manuseio e utilização adequados das matérias-primas, sendo que o método disponível de resíduos em aterros sanitários, cada vez mais se torna inviável, devido ao alto custo exigido pela legislação ambiental (UNSER, 1996).

Rowell (1994), afirmou que à reciclagem de materiais tem incentivado a utilização de fibras naturais como reforço para obtenção de compósitos, contudo, é importante verificar o comportamento destes materiais no escoamento do fluido nas máquinas.

A reciclagem atende a necessidade da sociedade e da legislação ambiental que solicita o reuso de matérias por parte das empresas fabricantes, além disso, pode gerar série de importantes benefícios sociais e econômicos (empregos e renda) na região que adota este processo (COELHO, 2009).

Segundo Ferreira *et al.* (1999), compósitos termoplásticos são alternativas para compósitos de matriz termofixa para algumas condições de menor solicitação e vem ganhando usos tecnológicos devido a algumas vantagens como baixo custo de manufatura, alta tenacidade à fratura, boa resistência ao impacto e a microtrincas, fácil controle de qualidade e principalmente por poderem ser reciclados.

Na obtenção biocompósitos granulados e reciclados é necessário ter um controle do índice de fluidez (IF), ou pelo menos mantê-la na faixa de limites de parametrização dos equipamentos. A qualidade do produto depende da especificação adequada dos materiais, que dependem de controles de processos e de uma condição constante de operação da unidade industrial. Entretanto, como a necessidade de ajustes nas fórmulas químicas e nos equipamentos da unidade para formar os produtos na faixa desejada nem sempre é possível. Logo, as experiências adquiridas no manuseio operacional direcionam os valores a faixa dentro da qual os grãos de biocompósitos formados podem variar sem prejudicar suas características, mantendo-se no limite de especificação.

A fabricação e reutilização de granulados de biocompósitos reciclados com polipropileno e fibras naturais devem ser caracterizadas pela sua fluidez, sem por em risco a qualidade do

produto resultante, sendo importante para obter dados necessários para as indústrias de transformação adaptar suas máquinas, promovendo um melhor desempenho dos maquinários durante os processos e reprocessos de transformação e reciclagem dos materiais, pois existe limite de carga de alimentação dos equipamentos, que depende do tamanho da cadeia, ou seja, com alta massa molar a carga é reduzida para que haja uma fusão adequada, entretanto necessitará de mais tempo para processar todo o material.

Neste contexto, de forma geral, a reciclagem proporciona economia de energia e recursos naturais, recuperando o produto utilizado e descartado ao novo ciclo produtivo com o objetivo de reutilizá-lo, trazendo vários benefícios para a sociedade e meio ambiente, tais como a diminuição da contaminação do solo e da água, geração de novas fontes de renda e empregos, e a formação de uma consciência ecológica (BRASIL e SANTOS, 2004).

A reciclagem é o processo no qual, resíduos de produtos que já foram consumidos e objetos que seriam descartados no meio ambiente, por serem considerados inutilizáveis, são reinseridos no ciclo produtivo através da sua utilização como matéria prima para a fabricação de novos produtos, utilizando dos processos de reciclagem, que pode variar de acordo com o material a ser reaproveitado, dentre os quais se podem destacar o papel e o plástico (LOMASSO *et al.*, 2015).

1.1.8 Mecanismo de dano

Durante a utilização do material compósito, o mesmo pode ser submetido a vários tipos de tensões, as quais dão origem a um mecanismo complexo com vários tipos de fratura, definido como “dano”, devido ao prejuízo ocorrido nas propriedades mecânicas dos mesmos durante o carregamento (REIFSNIDER, 1982). O tipo e a forma de dano podem ser influenciados por diversos fatores, como o tipo e o sentido da carga aplicada, as propriedades físicas, químicas e mecânicas da fibra e da matriz, o processo de fabricação, a configuração do material compósito, os percentuais de fibra, matriz e vazios, a umidade absorvida e a temperatura de trabalho (BARROS, 2006).

Devido à grande variedade de fatores é extremamente difícil prever onde e como um dano se forma e, até mesmo, a sua propagação em um material compósito. A literatura mostra que, mesmo quando variando apenas um dos fatores acima mencionados, haverá variações significativas na formação e propagação do dano (BARROS, 2006).

Silva (1996) ilustra um fluxograma horizontal e vertical entre os mecanismos de falhas, figura 1.2.

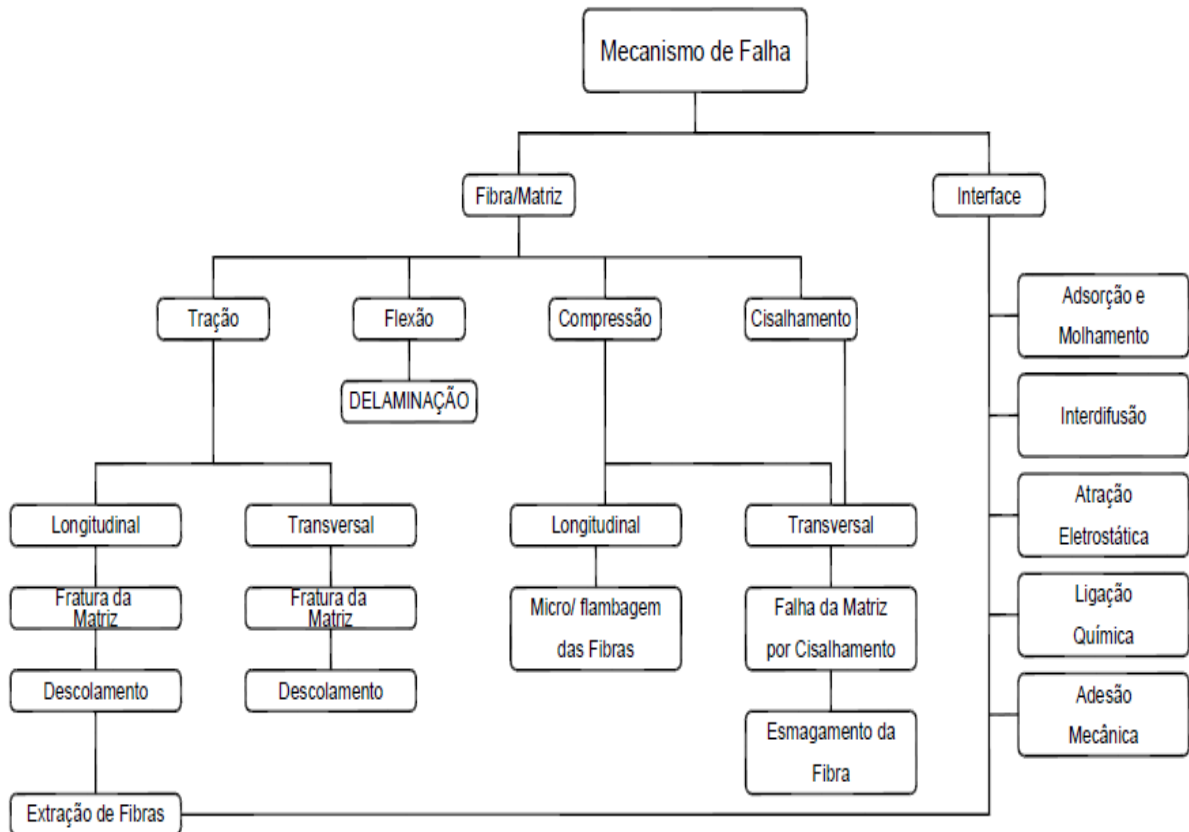


Figura 1.2 – Fluxograma horizontal e vertical dos mecanismos de falhas (SILVA, 1996).

Segundo a literatura (Barros, 2006), os principais tipos de danos encontrados nos materiais compósitos laminados são:

- Fissuração na matriz – ocorrência de uma ou mais fissuras na matriz do material compósito (fratura coesiva na matriz), vide figura 1.3;
- Ruptura da fibra – ocorrência da ruptura transversal ou longitudinal da fibra (fratura coesiva na fibra), vide figura 1.3;
- Desaderência fibra matriz – descolamento na interface entre fibra e matriz (fratura adesiva), vide figura 1.3;
- Delaminação – desaderência entre as camadas de um compósito laminado;

- Microflambagem – deformação ocasionada nas fibras do laminado quando submetido a esforços de compressão formando pequenas desaderência na interface fibra/matriz.

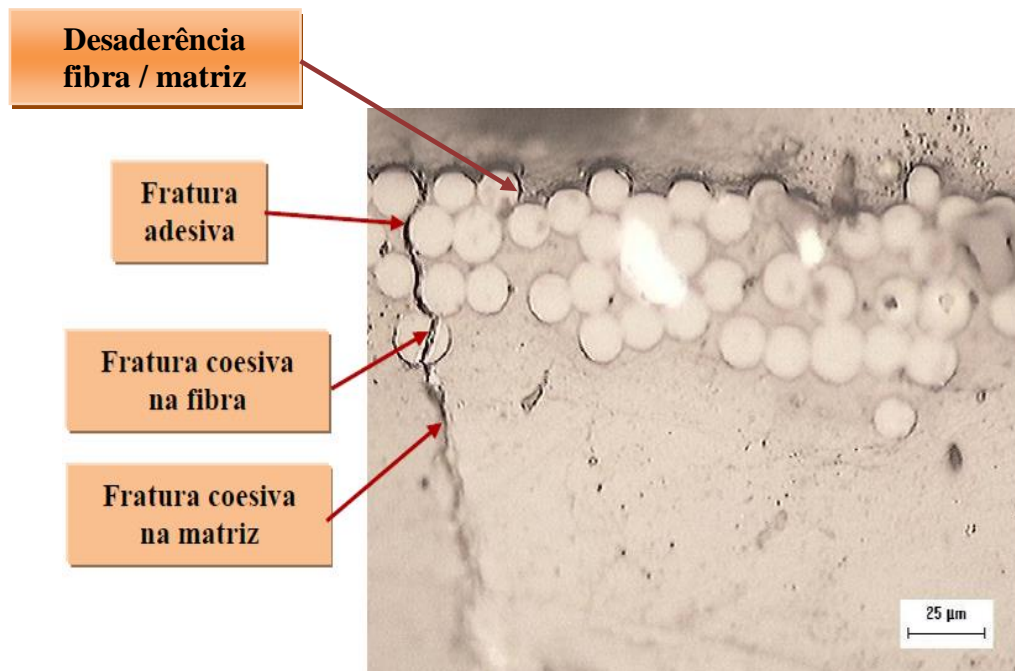


Figura 1.3 - Fratura adesiva e coesiva no laminado (DALTRO, 2011).

É possível identificar os danos nos materiais compósitos após ensaios mecânicos por meio de MEV, sendo que estes defeitos poderão prejudicar as propriedades mecânicas do produto final.

A figura 1.4 ilustra-se as características de danos originadas no ensaio do compósito laminado (DALTRO, 2011).

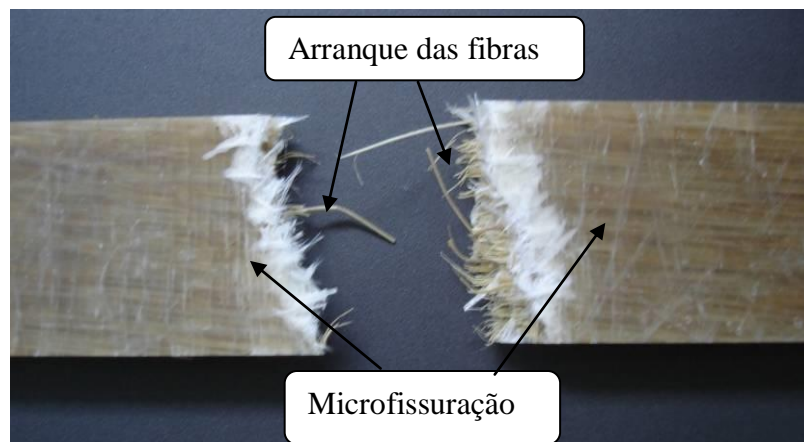


Figura 1.4 - Características da fratura do CP submetido à tração uniaxial (DALTRO, 2011).

Segundo Smith e Hashemi (2012), os cientistas e profissionais do campo da engenharia de materiais usam várias ferramentas (instrumentos) para estudar e entender o comportamento de materiais baseado na sua microestrutura, na existência de defeitos, nos microconstituintes, e outros recursos e características específicas da estrutura interna do material. Entre estes, destaca-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV), que permite aprofundar sobre as características internas e superficiais dos materiais. Utiliza-se para realizar medidas e observações microscópicas, caracterizar a fratura, fazer estudos da microestrutura, avaliar as camadas de recobrimento, mensurar a contaminação de superfície e analisar falhas de materiais.

1.2 MATRIZ POLIMÉRICA

Polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) de unidades de repetição denominadas mero, ligadas por ligação covalente. A matéria-prima para a produção de um polímero é um monômero (estrutura química), isto é uma molécula com uma (mono) unidade de repetição, para que ocorra a síntese é necessário que se liguem entre si para formar a cadeia polimérica, sendo que cada monômero deve ser capaz de se combinar com outros dois monômeros, no mínimo, para ocorrer à reação de polimerização (CANEVAROLO, 2013).

Segundo Eloísa e Luís (1999), monômeros são compostos químicos suscetíveis a reagir para formar polímeros. A figura 1.5 mostra as representações simbólicas da unidade estrutural de repetição química do polímero polipropileno.

Segundo Andrade *et al.* (2001), polímero é uma 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.

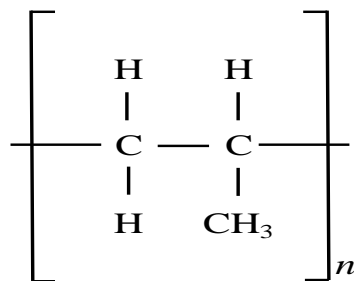


Figura 1.5 – Unidade de repetição química do polipropileno (SMITH e HASHEMI, 2012).

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 é um processo de conversão de um monômero ou de uma mistura de monômeros em um polímero.

Segundo Mano (2007), por reações de polimerização entendem-se aquelas em que substâncias simples reagem entre si, combinando suas moléculas e formando moléculas maiores, caracterizadas pela repetição de uma unidade básica. 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, como o polietileno, polipropileno, cloreto de polivinila e poliestireno. A reação por condensação acontece em estágios e 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; *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 (CANEVAROLO, 2002).

Durante a polimerização podem surgir três casos ou todos os átomos de carbono assimétricos 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 e MENDES, 1999).

Em relação ao comportamento em altas temperaturas, 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.

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.

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 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, 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 Tipos de matrizes poliméricas

Os materiais poliméricos são geralmente leves, isolantes elétricos e térmicos, flexíveis e apresentam boa resistência à corrosão e baixa resistência ao calor (PADILHA, 1997).

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 e NETO, 2006).

Segundo Padilha (1997), termoplásticos pode ser repetidamente conformado mecanicamente desde que reaquecidos. Portanto, não só a conformação a quente de componentes é possível, mas também a reutilização de restos de produção, que podem ser reintroduzidos no processo de fabricação (reciclagem).

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). Os polímeros 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 protegem as fibras 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 e frágeis do que os termoplásticos, e possuem melhor estabilidade dimensional.

1.2.2 Reciclagem dos polímeros

Segundo Chancerel e Rotter (2009), reciclagem é um processo com uma sequência de etapas e técnicas utilizadas nos materiais, visando reutilizar as matérias primas que são sujeitas a recuperação, sendo que dependem do tipo de processo, resíduo e utilização do produto.

A reciclagem consiste na transformação física de resíduos poliméricos após consumo e sobras de fabricação em granulados com intuito de reutilização como novos produtos. Os polímeros podem interagir com impurezas do meio (calor, oxigênio, umidade, emissões de poluentes atmosféricos e radiação ultravioleta) durante seus reprocessamentos, podendo alterar a sua composição, cujas consequências seriam a mudança nas propriedades mecânicas do produto submetidos a processos físicos e químicos (VILAPLANA *et al.*, 2006).

As matrizes termoplásticas à temperatura ambiente estão em estado sólido, podem ser recicladas, e o processo se dá por aquecimento, fusão e resfriamento. Já, as matrizes termofixas, à temperatura ambiente, estão em estado líquido na qual se utiliza de catalisadores para a obtenção de estado sólido (acelerador de cura – substância utilizada para aumentar a velocidade de processos de cura ou vulcanização). Não é reciclável e o processo de curado se dá a temperatura ambiente. Ainda, nas matrizes termoplásticas, são inúmeras as vantagens, como o tempo de estocagem, moldagem, resistência mecânica, custo de processamento, baixa densidade e possibilidade de reciclagem (TIO, 2007).

Para promoção da reciclagem dos polímeros é indispensável avaliar o desempenho destes nos maquinários de transformação por meio da análise do índice de fluidez (IF), pois este produto é caracterizado pela fluidez de seu estado de fusão. Dornelles Filho e Atolino (2009) destaca a fluidez (ou a viscosidade em estado fundido) dos materiais plásticos, muitas vezes tomada com medida do peso molecular, já que guarda uma relação direta com a viscosidade e o desempenho mecânico do plástico de engenharia.

Contudo é preciso reduzir o máximo a degradação no processamento mecânico que pode provocar alterações no comportamento reológico (deformação dos materiais sob fluxo) e nas propriedades mecânicas dos polímeros, devido à cisão de cadeia [ruptura de ligações da cadeia principal de um polímero (ANDRADE *et al.*, 2001)].

Estudo sobre a energia necessária para a produção de alguns materiais, entre elas a resina termoplástica, segundo Cerqueira Leite (1988); Padilha (1997), para a produção do polipropileno é de 108 a 113 GJ/tonelada, 87,3% superior de energia necessária para a produção do papel que é de 59 GJ/tonelada, 39% superior de energia necessária para a produção da poli (cloreto de vinila) (PVC) que é de 79,5 GJ/tonelada (valor médio). Logo, é preciso se preocupar com a redução deste recurso, e os produtos recicláveis pode surgir como uma das alternativas.

Segundo Michaeli *et al.* (1995), o melhor resultado na reciclagem de termoplásticos pode ser obtido quando os resíduos a serem utilizados forem completamente puros, isto é, em gênero e

tipo de plástico, aditivos e cargas. Além disso, o resíduo deve estar limpo quando se quiser novamente fabricar produtos valiosos. Um exemplo de um bom produto reciclado é o engradado defeituoso de polipropileno reunido na cervejaria. Como cada cervejaria retoma apenas os seus próprios engradados, eles são de um único tipo e da mesma cor. Os engradados são moídos em moinhos especiais no transformador de plásticos. As sujeiras aderidas ao plástico são lavadas com água. O plástico moído é lavado e então seco e transformado, com aditivos, em novos engradados, junto não é inserido nenhum material novo, se o nível de qualidade satisfizer a condição de reutilizável. Desta forma, o engradado de cerveja é um produto 100% reciclável.

1.2.3 Termoplástico polipropileno

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 foi 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 e tubulares), 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 e Mendes (1999), a preparação se dá em dois meios, um por poliadicação em lama, monômero com catalisador de Ziegler-Natta, heptano, 60° C, 20 PSI; e outro por poliadicação em fase gasosa, monômero com 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.

Poliolefinas, 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).

Características físicas gerais do polipropileno

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

Segundo Paiva e Wiebeck (2004), polipropileno é um termoplástico, branco e opaco, dependendo da cristalinidade pode ser transparente, sendo que se de baixa cristalinidade é biorientado, além de possuir alto brilho.

Segundo Marinho (2005), filmes de polipropileno obtidos por extrusão, fornecem um produto brilhante, transparente e forte.

Propriedades do polipropileno

As propriedades dos polímeros dependem principalmente de três fatores, da natureza química dos monômeros e suas implicações na estrutura molecular formada, tanto no que se refere à constituição quanto à configuração, ao peso molecular e à conformação, do processo de preparação empregado, devido ao mecanismo envolvido e, portanto, suas repercussões na estrutura macromolecular e da técnica escolhida para essa preparação, com a conseqüente adequação maior ou menor do polímero formado para um determinado processo (MANO, 1994).

Segundo Marinho (2005), polipropileno tem ótimas propriedades dielétricas (são afetadas pela presença de resíduos de catalisador), pode ser usada em temperaturas mais altas que o polietileno, apresenta alta impermeabilidade à água, resistem às graxas, óleos e ácidos minerais, sua molécula isotática (todos os grupos de radicais estão no mesmo lado da cadeia), por ter estrutura linear e regularmente ordenada, pode ser facilmente orientada por estiramento para proporcionar fibras de excelentes qualidades mecânicas, também apresentam vantagens, sobre os filmes de polietileno de baixa densidade, como maior resistência a tração e maior impermeabilidade a gases e vapores.

Na tabela 1.1 mostram-se as propriedades gerais do polipropileno puro.

Tabela 1.1 – Propriedades gerais do PP puro (MANUAL DE POLIPROPILENO, 2007).

Propriedades	Valores Típicos
Peso Molecular, g/mol	80.000 - 500.000
Densidade Volumétrica, g/cm ³	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 Vítre (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), especificados por faixa de valores usados como referências para desempenho dos maquinários de transformação.

Segundo Fachine *et al.* (2006), a resistência à tração no polímero possui um comportamento altamente dúctil, com estricção e escoamento extensivo do corpo de prova, e ocorrência da ruptura após uma grande deformação (figura 1.6).

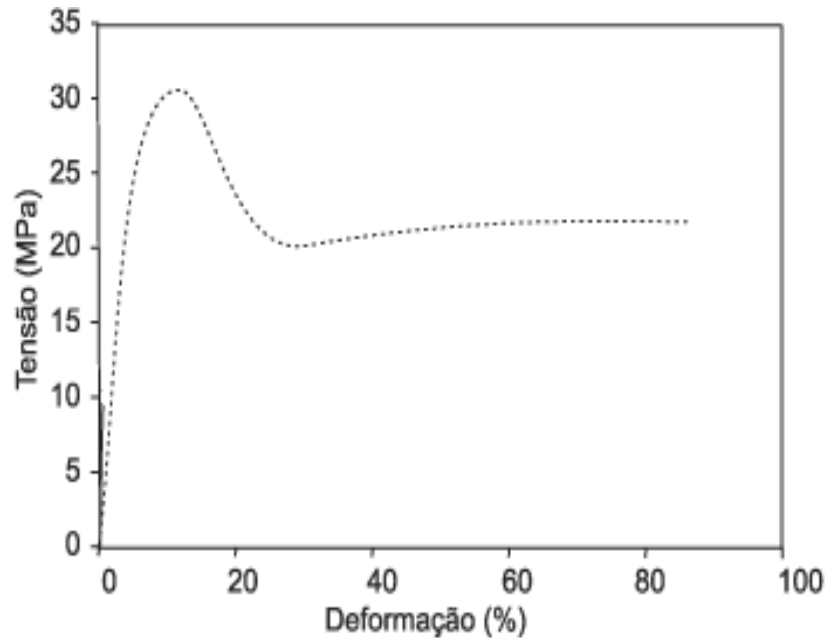


Figura 1.6 - Curva de tensão/deformação do PP KM 6100 (Adaptado de FECHINE *et al.*, 2006).

O comportamento de deformação mecânica deste material está fundamentado na viscoelasticidade, no qual está associado à resposta elástica e viscosa, simultânea ou não, apresentado pelos polímeros. Um material viscoelástico, sob deformação, terá um comportamento misto que resultará em recuperação parcial da deformação depois de retirada a força atuante sobre o material (CANEVAROLO, 2013).

Nos processos de formação, transformação e reciclagem de plásticos, bioplásticos, compósitos e biocompósitos, o índice de fluidez em função de sua fácil medição e compreensão, é considerado como importante parâmetro amplamente utilizado para caracterizar a propriedade de escoamento destes materiais, promovendo um melhor controle durante os seus processamentos e reprocessamentos em maquinários.

Segundo Smith e Hashemi (2012), polipropileno possui bom equilíbrio de propriedades para a produção de bens manufaturados, pois incluem resistência química à umidade e ao calor, juntamente de baixa densidade (0,900 a 0,910 g/cm³), boa dureza superficial e estabilidade dimensional, possui ótima vida útil quando sujeito a torção, e pode ser utilizado em produtos com dobradiças.

O termoplástico polipropileno (PP) HP 550 K contratipo (semelhantes em propriedades e aplicação) do (PP) KM 6100, o qual foi utilizado nesta pesquisa para a formação e

reprocessamento dos biocompósitos à base de PP com adição de fibras de curauá, apresentam suas propriedades com valores típicos na tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Propriedades do PP (QUATTOR, 2010).

Propriedades do PP Puro		Unid.	KM6100	HP550K
Físicas	IF - 2,16 kg / 230°C	g/10min	2,5 a 4,5	3,5
	Densidade (23°C)	g/cm ³	0,905	0,905
Mecânicas	Tração no Escoamento (50 mm/min)	MPa	36	36
	Alongamento (50 mm/min)	%	9	9
	Módulo de Elasticidade	GPa	1,02	-
	Módulo de Flexão (1,3 mm/min)	GPa	1,55	1,55
	Resistência ao Impacto IZOD 23 °C	J/m	45	45
	Dureza Shore D (1s)	-	73	73
Térmicas	Temperatura de Amolecimento Vicat (10N/Taxa A)	° C	154	155
	HDT 455 KPa	° C	105	91

Processo de transformação do polipropileno

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

a) 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 (2008), 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, tubos, 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.

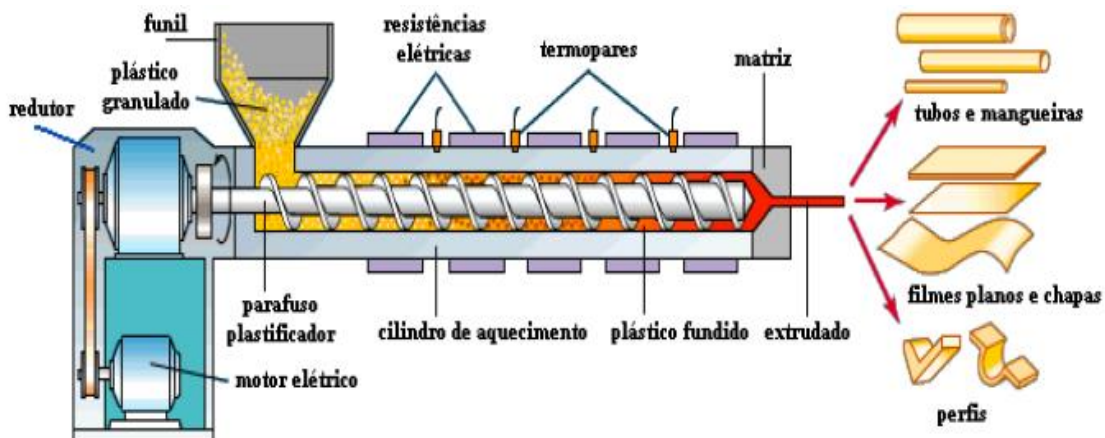


Figura 1.7 – Esquema de uma extrusora (MIOTTO; FEITOSA, 2008).

Segundo Paiva e 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.

Mohanaty (2005), apresentou uma representação esquemática de fabricação de grãos de biocompósitos por meio de processamento por extrusão, conforme figura 1.8.

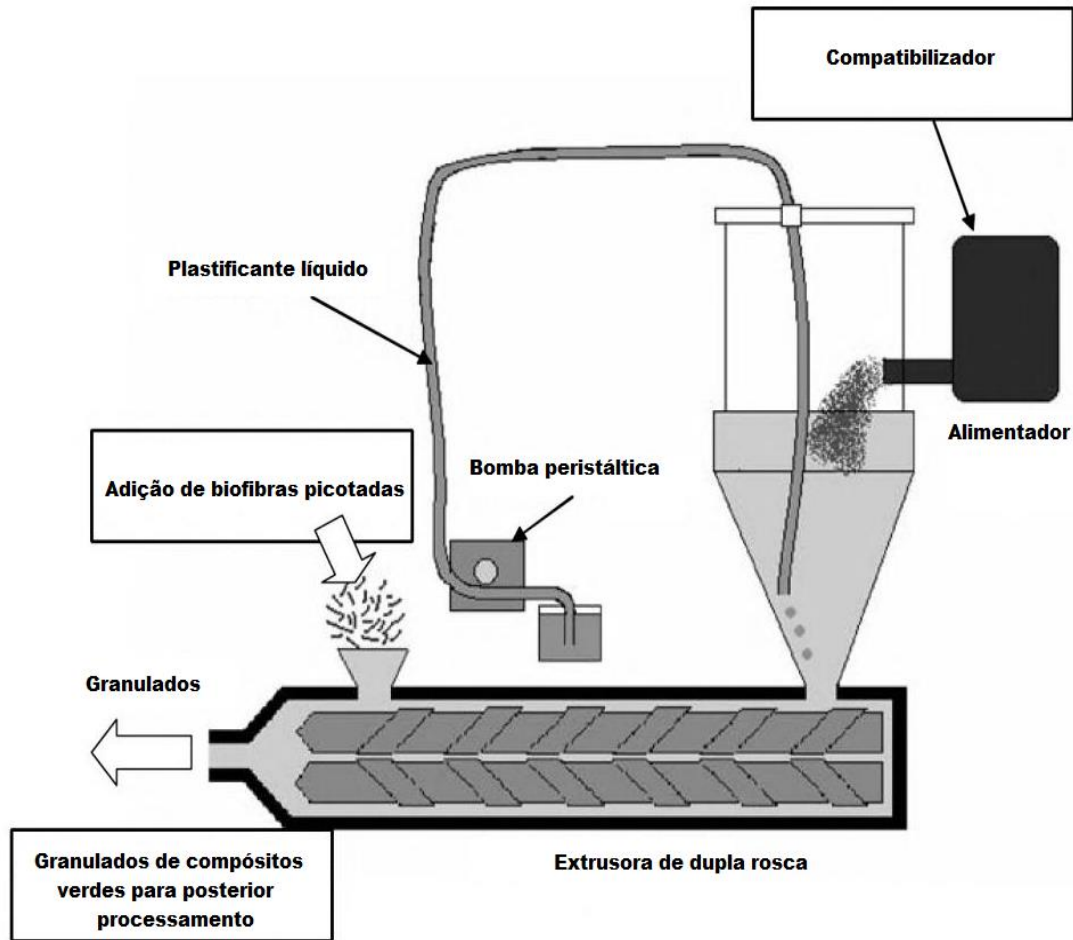


Figura 1.8 – Fabricação de biocompósitos por extrusão (Adaptado de MOHANATY *et al.*, 2005).

b) Processo de peletização por extrusão

O processo de peletização, vide figura 1.9, 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, o polímero termoplástico fundido (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.

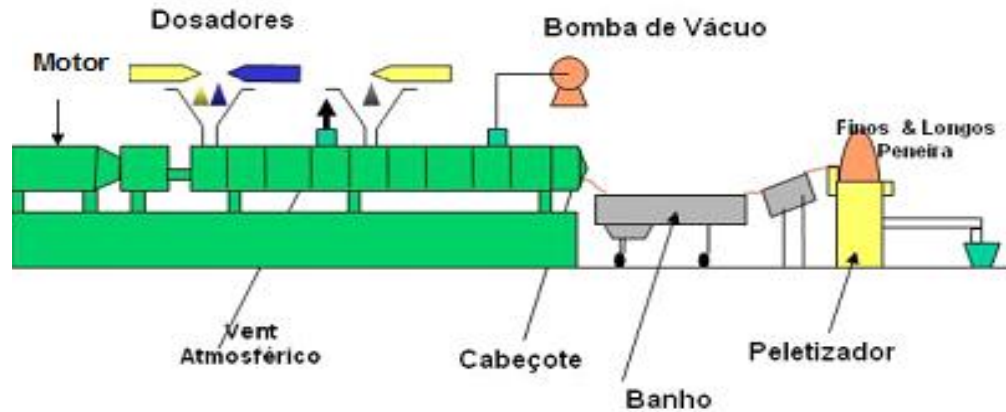


Figura 1.9 – Esquema de um processo de fabricação de grãos por extrusão (MOURA e GRAMOLELLI, 2008).

Após 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 até 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 influência na maleabilidade, resistência à tração e torção, alongamento e aspecto visual do produto (BRIDGE, 1997).

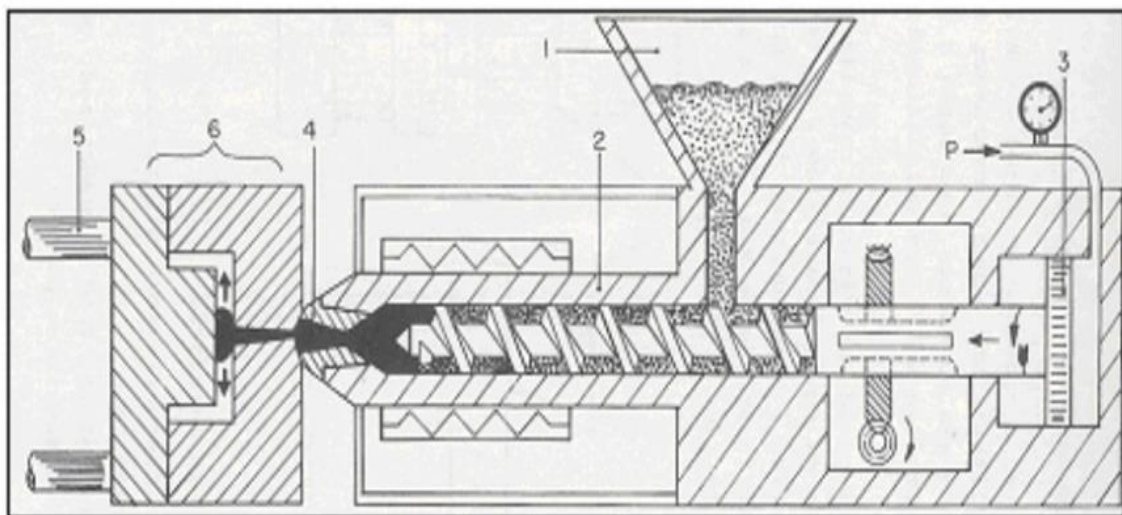
c) Processo por injeção

Segundo Andrade *et al.* (2001), injeção é um processo de transformação de termoplástico, no qual o material polimérico é fundido, homogeneizado, transportado, dosado e injetado no molde por ação de calor e pressão e, por meio de um êmbolo, chega a um molde com o formado desejado.

Moldagem por injeção consiste em aquecer a matéria-prima polimérica até o estado pastoso, relativamente fluido, que deve ser injetado sob pressão para dentro da cavidade de um molde mais frio que o polímero fundido e aí mantido até que a massa moldada esteja completamente solidificada, tendo a matéria-prima polimérica adquirida à geometria da cavidade do molde.

As operações envolvidas durante a moldagem de uma peça por injeção (figura 1.10), o polímero é alimentado através do funil de alimentação até a câmara de aquecimento, onde funde sobre ação de fonte de calor externo gerado por resistências elétricas e calor proveniente do cisalhamento induzido pela rotação de uma rosca sem fim. Durante o transporte do polímero da região de alimentação até a outra extremidade do canhão, onde se localiza o bico da injetora, onde começa a solidificação e homogeneização. À medida que o material é levado para frente do canhão, é gerada uma pressão que faz a rosca se deslocar axialmente, e que a certa quantidade de material levada para frente do canhão atinge o valor pré-estabelecido, a rosca ira atuar como pistão, forçando o material plastificado a preencher o molde, sendo que as principais funções da rosca são transportar o material para frente do canhão, plastificar (fundir) e homogeneizar o polímero e injetá-lo sob pressão para dentro do molde (HARADA e UEKI, 2012).

O molde não pertence diretamente à máquina injetora, uma vez que para cada peça deve ser constituído individualmente. É composto no mínimo de duas partes principais, sendo cada uma fixa em uma placa de fixação na unidade de fechamento. O tamanho máximo no molde é definido pelo tamanho da placa de fixação e pela distância entre duas colunas vizinhas da máquina. Composto essencialmente por placas com cavidades, sistema de alimentação, sistema de troca de calor, e sistema de extração, estes cumprem essencialmente as funções de receber e distribuir o fundido e modelar o fundido na forma da peça (MICHAELI *et al*, 1995).



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 1.10 – Esquema de uma injetora (SANTOS e MARTINS, 2004).

No caso da moldagem por injeção, embora o tempo de permanência do polímero fundido na injeção seja significativamente curto (alguns segundos), sugere-se que a oxidação térmica também realiza um papel importante (TORRES *et al.*, 2000).

Segundo Smith e Hashemi (2012), o processo de moldagem por injeção possui vantagens como, produtos de alta qualidade, que pode ser produzidos a uma alta taxa de produção, baixos custos de operação, produto de alto acabamento superficial e utilizar de várias formas de fabricação.

1.2.4 Uso do polipropileno

Segundo Paiva e Wiebeck (2004), o polipropileno pode ser aplicado em para-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 termo formadas 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 é utilizado para a fabricação de brinquedos, para-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).

Smith e Hashemi (2012) descrevem que o polipropileno pode ser aplicado em artigos de laboratório, proteções de ventiladores, revestimentos protetores de capacete, material de tecido em sacas, encerramento de parafusos, cases e contêineres. Sendo este polímero o terceiro mais importante plástico em uma classificação por vendas, e é um dos que possuem o menor custo, uma vez que pode ser produzido com materiais petroquímicos de baixo custo.

O polipropileno usado em matriz polimérica pode ser de vários tipos. O PP do tipo 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.

O PP do tipo HP 500 N é utilizada para tampas com lacre ou flip-top, utilidades domésticas, brinquedos, corpos de eletrodomésticos, tampas em geral (CAMARPLÁSTICOS, 2016); e HP 640 S aplica-se em peças de paredes finas e elevada razão de fluxo, ciclo rápido, aditivado com clarificante (FORTYMIL, 2013).

1.2.5 Comportamento Mecânico dos Polímeros

As propriedades mecânicas dos polímeros são caracterizadas pelo modo com que esses materiais respondem às solicitações mecânicas aplicadas (tipo tensões e deformações). A natureza desta resposta depende de estrutura química, temperatura, tempo (relacionados aos ensaios) e das condições de processamento e reprocessamento.

1.3 REFORÇO

As fibras de origens sintéticas, naturais e vegetais têm sido alternativas de reforços para materiais compósitos, sendo utilizadas nas formas de fibras contínuas, picotadas e particuladas.

Segundo Marinho (2005), a fibra é um material que possui resistência à ruptura e, conseqüentemente, um maior módulo de elasticidade em relação a um material não transformado em fibras.

1.3.1 Fibras sintéticas

As fibras artificiais rayon, viscose e acetato 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 rayon acetato e o rayon viscose seguem fluxos diferentes. A viscose passa por banho de soda cáustica 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.

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.

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

Seguindo a tendência mundial, a partir dos anos 70 a 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 (LEÃO, 2008).

Entre as fibras utilizadas como reforço, Marinho (2005), destacam as seguintes fibras:

- As fibras de vidro são as mais antigas fibras utilizadas como reforço, devido principalmente ao seu baixo custo, pouca espessura e permissão de fabricação de malhas trançadas. No entanto, são frágeis e sua ruptura é súbita e sem deformação permanente. Elas possuem comportamento elástico em uma faixa estreita de deformação e podem romper-se após longos períodos de carga. A maior parte dos compósitos com fibras de vidro empregam a fibra do tipo E, desenvolvida inicialmente para aplicações elétricas.
- As fibras de carbono teve sua aceitação rápida devido ao baixo custo e por possuir pequena espessura. Devido sua particularidade como variação de módulo de Young e resistência a ruptura em função da temperatura de pirólise, é possível uma família de fibra de carbono com diversas propriedades.

As fibras de aramidas utilizadas para reforçar plásticos tem o nome comercial kevlar, apropriadas para compósitos de elevada exigência para aplicações em que se requerer baixo peso, grande resistência mecânica e grande rigidez, resistência à deterioração e à fadiga. Tem interesse o material feito com fibras de kevlar em matriz epoxídica, cuja utilização contempla vários componentes do transporte espacial. O kevlar 49 é caracterizado por possuir resistência mecânica

e módulo de elasticidade elevados, assim como baixa densidade, cujas propriedades são justificativas para utilizá-las como reforço em matrizes poliméricas aplicadas as indústrias aeroespacial, marítima e automobilística (SMITH e HASHEMI, 2012).

1.3.2 Fibras naturais

As fibras naturais são aquelas encontradas na natureza e dividem-se em fibras de origem mineral (asbesto), animal (lã e seda) e vegetal (sisal, juta, abacaxi e curauá). 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, por exemplo, na produção de fios, cordas, sacarias, mantas, tapetes e artefatos de decoração (MORASSI, 1994).

Para Finkler *et al.*, 2005, as vantagens de se utilizar fibras naturais em relação a materiais tradicionais reforçantes, como as fibras de vidro, são de 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.

1.3.3 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 a 1930, a população mundial elevou-se de cerca de um bilhão para dois bilhões de habitantes. 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).

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.

Entre as desvantagens e limitações pode-se citar:

- Baixas temperaturas de processamento, isto é, não toleram mais do 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.

Segundo MARINELLI *et al.* (2008) a utilização das fibras vegetais apresentam diversos benefícios, pois:

- São materiais renováveis e sua disponibilidade pode ser considerada ilimitada;
- São materiais biodegradáveis, característica crucial para componentes que após esgotar a sua vida útil devem ser descartados;
- São compósitos reforçados com fibras naturais, que também utilizam matrizes biodegradáveis, são considerados os materiais menos agressivos ao meio ambiente e podem ser recompostos ao final de sua utilização;
- Representam uma nova fonte de renda para a população rural, podendo evitar o enorme fluxo do campo para a cidade, verificado nas regiões norte e nordeste do país;
- Apresentam baixo custo, em relação aos reforços atualmente empregados.

Outras vantagens das fibras vegetais em relação aos reforços convencionais (como as fibras de vidro), baixo custo, baixa densidade, desgaste reduzido da ferramenta de corte, biodegradabilidade, baixo conteúdo energético e uso reduzido de instrumentos para o seu tratamento ou processamento (PAIVA *et al.*, 1999). A tabela 1.3 mostra uma comparação entre as propriedades das fibras de origens vegetais e sintéticas.

Tabela 1.3 – Comparativo entre as propriedades das fibras de origens vegetais e sintéticas (Barros, 2006).

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

Características das fibras vegetais

As células vegetais são dotadas externamente de uma parede celular rígida, constituída basicamente de celulose, um carboidrato dotado de plasticidade, elasticidade, resistência à tração e decomposição por microrganismo, higrofilia e 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 a 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, atuando como material de cementação, 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 substância 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 1.11) funciona como um cimento, unindo as células (CHIARADIA, 2003).

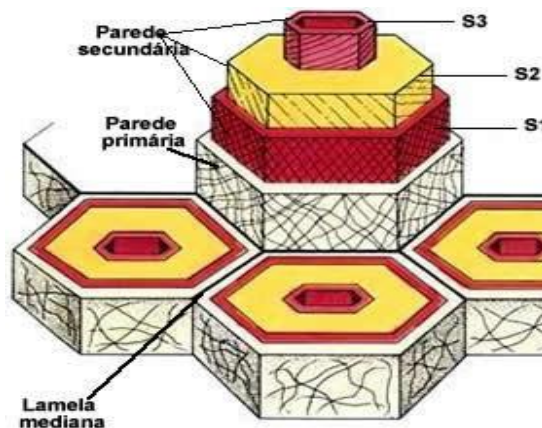


Figura 1.11– Lamela média (RAVEN, *et al.*, 2001).

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. A célula adulta apresenta o citoplasma como uma fina camada que reveste a parede celular internamente (CHIARADIA, 2003).

Segundo Bledkzi e Gassan (1999), extrativos são compostos orgânicos (terpenóides, ácidos graxos, flavonóides, esteróides e outros compostos aromáticos) que não fazem parte da parede celular lignocelulósicas, 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 frequentemente responsáveis por determinadas características da planta como a cor, sabor, cheiro e resistência natural ao apodrecimento.

Segundo Young (1997); 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 e pinus.

Fibras vegetais de 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 1.12 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).



(a)



(b)

Figuras 1.12 (a) Plantas de curauá (*ananas erectifolius*) (b) detalhe da folha (PEMATEC, 2016).

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).

Pode-se também descrever outro importante fator para utilização destas fibras, que é a não presença de cera, e quando comparada com as fibras que contêm tal substância, como exemplo as fibras de licuri (percentual de 12 % de cera aproximadamente), necessitaria de tratamento específico para limpeza e retirada da mesma, além do que o método utilizado para retirada da cera impregnada nas referidas fibras mergulhadas em hexano, não possui garantias de que toda a

cera foi retirada, sendo que um percentual extraído da relação entre o peso das fibras lavadas (exauridas e secas) com as brutas sem a lavagem, não garante a retirada total da cera.

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 1.13, mostra as fibras já limpas e “penteadas” e prontas para serem usadas com reforço (LEÃO, 2008).



Figura 1.13 – Fibras de curauá prontas para impregnação em plástico reforçado (LEÃO, 2008).

A tabela 1.4 mostra a composição da fibra de curauá.

Tabela 1.4 – Composição da fibra de curauá (OLIVEIRA, 2005).

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

A tabela 1.5 apresenta os dados extraídos (fibra de curauá) de um estudo comparativo entre as propriedades mecânicas das fibras.

Tabela 1.5 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras de curauá (AQUINO, 2008).

<i>Fibra</i>	<i>Diâmetro (μm)</i>	<i>Densidade (g/cm^3)</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>	<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>
Curauá	49 – 100	—	665 – 1404	20 – 36

1.4 ESTUDO DO REPROCESSAMENTO DE TERMOPLÁSTICOS E COMPÓSITOS

Alguns estudos recentes sobre os reprocessamentos de polímeros e compósitos neste subitem, que se seguem:

Verificando a propriedade físico-química em relação ao índice de fluidez (IF), que representa o desempenho das máquinas em relação ao escoamento dos fluidos dos polímeros e dos compósitos reprocessados, LOPEZ *et al.* (2012), verificou em seu estudo que com os sucessivos ciclos de reprocessamentos dos biopolímeros degradáveis (PLLA e PES-M) por meio do processo de injeção e trituração (figura 1.14), ocorreu um aumento significativo do índice de fluidez e diminuição no peso molecular devido à quebra da cadeia polimérica.

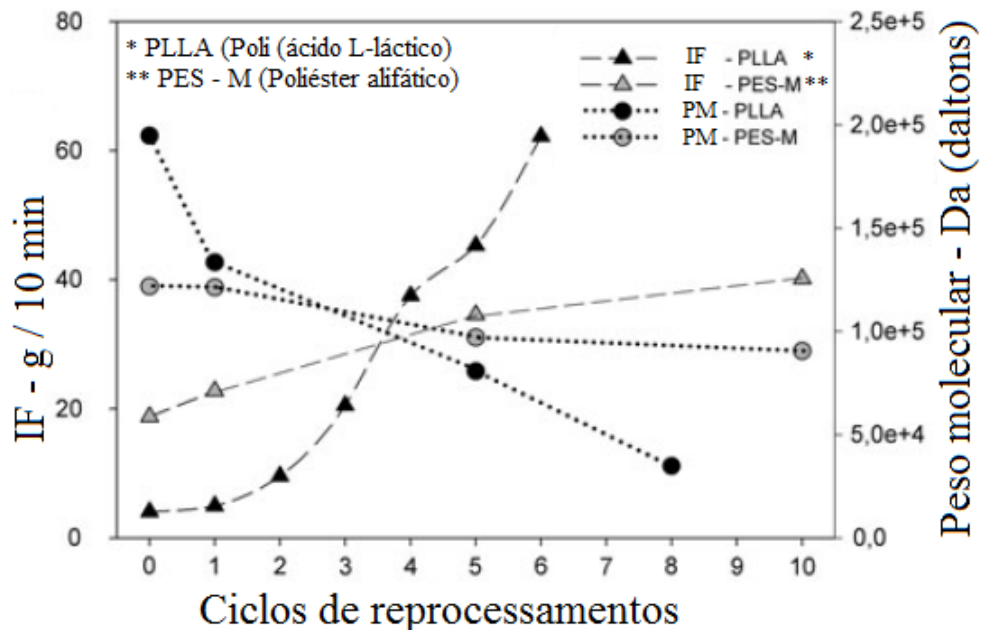


Figura 1.14 – IF e PM em função dos ciclos de RPS (Adaptado de LOPEZ *et al.*, 2012).

Delva *et al.* (2014) estudou os efeitos múltiplos das propriedades do polipropileno com a incorporação de partículas de argila (4%), agente de acoplamento (8%) e do polipropileno puro em vários ciclos de reprocessamentos por extrusão, verificou que à medida que se evoluíam os ciclos de reprocessamentos, os valores encontrados dos índices de fluidez do polipropileno puro (0,30 g/10 min) aumentavam (figura 1.15), atribuindo a redução da viscosidade com a ocorrência da quebra de cadeia do polímero (diminuição no peso molecular), entretanto, fato este, não

diminuiu as propriedades mecânicas do termoplástico utilizado, observando que a redução na viscosidade foi provocada pela degradação do polipropileno.

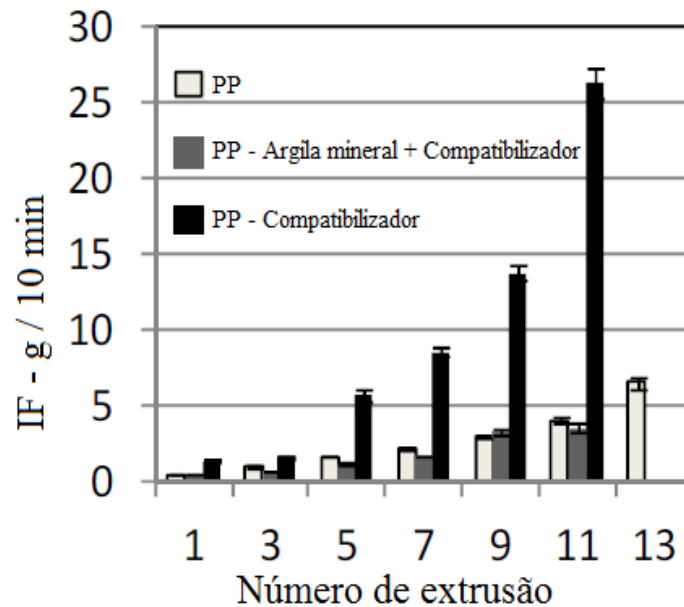


Figura 1.15 – IF em função do número de extrusões (Adaptado de DELVA *et al.*, 2014).

Observando a tensão de escoamento, durante os múltiplos reprocessamentos do polipropileno puro por extrusão, Delva *et al.* (2014), verificou que os valores encontrados foram aproximados, atribuindo a uma menor dependência do número de reprocessamentos (tabela, 1.6).

Tabela 1.6 – Valores da tensão de escoamento do PP puro reprocessado (DELVA *et al.*, 2014).

Reprocessamentos	Tensão de Escoamento (MPa)	D.P.*
1	21,9	1,0
4	22,5	1,1
7	21,1	1,4
12	20,7	0,3

* D. P. – Desvio Padrão.

Bourmaud e Baley (2009), observaram a rigidez do compósito de polipropileno reforçado com 30% de fibras vegetais de cânhamo e sisal respectivamente, após seis ciclos de injeção e trituração mecânica (reciclagem), sendo que os valores encontrados foram positivos para módulo de elasticidade, com o resultado da adição de fibras vegetais em ambos os compósitos, de 1,7 GPa do PP puro para 3,8 GPa do PP / cânhamo e 3,5 GPa para PP / fibras de sisal. Fato

observado na figura 1.16, onde os referidos autores evidenciaram uma boa estabilidade do novo módulo de elasticidade com os ciclos de injeção, devido a uma estabilização significativa com a adição de fibras vegetais. Consideraram também que com o número de ciclos, o módulo de elasticidade dos compósitos de PP / sisal mostrou uma ligeira diminuição (- 10 %), enquanto que o PP / cânhamo permaneceu com valores aproximados, explicando que tal comportamento foi devido ao número de ciclos de injeção.

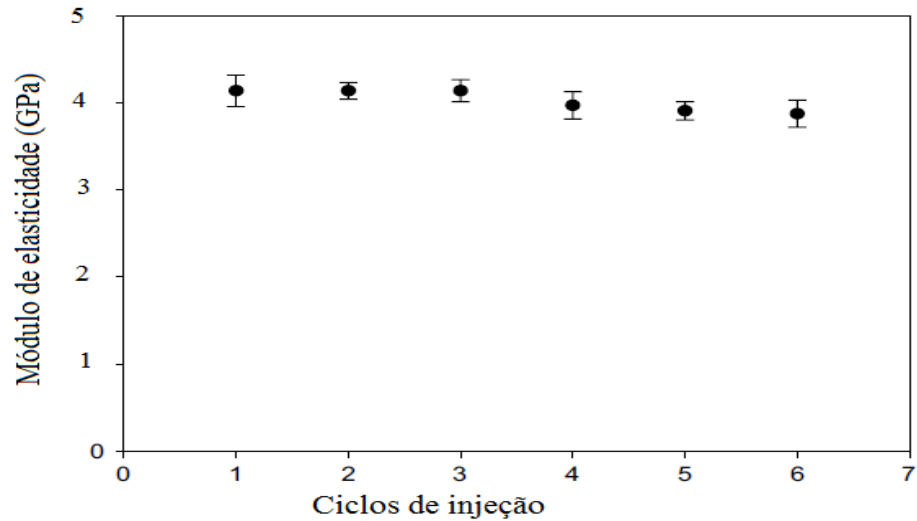


Figura 1.16 – ME do compósito (PP / cânhamo) em função do número de ciclos de injeção (Adaptado de BOURMAUD e BALEY, 2009).

CAPÍTULO – 2

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata da metodologia aplicada nesta pesquisa, preparo dos componentes e dos grãos de biocompósitos obtidos no processo de extrusão, realização dos ensaios para verificação das propriedades físicas e mecânicas, e observação de imagens por microscópio eletrônico de varredura (MEV) nas superfícies das amostras, citando os métodos e normas utilizados para obtenção dos resultados.

2.1 MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS

O polipropileno de forma granulado utilizado na fabricação dos biocompósitos foi o PP sob o código HP 550 K, fornecido em saco plástico de 25 kg pela empresa da Braskem S/A. A especificação deste produto é demonstrada na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Especificação do PP HP 550 K (Braskem S/A).

Propriedades	HP 550 K
IF - 2,16 kg / 230°C, g/10min	3,5
Tensão de Escoamento à tração (50 mm/min.), MPa	36,0
Alongamento no Escoamento à tração (50 mm/min.), %	9,0
Resistência ao Impacto IZOD (23° C), J/m	45,0
Dureza Shore D, 1s	73,0
Módulo de Flexão (1,3 mm/min.), GPa	1,55
HDT 455 KPa, °C	91,0
Vicat 1 Kg, °C	155,0

As fibras de curauá utilizadas para a confecção dos grãos de biocompósitos foram fornecidas (in natura) pela Pematec, localizada na cidade de Santarém, no Estado do Pará. Foi escolhida por não possuir cera em sua superfície, tal substância se impregnada nas fibras dificultaria a aderência do reforço a matriz polimérica, e o processo de limpeza consumiria

tempo, aumentaria custos e adicionaria a necessidade de avaliação da influência de lavagens das fibras na interferência nas propriedades mecânicas.

2.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DOS BIOCOMPÓSITOS

Todos os grãos de biocompósitos foram fabricados no laboratório de polímeros do SENAI-BA e tiveram as mesmas condições de preparo. Foram feitos cinco reprocessamentos para cada composição de carga de fibras de curauá utilizado na formação dos referidos grãos.

Foram utilizados 12 kg de polipropileno puro e 3,0 kg de fibras de curauá para fabricação dos grãos dos biocompósitos. Os grãos foram formados a partir das misturas de “PP” com adição de fibras de curauá, e distribuídas em três composições na razão de PP/fibras de curauá. Os biocompósitos foram obtidos na forma de grãos com adição das fibras picotadas em percentuais de massa mostrados na tabela 2.2. A escolha desses percentuais em peso foi em função da limitação do processo de fabricação.

Tabela 2.2 – Composição das amostras.

Material	Percentual de massa das fibras
PP puro	0 %
PP/ curauá	10 %
PP/ curauá	20 %
PP/ curauá	30 %

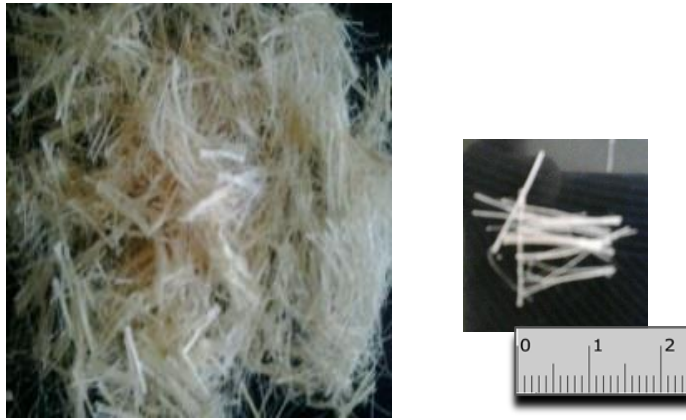
Para cada composição realizou-se a reciclabilidade dos grãos dos biocompósitos por meio de seu reprocessamento na extrusora realizando-se um total de cinco reprocessamentos. Também houve o reprocessamento dos grãos de polipropileno puro nas mesmas condições, para fins de comparação. A cada etapa de reprocessamento retirou-se um quilograma para fabricação por injeção dos corpos de prova de para a realização do ensaio de tração.

Ao todo foram fabricadas 4 composições e para cada composição 5 reprocessamentos. Foram feitas diversas purgas nas máquinas durante os processos de fabricação para todas as formulações, com o intuito de se evitar contaminação das amostras.

2.2.1 Preparação das fibras

As fibras de curauá foram lavadas com água para remover impurezas, penteadas, secadas e picotadas manualmente com auxílio de uma tesoura reta na faixa de 10 mm a 15 mm de

comprimento, conforme figura 2.1. Em seguida foram condicionadas em bandejas de alumínio e encaminhadas para estufa aquecida a 80 ° C a fim de evitar absorção de umidade.



Figuras 2.1 – Fibras de curauá picotadas.

2.2.2 Obtenção dos biocompósitos granulados

Tanto as fibras picotadas, quanto o PP granulado foram condicionadas em bandejas de alumínio, no qual seguiram para estufa 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, conforme figura 2.2.



Figura 2.2 – Estufa PALLEY.

As primeiras bandejas de PP e das fibras que foram retiradas da estufa foram pesadas em balança digital da marca Toledo (capacidade de 15 kg), e encaminhada para o misturador simples rotativo (figura 2.3), por um período de 15 minutos.



Figura 2.3 – Misturador Rotativo.

Em seguida foram adicionadas a extrusora dupla rosca modular co-rotacional da marca “IMACOM”, modelo DR 30:40 com diâmetro de rosca de 30 mm e razão $L/D = 40$, velocidade máxima de 600 rpm e distância entre os eixos de 26 mm, com sistema de alimentação volumétrica de capacidade máxima limitada em 2 kg/h (figura 2.4).



Figura 2.4 – Extrusora utilizada na obtenção dos biocompósitos.

O perfil de temperatura das zonas aquecidas por meio de resistência elétrica ficou estabelecido conforme tabela 2.3, com rotação de 170 rpm.

Tabela 2.3 – Perfil de temperatura do corpo da extrusora

Perfil de temperatura	Zona	°C
Cilindro	1	130,0
Cilindro	2	150,0
Cilindro	3	160,0
Cilindro	4	165,0
Cilindro	5	170,0
Cilindro	6	175,0
Cilindro	7	180,0
Cilindro	8	185,0
Cilindro	9	190,0
Cabeçote	10	190,0
Tanque de água	11	31,0

Das 11 zonas de acompanhamento de temperatura, 9 zonas estão localizadas no cilindro, uma zona no cabeçote (10^a) e outra do tanque de água (11^a).

Os biocompósitos de PP a 10 % de fibras de curauá, foram utilizados 100 gramas de fibras picotadas e 900 gramas de polipropileno granulados, no total de massa de um quilograma, medidos em balança analítica. Também foram fabricados os biocompósitos de PP a 20 % e 30 % de fibras de curauá na respectiva proporção. Foram feitas purgas a cada passagem da mistura pela extrusora, com o objetivo de evitar contaminação para os demais materiais.

Os valores de temperatura e rotação da extrusora foram estabelecidos em função de alguns parâmetros, como amolecimento do polímero, queima das fibras, formação de bolhas nos materiais. Foi necessário instalar um fusível no acoplamento entre o motor e o eixo da extrusora com a finalidade de evitar quebra do eixo e possível queima do motor. Também se evitou baixar a rotação do eixo em 150 rpm, pois poderia provocar a alta fusão do polímero e a queima das fibras. Além disso, a alta rotação (190 rpm) poderia provocar baixa fusão do polímero e não adesão das fibras.

Os grãos de polipropileno e as fibras picotadas foram adicionados por meio da abertura superior, na extremidade da extrusora, conforme figura 2.5, onde foi promovida a fundição e adesão dos materiais. A mistura saiu por dois pequenos furos (matriz) em formato de “cordões”

(figuras 2.6). Após passar por um processo de resfriamento e solidificação, conforme figuras 2.7 a, os cordões foram direcionados ao granulador, figura 2.7 b, equipamento de corte, que formou os grãos de biocompósitos.

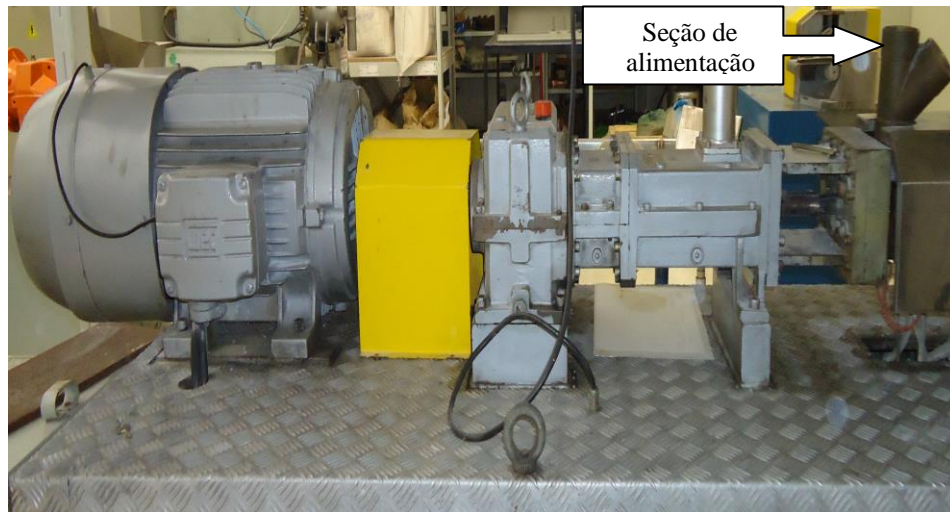
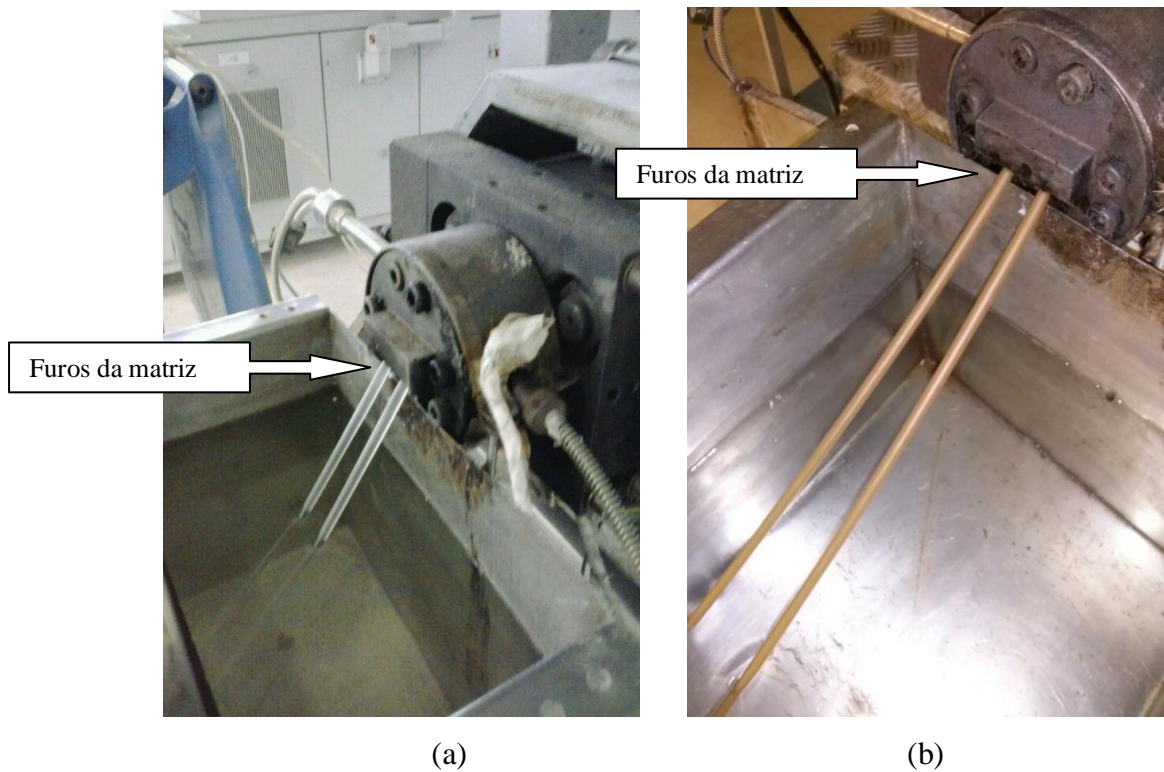


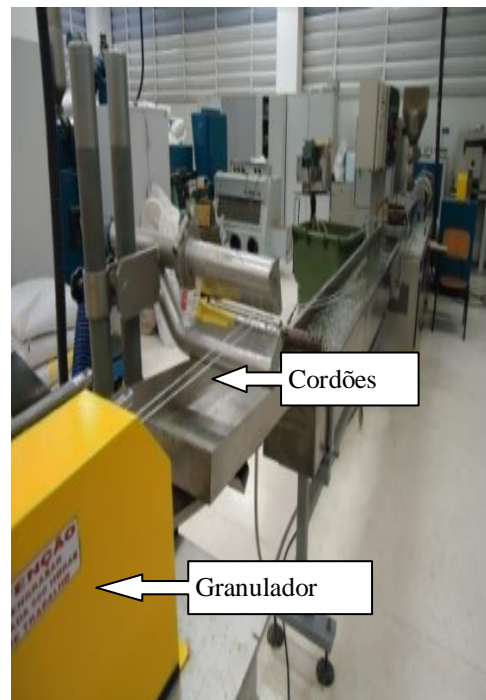
Figura 2.5 – Abertura superior onde foram adicionados os materiais.



Figuras 2.6 – (a) e (b) Saídas da mistura pelos dois furos da matriz da extrusora.



(a)



(b)

Figuras 2.7 (a) – Reservatório com água onde as misturas foram solidificadas; (b) - Cordões sendo enviados para o granulador.

Em seguida foram acondicionados em recipiente denominado “Blender Manual”, onde promoveu a homogeneização dos grãos (figura 2.8) para as próximas etapas dos reprocessos e processos de fabricação corpos de prova.



Figura 2.8 – Grãos de biocompósitos de PP com fibras de curauá homogeneizados.

Os granulados obtidos na extrusão, vide figura 2.9, foram redirecionados para a estufa por um período de 24 horas. Ao término do período de secagem parte dos grãos dos biocompósitos seguiu para a injetora, no qual alimentou-se por um funil (figura 2.10) para a fabricação dos CP e outra parte foram novamente reprocessadas.

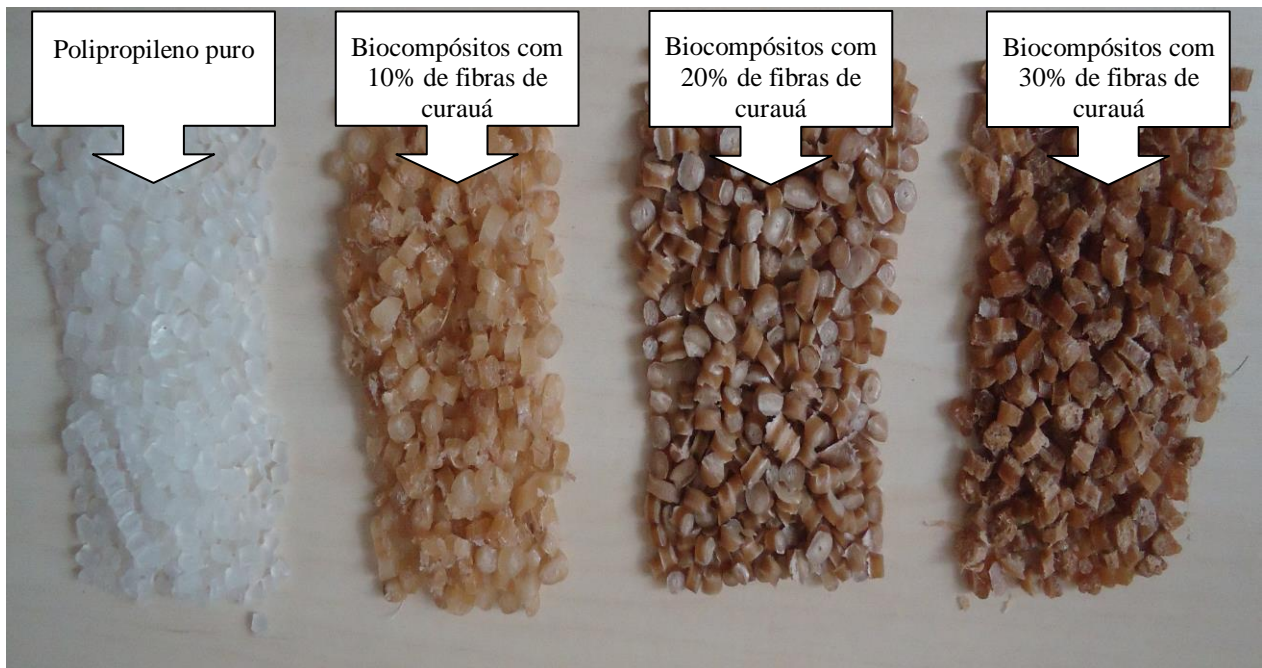


Figura 2.9 – Biocompósitos granulados utilizados para preparação dos corpos de prova.



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

Durante o processo de injeção a massa fundida de biocompósitos foi direcionada para um molde por meio de um bico alimentador (figura 2.11), acionado por um pistão com pressão de 700 bar e vazão de 180 cm³/s para formação dos corpos de prova, figura 2.12. O processo ocorreu com uma temperatura média de 180 °C em todas as zonas de aquecimento. O ciclo total da injeção até o resfriamento dos corpos de prova foi de 30 segundos. As normas utilizadas para fabricação dos corpos de prova (molde / dimensionamento) foram a ISO 527 (1993) - tração, ISO 180 - impacto e ISO 178 - flexão em três pontos.

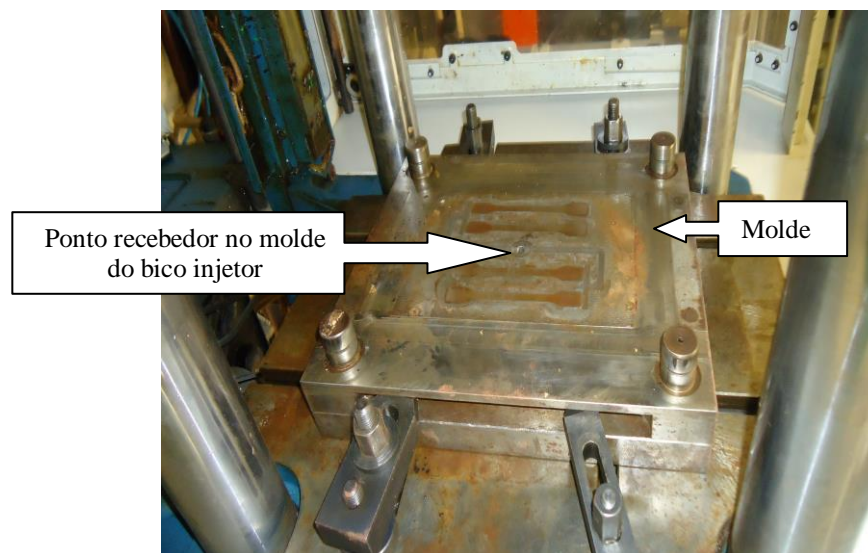


Figura 2.11 – Molde.



Figura 2.12 – Corpos de prova.

2.3 ENSAIOS REALIZADOS

2.3.1 Índice de fluidez (IF)

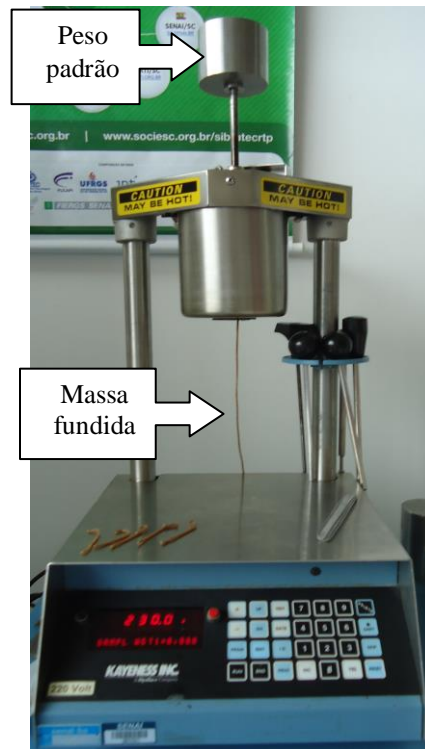
Todos os grãos obtidos no processamento dos materiais foram identificados e separados para verificação da degradação térmica provocada pela elevação da temperatura e cisalhamento ocorridos entre os eixos da extrusora.

Utilizou-se da análise de índice de fluidez para comparar a degradação térmica entre os grãos de polipropileno e biocompósitos reprocessado. Nos termoplásticos, baixa viscosidade representa baixa massa molar, ou seja, pequenas cadeias poliméricas, nos quais necessitam de menor temperatura e uma menor dificuldade para que atravesse o orifício padrão do plastômetro.

As análises dos IF foram realizadas com base na norma ASTM D1238-1995, utilizou-se o aparelho plastômetro da marca KAYENESS para encontrar os valores referentes ao índice de fluidez, ajustada a uma temperatura de 230 °C, carregou-se o cilindro de extrusão com o material e compactou-o com o pistão de carregamento para eliminar o ar, em seguida colocou-se um peso sobre o pistão (total padrão de 2,16 kg), iniciando as medidas dos coletados (5 extrudados para cada amostra) de polímeros e biocompósitos, em seguida as amostras (massa fundida e resfriada)

foram pesadas em balança analítica da marca METTLER AJ150 e calculada o índice de fluidez em g/10 min de extrusão.

A figura 2.13, mostra o equipamento que foi utilizado nos procedimentos das análises dos índices de fluidez.



Figuras 2.13 – Peso impulsionando os grãos fundidos no orifício padrão.

2.3.2 Ensaio de tração

Realizou-se o ensaio na máquina universal “EMIC” modelo DL 2000 (figura 2.14) de capacidade máxima de 20 kN no laboratório de polímeros do SENAI-BA. Foram utilizados 5 corpos de prova do tipo gravata, para cada composição, acondicionados no ambiente em que foram realizados os ensaios a uma temperatura de 24 ° C e umidade relativa de 60 %, os ensaios ocorreram em uma velocidade constante de 50 mm/min, medindo-se as seguintes propriedades mecânicas: tensão de escoamento, tensão de ruptura e módulo elástico, além da tensão máxima e deformação (%). Os dados gerados foram obtidos do programa “VIRMAQ” que serviu para controle e aquisição de dados do equipamento de ensaio universal, sendo que foram consideradas as médias dos valores encontrados nos ensaios com seus respectivos desvios padrão.

Para a confecção dos corpos de prova foram dimensionados de acordo com a norma ISO-527 (1993) com os seguintes valores: $h = 4,0$ mm; $L = 115,0$ mm; $L_0 = 50,0$ mm; $L_1 = 78,0$ mm; $L_2 = 104,5$ mm; $L_3 = 150,0$ mm; $b_2 = 20,0$ mm; $b_1 = 10,0$ mm; e $r = 60$ mm. As nomenclaturas podem ser observadas na figura 2.15.



Figura 2.14 – Máquina universal – EMIC.

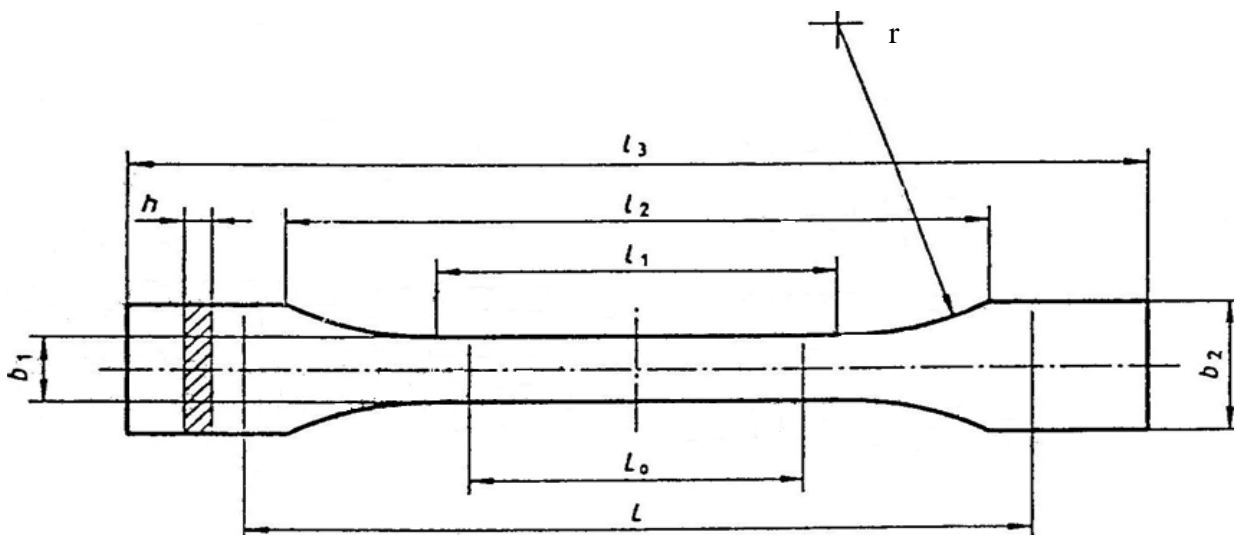


Figura 2.15 – Corpo de prova para o ensaio de tração.

2.3.3 Ensaio de impacto

Para realização dos ensaios de impacto [IZOD – “Edgewise” (e)] utilizou-se a norma ISO-180 (1993) e máquina da marca EMIC (figura 2.16) no laboratório de polímeros do SENAI-BA, obtendo-se os resultados da energia absorvida, e por meio da divisão com a área transversal dos corpos de prova.

Foram utilizados 5 corpos de prova (sem entalhe) para cada composição, acondicionados no ambiente em que foram realizados os ensaios a uma temperatura de 24 ° C e umidade relativa de 60 %, medindo-se as resistências ao impacto, determinando a resistência à quebra por choque flexional, por meio da medição de energia cinética armazenada em pêndulo e liberada ao se chocar com o corpo de prova. Os dados gerados foram submetidos às médias dos valores encontrados nos ensaios com seus respectivos desvios padrão.

Todos os corpos de prova foram fabricados da forma retangular com as seguintes dimensões: $h = 4,0$ mm; $L = 78,0$ mm; e $b = 10,0$ mm. As nomenclaturas podem ser observadas na figura 2.17.



Figura 2.16 – Máquina de impacto – EMIC.

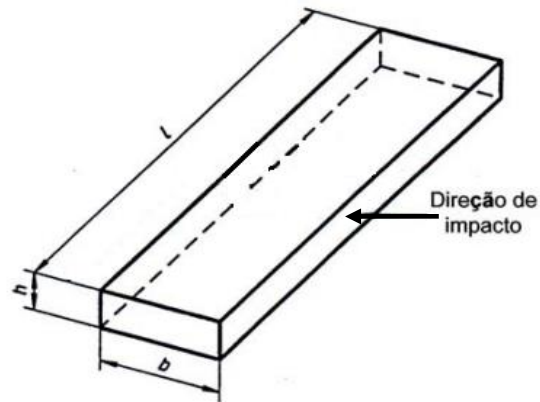


Figura 2.17 – Corpo de prova para o ensaio de impacto sem entalhe – ISO180.

2.3.4 Ensaio de flexão em três pontos

Os ensaios de flexão em três pontos foram realizados na máquina de ensaio universal da EMIC modelo DL 2000, conforme norma ISO-178 (1993), no laboratório de polímeros do SENAI-BA. Foram utilizados 5 corpos de prova para cada composição, acondicionados no ambiente em que foram realizados os ensaios a uma temperatura de 24 ° C e umidade relativa de 60 %, os ensaios ocorreram em uma velocidade constante de 5 mm/min e célula de carga de 2 kN, medindo-se as seguintes propriedades mecânicas: módulo elástico e tensão máxima. Os dados gerados foram obtidos do programa “VIRMAQ” que serviu para controle e aquisição de dados do equipamento de ensaio universal, sendo que foram consideradas as médias dos valores encontrados nos ensaios com seus respectivos desvios padrão.

Os corpos de prova do ensaio de flexão são do tipo retangular e tem as seguintes dimensões: $h = 4,0$ mm; $L = 78,0$ mm; $l = 64,0$ mm; $b = 10,0$ mm; e “F” a força aplicada. As nomenclaturas podem ser observadas na figura 2.18.

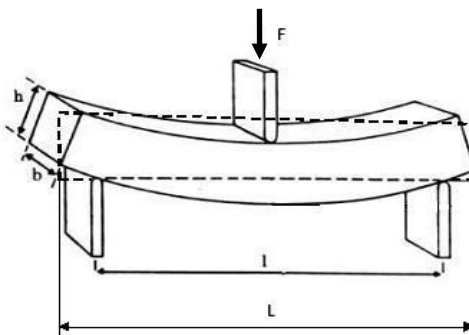


Figura 2.18 – Corpo de prova para o ensaio de flexão.

2.3.5 Análise da Característica da Fratura

Para verificação da adesão das fibras na matriz dos biocompósitos foram realizados nos ensaios de impacto, análises das características da fratura dos corpos de prova fraturados do primeiro e quinto reprocessamento das composições de 10 %, 20 % e 30 %. As mesmas foram executadas em duas etapas: a primeira consistiu de uma análise macroscópica da falha mecânica com o objetivo de conhecer a formação e distribuição da mesma ao longo de todo o comprimento do corpo de prova. Já na segunda etapa, consistiu em uma análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para detecção de falhas de forma a observar as fraturas dos tipos adesiva (interface fibra/matriz) e coesiva (na fibra ou na matriz), além de características do dano, como microfissuração da matriz entre outros danos. Utilizou-se MEV modelo JEOL – JSM 6510LV para esta análise.

O processo iniciou-se com a proteção da superfície do corpo de prova fraturado no ensaio de impacto. Em seguida o CP protegido foi metalizado com ouro em um Íon Coater, IC 50, Shimadzu, máquina de metalização DENTON VACUUM – DESK V (figuras 2.19), pois só é possível à varredura com a presença de elementos metálicos. Ao final, foram efetuados varreduras em todos os CP's por meio da microscópica eletrônica (figura 2.20).



(a)



(b)

Figuras 2.19 (a) – Máquina de metalização DENTON VACUUM; (b) – CP metalizados.

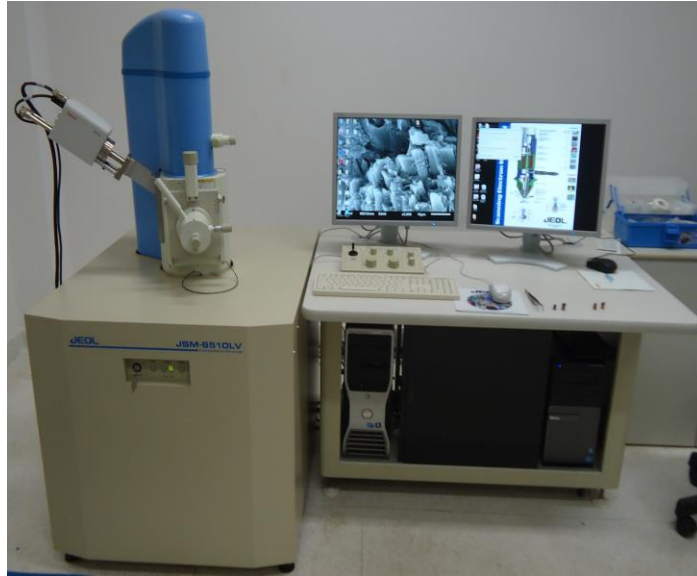


Figura 2.20 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV).

CAPÍTULO – 3

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos das análises dos índices de fluidez, dos ensaios de tração, flexão em três pontos, e impacto para os biocompósitos e do polipropileno produzidos após vários reprocessamentos. Depois é feito um comparativo entre as propriedades mecânicas dos biocompósitos reprocessados com PP e estudo de MEV.

3.1 Análises do Índice de Fluidez (IF) do Polipropileno Puro e dos Biocompósitos Reprocessados

A tabela 3.1 apresenta os resultados das análises dos índices de fluidez, os valores indicam as medidas da viscosidade do polímero e dos biocompósitos.

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

<i>Médias dos Valores das Composições* g/10min</i>				
<i>Reprocessamentos</i>	<i>PP puro</i>	<i>10%</i>	<i>20%</i>	<i>30%</i>
I	4,86	2,49	1,63	1,54
II	6,03	2,57	2,41	1,78
III	6,71	3,21	3,18	2,37
IV	6,83	4,15	3,88	2,55
V	7,64	4,72	4,57	3,23

*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 valor de IF do polipropileno puro fornecido pelo fabricante (3,5 g/10min) com o resultado do 1º reprocessamento do polipropileno verificou-se que o IF subiu para 4,86 g/10min, um aumento de 38,9 %, e se comparar com o 5º reprocessamento de PP o aumento do IF foi de 7,64 g/10min, um crescimento percentual de 118,3 %. Tal aumento foi em função de oxidação e degradação térmica do polipropileno,

provocada nos ciclos de reprocessamentos na extrusora, sendo necessária utilização de aditivos para evitar e/ou reduzir tal ocorrência.

Foram observados que os valores obtidos nas misturas PP/10 % de fibras de curauá (3° reprocessamento), PP/20 % de fibras de curauá (4° reprocessamento) e PP/30 % de fibras de curauá (5° reprocessamento) possuíram valores próximos da do IF do PP puro. Este resultado demonstra que o uso da fibra de curauá diminui o IF e que são necessários vários reprocessamentos para este valor se aproximar ao verificado do PP sem reprocessamento.

Verificou-se que o índice de fluidez diminuiu de 4,86 g/10min (PP I) para 1,54 g/min (biocompósito 30% I), diminuição de 68,3 % e de 7,64 g/10min (PP V) para 3,23 g/10min (biocompósito 30% V), variação de 57,7 %, nos 1° e 5° reprocessamentos, com o aumento de adição de fibras naturais na matriz de polipropileno, devido redução da degradação térmica do biocompósito. Também, à medida que se aumenta a carga de fibras há uma redução de massa de polímeros na mistura, diminuindo os esforços de cisalhamento provocado pelas roscas da extrusora.

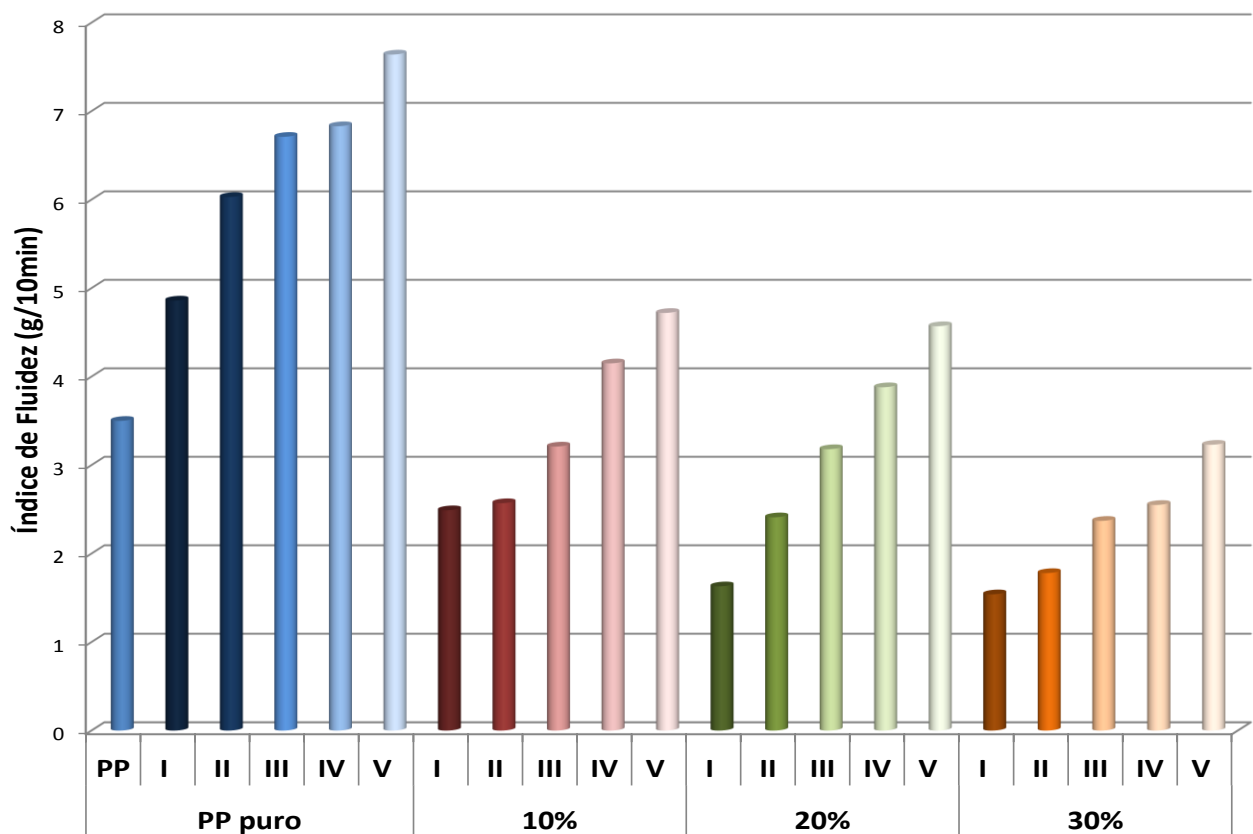


Figura 3.1 – Índice de fluidez dos PP puro e biocompósitos de curauá reprocessados.

Os valores obtidos para os biocompósitos com 30 % fibras de curauá foram os que apresentaram os menores valores após todos os ciclos (cinco) de reprocessamentos na extrusão, entre as outras composições de biocompósitos, tendo a menor diminuição na fluidez (viscosidade) da mistura.

Estes resultados apresentados demonstram de forma indireta que o uso de fibras naturais reduz a degradação térmica da mistura durante o seu reprocessamento. Consequência do aumento da adição de carga e redução de massa de resina, na proporção da mistura. É importante dizer que, normalmente os maquinários são preparados para processar o termoplástico, especificando as faixas de trabalho para cada tipo de produto em função de diversos fatores, e um deles é a faixa de IF, com esta propriedade é possível promover o controle de qualidade do produto final, além de servir como orientação para o processo em que o plástico será destinado. É importante ressaltar que os grãos de biocompósitos formados podem trabalhar em equipamentos ajustados para uma faixa de IF entre 1,5 a 4,8 g/10min, desta forma atenderia o desempenho de transformação da resina, durante o processo e reprocesso, viabilizando a reutilização dos mesmos na reciclagem.

Comparando esses resultados com os outros obtidos pela literatura (OTA, 2004), se verificou efeitos semelhantes, no qual o autor utilizou de 20 % e 30 % de fibras de vidro, aos obtidos para as fibras de curauá. Os valores apresentados mostram que o acréscimo de fibras de vidro em conjunto com o polipropileno homopolímero diminuiu a fluidez, reduzindo a degradação térmica da mistura, e em relação à viscosidade, verificou-se que os valores encontrados não caíram drasticamente, permitindo aos biocompósitos a extrudabilidade, outro ponto importante na reciclabilidade do produto, adaptação às máquinas de transformação.

Delva *et al.* (2014), observou fato semelhante ao analisar o efeito do reprocessamento e nas propriedades do polipropileno com a incorporação de partículas de argila (4%), agente de acoplamento (8%) e do polipropileno puro em 15 ciclos de reprocessamentos de extrusão.

Tal fato também ocorreu com Lopez *et al.* (2012), ao estudar os ciclos de reprocessamentos dos biopolímeros degradáveis no processo de injeção e trituração, que com os sucessivos reprocessamentos (dez vezes) ocorreu aumento significativo do índice de fluidez e diminuição significativa no peso molecular devido à quebra da cadeia polimérica.

3.2 Ensaios Realizados no PP Puro Reprocessado

3.2.1 Ensaio de tração uniaxial do PP puro reprocessado

A tabela 3.2 e as figuras 3.2 e 3.3 apresentam os resultados do ensaio de tração do PP reprocessados com velocidade de 50,0 mm/min. Pode-se observar que os reprocessamentos não alteram significativamente as propriedades do polipropileno.

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

<i>Reprocessamentos</i>	<i>Tensão Máxima (MPa)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Tensão de Escoamento (MPa)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>D.P.*</i>
I	30,2	0,9	15,8	0,6	1,22	0,06
II	31,5	0,6	17,6	1,1	1,13	0,10
III	32,5	0,3	17,3	0,4	1,28	0,08
IV	32,7	0,6	17,6	0,7	1,28	0,04
V	32,6	0,2	17,7	0,6	1,27	0,10

* D. P. – Desvio Padrão.

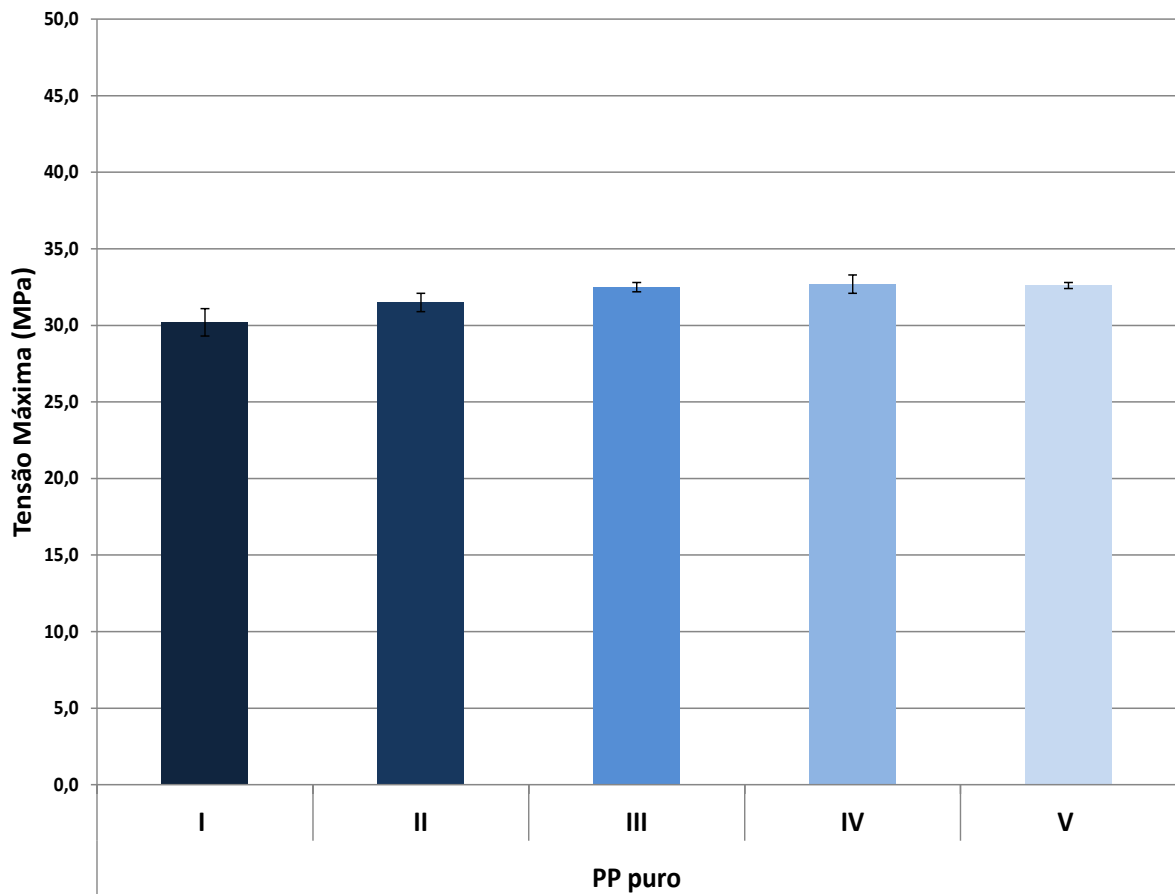


Figura 3.2 – Tensão máxima do polipropileno puro reprocessados.

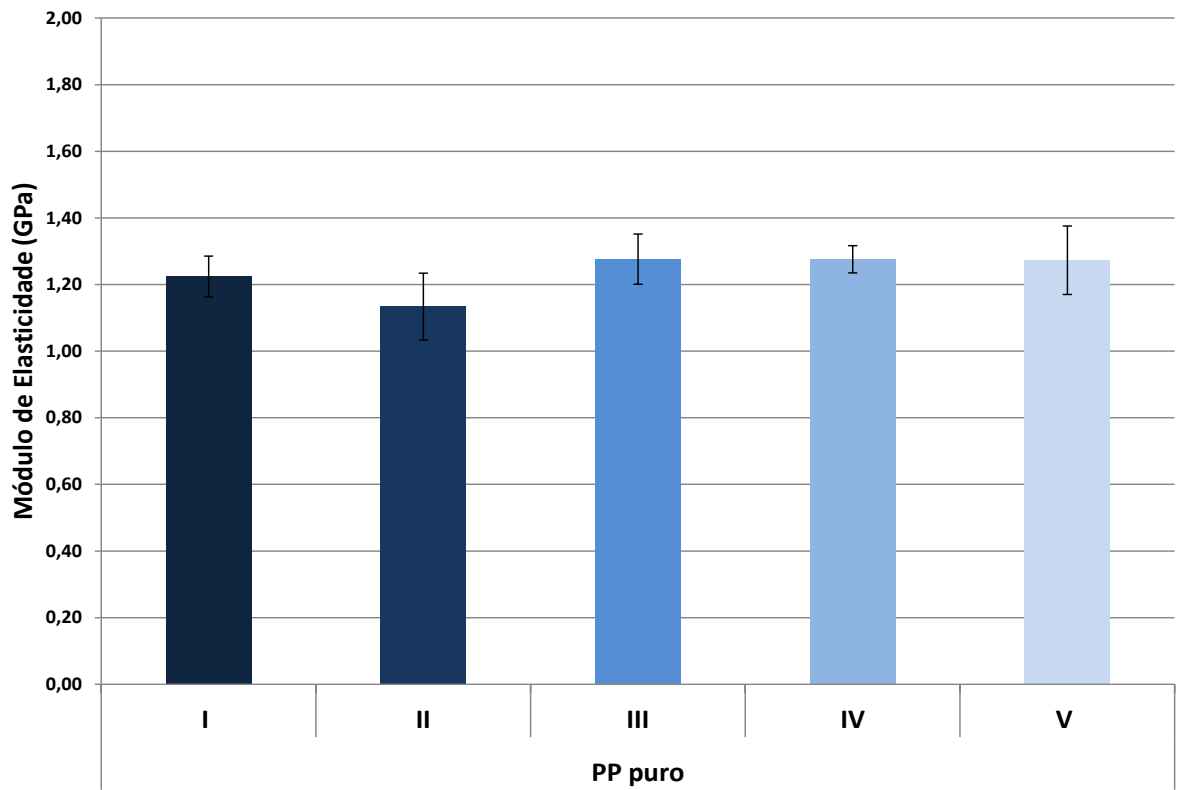


Figura 3.3 – Módulo de elasticidade do polipropileno puro reprocessados.

Neste ensaio os corpos de prova não romperam, porém foi possível encontrar valores de tensão máxima e de escoamento, conforme visualização das figuras 3.4 e 3.5.

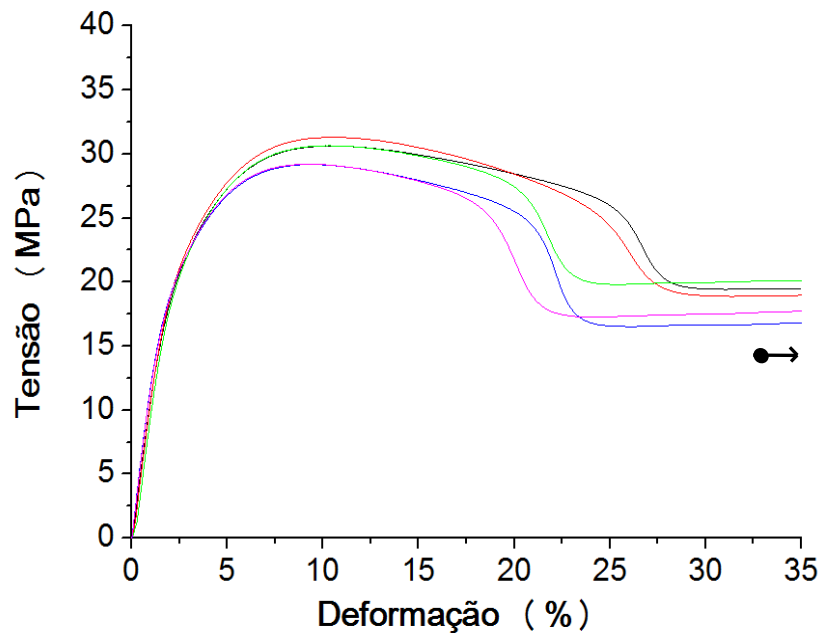


Figura 3.4 – Ensaio de tração do PP com velocidade 50 mm/min – reprocessamento I.

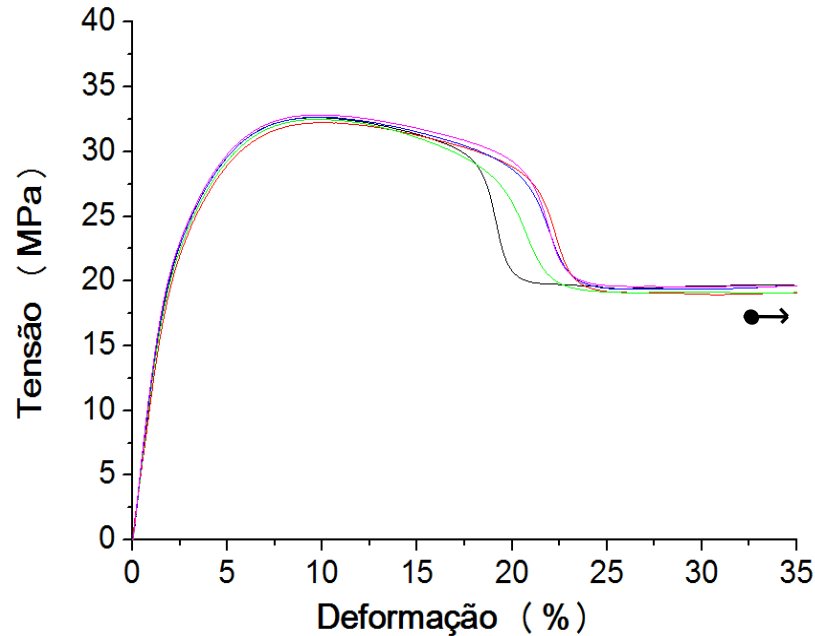


Figura 3.5 – Ensaio de tração do PP com velocidade 50 mm/min– reprocessamento V.

Os valores encontrados nesta pesquisa também foi observado por Delva *et al.* (2014), após expor o PP puro ao longo de múltiplos reprocessamentos por extrusão, afirmou que os valores dos módulos de elasticidade (rigidez) e da tensão de escoamento do PP permaneceram constantes, sem variação significativa. Também afirmou que estes valores são menos dependente do número de reprocessamento.

De acordo com Lopez *et al.* (2012), os ciclos de reprocessamentos (5) de alguns biopolímeros degradáveis no processo de injeção e trituração, em relação à resistência à tração e módulo de elasticidade (propriedades mecânicas), apresentam valores aproximados, fato este, semelhante a presente pesquisa.

3.2.2 Ensaio de flexão em três pontos do PP puro reprocessado

A tabela 3.3 apresenta os resultados do ensaio de flexão em três pontos do PP reprocessados com velocidade utilizada de 5,0 mm/min. Pode-se observar que os reprocessamentos não alteram significativamente as propriedades mecânicas do polímero polipropileno.

Tabela 3.3 – Resultados do polipropileno reprocessado obtidos do ensaio de flexão.

<i>Reprocessamentos</i>	<i>Tensão Máxima (MPa)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>D.P.*</i>
I	39,3	0,7	1,37	0,03
II	40,1	0,6	1,41	0,07
III	41,8	1,1	1,46	0,05
IV	39,9	1,9	1,37	0,06
V	37,8	0,5	1,40	0,04

* D. P. – Desvio Padrão.

Como ocorreu nos ensaios de tração, os corpos de prova dos ensaios de flexão não fraturaram. Podem-se visualizar nas figuras 3.6 e 3.7 os valores de tensão máxima e do módulo de elasticidade para o PP puro reprocessados.

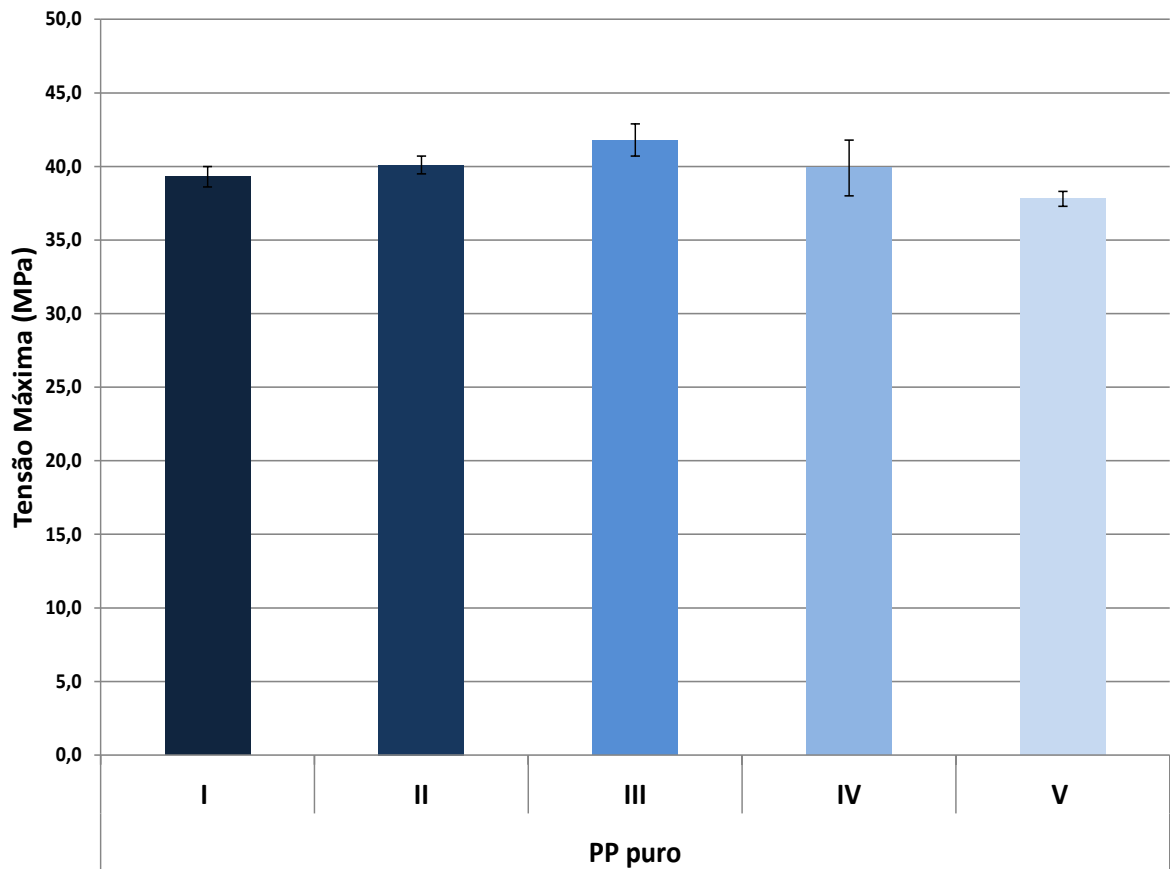


Figura 3.6 – Tensão máxima do polipropileno puro reprocessados.

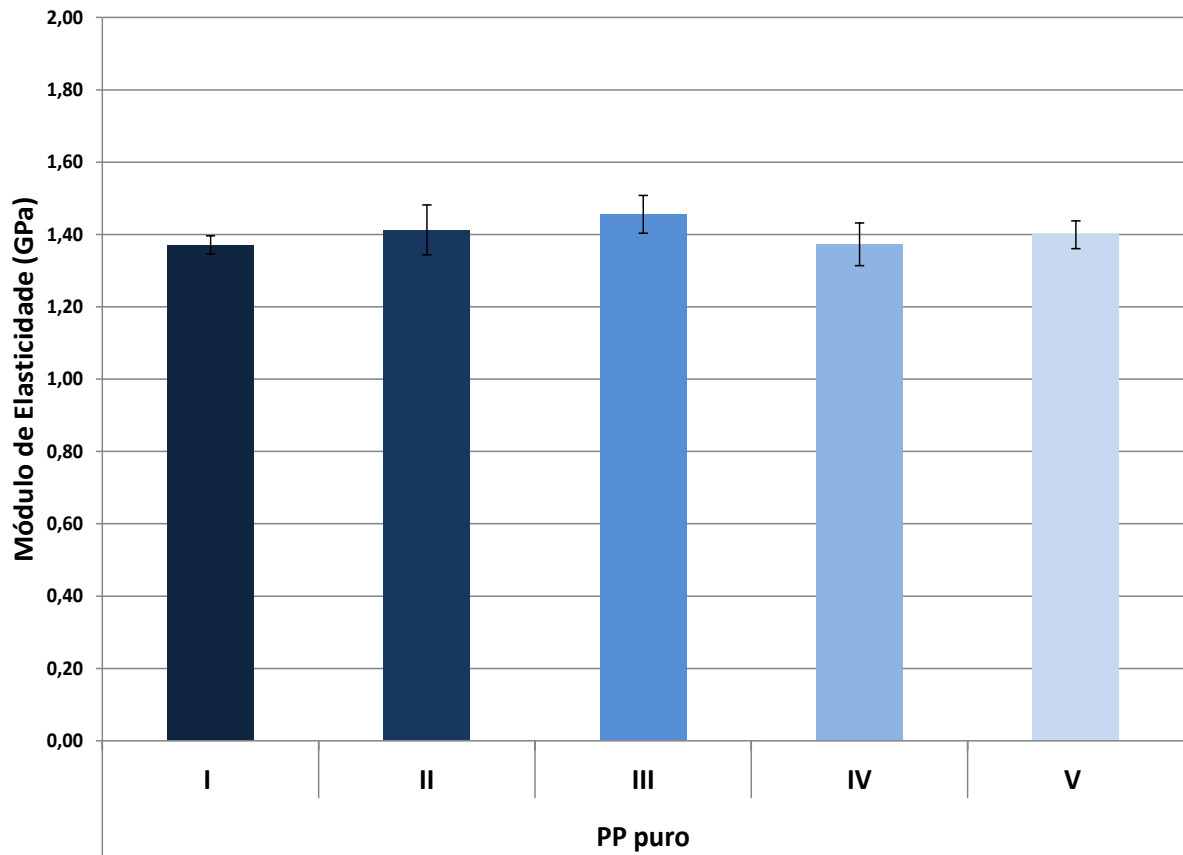


Figura 3.7 – Módulo de elasticidade do polipropileno puro reprocessados.

De acordo com Lopez *et al.* (2012), os ciclos de reprocessamentos de um dos biopolímeros degradáveis no processo de injeção e trituração, em relação à resistência de flexão e seu módulo (propriedades mecânicas), tiveram comportamentos similares.

3.3 Ensaios Realizados nos Biocompósitos de PP com Fibra de Curauá

Neste subitem 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 e de impacto.

3.3.1 Ensaio de tração uniaxial

Apresentam-se nas figuras 3.8 a 3.16, alguns exemplos dos diagramas tensão versus deformação dos corpos de prova ensaiados à tração, dos biocompósitos com 10 %, 20 % e 30 % de fibras de curauá, respectivamente. Pelos resultados apresentados, percebe-se, de uma forma

geral, que a dispersão obtida entre as amostras não foi significativa, exceção se faz somente aos valores de deformação de ruptura que variam significativamente.

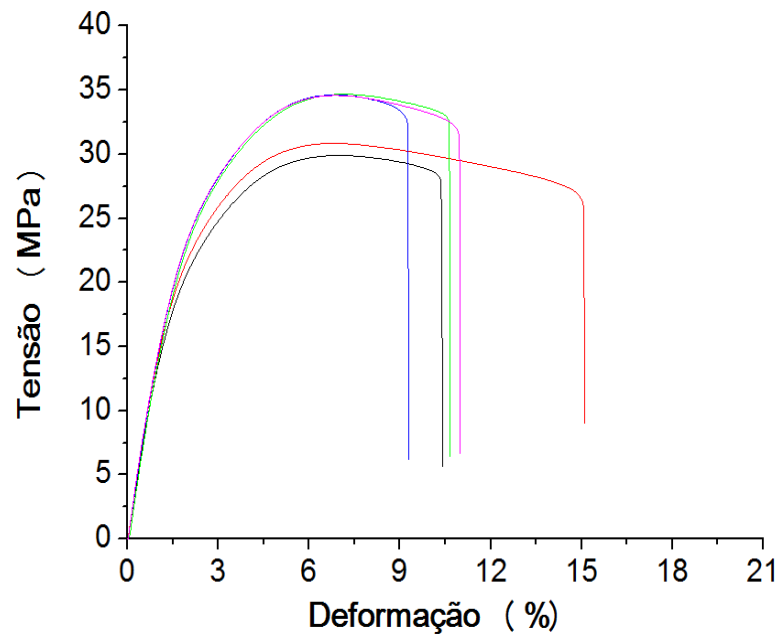


Figura 3.8 – Ensaio de tração do biocompósito com 10 % de curauá – reprocessamento I.

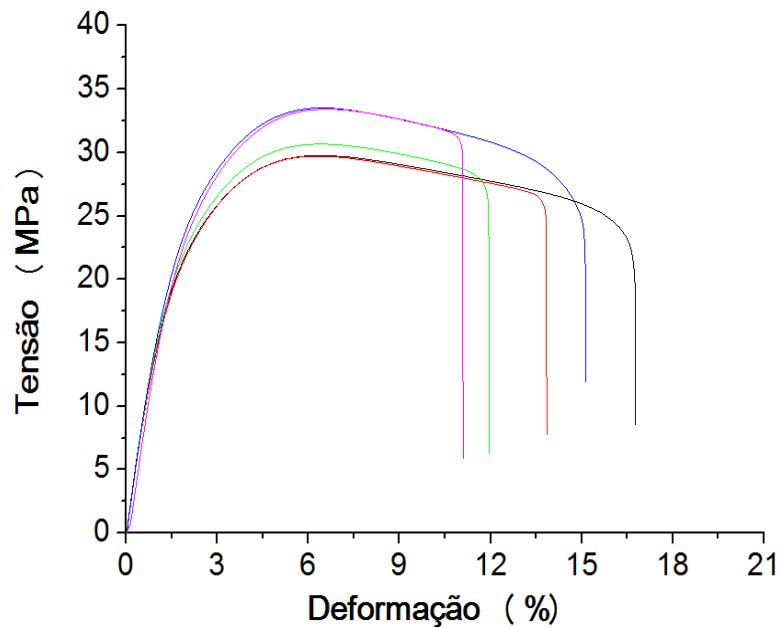


Figura 3.9 – Ensaio de tração do biocompósito com 10 % de curauá – reprocessamento V.

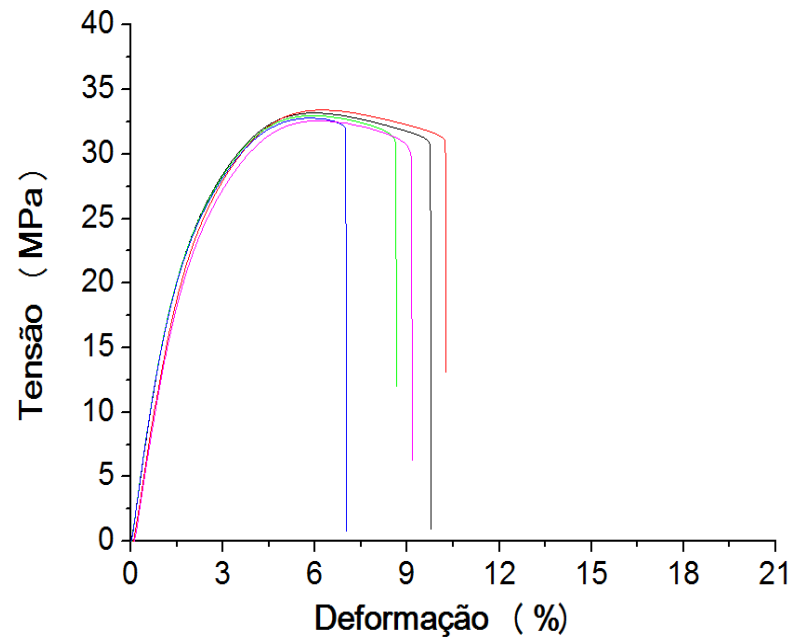


Figura 3.10 – Ensaio de tração do biocompósito com 20 % de curauá – reprocessamento I.

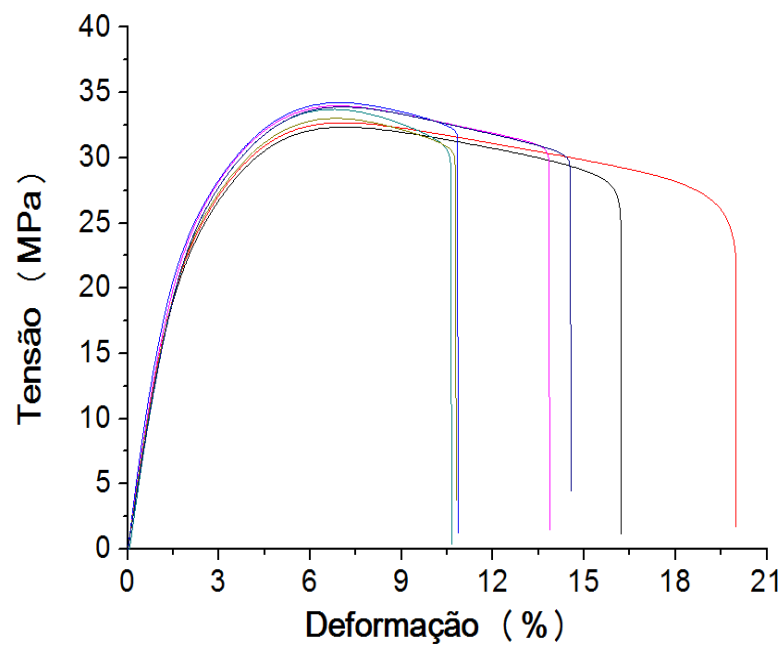


Figura 3.11 – Ensaio de tração do biocompósito com 20 % de curauá – reprocessamento II.

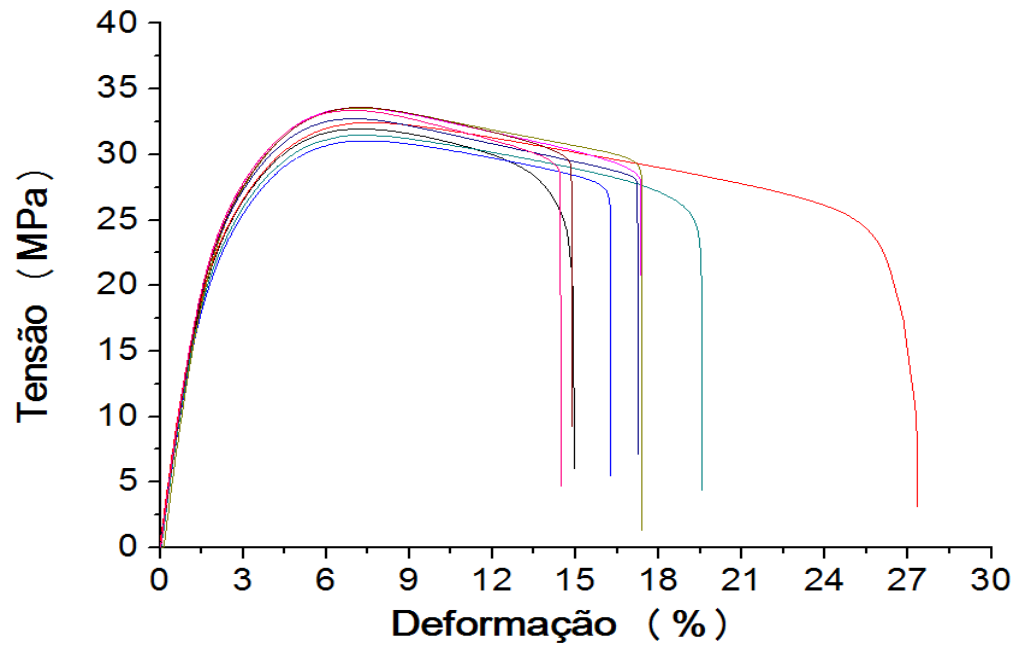


Figura 3.12 – Ensaio de tração do biocompósito com 20 % de curauá – reprocessamento III.

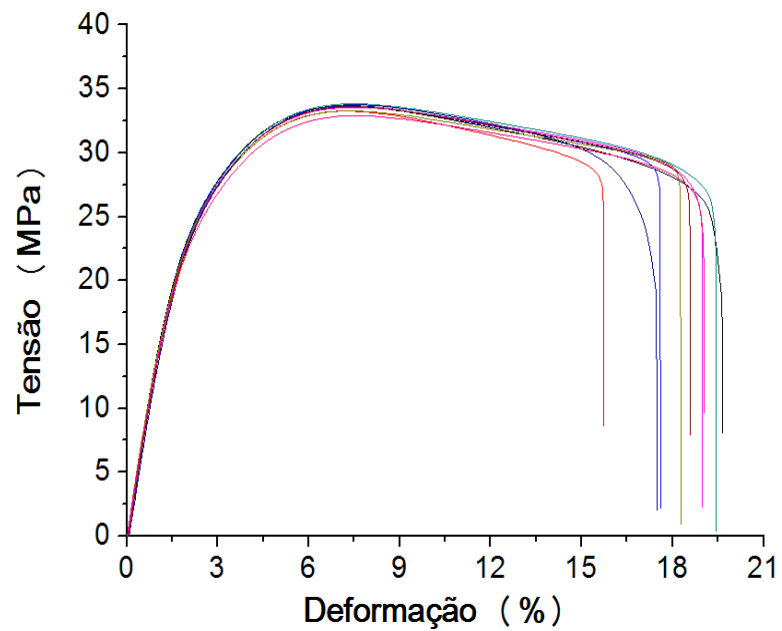


Figura 3.13 – Ensaio de tração do biocompósito com 20 % de curauá – reprocessamento IV.

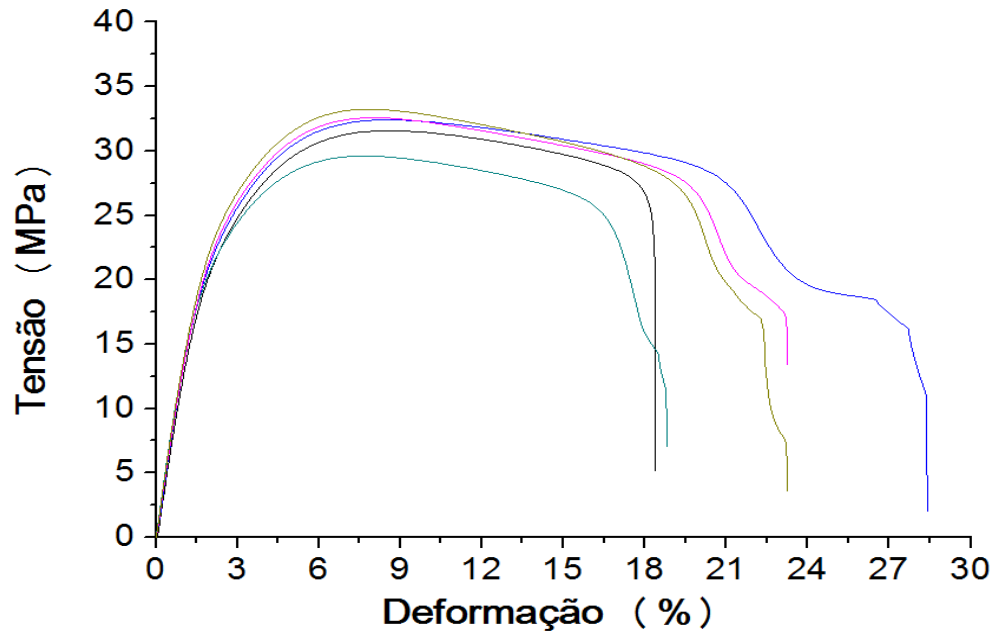


Figura 3.14 – Ensaio de tração do biocompósito com 20 % de curauá – reprocessamento V.

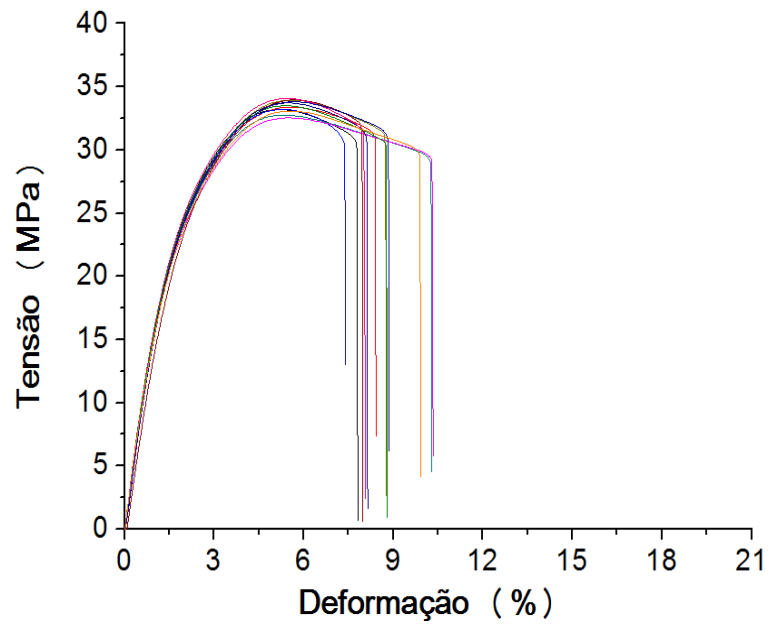


Figura 3.15 – Ensaio de tração do biocompósito com 30 % de curauá – reprocessamento I.

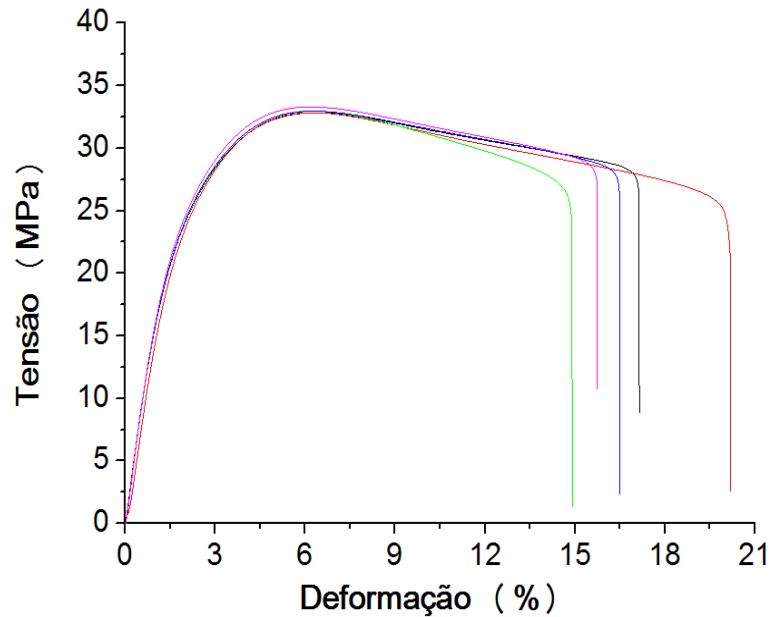


Figura 3.16 – Ensaio de tração do biocompósito com 30 % de curauá – reprocessamento V.

As tabelas 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam os resultados da tensão máxima, tensão de escoamento, tensão de ruptura, deformação na ruptura e do módulo de elasticidade. Observa-se por meio destas, a presença das fibras de curauá no polipropileno não alterou significativamente a tensão máxima dos biocompósitos formados, e quando comparados com PP puro e seus reprocessamentos também não houve alteração significativa.

Comparando os resultados da tensão máxima obtidos na literatura de Bourmaud e Baley (2009), o compósito de PP / 30 % de cânhamo, considerando como 1º reprocessamento, obteve melhoras em relação ao PP puro utilizado, obtendo valor aproximado de 33,1 MPa, cujo valor é aproximado aos valores dos reprocessamentos desta tese.

Na tensão de escoamento, também não houve modificações significativas de valores com o incremento de fibras de curauá inclusive após os cinco reprocessamentos, mantendo-se compatível com os valores do PP puro e seus reprocessamentos. Verifica-se um comportamento diferente para tensão de ruptura, à medida que foram promovidos os reprocessamentos, houve uma redução, cerca de 5 MPa nas composições dos biocompósitos de 10 % e 30 % de fibras de curauá entre o 1º e 5º reprocessamento, representando um percentual de 17,4 % e 14,6 % respectivamente, sendo que nos biocompósitos com 20 % de fibras, entre esses uma redução maior, em torno de 12,1 MPa (38,8 %).

Tabela 3.4 – Ensaio de tração dos biocompósitos PP / 10 % de fibras de curauá reprocessados.

<i>RPS</i>	<i>Tensão Máxima (MPa)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Tensão de Escoamento (MPa)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Tensão de Ruptura (MPa)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Deformação na Ruptura (%)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>D.P.*</i>
I	32,9	2,4	17,4	1,0	30,4	3,0	11,2	2,2	1,57	0,05
II	29,8	1,8	16,4	1,9	24,4	3,8	13,2	3,2	1,60	0,22
III	32,4	1,1	18,1	0,5	25,9	3,4	15,6	2,8	1,66	0,05
IV	32,4	1,0	18,3	1,5	24,7	3,5	16,6	2,7	1,62	0,17
V	31,4	1,9	17,4	1,3	25,1	3,7	13,7	2,3	1,69	0,05

* D. P. – Desvio Padrão.

Tabela 3.5 – Ensaio de tração dos biocompósitos PP / 20 % de fibras de curauá reprocessados.

<i>RPS</i>	<i>Tensão Máxima (MPa)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Tensão de Escoamento (MPa)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Tensão de Ruptura (MPa)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Deformação na Ruptura (%)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>D.P.*</i>
I	33,0	0,3	18,8	0,5	31,2	0,7	8,9	1,2	1,62	0,09
II	33,4	0,7	18,2	0,7	28,7	3,1	18,8	3,5	1,60	0,11
III	32,6	1,0	18,2	0,7	24,7	6,4	17,7	4,0	1,53	0,04
IV	33,5	0,3	18,4	0,6	24,2	3,3	18,3	1,2	1,53	0,03
V	31,8	1,3	17,4	0,7	19,1	5,3	19,4	2,6	1,42	0,05

* D. P. – Desvio Padrão.

Tabela 3.6 – Ensaio de tração dos biocompósitos PP / 30 % de fibras de curauá reprocessados.

<i>RPS</i>	<i>Tensão Máxima (MPa)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Tensão de Escoamento (MPa)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Tensão de Ruptura (MPa)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Deformação na Ruptura (%)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>D.P.*</i>
I	33,0	0,4	18,6	0,5	30,2	0,9	8,8	1,4	1,76	0,07
II	32,5	0,2	17,7	0,3	29,0	0,4	11,4	1,1	1,76	0,04
III	32,1	0,2	17,7	0,2	26,3	0,5	14,4	1,1	1,76	0,03
IV	32,7	0,2	18,5	0,7	27,6	1,6	13,3	2,6	1,76	0,05
V	33,0	0,2	18,3	0,7	25,8	2,4	16,9	2,0	1,80	0,08

* D. P. – Desvio Padrão.

Pode-se observar que nos primeiros reprocessamentos de cada formulação dos materiais biocompósitos à base de fibra de curauá ocorreu uma influência significativa na deformação de ruptura, apresentando valores menores, quando comparado com os valores seguintes dos

respectivos reprocessamentos. À medida que se reprocessava os biocompósitos, houve uma tendência do aumentando dos valores da deformação de ruptura.

Percebeu-se que na formação inicial de cada composição dos grãos dos biocompósitos ocorreu uma tendência de rompimento com menor valor entre os outros reprocessamentos, devido a uma menor aderência e homogeneização das fibras à matriz polimérica, conforme se verifica no subitem 3.3.4. Já nos seguintes reprocessamentos ocorreu uma melhora, sendo que o menor valor entre eles, aproximadamente 17,8 %, foi entre o 1º e 2º reprocessamentos dos biocompósitos a 10 % de curauá.

Para melhor visualizar os resultados apresentados nas referidas tabelas 3.4 a 3.6, apresentam-se nas figuras 3.17 a 3.19 os resultados da tensão máxima, módulo de elasticidade e deformação de ruptura dos biocompósitos de polipropileno a base de fibra de curauá com 10 %, 20 % e 30 %, respectivamente e seus reprocessamentos. Pelos resultados mostrados nestas figuras, percebe-se que a dispersão obtida entre as amostras apresentam valores próximos para todos biocompósitos à base de fibra de curauá.

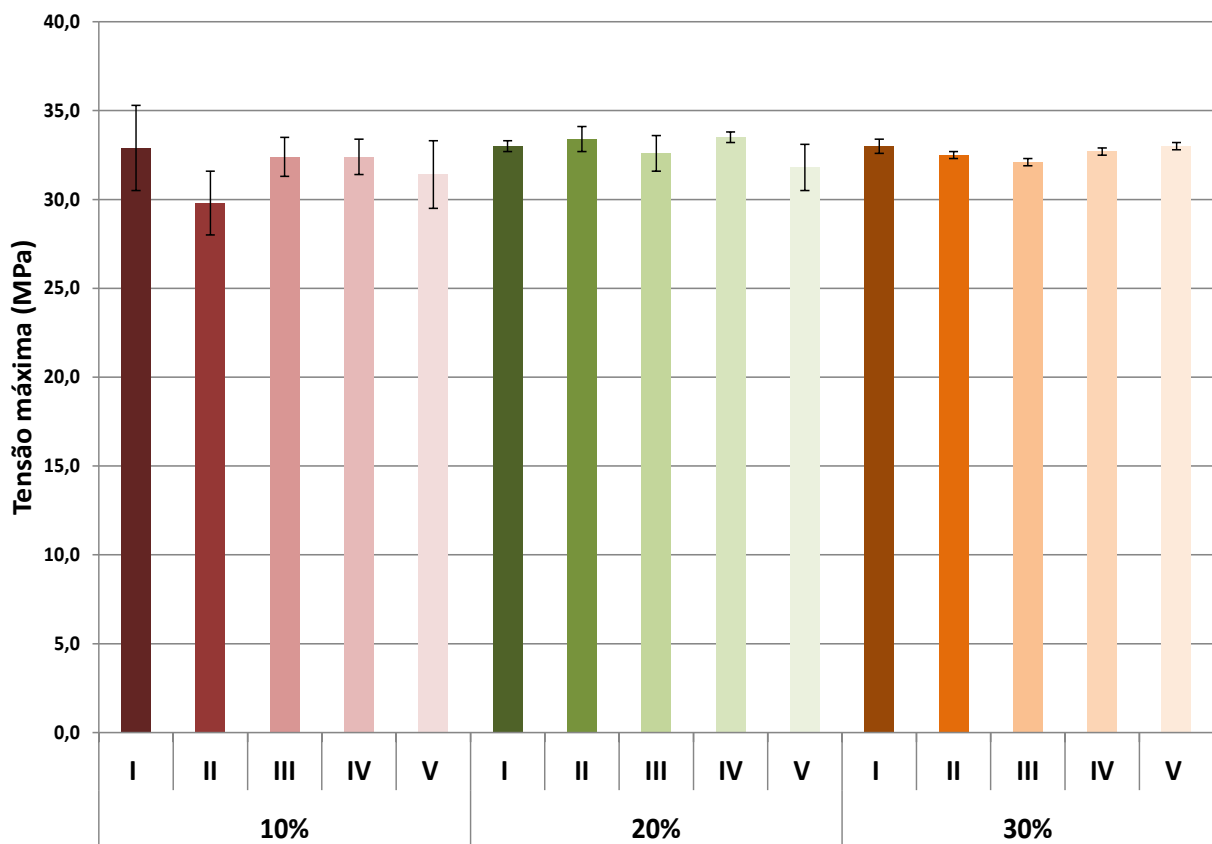


Figura 3.17 – Tensão máxima dos biocompósitos de fibras de curauá reprocessados.

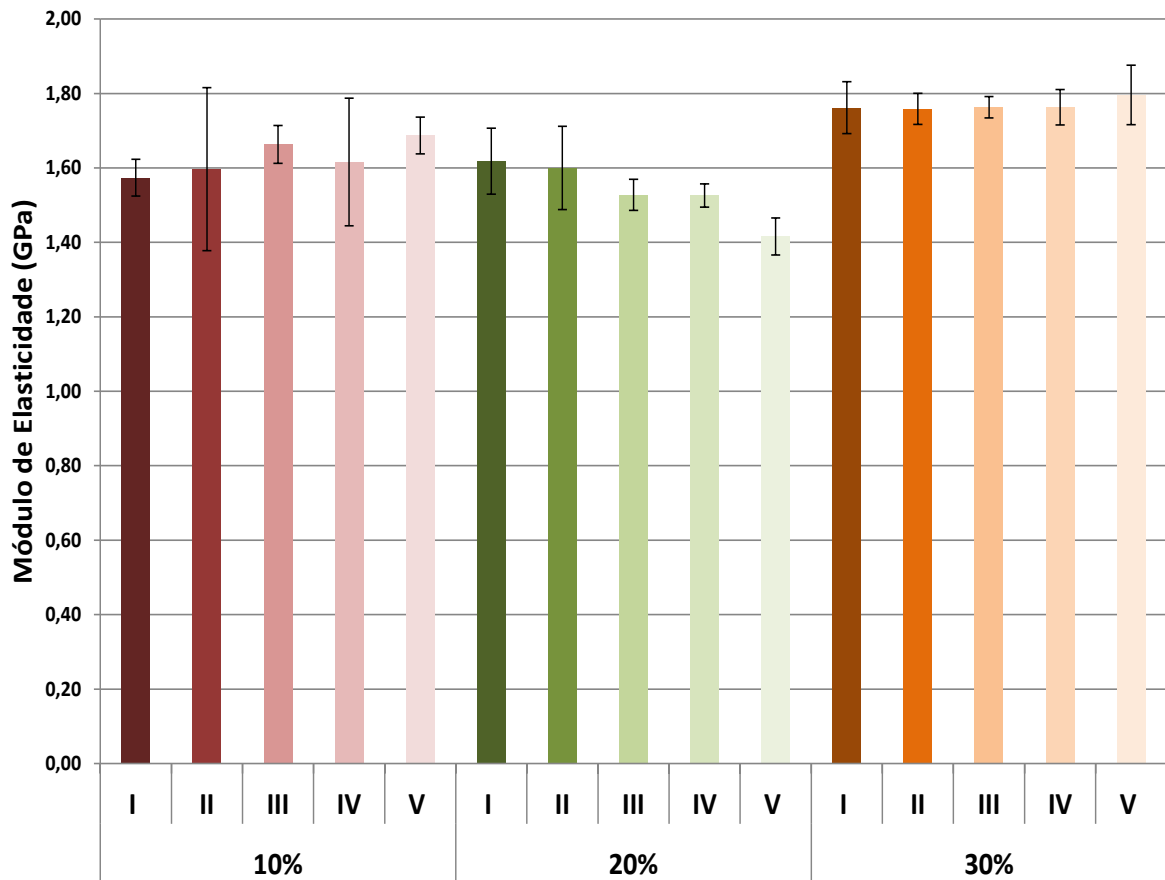


Figura 3.18 – Módulo de elasticidade dos biocompósitos de fibras de curauá reprocessados.

No caso da rigidez, os biocompósitos a 10 % e 30 % houve poucas alterações. Entretanto quando comparado com o PP reprocessado, houve melhoras significativas, cerca de 40,6 % para o biocompósito de 30 % de fibras de curauá, ou seja, um aumento na rigidez de 1,28 GPa (3º reprocessamento) dos PP reprocessados para 1,80 GPa (5º reprocessamento) do biocompósito de 30 % de fibras de curauá.

Pode-se observar que os resultados encontrados dos biocompósitos a 20 % de fibras de curauá apresentaram valores menores do que o esperado. A influência de fatores como a temperatura, o tempo de preparo, as intempéries e experiência dos operadores no processo de fabricação são consideradas relevantes na produção destes materiais, verificado também por Klein (2009), que a contribuição elástica e viscosa para o comportamento mecânico do polímero depende da temperatura e do tempo do experimento. Os efeitos apresentados nas curvas características dos biocompósitos a 20 % de fibras de curauá (figura 3.14) ocorreram em função dos pequenos escorregamentos provocados após passagem dos valores de tensão de rupturas.

Contudo os resultados num contexto geral foram superiores, quando comparados com o polipropileno puro.

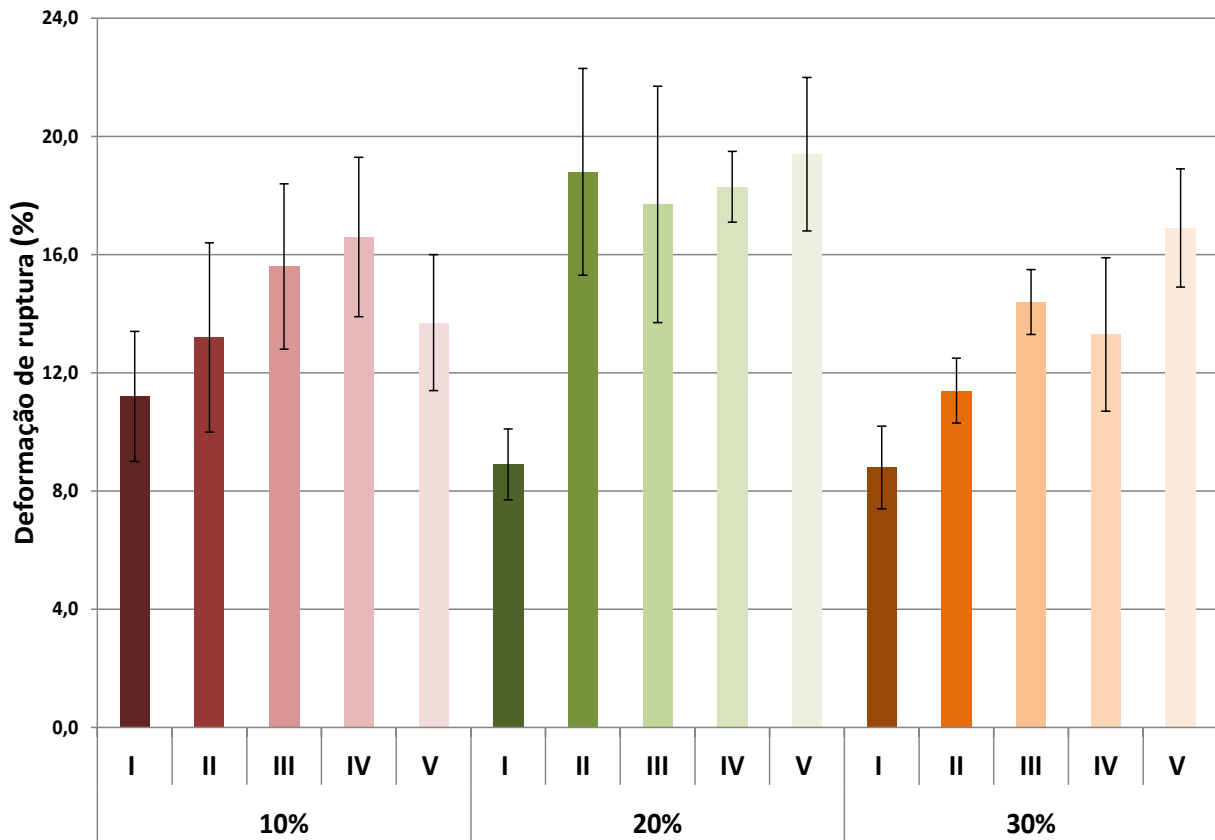


Figura 3.19 – Deformação de ruptura dos biocompósitos de fibras de curauá reprocessados

Fato semelhante ocorreu também com Ferreira (2009) utilizando fibras longas de curauá com uma matriz termofixa, que apresentaram curvas não uniforme para os ensaios de tração, relacionou o ocorrido à aproximação da ruptura das fibras, aonde os filamentos vão, aos poucos, se rompendo e, com isto, a região não uniformes são amplificadas. Estas ocorrências correspondem ao processo gradativo de separação dos filamentos que compõem uma fibra de curauá. Já na presente tese a região não uniforme foi discreta, apresentando poucas quantidades após a tensão de ruptura (figura 3.14).

Isto também foi observado por Bourmaud e Baley (2009), analisando a rigidez do compósito após seis ciclos de injeção e trituração mecânica (reciclagem), cujos resultados apresentados mostram valores do módulo de elasticidade aproximados. Também afirmou que com o número de ciclos, o módulo de elasticidade do compósito de PP / sisal mostrou uma ligeira diminuição, enquanto que o PP / cânhamo permaneceu inalterado, afirmando que tal

comportamento foi devido ao número de ciclos de injeção. Fato este que pode ser atribuído à presença de intempéries e no número de ciclos de reprocessamento aos biocompósitos de polipropileno com 20% de fibras de curauá.

Outra possibilidade para explicar a perda de rigidez após várias extrusões (reprocessamento) é uma interação reduzida (prejudica) da matriz termoplástica (PP) com o material de reforço (curauá).

Pode-se explicar também a ocorrência da redução dos valores de rigidez nos biocompósitos com 20% de fibras de curauá, pela baixa eficiência durante o arrefecimento (resfriamento) no processo de injeção e um maior número de extrusões (quantidades). Isso leva a crê a importância e cuidados no preparo dos biomcompósitos.

De acordo com Lopez *et al.* (2012), compósito reforçado com fibras vegetais pode ser reprocessados em até oito vezes sem perda significativa de resistência à tração, observando neste o mesmo comportamento com a adição de fibras de curauá, possibilitando a reciclabilidade destes biocompósitos aqui fabricados.

3.3.2 Ensaio de flexão em três pontos

Analisando o comportamento ao ensaio de flexão verifica-se (tabelas 3.7 a 3.9) que com a adição no percentual de fibras aumentou a tensão máxima, na qual o valor aumentou de 39,3 MPa no 1º reprocessado do PP (tabela 3.3) para 48 MPa no 1º reprocessado do biocompósito a 30 % de curauá, tendo assim um aumento percentual de 22,1 %. Observou-se que houve redução na tensão máxima à medida que promovia os reprocessamentos para todas as composições, sendo uma maior redução entre os biocompósitos de 30 % de curauá, 13,5 %, no qual considerou-se uma pequena oscilação devido aos diversos reprocessamentos sofridos pelos grãos de biocompósitos.

Tabela 3.7 – Ensaio de flexão dos biocompósitos PP/10 % de fibras de curauá reprocessados.

<i>Reprocessamentos (RPS)</i>	<i>Tensão Máxima (MPa)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>D.P.*</i>
I	45,4	1,8	1,90	0,04
II	41,4	0,9	1,90	0,13
III	41,8	1,3	1,83	0,17
IV	41,5	0,7	1,89	0,07
V	41,4	2,2	1,92	0,05

* D. P. – Desvio Padrão.

Tabela 3.8 – Ensaio de flexão dos biocompósitos PP/20 % de fibras de curauá reprocessados.

<i>Reprocessamentos (RPS)</i>	<i>Tensão Máxima (MPa)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>D.P.*</i>
I	44,4	1,0	1,83	0,20
II	40,7	0,9	1,62	0,17
III	39,8	2,0	1,58	0,09
IV	39,6	2,7	1,51	0,04
V	39,4	2,2	1,46	0,12

* D. P. – Desvio Padrão.

Tabela 3.9 – Ensaio de flexão dos biocompósitos PP/30 % de fibras de curauá reprocessados.

<i>Reprocessamentos (RPS)</i>	<i>Tensão Máxima (MPa)</i>	<i>D.P.*</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>D.P.*</i>
I	48,0	0,4	1,93	0,07
II	47,9	0,3	1,98	0,01
III	42,8	1,4	2,01	0,05
IV	41,9	0,8	2,00	0,06
V	41,5	1,8	1,97	0,06

* D. P. – Desvio Padrão.

Analisando a rigidez à flexão percebeu-se um aumento nesta propriedade com o aumento no percentual de fibras, isto é mais evidente na formulação de 30 % de curauá, o módulo subiu de 1,37 GPa sem adição de fibras (1º reprocessamento do PP, tabela 3.3) para 2,00 GPa para a composição de 30 % de fibra de curauá (3º reprocessamento), um aumento de 46,0 %. Percebe-se também pelos resultados apresentados nas três tabelas 3.7 a 3.9, que os valores da resistência e rigidez, obtidos para os biocompósitos com 10 % de curauá e 30 % são próximos entre os reprocessamentos, com uma variação percentual de 8,8 % a 13,5 % de resistência e 4,7 % a 4,1 % de rigidez entre os biocompósitos de 10 % e 30 % respectivamente.

Para melhor visualizar os resultados apresentados nas referidas tabelas 3.7 a 3.9, apresentam-se nas figuras 3.20 e 3.21 os resultados dos diagramas tensão versus deflexão dos biocompósitos de polipropileno a base de fibra de curauá com 10 %, 20 % e 30 %, respectivamente e seus reprocessamentos. Pelos resultados apresentados nestas figuras, percebe-se que a dispersão obtida entre as amostras foi pouco significativa para todos os biocompósitos à base de fibra de curauá. 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.

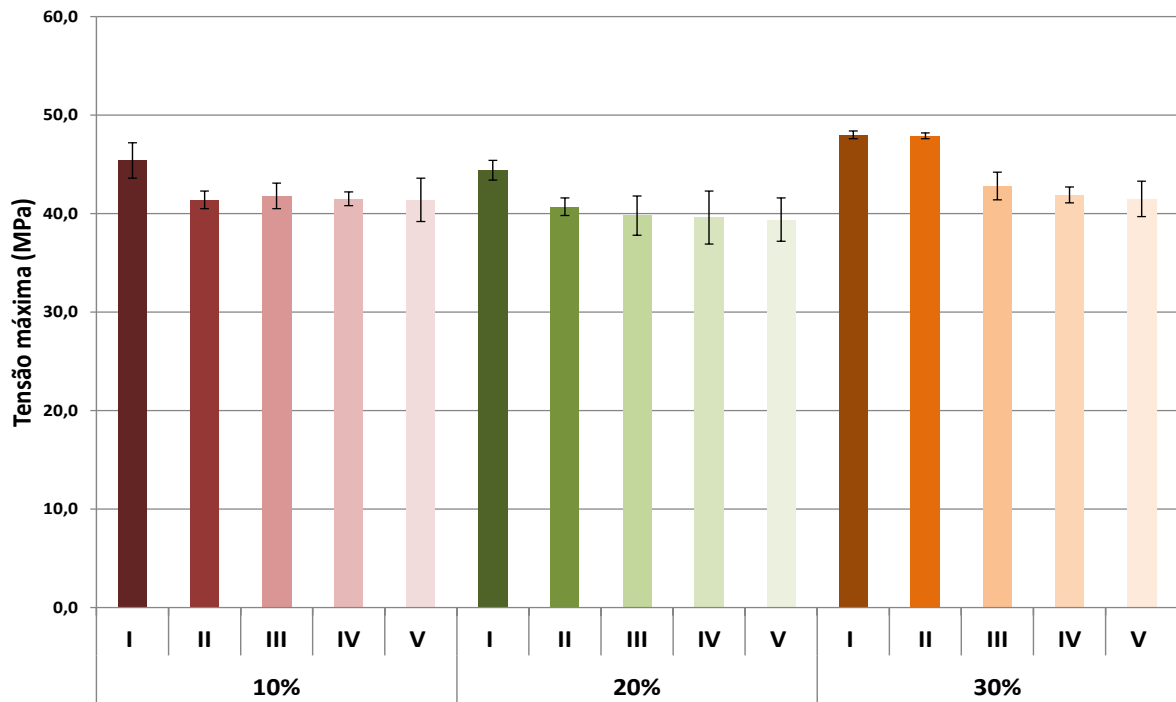


Figura 3.20 – Tensão máxima dos biocompósitos com fibras de curauá reprocessados.

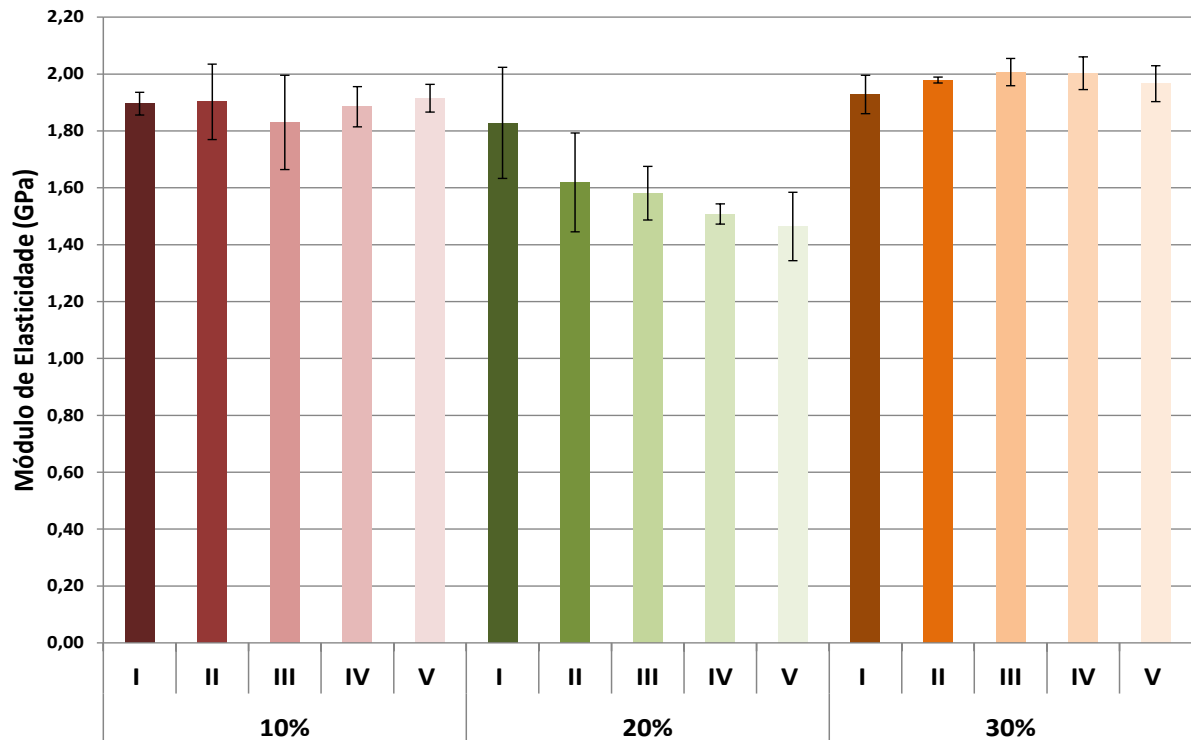


Figura 3.21 – Módulo de elasticidade dos biocompósitos com fibras de curauá reprocessados.

Observando os valores encontrados na rigidez dos biocompósitos com 20 % de fibras de curauá uma redução em torno de 20,2 % entre os reprocessamentos, notaram-se oscilações nos referidos valores proveniente da utilização de fibras curtas juntamente com as interferências por intempéries na fabricação dos referidos biocompósitos.

A provável razão para este fato ter ocorrido é a não homogeneização das fibras / matriz na primeira passagem pela extrusora, e nas blendas manuais entre os grãos formados na extrusão.

Além disso, foi detectado que o aumento de 10 % para 30 % não influenciou significativamente os resultados obtidos na flexão.

De acordo com Lopez *et al.* (2012), compósito reforçado com fibras vegetais pode ser reprocessados em até oito vezes sem perda significativa de resistência à flexão, observando neste o mesmo comportamento com a adição de fibras de curauá, possibilitando a reciclabilidade destes biocompósitos aqui fabricados.

3.3.3 Ensaio de impacto

As tabelas 3.10 a 12 apresentam os valores médios dos resultados obtidos para os ensaios de resistência ao impacto de biocompósitos à base de fibras de curauá.

Tabela 3.10 – Ensaio de impacto dos biocompósitos PP/10 % de fibras de curauá reprocessados.

<i>Reprocessamento (RPS)</i>	<i>Impacto (KJ/m²)</i>	<i>D. P.*</i>
I	33,9	2,4
II	34,5	4,1
III	34,4	1,0
IV	34,1	2,5
V	34,7	0,9

* D. P. – Desvio Padrão

Tabela 3.11 – Ensaio de impacto dos biocompósitos PP/20 % de fibras de curauá reprocessados.

<i>Reprocessamento (RPS)</i>	<i>Impacto (KJ/m²)</i>	<i>D. P.*</i>
I	30,6	5,8
II	33,3	3,1
III	34,3	1,9
IV	33,6	2,2
V	34,9	4,2

* D. P. – Desvio Padrão

Tabela 3.12 – Ensaio de impacto dos biocompósitos PP/30 % de fibras de curauá reprocessados.

<i>Reprocessamento (RPS)</i>	<i>Impacto (KJ/m²)</i>	<i>D. P.*</i>
I	21,3	2,0
II	24,7	1,5
III	26,5	2,2
IV	31,0	2,6
V	32,7	2,2

* D. P. – Desvio Padrão

A partir dos resultados obtidos das tabelas 3.10 a 3.12 elaboraram-se os gráficos de barras conforme figuras 3.22 a 3.24.

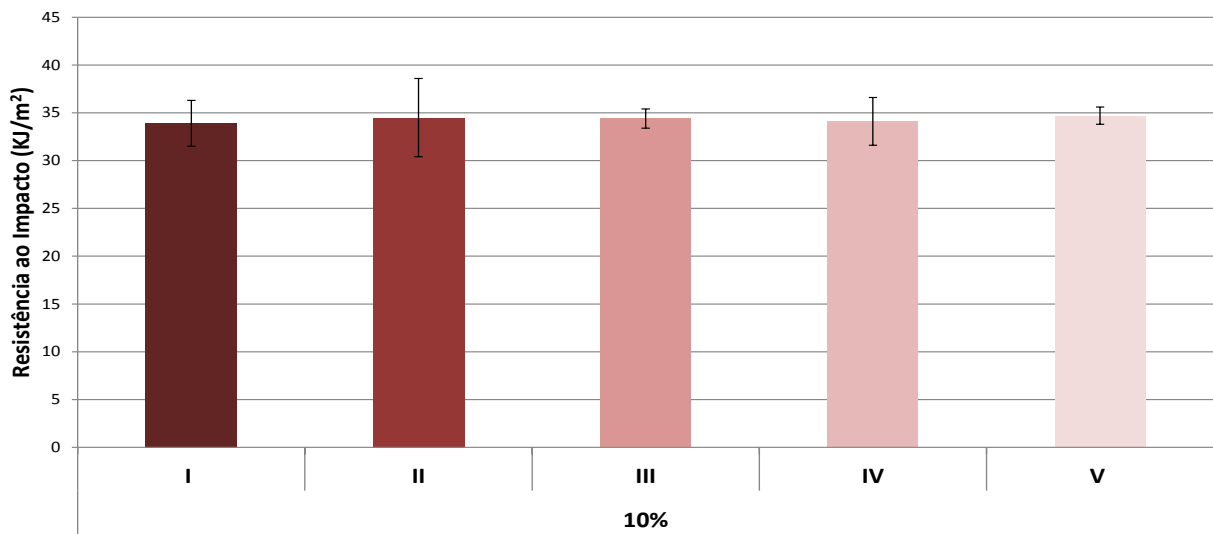


Figura 3.22 – Resistência ao impacto dos biocompósitos com 10 % de curauá reprocessados.

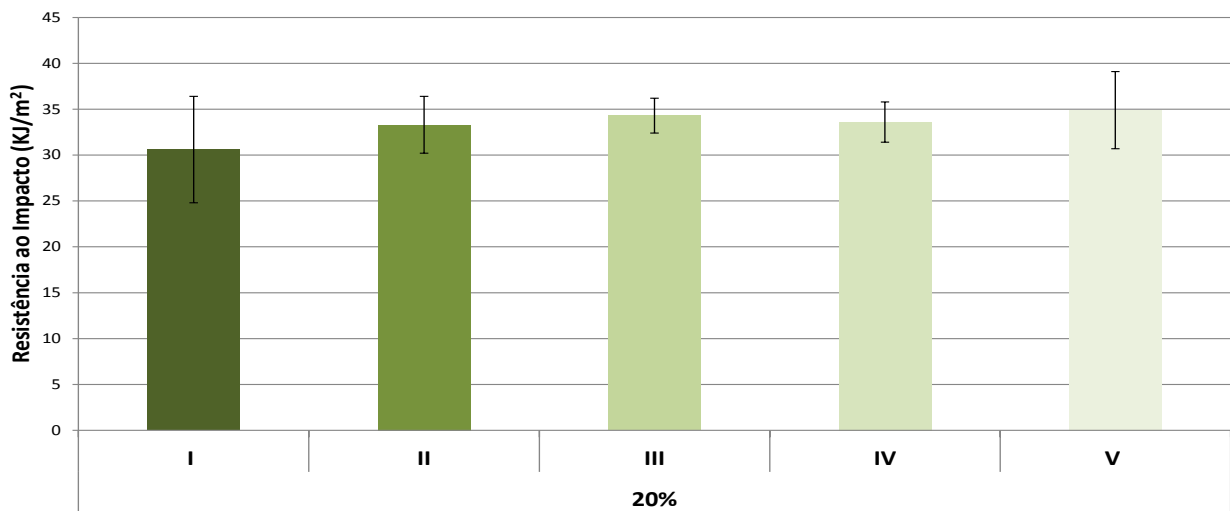


Figura 3.23 – Resistência ao impacto dos biocompósitos com 20 % de curauá reprocessados.

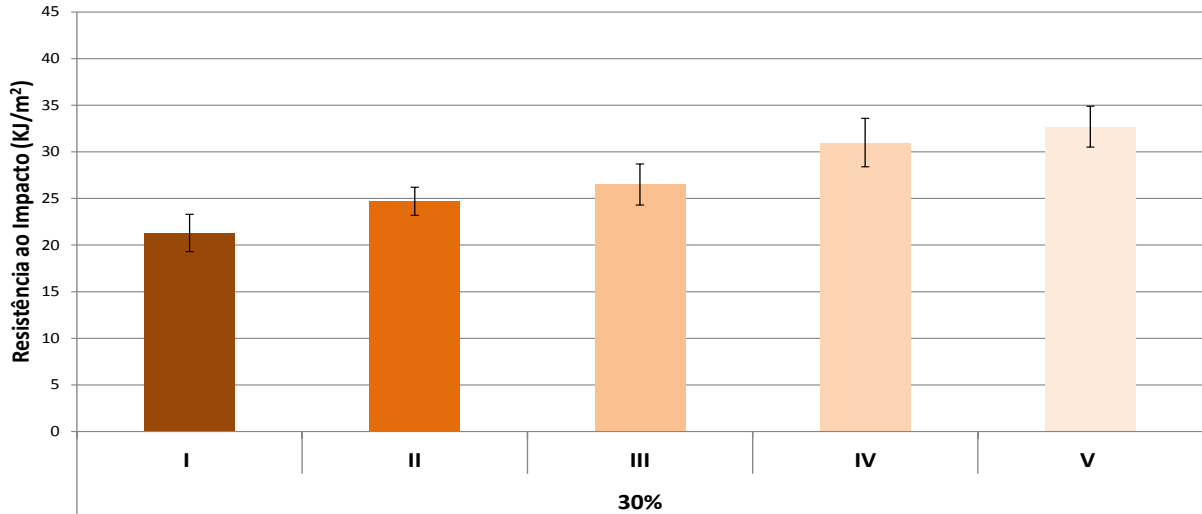


Figura 3.24 – Resistência ao impacto dos biocompósitos com 30 % de curauá reprocessados.

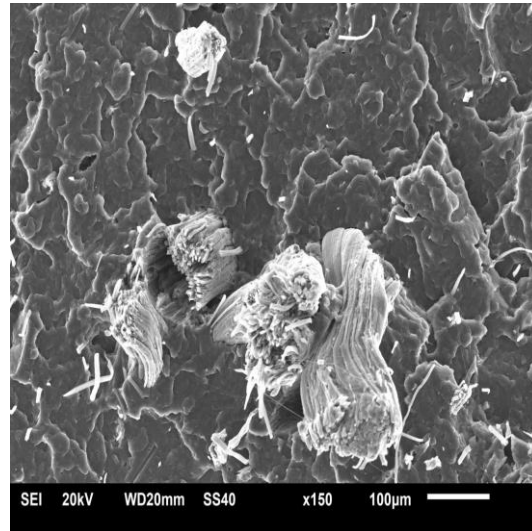
Fazendo uma análise comparativa, observou-se que a adição de fibras de curauá diminuiu os valores de resistência ao impacto, sendo este decréscimo em torno de 9,7 % entre os 1º reprocessamentos dos biocompósitos de 10 % e 20 % de curauá respectivamente, e decréscimo de 37,2 % entre os biocompósitos de 10 % e 30 %. Este resultado era esperado já que, como visto no item 3.3.1, verificou-se uma diminuição da deformação de ruptura destes materiais com o aumento do percentual de fibra de curauá nas etapas iniciais de cada formulação, diminuindo consequentemente sua tenacidade. Entretanto à medida que se reprocessava os grãos formados por cada composição percebeu-se um aumento em sua resistência, sendo mais significativo, nos biocompósitos com 30 % de curauá, um percentual de 53,5 %, fato este proveniente de uma maior aderência das fibras a matriz polimérica à medida que se reprocessava os biocompósitos, pois a cada passagem na extrusora os grãos tornavam-se mais homogêneos.

É importante destacar, que a maior redução de resistência ao impacto ocorreu de modo mais significativo para o biocompósito com 30 % de fibras de curauá, acredita-se que tal fato é dividido à aproximação do valor crítico de fração volumétrica do material de reforço (necessidade de estudos futuros), sendo que as frações volumétricas de fibra no compósito devem obedecer a uma faixa máxima para que continue havendo interação fibra-matriz.

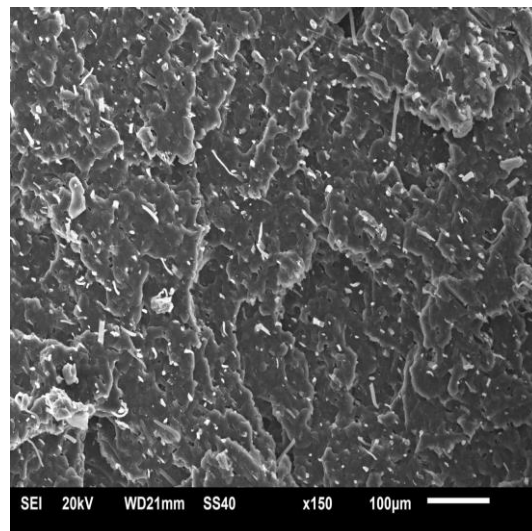
3.3.4 Ensaio morfológico por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Por meio da microscopia eletrônica de varredura pode-se verificar a microestrutura dos biocompósitos, nas amostras dos corpos de prova do ensaio de impacto. Observou-se uma boa

aderência das fibras na matriz polimérica, a não identificação de quebras das microfibras de curauá e nem falhas com micro trincas nas áreas analisadas, conforme figuras 3.25 e 3.26. Sendo que nas figuras 3.25 “a” e 3.26 “a”, apresentaram-se mais fibras com tamanho perceptível, por ser os primeiros reprocessamentos, já nas figuras 3.25 “b” e 3.26 “b” verificaram-se a presença de menos fibras, uma superfície lisa e homogênea, devido aos diversos reprocessamentos realizados nos biocompósitos.

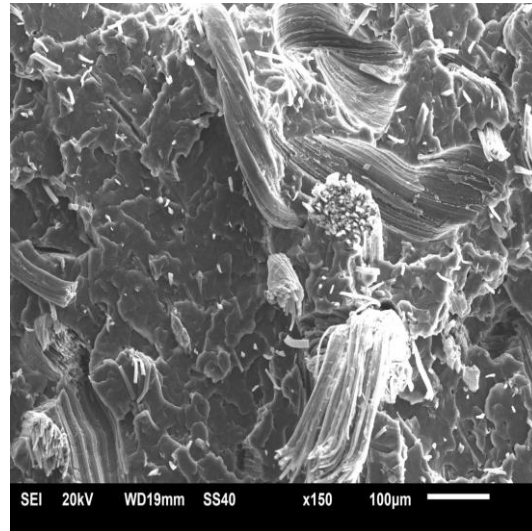


(a)

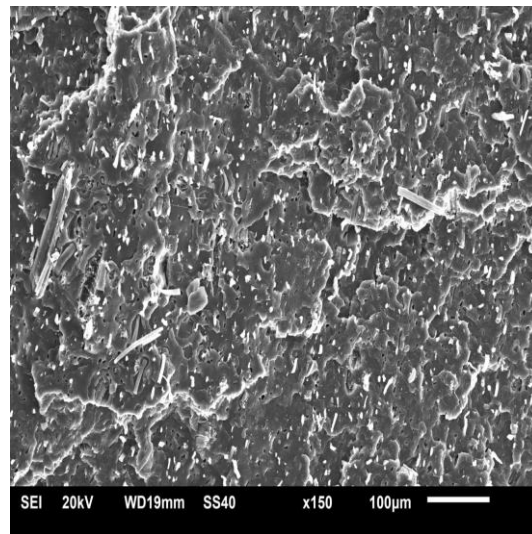


(b)

Figuras 3.25 (a) – Reprocessamento I com 10 % de fibras de curauá; (b) – Reprocessamento V com 10 % de fibras de curauá.



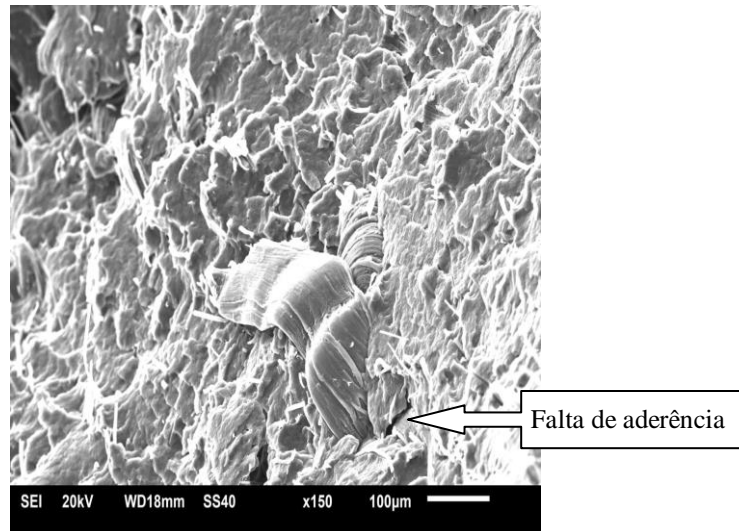
(a)



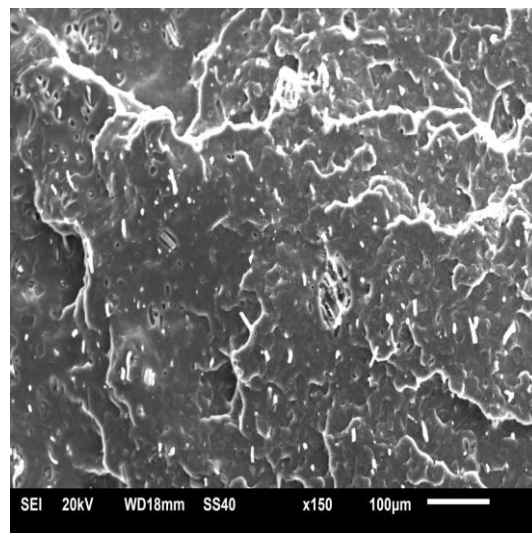
(b)

Figuras 3.26 (a) – Reprocessamento I com 30 % de fibras de curauá; (b) – Reprocessamento V com 30 % de fibras de curauá.

Observou-se na composição dos biocompósitos com 20 % de fibras de curauá que houve uma boa distribuição em conjunto com uma adesão parcial da carga de curauá na matriz polimérica de polipropileno, conforme figuras 3.27, entretanto identificou-se falta de aderência entre fibras de curauá e a matriz polimérica.



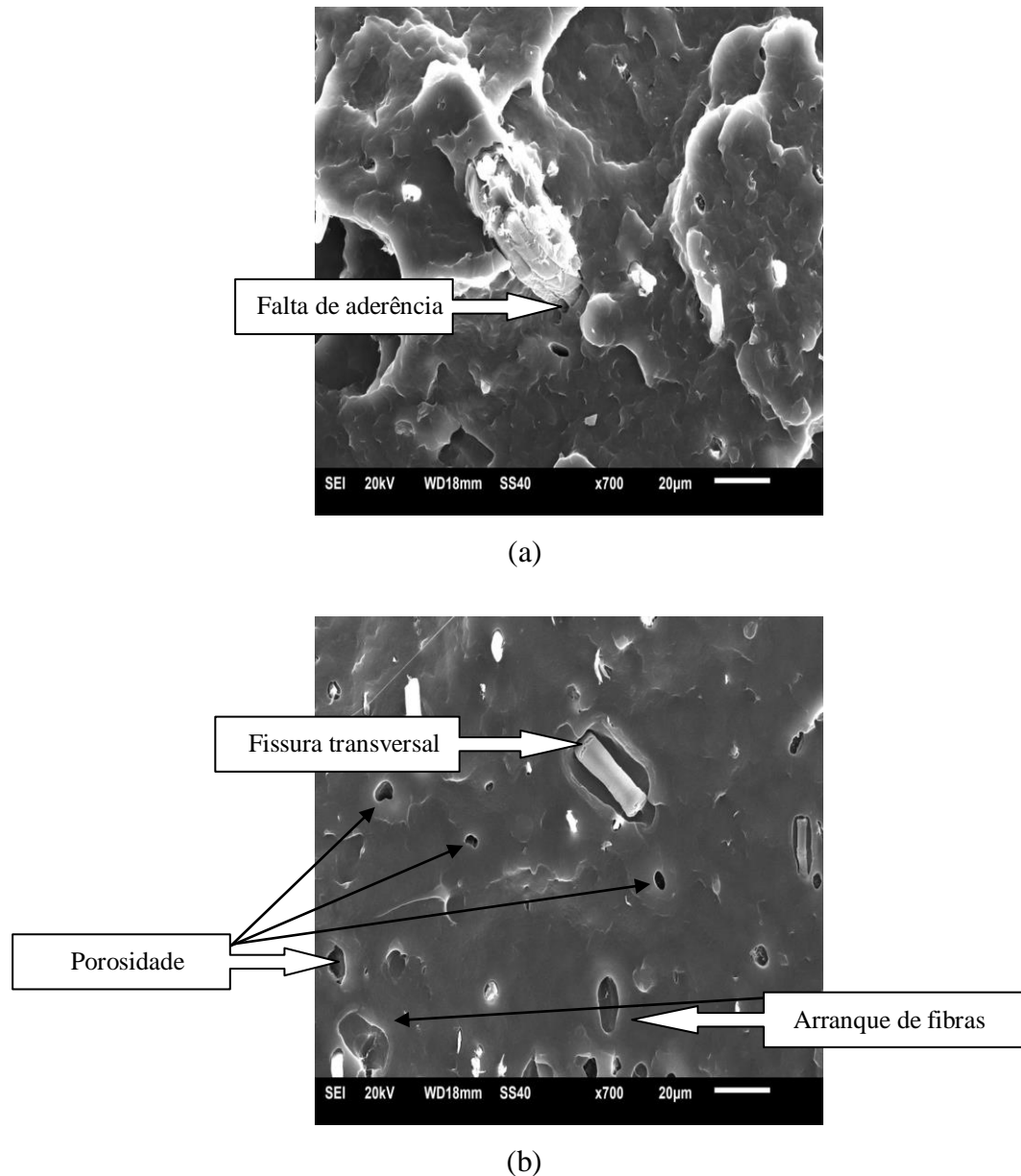
(a)



(b)

Figuras 3.27 (a) – Reprocessamento I com 20 % de fibras de curauá; (b) – Reprocessamento V com 20 % de fibras de curauá.

Devidos os valores encontrados da rigidez nos ensaios de tração e flexão para a composição dos biocompósitos com 20 % de fibras de curauá do 5º reprocessamento apresentar valores abaixo do esperado, resolveu-se analisar com uma melhor resolução, de 700x (figuras 3.28 a e b). Podem-se observar nas regiões analisadas falhas como fissura transversal nas fibras de curauá, falta de aderência entre fibra/polímero, a presença de pequenos poros e arranque de fibras entre os materiais de formação na superfície da amostra, que podem ter sido causados por descolamentos das fibras no compósito.



Figuras 3.28 (a) – Falta de aderência; (b) – Fibra com fissura transversal.

Acredita-se da influência do meio (intempéries), sendo que os grãos estavam propícios à absorção de umidade. Com isso confirma o que Pukansky (2005) afirmou, que o processamento para formação de biocompósitos, termoplásticos modificados com fibras naturais é complexo, devido à natureza higroscópica e hidrofílica das fibras lignocelulósicas, cuja tendência é de absorver umidade, gerando a formação de vapores durante o processamento. Sendo que o tempo de espera para a injeção pode ter sido suficiente para reter umidade nas fibras de curauá dos biocompósitos com 20 %, aumentando a degradação térmica do material, em consequência uma redução nos valores de rigidez durante o processo de injeção.

Também pode ser confirmado por Marinelli *et al.* (2008), para materiais moldados pelo processo de injeção, a formação de gases trará problemas porque as substâncias voláteis ficam aprisionadas dentro da cavidade durante o ciclo de moldagem por injeção. Se o material não for adequadamente seco, antes do processamento, haverá a formação de um produto com porosidade e com microestrutura semelhante a um expandido estrutural. Esta distribuição de porosidade é influenciada pelas condições de processamento e, conseqüentemente, trará comprometimento às propriedades mecânicas do material modificado. A presença de água absorvida pode também agravar a degradação térmica do material celulósico. Contudo pode-se ainda observar a boa estrutura superficial da amostra, que apresentou uma homogeneização visual das fibras aderidas na matriz polimérica. Em função disto, ficou evidente que a promoção de cuidados na fabricação de compósitos com adição de fibras naturais ajudará na formação de matérias de melhor qualidade.

CAPÍTULO – 4

CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos nesta tese ressalta-se as seguintes conclusões:

Os reprocessamentos alcançados, de um modo geral, nos materiais de biocompósitos com percentuais de 10 %, 20 % e 30 % de fibras de curauá respectivamente, por meio das etapas de extrusão e injeção, tiveram valores superiores e/ou aproximados ao polipropileno puro reprocessado, sendo assim, possível fabricar os biocompósitos granulados de polipropileno com a adição das fibras de curauá.

Observou-se que no PP puro após o 5º reprocessamento, houve um aumento de 118,3 % do IF em relação ao PP puro sem reprocesso. Sendo assim, necessário uso de aditivo para evitar a degradação térmica do PP provocada nos ciclos de reprocessamentos na extrusora. Entretanto, com a adição das fibras de curauá reduziu a degradação térmica no PP, onde verificou-se que foi necessário reprocessar os grãos dos biocompósitos com percentuais de 10 %, 20 % e 30 % de curauá, por 3, 4 e 5 vezes respectivamente para se aproximar do IF do PP sem reprocesso. Na medida em que se aumenta a carga de fibras há uma redução de massa de polímeros na mistura, diminuindo os esforços de cisalhamento provocado pelas roscas da extrusora.

Nas análises dos índices de fluidez apresentada, observou-se que os valores obtidos para os biocompósitos com 30 % fibras de curauá foram os que apresentaram os menores valores após todos os ciclos de reprocessamentos (cinco) na extrusão, entre as outras composições, tendo a menor diminuição na fluidez da mistura, entre os 1º reprocessamentos uma variação de 68,3 % e uma variação de 57,7 % no 5º reprocessamento.

Se os maquinários preparados para processar o PP, estiveram especificados (ajustados) para trabalhar com faixa de IF do HP 550 K, estes biocompósitos desta forma atenderia o

desempenho de transformação da resina, durante o processo e reprocesso, viabilizando a utilização dos mesmos, com possibilidade de reciclagem.

Os resultados apresentados das propriedades mecânicas dos biocompósitos relacionado ao ensaio de tração uniaxial tiveram o mesmo comportamento, valores aproximados, na tensão máxima, percebe-se que a dispersão obtida entre as amostras foi pouco significativa, exceção se faz somente aos valores de rigidez que variam significativamente em relação ao PP puro reprocessado.

Em relação à rigidez a tração, obteve ganho de 40,6 %, quando comparado com o melhor resultado do PP puro reprocessado com o 3º reprocessamento do biocompósito com percentual de 30 % de fibras de curauá. E quando comparado com o menor valor entre os todos os biocompósitos, o 5º reprocessamento do biocompósito com percentual de 30 % de fibras de curauá, os valores apresentados são considerados aproximados.

Percebeu-se que na formação inicial de cada composição dos grãos dos biocompósitos ocorreu uma tendência de rompimento com menor valor entre os outros reprocessamentos seguintes, devido a uma menor aderência e homogeneização das fibras a matriz polimérica.

Quando submetidos aos ensaios de flexão em três pontos, os biocompósitos demonstraram valores maiores em relação ao PP reprocessado. Verificou-se que com o aumento no percentual de fibras de curauá aumentou a tensão máxima, um aumento percentual de 22,1 % no biocompósito com 30 % de fibras de curauá no 1º reprocessamento. E que a redução desta propriedade quando comparadas entre elas com mesmo percentual foi mínima, um percentual de 13,5 %, no qual considerou-se uma pequena oscilação devido aos diversos reprocessamentos sofridos pelos grãos de biocompósitos. Observou-se também um aumento na rigidez à flexão, mais evidente, para o biocompósito a 30 % de fibras de curauá, um aumento no módulo de 46,0 %.

No ensaio de impacto, houve diminuição na resistência, para todos os biocompósitos, reduzindo na medida em que se adicionavam as fibras usadas, sendo este decréscimo em torno de 9,7 % entre os 1º reprocessamentos dos biocompósitos de 10 % e 20 % de curauá respectivamente, e decréscimo de 37,2 % entre os biocompósitos de 10 % e 30 %. Entretanto à medida que se reprocessava os grãos formados por cada composição houve um aumento em sua resistência, sendo mais significativo, nos biocompósitos com 30 % de curauá, um percentual de 53,5 %, devido a maior aderência e homogeneização dos materiais.

Nos reprocessamentos dos biocompósitos formados com 10 % e 30 % de fibras de curauá não apresentaram falhas após análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Entretanto, nos biocompósitos formados com 20 % de fibras de curauá, foram observadas falhas como fissura transversal na fibra de curauá, falta de aderência, porosidade e arranque de fibras entre os materiais de formação na superfície da amostra, devido influência de intempéries durante o processo de injeção do material.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1 - Criar novas composições de biocompósitos, utilizando outras resinas termoplásticas, com intuito de verificar o comportamento mecânico e físico, promovendo as análises macroscópicas e microscópicas ópticas de fratura, a fim de verificar a aderência entre os componentes.
- 2 - Obter biocompósitos com maior percentual de fibras naturais, com o objetivo de determinar limites máximos de desempenho mecânico.
- 3 - Realizar ensaios mecânicos com produtos recicláveis de biocompósitos, a fim de estudar a viabilidade econômica.
- 4- Estudo por envelhecimento nos biocompósitos com intuito de verificar o comportamento mecânico.
- 5- Estudo da temperatura de deflexão térmica (HDT) nos biocompósitos.

REFERÊNCIAS

- 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**. 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.
- BALAJI, A. *et al.* **Bagasse Fiber - The Future Biocomposite Material: A Review**. International Journal of ChemTech. Vol. 7. pp 223-233, 2015.
- BARROS, A. R. F. **Compósitos Híbridos: Desenvolvimento de Configuração e Efeitos de Umidificação**. Dissertação de Mestrado, PPGEM/UFRN, 2006.
- 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.
- BOURMAUD, Alain. BALEY, Christophe. **Rigidity analysis of polypropylene/vegetal fibre composites after recycling**. Polymer Degradation and Stability. Elsevier 94: 297 - 305, 2009.

BRASIL, Anna M.; SANTOS, Fátima. **Equilíbrio Ambiental e Resíduos na Sociedade Moderna**. São Paulo: Faarte Editora Ambiental, 2004.

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 Básico para Tecnólogos e Engenheiros**. 1ª Ed. Ed. Artliber. São Paulo, 2002.

CANEVAROLO Jr., Sebastião V. **Ciência dos Polímeros: Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros**. 3ª Ed. Ed. Artliber. São Paulo, 2013.

CAMARPLASTICOS – **Empresa de Resinas Plásticas Recicladas e Novas**. Disponível em: <http://www.camarplasticos.com.br/contratipos/pp.htm>. Acesso em janeiro de 2016.

CAMARGO, Alexandre Soares de. **Compósitos de Polipropileno Reforçado com Farinha de Madeira para Aplicações em Produtos Moldados por Injeção**. Dissertação. São Paulo, 2006.

CERQUEIRA Leite, Rogério C. de; e Colaboradores. **Nióbio uma Conquista Nacional**. Livraria duas Cidades Ltda., São Paulo, 1988.

CHANCEREL P. ROTTER S. **Recycling-oriented Characterization of Small Waste Electrical and Electrical and Electronic Equipment**. Waste Management 29 (2009) p. 2336-2352.

CHIARADIA, Adelheid M. L. **Biologia: Minimanual de Pesquisa**. Ed. Claranto, Minas Gerais 2003.

COELHO, Ricardo M. P. **Reciclagem e Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Belo Horizonte: Recóleo, 2009.

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.

DALTRO, Nelson Rios. **Desenvolvimento de um Laminado Compósito Híbrido a Base de Fibras de Vidro/Licuri**. Dissertação de Mestrado, PPGEM/UFRN, 2011.

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.

DELVA, Laurens *et al.* **The Effect of Multiple Extrusions on the Properties of Montmorillonite Filled Polypropylene**. Journal of Applied Polymer Science, 6, pp.2912-2927 (2014).

DORNELLES Filho, Augusto Marcelino Lopes; ATOLINO, Walter José Tangary. **Plásticos de Engenharia**. Editora Arteiber Ltda., São Paulo, 2009.

FECHINE, G. J. M.; SANTOS, J. A. B.; RABELLO, M. S.; **Avaliação da Fotodegradação de Poliolefinas Através de Exposição Natural e Artificial**. Quim. Nova, Vol. 29, n. 4, p. 674 – 680. São Paulo, 2006.

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.

FERREIRA, Ailton da Silava. **Características Estruturais E Propriedades De Compósitos Poliméricos Reforçados Com Fibras Longas De Curauá**. Tese de doutorado. UENF, Campos dos Goytacazes – RJ, 2009.

FERREIRA, A. S.; MONTEIRO, S. N; LOPES, F.P. D, Carvalho, E. A. **Avaliação das propriedades Mecânicas da Fibra do Curauá, utilizando Análise de Weibull**. 64º Congresso Anual do Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, Belo Horizonte – MG, 2009.

FERREIRA, A. S.; MONTEIRO, S. N; LOPES, F.P. D. **Efeito do Tratamento das fibras de Curauá nas propriedades Mecânicas de Compósitos com Matriz Epoxidica**. In: 64º Congresso Anual do Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, Belo Horizonte – MG, 2009.

- FERREIRA, J.A.M. *et al.* **Analysis of Fatigue and Damage in Glass-Fibre-reinforced Polypropylene Composite Materials.** Composites Science and Technology, Portugal, v. 59, 1999.
- FINKLER, M. *et al.* 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.
- FORTYMIL. Disponível em: <http://www.fortymil.com.br/pp.pdf>. Acesso em março de 2013.
- 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.
- HARADA, Júlio; UEKI, Marcelo M. **Injeção de Termoplásticos: Produtividade com Qualidade.** Editora Artliber. São Paulo, 2012.
- HAGE, E. Jr. **Compósitos e Blendas Poliméricas.** Instituto Latino Americano e IBM Brasil, p. 203, São Paulo, 1989.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (**ISSO 178**), Determination of Flexural Properties, 1993.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (**ISO 180**), Determination of Izod Impact Strength, 1993.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (**ISO 527**), Determination of Tensile Properties, 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 Composites – ISNapol, 3, 2000, São Pedro. Proceedings... São Pedro: [s.n.]. 606p. p. 333-343. 2000.

KLEIN, Fernando Roberto. **Estudo da Degradação Termomecânica e Fotooxidativa de Poli (Acrilonitrila-Butadieno-Estireno) para fins de Reciclagem Primária.** Dissertação de Mestrado. UFSC – Florianópolis / SC, 2009.

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.

LIGOWSKIL, Ezequiel. SANTOS, Benedito Cláudio dos. JUJIWARA, Sérgio Toshio. **Materiais compósitos a base de fibras da cana-de-açúcar e polímeros reciclados obtidos através da técnica de extrusão.** Artigo Científico. Scielo Brasil. Polímeros, 25(1), 70-75, São Carlos-SP, 2015.

LOMASSO, Alexandre L., *et al.* **Benefícios e Desafios na Implementação da Reciclagem: Um Estudo de caso no Centro Mineiro de Referência em Resíduos (CMRR).** Revista Pensar Gestão e administração, v.3, n. 2, 2015.

LOPEZ, J. P. *et al.* **Recycling Ability of Biodegradable Matrices and Their Cellulose Reinforced Composites in a Plastic Recycling Stream.** Journal of Polymers and the Environment, v. 20, n. 1, p. 96-103, 2012.

MANO, Eloisa Biasotto. **Introdução a Polímeros.** 5ª Reimpressão. Ed. Edgard Blücher Ltda. Rio de Janeiro, 1994.

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.
- MARINELLI, Alessandra L. *et al.* **Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras Vegetais Naturais da Biodiversidade: Uma Contribuição para a Sustentabilidade Amazônica**. Artigo Científico - Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, p. 92-99, 2008.
- MARINHO, Jean Richard Dasnoy. **Macromoléculas e Polímeros**. Ed. Manole. São Paulo, 2005.
- MARINUCCI, Gerson. **Materiais Compósitos Poliméricos – Fundamentos e Tecnologia**. Editora Artliber. São Paulo, 2011.
- MEYER, J. A., **Wood Polymer Materials: State of the Art**. Wood Science, Madison 14(2): 49-54, 1981.
- MICHAELI, Walter, *et al.* **Tecnologia dos Plásticos**. Ed. Edgard Blucher. São Paulo, 1995.
- MOHANTY, Amar K. MISRA, Manjusri. DRZAL, Lawrence T. **Natural Fibers, Biopolymers, e Biocomposites**. Taylor & Francis Group, 2005.
- 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.

- 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.
- PADILHA, Ângelo Fernando. **Materiais de Engenharia – Microestrutura e Propriedades**. Editora Hemus Livraria. São Paulo, 1997.
- PARDINI, Luiz C., LEVY NETO, Flamínio. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. 1. Edição. Ed. Edgard Blucher. São Paulo, 2006.
- PEMATEC TRIANGEL – **Fabricante de Peças Automobilísticas**, 2016. Disponível em: www.Pematec.com.br/curauá.htm. Acesso em janeiro de 2016.
- 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.
- PUKANSKY, B. - **European Polymer Journal**, 41, p.645, 2005.
- QUATTOR – UN PP. Empresa Petroquímica. Folha de Dados de Produto. Polipropileno Homopolímero. São Paulo, 2010.

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.

REIFSNIDER, K. L. **Damage in Composite Materials.** P. 280, 1982.

RIBEIRO, Marinaldo D. **Conceitos Aplicados a Alimentação Animal.** Departamento de Produção Animal – EMV. UFBA, 2001.

ROESLER, Joachim; HARDERS, Harald; BAEKER, Martin. **Mechanical Behaviour of Engineering: Metals, Ceramics, Polymers, and Composites.** Springer – Verlang Berlin Heidelberg, 536 p, 2007.

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.

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

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.

SANTOS, Rachel Passos de Oliveira. **Compósitos baseados em PET reciclado, fibras de sisal e plasticizantes oriundos de fontes renováveis: estudo do processamento e propriedades destes materiais.** Dissertação de Mestrado. USP, 2012.

SHACKELFORD, James F. **Ciência dos Materiais.** 6ª edição. Ed. Pearson. São Paulo, 2008.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais.** 5ª ed. AMGH. Porto Alegre, 2012.

SILVA, J. L. G. **Estudo dos Mecanismos de Molhabilidade do Compósito de Fibra Sisal/Matriz Polimérica.** Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 1996.

SOUZA, S. A.. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos.** Ed. Edgard Bluched, p. 286,1984.

TAJVIDI, M., FALK, R. H., HERMANSON, J.C. **Effect of natural fibers on thermal and mechanical properties of natural polypropylene composites studied by dynamic mechanical analysis.** Journal of Applied Polymer Science 101, 2006.

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.

TORRES, N.; ROBIN, J. J.; BOUNTVIN, B. **Study of Thermal and Mechanical Properties of Virgin and Recycled Poly (ethylene terephthalate) before and after Injection Molding.** European Polymer Journal. V.36, p. 2075 – 2080, 2000.

UNSER, J. F. **Advanced Composites Recycling.** Sampe Journal, v. 32, n. 5, p.52-57, 1996.

VILAPLANA F.; RIBES A.; KARLSSON S. **Degradation of Recycled High-impact Polystyrene. Simulation by Reprocessing and Thermo-oxidation.** Polymer Degradation and Stability 91 (2006) 2163 – 2170.

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.