



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE MATERIAIS

---



ENG 02298 TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

Utilização da Micronização na Reciclagem de Barbeadores Multimateriais  
Descartáveis

Felipe Nunes Laux

180674

Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior

Porto Alegre

Dezembro de 2015

## **AGRADECIMENTOS**

Ao excepcional grupo de pessoas composto por:

Dillan e Rafa;

Jéssica e Goia;

Bina e Tamara;

Bento e Carol;

Welter, Sabrina e Sofia;

Paula e Micheli;

Amanda e Andreia;

E também a todos os outros que abriram mão de uma parte do seu tempo e compartilharam uma parte do seu conhecimento para colaborar na elaboração deste trabalho.

## RESUMO

A possibilidade de se produzir produtos contendo uma mistura de diferentes materiais acarretou, ao longo dos últimos anos, em um crescimento no desenvolvimento dos mesmos. A tendência atual de combinar materiais para fins funcionais e estéticos faz com que os problemas decorrentes aumentem em igual escala. Uma vez que a separação dos materiais componentes não é possível em função do processamento ao qual são submetidos, os produtos multimateriais encontram dificuldades ou impossibilidade de serem reciclado por processos tradicionais de reciclagem. Dessa forma, é importante estudar maneiras de se reprocessar esse tipo de produtos, para evitar o descarte prematuro em aterros sanitários e industriais. Assim, este trabalho se dedica a avaliar a técnica de micronização como uma alternativa eficiente para o reprocessamento de produtos multimateriais, utilizando, como objeto de estudo, barbeadores descartáveis. Para isto, os produtos, depois de serem micronizados, foram misturados com polipropileno virgem e submetidos ao processo de extrusão. O material obtido foi caracterizado mecanicamente quanto sua resistência à tração e ao impacto e dureza; fisicamente quanto a sua densidade e índice de fluidez; e termicamente através de análise termogravimétrica e calorimetria exploratória diferencial. Apesar de ter sido notado uma queda nas propriedades mecânicas, os dados mostram que o polipropileno incorporou bem a carga micronizada, sem problemas de dispersão, uma vez que os resultados obtidos tiveram baixo desvio padrão e foram coerentes com o esperado.

**Palavras-chave:** Produtos multimateriais. Reciclagem. Micronização. Barbeadores.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Ciclo total dos Materiais.....	14
Figura 02 - Simbologia para identificação de materiais poliméricos .....	16
Figura 03 - Estrutura química do polipropileno.....	18
Figura 04 - Estruturas morfológicas de copolímeros em bloco em função da relação A/B.....	19
Figura 05 - Estrutura química do SEBS .....	20
Figura 06 - Exemplar do produto utilizado no estudo .....	22
Figura 07 - Modelo do aparelho de FTIR utilizado .....	23
Figura 08- Fluxograma de trabalho .....	23
Figura 09 - Moinho utilizado na etapa de cominuição .....	24
Figura 10 - Moinho utilizado na etapa de micronização .....	24
Figura 11 - Extrusora utilizada no estudo.....	25
Figura 12 - Picotador utilizado no estudo.....	26
Figura 13 - Mini injetora utilizada no estudo.....	26
Figura 14 - Máquina universal utilizada no ensaio de tração.....	28
Figura 15 - Corpo de prova utilizado no ensaio de resistência à tração .....	28
Figura 16 - Equipamento utilizado no ensaio de resistência ao impacto .....	29
Figura 17 - Corpo de prova utilizado no ensaio de resistência ao impacto.....	29
Figura 18 - Equação para determinação de densidade pelo método de Arquimedes..	30
Figura 19 - Aparato para determinação de densidade pelo método de Arquimedes ...	31
Figura 20 - Plastômero utilizado neste estudo .....	31
Figura 21 - Durômetro utilizado neste estudo .....	32
Figura 22 - Modelo do equipamento de TGA utilizado .....	33
Figura 23 - Modelo do equipamento de DSC utilizado .....	34
Figura 24 - Espectro de FTIR do material polimérico presente no cabo do barbeador	35
Figura 25 - Espectro de FTIR de PP virgem .....	35
Figura 26 - Espectro de FTIR do material elastomérico presente no cabo do barbeador .....	36
Figura 27 - Espectro de FTIR do TPE PP/SEBS.....	36
Figura 28 - Material elastomérico após cominuição .....	37
Figura 29 - Material após passagem em peneira de 35 mesh.....	37
Figura 30 - Aparência do material após extrusão.....	38
Figura 31 - Corpos de prova de PP+carga para ensaios de tração (a) e impacto (b) ..	38
Figura 32 - Corpos de prova do PP virgem para ensaios de tração (a) e impacto (b) .	39
Figura 33 - Corpos de prova PP virgem após a realização do ensaio de tração .....	39

Figura 34 - Corpos de prova PP + carga após a realização do ensaio de tração .....	40
Figura 35 - Perfis das curvas tensão deformação obtidas.....	40
Figura 36 - Corpos de prova após ensaio de impacto .....	41
Figura 37 - Curvas de TG (preto) e DTG (azul) para o PP virgem.....	45
Figura 38 - Curvas de TG (preto) e DTG (azul) para o PP + carga .....	45
Figura 39 - Curva de DSC do PP virgem .....	46
Figura 40 - Curva de DSC da carga.....	47
Figura 41 - Curva de DSC para o PP + carga .....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Perfil de temperatura utilizado na extrusão .....	26
Tabela 02 - Parâmetros de injeção .....	27
Tabela 03 - Comparação entre ensaios de tração do PP virgem e do PP com carga .	41
Tabela 04 - Comparação entre ensaios de resistência ao impacto Izod do PP virgem e do PP com carga .....	42
Tabela 05 – Densidades pelo método de Arquimedes para PP virgem e PP com carga .....	42
Tabela 06 - MFI para o PP virgem e o PP com carga .....	43
Tabela 07 - Dureza Shore D para o PP virgem e PP com carga.....	44

## LISTA DE SIGLAS

ASTM - American Society for Testing and Materials

ABNT - Associação Brasileira de Normas

PP – Polipropileno

TPE - Elastômero termoplástico

SEBS - Estireno-Etileno/Butileno-Estireno

SBS - Estireno-Butadieno-Estireno

FTIR - Espectroscopia de infravermelho com transformada de fourier

LaPol - Laboratório de Materiais Poliméricos

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LACOR - Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materais

MFI - Índice de fluidez

TGA - Análise termogravimétrica

DSC - Calorimetria exploratória diferencial

CP – Corpo de prova

TG – Termogravimetria

DTG - Termogravimetria derivada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
3.1 PRODUTOS MULTIMATERIAIS .....	13
3.2 RECICLAGEM DE POLÍMEROS.....	13
3.2.1 Tipos de Reciclagem de Polímeros.....	15
3.2.2 Processos de reciclagem de polímeros.....	15
3.2.2.1 Reciclagem Mecânica .....	15
3.2.2.2 Reciclagem Química .....	16
3.2.2.3 Reciclagem Energética.....	17
3.2.3 Micronização.....	17
3.3 POLÍMEROS EM ESTUDO.....	18
3.3.1 Polipropileno .....	18
3.3.2 Elastômeros Termoplásticos.....	19
<b>4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>22</b>
4.1 AQUISIÇÃO E PREPARO DAS AMOSTRAS.....	22
4.2 IDENTIFICAÇÃO DOS POLÍMEROS PRESENTES NO PRODUTO.....	22
4.3 COMINUIÇÃO.....	23
4.4 MICRONIZAÇÃO .....	24
4.5 MISTURA COM PP VIRGEM .....	25
4.6 EXTRUSÃO .....	25
4.7 INJEÇÃO.....	26
4.8 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	27
4.9 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO .....	28
4.10 DENSIDADE PELO MÉTODO DE ARQUIMEDES.....	29
4.11 ÍNDICE DE FLUIDEZ .....	31



4.12 DUREZA SHORE .....	32
4.13 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA .....	32
4.14 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL DE FLUXO DE CALOR ...	33
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>35</b>
5.1 IDENTIFICAÇÃO DOS POLÍMEROS PRESENTES NO PRODUTO .....	35
5.2 COMINUIÇÃO E MICRONIZAÇÃO .....	36
5.3 EXTRUSÃO .....	38
5.4 INJEÇÃO.....	38
5.5 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL OBTIDO .....	39
5.5.1 Análise do ensaio de resistência à tração .....	39
5.5.2 Análise do ensaio de resistência ao impacto Izod .....	41
5.5.3 Densidade.....	42
5.5.4 Índice de Fluidez.....	42
5.5.5 Dureza Shore.....	43
5.5.6 Análise termogravimétrica.....	44
5.5.7 Análise da calorimetria exploratória diferencial .....	46
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>48</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>50</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das razões que torna os polímeros populares como materiais de engenharia é o fato de serem inertes química e biologicamente. No entanto, essas características acabam se tornando um problema quando é necessário descartá-los (1). Outras características como densidade baixa, boa resistência, baixo custo e facilidade de produção também são responsáveis pelo crescimento no mercado, que traz consigo igual aumento na geração de resíduos decorrentes da produção e descarte destes materiais (2).

Em 2014 o plástico representou 13,5% do volume de lixo que poderia ter sido reciclado mas foi disposto em aterros e lixões. Isso faz dele o principal produto reciclável que deixa de ser reaproveitado. Só no Brasil, isso se traduz em cerca de cinco bilhões de reais desperdiçados anualmente com descarte inadequado (3). Como agravante, a disposição de plásticos em aterros dificulta o movimento de fluidos no interior destes, em função da formação de camadas impermeáveis. Este efeito prejudica a decomposição de outros materiais e dificulta a compactação do resíduo (4).

A alta diversidade de produtos poliméricos que começam a surgir a partir dos anos 1900 faz com que já na década de 60 comece a ocorrer a substituição de materiais tradicionalmente usados por polímeros, dando origem à Idade dos Polímeros. Juntamente com essa diversidade, o desenvolvimento tecnológico e a necessidade de atendimento de critérios específicos fazem com que comece a surgir produtos que unam diferentes materiais em um mesmo componente, os chamados multimateriais (5).

Entretanto, a tendência de unir diferentes materiais em um único produto traz consigo alguns riscos. O tipo de processamento pelos quais os produtos multimateriais são manufaturados impossibilita a dissociação dos seus componentes, o que faz com que eles encontrem dificuldades de inserção nos processos tradicionais de reciclagem, que dependem justamente da separação dos materiais. A impossibilidade de separação se traduz em impossibilidade de reprocessamento e resulta em sérios problemas, que permeiam questões ambientais, sociais e econômicas (6).

Como alternativa para contornar estes problemas, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a micronização, que consiste na redução do tamanho de partícula, como opção para o reprocessamento do corpo de aparelhos de barbear descartáveis - cujo processo de fabricação utilizado não permite a separação adequada dos diferentes componentes utilizados.

O trabalho focará na aplicação da micronização tradicional, sem a utilização de técnicas mais avançadas, que envolvem fluidos supercríticos durante o processo. O produto a ser reciclado é composto por diferentes materiais poliméricos, termoplástico e elastomérico. A proposta se baseia em estudos anteriores em escovas de dente, que possuem uma composição de materiais com funções semelhantes. (6)

Essa necessidade surge em função do produto em questão não obedecer a critérios importantes do ecodesign, um modelo de projeto de design orientado por critérios ecológicos (7). Entre estes critérios pode-se citar: utilização de materiais de baixo impacto ambiental, reutilização de objetos e modularidade dos componentes que formam o produto.

Assim, com este estudo pretende-se encontrar uma maneira que possibilite a reciclagem dos produtos citados, ao mesmo tempo em que se diminua a quantidade de material virgem utilizado para a fabricação de novo produtos.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar o processo de micronização como uma opção para a reciclagem de corpo de barbeadores multimateriais descartáveis, visando uma nova aplicação para o produto reciclado.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Verificar a possibilidade de se utilizar o material micronizado como carga em um polímero virgem, para posterior processamento utilizando extrusão e injeção.

- Caracterizar o material obtido quanto às suas propriedades físicas, térmicas e mecânicas.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 PRODUTOS MULTIMATERIAIS

Produtos multimateriais consistem em uma associação de materiais em um mesmo componente. É importante diferenciá-los de uma montagem de diversos materiais, de modo que algumas abordagens sugerem considerar que multimateriais são combinações de materiais que não podem ser desmontadas (8). Como exemplo, pode-se citar os produtos co-injetados, multicamadas e compósitos.

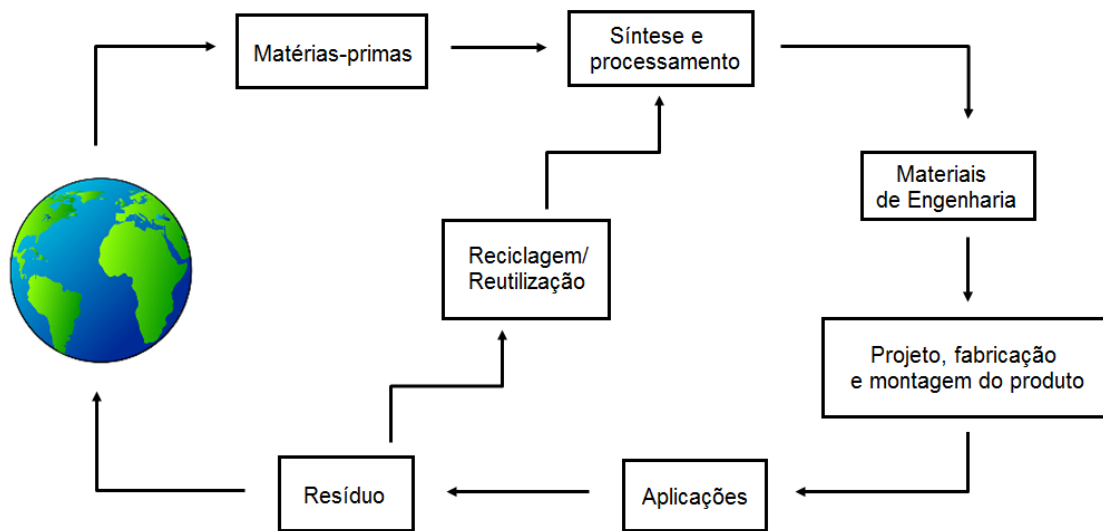
Os produtos multimateriais surgem na medida em que os tradicionais materiais monolíticos não conseguem mais atender as exigências de desempenho para designers e engenheiros. Paralelo a isso, começam a ser desenvolvidas e aperfeiçoadas técnicas computadorizadas para sistematizar ainda mais os métodos de design e facilitar a busca por soluções de projeto. Assim, as soluções para os problemas de projetos deixam de ser pesquisadas na definição de um produto, e começam a ser focadas na concepção de um multimaterial, multifuncional, que seja adaptado para a aplicação em questão (8).

Entre os motivos pelos quais utilizar multimateriais, além da melhoria de desempenho, estão: a facilidade de produção e a redução de custos operacionais (9). Para a sua produção, em geral são utilizados métodos que não permitem a separação dos componentes, como a co-injeção – que promove a fusão dos materiais envolvidos –, fazendo com que não seja possível a sua separação, inviabilizando, conseqüentemente, sua reciclagem pelos processos convencionais.

#### 3.2 RECICLAGEM DE POLÍMEROS

Estima-se que, nos Estados Unidos, metade da energia usada pela indústria é gasta na produção de materiais (1). Dessa forma, é importante selecionar com cuidado os materiais, uma vez que estes possuem influência direta no custo, meio ambiente, sistema de produção e ciclo de vida do produto. O ciclo de vida de um material é representado pelo ciclo dos materiais, mostrado na Figura 01, abaixo.

**Figura 01 - Ciclo total dos Materiais**



**Fonte: Adaptado de Callister; Rethwisch (2012).**

O ciclo dos materiais apresenta todo o caminho, do início ao fim de sua utilização, começando com a extração das matérias-primas usadas para fabricá-lo e terminando com a disposição do resíduo gerado pelo produto/material ao término de sua vida útil. Ao chegar neste ponto o material pode ser reciclado/reutilizado, retornando ao ciclo dos materiais, ou eliminado como rejeito. Assim, o produto deve ser projetado de modo que, ao final de sua vida útil, os materiais possam ser descartados com o menor impacto ecológico possível (1). Para os materiais virgens, a exploração das matérias-primas, o transporte até o local de beneficiamento e o tipo de processamento ao qual elas serão submetidas são os fatores que influenciam no seu impacto ecológico. Já para materiais reciclados, os fatores envolvidos são o sistema de gerenciamento de lixo em que os resíduos estão inseridos, seu transporte até o local de reciclagem e o tipo de reprocessamento (10).

Ao optar pela reciclagem, é possível citar como benefícios: a redução do lixo aterrado; preservação de recursos naturais; economia de energia; redução de poluição ambiental; e geração de empregos diretos e indiretos. Uma destas formas de geração de emprego se dá pela coleta de resíduos recicláveis, que se divide em coleta bruta e coleta seletiva (4). Enquanto na primeira os materiais coletados são enviados a uma usina de lixo, onde os recicláveis serão separados em um setor de triagem, na segunda a separação é realizada

pela própria fonte geradora (11). Hoje se observam ainda iniciativas de recolhimento de produtos pelas próprias empresas ou outras instituições, através de postos de coleta ou envio por correio.

### 3.2.1 Tipos de Reciclagem de Polímeros

A reciclagem de polímeros se divide, conforme a ASTM D5033-00, em primária, secundária, terciária e quaternária. No que diz respeito ao tipo de processamento, a divisão é feita entre mecânica, química e energética (4). Os parâmetros que são usados para definir cada tipo ou processo de reciclagem serão explicados a seguir.

A reciclagem primária está relacionada a resíduos do produto dentro do processo (pré-consumo), como rebarbas e resíduo nos canais de injeção, que são novamente introduzidos no processo produtivo. Já a reciclagem secundária reaproveita materiais que são oriundos do pós-consumo. Esse tipo de reciclagem se inicia na coleta dos resíduos residenciais e industriais e continua em uma unidade de triagem e separação. A reciclagem terciária é usada para produtos de alto valor econômico e envolve processos químicos, como a despolimerização ou pirólise, por exemplo, para transformar resíduos em matérias-primas novamente. Por fim, a reciclagem quaternária é aplicada para resíduos que não são reutilizáveis do ponto de vista econômico, e visa apenas obtenção de energia térmica (6; 4).

### 3.2.2 Processos de reciclagem de polímeros

Conforme citado anteriormente, os processos mais comuns de reciclagem de polímeros são divididos em três tipos: reciclagem mecânica, reciclagem química e reciclagem energética.

#### 3.2.2.1 Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica – ou física – consiste, fundamentalmente, na trituração e reprocessamento do polímero, com o objetivo de produzir um novo componente. Neste tipo de processo, o material deve inicialmente ser separado. Para facilitar a separação dos tipos de polímero, a NBR 13230:2008,

da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (12), estabelece as normas de identificação para materiais poliméricos, conforme a Figura 02.

**Figura 02 - Simbologia para identificação de materiais poliméricos**



**Fonte: Adaptado de ABNT NBR13230:2008.**

A separação inicial é importante porque uma das limitações da reciclagem mecânica se dá justamente em função da incompatibilidade entre polímeros diferentes (13). Deve-se citar ainda que a dificuldade de identificação de alguns polímeros torna a etapa de separação mais difícil e mais cara (11).

Após a separação, o material passa pela etapa de lavagem – se necessário – e segue para a trituração, onde ocorre a redução do tamanho do resíduo, a fim de facilitar a etapa seguinte, de extrusão. Na extrusão, o material é transformado em um produto homogêneo que, após ser peletizado, está pronto para ser reprocessado e transformado em um novo componente (13).

### 3.2.2.2 Reciclagem Química

A reciclagem química consiste na utilização de calor ou agentes químicos para decompor os polímeros. O objetivo é a obtenção de monômeros ou mesmo misturas de compostos, formadas, principalmente, por hidrocarbonetos. Os produtos obtidos através deste tipo de reciclagem possuem propriedades bem semelhantes às do material virgem (13).

Apesar do grande potencial deste processo, e da atenção que desperta nos recicladores, este tipo de reciclagem é pouco aplicado em virtude do seu baixo índice de aplicação e por ser um processo que não apresenta um bom retorno financeiro. Além disso, o custo de implementação requer um alto investimento (6).



### 3.2.2.3 Reciclagem Energética

A reciclagem energética – ou térmica - é realizada quando não existe alternativa para reciclar o material. Nela, o resíduo passa por uma incineração controlada a fim de se aproveitar a energia liberada na sua queima. O resíduo do processo de incineração é posteriormente enviado para um aterro (14). Em função disso, é importante estar atento ao tipo de material que será submetido a ele. Ainda que possuam um bom poder calorífico, alguns polímeros ao serem queimados podem liberar substâncias tóxicas, como é o caso dos polímeros clorados. Assim, a etapa de separação é de fundamental importância para a reciclagem energética (13).

Como neste processo o material não é reutilizado na sua totalidade, promovendo apenas a recuperação de energia através de sua queima, algumas classificações não o consideram uma forma de reciclagem. Essa divergência surge exatamente na maneira com que se define um processo de reciclagem, já que alguns autores entendem que existe a necessidade do reaproveitamento do material para geração de novos produtos (15).

### 3.2.3 Micronização

A micronização é um processo de redução de tamanho de partículas de um material (16). Apesar de existirem diferentes técnicas de micronização, as mais comuns e acessíveis envolvem a trituração do material. O processo pode ser realizado tanto em temperatura ambiente quanto em temperaturas criogênicas, onde o processo recebe o nome de micronização criogênica. Nesse último caso, é utilizado nitrogênio líquido para resfriar o material a temperaturas que ficam entre  $-120$  e  $-80^{\circ}\text{C}$ , antes de promover a sua trituração (6). Embora consumam pouca energia e apresentem um custo de manutenção baixo, esse tipo de micronização é pouco usado em função de seu alto custo de operação, devido ao consumo de nitrogênio líquido (17).

A micronização a temperatura ambiente, por outro lado, pode operar em temperaturas de até  $120^{\circ}\text{C}$  (17), de modo que não é recomendável para materiais que apresentem um baixo ponto de fusão. Enquanto na micronização a temperatura ambiente gera partículas com tamanho entre 0,210 a 0,420mm, a micronização criogênica consegue gerar partículas com tamanho entre 0,105

e 0,210mm. Ambos os processos, no entanto, podem ser aplicados diversas vezes até que as partículas alcancem o tamanho de interesse (6).

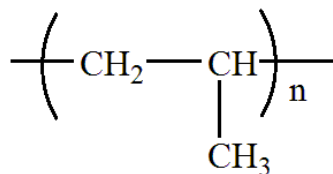
Na área de reciclagem de polímeros, a micronização é amplamente utilizada para o reprocessamento de termofixos e materiais elastoméricos. O processo, quando aplicado a materiais como a borracha de pneu pode ser utilizado para produzir asfalto-borracha (18). Quando misturados com polímeros termoplásticos, é possível produzir uma mistura homogênea para obter elastômeros termoplásticos, possíveis de se injetar (19).

### 3.3 POLÍMEROS EM ESTUDO

#### 3.3.1 Polipropileno

O polipropileno (PP) é um homopolímero termoplástico semicristalino, com massa molar que fica entre 80.000 e 500.000 g/mol. Sua densidade gira em torno de 0,90g/cm<sup>3</sup>, com temperatura de transição vítrea entre 4 e 12°C e temperatura de fusão entre 165 e 175°C (20). Sua estrutura química é demonstrada na Figura 03:

**Figura 03 - Estrutura química do polipropileno**



O polipropileno começou a ter larga utilidade comercial apenas quando, utilizando catalisadores de organometálicos (também conhecidos por catalisadores Ziegler-Natta), foi possível sintetizá-lo em sua forma isotática. Antes disso, o polipropileno só havia sido sintetizado na sua forma atática, que possui poucas propriedades comerciais. Por esse motivo, o polipropileno em sua forma isotática é hoje conhecido como polipropileno comercial. (21).

As principais características do PP são: baixa densidade, bom isolamento térmico e elétrico, boa resistência química – não é atacado pela maioria dos agentes orgânicos, mas é atacado quando exposto a compostos

halogenados – e boa resistência ao impacto. Junto com o fato de ser um polímero de fácil moldagem e usinagem, o PP é um polímero de ampla utilização no mercado, apresentando o maior crescimento de mercado na história dos plásticos desde o início de sua produção comercial, em 1957 (22).

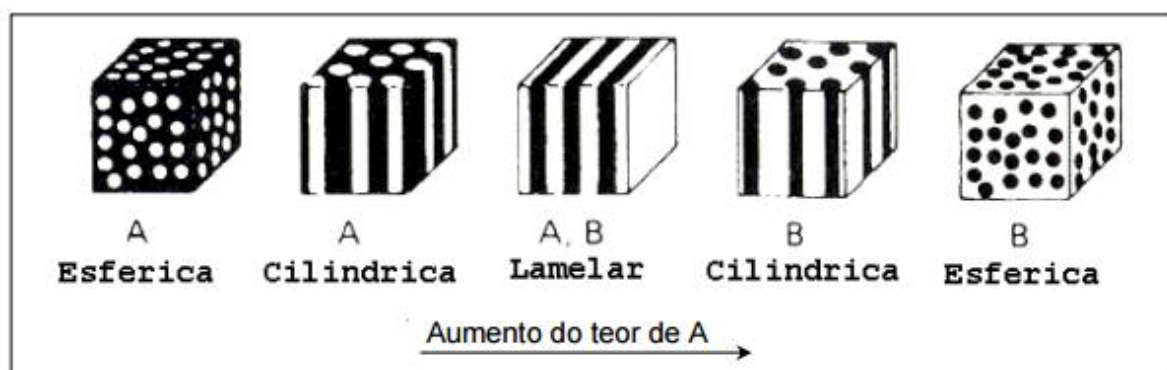
Sua aplicação hoje está muito ligada ao mercado de embalagens – para produtos alimentícios e de higiene –, bens de consumo e setor automobilístico. O setor de construção civil também começa a aplicar o polipropileno em construções, em função das suas propriedades como isolante térmico e acústico. Além disso, quando usado em aplicações estruturais, o uso do polímero diminui o peso da estrutura e diminui a quantidade de concreto utilizado (22).

### 3.3.2 Elastômeros Termoplásticos

Elastômeros termoplásticos (TPE's, na sigla em inglês) são copolímeros em bloco que misturam centros rígidos e elastoméricos, em uma estrutura multifásica. Essa estrutura resultante é responsável por fazer com que os TPE's possuam, ao mesmo tempo, as características de processamento dos termoplásticos e características físicas da borracha (23; 24).

A estrutura de um TPE geralmente é do tipo A-B-A, onde A é um termoplástico e B um elastômero. A morfologia depende da relação entre as quantidades de termoplástico/elastômero. A Figura 04 apresenta as diferentes estruturas morfológicas que os TPE's podem apresentar, em função da quantidade de termoplásticos (23).

**Figura 04 - Estruturas morfológicas de copolímeros em bloco em função da relação A/B**

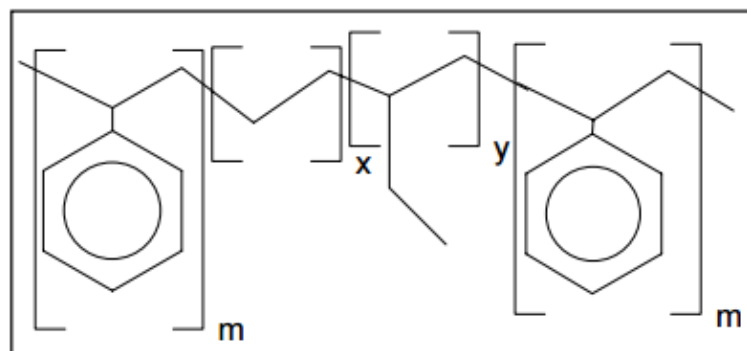


Fonte: Abreu, 2004.

Se a quantidade de centros rígidos for baixa, o copolímero apresenta uma morfologia esférica, com o termoplástico disperso em uma matriz elastomérica. Conforme o teor aumenta, o material começa a apresentar uma estrutura cilíndrica até que finalmente se alcance uma relação 50/50, onde a estrutura se transforma em lamelar. Quando o termoplástico passa a ser a fase em maior quantidade, a situação se inverte e se observam as mesmas morfologias observadas anteriormente, porém com o elastômero como fase dispersa (23).

Entre os TPE's mais comuns está o SEBS (Estireno-Etileno/Butileno-Estireno, na sigla em inglês). Este copolímero é obtido a partir da hidrogenação de outro copolímero em bloco, o SBS (Estireno-Butadieno-Estireno, na sigla em inglês). A Figura 05 apresenta a estrutura química do SEBS (23).

**Figura 05 - Estrutura química do SEBS**



**Fonte: Abreu, 2004**

Por não apresentar insaturações, o SEBS se torna mais resistente a oxidação e não corre o risco de reticular durante o processamento. Em geral, a relação usada comercialmente contém 30% de estireno, que apresenta uma morfologia esférica. (23). Devido ao seu alto custo e sua capacidade de processamento limitada, o SEBS nunca é utilizado em sua forma pura. Ao invés disso, o produto é utilizado em porcentagens que variam de 1% até 50%, em geral. A quantidade varia de acordo com o objetivo a ser alcançado no produto. Em quantidades baixas (1 a 20%), o SEBS atua como modificador de impacto em polímeros apolares (24).

Quando misturado ao PP, a blenda formada possui um desempenho superior quando comparados a outros TPE's. Entre as aplicações encontradas

é possível citar as indústrias de calçados, peças automotivas, isolamento elétrico e revestimentos. (24).

## 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1 AQUISIÇÃO E PREPARO DAS AMOSTRAS

Os barbeadores, todos idênticos, foram adquiridos em estado pré-consumo, em suas embalagens originais. Após a aquisição, o primeiro passo foi a retirada de cada lâmina de barbear, para que a cominuição pudesse ser efetuada. A escolha de não utilizar as lâminas se deve ao fato do aço utilizado nestes produtos possuir um valor agregado muito maior que os polímeros em questão, além de possuir uma reciclagem bem estabelecida. Um exemplar do produto, já sem a lâmina, está representado na Figura 06.

**Figura 06 - Exemplar do produto utilizado no estudo**



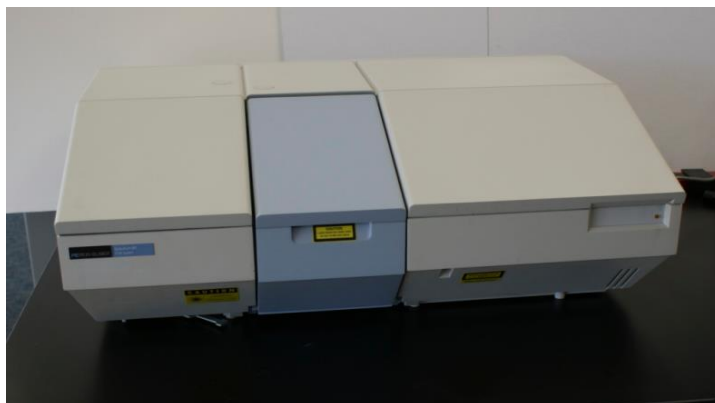
**Fonte: o autor, 2015.**

### 4.2 IDENTIFICAÇÃO DOS POLÍMEROS PRESENTES NO PRODUTO

Os materiais presentes no corpo do produto foram caracterizados utilizando a técnica de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR, na sigla em inglês). O ensaio consiste na emissão de um feixe de radiação infravermelha fazendo com que as moléculas da amostra interajam de três maneiras distintas: absorvendo, emitindo ou espalhando a radiação. Essas interações são captadas por um detector, que gera um espectro de acordo com a interferência das ondas geradas. Na prática, o feixe de radiação passa por um divisor, que o divide em duas partes iguais. Uma parte reflete em direção a um espelho fixo, enquanto a outra reflete em direção a um espelho móvel. Os dois feixes sofrem reflexão total e passam novamente pelo divisor, sofrendo interferências construtivas (se estiverem em fase) ou destrutivas (se estiverem defasadas em  $180^\circ$ ), sendo encaminhados para o detector (25).

O equipamento utilizado foi um FTIR Spectrum 1000, da marca Perkin Elmer, apresentado na Figura 07, pertencente ao Laboratório de Materiais Poliméricos (LaPol) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

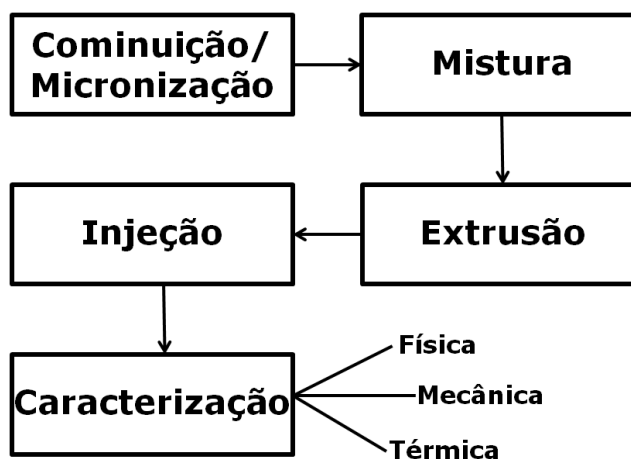
**Figura 07 - Modelo do aparelho de FTIR utilizado**



Fonte: Perkin Elmer, 2015 (26)

Após a identificação dos materiais, foi determinado um fluxograma de trabalho para produzir e caracterizar o material desejado, mostrado na Figura 08.

**Figura 08- Fluxograma de trabalho**



Fonte: o autor, 2015.

### 4.3 COMINUIÇÃO

Antes de realizar a micronização foi necessário fragmentar os barbeadores para que o material atingisse um tamanho adequado para o equipamento. Assim, foi utilizado um moinho de facas RONE SFB 2305,

representado na Figura 09. O equipamento pertence ao Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais (LACOR) da UFRGS.

**Figura 09 - Moinho utilizado na etapa de cominuição**



**Fonte: o autor, 2015.**

#### 4.4 MICRONIZAÇÃO

Para a etapa de micronização foi utilizado um moinho de facas Retsch SM300, com rotação de 1.500 rpm, representado na Figura 10. O equipamento pertence ao LACOR da UFRGS. O material foi passado pelo equipamento duas vezes. Na primeira foi utilizada uma malha de 2mm; na segunda, uma malha de 1mm.

**Figura 10 - Moinho utilizado na etapa de micronização**



**Fonte: o autor, 2015.**



Para facilitar a micronização e garantir que o tamanho das partículas fosse o desejado, o material foi sendo peneirado entre as passagens pelo moinho de facas. Foram utilizadas peneiras de 16 e 35 *mesh* (1,19 e 0,5mm, respectivamente).

#### 4.5 MISTURA COM PP VIRGEM

Após a micronização e o peneiramento, o material foi misturado com PP virgem, em uma proporção mássica de 70% de PP e 30% de material reciclado. O PP utilizado foi o grade CP 442 XP.

#### 4.6 EXTRUSÃO

A extrusão foi realizada em uma extrusora mono rosca pertencente ao LaPol da UFRGS, representada na Figura 11.

**Figura 11 - Extrusora utilizada no estudo**



**Fonte: o autor, 2015.**

O perfil de temperaturas utilizado está representado na Tabela 1, onde a Zona 01 representa a zona de entrada do material e a Zona 3 a saída. A velocidade de rotação foi de 50RPM.

**Tabela 01 - Perfil de temperatura utilizado na extrusão**

<b>Zona 1</b>	180°C
<b>Zona 2</b>	210°C
<b>Zona 3</b>	200°C

**Fonte: o autor, 2015.**

Após extrudado o material foi pelletizado utilizando um picotador Seibt PS50, pertencente ao LaPol da UFRGS, que pode ser visto na Figura 12.

**Figura 12 - Picotador utilizado no estudo**

**Fonte: o autor, 2015.**

#### 4.7 INJEÇÃO

A injeção foi realizada em uma mini-injetora Thermo Scientific HAAKE MiniJet II, pertencente ao LaPol da UFRGS, representada na Figura 13. Para cada amostra (PP virgem e a reciclada) foram injetados 6 corpos de prova (CP) para realizar ensaio de tração e 10 CP's para ensaio de impacto.

**Figura 13 - Mini injetora utilizada no estudo**

**Fonte: o autor, 2015.**

Os parâmetros utilizados na injeção foram os mesmos para ambas as amostras e estão descritos na Tabela 02:

**Tabela 02 - Parâmetros de injeção**

<b>Temperatura do cilindro</b>	190°C
<b>Temperatura do molde</b>	50°C
<b>Pressão de injeção</b>	600 bar
<b>Tempo de injeção</b>	10 segundos

**Fonte: o autor, 2015.**

#### 4.8 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O ensaio de resistência à tração consiste em posicionar um corpo de prova na vertical, preso por duas garras, uma fixa e uma móvel. O ensaio é realizado deslocando a garra móvel a uma velocidade programada, registrando a tensão de tração e a deformação às quais o material está sendo submetido. Assim, a resposta obtida em um ensaio de tração é uma curva tensão x deformação. Desta resposta, entre outras coisas, é possível obter informações quanto ao módulo de elasticidade do material, além de identificar o limite onde o material perde suas propriedades elásticas e começa a deformar plasticamente e o seu limite de ruptura (25).

Para este ensaio, foi utilizada uma máquina de ensaio universal da marca Shimadzu EZ-LX, utilizando o software Trapezium X, conforme a Figura 14. O equipamento pertence à Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Design da UFRGS.

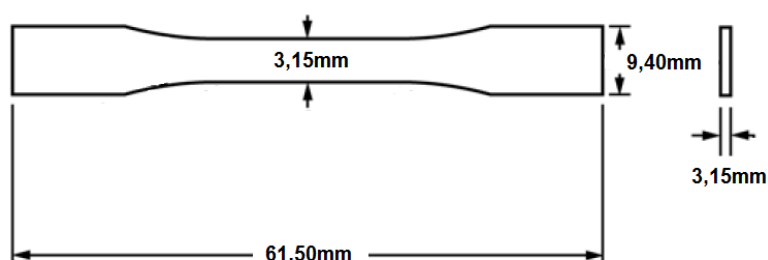
**Figura 14 - Máquina universal utilizada no ensaio de tração**



**Fonte: o autor, 2015.**

A norma seguida para a realização do ensaio foi a ASTM D638-14 (27), utilizando o corpo de prova de modelo V especificado, com as dimensões apresentadas na Figura 15. A velocidade do ensaio para ambas as amostras foi de 20mm/min.

**Figura 15 - Corpo de prova utilizado no ensaio de resistência à tração**



**Fonte: adaptado de ASTM D638, 2014.**

#### 4.9 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO

O ensaio de resistência ao impacto Izod consiste em posicionar um corpo de prova e submetê-lo ao impacto de um martelo preso a um pêndulo. O corpo de prova deve sofrer um entalhe, que atuará como concentrador de tensões, garantindo que a fratura produzida no material seja frágil, e não dúctil. Para a realização do ensaio, o princípio envolvido é o de absorção de energia.

O martelo é solto de uma altura padronizada e, ao atingir o corpo de prova, perde a energia necessária para fraturá-lo. Essa energia, descontada da energia gasta para um movimento livre do pêndulo (energia de calibração), pode ser usada para calcular a resistência ao impacto do material (25).

O ensaio foi realizado em um equipamento CEAST Impactor II, da marca Instron, conforme a Figura 16. O equipamento pertence à Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Design da UFRGS.

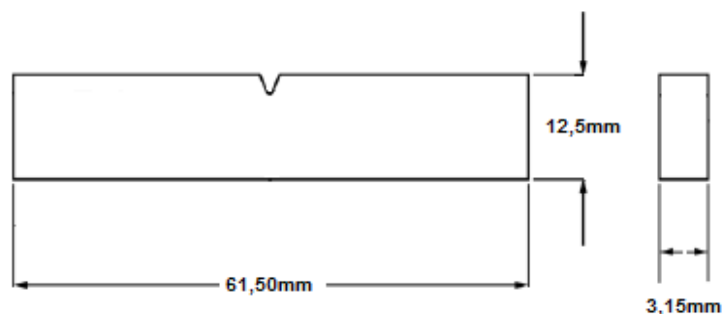
**Figura 16 - Equipamento utilizado no ensaio de resistência ao impacto**



Fonte: o autor, 2015.

A norma seguida para a realização do ensaio foi a ASTM D256-10 (28), utilizando o corpo de prova representado na Figura 17. A velocidade do ensaio para ambas as amostras foi de 20mm/min.

**Figura 17 - Corpo de prova utilizado no ensaio de resistência ao impacto**



Fonte: adaptado de ASTM 256, 2010.

#### 4.10 DENSIDADE PELO MÉTODO DE ARQUIMEDES

Densidade de uma substância é definida como a razão entre sua massa e seu volume. Para a determinação da densidade de sólidos, um dos métodos utilizados é o de Arquimedes. A técnica se baseia no princípio de que todo corpo submerso em um líquido sofre efeito de empuxo, que o empurra para cima com a mesma intensidade do peso do líquido deslocado (29).

O equipamento para realizar a medida consiste em um aparato onde possa ser medida a massa do material a ser analisado dentro da água. Uma vez submersa, a peça ensaiada irá crescer uma certa massa na balança, que será proporcional à força do empuxo em função da massa de água deslocada. A densidade do material será dada pela equação apresentada na Figura 18 (29).

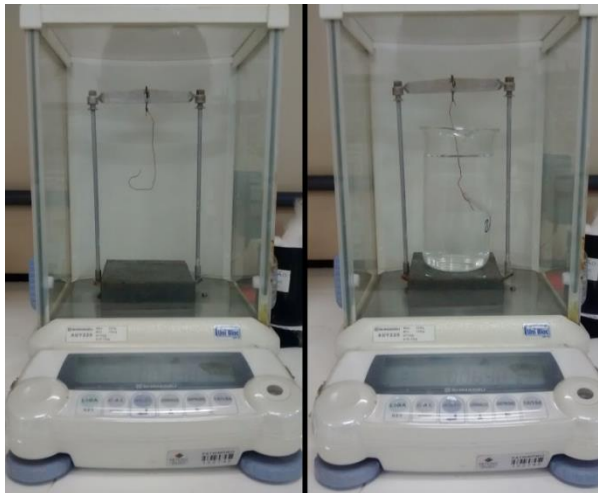
**Figura 18 - Equação para determinação de densidade pelo método de Arquimedes**

$$d_s = \left( \frac{m_s}{m_s - m_{AP}} \right) \cdot d_L$$

**Fonte: Montanheiro, 1990.**

Onde  $d_s$  e  $d_L$  representam as densidades do material ensaiado e líquido utilizado no mecanismo, e  $m_s$  e  $m_{AP}$  representam a massa do sólido e a massa aparente do sólido (ou seja, quando ele se encontra todo submerso). A Figura 19 apresenta o mecanismo utilizado para realizar a determinação de densidade utilizando o método de Arquimedes.

**Figura 19 - Aparato para determinação de densidade pelo método de Arquimedes**



**Fonte: o autor, 2015.**

#### 4.11 ÍNDICE DE FLUIDEZ

O Índice de Fluidéz (MFI, na sigla em inglês) é um índice que mede a facilidade de processamento de polímeros de uma maneira simples. Na prática, o MFI corresponde a quantas gramas de polímero fundido consegue fluir por um capilar durante o tempo de 10 minutos, em uma mesma temperatura. Além disso, o peso que irá forçar a passagem pelo capilar também deve ser constante (23). A norma utilizada para se realizar esta análise foi a ASTM D1238-85 (30), e o ensaio foi conduzido em um plastômero CEAST MF30, da marca Instron, conforme apresentado na Figura 20.

**Figura 20 - Plastômero utilizado neste estudo**

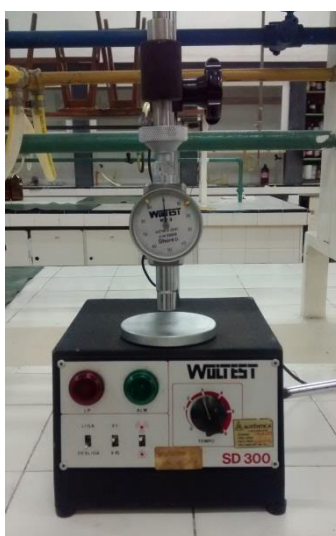


**Fonte: o autor, 2015.**

#### 4.12 DUREZA SHORE D

Segundo a norma D2240-05, da ASTM (31), um ensaio de dureza consiste em forçar um indentador específico com uma força previamente definida sobre o material e avaliar a marca por ele deixada, ou a profundidade de penetração. Para este estudo foi utilizado um durômetro Wulstest SD 300, pertencente à Fundação Liberato, em Novo Hamburgo, conforme mostra a Figura 21.

**Figura 21 - Durômetro utilizado neste estudo**



**Fonte: o autor, 2015.**

#### 4.13 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A Análise Termogravimétrica (TGA, na sigla em inglês), consiste em submeter a amostra a uma variação programada de temperatura, ao mesmo tempo em que se analisa a variação de massa do material. Assim, a perda ou ganho de massa é determinada em função da temperatura e/ou tempo. Essa análise permite descobrir em quais faixas de temperatura o material adquire composição definida e onde ocorre a sua decomposição. Além disso, é possível identificar e acompanhar o andamento de reações de desidratação, oxidação, combustão, entre outras (25). O ensaio foi realizado em um equipamento TGA Q50 da Marca TA, apresentado na Figura 22, pertencente ao LaPol da UFRGS.



**Figura 22 - Modelo do equipamento de TGA utilizado**



**Fonte: TA Instruments, 2015 (32).**

#### 4.14 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL DE FLUXO DE CALOR

A Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC, na sigla em inglês) de fluxo de calor consiste em submeter a amostra e um material de referência à mesma variação programada de temperatura. Ambos os analitos são colocados em cápsulas idênticas, posicionados sobre um disco termoeletrico e aquecidos pela mesma fonte de calor. O calor é transferido para as duas cápsulas e o fluxo de calor entre elas é controlado por termopares conectados ao disco. O ensaio se baseia no princípio que a variação de temperatura, em um dado momento, é proporcional à variação de entalpia, à capacidade calorífica e à resistência térmica total ao fluxo calórico (CANEVAROLO JR, 2007).

Os eventos térmicos detectados nesse ensaio são de transições de primeira ou segunda ordem. Transições de primeira ordem são aquelas que apresentam uma variação de entalpia, dando origem a picos. Como transições de primeira ordem pode-se citar: fusão, perda de massa, dessorção e reações de redução. Já as transições de segunda ordem não apresentam variação de entalpia, mas variação da capacidade calorífica. Assim, essas transições não formam picos, e sim um deslocamento na forma de S na linha base do gráfico fluxo de calor x temperatura. Como exemplo de transição de segunda ordem pode-se citar a temperatura de transição vítrea (CANEVAROLO JR, 2007). O ensaio foi realizado em um equipamento DSC Q20 da Marca TA, apresentado na Figura 23, pertencente ao LaPol da UFRGS.

**Figura 23 - Modelo do equipamento de DSC utilizado**



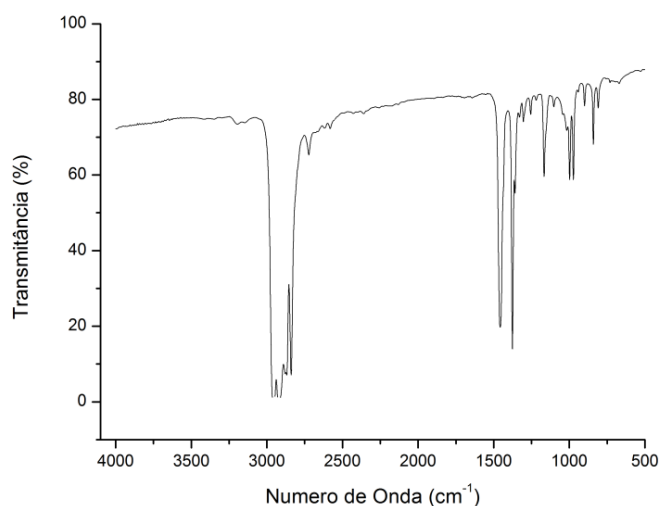
**Fonte: TA Instruments, 2015.**

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 IDENTIFICAÇÃO DOS POLÍMEROS PRESENTES NO PRODUTO

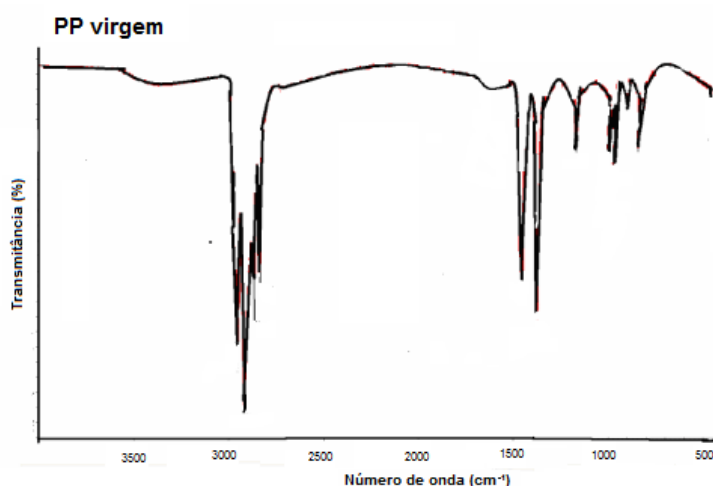
Com os ensaios de FTIR realizados nos dois tipos de materiais encontrados no barbeador, termoplástico e elastomérico, foi possível identificar que o cabo do barbeador em estudo é composto de polipropileno e de um elastômero termoplástico composto de polipropileno e SEBS. As Figuras 24 e 25 apresentam o espectro obtido na análise do polímero presente no barbeador e o padrão de comparação, respectivamente.

**Figura 24 - Espectro de FTIR do material polimérico presente no cabo do barbeador**



**Fonte: o autor, 2015.**

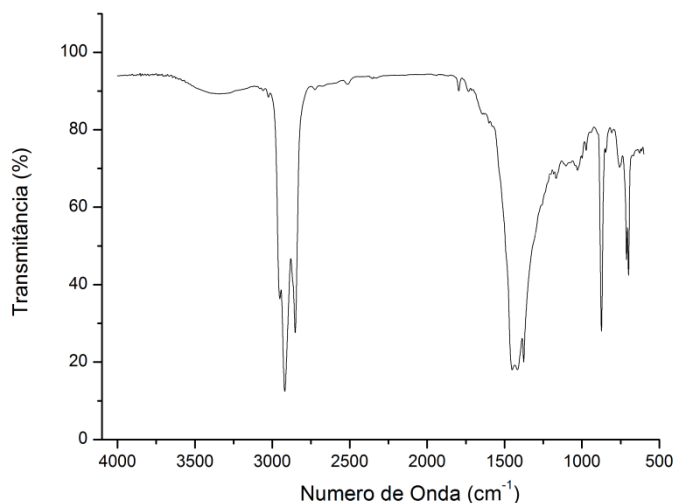
**Figura 25 - Espectro de FTIR de PP virgem**



**Fonte: Santhoskumar et al, 2010 (33).**

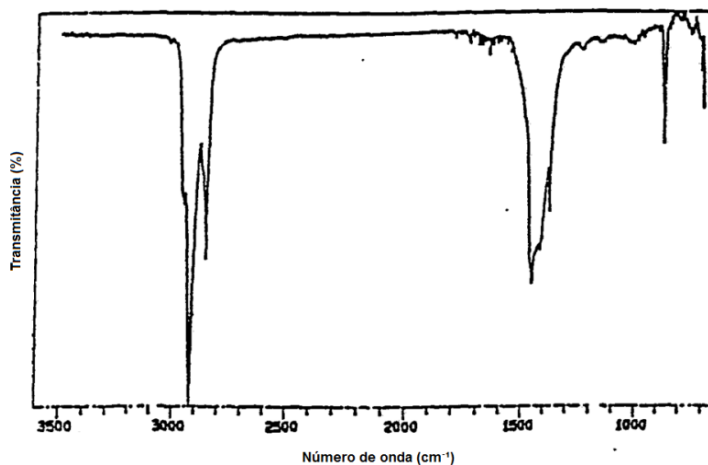
As Figuras 26 e 27 apresentam o espectro obtido na análise do elastômero presente no barbeador e o padrão de comparação, respectivamente.

**Figura 26 - Espectro de FTIR do material elastomérico presente no cabo do barbeador**



**Fonte: o autor, 2015.**

**Figura 27 - Espectro de FTIR do TPE PP/SEBS**



**Fonte: Zielinski e Seabury, 1993 (34).**

## 5.2 COMINUIÇÃO E MICRONIZAÇÃO

A cominuição realizada no primeiro moinho de facas ocorreu de maneira rápida e sem problemas. No entanto, a parte elastomérica dos barbeadores não foi triturada de maneira adequada, conforme mostra a Figura 28, em

função da sua alta resiliência. Assim, o material acabou passando entre as lâminas do moinho.

**Figura 28 - Material elastomérico após cominuição**



Fonte: o autor, 2015.

Esse problema não se repetiu quando a amostra passou pelo segundo moinho, nas malhas de 2mm e 1mm. Conforme o material passava pelo moinho, era recolhido e passado em peneiras de 16 e 35 mesh. Observou-se então que, apesar da malha utilizada no moinho tenha sido de 2mm, uma parte do material já alcançava a granulometria desejada. Assim, após passar na malha de 1mm, já havia uma quantidade suficiente de material para que se procedesse a extrusão com o PP virgem. A Figura 29 mostra a aparência do material após passagem pela peneira de 35 *mesh*.

**Figura 29 - Material após passagem em peneira de 35 *mesh***

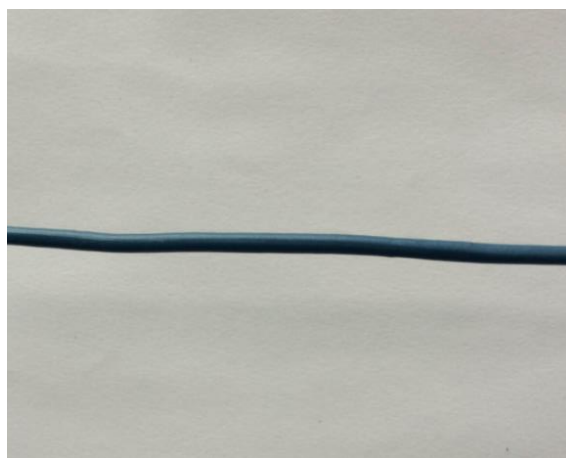


Fonte: o autor, 2015.

### 5.3 EXTRUSÃO

A extrusão ocorreu sem problemas relacionados à mistura com o polímero virgem ou qualquer dificuldade de extrusão. O material extrudado apresentou aparência completamente homogênea, sem demonstrar qualquer defeito de instabilidade na matriz ou fratura do fundido. A Figura 30 mostra a aparência do material extrudado.

**Figura 30 - Aparência do material após extrusão**

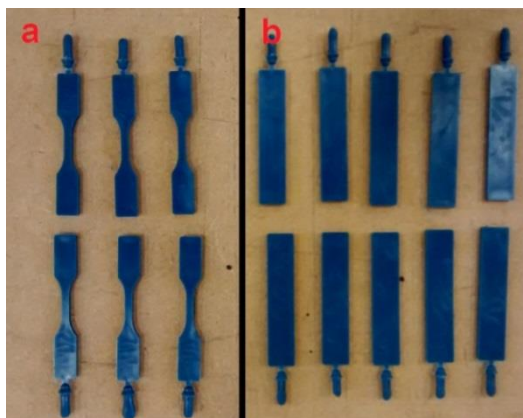


**Fonte: o autor, 2015.**

### 5.4 INJEÇÃO

A injeção do material reciclado aconteceu sem problemas, com os corpos de prova sem sinais de degradação e com uma aparência homogênea, conforme a Figura 31. As dimensões dos corpos de prova estão de acordo com as apresentadas nas Figuras 14 (tração) e 16 (impacto).

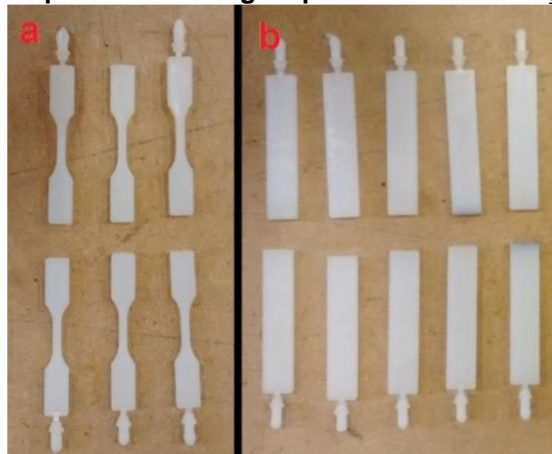
**Figura 31 - Corpos de prova de PP+carga para ensaios de tração (a) e impacto (b)**



**Fonte: o autor, 2015.**

Também foram injetados 6 corpos de prova do PP virgem, como pode ser visto na Figura 32. O polímero virgem foi utilizado para melhor comparação das propriedades medidas no material com a carga. As dimensões dos corpos de prova estão de acordo com as apresentadas nas Figuras 14 (tração) e 16 (impacto).

**Figura 32 - Corpos de prova do PP virgem para ensaios de tração (a) e impacto (b)**



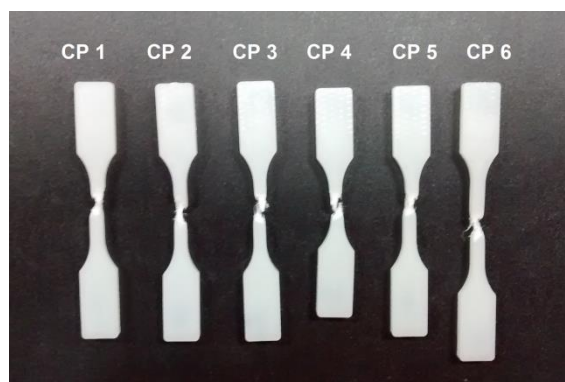
Fonte: o autor, 2015.

## 5.5 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL OBTIDO

### 5.5.1 Análise do ensaio de resistência à tração

O ensaio de resistência à tração foi realizado com 6 corpos de prova de PP virgem e de PP+carga, para que fosse possível uma comparação mais adequada possível da variação das propriedades em função da adição da carga. As Figuras 33 e 34 apresentam os corpos de prova do polímero virgem e com carga, após a realização do ensaio.

**Figura 33 - Corpos de prova PP virgem após a realização do ensaio de tração**



Fonte: o autor, 2015.

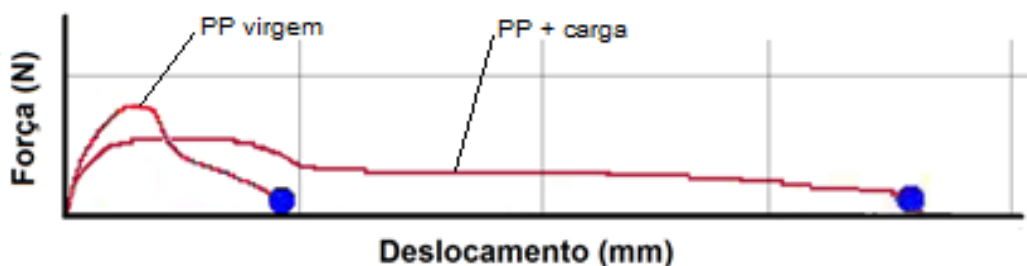
**Figura 34 - Corpos de prova PP + carga após a realização do ensaio de tração**



Fonte: o autor, 2015.

No ensaio do polímero com a carga, o CP 6 foi descartado em função do seu comportamento destoante em relação aos outros CP's. Ainda assim o número de corpos de prova ficou dentro do estipulado pela ASTM D638. Comparando as imagens acima é possível observar um aumento significativo da capacidade se deformar plasticamente sem romper, de cerca de 400% a mais do que o polímero virgem. A adição de um TPE ao polímero virgem, mesmo que em pequenas quantidades gerou uma mudança significativa no perfil da curva tensão x deformação do material obtido, conforme se observa na Figura 35.

**Figura 35 - Perfis das curvas tensão deformação obtidas**



Fonte: o autor, 2015.

Os resultados para tensão de escoamento, tensão máxima e tensão de ruptura estão apresentados na Tabela 03.



**Tabela 03 - Comparação entre ensaios de tração do PP virgem e do PP com carga**

	Tensão de Escoamento (Mpa)	Tensão Máxima (Mpa)	Tensão de Ruptura (Mpa)	Deslocamento até a Ruptura (mm)
<b>PP virgem</b>	38,4532 ( $\pm 0,8979$ )	11,9537 ( $\pm 0,6056$ )	1,4678 ( $\pm 0,0097$ )	8,5083 ( $\pm 0,2611$ )
<b>PP + carga</b>	29,1143 ( $\pm 1,1615$ )	8,3770 ( $\pm 0,1937$ )	1,6827 ( $\pm 0,0979$ )	43,4768 ( $\pm 8,3607$ )

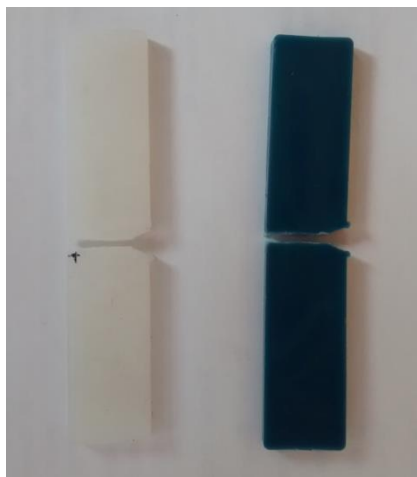
Fonte: o autor, 2015.

Ao adicionar a carga, observa-se uma queda nos valores de tensão de escoamento e de tensão máxima. A tensão de escoamento caiu aproximadamente 24%, enquanto a tensão máxima teve uma queda de 30%. Por outro lado, além do aumento do deslocamento até a ruptura, o polímero com a carga apresentou um leve aumento na sua tensão de ruptura, de cerca de 15%. O alto valor observado nos desvios padrão do ensaio com o polímero com carga pode estar relacionado a problemas de dispersão da carga no material extrudado ou a formação de bolhas não identificadas nos corpos de provas.

### 5.5.2 Análise do ensaio de resistência ao impacto Izod

Assim como no ensaio de resistência à tração, o ensaio de resistência ao impacto foi realizado tanto no PP virgem quanto no PP com carga. Foram utilizados 10 corpos de prova para cada amostra, sendo todos eles validados. A Figura 36 mostra um exemplo de cada corpo de prova após o ensaio.

**Figura 36 - Corpos de prova após ensaio de impacto**



Fonte: o autor, 2015.

A Tabela 04 apresenta a média dos valores obtidos para ambos os materiais.

**Tabela 04 - Comparação entre ensaios de resistência ao impacto Izod do PP virgem e do PP com carga**

	<b>Resistência ao impacto (J/m)</b>
<b>PP Virgem</b>	267,4609 ( $\pm$ 2,8285)
<b>PP + carga</b>	163,1861 ( $\pm$ 2,5821)

**Fonte: o autor, 2015.**

É importante salientar que o grade de PP utilizado na mistura se trata de um copolímero heterofásico de propileno e etileno, de extra performance (35). Isso explica os altos valores de resistência uma vez que esse grade é utilizado quando há a necessidade de resistir a solicitações elevadas de impacto.

Observa-se que os corpos de prova do PP com carga apresentaram uma resistência ao impacto quase 40% inferior à apresentada pelo PP virgem. Esse resultado já era esperado por se estar adicionando uma carga contendo material elastomérico em um polímero já desenvolvido para possuir excelente resistência ao impacto.

### 5.5.3 Densidade

A medida de densidade foi realizada no PP virgem e no PP com carga, para verificar a influência de sua adição. Para a determinação de cada amostra foram feitas medidas em três corpos de prova diferentes. A Tabela 05 apresenta a média dos valores obtidos para ambos os materiais.

**Tabela 05 – Densidades pelo método de Arquimedes para PP virgem e PP com carga**

	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>PP virgem</b>	0,9436 ( $\pm$ 0,0121)
<b>PP + carga</b>	0,9418 ( $\pm$ 0,0137)

**Fonte: o autor, 2015**

Os resultados não indicam uma mudança na densidade em função da adição da carga. A variação observada foi de apenas 0,2%, valor que ficam dentro dos desvios padrão calculados em cada amostra. Apesar de ser um valor esperado, uma vez que a densidade do SEBS gira em torno de 0,90 a 1,15g/cm<sup>3</sup>, destaca-se o baixo valor de desvio padrão para o PP com carga, indicativo de que o processo de injeção ocorreu de maneira adequada.

#### 5.5.4 Índice de Fluidez

A medida do índice de fluidez foi realizada tanto no PP virgem quanto no PP com carga. O objetivo era analisar se a adição da carga iria tornar o polímero mais ou menos fácil de processar. Cada análise foi feita em cinco vias. A Tabela 06 apresenta os resultados para as duas amostras, assim como seu desvio padrão.

**Tabela 06 - MFI para o PP virgem e o PP com carga**

	<b>MFI (g/10min)</b>
<b>PP virgem</b>	0,374 ( $\pm$ 0,007)
<b>PP + carga</b>	1,079 ( $\pm$ 0,031)

**Fonte: o autor, 2015.**

Observando os resultados pode-se perceber que a adição da carga fez com que o MFI do PP aumentasse quase 190%. Salieta-se o baixo desvio padrão, o que é um indicativo de que a dispersão da carga no polímero virgem ocorreu de maneira adequada.

#### 5.5.5 Dureza Shore D

A medida da dureza foi realizada tanto no PP virgem quanto no PP com carga. Conforme determinado pela ASTM D2240-05, foram realizadas 5 medidas em cada amostra. Para se obter a espessura de 6mm foi necessário sobrepor duas peças. A Tabela 07 apresenta os valores médios apresentados para as duas amostras, assim como seu desvio padrão.

**Tabela 07 - Dureza Shore D para o PP virgem e PP com carga**

	<b>Dureza Shore D</b>
<b>PP virgem</b>	73 ( $\pm 1$ )
<b>PP + carga</b>	69,2 ( $\pm 0,76$ )

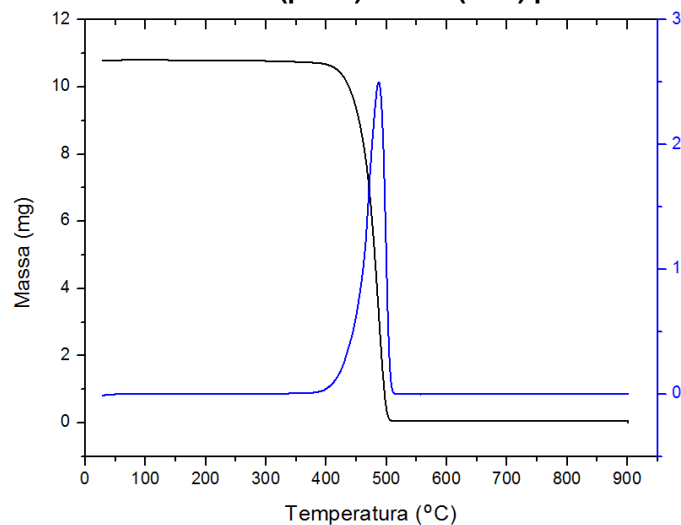
Fonte: o autor, 2015.

Observa-se que a dureza do PP com carga caiu cerca de 5% em relação ao PP virgem. Um resultado esperado, uma vez que foi feita a adição de uma carga contendo um elastômero termoplástico, que apresentam baixa dureza (24). Salienta-se o baixo desvio padrão obtido na amostra com carga, indicando homogeneidade no material obtido.

#### 5.5.6 Análise termogravimétrica

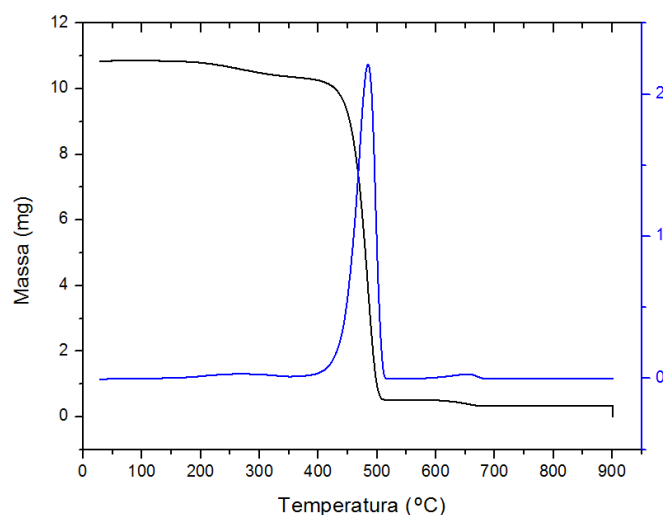
A análise termogravimétrica foi realizada tanto no PP virgem quanto no PP com carga. Assim, foi possível avaliar a influência da adição da carga no polímero e também analisar o material obtido quanto a sua estabilidade térmica. Em ambos os casos, o ensaio foi realizado iniciando em 28°C e atingindo 900°C utilizando uma rampa de aquecimento de 20°C por minuto.

As Figuras 37 e 38 mostram as curvas de TG (termogravimetria) e DTG (termogravimetria derivada, na sigla em inglês) para o PP virgem e o PP com carga, respectivamente. A curva DTG representa a derivada primeira, em relação ao tempo, da curva de TG. Ou seja, avalia a taxa de variação de massa em função do tempo de ensaio. Nas Figuras, a curva de TG é representada na cor preta, enquanto a de DTG é representada na cor azul.

**Figura 37 - Curvas de TG (preto) e DTG (azul) para o PP virgem**

**Fonte: o autor, 2015.**

Analisando a curva de DTG do PP virgem nota-se que a sua decomposição começa a ocorrer em 380°C e termina em 510°C – pontos onde se inicia e encerra o pico da curva em questão. O ponto máximo ocorre em 485°C, o que significa que esta é a temperatura onde a variação de massa está ocorrendo mais rapidamente (25).

**Figura 38 - Curvas de TG (preto) e DTG (azul) para o PP + carga**

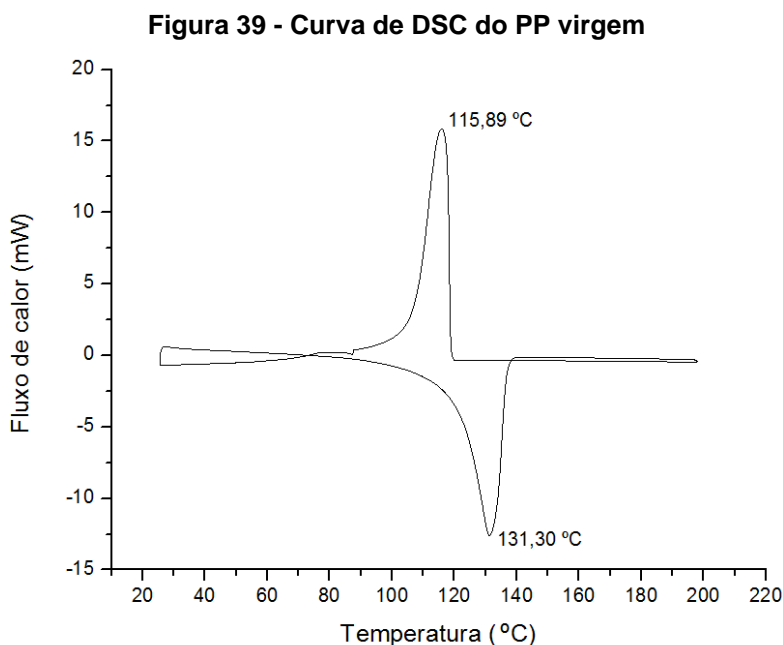
**Fonte: o autor, 2015.**

As curvas decorrentes do TGA realizado no PP com carga, ao contrário do que se observa no PP virgem, apresentam patamares menos definidos. Analisando a curva de TG percebe-se que o material começa a apresentar perda de massa em 200°C, mas somente entre 380 e 510°C começa a

acontecer uma decomposição acentuada, conforme mostra a curva de DTG. A variação de massa mais acentuada também acontece em 485°C, assim como no PP virgem. Além do pico principal na curva de DTG, na análise do PP com carga é possível notar um segundo pico de variação de massa, com ponto máximo em 655°C. Esse segundo pico pode estar associado a aditivos presentes no PP ou no SEBS que compõem o barbeador.

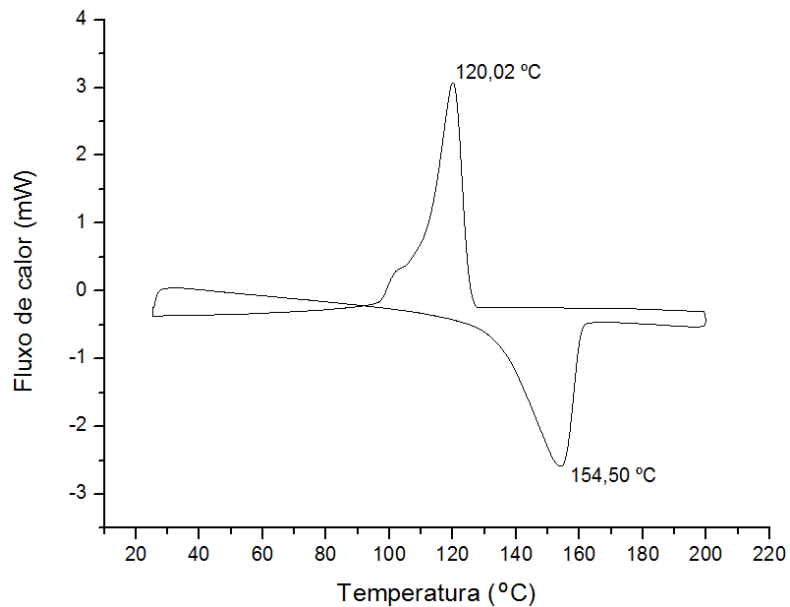
#### 5.5.7 Análise da calorimetria exploratória diferencial

A análise de DSC foi realizada no PP virgem, na carga e no PP com carga. O objetivo foi verificar o comportamento do material obtido durante o aquecimento e resfriamento. Os ensaios foram realizados partindo de 25°C e aquecendo até 200°C, em uma rampa de aquecimento de 10°C/min. Ao chegar na temperatura desejada, a amostra foi novamente submetida a uma taxa de resfriamento de 10°C/min até chegar a 25°C. Por último o primeiro ciclo foi repetido com a mesma rampa de aquecimento até 200°C. A Figura 39 mostra as curvas de resfriamento e aquecimento para o PP virgem.



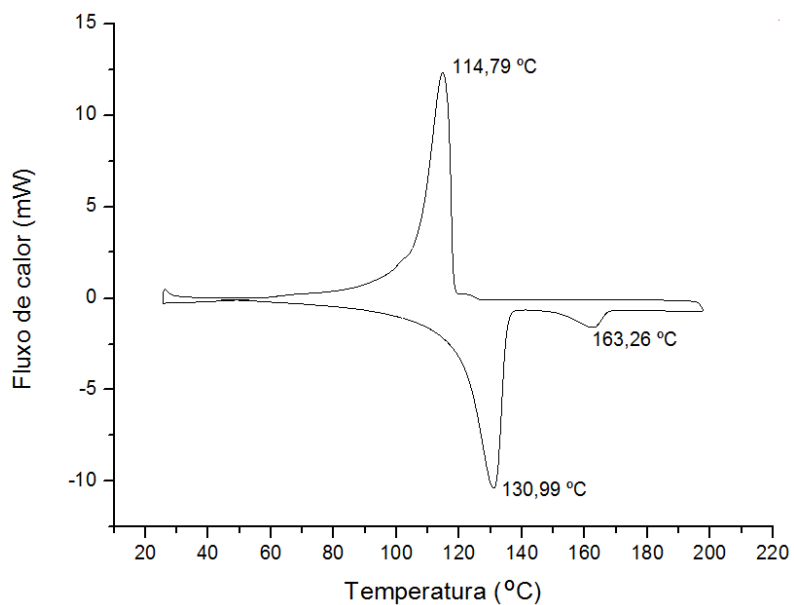
**Fonte: o autor, 2015.**

A curva mostra que o PP virgem sofreu fusão em cerca de 131°C e cristalizou próximo a 115°C, com picos bem definidos. A Figura 40 mostra as curvas de resfriamento e aquecimento de DSC para a carga adicionada.

**Figura 40 - Curva de DSC da carga**

**Fonte: o autor, 2015.**

A curva de DSC da carga apresenta dois picos bem largos, um endotérmico na altura dos 155°C e outro exotérmico na altura dos 120°C. Isso mostra que, quando aquecido, todo o TPE funde e cristaliza ao mesmo tempo, sem a fusão prematura de um componente. Por último tem-se as curvas de resfriamento e aquecimento do material obtido, apresentadas na Figura 41.

**Figura 41 - Curva de DSC para o PP + carga**

**Fonte: o autor, 2015.**

Analisando a curva para o PP com a carga, note-se a existência de dois picos exotérmicos: um bem definido em 130°C e outro pouco aparente em torno de 160°C. Isso significa que, ao ser aquecido, o material obtido primeiro vai ter fundida a sua fase vinda do PPvirgem para depois começar a fundir a fase proveniente do TPE. Essa condição pode fazer com que o material tenha problemas em possuir uma composição definida, se aquecido. Isto, evidentemente, vai depender da taxa de aquecimento a que vai ser submetido o produto originário deste material.

A cristalização, por outro lado, apresentou um único pico, bem definido, em torno de 115°C. Esse pico indica que as duas fases estão cristalizando junto ao ser resfriadas. Isso é favorável, uma vez que a taxa de resfriamento de produtos manufaturados por aquecimento pode ser muito mais difícil de controlar do que o seu aquecimento no processamento.



## 6. CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado foi possível concluir que a micronização se apresenta como uma alternativa possível para a reciclagem de barbeadores multimateriais descartáveis. O processo se mostrou uma aplicação viável e eficiente, com muitas partículas alcançando a granulometria desejada mesmo sem a utilização da malha de 0,5mm. Além disso, não foram constatados problemas como degradação do material a ser reciclado ou dificuldade de moagem em nenhum momento.

Quanto à viabilidade do processo, o produto micronizado não aparentou problemas durante a mistura com o polipropileno virgem, extrusão ou injeção de corpos de prova. Sempre que submetido a processamento, o material apresentou aparência homogênea e sem defeitos.

No que diz respeito à caracterização, o material em geral apresentou resultados com desvios padrão pequenos na maioria dos ensaios, o que pode ser um indicativo de que o polipropileno incorporou a carga de maneira satisfatória, sem problemas de compatibilidade ou dispersão.

No caso dos ensaios de tração e impacto, houve perda significativa de propriedades relacionadas.

Entretanto, deve-se salientar que, embora a micronização tenha se mostrado uma alternativa viável para o reprocessamento de barbeadores multimateriais descartáveis, deve-se repensar o modelo de design que é utilizado. Técnicas derivadas do ecodesign devem ser incentivadas e difundidas para que a reciclagem possa ser pensada desde o início do projeto de manufatura de produtos.

## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Utilizar outras proporções de mistura material reciclado/material virgem, para avaliação da influência no polímero virgem.

- Utilizar produtos pós consumo e micronizar barbeadores de diferentes composições para avaliar o impacto no material produzido.

- Realizar um estudo de viabilidade econômica do processo e viabilizar a coleta e reciclagem de multimateriais para reciclagem utilizando micronização.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8ªEd. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2012.
- 2- SIDDIQUE, Rafat.; Et al. **Use of Recycled Plastic in Concrete: A Review**. Waste Management, v. 28, p.1835-1852, 2008.
- 3 – Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **PERFIL 2014**. São Paulo, 2014.
- 4 - GRIPPI, Sidney. **Lixo, Reciclagem e sua História**. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2001.
- 5 - THOMAS, S.; YANG, W. **Advances in Polymer Processing: From Macro to Nano Scales**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009.
- 6 - ASHTON, Elisa Guerra. **DESIGN E TECNOLOGIA: RECICLAGEM DE PRODUTOS MULTI-MATERIAIS**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- 7 - BRANDÃO, Marili de Lima Ferreira. **Design Sustentável: O Uso da Matéria Prima Renovável. Um Estudo de Caso da Produção do Couro Vegetal no Norte do Brasil**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- 8 - KROMM, F.X.; et al. **Definition of a multimaterials design method**. Materials and Design. nº 28 p. 2641–2646, 2007.
- 9 - WARGNIER, W.; et al. **Proposal for a multi-material design procedure**. Materials and Design, n. 56, p. 44-49, 2014.
- 10 - WILLIAMS, Paul T. **Waste Treatment and Disposal**. 2ªEd. Editora John Wiley & Sons Ltd. Chichester, Inglaterra, 2005.

11 - WASSERMANN, Adriana Inés. **Processamento e Características Mecânicas de Resíduos Plásticos Misturados**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

12 - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13230: 2008. Embalagens e acondicionamento plásticos recicláveis - Identificação e simbologia**.

13 - AGUADO, J.; SERRANO, D. **Feedstock Recycling of Plastic Wastes**. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1999.

14 - CÂNDIDO, L.; et al. **The recycling cycle of materials as a design Project tool**. Journal of Cleaner Production. V. 19, p. 1438-1445, 2011.

15 - VARELLA, Cinthia Versiani Scott. **REVIRANDO O LIXO: POSSIBILIDADES E LIMITES DA RECICLAGEM COMO ALTERNATIVA DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

16 - VANDANA, K. R.; et al. **An overview on *in situ* micronization technique – An emerging novel concept in advanced drug delivery**. Saudi Pharmaceutical Journal, v. 22, p. 283-289, 2014.

17 - LAGARINHOS, C., TENÓRIO, J. **Tecnologias Utilizadas para a Reutilização, Reciclagem e Valorização Energética de Pneus no Brasil**. Polímeros, v.18, n.2, p.106-118, 2008.

18 - LAGARINHOS, Carlos Alberto Ferreira.; CASSOLA, Mônica Speck. **Reciclagem De Pneus Inservíveis: Valorização energética e novos usos**. ICTR 2004 - Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, Florianópolis, 2004.

19 - ZHANG, S. L.; et al. **Characterization of the properties of thermoplastic elastomers containing waste rubber tire poder.** Waste Management. Nº 29, p. 1480 – 1485, 2009.

20 - OGORKIEWICZ, R. M., **Engineering Properties of Plastics.** 1<sup>st</sup> Ed., London: John Wiley & Sons, 1970.

21 - CANEVAROLO JR., Sebastião V. **Ciência de Polímeros.** 2<sup>a</sup> Ed. Editora Artliber, São Paulo, 2006.

22 - PETRY, André. **Mercado Brasileiro de Polipropileno com Ênfase no Setor Automobilístico.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

23 - ABREU, Flávia Oliveira Monteiro da Silva. **Blendas de Polipropileno com Elastômeros Termoplásticos tipo SBS e SEBS.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

24 - TIGGEMANN, Hugo Maurício. **Desenvolvimento de Nanocompósitos a partir de um Elastômero Termoplástico.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

25 - CANEVAROLO JR., Sebastião V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros.** 2<sup>a</sup> Ed. Editora Artliber, São Paulo, 2007.

26 – Perkin Elmer. Disponível em: <http://www.perkinelmer.com/>. Acesso em 27/11/2015.

27 - American Society for Testing and Materials. **D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.** 2014.

28 - American Society for Testing and Materials. **D256-10: Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics.** 2010.

29 - MONTANHEIRO, Maria Nazareth Stolf. **Determinação da densidade de sólidos e líquidos pelo princípio de Arquimedes.** Caderno Catarinense de Ensino de Física, v.7, n.2, 1990.

30 – American Society for Testing and Materials. **D1238 - 85 Standard Test Method for Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer.** 1985.

31 - American Society for Testing and Materials. **D2240-05 Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness.** 2010

32 – TA instruments. Disponível em: <http://www.tainstruments.com/>. Acesso em 27/11/2015.

33 - SANTHOSKUMAR, Anniyyappa Umapathi et al. **Comparison of Biological Activity Transistion Metal 12 Hydroxy oleate on Photodegradation of Plastics.** Central Institute of Plastics Engineering & Technology, Guindy, India, 2010.

34 - ZIELINSKI, R. E.; SEABURY, M. J. **Fluorination of articles molded from elastomers.** 1993. Disponível em: <http://www.google.st/patents/WO1993002129A1?cl=en>. Acesso em 20/11/2015.

35 – BRASKEM. **Folha de dados polipropileno CP 442 XP.** Disponível em: [http://www.activas.com.br/fichas/braskem/pp/copolimero\\_heterofasico/cp442xp.pdf](http://www.activas.com.br/fichas/braskem/pp/copolimero_heterofasico/cp442xp.pdf). Acesso em: 28/11/2015.