

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica

Marcus Vinícius de Abreu Soeiro

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS
INJETADOS DE POLIPROPILENO COM CARGA DE 20% E 30%
DE FIBRA DE VIDRO E FIBRA DE COCO**

Belo Horizonte

2014

Marcus Vinícius de Abreu Soeiro

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS
INJETADOS DE POLIPROPILENO COM CARGA DE 20% E 30%
DE FIBRA DE VIDRO E FIBRA DE COCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. William de Melo Silva.

Belo Horizonte

2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

S681c Soeiro, Marcus Vinícius de Abreu
Caracterização mecânica de compósitos injetados de polipropileno com carga de 20% e 30% de fibra de vidro e fibra de coco / Marcus Vinícius de Abreu Soeiro. Belo Horizonte, 2014.
96.:il.

Orientador: William de Melo Silva
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Fibras. 2. Fibras de vidro. 3. Polipropileno. 4. Compósitos poliméricos. I. Silva, William de Melo. II. Pontifícia Universidade Católica de Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 678.7

Marcus Vinícius de Abreu Soeiro

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS INJETADOS
DE POLIPROPILENO COM CARGA DE 20% E 30% DE
FIBRA DE VIDRO E FIBRA DE COCO**

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. William de Melo Silva, Dr. (Orientador)

Prof. José Rubens Gonçalves Carneiro, Dr. – PUC Minas

Prof. Pedro Paiva Brito, Dr. – PUC Minas

Prof. Rodrigo Lambert Oréfica, Dr. – UFMG

Belo Horizonte, 27 de maio de 2014.

À instituição mais importante do mundo,
que é a família.

À minha esposa, Fernanda,
por todo amor e incentivo neste caminhar.

A minhas filhas, Bianca e Raquel,
pela habilidade perene de gerarem alegrias
e aprendizados em nosso lar.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por esta conquista.

Ao meu orientador, Professor William de Melo Silva, pelas informações, conhecimentos, experiências, conselhos, sempre propondo novos desafios. E por ter acreditado no meu potencial.

À empresa Borealis Brasil, em especial ao Sr. Marcelo Brassolatti, pelo fornecimento do polipropileno.

Ao Departamento de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET) pela disponibilidade de uso dos laboratórios de testes e microscopia.

Ao Professor Alexandre Rangel, por compartilhar os seus conhecimentos na realização do ensaio de impacto.

À minha família, que sempre me apoiou, a minha mãe, Elaine, meu pai, Marcos, e a minhas irmãs, Patrícia e Valéria, que sempre estiveram presentes.

À minha esposa, Fernanda, pela paciência e compreensão.

Às amigas Claudilene, Talita e Jaqueline, que me ajudaram sempre que precisei.

RESUMO

Os compósitos formados por polímeros e fibras sintéticas vêm sendo usados em diversas aplicações e a cada dia em maiores quantidades. Um exemplo disso é o polipropileno reforçado com a fibra de vidro que demonstra interessantes propriedades mecânicas que o diferenciam de um material puro, basicamente, pelo modo como o material responde às solicitações mecânicas nele aplicado. Neste sentido, a substituição de fibras sintéticas por fibras vegetais é uma alternativa interessante, pelas questões que vão desde renovabilidade, biodegradabilidade e reforçabilidade. Este trabalho propõe a realização de um estudo comparativo entre compósitos com fibra de vidro e compósitos com fibras naturais na mesma matriz polimérica e nas mesmas proporções de massa. Para isso, este trabalho caracterizou compósitos com fibras de vidro e compósitos com fibras de coco usando as mesmas cargas em uma mesma matriz polimérica. Assim, as fibras foram adicionadas a uma matriz polimérica por meio de extrusora dupla-rosca corrotacional interpenetrante. Após essa mistura, os corpos de prova foram preparados por injeção. Os testes realizados foram: de resistência à tração, de resistência ao impacto, de flexão e de densidade. As propriedades térmicas foram analisadas por análise termogravimétrica. Com isso, as vantagens do uso das fibras naturais encontradas foram que os compósitos com fibras vegetais possuem densidades mais baixas, custos mais baixo de produção e a diminuição de resíduos no ambiente. Do ponto de vista de substituição da fibra de vidro pela de coco, em determinados percentuais, quando misturados ao polipropileno, não se verificou alteração de propriedades mecânicas. A análise termogravimétrica dos compósitos demonstrou perda de massa do polipropileno de 99,26% para o polipropileno 30%; em massa de fibra de vidro, 70,17%; para o polipropileno, 30%; e fibra de coco, perda de massa de 92,19%. O processo de limpeza das fibras de coco e a sua secagem no forno demonstraram eficiência para a adesão da fibra de coco na matriz polimérica e perda de massa devido à secagem de 40%. Por fim, verificou-se que a fibra de coco é uma excelente alternativa para substituir a fibra de vidro, porém se faz necessário a ampliação desses estudos.

Palavras-chaves: Fibra de vidro. Fibra de coco. Polipropileno. Compósitos.

ABSTRACT

Nowadays, the composites formed from polymers and synthetic fibers have been used in various applications and in greater quantities. One example is polypropylene reinforced with fiberglass which shows interesting mechanical properties that differentiate it from a pure material, basically by how the material responds to mechanical stresses applied to it. In this sense, the substitution of synthetic fibers by natural fibers is an interesting alternative, for issues ranging from renewability, biodegradability and reinforcement. This work proposed to carry out a comparative study of composite fiberglass and composites with natural fibers in the same polymer matrix and in the same proportions of mass. In this experimental work, it was characterize composites with glass fibers and composites with coconut fibers using the same loads in the same polymer matrix. Thus, the fibers were added to a polymeric matrix by a rotational twin-screw extruder interpenetrating. The samples were prepared for injection after mixing. The tests performed were: tensile strength, impact resistance, bending and density. The thermal properties were analyzed by thermogravimetry (TG). Thus, the advantages of using natural fibers have found that the compounds with plant fibers possess lower densities, lower production costs and reduced waste in the environment. From the viewpoint of substitution of the coconut fiber glass in certain percentages, when mixed with the polypropylene, no changes were observed in mechanical properties. Thermogravimetric analysis of composites showed weight loss of 99.26% of polypropylene at 30%; Bulk glass fiber, 70.17%; for polypropylene at 30%; and coconut fiber, mass loss of 92.19%. The cleaning process of coconut fibers and drying it in the oven demonstrated efficiency for the accession of coconut fiber in the polymer matrix and mass loss due to drying of 40%. Finally, it was found that the coconut fiber is an excellent alternative to replace the glass fiber, but it is necessary to expand these studies.

Key words: Glass fiber. Coconut fiber. Polypropylene. Composites.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Montagem básica de um compósito: união de uma base com reforços.....	20
FIGURA 2 - Tipos de compósitos baseados na estrutura.....	20
FIGURA 3 - Propeno e reação de polimerização.....	27
FIGURA 4 - Configurações estereoespecíficas do polipropileno.....	27
FIGURA 5 - Agentes modificadores.....	33
FIGURA 6 - Exemplos de aplicações de termoplásticos carregados.....	33
FIGURA 7 - Influência dos parâmetros/eficiência do reforço.....	36
FIGURA 8 - Coqueiros da variedade gigante.....	41
FIGURA 9 - Curvas típicas tensão <i>versus</i> deformação obtidas em ensaios de tração para diversos tipos de polímeros classificados de acordo com a sua rigidez e tenacidade.....	43
FIGURA 10 - Modelo de uma máquina para realizar o teste de impacto.....	46
FIGURA 11 - Formas e dimensões dos corpos de prova para ensaio de impacto.....	48
FIGURA 12 - Representação esquemática do dispositivo de ensaio de flexão em três pontos.....	50
FIGURA 13 - PP-PX 2507.....	55
FIGURA 14 - Fibra de vidro utilizada nos corpos de prova.....	57
FIGURA 15 - Fibra de coco utilizada nos corpos de prova.....	57
FIGURA 16 - Fibra de coco sendo mercerizada.....	58
FIGURA 17 - Forno utilizado para secar a fibra de coco.....	59
FIGURA 18 - Disposição das fibras de coco dentro do forno.....	60
FIGURA 19 - Moinho usado para picotar as fibras de coco.....	60
FIGURA 20 - Corpo de prova após a injeção para teste de tração.....	67
FIGURA 21 - Foto da injetora onde os corpos de prova foram feitos.....	68
FIGURA 22 - Foto do molde dos corpos de prova.....	69
FIGURA 23 - Foto da máquina de tração.....	70
FIGURA 24 - Foto da máquina de impacto.....	73
FIGURA 25 - Corpo de prova usado no ensaio de impacto.....	73

FIGURA 26 - Foto do MEV (a), foto do evaporador para revestimento de amostras (b).....	77
FIGURA 27 - Fibra de coco antes da secagem.....	78
FIGURA 28 - Fibra de coco após a secagem.....	78
FIGURA 29 - Fibra de coco na matriz polimérica a, b.....	79
FIGURA 30 - Fibra de vidro na matriz polimérica a, b.....	80
FIGURA 31 - Foto da máquina para o ensaio HDT (a), corpo de prova (b)...	80
FIGURA 32 - Foto da máquina usada no ensaio de fluidez do polipropileno PX2507.....	83

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - Principais produtores de polímeros no mundo.....	22
GRÁFICO 2 - Resistência à tração dos compósitos.....	71
GRÁFICO 3 - Tenacidade dos compósitos.....	72
GRÁFICO 4 - Resistência ao impacto dos compósitos.....	74
GRÁFICO 5 - Teste de HDT.....	82
GRÁFICO 6 - Análise termogravimétrica do PP puro.....	84
GRÁFICO 7 - Análise termogravimétrica do PP com 30% de fibra de vidro..	84
GRÁFICO 8 - Análise termogravimétrica do PP com 30% de fibra de coco..	85

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Início de comercialização de alguns polímeros sintéticos.....	21
QUADRO 2 - Propriedades mecânicas de polímeros termoplásticos.....	28
QUADRO 3 - Composição química típica de fibras de vidro comerciais.....	37
QUADRO 4 - Propriedades físicas do PP-PX 2507 fornecidos pela Borealis.	55
QUADRO 5 - Dados da fibra de vidro utilizada nos corpos de prova.....	56
QUADRO 6 - Proporções em peso de cada compósito.....	61

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Condições de extrusão das amostras.....	63
TABELA 2 - Condições de injeção dos corpos de prova fibra de vidro com PP.....	64
TABELA 3 - Condições de extrusão das amostras com formulações de 20% e 30 % de fibra de coco com PP.....	65
TABELA 4 - Condições de injeção dos corpos de prova fibra de coco com PP.....	66
TABELA 5 - Resistência à tração dos compósitos extrudados e injetadas....	71
TABELA 6 - Resistência ao impacto Izod dos compósitos.....	74
TABELA 7 - Resistência mecânica em flexão.....	75
TABELA 8 - Resistência mecânica em densidades.....	76
TABELA 9 - Ensaio de HDT.....	81
TABELA 10 - Resultados dos ensaios de termogravimetria.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS

g – Grama

mm – Milímetro

MPa – Megapascal

nm – Nanômetro

PDMS – *Polydimethylsiloxane*

PE – *Polyethylene*

PMMA – *Polymethylmethacrylate*

PP – Polipropileno

PS – *Polystyrene*

Tg – Termogravimetria

LISTA DE SIGLAS

a.C. – Antes de Cristo
ABS – Acrilonitrila butadieno estireno
ANOVA – Análise de Variância
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
CEFET – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
cm³ - Centímetro cúbico
D – Diâmetro da fibra
Da – Densidade aparente (kg/m³)
DEMAT – Departamento de Engenharia de Materiais
Dvol – Densidade volumétrica (kg/m³)
EPR – Propileno-etileno
FV – Fibras de vidro
HDT – *Heat deflection temperature*
ISO – *International Organization for Standardization*
MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura
PET – *Polyethylene Terephthalate*
PRFV – Plásticos reforçados com fibra de vidro
Psat – Peso saturado (g)
Pse – Peso seco (g)
Psus – Peso suspenso (g)
PVC – *Polyvinyl chloride*
rpm – Rotação por minuto
SAN – Estireno-acrilonitrila
SBR – Butadieno estireno
Tc – Temperatura de cristalização
Tm – Temperatura de fusão cristalina

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3 – Óxido de alumínio

B_2O_3 – Óxido bórico

CaO – Óxido de cálcio

d_σ – Variação de tensão até o escoamento

d_ε – Variação de alongamento até o escoamento

ε – Deformação (mm/mm)

E – Módulo de elasticidade (N/m^2)

ε_f – Deformação em flexão

E_r – Módulo de relaxação (N/m^2)

L – Comprimento sob deformação

l_0 – Comprimento inicial

MgO – Óxido de magnésio

NaOH – Hidróxido de sódio

σ_1 – Tensão medida no ponto de deflexão s_1

σ_2 – Tensão medida no ponto de deflexão s_2

ρ – Densidade (kg/m^3)

P_2O_5 – Pentóxido de fósforo

Q – Carga (gf)

σ – Tensão (MPa)

S_f – Resistência da fibra

SiO_2 – Sílica

t – Resistência interfacial

μm – Microns

SUMÁRIO¹

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos	23
1.1.1 <i>Objetivo geral</i>	23
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 Desenvolvimento dos compósitos	24
2.2 Polipropileno	26
2.3 Fundamentos de reforço mecânico de termoplásticos	29
2.4 Termoplásticos	30
2.5 Fibras	32
2.5.1 <i>Fibras sintéticas</i>	35
2.5.2 <i>Fibras de vidro</i>	37
2.5.3 <i>Fibras de coco</i>	39
2.6 Propriedades dos termoplásticos de engenharia	41
2.7 Ensaio de tração	44
2.8 Ensaio de impacto	46
2.9 Ensaio flexão	50
2.10 Ensaio de densidade	53
2.11 Teste de fluidez	53
3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	55
3.1 Materiais	55
3.2 Produção dos corpos de prova	58
3.2.1 Secagem da fibra de coco	58
3.2.2 <i>Moldagem dos corpos de prova</i>	61

¹ Este trabalho foi revisado de acordo com as novas regras ortográficas aprovadas pelo Acordo Ortográfico assinado entre os países que integram a Comunidade de Países de Língua Portuguesa (CPLP), em vigor no Brasil desde 2009. E foi formatado de acordo com o Manual de Normatização da PUC, 2011.

4 RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	70
4.1 Resistência à tração.....	70
4.2 Resistência ao impacto.....	73
4.3 Ensaio de resistência à flexão.....	74
4.4 Ensaio de densidade.....	75
4.5 Caracterização microestrutural.....	76
4.6 Caracterização térmica.....	80
4.7 Teste de fluidez.....	82
4.8 Teste termogravimetria.....	83
5 CONCLUSÃO.....	87
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
REFERÊNCIAS.....	90
APÊNDICE A.....	94

1 INTRODUÇÃO

A evolução da humanidade, desde seus primórdios, está intimamente ligada à capacidade do homem em criar alternativas para garantir sua sobrevivência e melhorar seu conforto de vida. Assim, é possível observar constantes avanços científicos e tecnológicos nas áreas de alimentação, da saúde, de comunicação, de transporte, etc., para atingir tais objetivos. Grande parte das mudanças ocorridas até hoje se deve à disponibilidade de materiais adequados para transformar as idéias e mesmo sonhos em realidade (HAGE JR., 1998, p. 9).

A indústria de polímeros constitui hoje um dos pilares do estilo de vida contemporâneo. É significativa a quantidade de bens que nos cercam, produzidos de material polimérico, uma vez que eles são utilizados em quase todas as áreas das atividades humanas, principalmente nas indústrias automobilísticas, de embalagens, de revestimentos e de vestuário, e se incorporam de forma permanente ao dia-a-dia de nossas vidas. Isso se deve também ao fato de que os materiais poliméricos vêm conquistando muitos mercados a partir da substituição de outros insumos, como papel, madeira e metais (GUTIÉRREZ; EMMANUEL, 2009).

Atualmente, o desenvolvimento de novos materiais traz a reboque não apenas a necessidade de atender ao projeto, mas também de atender a questões ambientais. As questões ambientais e as relacionadas à saúde humana nunca foram desconhecidas pela indústria química. Ainda em 1962, Rachel Carson², escritora, cientista e ecologista americana, publicou o livro *Silent Spring*³ (“Primavera Silenciosa”), lançando aquele que é considerado o maior desafio da indústria química. Seu livro é a primeira indicação do impacto criado pelas indústrias químicas, ao abordar as consequências ambientais de agrotóxicos na contaminação do solo e da água, o que ameaçava toda a cadeia alimentar dos seres vivos (MOL, 1995; PASSOS, 2009).

A seleção de materiais orientados para o futuro é indispensável nos dias de hoje, em razão dos aspectos tecnológicos e econômicos decorrentes das

² Rachel Louise Carson nasceu em maio de 1907. Posteriormente, em depoimento ao Congresso Americano em 1963, Carson pede novas políticas de proteção à saúde humana e ao meio ambiente (LEAR, 1998).

³ Mais detalhes a respeito podem ser encontrados em Passos (2009, p. 6).

diretrizes promulgadas pela legislação da União Européia sobre os carros em fim de vida útil, ocorrida em setembro de 2000 (KLEBA; ZABOLD, 2004; MARSH, 2003).

Segundo Abreu, Forte e Liberman (2006), o polipropileno (PP) é um material pouco tenaz e com baixa resistência ao impacto. Melo *et al.* (2000) também descreveram que se trata de um polímero versátil e de larga aplicação, porém apresenta instabilidade dimensional e limitações na resistência ao impacto e termoformabilidade. Por outro lado, quando modificado com borracha ou misturado com outros polímeros ou fibras, suas propriedades são otimizadas, podendo ser aplicado em pára-choques de automóveis, revestimento interno de *freezers*, eletrodomésticos, etc.

A possibilidade de melhora das propriedades mecânicas de um polipropileno em função de sua associação com fibras traz para a engenharia um novo caminho para a formação de um compósito, com aplicações na indústria automotiva. Estudos recentes já demonstraram que as fibras sintéticas, quando associadas ao polipropileno, contribuem para o aumento das propriedades mecânicas do PP. Uma peça polimérica composta de menos material virgem e com fibra natural demonstra ter uma vantagem industrial em relação ao custo final da peça e em relação à reciclagem do material polimérico. Segundo Canevarolo (2006), considerando-se que a distribuição de esforços ou tensões em uma matriz polimérica é uniforme em todos os seus pontos, uma segunda fase dispersa nessa matriz também absorve a solicitação aplicada ao conjunto. Se o módulo de elasticidade dessa segunda fase for mais alto que a matriz, o resultado final será aumento nas propriedades mecânicas do composto, principalmente o módulo de elasticidade e a resistência à ruptura. Ainda de acordo com Canevarolo (2006), termoplásticos como náilon, o polipropileno, etc. e termofixos como poliéster insaturado e resina epóxi encontram grande aplicação quando reforçados com fibras.

Segundo Vicente Chiaverini (1986), define-se compósito como uma mistura de fases macrocomponentes de materiais em estados divididos diferentes sob o ponto de vista da composição química, como mostra a FIG. 1.

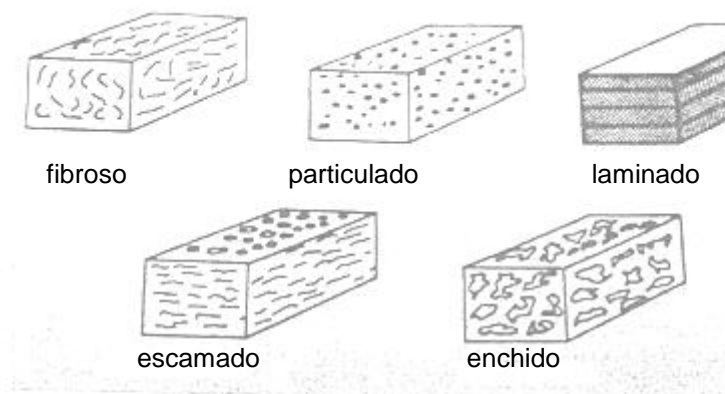
Figura 1 - Montagem básica de um compósito: união de uma base com reforços estruturais



Fonte: Moraes (2012).

A FIG. 2 é apresentada por Chiaverini, onde o autor classifica cinco tipos básicos de compósitos com base em sua estrutura: a) fibroso; b) particulado; c) lamelar; d) escamado; e) enchido.

Figura 2 - Tipos de compósitos baseados na estrutura



Fonte: Chiaverini (1986).

O termo polímero foi criado por um químico alemão, J. Berzelius, em 1832 (HAGE JR., 1998, p. 9). Antes de 1920, polímeros eram considerados tipos especiais de colóides. Apenas em 1920, Staudinger propôs a estrutura baseada em longas cadeias. Em seguida, Herman Mark visualizou a disposição de meros em células unitárias (ORÉFICE, 2013).

Os polímeros revolucionaram o mundo após a II Guerra Mundial, possibilitando a fabricação de produtos com leveza e durabilidade, sem problemas de deterioração e de custo reduzido, que poderiam facilmente substituir o aço, o vidro e a madeira no uso cotidiano (CASARIN, 2004). O sistema atual de produção de peças poliméricas, que tem o petróleo como a sua

principal fonte de matéria-prima, desenvolveu-se como indústria de base nos países industrializados a partir de meados do século XX (CASARIN, 2004). O QUADRO 1 exibe o início da comercialização de alguns polímeros.

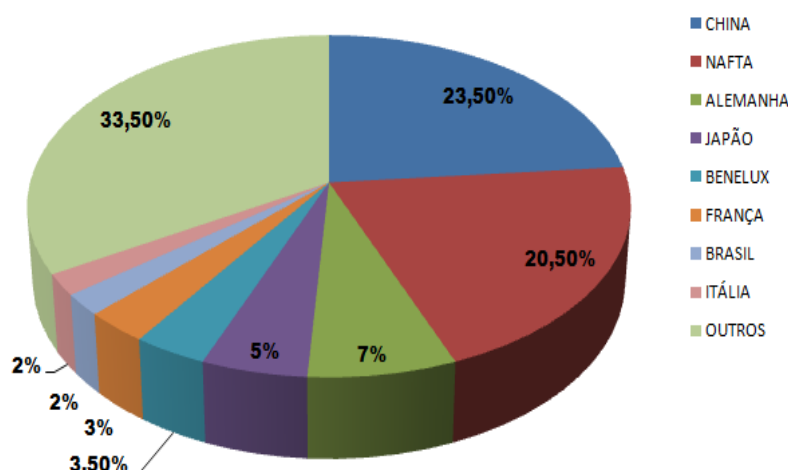
Quadro 1 - Início de comercialização de alguns polímeros sintéticos

Ano	Sigla	Polímero	Fabricante
1927	PVC	Poli(cloreto de vinila)	B. P. Goodrich
1930	PS	Poliestireno	I.G.Farben/Dow
1936	PMMA	Poli(metacrilato de metila)	Rohm and Haas
1936	PA 6,6	Nylon 6,6	DuPont
1939	LDPE	Poli(etileno de Baixa Densidade)	ICI
1946	PTFE	Poli(tetra fluor etileno)/TEFLON	DuPont
1948	ABS	Copolímero acrilonitrila-butadieno-estireno	Rohm and Haas/ I.G.Farben
1954	PU	Poliuretanos	Bayer/DuPont
1954	HDPE	Poli(etileno de Alta Densidade)	Hoechst
1954	PET	Poli(tereftalato de etileno)	ICI
1956	PA 6	Poliamida ou Nylon 6	Allied
1957	PP	Polipropileno	Phillips Petrol.
1958	PC	Policarbonato	GE/Bayer
1958	POM	Poli(acetal ou Acetal)	DuPont
1959	LLDPE	Poli(etileno Linear de Baixa Dens.)	DuPont-Canada
1960	ARAMID	Poli(amida aromática)	DuPont
1963	PI	Poliimidas	DuPont
1965	PPO	Poli(éter fenileno) ou Noryl	GE
1965	SBS	Borracha Termoplástica	Shell
1969	PBT	Poli(tereftalato de butileno)	Celanese
1972	PPS	Poli(sulfeto de fenileno)	Phillips Petrol.
1972	LCP	Cristal Líquido Polimérico	Carborundum
1978	PES	Poli(éter sulfona)	ICI
1978	PEEK	Poli(éter éter sulfona)	ICI
1982	PEI	Poli(éter imida)	GE
1987	PA 4,6	Poliamida ou Nylon 4,6	DSM

Fonte: Utracki (1995, p. 2).

Atualmente, os polímeros participam de diversos segmentos industriais, tais como embalagens, têxteis, automobilísticos, eletroeletrônico, entre outros. O GRÁF. 1 exibe os principais produtores de polímeros no mundo.

Gráfico 1 - Principais produtores de polímeros no mundo



Fonte: Héber (2012, p. 4).

Na indústria automobilística essa troca de material metálico por material polimérico representa ganho no projeto dos veículos em relação a peso e facilidade de produção. Veículos mais leves podem aproveitar melhor o combustível, gerando diminuição no consumo de petróleo. Pode-se afirmar, também, que carros com o maior número de partes plásticas poderão facilitar a reciclagem do produto quando o mesmo alcançar o final da sua vida útil. Existe tendência concreta ao crescimento do uso do plástico na indústria de automóvel, em função não só do avanço tecnológico na produção de resinas termoplásticas, mas também pela preocupação cada vez maior das montadoras na redução do peso dos veículos. Dessa forma, pode-se aumentar a capacidade de carga e ainda atender às exigências da norma *International Organization for Standardization* (ISO) 14000 de proteção ao meio ambiente, que exige das fábricas mais peças recicláveis.

A indústria automotiva começou a usar compósitos com fibras vegetais por razões técnicas e comerciais. As fibras vegetais aparecem como uma valiosa alternativa aos materiais sintéticos e sua utilização tem crescido significativamente nos últimos anos. As fibras vegetais apresentam potencial de redução do peso do veículo em até 40% quando comparado com as fibras de vidro, que estão presentes na maioria dos compósitos da indústria automotiva. A indústria automotiva alemã tem aumentado o seu uso de 4.000 toneladas em

1996 para 15.500 toneladas em 1999, enquanto que o resto da Europa teve seu consumo aumentado de 300 toneladas para 6.900 toneladas no mesmo período (SUDELL *et al.*, 2002).

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

Desenvolver e caracterizar os compósitos de polipropileno com fibra de vidro e fibra de coco com carga de 20 e 30% de material, verificando as correlações existentes nas mudanças das propriedades físicas e mecânicas com a alteração de carga em cada compósito.

1.1.2 *Objetivos específicos*

- a) Fabricar corpos de prova com diferentes cargas de fibra e comparar os resultados dos compósitos por meio dos testes de:
 - Tração
 - Impacto Izod
 - Flexão
 - Densidade
 - Análise por microscopia eletrônica de varredura
 - Análise termogravimétrica
 - Análise de deflexão térmica
 - Teste de fluidez.
- b) Analisar estatisticamente os resultados para excluir erros sistemáticos e eventuais erros de resultados obtidos. Análise realizada pela metodologia Análise de Variância (ANOVA).
- c) Comparar a adesão das fibras de coco e das fibras de vidro na matriz polimérica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desenvolvimento dos compósitos

A arqueologia tem seus primeiros registros de artefatos elaborados com resinas vegetais (âmbar) evidenciados em cavernas da Inglaterra, peças que remontam à Era 11.000 a.C. a 9.000 a.C., período pertencente à Idade da Pedra Antiga. Sua origem suposta é a de terem sido trazidos de regiões bálticas (LANGENHEIN, 2003).

Usos posteriores já mais refinados de materiais resinosos extraídos e/ou refinados para carimbar, colar documentos e vedar vasilhames na Antiguidade pelos egípcios e romanos, também a.C., são registrados na história da humanidade (CANEVAROLO Jr., 2002).

Ressalta-se também a influência das pesquisas em materiais militares, desde os séculos remotos até a atualidade, que vêm contribuindo para inúmeros avanços na engenharia de materiais, em virtude dos seus naturais interesses em dominar tecnologias de ponta, com vantagem sobre inimigos. Assim, remeter aos primórdios dos compósitos subentende, por analogia, o emprego até de materiais como a madeira, apesar da classificação como compósito à época ainda inexistir.

Na história recente, em 1912 Leo Baekeland produziu o primeiro polímero sintético pela reação entre fenol e formaldeído, que deu origem à resina fenólica, hoje conhecida como “baquelite”, termo derivado de seu inventor (CANEVAROLO Jr., 2002). Segundo Oréfice (2001), a cronologia do desenvolvimento da síntese das macromoléculas tem a seguinte seqüência;

- a) 1885 Cadeias de polímeros naturais
- b) 1885 Desenvolvimento do nitrato de celulose
- c) 1910 Desenvolvimento da baquelite: fenol – formaldeído
- d) 1920 Herman Staudinger – hipótese macromolecular
- e) 1929 *Polyvinyl Chloride* (PVC) (Goodrich)
- f) 1930 *Polystyrene* (PS) – (Dow)
- g) 1936 *Polymethylmethacrylate* (PMMA) *Rohm and Haas*
- h) 1936 *Nylon* – *Dupont*
- i) 1939 *Polyethylene* (PE)

- j) 1943 *Polydimethylsiloxane* (PDMS)
- k) 1954 *Polyethylene Terephthalate* (PET)
- l) 1970 Plásticos de engenharia.

Ainda segundo Oréfice (2013), antes de 1920 os polímeros eram considerados tipos especiais de colóides. Apenas em 1920 Staudinger propôs a estrutura baseada em longas cadeias. Em seguida, Herman Mark visualizou a disposição de meros em células unitárias.

Chegou então a 2ª Guerra Mundial, que impulsionou ainda mais esses estudos. Um dos desenvolvimentos citável é o da borracha sintética butadieno estireno (SBR), pela Alemanha, dada a interrupção de fornecimento de borracha natural pelas suas fronteiras (CANEVAROLO Jr., 2002).

Segundo Andrade (2008), naquela época surgiram os primeiros plásticos reforçados com fibra de vidro (PRFV) e tem-se a referência do primeiro emprego desse material em substituição a peças de alumínio do avião britânico *Spitfire*, usado nas batalhas com o eixo.

Os polímeros estão sendo usados em um grande número de aplicações, designados como de uso geral, de engenharia e de uso espacial. Em muitas dessas aplicações os polímeros, puros ou formulados com inúmeras possibilidades de modificações, estão cada vez mais substituindo outras classes de materiais que eram antes tradicionalmente usados. Essa substituição é baseada no conjunto de propriedades e características apresentadas pelos polímeros.

A resistência ao impacto é uma das propriedades mais requisitadas para a especificação do comportamento mecânico de polímeros, principalmente plásticos. A habilidade de um material polimérico em suportar choques acidentais pode decidir sobre o sucesso ou o fracasso do seu uso em uma determinada aplicação (CANEVAROLO JR., 2007, p. 45).

Assim, com o avanço das pesquisas em polímeros, tanto resinas quanto reforços sintéticos passaram a ser desenvolvidos de modo mais significativo, deixando em segundo plano as pesquisas em resinas e fibras naturais. Materiais compostos de plásticos reforçados com fibras, inicialmente voltados para o emprego na indústria aeroespacial e militar, diversificaram-se a ponto de se

tornarem comuns como artigos consumíveis de nosso cotidiano (MENDONÇA, 2005).

É importante que um produto polimérico apresente desempenho mecânico satisfatório durante a vida útil projetada. O comportamento mecânico desses materiais é caracterizado pela resposta que estes apresentam quando submetidos a tensões ou deformações, o que depende muito das cargas usadas como reforço.

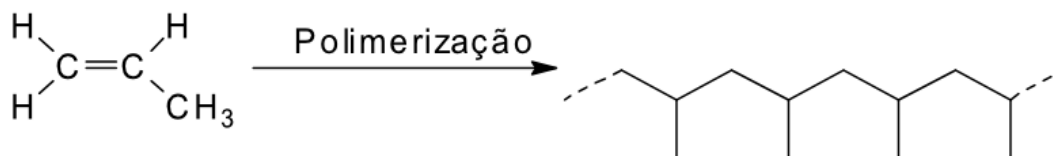
As principais cargas para plásticos são: carbonato de cálcio (precipitado ou natural), talco, alumina tri-hidratada, caulim, sílica, mica e as diversas fibras, que são cargas para reforço. O reforço é adicionado ao polímero com o intuito de melhorar o seu desempenho em relação à resistência mecânica⁴, resistência à temperatura e atender pressões ambientais crescentes(CANEVAROLO, 2006).

2.2 Polipropileno

A palavra polímero origina-se do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição). Desta forma, um polímero é uma macromolécula composta de muitas (dezenas de milhares) unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. Dependendo do tipo do monômero (que se refere a uma pequena molécula a partir da qual o polímero será sintetizado), do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, os polímeros podem ser: plásticos, borrachas e fibras (CANEVAROLO, 2006). Os polipropilenos são polímeros derivados de uma reação de adição em que durante a sua formação (reação dos monômeros) não há perda de massa na forma de compostos de baixo peso molecular. O polipropileno é um termoplástico poliolefínico, obtido da polimerização catalítica de propeno, a partir de catálise estereoespecífica Ziegler-Natta. Um átomo de carbono assimétrico ou quiral é aquele que está ligado a quatro grupos diferentes. Quando se parte de um monômero vinílico como o propeno (FIG. 3), na reação de polimerização cada nova adição de monômero resulta na adição de um novo centro assimétrico à macromolécula em crescimento.

⁴ O aumento da resistência mecânica refere-se ao aumento da tensão de ruptura no ensaio de tração e ao aumento de energia no ensaio de impacto Izod.

Figura 3 - Propeno e reação de polimerização



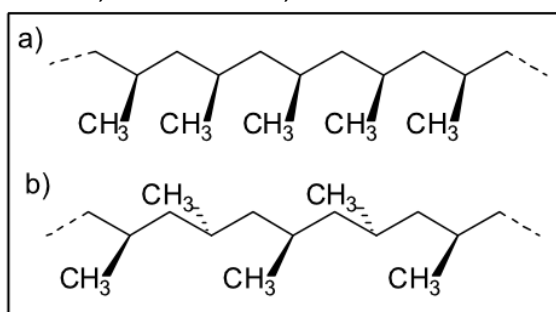
Fonte: Albuquerque (2010).

A ordenação desses carbonos assimétricos na cadeia é denominada pela palavra taticidade, criada por Natta (1955). A FIG. 4(a) mostra a cadeia isotática, quando todos os carbonos assimétricos apresentam a mesma configuração. Na FIG. 4(b) está a cadeia sindiotática, quando os carbonos assimétricos apresentam configurações alternadas. Se as configurações do carbono assimétrico se distribuem aleatoriamente ao longo do polímero, diz-se que o polímero é atático.

Se entender a cadeia de um polímero sobre um plano que contenha os carbonos da cadeia principal e representar acima e abaixo desse plano grupos ligados à cadeia, verifica-se: nos polímeros isotáticos todos os substituintes se encontram do mesmo lado do plano da cadeia principal; nos polímeros sindiotáticos os substituintes estão alternadamente acima e abaixo desse plano; e nos atáticos não há regularidade de disposição (LIEBERMAN; BARBE, 1998).

Figura 4 - Configurações estereoespecíficas do polipropileno

a) Isotática, b) sindiotática



Fonte: Albuquerque (2010).

Esse tipo de configuração das cadeias do polipropileno afeta fortemente suas propriedades mecânicas, sendo que a estrutura que apresenta melhores propriedades mecânicas é a isotática. Porém, as reações de polimerização não permitem a obtenção de cadeias 100% isotáticas, e sim frações na ordem de 90 a

99%. O polipropileno atático é o que apresenta propriedades mecânicas impróprias, com aspecto de cera, sendo tolerado até no máximo 10% em peso dessa estrutura em uma grade comercial de polipropileno (LIEBERMAN; BARBE, 1998).

O polipropileno é um polímero incolor, inodoro, atóxico e com densidade de aproximadamente 0,9 g/cm³, caracterizando-se por ser um dos polímeros mais leves. Por apresentar uma estrutura apolar, é praticamente inerte quimicamente, sendo apenas suscetível à dissolução por solventes apolares. A cadeia apolar do polímero prejudica operações tais como pintura, impressão e interação com substâncias polares (BERGER *et al.*, 1999).

As propriedades mecânicas são excelentes quando comparadas com as de outros polímeros similares (QUADRO 2). São encontradas comercialmente diversas grades de polipropileno, com propriedades mecânicas variáveis por causa de diferenças estruturais, como, por exemplo, peso molecular e grau de isotaticidade. Além disso, as novas tecnologias de copolimerização permitem obter mais versatilidade nas propriedades mecânicas pela incorporação de outros monômeros, tornando-o menos rígido e mais resistente ao impacto. Os copolímeros mais utilizados comercialmente são de propileno-etileno (EPR).

Quadro 2 - Propriedades mecânicas de polímeros termoplásticos

	PP	NYLON	PVC	ABS	PEAD	PS
Resistência ao impacto (J / 12,7 mm ²)	0.3 - 4.3	0.7 - 2.5	0.7 - 2.0	2.0 - 8.1	1.0 - 8.0	0.1 - 2.0
Resistência a tensão (MPa)	29 - 38	48 - 84	60	17 - 62	21 - 38	17 - 84
Resistência a flexão (MPa)	34 - 55	55 - 110	93	24 - 93	14 - 20	27 - 117
Elongação sob tensão (%)	50 - 600	60 - 350	07 - 40	10 - 140	50 - 800	1.0 - 60
Módulo de Elasticidade (GPa)	0.9-1.4	1.0 - 2.8	2.4 - 4.1	0.7 - 3.0	5.5 - 10.4	1.7- 4.1

Fonte: Lieberman (1998).

A viscosidade e elasticidade do polímero fundido são influenciadas pelas cadeias mais longas, diminuem significativamente quando ocorre o aumento da cadeia polimérica, o que diminui o efeito de inchamento do extrudado e confere melhor precisão dimensional a peças injetadas.

No Brasil, o PP normalmente comercializado é o isotático, que é preparado a partir do monômero propileno em reação de poliadição com catalisador de Ziegler-Natta, que são catalisadores formados por metais de transição e os mais comuns são os $TiCl_3$ e foi a partir deles que puderam produzir PP sindiotático ou isotático, pois é ele que regula a entrada do grupo metila na cadeia polimérica (COUTINHO; COSTA, 1991).

2.3 Fundamentos de reforço mecânico de termoplásticos

Com a crise do petróleo nos anos 60 e 70 os materiais poliméricos, que tiveram pouco tempo antes grande desenvolvimento científico, atingiram preços exorbitantes. Para reduzir um pouco os custos de fabricação, os transformadores (fabricantes de peças) adotaram um procedimento antigo como meio de viabilização econômica: o uso de cargas minerais de baixo custo como aditivos em plásticos e borrachas com fins não reforçantes. Essa necessidade despertou mais interesse pelo uso técnico de cargas, levando a grandes desenvolvimentos nessa área, de modo que hoje as cargas constituem no aditivo mais empregado (em termos percentuais de consumo) nos plásticos. A idéia não fundamentada de que o componente de carga apenas atua como componente de preenchimento é incorreta, visto que com maior ou menor grau ocorrem alterações nas propriedades mecânicas dos materiais quando adicionadas em cargas e concentrações apropriadas (RABELLO, 2011).

Os termoplásticos reforçados com FV são normalmente fornecidos “prontos para montagem”. Os produtos moldados podem conter um mínimo de 5% e até 60% de fibra em peso. A maioria desses compostos contém fibra na faixa de 20 a 40%, a fim de atingir melhor relação custo-desempenho (ALBUQUERQUE, 2010).

Praticamente todos os termoplásticos podem ser encontrados na forma de compostos reforçados com fibras de vidro. Os mais comumente usados são o *nylon*, o polipropileno, o poliestireno e as resinas acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e estireno-acrilonitrila (SAN), provavelmente em função do fato de que a

maior experiência acumulada com plásticos reforçados se dá com esse tipo de material (ALBUQUERQUE, 2010).

Os principais fatores materiais das fibras de reforço e cargas minerais que determinam as propriedades mecânicas de termoplásticos reforçados são: a) fibra ou carga mineral de reforço; b) matriz polimérica; c) interface polímero-reforço.

Cada um desses itens deve apresentar características apropriadas tanto individual quanto coletivamente, no sentido de maximizar a eficiência do reforço das propriedades desejadas (CASTELLANOS, 2001; CHAWLA, 1987).

A matriz polimérica é, usualmente, componente de baixa rigidez e resistência, porém possui razoável tenacidade, baixa densidade e coeficiente de expansão térmica superior ao do componente de reforço que possui alto módulo e resistência, porém normalmente é frágil. A fibra ou o reforço mineral deve suportar a maior parte da carga mecânica e é função da matriz polimérica transmitir e distribuir as tensões para o reforço. Esse é o princípio básico que determina a eficiência do reforço polimérico, desde que a adesão seja mantida integralmente (CASTELLANOS, 2001; CHAWLA, 1987).

A interface polímero-reforço é o fator crítico que determina até que ponto as propriedades mecânicas em potencial do compósito serão atingidas e mantidas durante o seu uso em serviço. A interface deve apresentar características físicas e químicas adequadas para promover eficiente transferência de tensão matriz para o agente de reforço (CASTELLANOS, 2001; CHAWLA, 1987).

Segundo (CASTELLANOS, 2001; CHAWLA, 1987) pode-se então inferir que as propriedades finais do compósito polimérico dependerão de:

- a) Propriedades características individuais de seus componentes;
- b) Concentração relativa de componentes;
- c) Natureza da interface e da região de interface polímero/reforço;
- d) Eficiência do processo de composição/compostagem.

2.4 Termoplásticos

Os termoplásticos são polímeros que, sob efeito da temperatura, amolecem e fluem, retirada a temperatura se solidificam, repetidas vezes. São solúveis e

possuem cadeia linear ou ramificada. A combinação de baixa densidade química, resistência química, custo baixo e um balanço entre rigidez e tenacidade permite que termoplásticos ocupem o espaço de outros materiais em muitas aplicações importantes (ELMAJDOUBI; VU-KHANH, 2003).

Termoplásticos consistem em longas moléculas com comprimento da ordem de 20 a 30 nm (DAVIS; TROXELL; HAUCK, 1982) e fluem facilmente sob alta tensão sem elevadas temperaturas, permitindo, assim, serem fabricados na forma solicitada e mantendo a forma quando resfriado à temperatura ambiente. Esses polímeros podem ser repetidamente aquecidos, fabricados e resfriados e, conseqüentemente, ser reciclados. Os termoplásticos bem conhecidos são acrílico, *nylon* (poliamida), polietileno, poli(éter-éter cetona) e poliestireno (MATTHEWS; RAWLINGS, 1994) e polipropileno. Os termoplásticos são moldáveis a quente e possuem baixa densidade, boa aparência, são isolantes térmicos e elétricos, são resistentes ao impacto e possuem baixo custo, portanto, apresentam larga faixa de aplicações.

Normalmente, o polímero é processado em temperaturas altas quando apresenta o comportamento de um fluido viscoso, sendo utilizado em aplicações práticas com característica flexível ou rígida. Tal variabilidade de comportamento é uma característica sabiamente usada na indústria para a seleção do melhor material para determinada aplicação (CANEVAROLO, 2006).

Os polímeros apresentam, de modo geral, três temperaturas de transição importantes: transição vítrea, fusão cristalina e cristalização.

Temperatura de transição vítrea é o valor médio da faixa de temperatura que durante o aquecimento de material polimérico de uma temperatura muito baixa para valores mais altos permite que as cadeias poliméricas da fase amorfa adquiram mobilidade, ou seja, adquiram possibilidade de mudança de conformação. Abaixo da T_g o polímero não tem energia interna suficiente para permitir o deslocamento de cadeia em relação a outras por mudanças conformacionais (CANEVAROLO, 2006).

A temperatura de fusão cristalina (T_m) é o valor médio da faixa de temperatura em que, durante o aquecimento, desaparecem as regiões cristalinas com a fusão dos cristalitos. Nesse ponto, a energia do sistema atinge o nível necessário para vencer as forças intermoleculares secundárias entre as cadeias da fase cristalina, destruindo a estrutura regular de empacotamento, mudando do

estado de borracha para o estado viscoso (fundido). Essa transição só ocorre na fase cristalina, portanto, só tem sentido se aplicada para polímeros semicristalinos. Trata-se de uma mudança termodinâmica de primeira ordem, afetando variáveis tais como volume específico e entalpia (CANEVAROLO, 2006).

Para se determinar experimentalmente essas duas temperaturas de transições, é conveniente acompanhar a variação do volume específico, pois este é uma propriedade que mede o volume total ocupado pelas cadeias poliméricas. Um aumento da temperatura ocasionará aumento do volume devido à expansão térmica. Esse aumento é esperado ser linear com a temperatura, a não ser que ocorra modificação na mobilidade do sistema, o que implicaria um mecanismo de expansão diferente. Para simplificar a análise, divide-se o polímero em apenas dois grandes grupos: amorfos e semicristalinos (CANEVAROLO, 2006).

A temperatura de cristalização (T_c) é uma temperatura na qual ocorre uma ordenação espacial que permite a formação de uma estrutura cristalina (cristalito ou lamela) naquele ponto. Essa temperatura é obtida a partir do resfriamento de um polímero semicristalino, por meio de seu estado fundido, isto é, de uma temperatura acima da T_m ele atingirá uma temperatura baixa o suficiente para que, em dado ponto dentro da massa polimérica fundida, expressivo número de cadeias poliméricas se organize espacialmente de forma regular. Cadeias em outros pontos também estarão aptas para se ordenarem formando novos cristais. Isso se reflete em toda a massa polimérica, produzindo-se a cristalização da massa fundida (CANEVAROLO, 2006).

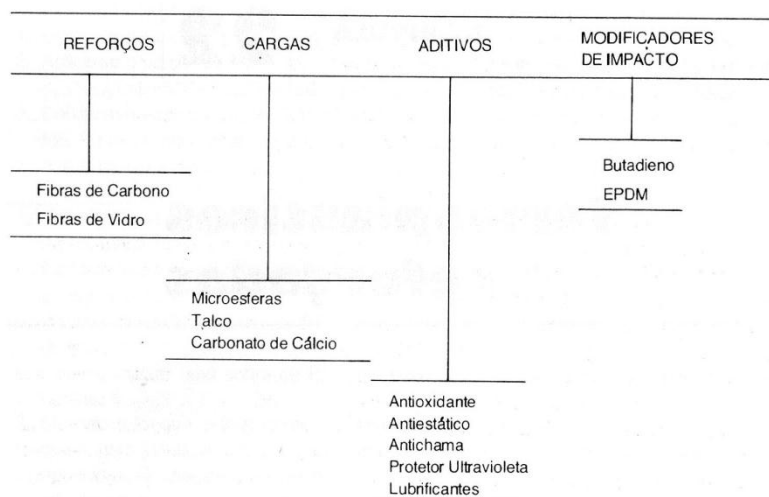
2.5 Fibras

A utilização de fibras na composição dos polímeros produz compósitos com características especiais para uso na engenharia. As fibras de vidro tornam os polímeros mecanicamente mais resistentes, fazendo com que esse tipo de material seja usado cada vez mais na confecção de peças. Compósitos de polímeros reforçados com fibras curtas são muito atrativos, devido à sua facilidade de fabricação, economia e propriedades mecânicas superiores. Processos de injeção e extrusão são frequentemente usados para fabricação desses compósitos (FU *et al.*, 2000). Desta forma, houve necessidade de aumentar o entendimento sobre as influências dos parâmetros que controlam as

relações entre propriedades e estrutura desses compósitos carregados com fibras (THOMASON, 2002).

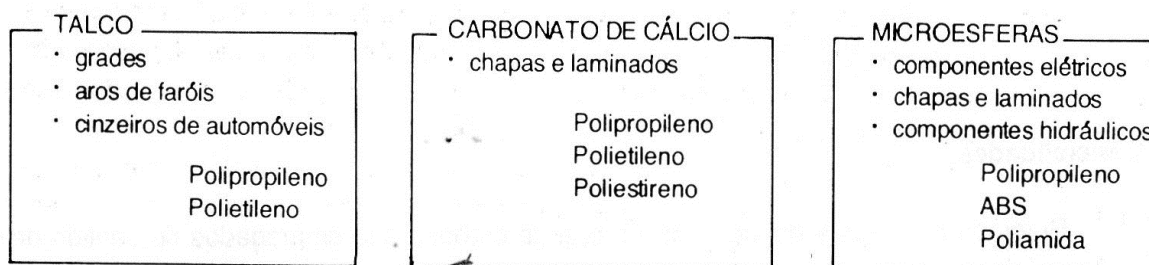
Os agentes modificadores não têm limites bem definidos para a classificação, uma vez que alguns podem agir com duas ou mais funções diferentes. A classificação a seguir é usual e baseia-se na principal função que exerce os termoplásticos (ALBUQUERQUE, 2010). A FIG. 5 exhibe os agentes modificadores de acordo com a função que eles desempenham quando adicionados a um polímero e a FIG. 6 exemplifica a utilização desses compósitos.

Figura 5 - Agentes modificadores



Fonte: Albuquerque (2010).

Figura 6 - Exemplos de aplicações de termoplásticos carregados



Fonte: Albuquerque (2010).

As principais razões para modificações de polímeros com cargas são:

- Aumentar a resistência ao calor;

- b) reduzir custo;
- c) aumentar a rigidez;
- d) reduzir a contração;
- e) alterar as propriedades elétricas;
- f) reduzir a flamabilidade;
- g) modificar o peso específico;
- h) aumentar a resistência à compressão;
- i) proporcionar mais capacidade de lubrificação;
- j) aumentar a resistência ao impacto
- k) proporcionar mais estabilidade dimensional;

As principais variáveis materiais da fibra que irão afetar significativamente as propriedades mecânicas de polímeros reforçados são:

- a) Tipo de fibra;
- b) comprimento médio das fibras;
- c) orientação da fibra e anisotropia;
- d) interface fibra-polímero;
- e) dispersão das fibras.

Nos compósitos com fibras contínuas, as tensões aplicadas são preferencialmente suportadas pelas fibras, enquanto a matriz atua como agente de união destas e transferidor de tensões. Por outro lado, embora não sendo capazes de produzir níveis de reforço similares aos de fibras contínuas, compósitos de fibras descontínuas possuem grande versatilidade de processamento (podem ser processados via injeção e extrusão) e oferecem a possibilidade de produção de materiais com propriedades isotrópicas (ALBUQUERQUE, 2010).

Segundo Albuquerque, 2010, Em geral, as fibras são usadas como agente de reforço, por possuírem resistências mecânicas elevadas; e como agente sustentador de tensões que dissipam energia à frente das trincas, conferindo elevadas propriedades mecânicas aos compósitos. As fibras usualmente utilizadas em compósitos apresentam diâmetros entre 10 e 100 μm .

2.5.1 Fibras sintéticas

Muitas fibras sintéticas foram desenvolvidas para substituir as fibras naturais, pois as primeiras têm comportamento mais previsível e são geralmente mais uniformes no tamanho, além de custarem menos que as equivalentes. As mais comuns são o *nylon 6*, *nylon 66*, os poliésteres saturados, o polipropileno, as elastoméricas e as acrílicas .

Algumas fibras sintéticas ocupam papel como fibras de reforço. As principais utilizadas são:

- a) Fibras de vidro: melhoram as propriedades mecânicas de uma resina tanto a curto como em longo prazo. Elas melhoram a resistência ao escoamento, a condutividade térmica e a temperatura de deflexão pelo calor, além das propriedades imanentes das resinas-base. O grau de melhoria das propriedades está diretamente relacionado à eficiência do sistema de dimensionamento, que liga a resina às fibras. As esferas de vidro e as fibras de dimensões não uniformes, por outro lado, aumentam os desgastes nas superfícies e o coeficiente de atrito (ALBUQUERQUE, 2010). As mais importantes substâncias que podem obter o estado vítreo são sílica (SiO_2) e os silicatos, óxido bórico (B_2O_3) e os boratos, pentóxido de fósforo (P_2O_5) e os fosfatos (CHRÉTIEN, 1986). A produção de FV envolve fusão dos reagentes (fonte de borato-Borax, sílica volatilizada, caulim, dolomita, soda em pó) que, em geral, estão na forma de óxidos e carbonatos. Essa fusão ocorre entre 1.200 e 1.400°C. Após a fusão é realizado o puxamento por meio de espineretes (orifícios com pequeno diâmetro) e posterior bobinamento e/ou corte (fibras), dependendo da aplicação no mercado.
- b) Fibras de aramida: é uma fibra sintética, encontrada sob diversas formas e com diferentes seções transversais. Sua designação decorre da junção do termo poliamida aromática (*aromatic polyamid*), que expressa sua composição química. De acordo com a *U.S. Federal Trade Commission*, a palavra aramida é utilizada como um termo genérico para designar um conjunto de fibras manufaturadas formadas por longas cadeias sintéticas

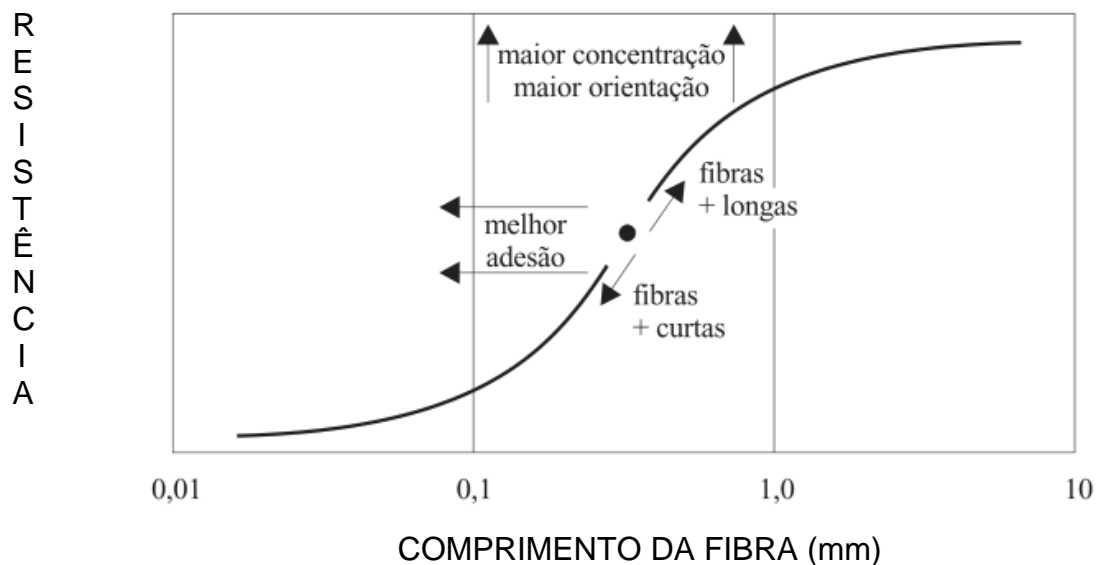
de poliamidas, na qual pelo menos 85% das ligações de amidas são formadas pela união direta de dois anéis aromáticos (YANG, 1993). Essa característica as diferencia das poliamidas convencionais como o *nylon*.

c) Fibras de boro: sua fabricação é feita pela decomposição em fase de vapor do boro sobre um filamento de tungstênio à temperatura de 1.500 K e seus compósitos custam mais que os de fibra de carbono, porém apresentam propriedades mecânicas superiores (DAVIAUD; FILLIATRE, 1983);

d) Fibras carbônicas: quando adicionadas as resinas termoplásticas, oferecem os mais elevados valores comerciais disponíveis no que se refere a resistências, módulos, temperaturas de deflexão ao calor, escoamento e duração pro fadiga. A melhora dessas propriedades, aliada a acentuado aumento na condutividade térmica e baixo coeficiente de atrito, faz das fibras de carbono o reforço ideal para desgastes e aplicações com atritos, as quais toleram custos bastante elevados (ALBUQUERQUE, 2010).

A FIG. 7 (NAGEM, 2001) mostra a influência dos parâmetros geométricos na eficiência de reforço termoplástico. Observa-se que a resistência do compósito desloca-se ao longo da curva sigmoidal para valores maiores ou menores em função do comprimento da fibra. Entretanto, o aumento na concentração e grau de orientação da fibra desloca a curva verticalmente para cima. A curva em “S” é também deslocada horizontalmente à esquerda para comprimentos menores de fibra com aumento da adesão interfacial fibra-polímero.

Figura 7 - Influência dos parâmetros/ eficiência do reforço



Fonte: Nagem (2001).

2.5.2 Fibras de vidro

As fibras de vidro são habitualmente constituídas em duas composições diferentes, cujos componentes principais são mostrados no QUADRO 3:

QUADRO 3 - Composição química típica de fibras de vidro comerciais

Tipo "E"	Tipo "S"
SiO ₂ - 54,5%	SiO ₂ - 64,0%
Al ₂ O ₃ - 14,5%	Al ₂ O ₃ - 26,0%
CaO - 17,0%	MgO - 10,0%
B ₂ O ₃ - 8,5%	-

SiO₂: sílica; Al₂O₃: óxido de alumínio; CaO: óxido de cálcio; B₂O₃: óxido bórico; MgO: óxido de magnésio.

Fonte: NAGEM, 2001

Nota-se que as fibras de vidro são silicatos com conteúdo de agentes modificadores que são usados visando à redução das temperaturas necessárias para atingir viscosidades altas o suficiente para produzir fibras. As fibras tipo "S" são mais resistentes ao contato com a água, por possuírem maiores conteúdos de sílica e alumina, mas possuem custos mais elevados, (NAGEM,2001).

Fibras de vidro geralmente possuem 5-20 μ de diâmetro e suas superfícies não são livres de falhas. Quando compostos são processados, as fibras se tornam mais curtas, especialmente no caso de moldagem por injeção na qual uma grande tensão é aplicada para fundir (DE; WHITE, 1996).

Com a finalidade de atingir um nível de tensão máxima na fibra, o comprimento da fibra de vidro deve ser maior ou igual ao valor crítico conhecido como comprimento crítico da fibra (L_c).

O comprimento crítico da fibra de vidro pode ser calculado a partir da equação (1) (THOMASON, 2002)

$$L_c = \frac{S_F \times D}{2xt} \quad (1)$$

sendo:

S_F = resistência da fibra

D = diâmetro da fibra

t = a resistência interfacial (THOMASON, 2002).

Quando o comprimento da fibra for menor, igual ou maior que o comprimento crítico, podem ocorrer as situações descritas a seguir (THOMASON, 2002):

- (1) Se $L < L_c$: a tensão nunca atinge um valor suficiente para quebrar a fibra; e outros mecanismos como a ruptura da matriz e o arrancamento da fibra (*pull-out*) irão ocorrer.
- (2) Se $L = L_c$: neste caso o pico de tensão pode atingir a tensão de fratura da fibra no centro desta.
- (3) Se $L > L_c$: o pico de tensão é aplicado na parte central da fibra, podendo ocorrer fratura da mesma.

Tancrez, Rietsch e Pabiot (1994) avaliaram o comportamento da resistência ao impacto CHARPY em compósitos de polipropileno carregados com fibras de vidro em função do comprimento de fibras e comentaram que a energia de ruptura máxima ocorre próximo do comprimento crítico da fibra de vidro. Esse comprimento crítico depende da qualidade da interface do compósito de

polipropileno com fibras de vidro (TANCREZ; RIETSCH; PABIOT, 1994).

Thomason (2002) também investigou o comportamento da resistência ao impacto CHARPY para compósitos de polipropileno com fibras de vidro e encontrou valor de resistência máxima ao impacto no comprimento crítico da fibra em 2,6 mm.

Entre as desvantagens das fibras de vidro, podem-se citar baixo módulo de elasticidade (quando comparado com outras fibras), elevada sensibilidade a defeitos de manuseio, maior densidade (quando comparado com a de outras fibras), entre outras. E, quando em contato com ambiente aquoso, apresentam degradação superficial, representada pela lixiviação de seus componentes móveis (cálcio, magnésio, alumínio, etc.) (THOMASON, 2002).

As fibras para isolamento acústico e térmico são usadas em residências, comércio e indústrias. As fibras de reforço são usadas nas indústrias de transporte (automotiva, marinha, aeroespacial e ferroviária), eletrônica (placas de circuito, *surrounds* para equipamentos de audiovisual), lâminas dos moinhos de vento e em substituição ao aço em reforços de concretos (FREEDONIA, 2002).

Características e propriedades das fibras de vidro curtas (THOMASON, 2002):

- a) Diâmetro médio: 12 a 15 μm ;
- b) área superficial específica: $0,16 m^2 / g$;
- c) comprimento: de 4 mm (picadas) e de 0,3 mm (moídas);
- d) ponto de fusão: > 1700° C;
- e) umidade: máx. 0,1%;
- f) perda ao fogo: máx. 0,1%;
- g) densidade específica: 2,65 g/cm³;
- h) cor: branco translúcido.

2.5.3 Fibras de coco

As fibras naturais dividem-se em: de origem animal; de origem vegetal e de origem mineral. Destaque especial tem-se dado à utilização de fibras naturais de origem vegetal. No Brasil, existe grande variedade de fibras vegetais,

apresentando diferentes propriedades químicas, físicas e mecânicas. Entre essas fibras podem-se citar (MARINELLI, 2008; NECHWATAL; MIECK; REUBMANN, 2003): fibras nativas brasileiras - sisal, coco, juta, rami, coral, fibra de bagaço de cana-de-açúcar e soja.

A fibra de coco é tipicamente usada em mantas e até lonas de freio de automóveis. Pode ainda ser usada na confecção de diversos produtos de utilidade para a agricultura, indústria e construção civil, em substituição a outras fibras naturais e sintéticas. A Bahia é o maior produtor nacional de coco e responsável por 34% da produção do país (brazilianfibres).

Segundo Silva (2003), Salazar e Leão (2006) e Oliveira et al. (2008), as vantagens citáveis das fibras vegetais em relação às fibras sintéticas são:

- a) Possibilidade de abundância (dependência de demanda e gestão ambiental);
- b) baixa abrasão a equipamentos e moldes;
- c) possibilidade de baixo custo (havendo modernização de processos);
- d) baixa densidade (propriedades inerente às fibras vegetais);
- e) relativa facilidade de obtenção e manuseio;
- f) não toxidez.

E as desvantagens são:

- a) Facilidade de absorção de umidade, o que favorece sua degradação, mas em algumas aplicações é condição desejada;
- b) baixa resistência a micro-organismos (o que acelera a sua degradação);
- c) baixa estabilidade térmica (são sensíveis a elevações de temperatura);
- d) produção da fibra de coco - as máquinas que produzem a fibra de coco ainda são construídas empiricamente;
- e) custo elevado da logística de captação do coco verde.

A fibra de coco, também chamada *coir* (coco em inglês), é uma massa fibrosa castanho-avermelhada contida entre a casca externa do coco e o invólucro externo do núcleo. O coqueiro, palma de coco ou *coconut palm* é talvez a árvore mais conhecida dos trópicos e uma das mais importantes economicamente. O

coqueiro cresce nas costas arenosas ao longo dos trópicos e na maioria das regiões subtropicais. Ele é uma palma alta e reta, usualmente de 10 a 20 m de altura, sendo o seu fruto utilizado como fonte de alimentação e bebida, óleo, fibra, combustível, madeira e outros. O coco é cultivado e utilizado na Índia e na Ásia Continental há pelo menos 3.000 anos e chegou ao Brasil pela colonização portuguesa (PINO, 2005).

A FIG. 8 exhibe o cultivo de coco no Brasil, que é realizado principalmente nas cidades litorâneas. O coqueiro foi introduzido no Brasil em meados de 1950 pelo estado da Bahia, por isso da denominação coco-da-baía, com material proveniente da Ilha de Cabo Verde. É provável que tenha origem na Índia ou Sri-Lanka, originado de Moçambique. Passados alguns anos, novas introduções de coqueiro foram realizadas de países como Malásia, Costa do Marfim, entre outros (ARAGÃO; RIBEIRO MELO, 2010).

Figura 8 - Coqueiros da variedade gigante



Fonte: Humberto Rollemberg Fontes.

No Brasil, os coqueiros mais comuns são encontrados em duas variedades: a gigante e a anã. Os frutos obtidos, tanto numa variedade como na outra, têm as mesmas características e utilidades. No primeiro caso, como o coqueiro é uma planta de grande longevidade, podendo viver além dos 150 anos, chega a atingir 35 metros de altura. Isso dificulta bastante a coleta dos frutos, tornando-a uma atividade arriscada e que exige do apanhador grande destreza, prática e coragem. Dos seis aos nove anos de idade o coqueiro inicia a produção de frutos, que se estabiliza quando chega aos 12 anos, alcançando média de 70 cocos por pé ao ano. Essa é a variedade mais comum em todo o Nordeste brasileiro, região responsável por aproximadamente 85% da produção nacional e

mais de 90% da área plantada, ocupando principalmente os estados de Alagoas, Sergipe e Bahia (SILVESTRE; SILVA, 1996).

O coqueiro anão introduzido no Brasil em 1925, vindo da Malásia, não alcança mais do que 10 metros de altura, o que facilita bastante a coleta dos frutos. É mais precoce do que a variedade gigante, iniciando sua frutificação no segundo ano após o plantio, também apresentando maior produtividade, cerca de 200 frutos por pé ao ano. Em compensação, vive apenas 20 anos, ou seja, bem menos tempo do que o centenário coqueiro comum (SILVESTRE; SILVA, 1996).

2.6 Propriedades dos termoplásticos de engenharia

As propriedades mecânicas dos materiais são avaliadas pela resposta que estes apresentam, quando submetidos a solicitações. No caso dos plásticos, divergindo do comportamento mecânico no regime elástico de outros materiais tradicionais como os metais e as cerâmicas, as tensões e deformações não se relacionam por meio de simples constante de proporcionalidade ou constante elástica conhecida como módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade depende da temperatura, do tempo, do nível de solicitação mecânica aplicada (isto é, do nível de tensão ou deformação atuando no material) e, também, indiretamente da estrutura e condições de preparação/fabricação do plástico e alterações dessa estrutura em função das interações do plástico com agentes ambientais (exemplo: umidade gases e líquidos agressivos) (MORTON-JONES; ELLIS, 1986).

Comparados aos metais e às cerâmicas, os polímeros têm resistência mecânica bem inferior. Isso ocorre principalmente devido às diferenças na estrutura e nas ligações atômicas e moleculares desses materiais. Polímeros possuem ligações primárias covalentes entre os átomos da cadeia principal e ligações secundárias fracas com baixa energia de ligação entre as cadeias poliméricas, tais como forças de Van Der Waals, interações entre dipolos, ligações de hidrogênio. De forma diferente, nos metais e cerâmicas os átomos e moléculas estão completamente unidos por ligações primárias fortes, tais como ligações metálicas e ligações iônicas e covalente para as cerâmicas. Essa diferença na estrutura dos polímeros na comparação com os metais e as cerâmicas, em termos de energia de ligação, é a maior responsável pelo comportamento

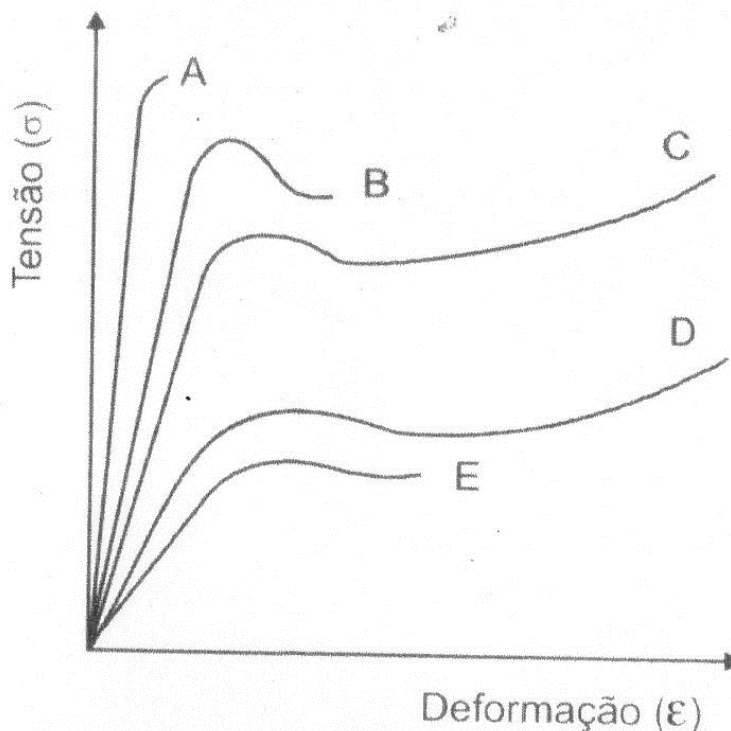
mecânico inferior dos polímeros quando relacionados a outros materiais (CANEVAROLO JR., 2007).

A estrutura molecular do polímero é responsável pelo seu comportamento mecânico. De acordo com esse comportamento, o material pode ser classificado em termos de rigidez, fragilidade e tenacidade. O aspecto de um diagrama tensão *versus* deformação serve como base para tal classificação. Na FIG. 9 são ilustrados, por meio da curva tensão *versus* deformação sob tração, comportamentos típicos de alguns materiais poliméricos, de acordo com a classificação a seguir (CANEVAROLO JR., 2007).

Os cinco comportamentos típicos de polímeros em ensaio de tração são:

- A. Polímeros com elevado módulo de elasticidade e baixa elongação de ruptura. Esse material pode ou não escoar antes de sua ruptura. Como exemplos, podem-se citar resinas fenólicas;
- B. polímeros com elevados módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tensão na ruptura e moderada elongação na ruptura. Poliacetais são um bom exemplo dessa classe de polímeros;
- C. polímeros com elevado módulo elástico, tensão no escoamento, elongação na ruptura e resistência máxima à tração. Como exemplo, cita-se o policarbonato, que é considerado um polímero duro tenaz;
- D. polímeros com baixo módulo de elasticidade, baixa tensão de escoamento, porém elevadas elongação e tensão no ponto de ruptura. Como exemplo, o polietileno;
- E. polímeros com baixo módulo de elasticidade e tensão no escoamento e uma elongação no ponto de ruptura moderada a elevada. Como exemplo, tem-se o teflon.

Figura 9 - Curvas típicas tensão *versus* deformação obtidas em ensaios de tração para diversos tipos de polímeros classificados de acordo com a sua rigidez e tenacidade



Fonte: Canevarolo Jr. (2007).

Os ensaios de fluência e relaxação de tensão, por outro lado, caracterizam os comportamentos mecânicos do polímero numa escala de tempo muito maior. Além disso, a caracterização do comportamento mecânico dos polímeros pode ser efetuada sem atingir a integridade ou ruptura do material ou pode ser executado até a fratura do polímero.

2.7 Ensaio de tração

No ensaio de tração, a força (ou tensão) é medida enquanto a amostra está sendo deformada a uma taxa constante. Testes de tração têm, tradicionalmente, sido o mais popular e universal usado dentro dos testes mecânicos.

As tensões podem ser calculadas com base na curva gerada no gráfico de tensão (MPa) *versus* deformação (%), utilizando-se a razão entre a carga ou força e a área de seção transversal do corpo de prova. A tensão é definida como nominal quando a área utilizada para o cálculo da tensão é a inicial (A_0). Por outro

lado, a tensão é definida como a real se a área utilizada no cálculo for a área obtida no instante do registro da carga, ou seja, instantânea (A).

A parte reta da curva de tração-deformação é o módulo do elástico do material, que é chamado de módulo de Young (E), calculado por meio da equação (2).

Equação:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (2)$$

Sendo:

$d\sigma$ = variação de tensão até o escoamento

$d\varepsilon$ = variação de alongamento até o escoamento.

A tensão (σ) e a deformação (ε) específica também podem ser calculadas utilizando-se as equações (3) e (4).

$$\sigma = \frac{\text{força}}{\text{área}} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{(l - l_o)}{l_o} \quad (4)$$

Sendo:

l = comprimento sob deformação

l_o = comprimento inicial

As propriedades mecânicas dos polímeros são caracterizadas pelo modo como esses materiais respondem às solicitações mecânicas aplicadas, podendo estas ser do tipo tensão ou deformação. A natureza dessa resposta depende da estrutura química, temperatura, tempo e história (condições) de processamento do polímero (CANEVAROLO, 2006).

O grau de cristalinidade e a morfologia dos materiais cristalinos têm fortes efeitos sobre o comportamento mecânico dos polímeros. Quando a temperatura aumenta a partir de uma temperatura menor para uma temperatura de transição

vítrea ou do ponto de fusão, o alongamento na ruptura é baixo e não existe ponto de escoamento. Para altas massas molares, os polímeros possuem alta resistência e baixa deformação na ruptura (NIELSEN, 1974).

A resistência e ductilidade dos polímeros podem ser modificadas pela orientação molecular das cadeias poliméricas. A orientação pode ser produzida pelo rápido resfriamento do fundido. A resistência à tração diminui na direção perpendicular à orientação. A tensão de escoamento e o módulo de Young mostram a mesma tendência da resistência à tração, mas o aumento na direção paralela e a diminuição na direção perpendicular à orientação não são grandes como no caso da resistência à tração (NIELSEN, 1974).

A resistência à tração e o módulo aumentam com o número do volume de fibras em compósitos de polipropileno (WAMBUA; IVENS; VERPOEST, 2003). Os estudos feitos por Fu *et al.* (2000) evidenciaram que a resistência à tração do compósito de polipropileno reforçado com fibras de vidro é mais influenciada pelo comprimento da fibra do que pela concentração da mesma.

Thomason (2002) avaliou o comportamento mecânico de compósitos de polipropileno reforçados com fibras de vidro e demonstrou que a resistência à tração e a resistência ao impacto aumentam com a concentração de fibras de vidro, não sendo fortemente influenciados com a variação do diâmetro da fibra.

Tancrez, Rietsch e Pabiot (1994), ao estudar o compósito de polipropileno reforçado com fibras de vidro, mostrou que, após a injeção, o comprimento das fibras diminuiu e, conseqüentemente, houve diminuição mecânicas dos compósitos que não possuíam agentes de acoplamento.

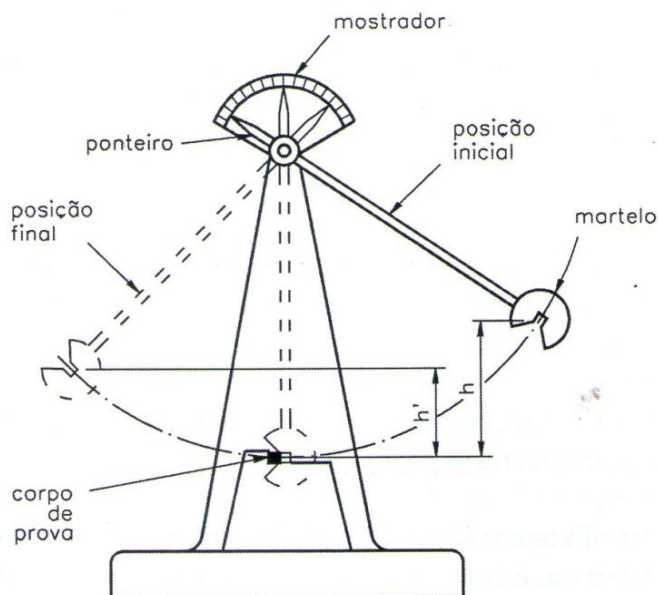
2.8 Ensaio de impacto

Os testes de impacto são testes de fraturas a alta velocidade que mede a energia para romper a amostra. Nos testes de impacto Izod e Charpy, um pêndulo com um peso é jogado contra a amostra (com entalhe ou não) e a energia necessária para romper a amostra é determinada a partir da perda de energia cinética do pêndulo (NIELSEN, 1974).

No teste de impacto com queda de pêndulo, a quantidade de energia necessária para quebrar um material é determinada pelo peso do pêndulo e altura inicial de queda (NIELSEN, 1974).

O pêndulo é levado a certa posição, onde adquire uma energia inicial. A diferença entre as energias inicial e final corresponde à energia absorvida pelo material. Na FIG. 10 verifica-se um modelo da máquina utilizada para realizar o ensaio de impacto.

Figura 10 - Modelo de uma máquina para realizar o teste de impacto



Fonte: Cozaciuc, Silva e Togni (2000).

A geometria da peça é importante porque a resistência ao impacto depende do tamanho da peça. Uma amostra mais fina tende a resistir ao impacto mais do que uma amostra mais espessa. De acordo com, NIELSEN, 1974, o teste de impacto é controlado pelos fatores citados a seguir:

- a) A energia necessária para iniciar a ruptura e
- b) A energia requerida para propagar a trinca.

A resistência ao impacto de uma amostra com entalhe é menor do que de uma amostra sem entalhe. A principal razão para isso é que o entalhe é concentrador de tensão. A concentração de tensão é maior para formato de entalhes com menor raio de curvatura. Numa amostra com entalhe, a maioria da deformação é localizada nas regiões próximas da região de menor abertura do entalhe, onde ocorre com taxa de deformação mais alta se comparada com

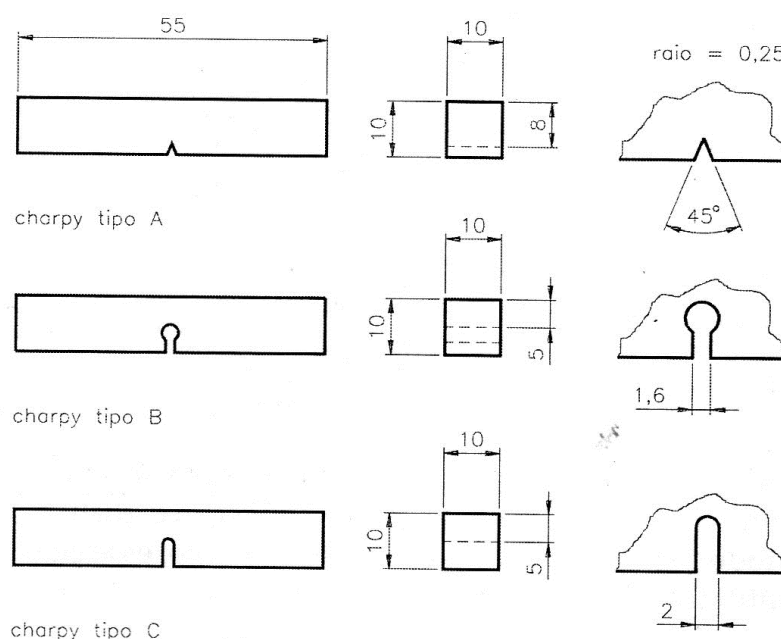
amostras sem entalhe. As altas deformações de um material podem mudar de comportamento dúctil para frágil com baixa resistência ao impacto. Assim, a diferença entre uma amostra com entalhe e sem entalhe pode ser maior ainda para material dúctil do que para material frágil. Outro fator que altera a sensibilidade do material com entalhe é o processo de fratura que envolve a iniciação da trinca e a sua propagação (NIELSEN, 1974).

Os corpos de prova de impacto utilizam duas classes como entalhe: o Charpy e o Izod. Há um tipo especial para ferros fundidos e ligas não ferrosas fundidas sobre pressão. Esses corpos de prova seguem especificações de normas internacionais, baseadas na norma americana E-23 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

Os corpos de prova Charpy compreendem três subtipos (A, B, C), de acordo com a forma do entalhe.

A FIG. 11 mostra as formas e dimensões desses três tipos de corpos de prova e dos respectivos entalhes. Os ensaios realizados de impacto nessa tese utilizaram os corpos de prova Charpy tipo A, com o ângulo de 45°.

Figura 11 - Formas e dimensões dos corpos de prova para o ensaio de impacto



Fonte: Cozaciuc, Silva e Togni (2000).

A resistência ao impacto aumenta com a elevação da temperatura. Para polímeros amorfos, a resistência ao impacto aumenta dramaticamente quando a temperatura é elevada próximo da temperatura de transição vítrea ou acima. Muitos polímeros cristalinos também possuem mais resistência ao impacto acima do que abaixo da temperatura de transição vítrea. Em temperaturas próximas da temperatura de transição vítrea ou acima, movimentos moleculares são grandes o suficiente para aliviar a concentração de tensão e muita energia pode ser dissipada por calor, tornando possível o escoamento e altas deformações (NIELSEN, 1974).

Os efeitos da orientação molecular sobre a resistência ao impacto possuem os mesmos comportamentos encontrados em tensão-deformação. Na situação prática, quando a direção da força é uma direção qualquer ou biaxial, a amostra sempre vai romper na direção mais fraca. A alta temperatura no cilindro da máquina de moldagem por injeção permite que a orientação diminua mais do que em temperaturas mais baixas, devido à relaxação de tensão (NIELSEN, 1974).

A resistência ao impacto tende a aumentar com o aumento da massa molar até um valor em que a resistência se torna independente da massa molar. O efeito da massa molar parece ser mais significativo para polímeros cristalinos, como o polipropileno acima da temperatura de transição vítrea (NIELSEN, 1974).

No teste de impacto, as fibras podem aumentar a resistência ao impacto por dois mecanismos de dissipação de energia;

- a) As fibras podem ser arrancadas (*pull-out*) da matriz e dissipar energia durante a fricção mecânica. Ao mesmo tempo, o arrancamento das fibras previne a concentração de tensão nas áreas ao longo da fibra; e
- b) as fibras dissipam energia durante o processo de descolagem (*dewetting*), tendendo a cessar a propagação da trinca.

As fibras também tendem a reduzir a resistência ao impacto por dois mecanismos:

- a) As fibras reduzem drasticamente o alongamento até ruptura, assim podem reduzir a área sobre a curva tensão-deformação;

- b) a concentração de tensão ocorre nas regiões de finais das fibras, áreas de adesão fraca e regiões onde as fibras se tocam.

Assim, dependendo da natureza do compósito e do tipo do teste de impacto, as fibras podem diminuir ou aumentar a resistência ao impacto (NIELSEN, 1974).

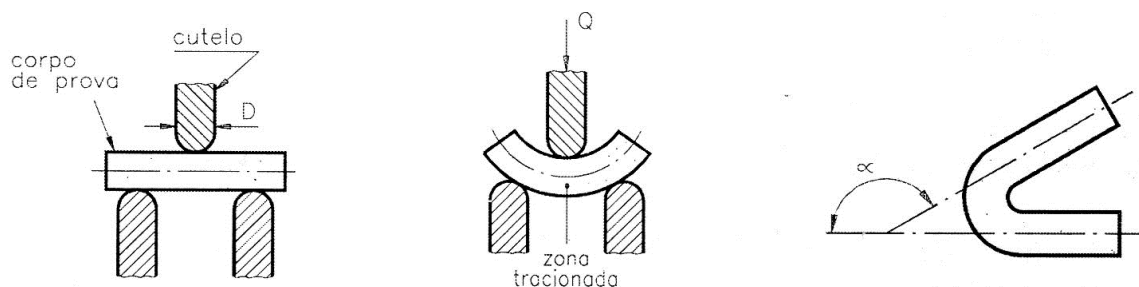
Se a carga de impacto é aplicada na direção paralela à concentração das fibras, a alta resistência ao impacto é obtida se a adesão é relativamente fraca e se as fibras são curtas. Então, a máxima energia pode ser dissipada por fricção mecânica durante o processo de arrancamento (*pukll-out*) e por descolamento (*debonding*) das fibras (NIELSEN, 1974).

Estudos feitos por Thomason (2002) mostraram que a resistência ao impacto aumentou com o aumento da concentração de fibras, para compósitos de polipropileno reforçados com fibras de vidro. A resistência ao impacto CHARPY é levemente afetada pela temperatura de teste entre -50 e $+40^{\circ}\text{C}$, com reduzido aumento com a diminuição da temperatura.

2.9 Ensaio flexão

O método mais comum de ensaios de flexão é o que utiliza o carregamento em um sistema com três pontos. Nos ensaios de flexão em três pontos, uma barra de seção cruzada retangular é ajustada com dois apoios fixados a um suporte (travessia fixa) e o carregamento é realizado por meio de um terceiro apoio (travessa móvel) posicionado a uma distância média entre os apoios fixados aos suportes. Os apoios devem possuir superfícies cilíndricas, de modo a evitar endentações ou falhas devido à concentração de tensões nos corpos de prova. Na FIG. 12 é representado esquematicamente o dispositivo de ensaio de flexão em três pontos.

Figura 12 - Representação esquemática do dispositivo de ensaio de flexão em três pontos



Fonte: Cozaciuc, Silva e Togni (2000).

O valor da carga, na maioria das vezes, não importa. O ângulo determina a intensidade do ensaio e é geralmente de 90, 120 ou 180° (COZACIUC; SILVA; TOGNI, 2000).

A separação dos apoios (a sua distância) deve ser ajustada de modo que sua razão com a profundidade do corpo de prova (L/d) seja igual a 16, a menos que uma distância maior tenha de ser utilizada em razão de certos critérios (COZACIUC; SILVA; TOGNI, 2000).

Esses ensaios são, geralmente, aplicados a materiais poliméricos rígidos e semirrígidos. O corpo de prova é defletido até que sua ruptura ocorra na superfície oposta ao carregamento ou até que uma deformação máxima de 5,0% seja alcançada. Entretanto, a resistência à flexão não pode ser determinada para aqueles materiais que não rompem ou não falham na superfície oposta ao carregamento dentro de um limite máximo de 5,0% de deformação (COZACIUC; SILVA; TOGNI, 2000).

Para um ensaio de flexão em três pontos, conforme a norma ASTM D790 (ASTM, 2010a), a tensão em flexão em megapascal (MPa) pode ser calculada de acordo com a equação (5).

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (5)$$

Sendo:

F = a força aplicada (em Newton);

L = a distância entre os apoios fixos (em mm);

b = a largura dos corpos de prova (em mm);

h = a espessura dos corpos de prova (em mm).

De acordo com a espessura do corpo de prova, a distância entre os dois apoios fixos $span$, pode ser calculada conforme a equação 6,

$$L = (16 \pm 1) \bar{h} \quad (6)$$

Sendo:

L = a distância entre os apoios fixos (em mm).

A deformação em flexão pode ser calculada usando-se a equação (7).

$$\varepsilon_f = \frac{6Dh}{L^2} \quad (7)$$

Onde

ε_f = deformação em flexão;

D = máxima deflexão no centro da barra;

h = espessura do corpo de prova;

L = distância entre os dois apoios fixos, $span$.

Para o cálculo do módulo em flexão, inicialmente deve-se determinar as deformações individuais s_1 e s_2 , que correspondem à flecha na região linear inicial da curva tensão X deformação. Os valores de individuais s_1 e s_2 são calculados de acordo com a equação (8).

$$s_i = \frac{\varepsilon_{fi} L^2}{6h} \quad (i = 1,2) \quad (8)$$

Sendo:

s_i = a deflexão individual;

ε_{fi} = valores individuais da deformação;

L = a distância entre apoios;

h = a espessura do corpo de prova.

Desta forma, o módulo de flexão pode ser determinado por pela equação (9):

$$E = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (9)$$

Sendo σ_{f1} e σ_{f2} as tensões medidas nos pontos de deflexão s_1 e s_2 , respectivamente.

Materiais que não falham até a máxima deformação permitida para esses ensaios devem utilizar o método de quatro pontos. A diferença básica entre os dois métodos está na localização da carga máxima e na tensão de tração máxima axial na superfície aposta ao carregamento. A tensão de tração máxima axial ocorre debaixo do ponto de carregamento no ensaio de três pontos, enquanto no ensaio de quatro pontos verifica-se na área entre os dois pontos de carregamento (ASTM, 2010).

Existem dois procedimentos básicos para ensaios de flexão em três pontos. O procedimento A é aplicado principalmente nos materiais que se rompem em deflexões comparativamente pequenas. Deve ser utilizado para medidas de propriedades sob flexão, particularmente o módulo sob flexão. O procedimento B é aplicado particularmente naqueles materiais que suportam grandes deflexões durante o teste (ASTM, 2010).

As propriedades sob flexão podem variar com a profundidade do corpo de prova, temperatura e condições atmosféricas e a diferença na taxa de carregamento especificada nos procedimentos A e B (ASTM, 2010).

2.10 Ensaio de densidade

A densidade de um sólido é uma propriedade que é convenientemente medida para identificar um material, para acompanhar as alterações físicas em uma amostra, para identificar o grau de uniformidade entre as unidades de amostragem de diferentes amostras ou para indicar a densidade média (NIELSEN, 1974).

Alterações na densidade de um material único são devidas às diferenças localizadas na cristalinidade, à perda de plastificante, absorção de solvente ou

outras causas. É possível que as partes de uma amostra difiram em densidade devido às suas diferenças na história cristalinidade térmica, à porosidade e à composição.

O ensaio de densidade em polímeros segue a norma ASTM D792, que usa o princípio de Arquimedes (empuxo).

2.11 Teste de fluidez

O índice de fluidez é o valor medido da taxa de extrusão de um material fundido, em condições específicas de temperatura e pressão, a partir de um capilar de diâmetro e comprimento específicos - ASTM D 1238 (ASTM, 2010b).

Shenoy e Saini (1996) publicaram que, durante a produção de injetados à base de termoplásticos, o único parâmetro de fluxo polimérico a que o produtor tem acesso fácil é o índice de fluidez.

A medição do índice de fluidez de um termoplástico é um processo simples. Uma vez que o plastômetro alcança a temperatura indicada, uma determinada massa de termoplástico é colocada dentro do seu capilar. Após um tempo prévio de aquecimento de 6 a 8 minutos, é iniciada a extrusão do termoplástico fundido através do orifício capilar - matriz-padrão de formato circular. A vazão gravimétrica é o índice de fluidez do termoplástico ensaiado.

O ensaio do índice de fluidez é um método particularmente útil em testes de controle de qualidade aplicados em termoplásticos, sendo a sua aplicação indicada para a medição de taxas de vazão de fundido na faixa de 0,15 a 50 gramas por 10 minutos (método manual); e na faixa de 0,50 a 300 gramas por 10 minutos (método automático). O método manual difere do método automático pela forma de extração do termoplástico extrudado, respectivamente, a partir de interferência do operador ou do próprio equipamento (ASTM, 2010b).

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 Materiais

A matéria prima utilizada como matriz polimérica consistiu de polipropileno (PP) isotático virgem, fornecido pela Borealis, de nome comercial PX2507. O QUADRO 4 exibe as propriedades físicas do polipropileno utilizado na elaboração dos corpos de prova, e na FIG. 13, o granulado de PP-PX2507.

Quadro 4 - Propriedades físicas do PP-PX2507 fornecido pela Borealis

Propriedade		Valores típicos	Unidade	Método
Densidade		0,905	g/cm ³	(ASTM, 2008)
Índice de fluidez	230° C/2,16 kg	40	g/10 min	ASTM D 1238 (ASTM, 2010b)
Resistência à tração	50 mm/min	34	MPa	ASTM D 638 (ASTM, 2010c)
Dureza rockwell	R escala	101	-	ASTM D 785 (ASTM, 2008)
Resistência ao impacto Izod	23° C	22	J/m	ASTM D256 (ASTM, 2010d)

Fonte: Catálogo comercial da empresa Borealis, 2012

Figura 13 - PP-PX2507



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O polímero da FIG. 13 traz um tamanho de molécula usual, ou seja, suas cadeias poliméricas relativamente pequenas se comparado à outras matérias primas, portanto, ocasionando assim um aspecto translúcido. É conhecido que as

propriedades físicas dos polímeros são dependentes do comprimento da sua molécula e conseqüentemente da sua respectiva massa molar. Como os polímeros normalmente envolvem uma faixa de valores de massa molar, é de relativamente comum o fato de se observar uma certa alteração em suas características e propriedades físicas.

O QUADRO 5 exibe as propriedades da fibra de vidro fornecida pela Owens Corning, que são fibras picadas obtidas de mechas de filamentos contínuos de vidro Advantex, que recebem recobrimento químico adequado para compatibilidade com a matriz polimérica à qual será incorporada.

Quadro 5 - Dados da fibra de vidro utilizada nos corpos de prova

NOMENCLATURA (<i>sizing</i> – diâmetro ⁵ – comprimento ⁶)	Diâmetro do Filamento (nominal) [μm]	Teor de Umidade (limite máximo) [%]	Comprimento da fibra de vidro (mm)
147A-14P 4MM	14	0,10	4

Fonte: Ficha técnica da Owens Corning para fibra de vidro.

A FIG. 14 exibe a fibra de vidro utilizada na realização dos corpos de prova. Esses filamentos são cortados em comprimentos específicos. A fibra utilizada foi a 147^a, que é desenhada para aplicação em processos de extrusão e/ou injeção de polímeros termoplásticos, visando atuar como reforço em compósitos de polipropileno e polietileno.

⁵ O diâmetro do filamento é controlado com base em parâmetros de processo na etapa de fiação.

⁶ O comprimento nominal de corte é fixado no ajuste inicial de processo.

Figura 14 - Fibra de vidro utilizada nos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A fibra de vidro industrializada facilita o processo de mistura com o polímero durante o processo de extrusão. Como ela apresenta densidade mais elevada que a fibra de coco, sua dosagem na extrusora torna-se mais fácil, permitindo injetar a quantidade desejada no polímero com mais precisão.

A fibra de coco que aparece na FIG. 15 foi obtida no comércio local. Como as propriedades mecânicas dos materiais compósitos são fortemente influenciadas pela interação entre a matriz polimérica e o componente de reforço, indica-se um pré-tratamento das fibras, buscando remover impurezas e melhorar a adesão fibra/matriz polimérica, por meio de um processo de limpeza com água ou de tratamento alcalino (mercerização) com hidróxido de sódio (NaOH) a 1% (FIG. 16) (ROSA *et al.*, 2009). Na FIG. 15 vê-se a fibra de coco.

Figura 15 - Fibra de coco utilizada nos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

3.2 Produção dos corpos de prova

3.2.1 Secagem da fibra de coco

A fibra de coco, após passar pela mercerização (lavagem em solução de hidróxido de sódio a 1% com água destilada durante 3 horas), foi secada com um ventilador por 24 horas para que o excesso de umidade fosse retirado da fibra de coco. Após essa secagem por ventilação forçada, a fibra de coco foi inserida em um forno com temperatura controlada em torno de 70°C durante 48 horas. Esse tempo de secagem foi necessário para que realmente toda umidade da fibra de coco fosse extraída. Antes de ser colocada no forno, a fibra de coco úmida foi pesada. Após sua inserção no forno, a cada 8 horas aproximadamente, cinco bandejas eram pesadas com o objetivo de verificar se ainda ocorria variação no seu peso em função da umidade. A FIG. 16 exhibe como foi realizado o banho para limpar a fibra de coco.

Figura 16 - Fibra de coco sendo mercerizada



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Conforme exibido na FIG. 16, o NaOH realiza o alveijamento das fibras de coco, fazendo com que elas fiquem mais claras. Após o banho na solução, a água que sai do tratamento apresenta coloração avermelhada.

Na FIG. 17 ressalta-se o forno utilizado no processo de secagem e na FIG. 18 como as fibras de coco eram dispostas no forno, respectivamente. Na parte superior do forno tem um sensor que controla a sua temperatura interna. Na saída do forno foi instalado um anemômetro que realiza a captação da velocidade

de saída do ar. O forno foi ajustado para uma temperatura máxima de 70°C, sendo que esse controle foi realizado em um controlador digital.

A estrutura do forno é de madeira e as prateleiras onde as fibras foram colocadas são de material metálico. Ao final do processo as fibras de coco tinham aspecto ressecado e peso final com aproximadamente 40% a menos que o peso inicial. No APÊNDICE A observa-se essa perda de massa, que é justificada pela perda de umidade da fibra de coco.

Figura 17 - Forno utilizado para secar a fibra de coco



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A disposição das fibras de coco exibidas na FIG. 18 permite um fluxo de ar capaz de realizar as secagens das fibras de coco. No início da secagem, o medidor de umidade localizado na saída do forno apresentava aumento de umidade em função das fibras de coco que eram colocadas. Após 24 horas de secagem, a umidade era estabilizada. A velocidade do ar na entrada era 6,3 m/s e a saída do ar quente apresentava velocidade de 0,8 m/s. Uma amostra de fibra de coco foi colocada por 24 horas em uma estufa a 105°C a fim de obter a perda de umidade. Após esse processo o material avaliado perdeu 21,48% de umidade. O APÊNDICE A informa o quanto de material foi secado, podendo-se verificar que cerca de 40% de umidade foi perdida do material que foi colocado para secar. A estrutura metálica que recebe a fibra de coco é composta de seis prateleiras, sendo que cada prateleira recebe quatro bandejas dispostas nas letras A, B, C e D, conforme FIG. 18.

Figura 18 - Disposição das fibras de coco dentro do forno



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Após a secagem das fibras de coco, o material foi picotado no moinho da FIG. 19.

Figura 19 - Moinho usado para picotar as fibras de coco



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

As fibras que saíram do moinho apresentavam grande variação no comprimento, o que dificultou o processo seguinte de extrusão. As fibras de coco não possuíam peso suficiente para descenderem no funil de alimentação da

extrusora. Com o objetivo de garantir a mistura em peso de fibra de coco com a matriz polimérica, foi necessário colocar no funil de alimentação da extrusora a mistura já feita.

3.2.2 *Moldagem dos corpos de prova*

Os corpos de prova de tração, impacto, *heat deflection temperature* (HDT) e flexão foram confeccionados pelos processos de extrusão e injeção no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. Os materiais PP, fibra de vidro e fibra de coco foram misturados em uma extrusora com dosador para confeccionar os corpos de prova (QUADRO 6):

Quadro 6 - Proporções em peso de cada compósito

Compósito	%PP	%FV	%FCC
Compósito 1	100	0	0
Compósito 2	80	20	0
Compósito 3	70	30	0
Compósito 4	80	0	20
Compósito 5	70	0	30

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A resposta ou comportamento de um polímero dentro da extrusora combinada com as condições de processamento da extrusora, ou seja, temperaturas do barril, velocidade da rosca e projeto da rosca, é o que permite à extrusora extrudar um *melt* polimérico homogêneo sob pressão e temperatura constantes.

O nome de cada zona define a atividade naquela zona. Na zona de alimentação, o fluxo polimérico ainda não fundido é transportado a partir do funil de alimentação para a zona de alimentação da extrusora (zona I). Na zona I, o composto é compactado na medida em que ele é transportado para frente na extrusora. Em seguida, ocorre a plastificação em que o polímero atinge a viscosidade adequada. Após a plastificação, o melt é transportado para a zona de dosagem e encaminhado para a matriz. Em uma extrusora de dois estágios, o

melt pode passar por uma zona de devolatilização ou descompressão na qual a umidade, voláteis ou solventes são removidos.

A matéria-prima sólida do polímero é fundida sob a ação do parafuso e do cilindro com o calor, fricção e pressão. O polímero fundido é então forçado através da matriz. O sistema de resfriamento é de sopro de ar ou comumente em banho de água. A extrusora é formada pelos seguintes componentes (partes):

- a) Funil de alimentação: contém grande quantidade de matéria-prima na forma de pós ou *pellets*, que é alimentada por ação da gravidade sobre a superfície superior do parafuso exposto que continuamente força o material no cilindro entre os passos da rosca;
- b) Cilindro: normalmente aquecido para fundir o polímero e de diâmetro interno constante, com paredes grossas para suportar altas pressões. Um ou mais elementos de aquecimento são colocados em torno do lado externo do cilindro. O cilindro cobre o comprimento inteiro do parafuso a partir do funil, onde seu lado superior é ajustado ao funil, à outra extremidade onde ele afina, com a única abertura sendo a matriz. O diâmetro interno do cilindro varia de $\frac{3}{4}$ a 24 polegadas.
- c) Rosca extrusora: a matéria-prima passa através da rosca. A forma da rosca juntamente com a sua rotação determina a velocidade com que a matéria-prima se move e a pressão aplicada ao cilindro. A rosca é chamada assim porque geralmente sua forma é da espiral de um parafuso. O diâmetro do centro do parafuso é determinante da pressão no cilindro. A razão L/D é a característica utilizada para descrever o tamanho da rosca. O "L" é o comprimento total do parafuso, enquanto "D" é o diâmetro interno do cilindro. As extrusoras mais curtas têm razão de 12 e as mais longas de 42.
- d) A matriz da extrusora: tem uma abertura na forma da seção do produto final que pretende alcançar. A matriz tem que ser capaz de suportar altas temperaturas e pressões exercidas sobre ela pelo polímero que está sendo forçado a passar através dela.

Para extrusão das amostras de fibra de vidro com PP foram utilizadas as seguintes condições:

- a) Extrusora COPERION - dupla rosca de 36 mm e L/D=44;
 b) perfil de temperatura (°C) e rotação por minuto (RPM), de acordo com a TAB. 1.

Tabela 1 - Condições de extrusão das amostras

Região	Temperatura (°C)			
	Amostra 1		Amostra 2	
	80%	20%	70%	30%
Zona 1	160	160	160	160
Zona 2	160	160	160	160
Zona 3	160	160	160	160
Zona 4	165	165	165	165
Zona 5	165	165	165	165
Zona 6	165	165	165	165
Zona 7	170	170	170	170
Zona 8	170	170	170	170
Zona 9	175	175	175	175
Zona 10	175	175	175	175
Cabeçote	175	175	175	175
Rotação em (RPM)	90	90	90	90

Fonte: Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais- Relatório LCP13-000436.

A zona de alimentação representa a parte da extrusora onde o material é depositado para ser levado. O material desce no funil por gravidade para o canal da rosca da extrusora. Os polímeros possuem uma densidade típica que favorece o seu escoamento no funil e conseqüente entrada na rosca, densidades típicas de polímeros no estado sólido ou melt variam de 0,9 a 1,7 g/cm³, dependendo do tipo de polímero, aditivos e quantidade de carga.

A fusão ou plastificação inicia-se na zona de alimentação a aproximadamente cinco ou seis diâmetros da rosca para frente a partir da entrada do material. Polímeros semicristalinos apresentam fusão em faixa bem estreita, enquanto que os amorfos continuam a amolecer acima da T_g até que a viscosidade fique baixa o suficiente para se processar o polímero.

Duas fontes de calor são disponíveis para fundir ou plastificar o polímero: condução do barril e aquecimento viscoso devido ao cisalhamento. A maior parte do calor é gerada pelo motor da extrusora que promove a rotação da rosca, resultando em aquecimento do polímero devido ao cisalhamento.

Aproximadamente 80-90% do calor necessário para fundir o polímero são gerados pelo cisalhamento devido à rotação da rosca, enquanto que os 10-20% restantes vêm dos aquecedores do barril.

A TAB. 2 demonstra as condições de injeção das amostras.

Tabela 2 - Condições de injeção dos corpos de prova fibra de vidro com PP

	Amostra 1		Amostra 2	
	80%	20%	70%	30%
Temperatura na zona de alimentação	190°C		190°C	
Temperatura do canhão	200°C		200°C	
Temperatura no bico de injeção	210°C		210°C	
Pressão de injeção	320 bar		320 bar	
Tempo de injeção	3,2s		3,2s	
Vazão de injeção	28 cm ³ /s		28 cm ³ /s	
Temperatura do molde	60°C		60°C	
Tempo de resfriamento	10s		10s	

Fonte: Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais - Relatório LCP13-000436.

A mistura na extrusora do polímero com a fibra de coco foi conseguida pelo movimento circular da rosca no canal na medida em que o plástico fundido foi bombeado para a matriz da extrusora mais o contrafluxo criado pelo cabeçote de pressão, o que promoveu a mistura do polímero com a fibra de coco.

Para a extrusão das amostras de fibra de coco com PP foram utilizadas as seguintes condições:

- a) Extrusora COPERION - dupla rosca de 36mm e L/D=44;
- b) perfil de temperatura (°C) e rotação (RPM): de acordo com a TAB. 3.

**Tabela 3 - Condições de extrusão das amostras
com formulações de 20% e 30% de fibra de coco com PP**

Região	Temperatura (°C)			
	Amostra 1		Amostra 2	
	80%	20%	70%	30%
Zona 1	160	160	160	160
Zona 2	160	160	160	160
Zona 3	160	160	160	160
Zona 4	165	165	165	165
Zona 5	165	165	165	165
Zona 6	165	165	165	165
Zona 7	170	170	170	170
Zona 8	170	170	170	170
Zona 9	175	175	175	175
Zona 10	175	175	175	175
Cabeçote	180	180	180	180
Rotação em (RPM)	180	180	180	180

Fonte: Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais- Relatório LCP13-000436.

A mistura fibra de coco com PP foi estabelecida durante o processo de extrusão; após esse processo os *pellets* foram injetados, conseqüentemente, houve nova mistura da fibra de coco com o polipropileno.

O objetivo da extrusão é alcançar uma temperatura uniforme de *melt* além de um *melt* homogêneo. A mistura é determinada pelo tempo de residência e pela taxa de cisalhamento à qual o fluido é exposto dentro da zona de mistura. Extrusoras monoroscas sem zona de mistura têm uma mistura deficiente. Um método para melhorar a mistura é aumentar a pressão no fim da extrusora ou na matriz para induzir a maior contrafluxo de pressão na extrusora.

A TAB. 4 disponibiliza as condições de condições de injeção das amostras.

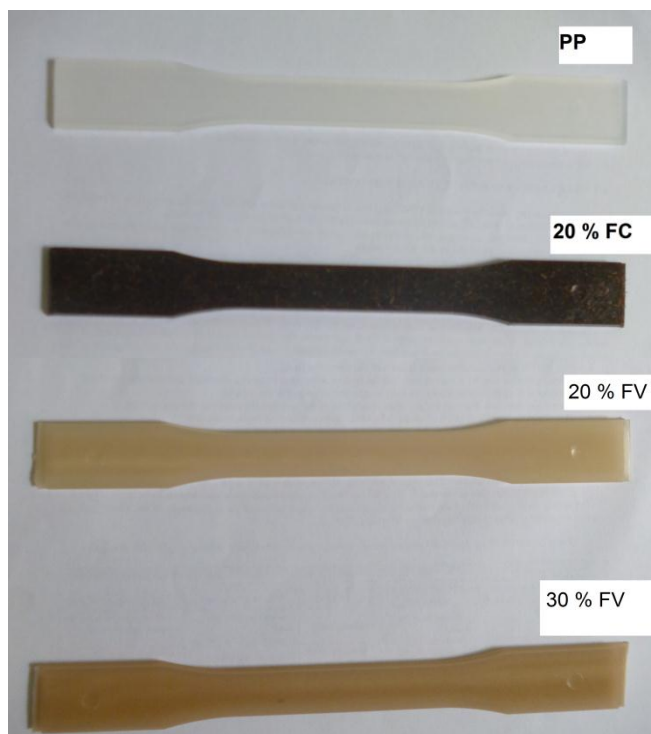
**Tabela 4 - Condições de injeção dos corpos
de prova fibra de coco com PP**

	Amostra 1		Amostra 2	
	80%	20%	70%	30%
Temperatura na zona de alimentação	170°C		170°C	
Temperatura do canhão	180°C		180°C	
Temperatura no bico de injeção	190°C		190°C	
Pressão de injeção	356 bar		356 bar	
Tempo de injeção	2,5 s		2,5 s	
Vazão de injeção	28 cm ³ /s		28 cm ³ /s	
Temperatura do molde	50°C		50°C	
Tempo de resfriamento	10s		10s	

Fonte: Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais - Relatório LCP13-000436.

Os corpos de provas para ensaios mecânicos foram confeccionados de acordo com o primeiro procedimento descrito: processo de extrusão seguido de injeção. Foram caracterizados a partir das propriedades mecânicas: resistência à tração, alongamento na ruptura e módulo de elasticidade, na máquina de tração do laboratório de ensaios destrutivos do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT). Verifica-se que durante os ensaios de tração os corpos de prova romperam-se na área útil. Na FIG. 20 os corpos de prova foram utilizados no ensaio de tração.

Figura 20 - Corpos de prova após a injeção para teste de tração



Fonte: elaborado pelo autor.

No processo de moldagem por injeção, os granulados plásticos contidos numa tremonha alimentam, por meio de uma abertura no cilindro de injeção, a superfície de um parafuso em rotação que os empurra em direção ao molde. A rotação do parafuso faz com que os granulados entrem em contato com as paredes aquecidas do cilindro, provocando o seu amolecimento (fusão) devido ao calor de compressão, do atrito e das paredes quentes do cilindro. Quando na extremidade do parafuso se atinge quantidade suficiente de material plástico fundido, o parafuso para e, com um movimento do tipo de um “empurrão”, introduz um “jato” de plástico fundido, através de um sistema de gitagem, nas cavidades de um molde fechado (STRAPASSON, 2004).

O parafuso mantém a pressão aplicada ao material plástico que é introduzido durante curto intervalo de tempo na cavidade do molde (macho e fêmea), que está fechado e tem o desenho que dará seu formato final. O contato com as paredes internas do molde arrefecido com água permite uma queda brusca de temperatura do fundido, que se solidifica formando a peça final. Finalmente, o molde é aberto e a peça é ejetada por meio de ar ou pela ação de molas ejetoras. O molde é depois fechado e fica pronto para outro ciclo.

As principais vantagens da moldagem por injeção incluem: a produção de peças de elevada qualidade com velocidades de produção altas, custos de mão-de-obra relativamente baixos, obtenção de um bom acabamento superficial na peça moldada, automatização da produção.

As principais desvantagens da moldagem por injeção são o custo do equipamento, que faz necessário produzir grande volume de peças para compensar o custo da máquina, e o controle rigoroso do processo, para que se obtenham produtos de qualidade (STRAPASSON, 2004). A FIG. 21 mostra a foto da injetora, onde corpos de prova foram realizados.

Figura 21 - Foto da injetora onde os corpos de prova foram feitos



Fonte: elaborado pelo autor.

A FIG. 22 exibe o molde do corpo de prova de tração. Verifica-se que o molde nele feito de uma liga de aço especial para suportar as constantes variações de temperaturas. Ressalta-se também que o molde possui canais de refrigeração que ajudam a troca térmica do polímero quente e molde, favorecendo, assim, o resfriamento rápido das peças injetadas.

Figura 22 - Foto do molde dos corpos de prova



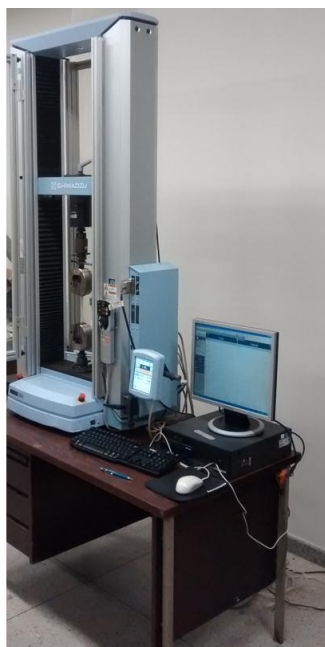
Fonte: elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

4.1 Resistência à tração

Os corpos de provas para ensaios mecânicos foram confeccionados de acordo com o procedimento descrito: processo de extrusão seguido de injeção. Foram caracterizados a partir das propriedades mecânicas: resistência à tração, alongamento na ruptura e módulo de elasticidade, na máquina de tração do laboratório de ensaios destrutivos do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) (FIG. 23). A velocidade utilizada foi de 50 mm/min, à temperatura de 23°C. Os corpos de provas foram estabilizados por 4 horas à temperatura de 23°C antes da realização do ensaio. Os corpos de provas foram obtidos como mostra a FIG. 20.

Figura 23 - Foto da máquina de tração



Fonte: elaborado pelo autor.

A TAB. 5 registra os resultados obtidos no ensaio de tração para as amostras extrudadas seguidas da injeção sem e com a adição de fibras. Os resultados foram analisados segundo a metodologia ANOVA disponível no *software Excel*.

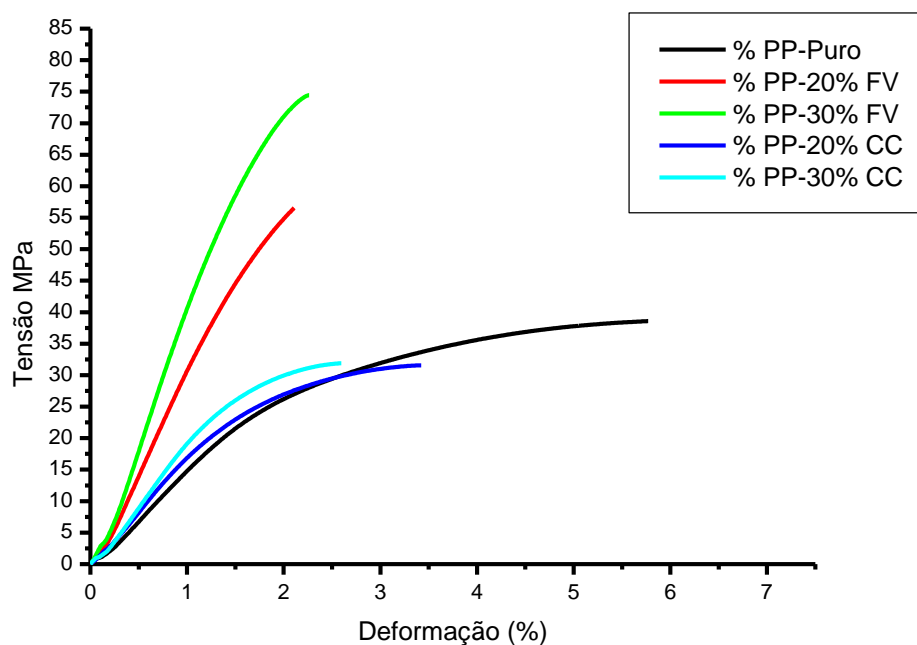
Tabela 5 - Resistência à tração dos compósitos extrudados e injetadas

Compósito (PP)% em peso	Tensão máxima (MPa)	Tenacidade (%)	Módulo de elasticidade (MPa)
100/0	38,41 ± 0,39	1,64 ± 0,17	646,27 ± 47,88
80/20 FV	62,02 ± 1,69	1,07 ± 0,10	2131,31 ± 223,50
70/30 FV	74,55 ± 1,41	0,96 ± 0,06	3238,51 ± 84,00
80/20 FC	31,57 ± 0,54	0,74 ± 0,04	915,05 ± 36,44
70/30 FC	31,67 ± 0,79	0,525 ± 0,04	1234,24 ± 29,93

Fonte: elaborado pelo autor.

O GRÁF. 2 representa a tensão por deformação obtida no ensaio de tração.

Gráfico 2 - Resistência à tração dos compósitos

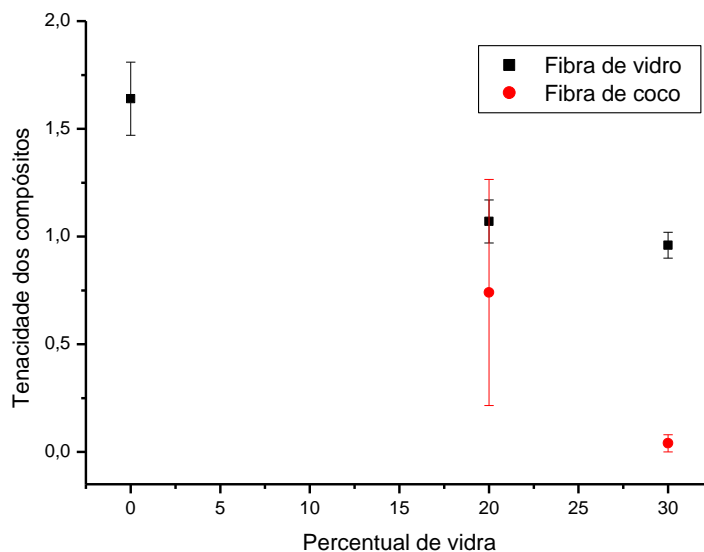


Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados dos testes mecânicos em relação à tração demonstraram que os compósitos reforçados com fibra de vidro aumentaram sua resistência à tração e também tiveram aumento no módulo de elasticidade em relação ao polipropileno puro. A tenacidade dos compósitos reforçados com fibra de vidro

reduziu-se em relação ao compósito puro. O GRÁF. 3 compara a tenacidade obtida nos ensaios.

Gráfico 3 - Tenacidade dos compósitos



Fonte: elaborado pelo autor.

Já os compósitos reforçados com fibra de coco tiveram redução da resistência à tração e redução no módulo de elasticidade em relação ao polipropileno puro. A tenacidade desses compósitos foi menor que a tenacidade do polipropileno puro.

4.2 Resistência ao impacto

O ensaio de resistência ao impacto Izod foi realizado no dispositivo de impacto do CEFET, modelo XJ-25Z/50Z, no laboratório de ensaios destrutivos do DEMAT (FIG. 24). O teste consiste em um pêndulo que atinge o corpo de prova já com entalhe realizado de acordo com a norma. Todos os corpos de prova quando foram atingidos pelo pêndulo sofreram ruptura total. O ângulo que a máquina descreve durante a trajetória de impacto corresponde a $153,72^\circ$.

Figura 24 - Foto da máquina de impacto



Fonte: elaborado pelo autor.

Os corpos de provas foram obtidos pelo processo de injeção, realizado no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, com os mesmos parâmetros, em relação à porcentagem de fibra, utilizados para obtenção dos corpos de provas para o ensaio de tração. O entalhe foi feito no entalhador do dispositivo de impacto do DEMAT. O pêndulo utilizado no ensaio foi de 1J. A velocidade foi de 3,5 m/s. A FIG. 25 exibe o corpo de prova usado no teste de impacto, que possuía 3,0 mm de espessura com um rasgo no meio de raio de 0,25 mm, profundidade do entalhe de 2,0 mm.

Figura 25 - Corpo de prova usado no ensaio de impacto



Fonte: elaborado pelo autor.

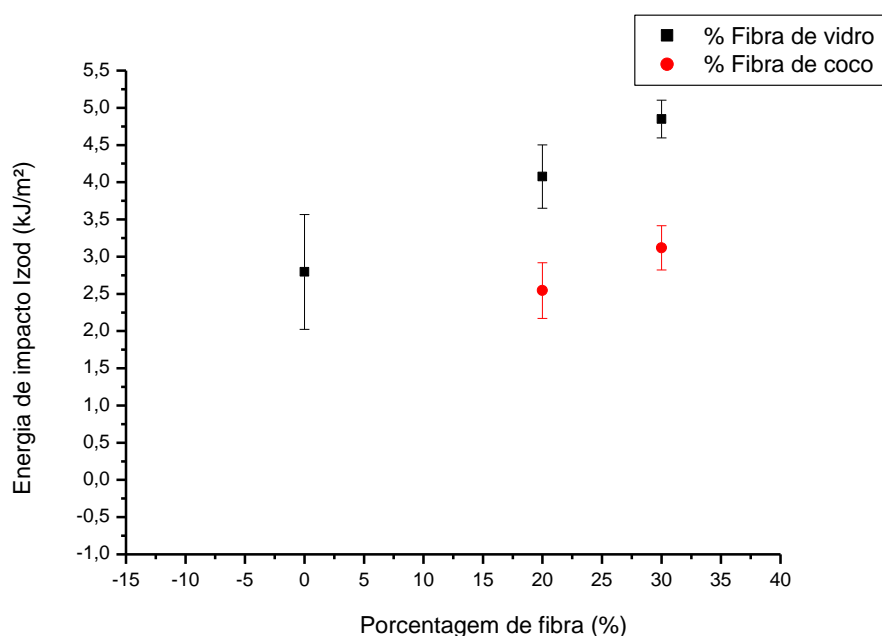
Na TAB. 6 têm-se os resultados obtidos no ensaio de impacto Izod.

Tabela 6 - Resistência ao Impacto Izod dos compósitos

Compósito (PP)% em peso	Energia (J)	Impacto Izod (kJ/m ²)
100/0	1,0	2,80 ± 0,77
80/20 FV	1,0	4,08 ± 0,43
70/30 FV	1,0	4,85 ± 0,25
80/20 FC	1,0	2,54 ± 0,37
70/30 FC	1,0	3,12 ± 0,30

Fonte: elaborado pelo autor.

No GRÁF. 4 tem-se a comparação dos resultados de resistência ao impacto dos compósitos. Observa-se que o maior resultado foi para o PP com carga de 30% de fibra de vidro. Os compósitos de fibra de coco com 20% demonstraram redução na resistência ao impacto, já o PP com 30% de carga de fibra de coco teve aumento em relação ao PP puro à resistência ao impacto Izod.

Gráfico 4 - Resistência ao impacto dos compósitos

Fonte: elaborado pelo autor.

4.3 Ensaio de resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão foi realizado nas amostras de polipropileno puro, polipropileno com 30% de fibra de vidro e polipropileno com

30% de fibra de coco, à velocidade de ensaio de 1,30 mm/min, máquina EMIC modelo DL 10000, operando com carga de 5000 N. Os ensaios foram feitos em cinco corpos de prova que ficaram 48 horas a $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e $(50 \pm 5)\%$ de umidade antes dos ensaios. A carga foi aplicada em três pontos, sendo o carregamento máximo ocorrendo exatamente na metade da distância entre os dois pontos fixos. A TAB. 7 salienta os resultados encontrados.

Tabela 7 - Resistência mecânica em flexão

Compósito (PP)% em peso	Módulo de Flexão (MPa)	Resistência a Flexão (MPa)
100/0	1579,00 \pm 24,36	46,22 \pm 0,52
70/30 FV	5325,79 \pm 76,45	100,05 \pm 2,13
70/30 FC	2293,51 \pm 53,98	49,97 \pm 1,39

Fonte: Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais.

O ensaio de flexão foi realizado para três amostras em cada uma das concentrações, vale lembrar que este ensaio é de elevado custo. O resultado revela que o compósito com fibra de vidro obteve o maior valor de resistência à flexão. Observa-se, também, que o compósito de fibra de coco tem valor de resistência à flexão mais alto que o polipropileno virgem. O ensaio de resistência à flexão foi feito nas amostras de polipropileno puro, polipropileno com 30% de fibra de vidro e polipropileno com 30% de fibra de coco, à velocidade de ensaio de 1,30 mm/min, máquina EMIC modelo DL 10000, operando com carga de 5000 N. Os ensaios foram realizados em cinco corpos de prova que ficaram 48 horas a $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e $(50 \pm 5)\%$ de umidade antes dos ensaios. A carga foi aplicada em três pontos, sendo o carregamento máximo ocorrendo exatamente na metade da distância entre os dois pontos fixos.

4.4 Ensaio de densidade

A densidade foi determinada por flutuabilidade, utilizando-se o princípio de Arquimedes para deslocamento dos fluidos, segundo a ASTM D792 (ASTM, 2008). Os resultados do ensaio são exibidos na TAB. 8.

Tabela 8 - Resistência mecânica em densidade

Compósito (PP)% em peso	Densidades (kg/m³)
100/0	904,8 ± 0,1
70/30 FV	1110,4 ± 1,4
70/30 FC	1004,2 ± 3,8

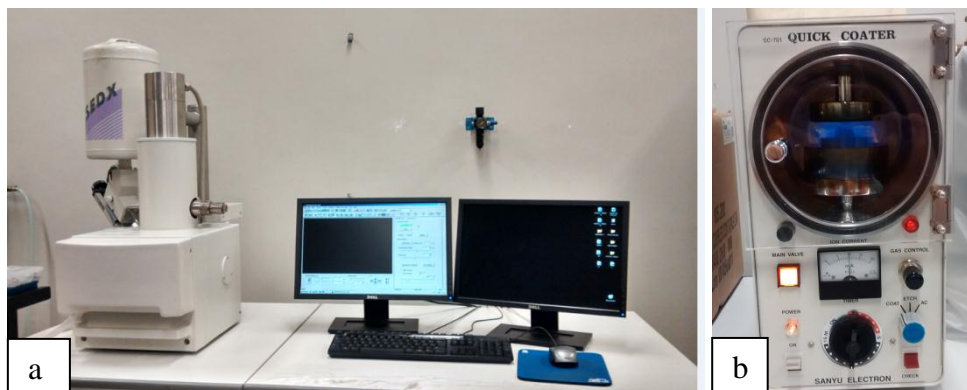
Fonte: Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais.

Pela tabela observa-se que o compósito mais denso é o polipropileno com fibra de vidro. A densidade pode ser determinada por meio do cálculo direto a partir do volume da amostra e de sua massa. Contudo, em geral não é possível determinar a massa com exatidão. Nesses casos, utiliza-se o método de Arquimedes, em que o corpo de prova suspenso por um fio é pesado ao ser imerso em um recipiente com um líquido de densidade inferior a esse.

4.5 Caracterização microestrutural

A microestrutura do compósito foi caracterizada no DEMAT por intermédio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo Shimadzu SSX-550 Superscan, em uma ampliação de 500, 1.000 e 3.000 vezes. As amostras foram fraturadas em nitrogênio líquido e metalizadas com ouro durante 10 minutos a uma corrente de 3 mA. A análise microestrutural foi realizada nas amostras após extrusão e nos corpos de provas injetados para análise da distribuição e adesão das fibras no PP. Na FIG. 26 vê-se o microscópio MEV (a) e o equipamento de metalização por ouro (b).

Figura 26 - Foto do MEV (a), foto do evaporador para revestimento de amostras não condutoras elétricas (b)

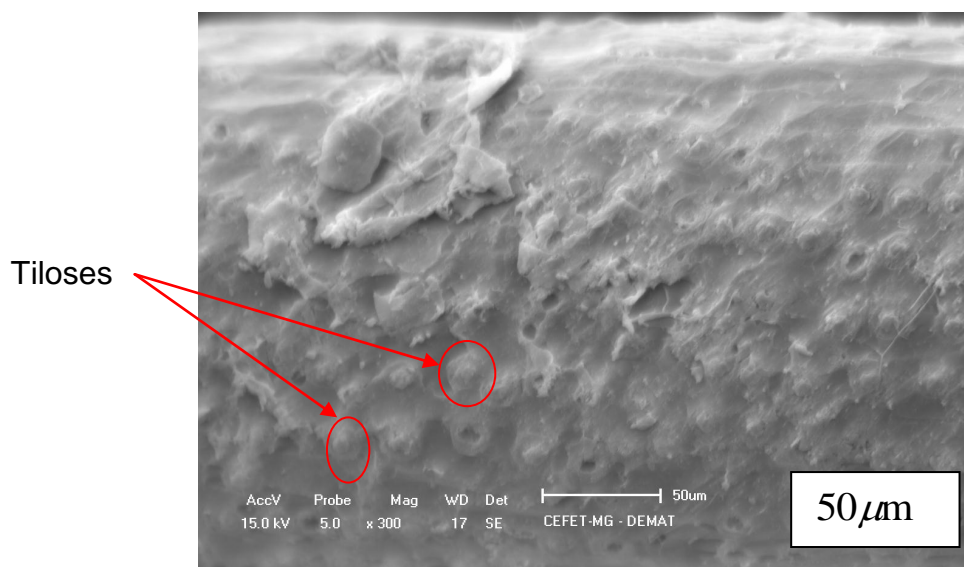


Fonte: elaborado pelo autor.

As fibras de vidro mostraram mais organização dentro da matriz, o que se atribui ao fato de a fibra de vidro apresentar mais peso que a fibra de coco, descendo, portanto, no funil da extrusora com mais facilidade. Como o escorregamento da fibra de coco no funil da extrusora é mais difícil, pois ela é mais leve que a fibra de vidro, o compósito de coco apresentou as fibras mais dispersas, sem uma organização mais direcionada que o compósito de fibra de vidro.

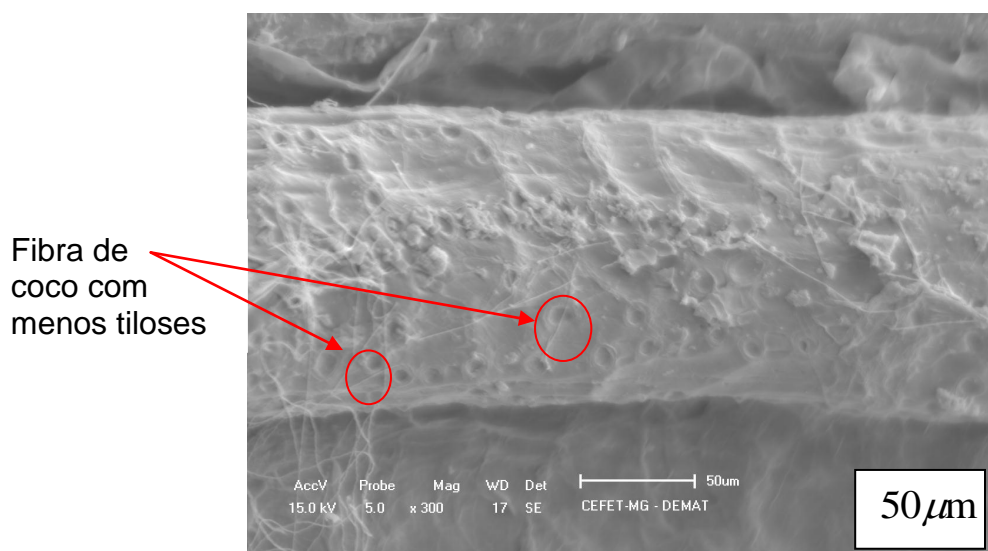
O forno usado para secagem das fibras de coco demonstrou-se eficiente. Na FIG. 27 verifica-se a imagem da fibra de coco antes da secagem, com elevado número de tiloses. E na FIG. 28 observa-se a imagem da fibra de coco após a secagem com número menor de tiloses. A tilose é um material à base de sílica, que diminui a adesão da fibra de coco na matriz polimérica. Sua remoção contribui para melhorar a adesão da fibra de coco no polipropileno.

Figura 27 - Fibra de coco antes da secagem



Fonte: elaborado pelo autor.

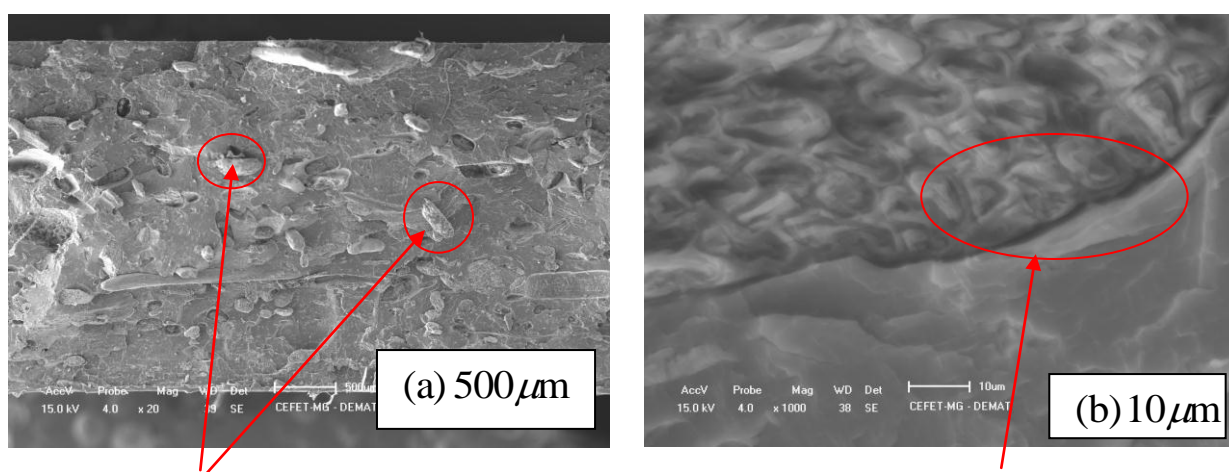
Figura 28 - Fibra de coco após a secagem



Fonte: elaborado pelo autor.

A adesão de uma fibra em uma matriz polimérica depende da afinidade química existente entre a matriz e o polímero, do aditivo usado na fibra para aderir à matriz, processo de extrusão (extrusora com uma rosca ou dupla rosca), tamanho da fibra, preparação da fibra, saída da extrusora e outros fatores. As FIG. 29(a) e 29(b) mostram como a fibra de coco ficou na matriz polimérica.

Figura 29 - Fibra de coco na matriz polimérica a, b



Fibra de coco na matriz polimérica

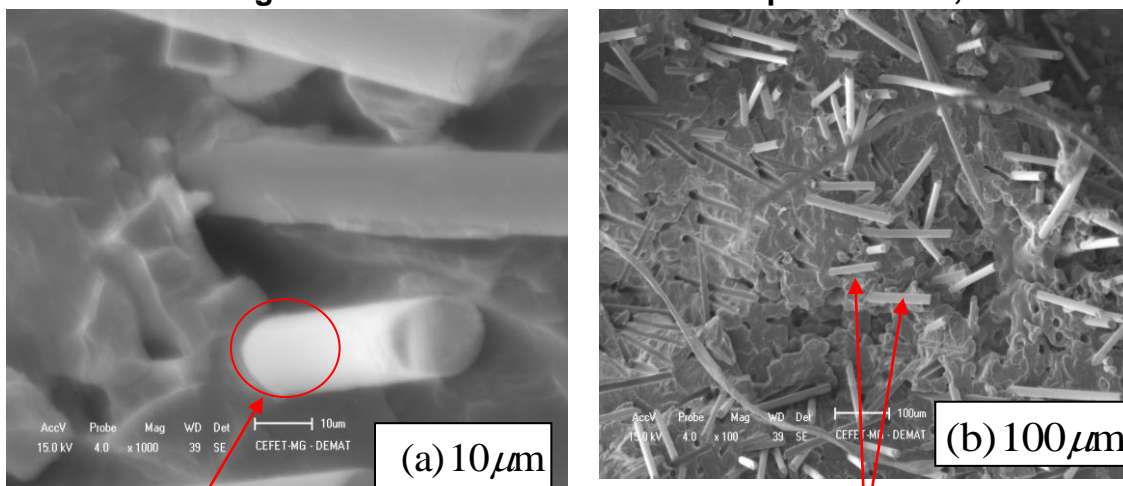
Fonte: elaborado pelo autor.

Adesão da fibra de coco na matriz polimérica

A FIG. 30(a) tem aumento de 20 vezes em um comprimento de 500 μm . Nessa figura as fibras de coco estão dispersas, com vazios na estrutura da matriz polimérica. Já a Figura 30(b) tem aumento de 1.000 vezes em um comprimento de 10 μm . Nessa figura constata-se que a fibra de coco apenas ficou posicionada no polímero, não aderindo completamente na matriz.

As FIG. 31(a) e 31(b) exemplificam como a fibra de vidro ficou na matriz polimérica. A FIG, 32(a) tem aumento de 1.000 vezes em um comprimento de 10 μm . A FIG. 32(b) apresenta aumento de 100 vezes em um comprimento de 100 μm . Verifica-se que as fibras de vidro estão uniformes na matriz, apresentando melhor adesão no polímero. A uniformidade das fibras de vidro e a sua densidade favorecem o processo de extrusão e injeção, conseqüentemente, o material com fibra sintética apresenta distribuição mais uniforme das fibras.

Figura 30 - Fibra de vidro na matriz polimérica a, b



Adesão da fibra de vidro na matriz

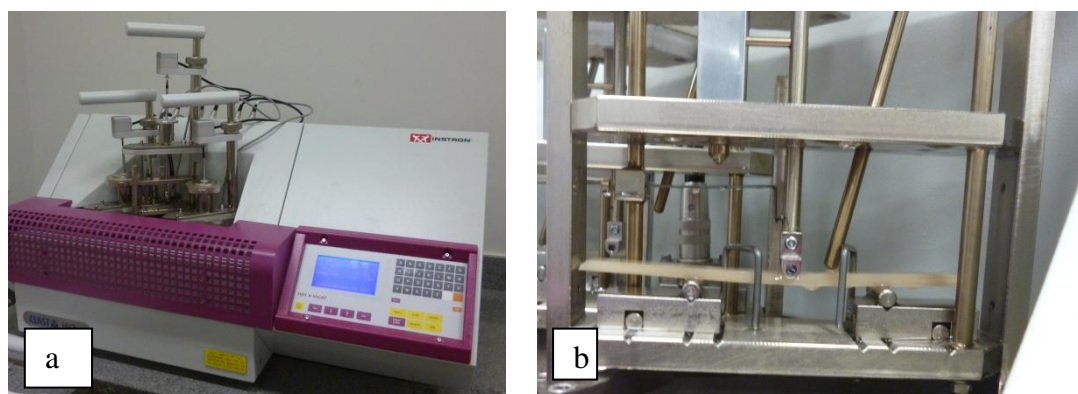
Fonte: elaborado pelo autor.

Fibra de vidro

4.6 Caracterização térmica

O objetivo deste ensaio foi avaliar qual material apresentava a maior deflexão em função do aumento de temperatura. O ensaio de HDT consiste em inserir o corpo de prova em um banho de glicerina, esquentar o fluido e aplicar uma carga. Esse teste foi realizado no DEMAT. Quando o corpo de prova apresentar deflexão de 0,25 mm, a máquina para de esquentar o fluido e marca a temperatura na qual a deformação aconteceu. Os corpos de prova foram realizados no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. As FIG. 31(a) e 31(b) sugerem, respectivamente, a máquina e como o corpo de prova é preparado para o ensaio.

Figura 31 - Foto da máquina para o ensaio de HDT (a), corpo de prova (b)



Fonte: elaborado pelo autor.

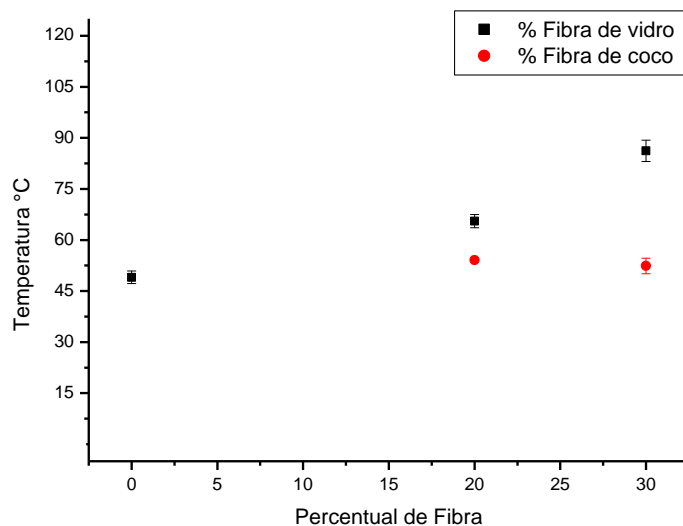
O teste de HDT/VICAT foi realizado com o corpo de prova com 3 mm de espessura. O corpo de prova foi imerso em banho de óleo de glicerina a 28°C. Após a homogeneização térmica que ocorre com 5 minutos do corpo de prova imerso no óleo de glicerina, a carga é aplicada. A carga é calculada de acordo com os parâmetros de espessura e largura do corpo de prova. No HDT é possível fazer dois tipos de teste, o corpo de prova na posição EDGE (em pé) ou na posição FLAT (deitado), tendo-se escolhido a posição EDGE. O teste de HDT apresentou os resultados listados na TAB. 9 .

Tabela 9 - Ensaio de HDT

Compósito (PP)% em peso	Temperatura (°C)	Deflexão (mm)
100/0	49,03 ± 1,85	0,25
80/20 FV	65,53 ± 1,95	0,25
70/30 FV	86,20 ± 3,12	0,25
80/20 FC	54,06 ± 0,40	0,25
70/30 FC	52,36 ± 2,28	0,25

Fonte: elaborado pelo autor.

O teste de HDT/VICAT demonstrou que os corpos de prova com fibra sintética aumentaram a resistência do polipropileno em relação ao material virgem. A carga é aplicada até o sensor situado na cabeça da estação indicar deflexão de 0,25 mm, após o que, automaticamente, o aquecimento do óleo é interrompido. O GRÁF. 5 demonstra os resultados obtidos no ensaio de HDT.

Gráfico 5 - Teste HDT

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7 Teste de fluidez

O teste de fluidez é realizado em *pellets*, com o objetivo de determinar a resistência ao escoamento de um polímero. Em geral, os materiais que são mais resistentes ao fluxo são aqueles com maior peso molecular ou aqueles que são mais fortemente reticulados. Portanto, a partir do índice de fluidez é possível avaliar qualitativamente o peso molecular de um polímero. Conforme a Norma ASTM D-1238 (ASTM, 2010b), o teste destina-se à medida da taxa de extrusão dos *pellets* fundidos por meio de uma matriz de comprimento e diâmetro padronizado, sob determinada condição. A taxa de extrusão para efeito do índice de fluidez é sempre medida tomando-se por base a quantidade de material, em gramas, que é extrudada a partir da matriz em 10 minutos. O teste de fluidez foi realizado somente no polímero virgem, ou seja, sem a composição de fibras. Esse fato ocorreu porque a máquina que realiza o teste de fluidez possui um furo muito pequeno, portanto, as fibras adicionadas ao polipropileno iriam provocar o entupimento da máquina. A Figura 32 exibe a máquina utilizada no teste de fluidez.

Figura 32 - Foto da máquina usada no ensaio de fluidez do polipropileno PX2507



Fonte: elaborado pelo autor.

O polímero PX 2507 apresentou alta fluidez quando aquecido, exibiu taxa de fluidez de 28 g/10minutos, sendo que durante o preaquecimento da máquina de 200°C o polímero já começou a fluir.

4.8 Teste termogravimetria

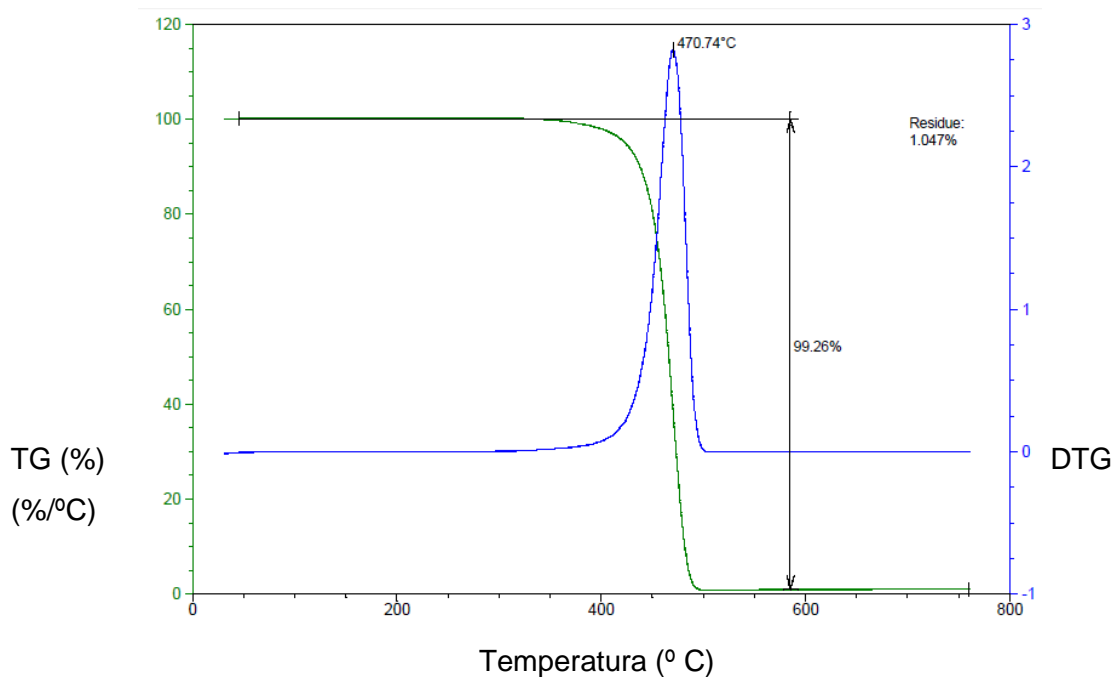
A termogravimetria é definida como uma técnica termoanalítica na qual a massa de uma substância é medida em função da temperatura, enquanto a substância é submetida a uma propagação controlada de temperatura. Pequena quantidade de amostra é colocada em um suporte de amostra alumina, onde sua massa é constantemente monitorada por uma termobalança. O resultado da análise é mostrado sob a forma de um gráfico cuja abscissa contém os registros de temperatura e a ordenada a massa residual.

As curvas termogravimétricas (Tg) foram obtidas em um módulo termogravimétrico TA Q500 (TA *Instruments*), utilizando suporte de amostra de alumina. A amostra foi aquecida de 23°C até 800°C, com uma razão de aquecimento de 20°C/min e atmosfera dinâmica de nitrogênio (N₂) com vazão de gás da ordem de 50 mL/min.

As curvas obtidas para as amostras contendo polipropileno virgem,

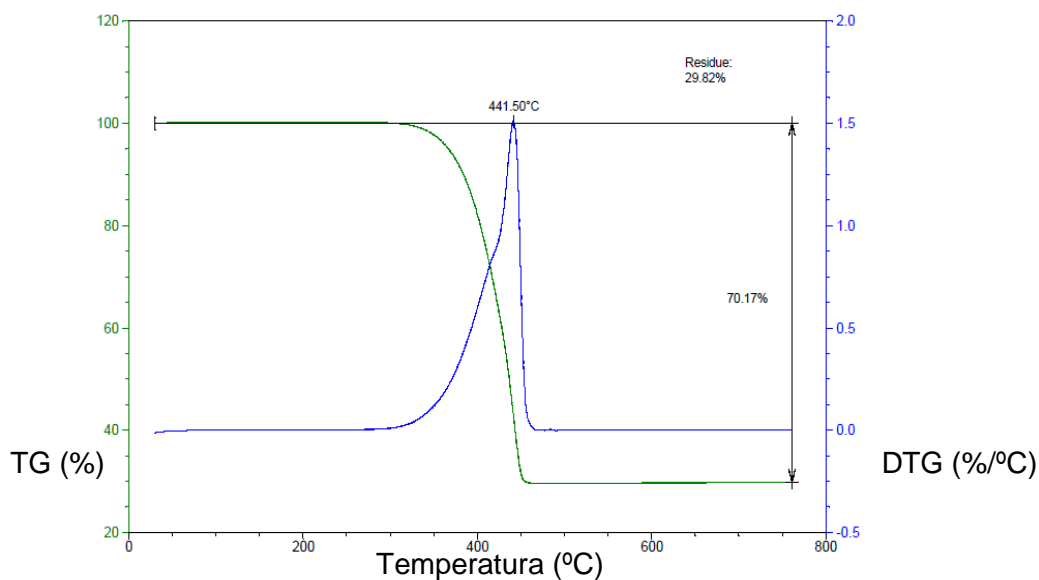
polipropileno com 30% de fibra de vidro e polipropileno com 30% de fibra de coco estão representadas, respectivamente, nos GRÁF. 6, 7 e 8, respectivamente, nos quais podem ser observadas as perdas de massa em função da temperatura e as temperaturas de pico, em que há as maiores perdas de massa.

Gráfico 6 - Análise termogravimétrica do PP puro

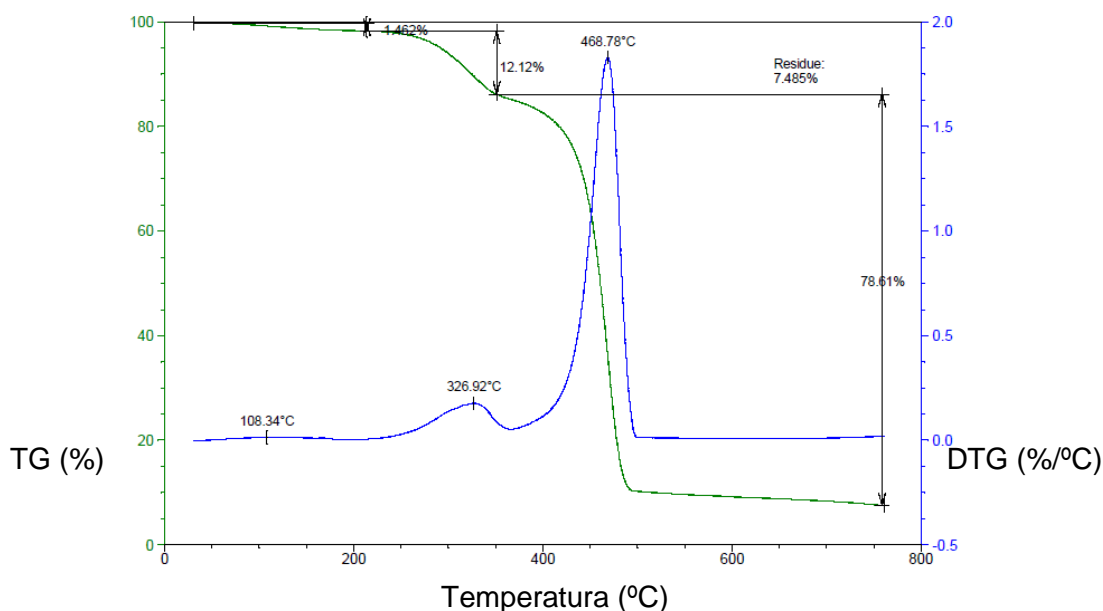


Fonte: Laboratório Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais.

Gráfico 7 - Análise termogravimétrica do PP com 30% de fibra de vidro



Fonte: Laboratório Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais.

Gráfico 8 - Análise termogravimétrica do PP com 30% de fibra de coco

Fonte: Laboratório Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais.

A análise termogravimétrica foi utilizada a fim de identificar a temperatura de degradação de cada amostra. Essa técnica avalia a estabilidade térmica do material, de forma que a partir do momento em que a amostra começa a perder massa, algum evento (físico ou químico) está ocorrendo. Os resultados dos ensaios de termogravimetria são apresentados na TAB. 10.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de termogravimetria

Amostra	Faixa de Temperatura (°C)	Perda de Massa (%)	Temperatura de Máxima Decomposição (°C)	Resíduos estáveis a 800° C (%)
PP/ puro	23-800	99,26	470,74	1,047
PP/30% de fibra de vidro	23-800	70,17	441,50	29,82
PP/30% de fibra de coco	20-200	1,462	108,34	7,485*
	200-370	12,12	326,92	
	370-800	78,61	468,78	

*O formato da curva indica que a perda de massa poderia continuar em temperaturas superiores à temperatura final deste ensaio (800° C).

A temperatura de início de degradação de cada amostra foi determinada pela temperatura *onset* de cada curva. A partir do momento em que é apurada queda da massa da amostra inicial, a temperatura correspondente a essa queda é a temperatura inicial de degradação da amostra.

Os resultados das análises térmicas demonstram que o polipropileno virgem perdeu mais massa, seguido do material com fibra de coco e, por último, o polipropileno com fibra de vidro. A uniformidade do polipropileno faz com que ele perca mais massa, pois todo o material sentiu o mesmo efeito do aumento de temperatura. Já nos compósitos, cada material manifestou um comportamento diferente, devido ao aumento de temperatura.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho objetivou caracterizar e comparar o comportamento mecânico e térmico de compósitos de fibra de vidro e fibra de coco com cargas de 20% e 30% em uma matriz polimérica de polipropileno de nome comercial PX2507. Com o intuito de realizar essa caracterização, oito ensaios foram realizados: tração, impacto, flexão, densidade, microscopia de varredura eletrônica, temperatura de deflexão térmica, fluidez e termogravimetria.

A partir dos valores obtidos dos ensaios de tração, concluiu-se que o processamento das fibras de coco gerou muitos poros na matriz polimérica, reduzindo, assim, a sua resistência à tração. O polipropileno com fibra de vidro teve mais resistência à tração, pois as fibras sintéticas elevaram a resistência do material. O aumento da porcentagem de fibra de vidro demonstrou que favorece o aumento da resistência à tração nas proporções observadas. Entretanto, o compósito com fibra de coco reduziu a resistência à tração em relação ao compósito puro mesmo em proporções maiores. A tenacidade dos compósitos com fibras é menor que a tenacidade do compósito puro.

O ensaio de impacto Izod revelou que os compósitos com fibra de vidro apresentaram mais resistência ao impacto, seguido do polímero virgem. Os compósitos com fibra de coco tiveram menos resistência ao impacto. A baixa resistência dos compósitos de fibra de coco ao ensaio de impacto é explicada pelos poros criados na matriz polimérica durante o processo de extrusão da fibra de coco com o polímero.

O ensaio de flexão salientou que o compósito de fibra de vidro possui mais resistência à flexão seguido do compósito de fibra de coco. Os dois tipos de fibra conseguiram aumentar a resistência do material virgem nas proporções analisadas.

O teste de densidade revelou que o polímero virgem obteve menor densidade seguido do polímero com fibra de coco. Verifica-se que as diferenças de densidades obtidas entre os compósitos não têm grandes variações de um material para outro.

O teste de microscopia de varredura eletrônica MEV enfatizou que o compósito com fibra de vidro possui melhor uniformidade na distribuição das fibras na matriz polimérica. Devido ao processamento das fibras de coco para

serem extrudadas, elas apresentaram falta de uniformidade em seu tamanho, baixa adesão à matriz polimérica (aditivos não foram usados para aderir à fibra de coco na matriz polimérica) e criaram grandes vazios na matriz polimérica, diminuindo, assim, a resistência do compósito nos ensaios mecânicos. A secagem das fibras de coco no forno mostrou-se ser um processo eficiente para secar as fibras. O processo de secagem e limpeza das fibras de coco foi eficiente, mas para uma escala industrial outros meios menos onerosos devem ser desenvolvidos. A quantidade de material retirado das fibras de coco poderia ser maior, uma vez que a concentração de hidróxido de sódio utilizada foi de 1%; para concentrações mais fortes a retirada de tiloses da fibra de coco é mais eficiente.

O ensaio de temperatura de deflexão térmica HDT demonstrou que os compósitos com fibra de vidro apresentaram mais resistência à flexão devido ao aumento de temperatura. Já os compósitos com fibra de coco aumentaram a sua resistência à flexão, ficando superior ao polímero virgem. O teste também revelou que o aumento das proporções das fibras na matriz polimérica aumenta a resistência do material no teste realizado.

No teste de fluidez, verificou-se que o PX2507 é um polímero de baixa densidade, apresentando resistência muito baixa à fluidez quando é aquecido. Portanto, o polímero analisado é composto de pequenas cadeias de polímeros, com baixa densidade.

Na caracterização térmica, por meio da Tg, observou-se que a adição de fibras ao polímero não aumentou a estabilidade térmica do PP puro. Quando avaliada a estabilidade térmica do PP com os compósitos de fibra, concluiu-se que o PP puro é mais estável termicamente, pois a adição de fibras nas proporções estudadas diminuiu a estabilidade térmica do material virgem.

Podem-se citar as vantagens do uso das fibras de coco na matriz polimérica, pois o compósito apresentou aspecto visual interessante, podendo ser utilizadas em processo de decoração e mais estabilidade ambiental.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Melhorar a adesão das fibras de coco na matriz polimérica.
- b) Desenvolver um processo para melhorar a uniformidade das fibras de coco para serem processadas com polímero.
- c) Estudar uma melhoria no processo de secagem das fibras de coco.
- d) Desenvolver aplicações para o compósito de fibra de coco com polímero.
- e) Estudar o comportamento mecânico de compósitos reforçados com fibra de coco em diferentes matrizes poliméricas tradicionalmente reforçadas com fibra de vidro.

REFERÊNCIAS

ABREU, F.O.S.M.; FORTE, M.M.C.; LIBERMAN, S.A. Propriedades mecânicas e morfologia de blendas de polipropileno com TPEs. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 1, p. 71-78, 2006.

ALBUQUERQUE, J.A.C. **Planeta plásticos**: tudo que você precisa saber sobre plásticos. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D790-10**. Standard Test Methods for Flexural Properties of unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1238-13** Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-10**. Standard Test Methods for Tensile Strength of Plastics, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010c.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D256-10**. Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010d.

ANDRADE, S. História dos compósitos no Brasil. *In*: ABMACO (org). **Compósitos 1**: materiais, processos, aplicações, desempenhos e tendências. São Paulo: ABMACO (Associação Brasileira de Compósitos), 2008.

ARAGÃO, W.M.; RIBEIRO MELO, M.F.V. Cultivares de coqueiro para a produção de coco seco: coqueiro gigante vs híbridos. *In*: CINTRA, F.L.D. *et al.* (ed.). **Fundamentos tecnológicos para a revitalização das áreas cultivadas com coqueiro gigante no Nordeste do Brasil**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, p. 37-60, 2009. 232 p.

BERGER M. *et al.* **Tradução em plástico industrial**. Local? p. 18, maio 1999.

CANEVAROLO Jr, S.V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artibler, v. 1, 2007. 448 p.

CASARIN, S.A. **Desenvolvimento e caracterização de blendas e compostos empregando polímeros biodegradáveis**. 2004. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em ciências e engenharia de matérias, São Carlos-SP.

CASTELLANOS, O.L. Materiales compuestos: matrices, refuerzo e interfase. **Revista Polímeros Aplicados**, Barcelona, p. 19-22, 2001.

CHIAVERINI, V. **Estrutura e propriedades das ligas metálicas**. Makron Books, 2. ed., v. I, II, III, 1986.

COUTINHO, F.M.B.; COSTA, T.H.S. Síntese e caracterização de catalisadores Ziegler-natta a base de $TiCl_3$ para polimerização de propileno. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 1991.

COZACIUC, I., SILVA, L.R.; TOGNI, M.A. **Telecurso 2000, ensaio de materiais**. Disponível em: <http://followscience.com/content/259035/nocoes-basicas-de-laboratorio-de-materiais-e-metalografia#sthash.LQz3Fbn9.dpuf>. Acesso em: 20 ago. 2013.

DAVIS, H.E.; TROXELL, G.E.; HAUCK, G.F.W. **The testing of engineering materials**. USA: McGraw-Hill, 4. ed., p. 371, 1982.

DE, S.K.; WHITE, J.R. **Short fibre-polymer composites**. Woodhead, Publishing Limited England, p. 2-65, 1996.

ELMAJDOUBI, M.; VU-KHANH, T. **Effect of cooling rate on fracture behaviour of polypropylene**. Canada: Elsevier Science, 2003.

FREEDONIA. 2002. Disponível em: <<http://www.freedoniagroup.com>>. Acesso em: 25 ago. 2013.

FU, S.Y. *et al.* **Composites**. Part A. 31. ed., p. 1117, 2000.

GUTIÉRREZ, C.; EMMANUEL, T. Futuro en los plásticos. **Ciências**, n. 96, p. 62-69, oct.-dic., 2009.

HAGE JR., E. Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros. **Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia**, p. 6-9, abr. 1998.

HÉBER, A.N. **Síntese sobre a indústria mundial e brasileira de resinas termoplásticas**. Relatório da Gerência de Informação e Conhecimento INDI/DPR/IC. Belo Horizonte-MG, p. 4, out. 2012.

KLEBA, I.; ZABOLD, J. Poliuretano com fibras naturais ganha espaço na indústria automotiva. **Revista Plástico Industrial**, São Paulo, n. 75, p. 88-99, nov. 2004.

LIEBERMAN, R.B.; BARBE, P.C. Propylene polymers. *In: Encyclopedia of Polymer Science & Engineering*. NY: John Willey & Sons, Inc, 2. ed., v. 13, p. 531, 1998.

MARINELLI, A.L. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 18, n. 2, p. 92-99, 2008.

MATTHEWS, F.L.; RAWLINGS, R.D. **Composite materials: engineering and science**. London: Chapman & Hall, 1994.

MELO, T.J.A. *et al.* Propriedades mecânicas e morfologia de uma blenda polimérica de PP/HIPS compatibilizada com SEBS. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 82-89, 2000.

MENDONÇA, P.T.R. **Materiais compostos & estruturas sanduíches**. Barueri (SP): Manole, 2005.

MOL, A.P.J. **The refinement of production: ecological modernization theory and the chemical industry**. 1995. Disponível em: <http://www.enp.wur.nl/NR/rdonlyres/10455A53-B1F5-4BA5-9F68-614CE241511B/144953/Mol1995TheRefinementofProduction.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2014.

MORAES, A.B. **Caracterização mecânica de compósitos injetados em molde com resinas de fontes renováveis reforçadas por fibras naturais de sisal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2012. 188 f.

MORSYLEIDE, F.R. *et al.* Plásticos biodegradáveis à base de amido reforçados com fibras de coco. **Circular Técnica**, 30 on line, 1. ed., Fortaleza, CE, set. 2010. 5 p.

MORTON-JONES, D.H.; ELLIS, J.W. **Polymer products: design, materials and processing**. London, Chapman and Hall, 1986.

NAGEM, N.F. **Projeto UFMG: Magnesita**, Relatórios Técnicos Internos, 2001.

NIELSEN, L. **Mechanical properties of polymers and composites**. USA: Marel Dekker Inc, v. 2, 1974.

NECHWATAL, A.; MIECK, K.P.; REUBMANN, T. Composites science and technology. v. 63, p.1273, 2003.

ORÉFICE, R.L **Notas de aula da disciplina Física dos Polímeros**, UFMG, 2013.

PASSOS, P.N.C. **A Conferência de Estocolmo como ponto de partida para a proteção internacional do meio ambiente**. Texto completo, v. 6, 2009. Disponível em: <http://revistaeletronicardfd.unibrasil.com.br/index.php/rdfd/article/view/18/17>>. Acesso em: 27 dez. 2013.

PINO, H.A.G. **Biossorção de metais pesados utilizando pó da casca de coco verde (cocos nucifera)**. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

RABELLO, M. **Aditivação de polímeros**. São Paulo: Artibler, v. 2, 2011. 240 p.

ROSA, M.F. *et al.* Effect of fiber treatments on tensile and thermal properties of starch/ethylene. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 5196-5202, 2009.

SALAZAR, V.L.P.; LEÃO, A.L. **Biodegradação das fibras de coco e de sisal aplicadas na indústria automotiva**. 2006. Disponível em: http://200.145.140.50/html/CD_REVISTA_ENERGIA_vol6/vol21n22006/artigos/Vera%20Lucia%20Pimentel%20Salazar.pdf. Acesso em: 20 maio 2013.

SHENOY, A.V.; SAINI, D.R. Thermoplastic melt rheology and processing. **Revista Plastic Engineering**, New York, v. 37, p. 312-391, 1996.

SILVA, A. **Compósitos**. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. 2003. Disponível em <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/53756/1/Compositos_0.pdf#search=%22comp%C3%B3sitos%22> Acesso: 25 de Maio de 2013.

SILVESTRE, P.; SILVA, H.T. **Frutas Brasil Frutas**. 1996. Disponível em: <<http://www.bibvirt.futuro.usp.br/especiais/frutasnobrasil/coco.html>> Acesso em: 26 maio 2013.

SUDELL, B.C. *et al.* A survey into the application of natural fibre composites in the automotive industry. **Natural Polymers and Composites**, São Paulo, v. 4, 2002. **Anis**, p. 455-460, 2002.

TANCREZ, J.P.; RIETSCH, F.; PABIOT, J. Influence of composition and solicitation conditions on the rupture characteristics of injection-molded glass-fiber-reinforced polypropylene composite. **European Polymer Journal**, v. 30, n. 7, p. 789-801, 1994.

THOMASON, J.L. The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene: 5. Injection moulded long and short fibre PP, Composites Part A-Applied. **Science and Manufacturing**, v. 33, n. 12, p. 1641-1652, 2002.

UTRACKI, L.A. History of commercial polymer alloys and blends. **Polym Eng Sci**, v. 35, p. 2, 1995.

AMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Natural fibers: Can they replace glass in fibre reinforced plastics? **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 9, p. 1259-1264, 2003.

YANG, H.H. **Kevlar aramid fiber**. Nova Jersey: Wiley, 1993.

APÊNDICE A

Massa de fibra de coco que foi secada ao forno - continua

Bandeja	Peso do material	Peso do
	com umidade kg	material seco kg
1A	0,037	0,024
2A	0,036	0,024
3A	0,027	0,022
4A	0,064	0,027
5A	0,043	0,022
6A	0,076	0,035
1B	0,045	0,019
2B	0,06	0,035
3B	0,079	0,044
4B	0,03	0,022
5B	0,028	0,019
6B	0,022	0,018
1C	0,033	0,022
2C	0,078	0,04
3C	0,061	0,03
4C	0,03	0,02
5C	0,069	0,029
6C	0,033	0,022
1D	0,03	0,022
2D	0,039	0,019
3D	0,022	0,013
4D	0,029	0,019
5D	0,069	0,031
6D	0,072	0,022
TOTAL	1,112	0,6

Massa de fibra de coco que foi secada ao forno - continua

Bandeja	Peso do material	Peso do
	com umidade kg	material seco kg
1A	0,024	0,018
2A	0,018	0,014
3A	0,046	0,028
4A	0,032	0,025
5A	0,021	0,013
6A	0,045	0,028
1B	0,019	0,015
2B	0,027	0,02
3B	0,063	0,042
4B	0,038	0,024
5B	0,03	0,023
6B	0,02	0,015
1C	0,033	0,025
2C	0,026	0,02
3C	0,026	0,02
4C	0,042	0,033
5C	0,048	0,029
6C	0,052	0,036
1D	0,025	0,019
2D	0,08	0,029
3D	0,089	0,029
4D	0,098	0,03
5D	0,15	0,041
6D	0,132	0,04
TOTAL	1,184	0,616

Massa de fibra de coco que foi secada ao forno - conclui

Bandeja	Peso do material com umidade kg	Peso do material seco kg
1A	0,112	0,04
2A	0,159	0,049
3A	0,176	0,054
4A	0,082	0,035
5A	0,097	0,034
6A	0,124	0,046
1B	0,114	0,036
2B	0,105	0,033
3B	0,135	0,041
4B	0,13	0,042
5B	0,132	0,045
6B	0,094	0,033
1C	0,096	0,041
2C	0,116	0,04
3C	0,127	0,046
4C	0,192	0,053
5C	0,177	0,051
6C	0,163	0,049
1D	0,029	0,04
TOTAL	2,36	0,808

Fonte: elaborado pelo próprio autor.