



## COMPÓSITOS DE POLIPROPILENO RECICLADO E PÓ DE COCO

Bianca Bastos dos Santos

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Materiais da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Marysilvia Ferreira da Costa

Rio de Janeiro  
Setembro de 2012

# COMPÓSITOS DE POLIPROPILENO RECICLADO E PÓ DE COCO

Bianca Bastos dos Santos

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE MATERIAIS.

Examinado por:

---

Prof<sup>ª</sup>. Marysilvia Ferreira da Costa, D.Sc.

---

Prof<sup>ª</sup>. Rossana M. M. Thirè, D.Sc.

---

Carolina Carvalho de Mello, M.Sc.

RIO DE JANEIRO/ RJ – BRASIL

SETEMBRO de 2012

Santos, Bianca Bastos dos

Compósitos de polipropileno reciclado e pó de coco/  
Bianca Bastos dos Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola  
Politécnica, 2012.

XI, 40 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marysilvia Ferreira da Costa

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso  
de Engenharia de Materiais, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 37-39

1. Compósitos com reforços naturais. 2. Módulo de  
elasticidade. 3. Polipropileno. 4. Pó de coco. 5. Caracterização.  
I Costa, Marysilvia Ferreira da. II. Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de  
Materiais. III. Compósitos de polipropileno com pó de coco.

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
João Rafael e Mônica, aos meus  
irmãos João Guilherme e Bruna e  
aos meus avós Hélio e Velúcia.*

## Agradecimentos

---

A Deus, que me dá forças para superar os obstáculos e me motiva a tentar me tornar a cada dia uma pessoa melhor.

A minha família, por todo amor, suporte, carinho, dedicação e compreensão que me oferecem em todas as etapas da minha vida.

Ao meu namorado Rodrigo, por todo apoio, carinho, companheirismo e compreensão e por estar sempre ao meu lado.

A professora Mary por me orientar nessa etapa tão importante de conclusão da minha graduação e por todo incentivo.

A Carol e Geovânio por toda ajuda que me deram na parte experimental, sempre tão solícitos e atenciosos.

A Luisa (LabPol), Rodrigo (Laboratório de Multiusuários), Grazielle (LMSCP) e Rodrigo e Alexander (Cepel) por todo auxílio na realização dos ensaios e todo o esforço para que fosse concluído num tempo disponível tão curto.

A todos do LabPol, que me acolheram e me receberam sempre com tanta simpatia e carinho.

A Clara, Ju e Nathália, pela enorme contribuição na arrecadação dos copos descartáveis.

A Mariana por ter me ajudado tanto nessa reta final do projeto e ao Pedro por ter me ajudado com o moinho.

Aos demais alunos da Metalmat que dividiram tantos sorrisos e dificuldades, e que fizeram todos esses anos de graduação tão especiais, principalmente Bárbara, Clara, Mariana, Juliana, Nathália, Breno, João Gabriel, Felipe, Douglas e Lays.

Ao corpo docente do Departamento de Metalurgia e Materiais, que contribuíram imensamente para minha formação acadêmica.

Ao Cepel pelos ensaios de MEV e ao LMSCP pelos ensaios de DSC

A CNPq-PIBIC pelo auxílio financeiro

A Clariant e a DILIMP pela doação dos aditivos (compatibilizante, antioxidante e de ajuda ao processo) e do pó de coco, respectivamente.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste projeto.

A todos vocês, muito obrigada!

Bianca

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Materiais.

## Compósitos de polipropileno reciclado e pó de coco

Bianca Bastos dos Santos

Setembro/2012

Orientador: Marysilvia Ferreira da Costa

Curso: Engenharia de Materiais

Os impactos ambientais provocados pelo descarte de plásticos motivam a busca por novas alternativas para os mesmos após seu uso. A reciclagem de polímeros acarreta na degradação de suas propriedades, que podem ser alteradas pela adição de cargas, ampliando seu campo de aplicação. Para isso, se faz necessário o uso de aditivos eficazes em quantidades adequadas. Nesse trabalho, foram produzidos compósitos de polipropileno originário de copos descartáveis reforçados com 2%, 5% e 10% de pó de coco com e sem a presença de aditivos. Esses compósitos foram obtidos através da extrusão, para mistura e homogeneização, seguida de moldagem por compressão, para fabricação dos corpos de prova. Estes foram então caracterizados por ensaios de tração, difração de raios X, calorimetria diferencial de varredura e microscopia eletrônica de varredura na superfície de fratura. Constatou-se a eficácia da adição de pó de coco no melhoramento do módulo de elasticidade do polipropileno reciclado além da efetividade dos aditivos usados na promoção da adesão do pó à matriz. Teores mais elevados de pó de coco ocasionaram, entretanto, o surgimento de bolhas de ar no interior do material, o que contribuiu para sua fragilização. A adição do pó de coco promoveu também uma diminuição no grau de cristalinidade do polipropileno.

Palavras-chave: compósitos com reforços naturais, pó de coco, polipropileno, reciclagem.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Engineer.

## COIR DUST REINFORCED RECYCLED POLYPROPYLENE COMPOSITES

Bianca Bastos dos Santos

September/2012

Advisor: Marysilvia Ferreira da Costa

Course: Materials Engineering

The environmental impacts caused by disposed plastics encourage the search for new alternatives to them after use. Recycling polymers leads to the degradation of their properties, which can be modified by the addition of fillers, expanding their range of application. For success, it is necessary to use additives in effective suitable amounts. In this paper, recycled polypropylene from plastic cups with 2%, 5% and 10% of coir dust were produced with and without the addition of additives. This composites were made by extruding, for mixing and homogenization, followed by compression molding to manufacture the specimens. They were characterized by tensile tests, X-ray diffraction, differential scanning calorimetry and scanning electron microscopy on the fracture surface. It was verified the effectiveness of the addition of coir dust in improving the elasticity modulus of recycled polypropylene besides the effectiveness of additives used in promoting the adhesion of the powder to the matrix. However, higher levels of coir dust caused the appearance of air bubbles inside the material, which contributed to its embrittlement. The addition of coir dust promoted a decrease in the degree of polypropylene crystallinity.

Keywords: natural filler composite, coir dust, polypropylene, recycling.

## Sumário

---

Lista de Figuras .....	x
Lista de Tabelas .....	xi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 POLIPROPILENO.....	3
2.2 RECICLAGEM .....	5
2.3 FIBRA E PÓ DE COCO.....	5
2.4 COMPÓSITOS .....	7
2.5 ADITIVOS.....	9
2.6 TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO .....	11
2.6.1 EXTRUSÃO.....	11
2.6.2 MOLDAGEM POR COMPRESSÃO .....	12
2.7 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO .....	12
2.6.1 TRAÇÃO UNIAXIAL .....	12
2.6.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX) .....	15
2.6.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	16
2.6.4 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC).....	18
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS .....	20
3.1 MATERIAIS.....	20
3.1.1 PREPARAÇÃO DO POLIPROPILENO .....	20
3.1.2 PREPARAÇÃO DO PÓ DE COCO .....	20
3.2 PREPARAÇÃO DO COMPÓSITO .....	21
3.2.1 EXTRUSÃO.....	21
3.2.2 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA .....	22



3.3	CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO .....	23
3.3.1	TRAÇÃO UNIAXIAL .....	23
3.3.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX) .....	23
3.3.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	23
3.3.4	CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC).....	23
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....		25
4.1	TRAÇÃO UNIAXIAL .....	25
4.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX).....	28
4.3	CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC) .....	31
4.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) .....	32
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO .....		36
CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		37
ANEXO 1 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS NO AJUSTE DAS CONDIÇÕES DE PROCESSO .....		40

## Lista de Figuras

Figura 1. Análise granulométrica do pó de coco moído no moinho planetário de bolas por 30 minutos e 208 rpm. [26] .....	21
Figura 2. Curvas médias de tração dos corpos de prova do grupo 1 .....	26
Figura 3. Curvas médias de tração dos corpos de prova do grupo 2 .....	26
Figura 4. Curvas médias de tração dos corpos de prova do grupo 3. ....	27
Figura 5. Comparação entre os módulos de elasticidades (MPa) dos diferentes grupos.	27
Figura 6. Superfícies de fratura do ensaio de tração dos corpos de prova com aditivos.	28
Figura 7. Difractogramas obtidos para as amostras de PP com 2%, 5% e 10% e PP puro. ....	29
Figura 8. Esquematização de curvas obtidas por DRX de grande ângulo para PP isotático (a), sindiotático (b) e atático (c) [2]. ....	30
Figura 9. Curvas obtidas no ensaio de DSC para os corpos de prova com 2%, 5%, 10% e sem pó de coco com aditivos, fluxo endotérmico para cima. ....	31
Figura 10. PP com 10% de pó de coco com aditivo. ....	33
Figura 11. PP com 10% de pó de coco, sem aditivos. ....	33
Figura 12. PP sem pó de coco. ....	34
Figura 13. PP com 10% de pó de coco, com aditivos. ....	34
Figura 14. PP com 10% de pó de coco, sem aditivos. ....	35

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1: Condições de Moldagem .....	22
Tabela 2: Propriedades mecânicas dos corpos de prova ensaiados .....	28
Tabela 3: Áreas cristalina (I <sub>c</sub> ) e amorfa (I <sub>a</sub> ) e grau de cristalinidade. ....	29
Tabela 4: Comparação entre os ângulos de difração (2θ) da literatura [27] com os principais picos obtidos. ....	30
Tabela 5: Temperaturas máximas, áreas e delta H calculados para os picos obtidos nas curvas do DSC. ....	32

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

---

A preocupação com os danos causados pelo homem ao meio ambiente é crescente. Por isso, tem-se investido muito em pesquisas relacionadas à reciclagem de produtos e utilização de fontes renováveis em aplicações tecnológicas, buscando o uso e a criação de materiais que reduzam esses estragos causados. É possível perceber essa mudança de mentalidade em diferentes níveis da sociedade: as empresas começam a se responsabilizar não apenas pela fabricação e venda de seus produtos, mas também pelo seu destino final e cada vez mais a separação de materiais na hora de seu descarte para posterior reciclagem faz parte da nossa rotina.

Materiais plásticos contribuem muito para redução da vida útil dos aterros sanitários, uma vez que, além de ocuparem um grande volume do mesmo, demoram muito tempo para se degradar. O polipropileno, por seu baixo custo, disponibilidade e pelas suas propriedades físicas, é um termoplástico de aplicação geral muito usado industrialmente, estando presente de forma significativa entre os materiais plásticos descartados.

Uma excelente alternativa para minimizar esse problema é a reciclagem destes materiais, reprocessando-os e transformando-os assim em novos produtos. A reciclagem de plásticos gera, entretanto, uma natural perda de suas propriedades, que já haviam começado a se deteriorar na sua fabricação e ao longo de sua utilização até seu descarte.

A adição das cargas corretas em quantidades apropriadas promove a melhora das propriedades mecânicas do polímero, expandindo suas possíveis aplicações. Esse material formado é conhecido como material compósito e normalmente se adiciona como carga, uma fibra sintética.

Nas últimas duas décadas, as fibras naturais receberam uma atenção considerável como um substituto para fibras sintéticas como reforço em plásticos. Esse tipo de reforço oferece vantagens econômicas e ambientais em relação aos reforços inorgânicos, pois possuem baixo custo, grande disponibilidade, desgastam menos os equipamentos e são biodegradáveis. O coco é largamente produzido no Brasil e a

utilização da fibra retirada de sua casca além de possibilitar a produção de um material de baixo custo, também ajuda na redução do lixo sólido.

## **1.1 OBJETIVOS**

Desenvolver um compósito utilizando polipropileno reciclado reforçado com pó de coco, com intuito de melhorar as propriedades já deterioradas desse polímero.

Caracterização das propriedades físicas e químicas deste compósito, analisando a influência de diferentes teores de pó de coco e da presença dos aditivos.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 POLIPROPILENO

O polipropileno (PP) é um polímero termoplástico produzido através da polimerização do propileno. A forma comercial de PP mais amplamente utilizada é produzida através de catalisadores que geram cadeias poliméricas cristalizáveis. Isso dá origem a um produto sólido semicristalino com boas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. [1]

Desde o seu desenvolvimento, em 1954, sua produção e seu uso experimentam um desenvolvimento espetacular. Isso porque o PP é um produto com qualidade de “plásticos de engenharia” que é vendido a preço dos materiais *commodities*. [2]

O polipropileno é um dos polímeros mais largamente usados no mundo e em 2005, representava aproximadamente 23% de todos os termoplásticos produzidos no Brasil. Essa ampla utilização é devida à grande disponibilidade e baixo custo de seu monômero, baixo custo de fabricação e atrativas propriedades. Estas podem ser modificadas para se adequarem a uma extensa variedade de aplicações. O polipropileno pode ser processado por quase todas as técnicas comerciais de fabricação de materiais plásticos, sendo classificado como um termoplástico de aplicação geral. [2, 3, 4]

Com o desenvolvimento de novos métodos de polimerização e a ampliação da competitividade para gerar polímeros resistentes, surgiram sistemas mais efetivos para a estabilização do PP, necessária por ele ser um hidrocarboneto. Muitos aditivos são incorporados, mas alguns deles são incompatíveis com a matriz polimérica por serem polares. Os aditivos usados com mais frequência são os pigmentos, as cargas, os retardantes de chama e os corantes. [2]

Como na maioria dos materiais termoplásticos, as principais propriedades do PP são provindas da amplitude da distribuição dos comprimentos das cadeias tpoliméricas e do comprimento médio destas em um dado produto. No estado sólido, as principais propriedades do PP refletem o tipo e grau de fases cristalinas e amorfas formadas pelas cadeias poliméricas. [1]

As características do PP são decorrentes principalmente da forma assimétrica de seu monômero, que dá à inserção do monômero uma orientação, criando várias possibilidades distintas de ligação para a formação da cadeia polimérica. [1, 3]

No PP isotático, todos os grupos metil possuem a mesma configuração em relação à cadeia principal. No PP sindiotático, os grupos metil possuem configuração alternada e o PP atático possui configuração aleatória. Devido a sua configuração, o PP atático não cristaliza. Comercialmente, o PP isotático é a forma mais significativa do PP. Na prática, não se verifica presença de 100% de uma ou outra configuração e podem existir defeitos na sequência da taticidade. [2, 3]

A taxa de cristalização atingida pelo PP fica entre 30 e 65%, sendo dependente de fatores como: cinética de cristalização, massa molar e distribuição de massa molar, o fato de o polímero ser homopolímero ou copolímero, a presença de aditivos, o grau de orientação molecular e o efeito da cristalização induzida pelo cisalhamento. A técnica de difração de raios X permite a diferenciação dos tipos de taticidade. [2]

O PP é um forte competidor entre os demais termoplásticos, devido a sua versatilidade de estrutura molecular. As estruturas químicas são baseadas na estereorregularidade e em seu grau e sua distribuição. As propriedades mecânicas do PP dependem também da relação entre suas fases cristalinas e amorfas, podendo ter um comportamento desde flexível, semiflexível, até rígido. É necessário conhecer intimamente a relação entre estrutura e propriedade de deformação do PP tanto a curto quanto em longo prazo. [2]

O PP possui propriedades físicas, mecânicas e térmicas excelentes e desejáveis quando usado em aplicações à temperatura ambiente. É um polímero relativamente rígido e possui alto ponto de fusão, baixa densidade, resistência ao impacto relativamente boa, excepcional resistência à ruptura por flexão, alta resistência química e a solventes, excelentes propriedades elétricas, boa estabilidade térmica e baixo custo. [1,4]

O polipropileno é utilizado geralmente na confecção de para-choques de carros, carcaças de eletrodomésticos, brinquedos, recipientes, sacaria, material hospitalar, embalagens, etc. A maioria dos polipropilenos é produzida por moldagens por injeção, por sopro ou por extrusão, a partir de compostos com ou sem reforços. [4]

## **2.2 RECICLAGEM**

A reciclagem pode ser entendida como a otimização do uso de energia e matérias-primas empregadas na fabricação de produtos através da implementação de diferentes processos e técnicas. [4]

Ultimamente, o crescente aumento do uso de produtos plásticos e o consequente aumento da geração desse tipo de resíduo é motivo de grande preocupação quanto ao seu destino final. Isso porque além de ocuparem um grande volume nos aterros sanitários, demoram um tempo longo para se degradar. [4] Sendo o polipropileno um material extensamente usado, ele contribui de forma expressiva para a ocupação de volume em aterros sanitários, onde permanece por muitos anos devido à sua lenta degradação.

Resíduos plásticos contribuem significativamente para a diminuição da vida útil dos aterros e a reciclagem entra como ferramenta para a minimização deste problema, que tem sido considerado um dos grandes vilões da poluição ambiental, sobretudo em relação aos danos causados pelos resíduos urbanos. [4]

Antes de serem reciclados, os resíduos plásticos já sofreram algum tipo de deterioração de suas propriedades físicas e químicas oriundas da polimerização, processamento, uso e descarte do polímero. [4]

Modificações estruturais como a cisão da cadeia principal, reações de reticulação, alterações na estrutura química e degradação ou eliminação dos aditivos presentes, promovem a alteração das propriedades dos materiais plásticos ao longo do tempo. Essas modificações derivam de diferentes tipos de ataques físicos ou químicos durante seu processamento ou uso. [4]

## **2.3 FIBRA E PÓ DE COCO**

A fibra de coco é uma fibra lignocelulósica retirada do mesocarpo fibroso do coco, fruta cultivada extensivamente nos trópicos. [5] Esse tipo de fibra é usado como carga em polímeros devido ao seu baixo custo, baixa densidade, boa resistência, boa rigidez, biodegradabilidade, bom isolamento térmico, menor desgaste de ferramentas, disponibilidade ilimitada (fonte renovável), não toxicidade e ausência de problemas quanto ao descarte. As fibras naturais também oferecem vantagens econômicas e



ambientais quando comparadas a reforços e enchimentos tradicionalmente usados, estando o pó de coco entre as fibras naturais mais baratas disponíveis. [5, 6, 7]

Como consequência, é crescente o interesse em pesquisas relacionadas a compósitos termoplásticos reforçados com diferentes fibras lignocelulósicas objetivando melhorar suas propriedades mecânicas bem como obter as características desejadas para determinada aplicação. [8]

As fibras naturais são compostas pela celulose, a lignina, a pectina, ceras e substâncias solúveis em água. A celulose, sua principal constituinte, embora seja responsável por suas boas propriedades mecânicas, confere às fibras um elevado caráter hidrofílico, que torna a matriz polimérica, geralmente hidrofóbica, e a fibra natural incompatíveis, promovendo uma fraca interface entre elas e diminuindo suas propriedades mecânicas. A superfície da fibra pode ser modificada ou pode ser adicionado ao material algum agente de acoplamento para promover essa adesão entre a fibra natural e a matriz polimérica. [9]

A composição química das fibras naturais é sensível a fatores como condições climáticas e de plantio, idade e parte da planta de onde foram extraídas. Isso implica em uma grande variedade de composições químicas e conseqüentemente de propriedades mecânicas. [6]

A celulose pode ser considerada como um polímero linear da glicose constituído por ligações  $\beta$  1,4 – glicosídicas. Sua estrutura linear e organizada permite a formação de regiões cristalinas, proporcionando boas propriedades mecânicas, responsáveis pela rigidez das fibras naturais. Também presentes em quantidades significativas, mas com propriedades inferiores à celulose, a lignina possui uma estrutura complexa, amorfa constituída de grupos alifáticos e aromáticos e a hemicelulose possui uma estrutura ramificada composta por diferentes açúcares como unidade repetitiva. Assim, as fibras lignocelulósicas são compostas por microfibrilas celulósicas envolvidas por uma matriz amorfa de lignina e hemicelulose, podendo ser consideradas como compósitos naturais. A fibra de coco possui grande importância tecnológica em muitos países e está disponível em quantidades expressivas no Brasil. [6]

Todas as fibras naturais são de natureza hidrofílica, possuindo assim uma forte afinidade para absorção da umidade e conseqüentemente uma vida curta. [13] Isso

porque seus principais componentes, a celulose e a hemicelulose, possuem grupos hidroxila fortemente polarizados. Em consequência, essas fibras são usadas de forma limitada em aplicações industriais. [8]

As fibras de coco possuem uma camada de ceras em sua superfície que favorece a compatibilização entre elas e as matrizes termoplásticas. [6] Elas são mais resistentes à umidade do que outras fibras naturais e suportam o calor e a água salgada. A grande maioria das fibras de coco comercialmente produzidas vem da Indonésia, das Filipinas, da Índia, do Brasil, do Sri Lanka, da Tailândia e da Malásia. [7] As fibras de coco são rejeitos das indústrias alimentícias de países tropicais, portanto, seu reaproveitamento contribui para a diminuição da quantidade de lixo sólido. [5]

O pó de coco, resíduo abundante no Brasil, deriva da separação da fibra do mesocarpo fibroso do coco, sendo composto por uma mistura de pó com fibras curtas. O pó de coco tem menor valor comercial em relação aos demais produtos obtidos na extração da fibra e tem sido usado basicamente como um meio de cultura para plantas. [10]

## **2.4 COMPÓSITOS**

Materiais compósitos são aqueles constituídos de dois ou mais materiais independentes, combinados em uma unidade estrutural macroscópica, sendo produzidos a partir de diversas combinações de materiais cerâmicos, poliméricos ou metálicos. Muitos materiais possuem dois ou mais constituintes, entretanto, somente são considerados compósitos aqueles cuja unidade estrutural é formada em um nível macroscópico ao invés de microscópico. [11]

Segundo Rabello [12], “cargas podem ser definidas como materiais sólidos, não solúveis, que são adicionados aos polímeros em quantidades suficientes para diminuir os custos ou alterar suas propriedades físicas”. A adição de cargas aumenta a viscosidade do material, dificultando o processamento, geralmente diminui a resistência ao impacto e muitas vezes contribui para a maior propagação de trincas, diminuindo a resistência à fadiga. Em contrapartida, a presença de cargas aumenta a estabilidade dimensional e diminui a contração no resfriamento ou na cura. [12]

Os materiais compósitos são compostos por uma fase contínua (matriz) e uma fase dispersa (reforço) e cujas propriedades são uma combinação das propriedades dos constituintes individuais. O objetivo é atender às aplicações tecnológicas através da combinação incomum de propriedades que não podem ser atingidas pela atuação de seus constituintes sozinhos. [11]

Dentro dos materiais compósitos, chamamos de compósitos funcionais aqueles cujas propriedades de interesse principal são as propriedades elétricas, térmicas, óticas ou mecânicas.

As propriedades físicas e mecânicas dos compósitos lignocelulósicos dependem de diversos fatores, tais como, o tipo de matriz polimérica e suas características, o tipo, teor e propriedades do reforço e a adesão/interação entre a carga e a matriz. [13, 14] As propriedades mecânicas do compósito também dependem de uma boa dispersão da carga, minimização de espaços vazios e uma adesão adequada entre a carga e a matriz. Uma fraca adesão interfacial resulta em um compósito com propriedades mecânicas inferiores. Para que haja uma adesão adequada, é feita a modificação da superfície da carga ou utiliza-se um compatibilizante. [13]

O inchaço promovido pela absorção de água e umidade do ambiente para dentro de microaberturas e falhas do compósito pode distorcer as dimensões dos produtos, levando à formação de microtrincas e à consequente degradação das propriedades mecânicas do compósito. Esse fenômeno se torna particularmente importante quando a adesão interfacial é fraca e se existem microespaços que podem se originar durante o processo de formulação devido ao envolvimento incompleto da fibra pela matriz. [8]

Os polímeros que são utilizados como matrizes de compósitos com fibras naturais devem ser processados em temperaturas abaixo da temperatura de degradação da fibra lignocelulósica, que se encontra em torno de 200°C. O polipropileno está entre esses polímeros, sendo processado em temperaturas entre 180°C e 240°C. [14]

A principal dificuldade com o uso de fibras lignocelulósicas em matrizes termoplásticas é a sua tendência de se entrelaçar e formar aglomerados durante o processamento devido à interação entre elas. Isso tende a impedir uma melhor dispersão da fibra dentro da matriz, resultando numa fraca adesão interfacial entre a matriz hidrofóbica e a carga hidrofílica. [13]

## 2.5 ADITIVOS

As propriedades do PP e do PE, poliolefinas de baixo custo, estão continuamente sendo expandidas através do uso de aditivos, cuja contribuição é frequentemente mal relatada e mal compreendida. [15]

Apesar da massa molar e estrutura polimérica das poliolefinas poderem ser cuidadosamente controlados pelos avanços das técnicas de polimerização, esses avanços são responsáveis por apenas parte das melhoras nas propriedades das classes de PP e do PE. [15]

A escolha e dosagem adequadas dos aditivos permitem a obtenção de materiais poliméricos feitos com características específicas para determinada aplicação. Os aditivos permitem o uso de plásticos em aplicações onde não seria possível empregá-los sem a adição dos mesmos, e por isso, hoje são considerados componentes indispensáveis. [12]

Pode-se dizer que todos os polímeros comerciais recebem aditivos, seja durante a síntese, o processamento ou a mistura. Os aditivos mais comumente usados são os plastificantes, os estabilizantes, cargas, antiestáticos, nucleantes, lubrificantes, pigmentos, espumantes, retardantes de chama e modificadores de impacto. [12]

Os dois principais motivos para a adição de cargas à matriz polimérica são a necessidade de alterar as propriedades do material (tornando-o mais rígido, por exemplo, ou mais flexível, ou até mais barato) e a necessidade de conferir estabilidade ao material durante o serviço ou durante o processamento. [12]

Os aditivos utilizados em polímeros são geralmente moléculas orgânicas adicionadas em pequenas quantidades durante a produção, o processamento ou modificação com o intuito de melhorar as propriedades inerentes dessa resina polimérica. Eles podem ser adicionados por diversos métodos e em diferentes etapas do processo de fabricação, devendo ser estáveis nas condições de processamento e serviço, ser de fácil dispersão, não afetar negativamente as propriedades do polímero e não migrar. Divididos em três segmentos principais, os aditivos podem ser classificados como modificadores do polímero, para melhorar o desempenho ou para ajudar o processamento. [12, 16]

Através dos processos de formulação, moldagem e extrusão a que esses polímeros estão expostos, eles enfrentam condições que tendem a degradar suas cadeias e mudar suas propriedades. O calor e a tensão do ambiente de processamento podem iniciar processos de oxidação e degradação no polímero bem antes do produto final estar pronto. Antioxidantes são então essenciais para manter a massa molar e propriedades mecânicas originais da resina ao longo do processamento e projeto planejados. [15]

Em polímeros, a auto-oxidação é causada pela criação de radicais livres. A auto-oxidação é um processo circular de auto-propagação que, a menos que haja interferência de antioxidantes, normalmente leva ao aumento da degradação do polímero. Essa degradação é quase sempre indesejada, a menos que o material seja intencionalmente projetado para sofrê-la após o término de sua vida de serviço. As poliolefinas são suscetíveis de se degradarem através de radicais livres por clivagem de suas cadeias ou ligações cruzadas entre elas. [15]

A auto-oxidação via radicais livres pode ser iniciada pelo calor, esforços mecânicos, resíduos de catalisadores metálicos e radiação, condições sofridas em diferentes graus durante a produção da resina, formulação, processamento e através do ciclo de vida do produto. [15]

Esse efeito desestabilizador do índice de fluidez normalmente se torna cada vez mais acentuado após diversas extrusões. Ao longo da vida útil do PP, a degradação induzida pelo calor pode causar perda de propriedades mecânicas desejadas e o aumento da fragilização. [15]

Aditivos antioxidantes são então utilizados com o objetivo de interferir na propagação das reações de radicais livres que quebram as cadeias poliméricas. [15] Dessa forma, essas substâncias inibem ou retardam o processo oxidativo e os efeitos de degradação. Isso inclui descoloração, mudança de viscosidade, perda de propriedades físicas, perda de claridade e trincas superficiais. [17]

Os aditivos compatibilizantes são utilizados para promover a adesão entre o polímero e o reforço através da formação de uma ligação química estável entre os dois, sendo adicionados então, para permitir a mistura entre resinas e materiais de reforço

incompatíveis. Os tipos mais comuns de agente compatibilizante, usados no caso de cargas inorgânicas, são os organosilanos. [16, 17]

Aditivos para ajuda no processamento são agentes tensioativos, adicionados para melhorar a transferência e alterar as propriedades superficiais do produto final. [16] Aditivos para ajuda no processamento são algumas vezes a chave para que um produto moldado seja possível e rentável. Particularmente em moldagem por injeção, a resina fundida deve fluir rapidamente do parafuso para o molde e as partes devem soltar do molde de forma rápida e limpa. Muitos aditivos para ajuda no processamento são usados em processos de injeção e extrusão. [15] Esses aditivos são projetados para recobrir a superfície interior da matriz de extrusão, reduzindo o atrito entre o polímero e o metal e facilitando o processamento. Isso permite que a quebra do fundido e o acúmulo na matriz sejam eliminados ou reduzidos. [17]

## **2.6 TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO**

### **2.6.1 EXTRUSÃO**

A extrusão é definida como o forçamento contínuo de um material fundido através de um dispositivo modelador. Para promover a homogeneidade do produto, a incorporação de aditivos, como antioxidantes, corantes e cargas, a mistura deve ser preparada quando o plástico se encontra no estado fundido, e isso é feito principalmente em uma extrusora. [18] Existem três tipos de extrusoras: de rosca, de disco ou de êmbolo, sendo mais comuns as extrusoras de rosca. [19]

O polímero é colocado na extrusora sob a forma de sólido seco e é fundido através de uma combinação de transferência de calor através do cilindro e dissipação da energia de trabalho do motor da extrusora. Na parte final é aplicada a pressão necessária para bombear o fundido homogeneizado através de uma matriz de moldagem ligada ao fim da extrusora. [18]

A rosca é o principal componente da extrusora, possuindo as funções de homogeneizar/plastificar o polímero por cisalhamento; aquecer o material para sua fusão ou amolecimento, transportar o polímero a partir do funil da extrusora até sair da matriz; e elevar a pressão da massa polimérica ao longo do comprimento da rosca para que o perfil extrudado seja compacto e isotrópico. O movimento da rosca gera 80% da

energia térmica necessária para transformar o polímero, através do cisalhamento desta sobre o material e o restante da energia é fornecida por aquecedores externos, através de mantas elétricas devidamente acopladas ao canhão. [2]

No início da rosca, o material se encontra a temperatura ambiente e se apresenta na forma de péletes ou pó, possuindo assim baixa densidade aparente. O amolecimento do polímero durante a extrusão promove a eliminação do ar existente entre os grãos, e em consequência, a densidade aumenta de duas a quatro vezes em relação ao valor inicial. O material deve então ser comprimido ao longo da rosca para equilibrar esse efeito e manter níveis apropriados de cisalhamento. [2]

A temperatura ao longo do canhão e da rosca e a rotação da rosca devem ser rigidamente controladas para que o fluxo seja cadenciado, isso proporciona dimensões constantes e propriedades mecânicas homogêneas ao longo de todo o material extrudado. [2]

## **2.6.2 MOLDAGEM POR COMPRESSÃO**

A moldagem por compressão é principalmente usada para processar termofixos e termoplásticos de difícil processamento, como aqueles com fibras como carga ou elastômeros termoplásticos. [19]

No caso de termoplásticos, uma determinada quantidade do polímero pré-aquecida, que pode ser uma chapa ou pilha de péletes ou pó, é colocada no molde e uma pressão hidráulica é aplicada na chapa superior ou inferior, aproximando-as. [19]

Os aspectos importantes no projeto da moldagem por compressão são: a escolha da quantidade certa de material a ser colocada para preencher a cavidade quando o molde for fechado, a determinação do tempo mínimo necessário para aquecer a cavidade até a temperatura de processamento desejada, a seleção da técnica de aquecimento adequada e a pressão necessária para preencher o molde. [19]

## **2.7 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO**

### **2.6.1 TRAÇÃO UNIAXIAL**

Na maior parte de suas aplicações, os diversos materiais poliméricos existentes devem cumprir uma série de requisitos e exigências, o que faz com que suas

propriedades mecânicas sejam de interesse tanto científico quanto tecnológico. Os valores das propriedades mecânicas servem como base para a comparação do desempenho de diferentes polímeros, assim como para a avaliação dos efeitos decorrentes da modificação do polímero-base, para especificações, etc. Em termos práticos, a análise das propriedades mecânicas é essencial no processo de seleção dos materiais poliméricos para uma peça ou produto. [20]

Os ensaios de tração são realizados aplicando-se uma solicitação ao material em condições controladas, geralmente deformação a uma velocidade constante, até a sua ruptura ou até que a tensão ou a deformação alcance um valor pré-determinado. A solicitação é feita puxando-se uniaxialmente o material e a resposta obtida para essa deformação aplicada é uma tensão de tração. Os resultados dos ensaios são expressos como curvas do tipo tensão versus deformação. As curvas obtidas pelo ensaio de tração podem ser usadas como uma indicação da tenacidade e resistência do polímero. [20, 21]

A célula de carga, responsável por registrar a carga durante o ensaio, é escolhida de forma a se obter uma boa sensibilidade no mesmo, devendo ter uma precisão maior que 99% do valor real da carga. Essa escolha é feita baseada nos valores de fundo de escala, seu erro percentual e nos valores estimados para a carga máxima necessária para o ensaio do material. Os corpos de prova são preparados em forma de halteres com a superfície da seção cruzada plana e a velocidade de realização do ensaio deve ser constante e pré-determinada. [20]

A resposta de deformação de um material para um dado regime de carregamento é descrito por equações gerais. Para muitos materiais, a parte inicial da curva de tração é linear, podendo ser descrita por uma equação simples conhecida como lei de Hooke, que relaciona linearmente a tensão e a deformação. [22, 23]

**Equação 1. Lei de Hooke**

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

onde E é o módulo de elasticidade.

Muitos polímeros podem exibir um comportamento não linear em sua curva tensão - deformação para altas tensões, o que geralmente é indicativo de comportamento dúctil.



A aplicação de níveis ainda mais elevados de tensão vai por fim levar o material à fratura. A área abaixo da curva indica a energia necessária para romper a amostra e está diretamente ligada à tenacidade do material. [22] Outra informação obtida nos ensaios de tração é o limite de escoamento, definido de forma geral como o ponto no qual o material deixa de se deformar elasticamente (de forma recuperável) e passa a sofrer deformação plástica (irreversível). [23]

As condições, tamanho e a história das amostras são de grande importância no comportamento das medidas mecânicas, devido às mudanças produzidas pelo envelhecimento (grau de cristalinidade, oxidação, etc.) e à dependência entre as propriedades e a técnica de produção. Para que a comparação entre materiais seja correta, eles devem ser preparados e condicionados sob o mesmo ambiente. As amostras devem ser uniformes e livres de imperfeições que possam atuar como concentradores de tensão. [21, 22]

No caso de materiais poliméricos, as propriedades mecânicas são uma reflexão direta da mobilidade das cadeias. [22] Polímeros apresentam uma resposta viscoelástica para deformação e conseqüentemente as propriedades mecânicas gerais são dependentes da taxa e da temperatura. Essa resposta viscoelástica é evidente não apenas na deformação, mas também na recuperação. [23]

Para que a lei de Hooke seja aplicável aos materiais poliméricos, apesar de seus efeitos viscoelásticos, a taxa de deformação aplicada deve ser mais rápida que a relaxação do material, para que ocorra apenas uma pequena relaxação e a aplicação da lei de Hooke seja uma aproximação razoável. [23]

A extrema sensibilidade dos polímeros à temperatura e à taxa de deformação implica na apresentação de uma vasta gama de comportamentos mecânicos, dependentes das condições precisas sob as quais o ensaio foi realizado e das condições de preparo e acondicionamento dos corpos de prova. Em conseqüência, para que seja possível a comparação de resultados, estes fatores devem ser cuidadosamente controlados, e também rigorosamente mencionados junto a cada conjunto de resultados. A baixas temperaturas e a altas taxas de deformação, os polímeros tendem a falhar de forma frágil, a deformação antes da ruptura é baixa e o módulo alto. Com o aumento da temperatura, a curva progride como se o material passasse por um regime de amolecimento, caracterizado por um baixo módulo, um limite de escoamento

indistinguível (inexistente) e grande deformação antes da ruptura. Finalmente, a uma temperatura suficientemente alta, o material pode apresentar uma resposta puramente dúctil com o módulo algumas ordens menor. [20, 23]

### **2.6.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)**

Essa técnica utiliza o espalhamento coerente dos raios X por estruturas organizadas (cristais), o que permite a realização de estudos morfológicos em materiais e a determinação de sua estrutura cristalina e sua cristalinidade. [20]

Um alvo é bombardeado por elétrons, que provocam a emissão de fótons e raios X, cujas características dependem desse alvo. A associação de macromoléculas pode produzir estruturas organizadas e a regularidade estrutural permite que o material difracte um feixe de raios X. Substâncias não cristalinas também podem apresentar algum grau de estruturação dando origem a bandas de difração não tão bem definidas. O sinal elétrico resultante é recebido pelo detector e representado pelo gráfico ângulo de espalhamento versus a intensidade do sinal. [20]

As distâncias interplanares são o principal resultado da difração de raios X e podem ser relacionadas com os demais parâmetros da célula unitária através de equações que incluem os índices de Miller. Quanto maior o número de átomos numa rede, mais intensa será a difração promovida pelo plano. [20]

W. Ruland desenvolveu toda a base de cálculo necessária para a interpretação do fenômeno de espalhamento de raios X por estruturas cristalinas e sua utilização quantitativa. Algumas condições devem ser satisfeitas para o uso adequado dessas equações: as imperfeições nos cristais devem ser mínimas ou quantificáveis por outra técnica, os cristais devem estar distribuídos aleatoriamente, a organização dos cristais deve ser tridimensional e por fim, devem existir métodos que permitam separar os picos cristalinos do espalhamento amorfo no difratograma do material, uma vez que o método se baseia na relação entre as áreas destes. [20]

Para a determinação da cristalinidade pelo método de Ruland, a seguinte equação deve ser aplicada:

Equação 2. Método de Ruland para determinação da cristalinidade.

$$\%C = \frac{I_c}{(I_c + KI_a)} \cdot 100$$

onde %C é a porcentagem cristalina,  $I_c$  é o resultado da integração dos picos de difração da porção cristalina,  $I_a$  é o resultado da integração do halo amorfo e K é a constante de proporcionalidade, característica do polímero. No caso do polipropileno, essa constante é igual a 0,98. [20]

As cargas ou agentes de reforço particulados apresentam geralmente energia livre superficial maior que a do polímero e em alguns casos, podem auxiliar na cristalização deste. Atuando como nucleadores, esses sólidos podem acelerar a nucleação, etapa mais lenta do processo de cristalização. Seus efeitos sobre as características cristalinas da matriz polimérica podem ser estudados por meio da difração de raios X. [20]

### 2.6.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A visualização, descrição e interpretação da fratura ou superfície da fratura, denominada fractografia, é muitas vezes necessária para se estabelecer relações entre estrutura e propriedades. Ela é comumente realizada com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura, um dos equipamentos mais usados hoje na pesquisa de materiais. [24]

As principais características desta técnica são: [20]

Resolução	10nm
Ampliação	20 – 100.000
Observação	Superfície
Meio	Alto vácuo ou baixo vácuo

Na microscopia eletrônica de varredura, uma fonte de elétrons, geralmente um tipo de filamento de tungstênio, produz elétrons que são acelerados a uma energia na faixa de 1 a 40 keV, com correntes entre  $10^{-6}$  e  $10^{-12}$  A. Ao atingir a superfície da amostra, o feixe de elétrons deve ser menor que 10 nm e ter corrente suficiente para permitir a formação de uma imagem com boa definição. Entretanto, o diâmetro do feixe emitido pelo canhão de elétrons convencional é grande demais para esse fim, sendo por isso

reduzido e focalizado na superfície da amostra com o auxílio de lentes eletromagnéticas, em conjunto com os difratogramas. A superfície da amostra é varrida linha por linha para formar a imagem. [20, 24]

Ao ser atingida pelo feixe de elétrons, a amostra emite elétrons secundários, retroespalhados e raios X, sendo os dois primeiros, os sinais mais usados rotineiramente em análises. Os microscópios eletrônicos de varredura normalmente possuem detectores de elétrons secundários e retroespalhados que capturam esses elétrons, formando a imagem que é apresentada no monitor. Os elétrons secundários vêm de uma camada superficial de até 10nm de espessura, gerando imagens tipicamente topográficas, enquanto os elétrons retroespalhados normalmente se originam de camadas mais profundas, formando imagens com contraste de composição. [20, 24]

Os elétrons secundários se formam a partir de elétrons primários que perderam energia durante sua trajetória no interior da amostra, ou pela excitação de elétrons da banda de condução ou de valência. Eles são emitidos com energias inferiores a 50 eV e são os mais abundantes. No caso da detecção de elétrons secundários, um sinal elétrico é produzido a cada ponto varrido na superfície da amostra. [20]

O contraste da imagem é composto pelo contraste do material, que varia de acordo com o número atômico dos elementos da amostra; pelo contraste topográfico, que varia com a orientação da superfície da amostra em relação à direção de incidência dos elétrons primários; e o contraste da orientação, que varia com a posição relativa da superfície da amostra em relação ao detector. [24]

O contraste topográfico gerado pelos elétrons secundários contribui para uma visualização mais clara de bordas e pontas e o contraste de orientação contribui para o caráter plástico da micrografia do MEV. [24]

O MEV é geralmente utilizado para a análise superficial ou subsuperficial de amostras com dimensões relativamente grandes. As imagens são obtidas com alta profundidade de foco, ou seja, diferentes relevos da superfície da amostra estão simultaneamente em foco, formando imagens tridimensionais. O MEV produz imagens com elevada resolução, o que possibilita a alta ampliação de detalhes próximos sem que haja perda de nitidez. A preparação de amostras e a obtenção de imagens são relativamente simples. [20]

A maioria dos polímeros são materiais não condutores e por isso requerem revestimentos condutores ou o uso de baixa voltagem de aceleração do feixe. A amostra é encaixada sobre suportes metálicos, podendo ser utilizados também, adesivos condutores. Quando a amostra é formada por um material não condutor, ela é revestida por um filme condutor para evitar o acúmulo de carga negativa. O recobrimento metálico deve ser suficientemente contínuo e fino para não mascarar a topografia da superfície, sendo ao mesmo tempo adequado para conduzir o excesso de carga negativa. A espessura da amostra não é um aspecto crítico dado que o interesse esta na topografia superficial desta. [20]

Alguns polímeros apresentam particular sensibilidade a elétrons de alta energia. A interação do feixe com materiais orgânicos pode promover a ionização, que pode acarretar em reticulação ou mesmo na ruptura de ligações químicas. [20]

#### **2.6.4 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)**

A calorimetria diferencial de varredura (DSC) mede a variação da entalpia em função do tempo ( $dH/dt$ ), e, a partir disso, fornece informações a respeito do fluxo de calor no compartimento da amostra em função da variação de temperatura ou do tempo (a T constante). [25]

Quando uma substância sofre uma transformação física ou química, ocorre também uma variação correspondente da entalpia. A variação controlada da temperatura de uma amostra polimérica permite a observação de mudanças nas propriedades físicas, associadas com mudanças no grau de empacotamento e interações entre as cadeias. Os dados são obtidos medindo-se a variação de entalpia entre o material analisado e uma amostra inerte usada como referência ou padrão. [22, 25]

As modificações nas curvas de DSC podem ser promovidas por transições de primeira e de segunda ordem. As transições de primeira ordem geram variações de entalpia, dando origem à formação de picos. As transições de segunda ordem acarretam na variação da capacidade calorífica sem, entretanto, variar a entalpia, provocando um deslocamento da linha de base (característico da  $T_g$ ). [20] O DSC pode ser usado na determinação da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), da temperatura de cristalização

( $T_c$ ), da temperatura de fusão ( $T_m$ ), na medida do calor específico ( $C_p$ ) e na medida do calor de fusão ( $\Delta H_f$ ). [25]

A análise é realizada com um programa de aquecimento ou resfriamento, utilizando uma velocidade de variação de temperatura determinada (em geral, entre 5 e 20°C/min). Existe ainda a possibilidade de manter o sistema a uma temperatura constante, ou seja, operar no modo isotérmico durante um tempo determinado para a avaliação cinética de processos térmicos. [25]

As curvas obtidas representam a quantidade de energia elétrica fornecida ao sistema, sendo as áreas sob os picos proporcionais às variações de entalpia que ocorrem em cada transformação. [25]

A amostra e a referência são colocadas em cápsulas idênticas em compartimentos separados, que possuem fontes de aquecimento individuais. A temperatura e a energia são monitoradas e geradas por filamentos de platina idênticos, que atuam como termômetros resistivos e aquecedores. O calor fornecido é mantido constante e quando ocorre algum processo endotérmico ou exotérmico, o sistema de controle aumenta imediatamente a energia fornecida para a amostra ou para a referência, para que as duas sejam mantidas na mesma temperatura. Assim, a temperatura da amostra acompanha a temperatura da referência através do ganho ou perda de calor controlado pelo equipamento. Gráfico obtido é expresso em termos de fluxo de calor (mW) por temperatura (°C) ou tempo (min). [25]

Observando as curvas de DSC vemos que ao processo de fusão de polímeros semicristalinos ocorre geralmente em uma faixa de temperaturas. A largura dessa faixa reflete a distribuição de tamanhos de cristalitos no material. O valor da  $T_f$  é função de um número de propriedades que abrange a massa molar e sua distribuição, o grau de cristalinidade e as dimensões dos cristalitos do polímero. [22]

## **CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS**

---

### **3.1 MATERIAIS**

O polipropileno proveio da reciclagem de copos descartáveis brancos recolhidos. O pó de coco foi fornecido pela DILIMP, uma indústria de processamento de fibras de coco localizada em Sergipe. Os aditivos: CESA NOX 210009 IRGAFOS 168FF e CESA NOX 112271 IRGANOX 1010FF (antioxidante), CESA MIX 244601 (compatibilizante) e CESA PROCESS 244461, foram fornecidos pelo Clariant.

#### **3.1.1 PREPARAÇÃO DO POLIPROPILENO**

Após serem recolhidos no Departamento de Metalurgia e Materiais ou trazidos por alunos de seus ambientes de trabalho ou festas, os copos foram lavados apenas com esponja e água para evitar o descarte de produtos químicos, causando o menor impacto possível ao meio ambiente. Os copos lavados e secos foram então moídos em um moinho de facas tipo Wyllie de 2 CV de potência até um tamanho necessário para uma adequada homogeneização na extrusora.

#### **3.1.2 PREPARAÇÃO DO PÓ DE COCO**

O pó de coco foi seco na estufa a 105°C e então moído em copos de aço inox em moinho planetário RETSCH PM-4 durante trinta minutos com uma rotação de 208 RPM, utilizando esferas de aço inox com diâmetro de 3 mm. Em seguida, ele foi peneirado com peneira de malha 0,212 mm e auxílio de um agitador contínuo por dez minutos. O pó de coco secou novamente na estufa a 105°C por pelo menos 16 horas antes da extrusão com intuito de reduzir ao máximo a presença de umidade na superfície do pó durante o processo.

A moagem do pó de coco seguiu os mesmos parâmetros e utilizou o mesmo material que em Mello, C. C. [26], assim, sua distribuição granulométrica esperada pode ser expressa pela curva abaixo (Figura 1).

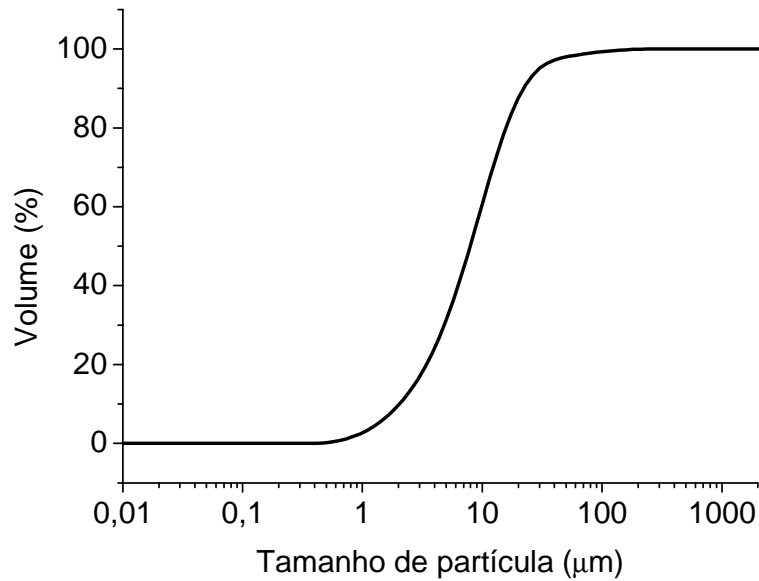


Figura 1. Análise granulométrica do pó de coco moído no moinho planetário de bolas por 30 minutos e 208 rpm. [26]

## 3.2 PREPARAÇÃO DO COMPÓSITO

### 3.2.1 EXTRUSÃO

A extrusão foi realizada em uma extrusora de rosca simples da Extrusão Brasil SA com uma rotação de 25 RPM e o seguinte perfil de temperaturas:

Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
170°C	180°C	180°C	170°C

Os PP a ser extrudado foi dividido em dez porções iguais que eram misturadas ao aditivo e ao pó de coco imediatamente antes de serem colocados na extrusora, para garantir a uniformidade de alimentação. Foi feita a extrusão de PP contendo 0%, 2%, 5% e 10% de pó de coco, com e sem aditivos. Utilizou-se apenas PP reciclado, sem nenhuma adição de PP virgem. Em todos os corpos de prova com aditivos, adicionou-se o mesmo teor em peso de cada um, quantidades indicadas pelo fabricante: 0,5% CESA NOX 210009 IRGAFOS 168FF, 0,5% CESA NOX 112271 IRGANOX 1010FF e 3% CESA MIX 244601. Optou-se por não utilizar o CESA PROCESS 244461, pois o mesmo não contribuiu de forma positiva para as propriedades do compósito (Anexo 1).



O material foi extrudado em forma de macarrão, que em seguida foi cortado em forma de péletes com o auxílio de uma picotadora.

### 3.2.2 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Inicialmente, moldaram-se corpos de prova com 5% de PP em diferentes temperaturas, pressões e quantidade de degasagens, buscando o ajuste das condições de processo. As temperaturas utilizadas foram 190°C e 195°C e a pressão variou de 3 a 6 toneladas. Considerando os valores do módulo de elasticidade e do limite de resistência e a menor presença de bolhas, concluiu-se que a moldagem a 190°C e 5 ton conduziu à melhor combinação de propriedades. A partir daí, foram moldados nessas condições, corpos de prova de PP puro e com 2%, 5% e 10% de pó de coco. A Tabela 1 mostra as diferentes condições de moldagem em que foram preparados os corpos de prova.

**Tabela 1: Condições de Moldagem**

	Teor de Pó de coco	Pré-aquecimento	Aditivos
Grupo 1	-	120°C	-
	2% coco	120°C	-
	5% coco	120°C	-
	10% coco	120°C	-
Grupo 2	-	120°C	nox mix
	2% coco	120°C	nox mix
	5% coco	120°C	nox mix
	10% coco	120°C	nox mix
Grupo 3	-	150°C	-
	2% coco	150°C	nox mix
	5% coco	150°C	nox mix
	10% coco	150°C	nox mix

Após um pré-aquecimento dos péletes em estufa a vácuo a 120°C por 10 minutos, foram moldados por compressão em prensa hidráulica a 190°C e uma pressão de 5ton corpos de prova com 0%, 2%, 5% e 10% de pó de coco com e sem aditivos. Foi feito também um grupo com aditivo, nas mesmas condições e com um pré-aquecimento de 150°C. Logo após serem retirados da primeira prensa, foram levados à prensa de circulação de água para o resfriamento a 60°C durante 10 minutos.

### **3.3 CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO**

#### **3.3.1 TRAÇÃO UNIAXIAL**

O ensaio de tração foi realizado em todos os corpos de prova, seguindo as especificações da norma ASTM D638, seguindo as especificações para o corpo de prova Tipo I. Esses ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios Instron 5582 com a ajuda de um vídeo extensômetro para medir a real deformação dos corpos de prova. Calculou-se a média de 5 corpos de prova, utilizando-se para a realização do ensaio uma célula de carga de 10kN e uma velocidade de 5mm/min.

#### **3.3.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)**

Os ensaios de difração de raios X foram realizados em um difratômetro Shimadzu XRD 6000, operado com uma fonte de radiação de  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,541 \text{ \AA}$ ). A medição foi feita ao longo de uma região angular de  $10^\circ$  a  $80^\circ$  ( $2\theta$ ) com uma velocidade de varredura de  $2^\circ/\text{min}$ .

#### **3.3.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)**

O MEV foi realizado na superfície de fratura das amostras contendo 10% de pó de coco, com e sem aditivo e no polipropileno reciclado puro, com a finalidade de analisar a adesão do pó de coco à matriz nos dois casos e comparar essas duas fraturas com a do polipropileno puro. O ensaio foi realizado no MEV LEO 940 A, localizado no Cepel. A voltagem e o aumento utilizados estão discriminados na parte inferior de cada imagem. Todas as amostras analisadas foram recobertas com ouro.

#### **3.3.4 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)**

Foram analisadas as amostras de polipropileno puro, polipropileno com 2%, 5% e 10% de pó de coco com os aditivos antioxidantes e compatibilizante, moldados a  $190^\circ\text{C}$  com pré-aquecimento a  $150^\circ\text{C}$ .

A análise foi feita no equipamento Perkin Elmer, modelo DSC8500. A faixa de temperaturas analisada foi de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$ , a uma taxa aquecimento e resfriamento de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

### 4.1 TRAÇÃO UNIAXIAL

Os resultados do ensaio de tração estão expostos separadamente, divididos em grupos segundo sua condição de moldagem e composição, sendo estes:

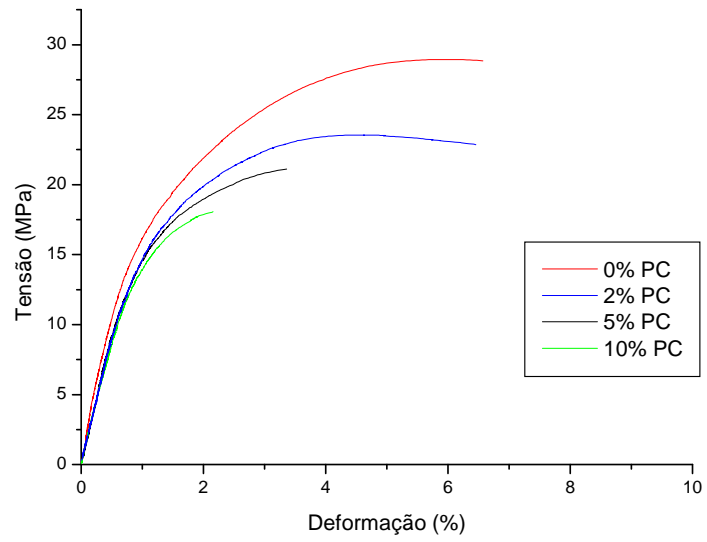
- Grupo 1: corpos de prova sem aditivos, moldados a 190°C sob uma pressão de 5 ton e com pré-aquecimento a 120°C.
- Grupo 2: corpos de prova com aditivos, moldados a 190°C sob uma pressão de 5ton e com pré-aquecimento a 120°C.
- Grupo 3: corpos de prova com aditivos, moldados a 190°C sob uma pressão de 5ton e com pré-aquecimento a 150°C.

Não houve empescoçamento em nenhum dos corpos de prova, nem mesmo nos compostos apenas de PP reciclado, apresentando todos, uma superfície de fratura plana a olho nu.

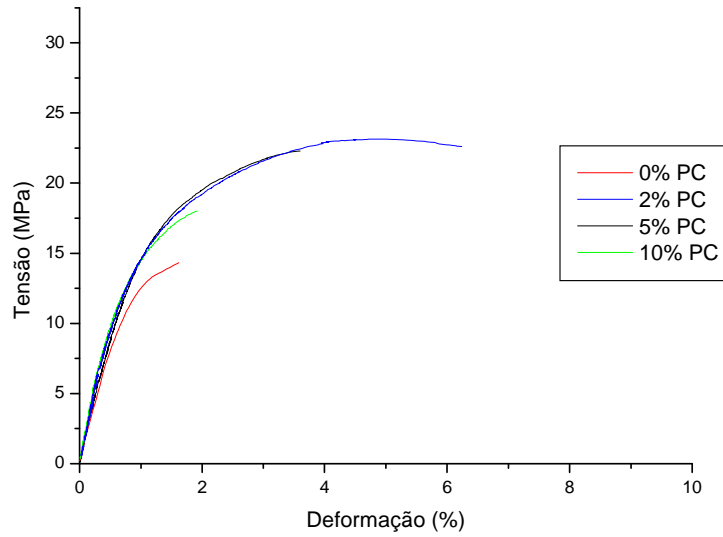
As curvas médias de tração estão representadas abaixo nas Figuras 3, 4 e 5 e os respectivos valores de propriedades mecânicas na Tabela 2. As curvas mostram que todos os materiais apresentam um comportamento dúctil, como era esperado para o polipropileno, entretanto as deformações sofridas no momento da ruptura são significativamente baixas, não ultrapassando valores próximos a 10%.

Apesar da tentativa de fazer um lote o mais homogêneo possível através da mistura de todo o material recolhido após a moagem, nota-se uma variabilidade de resultados relativamente grande devido ao fato da matriz composta por um material reciclado.

No grupo 2, a presença do aditivo compatibilizante no PP puro, sem a presença do pó de coco reduziu significativamente suas propriedades mecânicas. O aditivo acabou promovendo a aglomeração dos péletes durante o pré-aquecimento, o que gerou uma grande quantidade de bolhas. Além disso, os corpos de prova ficaram visualmente muito rugosos, como se houvesse falta de fusão durante a moldagem.



**Figura 2. Curvas médias de tração dos corpos de prova do grupo 1**



**Figura 3. Curvas médias de tração dos corpos de prova do grupo 2**

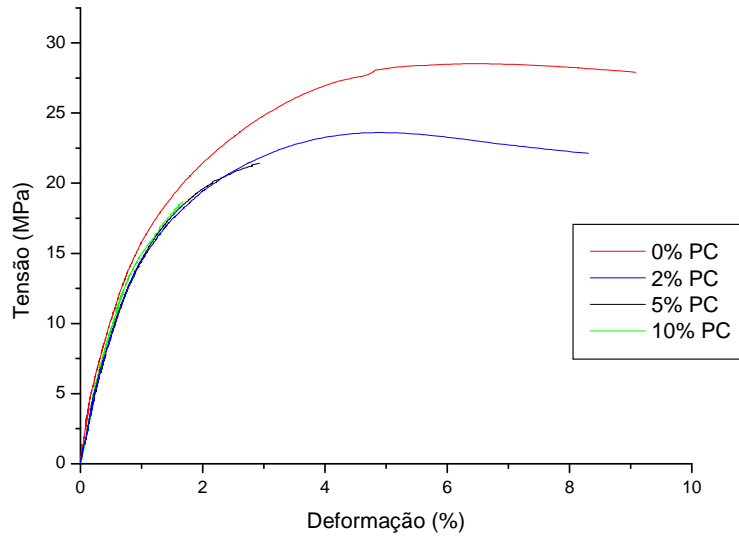


Figura 4. Curvas médias de tração dos corpos de prova do grupo 3.

Para um teor de 10% de pó de coco, os valores do módulo de elasticidade para os compósitos sem aditivos são bem inferiores e apresentam uma variabilidade muito maior do que para os dos corpos de prova com aditivos, que apresentaram claros aumentos nos valores do módulo. Esses resultados afirmam a eficácia dos aditivos usados. Para todos os grupos, é possível observar também que há uma tendência de aumento do módulo de elasticidade e de diminuição na tensão e deformação de ruptura com o aumento do teor de pó de coco presente. Este último se deu não apenas pela restrição ao movimento das cadeias decorrente da presença do pó, mas também pelo surgimento de bolhas no interior dos corpos de prova.

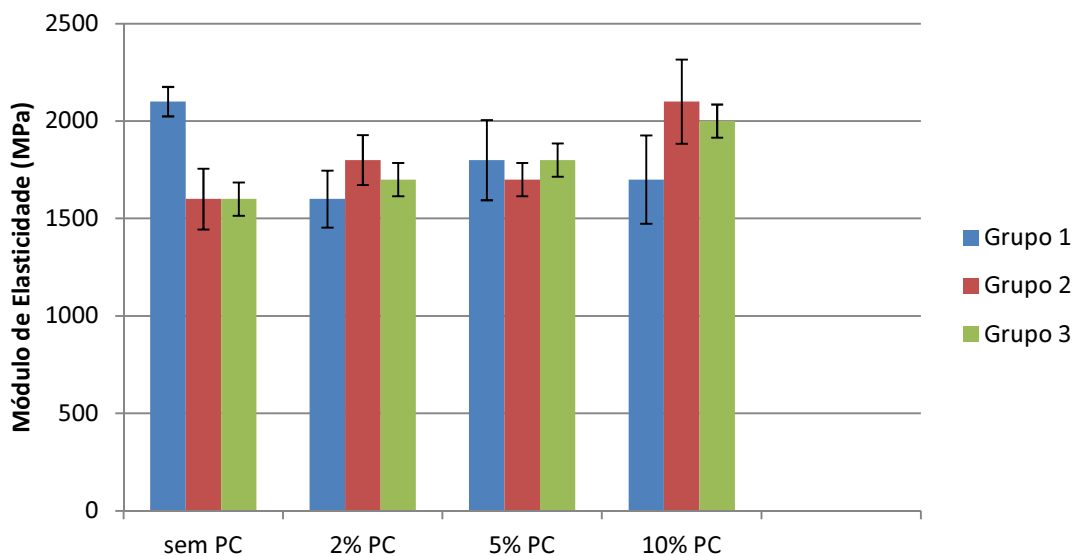


Figura 5. Comparação entre os módulos de elasticidades (MPa) dos diferentes grupos.

Tabela 2: Propriedades mecânicas dos corpos de prova ensaiados

		Módulo de Elasticidade (MPa)		LE (Offset 0,2 % (MPa)		Def LE (Offset 0,2 % (%)		LR (MPa)		Def LR (%)		Tensao RUPT (MPa)		Def RUPT (%)	
		Desvio		Desvio		Desvio		Desvio		Desvio		Desvio		Desvio	
		Média	Padrão	Média	Padrão	Média	Padrão	Média	Padrão	Média	Padrão	Média	Padrão	Média	Padrão
Grupo 1	-	2100	197	13,70	0,96	0,75	0,12	20,82	6,32	6,66	3,47	24,11	2,23	6,58	3,45
	2% coco	1600	98	14,46	0,46	0,99	0,08	18,54	5,45	6,57	1,23	22,39	0,52	6,45	1,34
	5% coco	1800	367	14,58	0,61	1,00	0,16	13,00	3,10	3,33	1,10	20,16	1,48	3,32	1,10
	10% coco	1700	140	13,60	0,90	0,97	0,15	10,22	0,36	2,17	0,23	17,84	0,61	2,16	0,23
Grupo 2	-	1600	156	11,36	1,30	0,84	0,15	9,78	5,22	1,82	0,68	14,27	2,80	1,62	0,64
	2% coco	1800	128	14,05	0,83	0,96	0,13	16,57	5,29	6,23	1,45	22,33	0,58	6,21	1,44
	5% coco	1700	85	12,64	2,52	0,83	0,22	14,03	5,03	3,35	0,82	21,22	2,62	3,16	1,05
	10% coco	2100	216	12,39	1,06	0,75	0,11	9,95	0,75	1,93	0,38	17,45	1,21	1,92	0,37
Grupo 3	-	1600	75	12,81	1,69	0,71	0,10	17,13	6,07	9,10	4,95	25,47	1,77	9,08	4,95
	2% coco	1700	146	13,13	0,82	0,85	0,07	12,86	0,60	8,37	1,38	21,97	0,49	8,32	1,42
	5% coco	1800	206	13,59	0,80	0,90	0,17	15,45	4,73	2,92	0,36	20,95	0,95	2,91	0,36
	10% coco	2000	226	13,52	1,67	0,85	0,23	10,30	1,65	1,81	0,53	17,61	2,26	1,67	0,65

As propriedades mecânicas dos corpos de prova ensaiados durante o ajuste das condições de processo, estão expostos no Anexo 1.

Observou-se a presença de bolhas (Figura 6) nos corpos de prova com 5% e 10% de pó de coco, sendo maior a quantidade de bolhas para o maior teor de pó de coco e para os corpos de prova com aditivos.

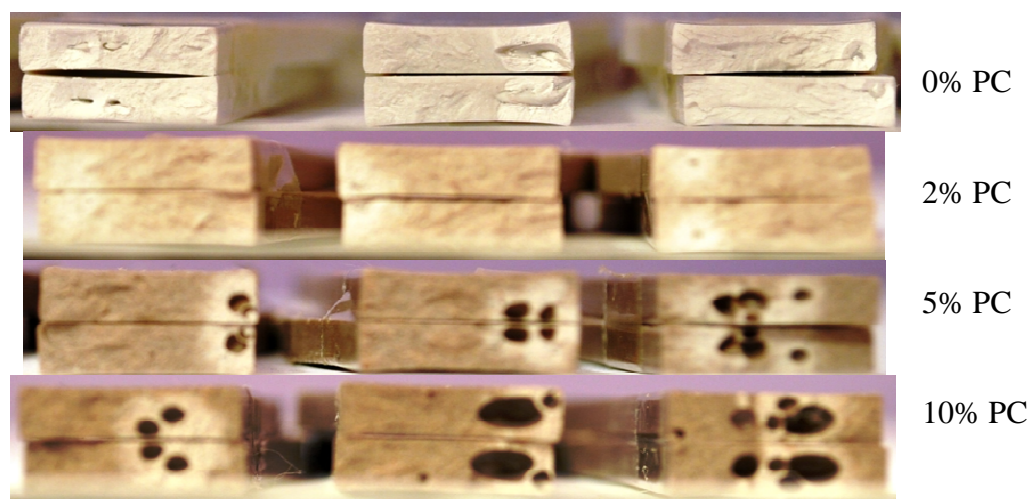


Figura 6. Superfícies de fratura do ensaio de tração dos corpos de prova com aditivos.

#### 4.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

Nos difratogramas obtidos no ensaio de difração de raios X (Figura 7), nota-se que todos apresentam picos bem definidos e que há uma diminuição na intensidade desses

picos com o aumento do teor de pó de coco. Isso indica, ao contrário do que se esperava, que houve uma diminuição do grau de cristalinidade do PP com o aumento do teor de pó de coco. Essa variação no grau de cristalinidade foi calculada através do método de Ruland, considerando o fator de correção K como 0,98 [20] e os resultados estão expressos na Tabela 3.

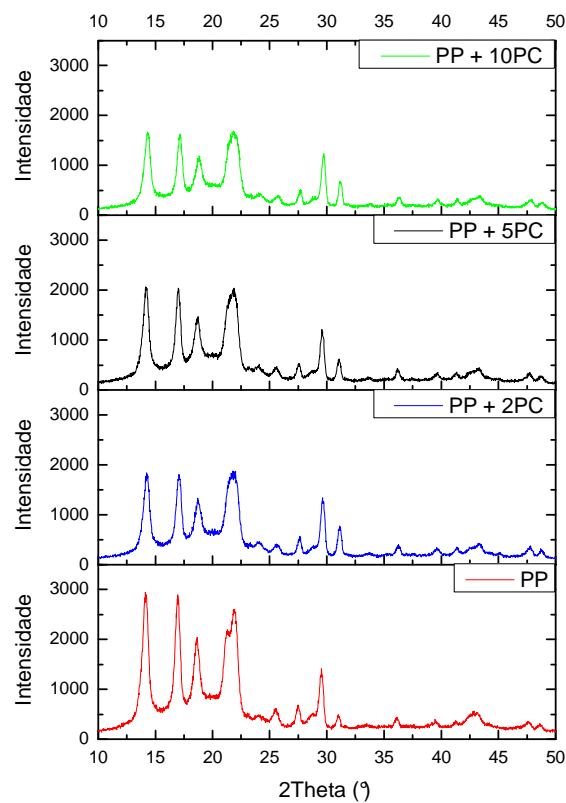


Figura 7. Difratomogramas obtidos para as amostras de PP com 2%, 5% e 10% e PP puro.

Tabela 3: Áreas cristalina ( $I_c$ ) e amorfa ( $I_a$ ) e grau de cristalinidade.

	$I_c$	$I_a$	Cristalinidade
PP	8839,10	4949,20	64,57%
PP + 2%PC	6484,63	4229,99	61,00%
PP + 5%PC	6611,33	4895,45	57,95%
PP + 10%PC	5660,32	4493,19	56,25%

Considerando que o grau de cristalinidade atingido pelo PP alcança normalmente até 65%, podemos dizer que todos os corpos de prova apresentam uma grande quantidade



de fase cristalina. Não houve alteração no número de picos nas curvas dos diferentes materiais, apesar de alguns picos apresentarem uma leve mudança de forma. Esse comportamento pode estar associado a um aumento da viscosidade promovido pelas partículas do pó de coco, que dificultou o alinhamento das cadeias para a formação da estrutura cristalina.

Tabela 4: Comparação entre os ângulos de difração (2theta) da literatura [27] com os principais picos obtidos.

Plano	PP isotático	PP	PP + 2% PC	PP + 5% PC	PP + 10% PC
	Ângulo	Ângulo	Ângulo	Ângulo	Ângulo
(110)	14,20°	14,14°	14,24°	14,16°	14,32°
(040)	17,00°	16,96°	17,06°	17,00°	17,16°
(130)	18,50°	18,64°	18,70°	18,74°	18,82°
(111)	21,30°	21,30°			
(131), (041)	22,00°	21,88°	21,78°	21,88°	21,86°

A Figura 8 representa esquematicamente curvas obtidas por difração de raios X de grande ângulo para os diferentes tipos de taticidade do PP. Comparando os ângulos e a forma dos picos obtidos com tais curvas, podemos concluir que o PP utilizado é predominantemente isotático.

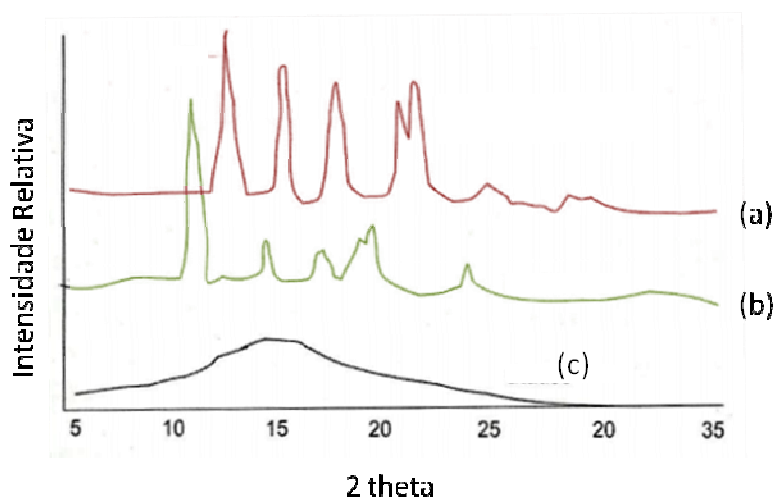


Figura 8. Esquematização de curvas obtidas por DRX de grande ângulo para PP isotático (a), sindiotático (b) e atático (c) [2].

### 4.3 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)

As curvas obtidas através do ensaio de DSC estão expostas na Figura 9. Nas quatro curvas podemos identificar a presença de dois picos de fusão, o primeiro em torno de 125°C e o segundo de 165°C, que foram denominados Pico 1 e Pico 2 respectivamente. Os valores medidos para o  $\Delta H$  (em J/g), para a área (em mJ) e para a temperatura máxima (correspondente a temperatura de fusão) para cada um desses picos estão dispostos na Tabela 4. Não foi possível identificar através desse ensaio a temperatura de transição vítrea desses materiais.

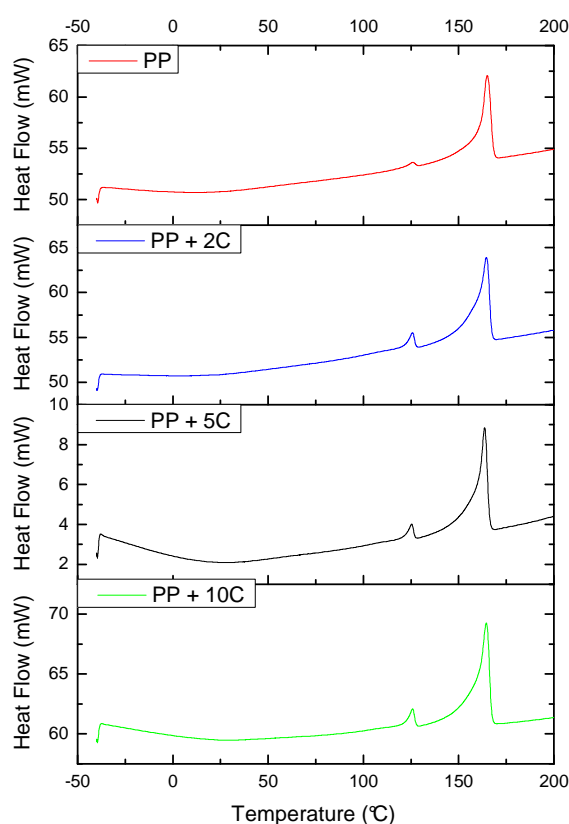


Figura 9. Curvas obtidas no ensaio de DSC para os corpos de prova com 2%, 5%, 10% e sem pó de coco com aditivos, fluxo endotérmico para cima.

O aparecimento de dois picos indica a presença de dois tipos de cristais diferentes no material. Os valores de  $\Delta H$  encontrados podem ser relacionados ao grau de cristalinidade de cada material. A diminuição do  $\Delta H$  do Pico 2 indicam uma diminuição do grau de cristalinidade com o aumento do teor de pó de coco presente, o que reafirma os resultados discutidos anteriormente no DRX.

Tabela 5: Temperaturas máximas, áreas e delta H calculados para os picos obtidos nas curvas do DSC.

	Pico 1			Pico 2		
	T <sub>f</sub> 1 (°C)	ΔH (J/g)	Área (mJ)	T <sub>f</sub> 2 (°C)	ΔH (J/g)	Área (mJ)
PP	125,82	2,3725	11,929	165	78,3103	393,744
PP + 2PC	125,75	8,0607	65,115	164,58	66,6913	538,733
PP + 5PC	125,37	5,4227	21,094	163,61	65,4177	254,475
PP + 10PC	125,83	5,6054	42,685	164,52	61,5751	468,894

#### 4.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As três superfícies de fratura apresentavam uma região mais deformada e a maior parte do corpo de prova relativamente plano. As regiões onde se verifica maior deformação da matriz (Figuras 12(b), 13(b) e 14 (b)) correspondem às áreas mais esbranquiçadas vistas na Figura 6. No caso dos corpos de prova com pó de coco, essa região fica próxima às bolhas, onde provavelmente se iniciou a fratura.

Não foi observada nenhuma aglomeração do pó de coco, o que indica que houve uma boa dispersão da carga na matriz. Comparando as micrografias abaixo (Figuras 10 e 11) vemos que a superfície de fratura do corpo de prova sem aditivos apresenta um grande número de pequenas crateras onde provavelmente haviam grãos de pó de coco que se soltaram durante a ruptura do material. A superfície de fratura do corpo de prova com aditivo não apresenta essas pequenas crateras, o que é um indicativo que a adesão do pó de coco à matriz foi efetiva.

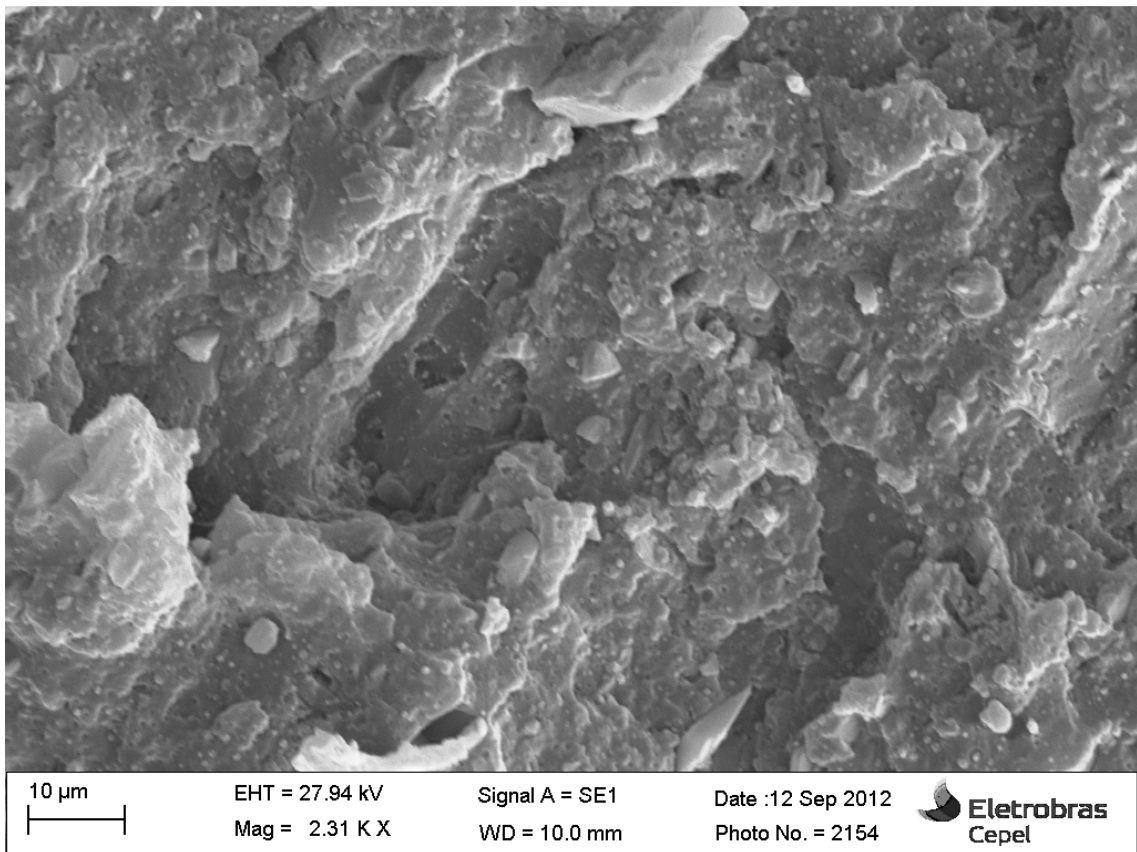


Figura 10. PP com 10% de pó de coco com aditivo.

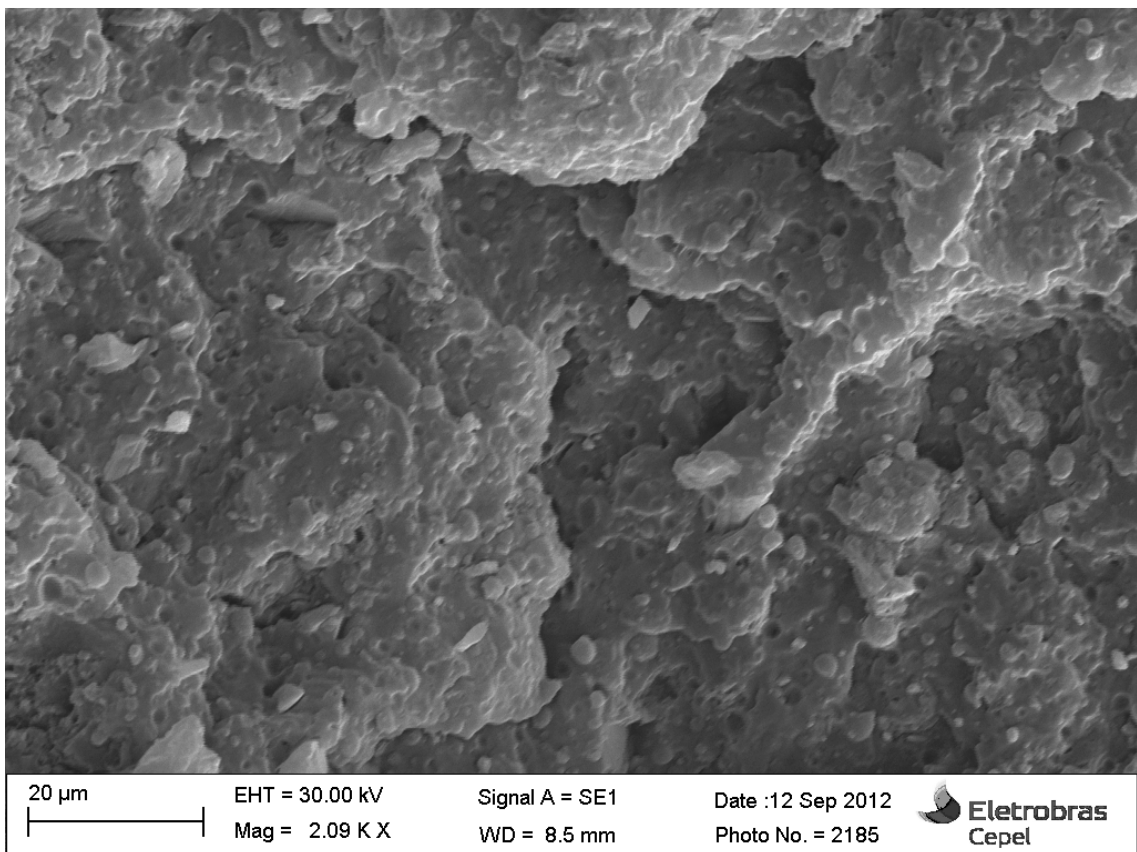


Figura 11. PP com 10% de pó de coco, sem aditivos.

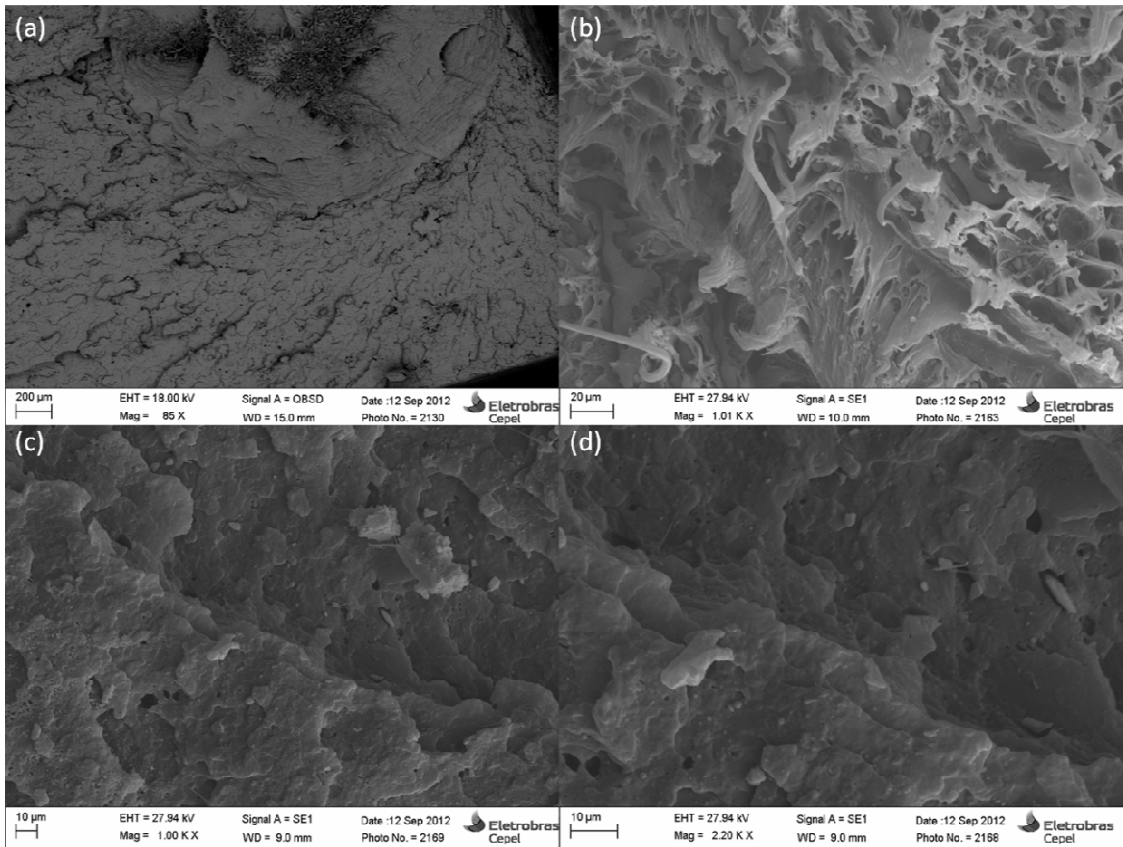


Figura 12. PP sem pó de coco.

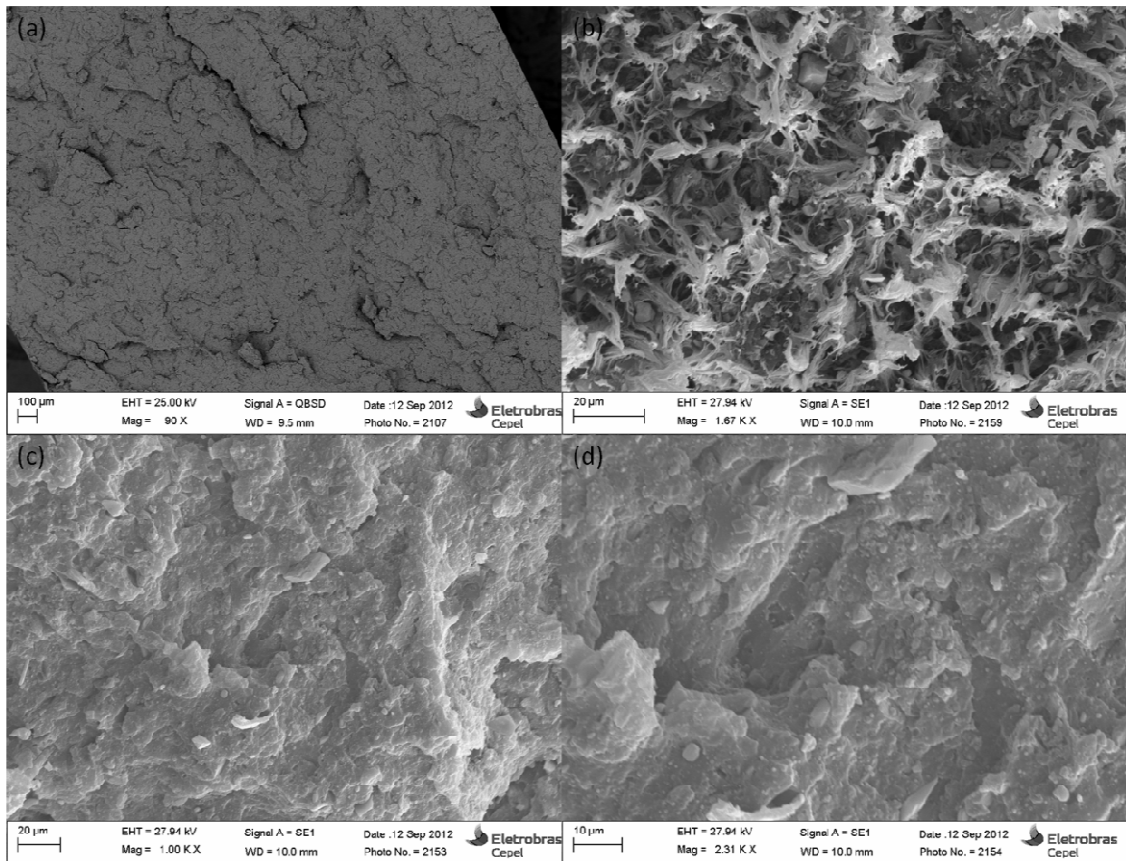


Figura 13. PP com 10% de pó de coco, com aditivos.

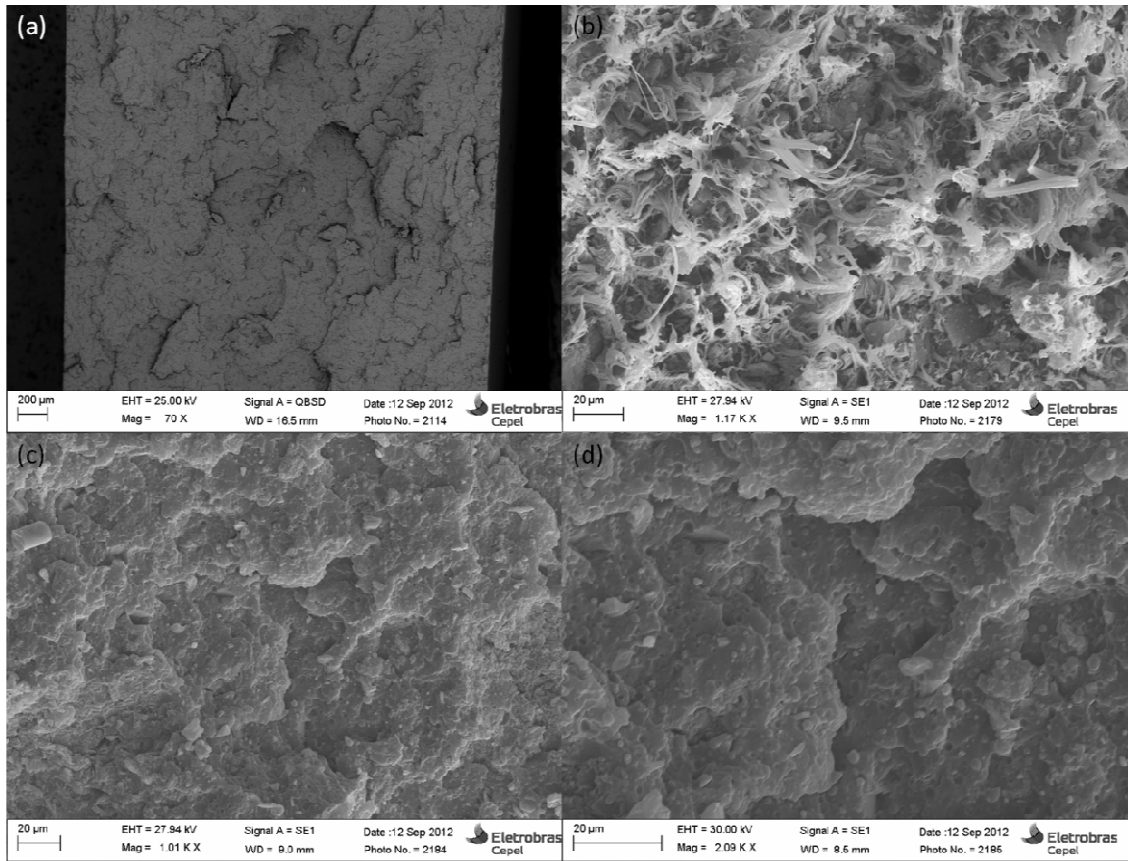


Figura 14. PP com 10% de pó de coco, sem aditivos.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

---

Os aditivos utilizados se mostraram efetivos na promoção da adesão da carga à matriz e as condições de processamento permitiram uma boa dispersão da fibra na matriz, como pode ser visto com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura.

Ocorre a presença de bolhas para teores mais elevados de pó de coco, fragilizando o material, provavelmente devido à rápida absorção da umidade ambiente.

O polipropileno provindo de copos descartáveis brancos é predominantemente isotático. A adição de pó de coco promove a diminuição do elevado grau de cristalinidade do polipropileno, que permanece, entretanto, relativamente alto. Por outro lado o pó de coco favorece a formação de outro tipo de cristal de ponto de fusão mais baixo que está presente em menor quantidade.

É evidente a tendência de aumento do módulo com o aumento do teor de pó de coco. Um estudo sobre a quantidade adequada de aditivo a ser usada para cada concentração se faz importante visando o melhor desempenho melhor possível para o material, não havendo aditivo em excesso, o que prejudica as propriedades da matriz polimérica e nem falte aditivo para ligar o pó de coco à matriz.

## CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. Karian, H. G. (2003). *Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites* (2 ed.). New York: Marcel Dekker.
2. Manrich, S. (2005). *Processamento de termoplásticos*. São Paulo: Artliber.
3. Lieberman, R. B. Propylene Polymers. In *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (3 ed., Vol. 11, pp. 287-358). John Wiley & Sons.
4. Mählmann, C. M., Lawisch, A. d., & Kipper, L. M. (2004). Estudo da reciclagem por termo-prensagem de polipropileno (PP) pós-uso.
5. Ishizaki, M. H., Visconte, L. L., Furtado, C. R., Leite, M. C., & Leblanc, J. L. (2006). Caracterização Mecânica e Morfológica de Compósitos de Polipropileno e Fibras de Coco Verde: Influência do Teor de Fibra e das Condições de Mistura. *Polímeros* , 16, pp. 182-186.
6. Santos, E. F. (2007). Efeito de agentes de acoplamento em compósitos de polipropileno com fibra de coco. Porto Alegre.
7. Ayrimis, N., Jarusombuti, S., Fueangvivat, V., Bauchongkol, P., & White, R. H. (n.d.). Coir Fiber Reinforced Polypropylene Composite Panel for Automotive Interior Applications.
8. Macedo, J. S., Costa, M. F., Tavares, M. I., & Thiré, R. M. (2010). Preparation and Characterization of Composites Based on Polyhydroxybutyrate and Waste Powder From Coconut Fibers Processing. *Polymer Engineering & Science* , 50, pp. 1466-1475.
9. Santos, E. F., & Nachtigal, S. M. (2007). Estudo das propriedades de compósitos de polipropileno com fibra de coco.
10. Haque, M., Islam, S., & Nazrul, I. (2012). Preparation and characterization of polypropylene composites reinforced with chemically treated coir. *Journal of Polymer Research* , 19, pp. 1-8.



11. Gibson, R. F. (1994). *Principles of composite material mechanics*. Mc Graw Hill.
12. Rabello, M. S. (2000). *Aditivação de Polímeros*. Artliber Editora.
13. Md. Nazrul Islam, M. R. (2010). Physico-mechanical properties of chemically treated coir reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* , 41 (2), 192-198.
14. Morandim-Giannetti, A. A., Agnelli, J. A., Lanças, B. Z., Magnabosco, R., Casarin, S. A., & Bettini, S. H. (2012). Lignin as additive in Polypropylene/coir composites: thermal, mechanical and morphological properties. *Carbo hidrate Polymers* , 2563-2568.
15. Tolinski, M. (2009). *Additives for Polyolefins, Getting the most out of Polypropylene, polyethylene and TPO*. Elsevier.
16. Thomas, R. Additives. In *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (Vol. 1, pp. 203 - 218). John Wiley & Sons.
17. *Aditivos produzidos pela Clariant*. Acesso em julho 2012, disponível em Site da empresa Clariant: <http://www.clariant.com>
18. Xanthos, M. Plastic Processing. In *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (3 ed., Vol. 11, pp. 1 - 29). John Wiley & Sons.
19. Donald G. Baird, D. I. (1998). *Polymer processing: principles and design*.
20. Canevarolo Jr., S. V. (2004). *Técnicas de Caracterização de Polímeros*. São Paulo: Artliber Editora.
21. Furches, J. B. Test Methods. In *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (3 ed., Vol. 8, pp. 189 - 222). John Wiley & Sons.
22. Pethrick, R. A. Characterization of Polymers. In *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (3 ed., Vol. 9, pp. 159 - 188). John Wiley & Sons.
23. O'Connell, P. A. Yield and Crazing in Polymers. In *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (3 ed., Vol. 12, pp. 627 - 681). John Wiley & Sons.
24. Ehrenstein, G. W. Fractography. In *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (3 ed., Vol. 2, pp. 590 - 616). John Wiley & Sons.
25. Elizabete F. Lucas, Bluma G. Soares, E. E. (2001). *Caracterização de Polímeros: Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica*. Rio de Janeiro: E-papers.

26. Mello, C. C. (2010, março). Modificação superficial do pó de coco visando a fabricação de compósitos biodegradáveis com matriz de poli(3-hidroxibutirato). Rio de Janeiro.
27. Iijima M, Strobl G. Isothermal crystallization and melting of isotactic polypropylene analyzed by time and temperature-dependence small-angle X-ray scattering experiments, American Chemical Society, Germany, 2000

## ANEXO 1 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS NO AJUSTE DAS CONDIÇÕES DE PROCESSO

Dega- sagem	Tempo (min)	Aditivos	Temperatura	Módulo de Elasticidade (MPa)		LE (Offset 0,2 %) (MPa)		Def LE (Offset 0,2%) (%)		LR (MPa)		Def LR (%)		Tensao RUPT (MPa)		Def RUPT (%)	
				Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
C3	2,5	nox mix	190°C	2000	167	11,68	1,42	0,67	0,14	9,57	3,23	1,28	0,41	14,25	0,99	1,27	0,41
C3	5	nox mix	190°C	1900	260	11,52	1,01	0,76	0,14	8,72	0,68	1,61	0,25	15,12	1,20	1,60	0,25
C4	5	nox mix	195°C	2100	407	13,95	1,38	0,84	0,20	14,24	4,69	2,83	0,37	21,68	0,89	2,83	0,37
C5	5	nox mix	190°C	1700	85	12,64	2,52	0,83	0,22	14,03	5,03	3,35	0,82	21,22	2,62	3,16	1,05
C6	5	nox mix	190°C	1600	160	11,86	0,81	0,96	0,14	10,24	3,43	2,00	0,20	15,24	1,15	1,98	0,19
C4	5	nox mix	190°C	2200	365	13,68	1,29	0,83	0,17	12,97	3,03	2,58	0,81	19,79	2,35	2,29	0,75
C4	5	nox mix	195°C	1500	121	14,40	1,19	1,11	0,13	11,53	1,69	2,82	0,65	19,98	2,94	2,73	0,78
C5	5	-	195°C	1700	230	12,69	1,77	0,86	0,25	10,12	1,69	2,29	1,16	17,43	2,45	2,28	1,16
C5	5	nox mix	195°C	1700	151	12,68	1,79	0,89	0,24	11,40	0,82	2,50	0,51	19,76	1,16	2,49	0,51
C5	5	nox mix pro	190°C	1600	90	10,32	0,70	0,74	0,16	12,89	3,87	3,08	1,47	15,42	1,60	3,05	1,48

Degasagem (número de vezes)

	1 ton	2 ton	3 ton	4 ton	5 ton
C3	0	3	3	3	3
C4	4	4	5	5	5
C5	5	5	5	6	6
C6	6	6	6	7	7