

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

WESLEY FERREIRA DA COSTA

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE OBTENÇÃO DE PEÇAS DENSAS A PARTIR
DO PROCESSO DE Prensagem a quente de pó de poli etileno
TEREFTALATO (PET) RECICLADO**

JUIZ DE FORA
2016

WESLEY FERREIRA DA COSTA

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE OBTENÇÃO DE PEÇAS DENSAS A PARTIR
DO PROCESSO DE Prensagem a quente de pó de Poli Etileno
TEREFTALATO (PET) RECICLADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini

JUIZ DE FORA
2016

WESLEY FERREIRA DA COSTA

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE OBTENÇÃO DE PEÇAS DENSAS A PARTIR
DO PROCESSO DE Prensagem a quente de pó de poli etileno
TEREFTALATO (PET) RECICLADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 23 de novembro de 2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Luiz Gustavo Monteiro Guimarães
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Alexandre da Silva Scari
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde, força para superar tudo o que passei e estar sempre comigo. Aos meus pais Marcos e Deisi por estarem sempre ao meu lado, me motivando e sendo base para tudo. Ao meu irmão Gustavo e namorada Thais pelo incentivo e apoio que sempre me deram. A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que me deu a oportunidade de estar aqui. Ao Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini pela grande ajuda e apoio na elaboração deste trabalho. A minha família que sempre me apoio e esteve presente nas minhas conquistas.

RESUMO

Neste trabalho foram obtidas através de prensagem a quente peças densas a partir do pó de PET reciclado. O PET em pó foi prensado em temperaturas variando de 70 °C a 150 °C e a pressão constante de 30 MPa. Com base nos resultados obtidos através dos ensaios de fabricação, lixamento, absorção de água e dureza avaliamos as características referentes ao resíduo do PET estudado, mostrando uma imensa gama de aplicações principalmente na construção civil. Os melhores resultados são obtidos com temperaturas entre 90 °C e 150 °C através dos ensaios realizados mostrando a possibilidade de fabricação e utilização, a possibilidade de proporcionar um melhor acabamento superficial através do processo de lixamento e sua boa capacidade em não acumular água no corpo de prova.

Palavras-chaves: 1. PET. 2. Pelletização. 3. Sinterização. 4. Fabricação.

ABSTRACT

In this work were obtained dense samples using hot pressing on recycled PET powder. The PET powder was pressed at temperatures ranging from 70 °C to 150 °C and at a constant pressure of 30 MPa. Based on the results of this work through the tests of fabrication, grinding and polishing, water absorption and hardness, were can evaluate the relative characteristics of the PET residue studied, showing a wide range of applications mainly in civil construction, among them the main proposal of this work, application in drywall. The best results are obtained with temperatures between 90 °C and 150 ° C through the tests carried out showing the possibility of manufacture and use, the possibility of providing a better surface finish through the grinding process and its good ability not to accumulate water in the test body.

Keywords: 1. PET. 2. Pelletization. 3. Sintering. 4. Manufacture.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Propriedade pela Massa Molar (CANEVAROLO, 2006.)	15
Figura 2 - Exemplo da formação do Ester a partir de um Diácido com Glicol (CANEVAROLO, 2006.)	15
Figura 3 - Polimerização por condensação (PIATTI e RODRIGUES 2005)	19
Figura 4 - Variação do volume específico pela temperatura (transição vítrea) (CANEVAROLO, 2006.)	21
Figura 5 - Variação do volume específico pela temperatura (faixa de cristalização) (CANEVAROLO, 2006.)	22
Figura 6 - Diferença entre as pré-formas do PET (M. S. Rabello e R. M. R. Wellen, 2008.)	23
Figura 7 - Temperatura por Log da Massa Molar (CANEVAROLO, 2006.)	27
Figura 8 - Resíduo proveniente do material reciclado do PET (Autor)	28
Figura 9 - Prensa embutidora (Autor)	29
Figura 10 - Orifício de fabricação do corpo de prova (Autor)	30
Figura 11 - Balança eletrônica (Autor)	30
Figura 12 - Durômetro de ensaio da Dureza de Brinell (Autor)	35
Figura 13 - Durômetro de ensaio da Dureza de Rockwell (Autor)	36
Figura 14 - Altura por Temperatura do experimento 2 (Autor)	38
Figura 15 - Densidade relativa por Temperatura do experimento 1 (Autor)	40
Figura 16 - Densidade relativa por Temperatura do experimento 2 (Autor)	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características de alguns polímeros.....	24
Tabela 2 - Valores pré-determinados para o experimento 1	32
Tabela 3 - Valores pré-determinados para o experimento 2	32
Tabela 4 - Valores obtidos do experimento 1 (massa, diâmetro, altura e volume)	37
Tabela 5 - Valores obtidos do experimento 2 (massa, diâmetro, altura e volume)	38
Tabela 6 - Valores obtidos do experimento 1 (densidade experimental e densidade relativa) .	39
Tabela 7 - Valores obtidos do experimento 2 (densidade experimental e densidade relativa) .	39
Tabela 8 - Valores obtidos do experimento 1 (massa inicial, final e variação)	41
Tabela 9 - Valores obtidos do experimento 2 (massa inicial, final e variação)	42
Tabela 10 - Capacidade de absorção de água por tipos de produtos	42
Tabela 11 - Capacidade do corpo em sofrer o processo de lixamento	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Carbono
HB	Dureza de Brinell
HR	Dureza de Rockwell
HRF	Dureza de Rockwell F
CO-O	Ester
°C	Grau Celsius
H	Hidrogênio
O	Oxigênio
PET	Polietileno Tereftalato
Kg	Quilograma
T _c	Temperatura de cristalização
T _m	Temperatura de fusão cristalina
T _g	Temperatura de transição vítrea
T _{uso}	Temperatura de uso
ΔM	Variação da massa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	11
1.2 MOTIVAÇÃO	11
1.3 OBJETIVOS GERAIS DEFINIDOS.....	12
1.4 METODOLOGIA DEFINIDA	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 POLÍMEROS	14
2.2 POLIMERIZAÇÃO.....	17
2.3 TEMPERATURAS DE TRANSIÇÃO CARACTERÍSTICAS EM POLÍMEROS	20
2.4 SINTERIZAÇÃO	25
2.5 RECICLAGEM DO PET	26
3 ESTUDO DE CASO	28
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	28
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
3.2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO	31
3.2.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	33
3.2.3 ENSAIO DE LIXAMENTO	33
3.2.4 ENSAIOS DE DUREZA	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1 ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO	37
4.2 ANÁLISE DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	41
4.3 ANÁLISE DO ENSAIO DE LIXAMENTO	42
4.4 ANÁLISE DO ENSAIO DE DUREZA	43
5 CONCLUSÃO	44
5.1 CONCLUSÕES	44
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Propõe-se explorar novas funcionalidades para os resíduos derivados da indústria de reciclagem de garrafas PET a fim de proporcionar uma redução dos refugos industriais e uma aplicação útil para a sociedade e conseqüentemente às empresas envolvidas. No processo foi utilizado uma embutidora para avaliação do material polimérico operando para fornecer blocos sólidos onde foram ensaiadas suas propriedades mecânicas.

O material a ser estudado, por não apresentar as características necessárias para o processo de pelletização, deixa de ser amplamente utilizado na reciclagem. As perspectivas de resultados preveem a possibilidade de um grande número de produtos que podem ser gerados a partir deste experimento, como a drywall, mesas, pias, boxes, etc.

1.2 – MOTIVAÇÃO

A garrafa PET tem sido utilizada em grande escala na sociedade em que vivemos. Ela nos gera inúmeras vantagens se comparada com as embalagens de vidro, como menor custo na fabricação, leveza, melhor resistência mecânica, além de ser quimicamente inerte, além da possibilidade de sua reciclagem, dentre outras características.

O PET, ou Polietileno Tereftalato, é um polímero termoplástico, que foi desenvolvido por dois químicos britânicos Whinfield e Dickson em 1941, formado pela reação entre o ácido tereftálico e o etileno glicol, originando um polímero, termoplástico. Utiliza-se principalmente na forma de fibras para tecelagem e em embalagens para bebidas.

A grande variedade de produtos que são produzidos através do PET mostra sua elevada importância, principalmente no mercado de embalagens.

Sua relevância na indústria se dá por possuir propriedades termoplásticas, isto é, pode ser reprocessado diversas vezes pelo mesmo ou por outro processo de transformação.

Quando aquecidos a temperaturas e pressões adequadas, esses plásticos amolecem, fundem e podem ser novamente moldados produzindo novos produtos com novas atribuições.

Nos processos atuais se busca a cada dia o melhor rendimento de nossos equipamentos e conseqüentemente de nossas empresas, evitando ao máximo os desperdícios. Isso quer dizer que procuramos as menores perdas possíveis, como perdas de energia, tempo, mão de obra ou matéria prima.

Inclinamo-nos, cada dia mais, na diminuição da quantidade de resíduos gerados, ou então, fazendo com que eles se tornem produtos com alguma utilidade. Porém, na indústria de reciclagem, uma fração do PET apresenta tamanho não apropriado para o processo de pelletização o qual transforma o material reciclado do PET em pequenas esferas que posteriormente produzem as pré-formas da indústria de embalagens, tornando este material descartável.

1.3 – OBJETIVOS GERAIS DEFINIDOS

Este trabalho tem como objetivo aprofundar os estudos relacionados a polímeros, em especial a fração do PET reciclado que apresenta tamanho de partículas inadequado à pelletização, dando novas aplicações a estas parcelas de materiais que inicialmente não apresentavam uma ampla aplicação no mercado.

1.4 – METODOLOGIA DEFINIDA

Foi notado que ao ser reciclado, uma parcela deste PET apresenta um tamanho inadequado para a pelletização o que os tornava um rejeito da reciclagem. Desta forma este resíduo inicialmente não teria utilidade nem aproveitamento em larga escala. Tendo em vista este fato no trabalho será feito experimentos a fim de determinar uma colocação deste material novamente no mercado, dando a ele uma utilidade e gerando renda.

O PET será prensado em temperaturas entre 70 °C e 150 °C e 30 MPa de pressão, com a finalidade de obter amostras que serão avaliadas em parâmetros como: densidade, porosidade, absorção de água e dureza.

CAPITULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente referencial teórico oferece uma visão ampla a respeito de polímeros, possibilitando a compreensão de sua aquisição, formação, características estruturais, processos de fabricação e seu reaproveitamento. Com isso, será mostrado suas aplicações na sociedade moderna com seus papéis mais diversos que começa em uma simples embalagem e chega aos grandes meios de transporte como sendo itens e acessórios. Logo após, falaremos sobre os processos de pelletização e sinterização, processos estes que são usados na reciclagem.

2.1 – POLÍMEROS

De acordo com Alves (2014), polímeros (do grego *poli*, “muitas”; *meros*, “partes”) que significa “muitas partes” ou então seu sinônimo mais conhecido como “plástico” (devido sua alta conformabilidade observado nos processos de sua fabricação) são macromoléculas (moléculas de alta massa molar) formadas pela união de um conjunto de moléculas menores (monômeros) através do processo chamado de polimerização com uma unidade de repetição da cadeia polimérica chamada de mero. A variação do número de monômeros, do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, nos possibilita dividir os polímeros em três grandes classes: Plásticos, borrachas e fibras (CANEVAROLO, 2006).

As características físico-químicas dos polímeros são totalmente dependentes de sua massa molar, ou seja, do comprimento da molécula. Esse comprimento molecular é muito variável o que nos possibilita uma imensa variação em suas propriedades. A variação de massa molar em relação às propriedades do material normalmente é afetada de maneira assintótica, isto é, moléculas pequenas tendem a sofrer maior alteração em suas propriedades físicas em comparação com as moléculas maiores onde essa variação tende a diminuir como mostra a figura 1 (CANEVAROLO, 2006). Essa grande variação no tamanho das moléculas nos permite produzir vários produtos com características diferentes, procurando atender as necessidades técnicas de cada aplicação ou técnica de processamento.

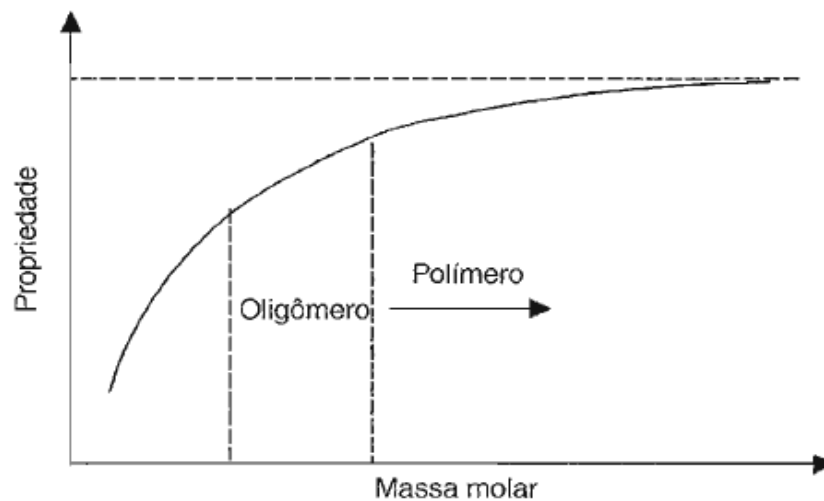


Figura 1: Variação de uma dada propriedade do polímero como função de sua massa molar. Fonte: CANEVAROLO, 2006.

É importante destacar que nem todos os compostos com baixa massa molar geram polímeros. Para ocorrer sua síntese é necessário que um monômero se ligue a no mínimo dois outros monômeros fazendo a reação de polimerização. Esse número mínimo de pontos reativos por molécula é chamado de funcionalidade.

De acordo com Canevarolo (2006) moléculas com dois ou mais grupos funcionais reativos podem, em condições propícias, reagir e formar uma macromolécula (polímero).

Exemplo: Glicol + Diácido \longrightarrow Poliéster + Água

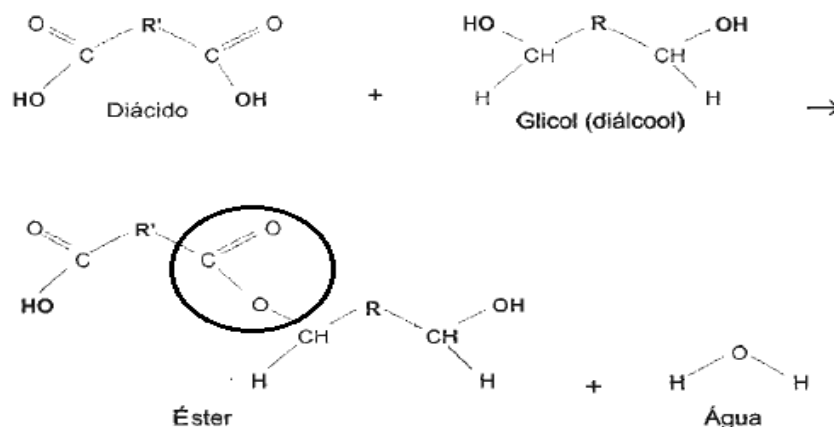


Figura 2: Reação do Diácido com Glicol formando um Éster mais água. Fonte: CANEVAROLO, 2006.

A figura 2 apresenta a reação entre um diácido e um glicol tendo como resultado uma molécula de éster e uma molécula de água. Na reação foi consumido apenas um grupo funcional de cada reagente, sobrando na molécula resultante da reação (éster) outros grupos funcionais que ainda podem reagir, com a possibilidade de uma molécula final ainda maior. O outro subproduto é a molécula de água, a qual deve ser eliminada no processo de polimerização.

Os polímeros são normalmente obtidos através da matéria-prima petroquímica, sendo um dos produtos finais do refinamento e da reforma do óleo cru (petróleo). Outra forma de se obter os polímeros é através do carvão mineral e alguns produtos naturais (como a celulose, o látex, o óleo de mamona, o óleo de soja) (Canevarolo, 2006).

Devido à grande variedade de polímeros, tornou-se necessário subdividi-los em quatro classificações, isto é, quanto à estrutura química, ao seu método de preparação, às suas características tecnológicas, e quanto ao seu comportamento mecânico. No trabalho foi dado ênfase apenas às classificações relevantes ao PET, que é o objeto de estudo deste trabalho.

Para Canevarolo (2006) o PET é um polímero de cadeia heterogênea, ou seja, em sua cadeia principal além do carbono ele possui outro átomo (oxigênio), conhecido por heteroátomo. Classificado como poliésteres possui ligação característica $-CO-O-$ (éster) sendo um termoplástico.

Canevarolo (2006) também diz que a segunda forma de classificar os polímeros é quanto ao comportamento mecânico. Os polímeros podem ser classificados em duas categorias principais: termoplásticos e termofixos (ou termorrígido ou termoendurecido), sendo o primeiro, materiais que se tornam menos rígidos quando aquecidos ou com aumento de pressão sendo que essa transformação física é reversível e onde encontramos o PET e o segundo, materiais que amolecem apenas uma vez ao serem aquecidos e sofrem uma transformação química irreversível. Em ambas as categorias é importante destacar os aditivos, estes são adicionados para mudar algumas propriedades diferenciando os produtos finais na busca de características específicas, variando suas propriedades físico-químicas e também sua aparência.

Os processos de fabricação da atualidade são divididos de acordo com as classificações de termoplástico e termofixos. Na classificação de termoplásticos temos o processamento por injeção, a modelagem por extrusão e a modelagem por insuflação, já os termofixos temos modelagem por compressão e por transferência (SHACKELFORD, 2008).

Quanto ao método de preparação podemos dividir em adição e condensação, estes serão explicados no tópico 2.2 de polimerização.

Em relação ao desempenho mecânico é levado em conta o desempenho do polímero quando usado em um item ou peça. Sendo dividida em termoplásticos convencionais, termoplásticos especiais, termoplásticos de engenharia e termoplásticos de engenharia especiais. O PET encontra-se na divisão de termoplásticos de engenharia, onde possui bom desempenho para aplicações em dispositivos mecânicos, com alta resistência (rigidez), boa tenacidade e excelente estabilidade dimensional. De acordo com Canevarolo (2006) outras formas são encontradas onde a classificação quanto ao desempenho mecânico são: termoplásticos convencionais, onde está concentrado aproximadamente 90% da produção total de polímeros no mundo e são polímeros de baixo custo; termoplásticos especiais, que possuem custo um pouco superior aos convencionais, porém com algumas características melhoradas, e por fim os termoplásticos de engenharia especiais, que possuem grandes quantidades de anéis aromáticos na cadeia principal, aumentando a estabilidade térmica acima de 150°C e sendo aplicados em altas temperaturas.

2.2 – POLIMERIZAÇÃO

A discussão inicial é dada através do processo de polimerização que no geral ocorre por crescimento de cadeia (polimerização por adição) ou crescimento em estágios (polimerização por condensação).

A polimerização é a reação ou conjunto de reações químicas pelo qual moléculas pequenas (monômeros) se juntam na formação de moléculas maiores (polímeros). Dividida em variáveis primárias e secundárias de acordo com o grau de importância e sua influência na qualidade do produto final, a temperatura de reação, pressão, tempo, presença e tipo de iniciador e agitação são consideradas as variáveis primárias, e o tipo de inibidor, de retardador, catalisador, controlador de massa molar, de quantidade de reagentes e demais agentes específicos, são considerados as variáveis secundárias.

De acordo com CANEVAROLO (2006) os processos de polimerização são classificados de acordo com: número de monômeros, tipos de reação química, cinética de polimerização e o tipo de arranjo físico.

O número de monômeros é o processo em que um ou mais monômeros podem ser polimerizados ao mesmo tempo, sendo homopolimerização, copolimerização e terpolimerização, quando temos um dois ou três monômeros envolvidos sucessivamente.

Em relação ao tipo de reação química usada para a produção de uma nova ligação, podemos ter: adição etênica (para produção do polietileno), esterificação (poliéster), amidação (poliamida), acetilação (acetato de celulose) e outras.

Na cinética de polimerização envolve o tipo de cinética envolvida durante as reações de polimerização, sendo: polimerização em etapas (ou policondensação), polimerização em cadeia (ou poliadição) e polimerização com abertura do anel.

Por último temos a classificação pelo tipo de arranjo físico, que dependem do tipo de materiais usados durante a polimerização, além do monômero, o processo pode ser homogêneo (em massa e em solução) ou heterogêneo (suspensão e emulsão).

A polimerização em etapas, é o processo que consiste na condensação sucessivas de grupos funcionais reativos existentes nas moléculas iniciais, aumentando seu tamanho até atingirem uma cadeia de tamanho polimérica. Nesse processo de polimerização os grupos funcionais são condensados sucessivas vezes eliminando as moléculas de baixa massa molar, os materiais iniciais reagem entre si, a massa molar aumenta com o tempo de reação e não há necessidade da adição de iniciadores para começar a reação.

Outra importante forma de polimerização é a polimerização em cadeia, ela consiste na formação de uma cadeia polimérica completa a partir da instabilidade da dupla ligação de um monômero ligando-se a outros monômeros de dupla ligação também instáveis. Durante o processo ocorre a abertura de uma dupla ligação formando duas ligações simples, esse é um processo exotérmico onde há a liberação de energia. Após a ruptura da dupla ligação é necessário que exista pelo menos uma instauração reativa na molécula. Caso essa reação seja entre carbonos são gerados polímeros de cadeia carbônica, caso contrário haverá o surgimento de um polímero de cadeia heterogênea. Outro fato importante é que a reação ocorre através do processo de iniciação, onde é gerado o centro ativo, posteriormente a propagação onde a cadeia cresce com a transferência do centro ativo de monômero a monômero, e por fim, ocorre o termino onde se dá o desaparecimento do centro ativo.

A polimerização por abertura de anel parte-se de um monômero em forma de um anel. Através da abertura deste anel tem-se a geração de uma bifuncionalidade que, se reagir consigo mesma várias vezes, formará uma cadeia polimérica.

De acordo com CANEVAROLO (2006) o processo de polimerização é formado basicamente pelo método de crescimento de cadeia, ou polimerização por adição, que envolve uma reação rápida entre cadeias de monômeros quimicamente ativados obtendo com resultado final a soma dos monômeros sem perda de massa, ou então pelo método de crescimento em

estágios, ou polimerização por condensação, que envolve reações químicas individuais entre pares de monômeros com a eliminação de moléculas de baixo peso molecular originários da reação de grupos funcionais reativos, sendo um processo muito mais lento.

Para que ocorra a união entre moléculas de monômeros na formação de polímeros, um fato a ser destacado é a presença de sítios reativos, que são moléculas de dupla ligação no crescimento em cadeia que possuem de ligações covalentes correspondendo a um par de elétrons compartilhados entre átomos adjacentes causando uma atração mútua entre eles, ou então, grupos funcionais reativos no crescimento em estágios.

A reação por crescimento de cadeia transforma uma ligação dupla de um monômero em uma ligação simples de um mero. Os dois elétrons que restam fazem união com os meros adjacentes formando uma grande cadeia de meros que é usualmente chamada de polímeros. Essa reação começa através de um iniciador (radical livre), este possui um elétron não-emparelhado que converte a ligação dupla em ligação simples. O elétron que possui a ligação simples reage com um monômero para manter sua estabilidade e conseqüentemente aumentar o tamanho da cadeia. Essa reação continua indeterminadamente sendo limitada apenas pela disponibilidade de monômeros não-reagidos.

No crescimento em estágio usaremos a molécula de etilenoglicol e ácido tereftálico para sua representação (Figura 3). O processo ocorre quando ácidos dicarboxílicos e dialcoóis formam um novo grupo funcional (ester neste caso) com eliminação de uma molécula pequena, neste caso água. O tempo desse processo é superior ao processo de crescimento de cadeia. Esse tipo de crescimento é também descrito por polimerização por condensação.

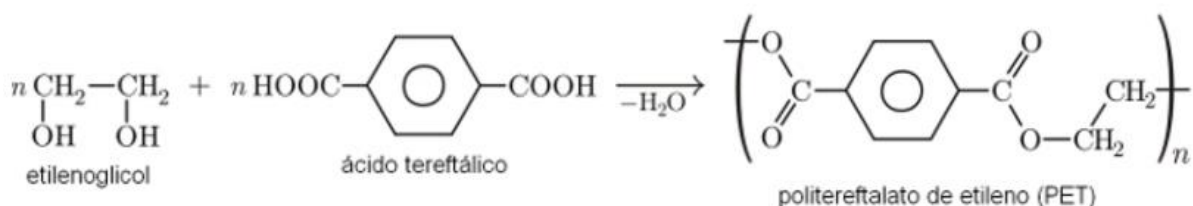


Figura 3: Crescimento em estágio do politereftalato de etileno (PET) Fonte: PIATTI e RODRIGUES 2005.

2.3 – TEMPERATURAS DE TRANSIÇÃO CARACTERÍSTICAS EM POLÍMEROS

A temperatura exerce uma enorme função em relação às características físicas dos polímeros, pois está relacionado com a mobilidade de uma cadeia polimérica. As mais diversas características podem ser encontradas nos plásticos, duro e frágil, borrachoso e tenaz ou um fluido viscoso. Há uma relação direta entre temperatura e agitação das moléculas sendo que quanto maior é a temperatura maior é essa agitação. Esse conhecimento é de extrema importância para uma melhor compreensão de como utilizar, construir e definir novas funcionalidades para os polímeros.

No geral existem três temperaturas de grande importância relacionadas aos polímeros: transição vítrea, fusão cristalina e cristalização.

A temperatura de transição vítrea ou T_g é citada de acordo com CANEVAROLO (2006) como o valor médio da faixa de temperatura que, durante o aquecimento de um material polimérico de uma temperatura muito baixa para valores mais altos, permite que as cadeias poliméricas da fase amorfa adquiram mobilidade, ou seja, adquiram a possibilidade de mudança de conformação. Com isso, é possível notar que em temperaturas abaixo da T_g o polímero não possui energia interna suficiente para permitir o deslocamento de uma cadeia em relação a outra por mudanças conformacionais, possuindo uma característica vítrea, ou seja, dura, rígida e quebradiço como o vidro.

De maneira mais clara é possível dizer que a temperatura de transição vítrea, é a temperatura para que haja movimento das cadeias poliméricas, fazendo com que o material passe do estado sólido para o borrachoso, permitindo que as cadeias deslizem umas sobre as outras quando uma força é aplicada. Um exemplo que pode ser dado é usar o ferro de passar roupas em um tecido polimérico, este é aquecido a temperaturas acima do T_g , de modo que suas fibras se tornem borrahosas.

A segunda temperatura é conhecida como temperatura de fusão cristalina ou T_m , (CANEVAROLO, 2006) ela é citada como valor médio da faixa de temperatura onde, ao sofrer aquecimento, desvanecem as regiões cristalinas com a fusão dos cristalinos. A energia necessária para as junções intermoleculares secundárias é vencida no ponto de T_m , isso acontece com a destruição da estrutura regular de empacotamento, com a mudança do estado borrachoso para o estado viscoso (fundido). Essa transição ocorre apenas na fase cristalina, sendo assim, somente é aplicada para polímeros semicristalinos e afeta as variáveis, tais como volume específico, entalpia, etc.

A variação do volume específico é bastante utilizada para determinar experimentalmente as temperaturas de transição citadas anteriormente, pois sabemos que essa propriedade mede o volume total ocupado pelas cadeias poliméricas. A variação de uma temperatura possui uma relação linear com o volume devido à expansão térmica, salvo em casos em que ocorra alguma modificação que impeça a mobilidade do sistema fazendo com que ocorra um mecanismo de expansão diferente. Os polímeros são divididos em dois grandes grupos diferenciados por seus comportamentos característicos de maneira a simplificar a análise, estes são: amorfos e semicristalinos. Os comportamentos são citados na figura 4.

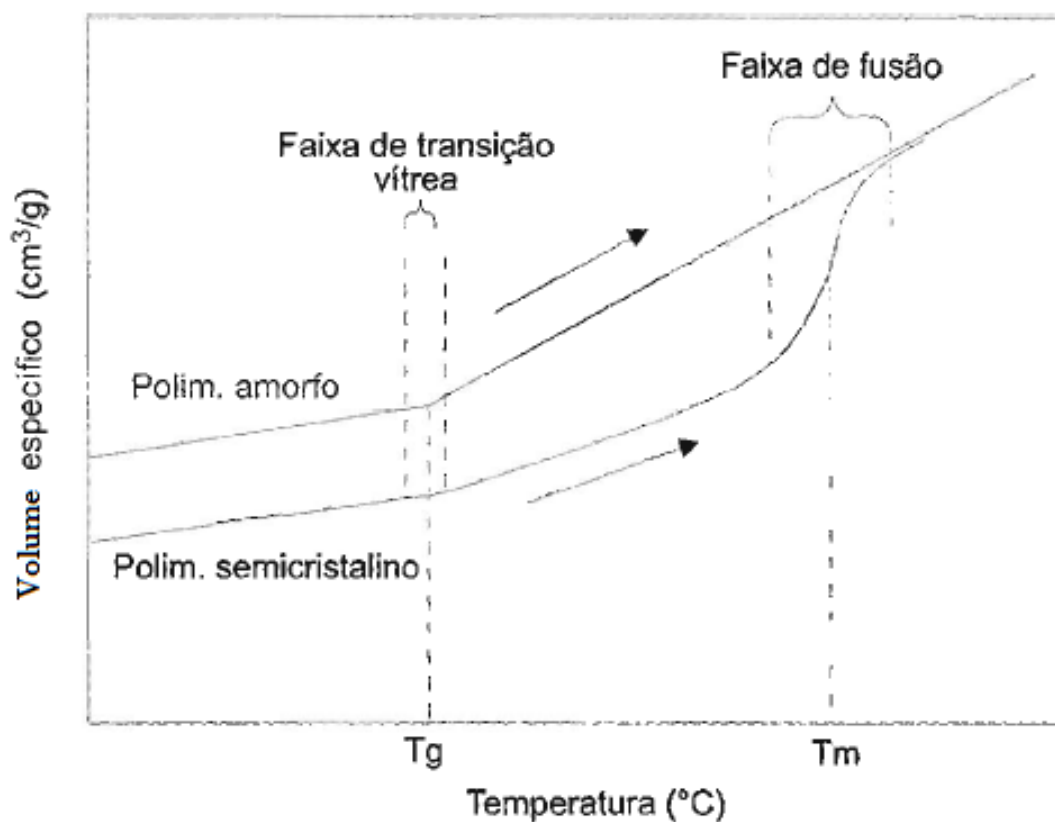


Figura 4: Variação do volume específico com o aumento da temperatura mostrando as faixas de temperatura em que ocorrem as transições T_g e T_m . Fonte: CANEVAROLO, 2006.

A figura 4 mostra um aumento na temperatura de maneira constante em relação ao volume específico, tornando visível o aumento gradativo da mobilidade, refletindo-se em uma expansão térmica linear. Outro fato importante é notado quando a curva passa pelo ponto T_g sofrendo uma inclinação, ou seja, há um aumento gradativo da mobilidade das cadeias, mantendo a expansão térmica linear, porém com uma taxa maior. Aumentando ainda mais a

temperatura a partir do T_g , chegará a um ponto onde a energia será suficiente para fundir os cristais presentes na massa polimérica. Os cristais são fundidos e se somam fazendo com que o volume do polímero aumente pouco a pouco. A existência de cristais de diversos tamanhos e com características diferentes (devido ao PET não ser um material puro e de baixa massa molar) faz com que exista uma faixa de temperatura ideal para serem fundidos, e com isso o aumento de volume já citado. Logo após a faixa de fusão, o polímero estará no estado fundido, e com isso a mobilidade de suas cadeias poliméricas será maior.

A terceira e última temperatura é chamada de temperatura de cristalização ou T_c , (CANEVAROLO, 2006) ela está localizada entre a temperatura de transição vítrea T_g e a temperatura de fusão cristalina T_m como mostra na figura 5.

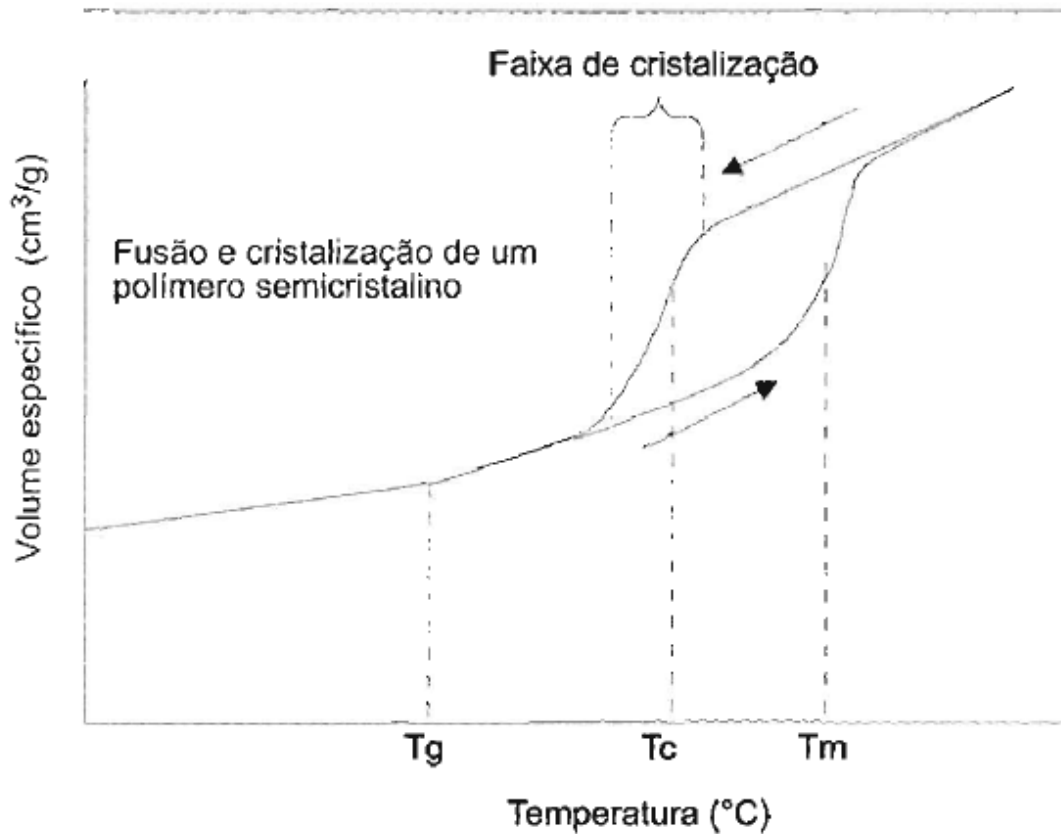


Figura 5: Variação do volume específico durante um ciclo térmico de aquecimento e resfriamento de um polímero semicristalino, mostrando a faixa de temperatura em que ocorre a cristalização. Fonte: CANEVAROLO, 2006.

No processo de resfriamento de um polímero semicristalino que esteve no estado fundido, ou seja, com temperaturas acima de T_m , é encontrado uma faixa de temperatura onde a massa polimérica fundida começa a se cristalizar e formar uma estrutura cristalina, essa faixa

é chamada de faixa de cristalização, dentro dessa faixa é encontrado a temperatura de cristalização (T_c). Essa faixa contempla um número grande de cadeias poliméricas que se organizam espacialmente de forma regular formando cadeias em diversos pontos no polímero (CANEVAROLO, 2006).

Esse processo de cristalização pode ocorrer de duas formas, sendo elas isotérmica ou dinâmica. A forma isotérmica ocorre quando há uma diminuição abrupta de temperatura até o valor de T_c , depois estabilizada e mantida constante até terminar o processo de cristalização. Já a forma dinâmica acontece quando a temperatura diminui de maneira constante e com a cristalização dentro de uma faixa de temperatura (CANEVAROLO, 2006).

Quando questionado sobre a cristalinidade do PET é importante se atentar para o seu processo de formação, sendo que ele pode ser feito de duas maneiras. No artigo publicado na *Revista Eletrônica de Materiais e Processos em 2008 como Estudo da cristalização a frio do poli (tereftalato de etileno) (PET) para produção de embalagens* (M. S. Rabello e R. M. R. Wellen, 2008) diz: “de acordo com as condições de resfriamento a partir do estado fundido durante o processamento, o produto pode ser obtido no estado amorfo (com pouca ou nenhuma cristalinidade) ou no estado semicristalino. Vale a regra geral de que resfriamento brusco, como utilizado na injeção de pré-formas em molde gelado, leva a obtenção de produtos amorfo enquanto que em resfriamento lento, como na injeção em molde quente, o produto obtido é semicristalino”. Esses estados são fáceis de serem verificados na figura 6.



Figura 6: Pré-formas de PET amorfa, parcialmente cristalina e cristalina (da esquerda para direita).
Fonte: Estudo da cristalização a frio do poli (tereftalato de etileno) (PET) para produção de embalagens M. S. Rabello e R. M. R. Wellen, 2008.

CANEVAROLO (2006) diz que as temperaturas de uso do PET na engenharia são muito menores que a temperatura de fusão cristalina (T_m), ou seja, $T_{uso} \ll T_m$, podendo ser usados a temperaturas de no máximo 100 °C abaixo de T_m .

A fração cristalina do PET varia de acordo com o seu processo de fabricação e as temperaturas atingidas em seu aquecimento e resfriamento. Um PET comum possui a cristalinidade em torno de 50% (BECKER, 2016). Na tabela 1 é possível observar as características do mero, T_g e T_m de alguns polímeros.

Polímero	Mero	T_g (°C)	T_m (°C)
Polietileno PE	$\left[\text{CH}_2\text{CH}_2 \right]_n$	-100	135
Polietileno p-fenileno	$\left[\text{CH}_2 - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{CH}_2 \right]_n$		380
Polioxietileno ou Polietileno óxido	$\left[\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O} \right]_n$		66
Polietileno Adipato PEA	$\left[\text{H} - \text{O} - \text{C}(=\text{O}) - \text{C}_6\text{H}_{10} - \text{C}(=\text{O}) - \text{O} - \text{C}_2\text{H}_4 - \text{OH} \right]_n$	-46	45
Polietileno Tereftalato PET	$\left[\text{H} - \text{O} - \text{C}(=\text{O}) - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{C}(=\text{O}) - \text{O} - \text{C}_2\text{H}_4 - \text{OH} \right]_n$	69	265
Poliócteno sebacato	$\left[\text{H} - \text{O} - \text{C}(=\text{O}) - \text{C}_{16}\text{H}_{32} - \text{C}(=\text{O}) - \text{O} - \text{C}_2\text{H}_4 - \text{OH} \right]_n$		75
Poliéster aromático	$\left[\text{O} - \text{CH}_2 - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{CH}_2 - \text{O} - \text{C}(=\text{O}) - \text{CH}_2 - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{CH}_2 - \text{C}(=\text{O}) - \text{O} \right]_n$		146
Polihexametileno adipamida Náilon 6,6	$\left[\text{H} - \text{N} - \text{C}_6\text{H}_{10} - \text{N} - \text{H} - \text{C}(=\text{O}) - \text{C}_6\text{H}_{10} - \text{C}(=\text{O}) - \text{N} - \text{H} \right]_n$	87	263
Polihexametileno tereftalamida Náilon 6T	$\left[\text{H} - \text{N} - \text{C}_6\text{H}_{10} - \text{N} - \text{H} - \text{C}(=\text{O}) - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{C}(=\text{O}) - \text{N} - \text{H} \right]_n$		350

Tabela 1: Características de alguns polímeros. Fonte: CANEVAROLO, 2006.

Um último fato importante a se destacar é a viscosidade dos polímeros, onde pode ser classificado em três estados: vítreo, borrachoso e viscoso.

O estado vítreo ocorre em temperaturas inferiores a temperatura T_g . Neste estado o polímero armazena em sua cadeia polimérica menor quantidade de energia, sendo esta insuficiente para apresentar mobilidade, e tornando o polímero rígido e frágil. No estado borrachoso a temperatura está entre T_g e T_m . O polímero começa a ganhar mobilidade a medida que seu nível energético aumenta. Por último o estado viscoso é quando a temperatura é superior a T_m , neste estado o polímero possui energia suficiente para estar fundido e apresenta em toda a sua cadeia polimérica (CANEVAROLO, 2006). A figura 7 apresenta o comportamento físico-químico de um polímero como função de sua massa molar e as temperaturas T_g e T_m .

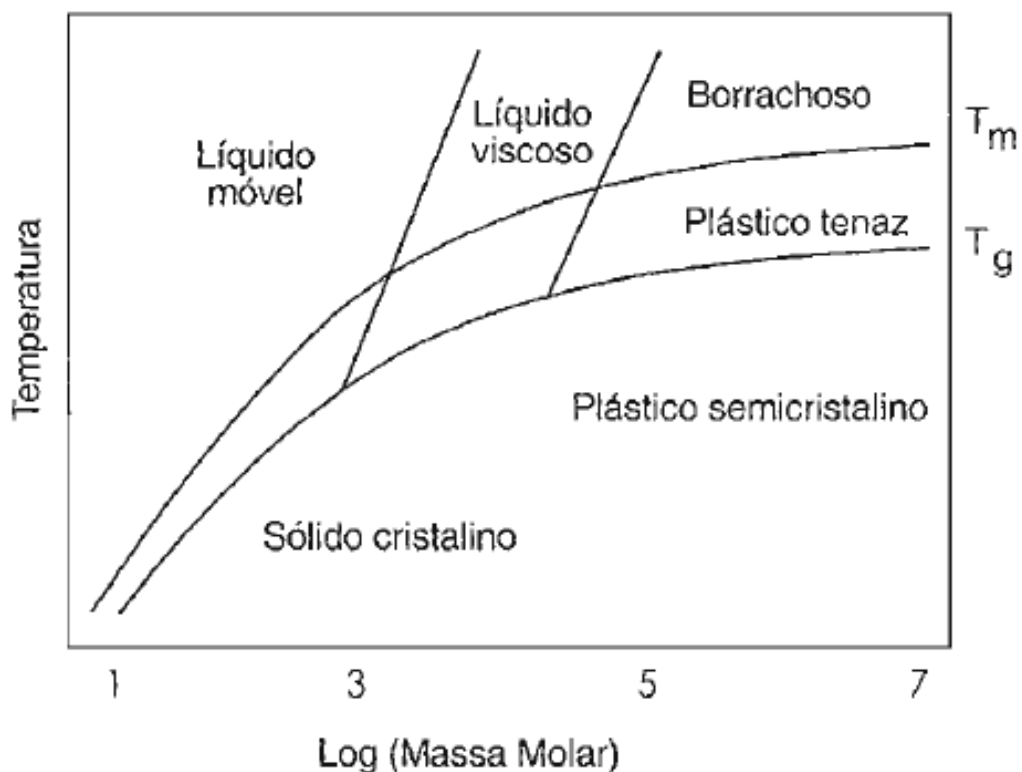


Figura 7: Comportamento físico-químico de um polímero como função de sua massa molar e das temperaturas características, T_g e T_m . Fonte: CANEVAROLO, 2006.

2.4 – SINTERIZAÇÃO

No artigo “*Um estudo teórico sobre a sinterização na metalurgia do pó*” por BRITO, MEDEIROS e LOURENÇO (2007) a sinterização é um processo físico, termicamente ativado em que um conjunto de partículas em contato mútuo de um determinado material,

transforma-se em um corpo íntegro e de maior resistência mecânica, podendo, inclusive, torna-se totalmente denso.

BRITO, MEDEIROS e LOURENÇO (2007) falam sobre algumas técnicas para efetuar a o processo de sinterização que consistem em: forno resistivo é o mais comum, utiliza-se uma amostra, e com uma baixa taxa de aquecimento e resfriamento; por auxílio de pressão temperatura e pressão, onde a temperatura faz com que ocorra o aumento de transporte do material e a pressão intensifica esse transporte); sinterização reativa ocorre reação dos materiais utilizados; micro-ondas (aquecimento); laser (aquecimento); plasma gás, é necessário expor a amostra sob sinterização a um plasma inerte ou reativo.

No presente trabalho o processo de sinterização utilizado será utilizando uma prensa embutidora que consiste na variação da temperatura e pressão na obtenção de um corpo de prova.

2.5 – RECICLAGEM DO PET

O PET é um plástico muito utilizado na sociedade moderna, sua importância é reconhecida quando falamos em suas propriedades, tais como: resistência mecânica e leveza. Tudo isso, aliado a um produto altamente reciclável, mudanças em sua utilização e de baixo custo ressalta sua importância no mercado atual. Porém, mesmo com tantas características favoráveis, temos que pensar que sua degradabilidade juntamente a baixa densidade fazem com que ocupem vastos espaços no ambiente por longos períodos.

A reciclagem é uma das soluções encontradas para amenizar os problemas gerados pelo descarte do PET, diminuir a extração dos materiais necessários para a sua formação (ácido tereftálico e etileno glicol), e reaproveitando esse material.

O processo de reciclagem foi descrito de acordo com os fatos observados na empresa AGPlast. A reciclagem se inicia na chegada do resíduo a ser reciclado na indústria de reciclagem. No primeiro momento, esse material é previamente separado e selecionado de acordo com o tipo de material, cor e qualidade. Esse processo pode ser feito na compra do material ou então de maneira manual. Após a separação por cores de PET ele é encaminhado para a remoção de tampas e rótulos, os quais não fazem parte do processo, sendo separados para outra utilização. Então o PET é triturado, moído e lavado várias vezes retirando todas as impurezas para se obter um produto final de boa qualidade. Já lavado e limpo o material é

secado através de uma secadora, onde hélices a altas rotações retiram toda a água que possa haver no material. Feito todo esse processo o PET é dividido pelo tamanho de partícula obtida, sendo o tamanho maior o objetivo da reciclagem, e o pó restante o objeto de estudo deste trabalho.

CAPÍTULO 3 – ESTUDO DE CASO

Este capítulo terá como principal objetivo referenciar o processo completo do experimento, bem como todos os passos, técnicas, maquinário e materiais utilizados para fabricação e obtenção dos resultados.

3.1 – MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

O material utilizado nos experimentos é o refugo da indústria de reciclagem de PET adquirido na empresa AG Plast, ele nada mais é que o PET em pó, que no processo de fabricação e através da reciclagem não possui utilidade para empresa e por isso é descartado. Diariamente são gerados em média 700 Kg desse material que fica estocado e repassado aos interessados. A figura 8 mostra melhor o material utilizado no experimento.



Figura 8: Resíduo proveniente do material reciclado do PET não utilizado pela indústria estudada.
Fonte: Autor.

O experimento será realizado por meio de uma Prensa Embutidora Modelo EFD40 da marca Fortel (figuras 9 e 10) onde é possível fazer corpos de prova de diâmetros constantes

e alturas variáveis variando alguns parâmetros. Os componentes desse sistema serão citados a seguir:

- Um sistema digital de controle de comando permite atribuir um tempo de embutimento, tempo de refrigeração, tempo de resfriamento e controle de temperatura por termopar;
- Um sistema hidráulico fechado composto por uma alavanca que quando movimentada é possível aplicar uma pressão que atuará no anteparo inferior dentro da máquina para fabricar o corpo de prova;
- Um manômetro onde é possível verificar a pressão instantânea do sistema, e com isso é possível acionar a alavanca para manter a pressão do sistema sempre constante caso seja necessário;
- Uma válvula hidráulica de pressão e alívio, para movimentar o anteparo inferior do conjunto hidráulico;
- Um anteparo superior para fechar o orifício de fabricação do corpo de prova;
- Uma trava rosqueada para fixar o anteparo e tornar possível a aplicação da força de baixo para cima;



Figura 9: Prensa Embutidora modelo EFD40 da marca Fortel. Fonte: Autor.

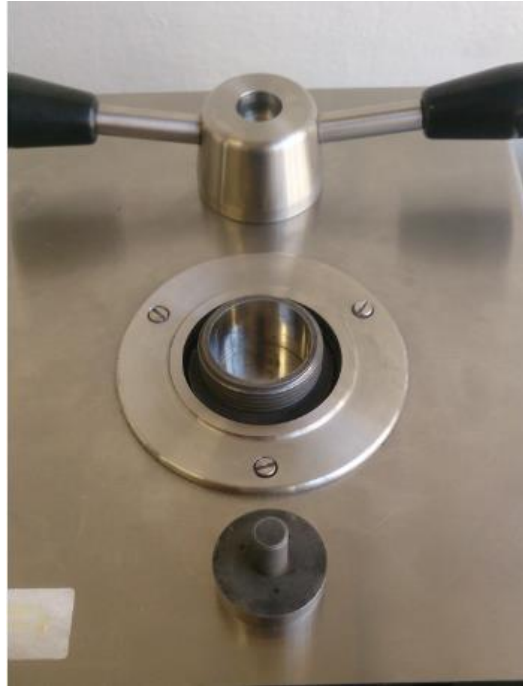


Figura 10: Detalhe para o orifício de fabricação do corpo de prova e seus componentes de travamento. Fonte: Autor.

O outro equipamento utilizado para efetuar as medições foi a balança eletrônica da marca BEL (figura 11).



Figura 11: Balança eletrônica. Fonte: Autor.

3.2 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para validação experimental e objetivando melhores resultados do processo como um todo, os experimentos foram realizados no laboratório de metalografia da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, onde é possível maior controle dos processos através de seus equipamentos.

Os ensaios realizados têm por objetivo identificar algumas características do material residual do PET em questão, para determinar suas possíveis aplicações. Os ensaios realizados foram: tentativa de fabricação do corpo de prova, ensaio de absorção de água, processo de lixamento, ensaio de dureza.

3.2.1 – PROCESSO DE FABRICAÇÃO

O ensaio de processo de fabricação tem como objetivo identificar a possibilidade de dar forma ao material (PET), variando a temperatura, tempo e mantendo a pressão constante. O processo de fabricação foi dividido em dois tipos de experimentos, sendo aqui tratados como experimento 1 e experimento 2 para facilitar a compreensão e posteriormente comparados entre si. Os corpos de prova do experimento 1 foram fabricados sem um controle da quantidade de material adicionado ao processo, sendo sua coleta feita através de uma marcação visual no recipiente de coleta, por esse motivo foi possível constatar que houve uma variação em suas características dimensionais. Já no experimento 2, houve um maior controle quanto quantidade de massa das amostras a serem fabricadas, permanecendo sempre constantes na quantidade de 20 gramas.

O processo de fabricação utilizado para obter os corpos de provas dos experimentos 1 e 2 são os mesmos e por isso será relatado apenas uma vez. Após ser coletado a quantidade de material do corpo de prova, seja através do recipiente de coleta (experimento 1) ou então inicialmente pesado e logo após coletado (experimento 2) o resíduo é levado para a prensa embutidora onde sua temperatura máxima, tempo de aquecimento e tempo de resfriamento são pré-selecionados no sistema digital de controle de comando, logo após são prensados por meio

da alavanca manual objetivando manter a pressão constante durante todo o experimento. As variáveis dos processos realizados estão na tabela 2 e 3 abaixo de acordo com cada experimento sendo essas as configurações iniciais da máquina para realizar a fabricação dos corpos de prova.

Amostra	Tempo 1	Tempo 2	Temperatura 1 (°C)	Temperatura 2 (°C)	Pressão (MPa)
1	14'00"	5'00"	43	150	30
2	14'00"	5'00"	43	150	30
3	13'00"	5'00"	43	130	30
4	13'00"	5'00"	43	130	30
5	12'00"	5'00"	43	110	30
6	12'00"	5'00"	43	110	30
7	10'00"	5'00"	43	90	30
8	10'00"	5'00"	43	90	30

Tabela 2: Valores pré-determinados para o experimento 1. Fonte: Autor.

Amostra	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Temperatura 1 (°C)	Temperatura 2 (°C)	Pressão (MPa)
1	14'00"	3'00"	2'00"	39	150	30
2	11'00"	3'00"	3'15"	39	130	30
3	8'00"	3'00"	2'30"	39	110	30
4	7'00"	3'00"	2'50"	39	90	30

Tabela 3: Valores pré-determinados para o experimento 2. Fonte: Autor.

As tabelas 1 e 2 acima demonstram os valores programados no sistema digital de controle de comando, sendo o “Tempo 1” o tempo total de aquecimento, “Tempo 2” o tempo total de resfriamento, “Tempo 3” o tempo em que a amostra permaneceu na temperatura máxima programada, “Temperatura 1” a temperatura inicial do processo, “Temperatura 2” a temperatura final e “Pressão” o valor da pressão que foi mantida constante.

Após o material ser colocado no orifício de fabricação na Prensa Embutidora Fortel, a mesma foi ligada e aquecida até a Temperatura 2, mantendo-se a pressão constante, e depois resfriada de acordo com o Tempo 2. O processo de aquecimento é linear, ou seja, devemos programar um tempo em que seja possível chegar a temperatura alvo e esse tempo deve constar o tempo de permanência do corpo de prova na Temperatura 2.

Um fato de grande importância e que deve ser observado e relatado é que durante o experimento, para se manter a pressão constante durante todo o processo, é necessário pressionar a alavanca da prensa embutidora constante para baixo tornando instável a exatidão em relação a manter a pressão constante durante todo o procedimento.

3.2.2 – ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Logo após a fabricação dos corpos de prova foi realizado o ensaio de absorção de água para identificar algumas das possíveis aplicações deste material polimérico. Para esse ensaio os copos de prova produzidos foram pesados e depois imersos em um recipiente contendo água onde foram mantidos por vinte quatro horas. Logo após eles são retirados da água e pesados novamente. Através da quantidade de água absorvida em porcentagem (AA%) e de sua transição por dentro do volume do corpo de prova é possível identificar a variação e o percentual de absorção de água. A norma utilizada no ensaio foi a Norma nacional NBR 13.818/1997: Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificação e Métodos de Ensaio (descrição dos parâmetros dos ensaios). Foi utilizado a fórmula 1 para calcular a quantidade de água absorvida e para comparar com produtos existentes no mercado: azulejos e porcelanatos.

$$AA\% = \frac{m_u - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

$AA\%$ = quantidade de água absorvida em porcentagem;

m_u = massa úmida;

m_s = massa seca.

3.2.3 – ENSAIO DE LIXAMENTO

Outro ensaio realizado foi o de lixamento, neste procedimento os corpos de prova foram submetidos a um processo de acabamento utilizando lixas “d’água” número 360, 600 e 1200 em água corrente, tendo em vista que essas são lixas utilizadas em acabamentos metálicos

e plásticos. Assim foi possível identificar a resistência desses corpos de prova ao processo de desbaste. Nesse ensaio a lixa foi molhada e os corpos de prova eram lixados com um movimento constante até atingir o melhor acabamento possível.

3.2.4 – ENSAIOS DE DUREZA

Foi realizado o ensaio de Dureza Brinell (HB) (figura 12) utilizando a norma ASTMEL 10. Este ensaio tem como objetivo identificar a dureza do material através da penetração de uma esfera de aço no material a ser testado. O procedimento do ensaio segue os passos a seguir: uma pequena esfera de aço de diâmetro “D” é comprimida por uma carga “F” contra uma superfície plana, polida e limpa de um certo material por um determinado tempo “t”, assim a esfera produz uma calota esférica de diâmetro “d” e profundidade “P”. Esse ensaio expressa a relação entre a carga aplicada pela área da calota esférica impressa no material ensaiado conforme a equação:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

Onde:

HB = Dureza Brinell;

P = carga aplicada;

D = diâmetro da esfera de aço;

d = diâmetro da calota esférica.



Figura 12: Durômetro de ensaio da Dureza de Brinell. Fonte: Autor.

Além do ensaio de dureza HB também foi realizado o ensaio de dureza de Rockwell C (figura 9), que consiste em indentar o material sob teste com um cone de diamante ou indentador de esfera de aço endurecido. O indentador é pressionado contra a superfície do compor de prova com uma pré-carga F_0 , usualmente de 10 kgf. Quando o equilíbrio é atingido, um dispositivo indicativo com luz, que segue o movimento do indentador, responde às variações da profundidade de penetração é ajustado para a posição zero.

Ainda com a pré-carga aplicada, uma segunda carga é introduzida, aumentando a penetração. Atingindo novamente o equilíbrio a carga é removida, mantendo-se a pré-carga. A remoção da carga provoca uma recuperação parcial, reduzindo a profundidade da penetração. O aumento permanente na profundidade da penetração resultante da aplicação e remoção da carga é usado para calcular o valor da dureza de Rockwell. A equação utilizada pela máquina para efetuar os cálculos e mostrar o resultado no visor é:

$$HR = E - e \quad (3)$$

Onde:

HR = Dureza Rockwell;

E = constante dependente do formato do endentador: 100 para diamante, 130 para esfera de aço;

e = aumento permanente da profundidade de penetração devido à maior carga aplicada em unidades de 0,002 mm.



Figura 13: Durômetro de ensaio da Dureza de Rockwell. Fonte: Autor.

CAPITULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao longo do presente capítulo serão mostrados os resultados e gráficos obtidos que foram calculados através dos dados obtidos dos experimentos e ensaios. De posse desses resultados, foi possível analisar os valores obtidos, discutir os critérios para a tomada de decisões a respeito das possíveis aplicações mencionadas nas considerações iniciais e determinar se é possível utilizar esses produtos no mercado.

4.1 – ANALISE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Essa etapa é fundamental para uma maior compreensão dos resultados obtidos através do processo de fabricação dos corpos de prova. Nela será possível entender as variações das amostras com base em medições e pesagens. Um dos objetivos é de sempre trabalhar com temperaturas inferiores ao T_m , buscando sempre melhores resultados utilizando menores quantidades de energia.

A partir dos dados obtidos da tabela 2 do capítulo anterior foi possível pesar, medir e calcular os valores resultantes do processo de fabricação. As tabelas 4 e 5 referenciam os resultados obtidos como: massa, diâmetro, altura e volume. No experimento 2 (tabela 5) é fácil identificar uma relação entre temperatura e volume, pois ao aumentarmos a temperatura e mantermos as outras variáveis constantes o valor da altura diminui (figura 14) e, conseqüentemente o volume.

Amostra	Tempo 1	Tempo 2	Temperatura 2 (°C)	Massa (g)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm ³)
1	14'00"	5'00"	150	29,70	39,70	18,00	22,27
2	14'00"	5'00"	150	27,10	39,80	16,55	20,57
3	13'00"	5'00"	130	33,40	39,80	21,65	26,92
4	13'00"	5'00"	130	29,30	39,80	17,75	22,07
5	12'00"	5'00"	110	28,10	39,95	17,80	22,30
6	12'00"	5'00"	110	30,00	39,90	18,10	22,62
7	10'00"	5'00"	90	31,40	39,95	19,60	24,55
8	10'00"	5'00"	90	28,50	39,95	17,80	22,30

Tabela 4: Valores obtidos para o experimento 1. Fonte: Autor.

Amostra	Tempo 1	Tempo 3	Temperatura 2 (°C)	Massa (g)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm ³)
1	14'00"	2'00"	150	20,10	39,80	12,50	15,54
2	11'00"	3'15"	130	20,00	39,80	12,60	15,66
3	8'00"	2'30"	110	20,00	39,80	12,70	15,79
4	7'00"	2'50"	90	19,90	39,80	13,70	17,03

Tabela 5: Valores obtidos para o experimento 2. Fonte: Autor.

Um fato que pode ser observado na Tabela 5 é que a amostra 4 sofreu um empeno, e por isso a altura e consequentemente a densidade mostraram diferenças em seus valores.

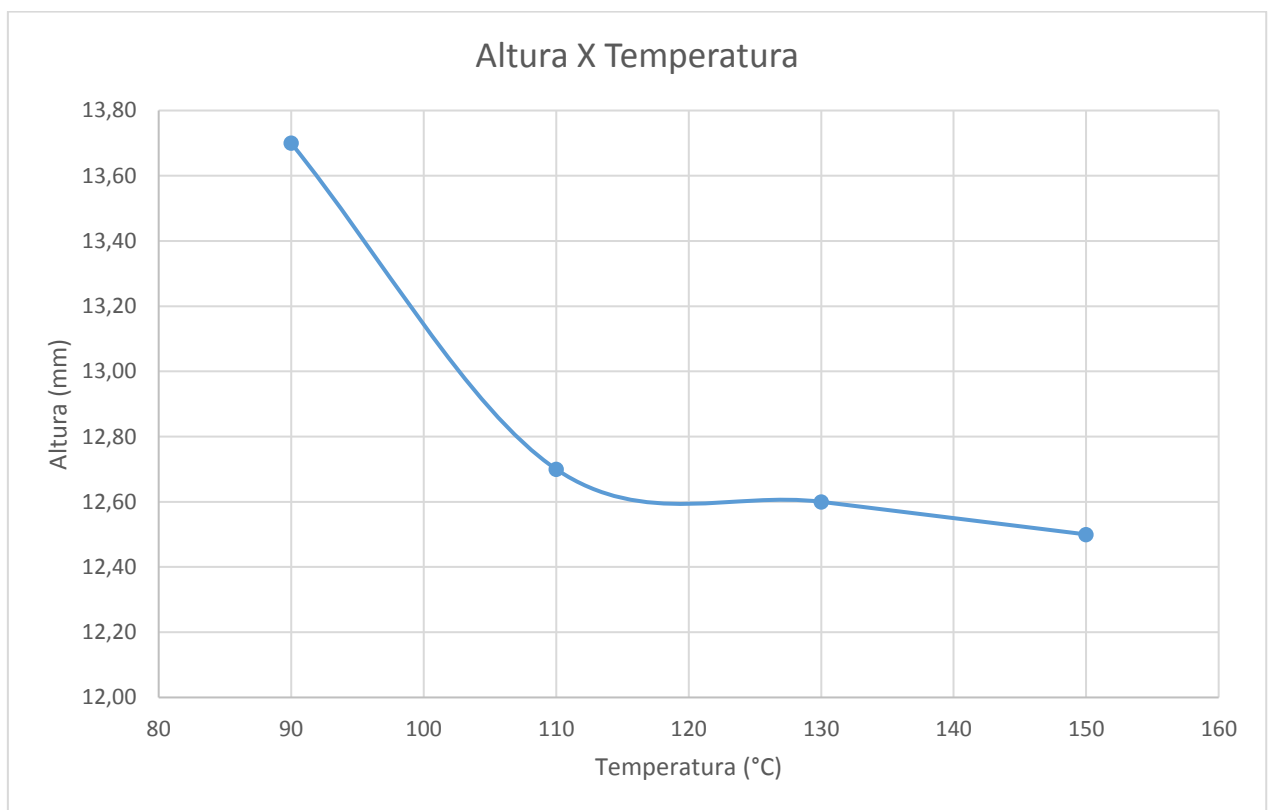


Figura 14: Gráfico Altura X Temperatura do experimento 2. Fonte: Autor.

Além dos dados anteriores também foram calculados a densidade do PET experimental e sua densidade relativa, esses valores estão nas tabelas 6 e 7 a seguir, as tabelas mostram os resultados das densidades do PET experimental e a densidade relativa através da fórmula:

$$DR = \frac{DE * 100}{1,38} \quad (4)$$

DR = Densidade relativa;

DE = Densidade do PET experimental.

A densidade média obtida no experimento 1 e o desvio padrão das densidades relativas foram de 1,295 e 0,026 respectivamente, enquanto que no experimento 2 foram de 1,251 e 0,031 respectivamente. Logo após temos as figuras 15 e 16 que apresenta o comportamento do corpo de prova com base na densidade relativa dos corpos de prova em função da variação da temperatura.

Amostra	Tempo 1	Tempo 2	Temperatura 2 (°C)	Densidade do PET geométrica (g/cm ³)	Densidade relativa (%)
1	14'00"	5'00"	150	1,334	96,639
2	14'00"	5'00"	150	1,317	95,424
3	13'00"	5'00"	130	1,241	89,903
4	13'00"	5'00"	130	1,327	96,195
5	12'00"	5'00"	110	1,260	91,307
6	12'00"	5'00"	110	1,326	96,105
7	10'00"	5'00"	90	1,279	92,660
8	10'00"	5'00"	90	1,278	92,607

Tabela 6: Valores obtidos para o experimento 1. Fonte: Autor.

Amostra	Tempo 1	Tempo 2	Temperatura 2 (°C)	Densidade do PET geométrica (g/cm ³)	Densidade relativa (%)
1	14'00"	2'00"	150	1,293	93,696
2	11'00"	3'15"	130	1,277	92,536
3	8'00"	2'30"	110	1,266	91,739
4	7'00"	2'50"	90	1,168	84,638

Tabela 7: Valores obtidos para o experimento 2. Fonte: Autor.

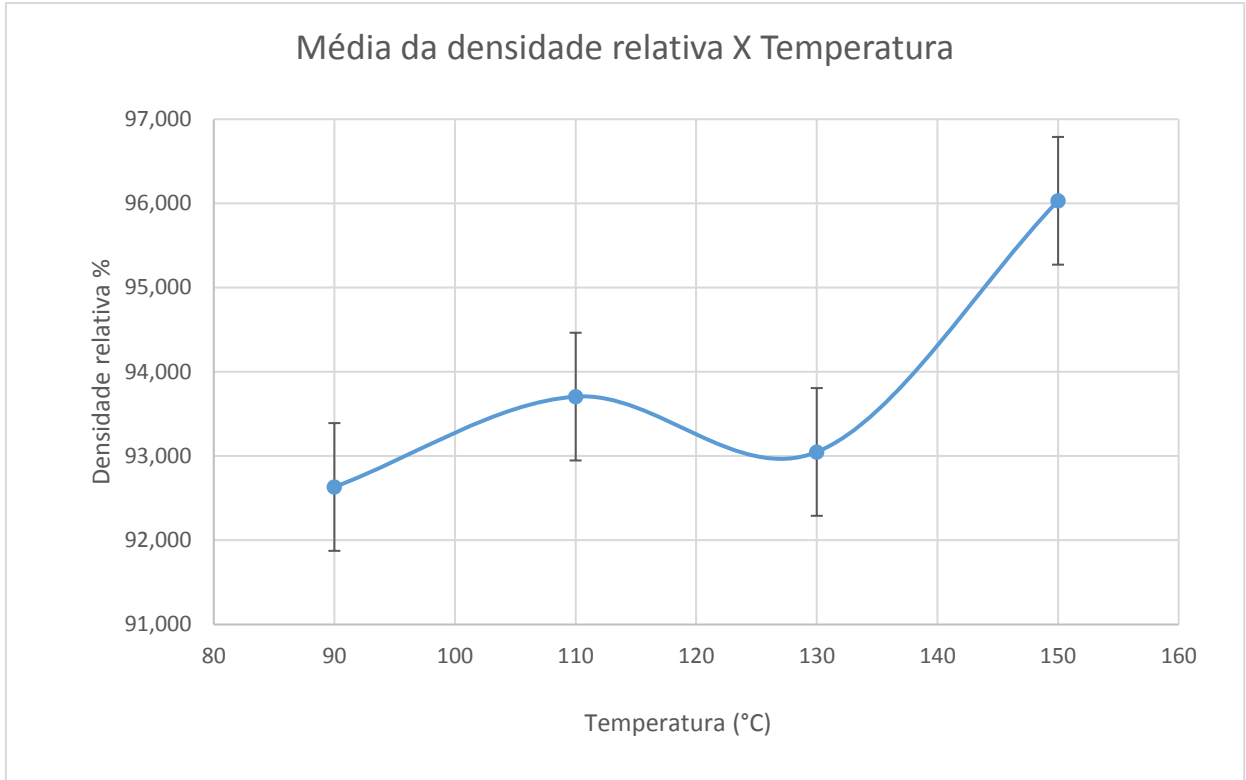


Figura 15: Densidade relativa X Temperatura do experimento 1. Fonte: Autor.

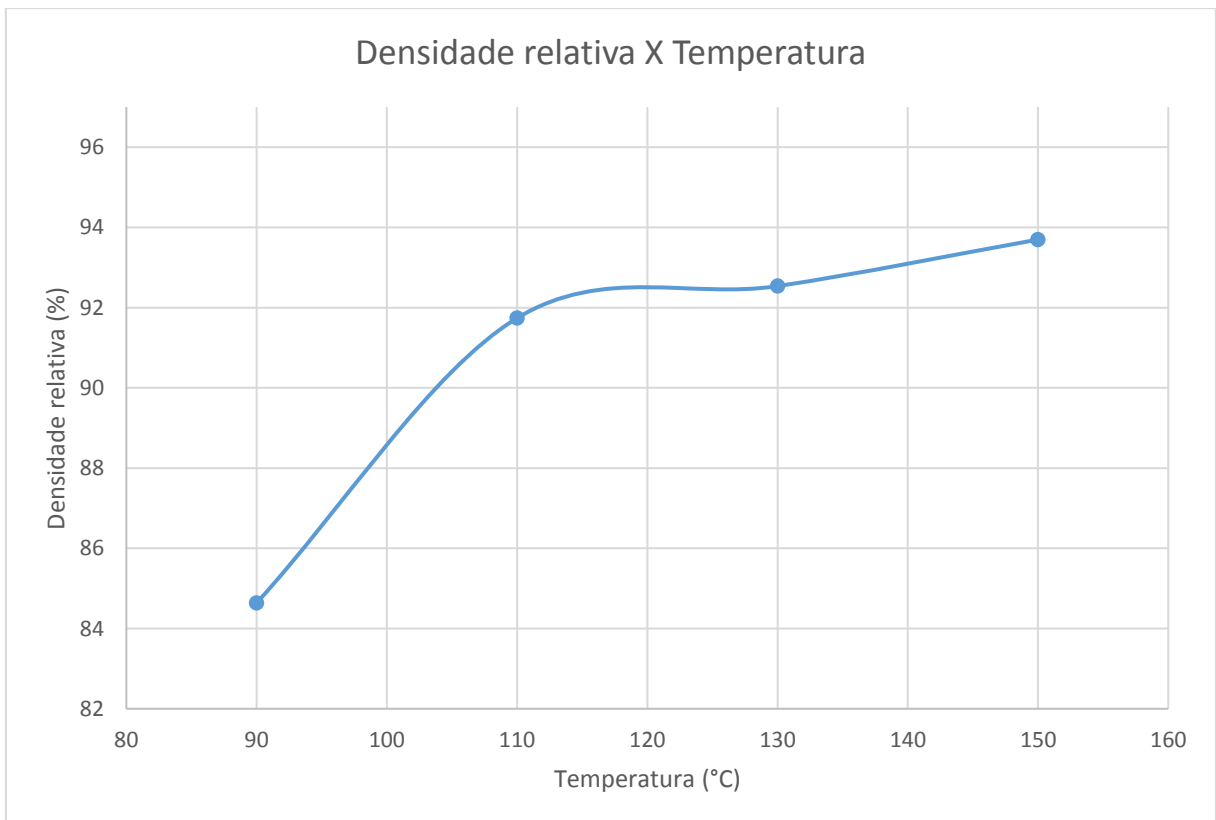


Figura 16: Densidade relativa X Temperatura do experimento 2. Fonte: Autor.

Sabendo que a densidade teórica do PET é de $1,38\text{g/cm}^3$ (GESTIS DO IFA, 2007), com base nos resultados obtidos e através dos gráficos é possível notar que com o aumento da temperatura, chegamos mais próximo do valor real de densidade relativa em porcentagem.

Os gráficos nos permitem entender que o processo de fabricação do material alvo da reciclagem está a temperaturas superiores às amostras ensaiadas com material residual.

O possível resultado gráfico deste experimento seria uma curva com o formato de “S” onde inicialmente teríamos as características de um gráfico exponencial e seu final seria uma curva logarítmica. Inicialmente teríamos valores baixos de temperatura e densidade relativa, em seu meio cresceria de maneira brusca até uma certa faixa onde depois teria um crescimento logarítmico. O gráfico deve possuir essas características pois ao aumentarmos a temperatura, nos aproximamos do T_m onde o material está completamente fundido e com a densidade de $1,38\text{g/cm}^3$ (como é apresentado no gráfico 3 do capítulo 2), já em temperaturas mais baixas apresentam densidades variáveis pois o material está longe da temperatura de fusão (T_m).

4.2 – ANÁLISE DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

A partir dos dados obtidos no processo de fabricação foi possível identificar as massas de cada corpo de prova. Na tabela 8 e 9 é mostrado a massa inicial (Peso Seco), final (Peso Úmido) e a porcentagem de absorção de água (%AA) de cada corpo de prova, dos experimentos 1 e 2, depois de emergidos em água durante um período de vinte e quatro horas.

Amostra	Temperatura 2 (°C)	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	ΔP (g)	AA%
1	150	29,70	30,00	0,30	1,00
2	150	27,10	27,50	0,40	1,46
3	130	33,40	34,10	0,70	2,05
4	130	29,30	29,70	0,40	1,35
5	110	28,10	28,90	0,80	2,77
6	110	30,00	30,50	0,50	1,64
7	90	31,40	32,20	0,80	2,48
8	90	28,50	29,20	0,70	2,40

Tabela 8: Valores obtidos para o experimento 1. Fonte: Autor.

Amostra	Temperatura 2 (°C)	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	ΔP (g)	AA%
1	150	20,10	20,50	0,40	1,95
2	130	20,00	20,60	0,60	2,91
3	110	20,00	20,60	0,60	2,91
4	90	19,90	20,70	0,80	3,86

Tabela 9: Valores obtidos para o experimento 2. Fonte: Autor.

A absorção da água nos corpos de prova é uma equação linear, onde a quantidade de água absorvida varia de acordo com a massa do corpo de prova, e essa quantidade de água em relação a massa do corpo varia entre 1 a 3% da massa do material sendo a média igual a 2,23 %. Os valores obtidos mostram que a quantidade de água absorvida por quantidade de material é muito baixa, ou seja, existe a possibilidade de utilização em ambientes molhados.

Uma comparação pode ser feita com o percentual de absorção de água de outros materiais utilizados em acabamentos internos. Normalmente são usadas as placas cerâmicas (chamadas de porcelanatos e azulejos), que possuem os coeficientes como mostrado na tabela 10.

Tipos de produtos	Percentual Máximo de Absorção de água (%)
Porcelanatos	0 a 0.5
Grês	0,5 a 3
Semi-Grês	3,0 a 6
Semi-porosos	3,0 a 10
Porosos	Acima de 10

Tabela 10: Tipo de produtos relacionados com o seu percentual máximo de absorção de água (%).
Fonte: Inmetro – Revestimentos cerâmicos (pisos e azulejos). Fonte: Autor.

De acordo com os resultados obtidos do resíduo estudado podemos compará-lo com o índice de absorção do Grês que possui diversas aplicações de acabamento em uma casa.

4.3 – ANÁLISE DO ENSAIO DE LIXAMENTO

O ensaio de lixamento teve como objetivo identificar se era possível melhorar o acabamento superficial dos corpos de prova. Esse ensaio nos remete a entender a viabilidade

em aplicações como a *drywall* ou outra qualquer que necessite desse tipo acabamento liso, já que nesses casos o acabamento superficial é de extrema importância para o produto. A tabela 11 avalia a temperatura em que os corpos de prova são ou não capazes de sofrer esse tipo de processo.

Amostra	Temperatura 2 (°C)	Capacidade
1	150	Sim
2	130	Sim
3	110	Sim
4	90	Não

Tabela 11: Capacidade do corpo de prova sofrer o processo de lixamento em relação a temperatura final. Fonte: Autor.

O resultado desse ensaio é descrito na tabela 11 acima onde notamos que apenas amostras acima da temperatura de 90 °C foram capazes de suportar o processo de lixamento e, portanto, para aplicações de acabamentos em que buscamos superfícies lisas devemos utilizar o material residual fabricado com temperaturas de 110 °C ou mais.

4.4 – ANÁLISE DO ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza de Brinell foi realizado, porém como o corpo de prova apresenta uma descontinuidade por todo o seu volume devido a junção dos vários pedaços residuais do PET, não foi possível observar o resultado no visor do aparelho, tornando, assim, o ensaio inválido.

Os corpos de prova quando ensaiados na dureza de Rockwell C obtiveram resultados que variam entre 3 e 10 HR, o que significa que a escala do ensaio está incompatível com o material em estudo, nessa escala são estudados materiais como: aço, titânio, aços com camada endurecida profunda.

Uma proposta seria realizar o ensaio de dureza de Rockwell F onde de acordo com a tese de doutorado de Márcio Cleto Soares de Moura apresenta um valor de aproximadamente 86,6 HRF.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

5.1 – CONCLUSÕES

Como pôde ser observado pelo exposto no capítulo anterior, os métodos utilizados para determinar as propriedades do material, bem como o estudo de suas aplicações mostraram que para o resíduo do PET existe uma enorme aplicabilidade nas mais diversas áreas, inclusive como drywall.

As melhores características apresentadas pelo resíduo do PET no processo de fabricação foram em temperaturas que variam entre 110 °C a 150 °C onde constatamos uma densidade relativa próxima a densidade real do PET porém com um menor custo energético na produção do material, já que não chegamos a ultrapassar a temperatura T_m e obtivemos uma densidade relativa de 96,939% a uma temperatura de 150 °C. Nos processos de lixamento e absorção de água foi verificado a possibilidade de efetuar o lixamento e também relação ao percentual máximo de absorção de água ser comparado ao Grês (um tipo de revestimento em acabamentos na construção civil).

No geral os resultados foram satisfatórios, seu processo de fabricação não apresenta grande complexidade, porém para se obter um produto de melhor qualidade e acabamento superior deve-se atentar a um equipamento que possua uma distribuição de calor uniforme e em mais direções.

A absorção de água é uma característica muito importante na área da construção civil e por isso as aplicações nesse parâmetro foram muito bem aceitas e com resultados satisfatórios podendo ser comparado a vários tipos de revestimentos cerâmicos.

5.2 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas propriedades não foram estudadas para um melhor entendimento das características e propriedades do resíduo do PET. As propostas sugeridas seriam os estudos mais aprofundados do ensaio de dureza, ensaio de tração e compressão, ensaio de acústica, ensaio de transferência de calor, durabilidade e identificar o custo de fabricação. Outra forma de pensar seria a criação de uma máquina que produzisse blocos com a possibilidade de encaixe uns nos outros, podendo assim construir uma *drywall* montável e reutilizável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BECKER Daniela.; “Materiais Poliméricos”, 2016

<http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/daniela/materiais/polimeros.pdf> Acessado em 13 de dezembro de 2016.

CANEVAROLO JR., S.; “Ciência dos Polímeros”, Artliber Editora, 2ª edição, São Paulo, 2006

DIAS, S. G., TEODÓSIO, A.; “Estrutura da cadeia reversa: “caminhos” e “descaminhos” da embalagem PET”, 2006 <http://www.scielo.br/pdf/%0D/prod/v16n3/a06v16n3.pdf> Acessado em 03 de setembro de 2016.

DIAS, S.G., TEODÓSIO, A.; “Reciclagem do PET: desafios e possibilidades”, 2006, http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2006_TR520346_8551.pdf Acessado em 03 de setembro de 2016.

“Dureza Brinell” – ABNT Catálogo <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=61036> Acessado em 02 de outubro de 2016.

“Dureza Rockwell”

http://docente.ifb.edu.br/paulobaltazar/lib/exe/fetch.php?media=durometro_rockwell_12.pdf Acessado em 22 de outubro de 2016.

“Ensaio Mecânico: Dureza, Infosolda Portal Brasileiro de Soldagem”

<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/212-ensaio-mecanico-dureza.html> Acessado em 04 de dezembro de 2016.

“Ensaio Mecânicos de Materiais Aula 3 – Ensaio de Dureza”

<http://www.engbrasil.eng.br/pp/em/aula3.pdf> Acessado em 02 de outubro de 2016.

GESTIS, “GESTIS substance database” [http://gestis-en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/530566.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis-en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/530566.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0) Acessado em 04 de dezembro de 2016.

INMETRO, “Revestimentos cerâmico (pisos e azulejos)” <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/revestimentos.asp> Acessado em 22 de outubro de 2016.

“Introdução aos materiais poliméricos” <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/daniela/materiais/polimeros.pdf> Acessado em 26 de outubro de 2016.

MANCINI, S., BEZERRA, M., ZANIN, M.; “Reciclagem de PET Advindo de Garrafas de Refrigerante Pós-Consumo”, 1998, <http://revistapolimeros.org.br/files/v8n2/v8n2a06.pdf> Acessado em 03 de setembro de 2016.

MOURA, C. S. “Desenvolvimento e caracterização de compósitos poli(tereftalato de etileno) reciclado (PET reciclado) com flocos de vidro”, https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/12784/1/MarcioCSM_TESE.pdf Acessado em 04 de novembro de 2016.

“Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais” www.edufal.ufal.br Acessado em 22 de outubro de 2016.

“Prensa Embutidora Metalográfica Fortel”, <http://fortel.com.br/embutidoras.html> Acessado em 28 de setembro de 2016.

RABELLO, M. S., WELLEN, R. M. R.; “Revista Eletrônica de Materiais e Processos em 2008 como Estudo da cristalização a frio do poli (tereftalato de etileno) (PET) para produção de embalagens”, 2008 <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/71/94> Acessado em 03 de setembro de 2016.

ROMÃO, W., SPINACÉ, M., PAOLI, M.; “Poli(Tereftalato de Etileno), PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem”, 2009, <http://www.scielo.br/pdf/po/v19n2/v19n2a09> Acessado em 03 de setembro de 2016.

SHACKELFORD, J.; “Ciência dos Materiais”, Pearson Education do Brasil, 6ª edição, São Paulo, 2008.

“Um estudo teórico sobre a sinterização na metalurgia do pó”

<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/viewFile/139/129> Acessado em 08 de outubro de 2016.