

Universidade Federal de Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia

Engenharia Mecânica

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS DENSAS
A PARTIR DO PROCESSO DE PRENSAGEM A QUENTE DE PÓ DE
POLI ETILENO TEREFALATO (PET) RECICLADO**

Guilherme Ariel Ferreira

Juiz de Fora

2017

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Ferreira, Guilherme Ariel.

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS DENSAS A PARTIR DO PROCESSO DE Prensagem a quente de pó de poli etileno tereftalato (PET) reciclado / Guilherme Ariel Ferreira. – 2017.

60 f. : il.

Orientador: Alexandre da Silva Scari

Graduação – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Engenharia Mecânica, 2017.

1. PET. 2. Sinterização. 3. Propriedades Mecânicas. I. Scari, Alexandre, orient. II. Título.

Guilherme Ariel Ferreira

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS DENSAS
A PARTIR DO PROCESSO DE Prensagem a quente de pó de
POLI ETILENO TEREFALATO (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.

Aprovada em: 08/11/2017

BANCA EXAMINADORA

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

Professor Dr. Raphael Fortes Marcomini
Universidade Federal de Juiz de Fora

Professor Dr. Lecino Caldeira
Instituto Federal Do Sudeste de Minas Gerais - Campus
Juiz De Fora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me proveu de todas as ferramentas necessárias para que eu alcançasse meus objetivos e vem me guiando na realização de meus sonhos.

À minha mãe, à minha avó, a meu pai (in memoriam) e meus irmãos meus exemplos de vida e meu porto seguro. Agradeço a todo suporte, apoio e incentivo nessa jornada.

Agradeço ao professor Lecino e ao técnico de laboratório Felype do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais Juiz de Fora pelo apoio e disponibilidade na realização dos ensaios de compressão. Agradeço ainda à Andrea, pela paciência e ajuda ao me ensinar os procedimentos de manuseio da prensa e acompanhamento no laboratório.

Agradeço ao professor e orientador Alexandre Scari por todo apoio, ajuda, paciência e orientação na realização deste trabalho.

“The more you Learn, The more you earn”.

Frank Clark

RESUMO

Nas últimas décadas houve um grande aumento na utilização de embalagens produzidas a partir de polímeros, especialmente o PET (Polietileno tereftalato) devido a suas propriedades mecânicas e econômicas. Esse aumento impulsiona a quantidade de resíduos gerado por estes materiais, que muitas vezes são descartados no meio ambiente, ou com o avanço da conscientização reciclado. A reciclagem de embalagens PET tem aumentado ano após ano, e durante o processo de reciclagem é gerado uma quantidade significativa de refugo que não é aproveitado, pois apresenta tamanho inadequado para o processo de reciclagem convencional sendo descartado. Este trabalho tem como objetivo, levantar parâmetros de sinterização para este material, avaliar as propriedades mecânicas do material sinterizado e assim verificar possíveis aplicações para esse refugo. Foram levantados os principais parâmetros de sinterização para o material em questão, tais como pressão, temperatura, tempo de sinterização e quantidade de material necessária e assim, foi analisado de acordo com os resultados obtidos experimentalmente, a possibilidade de aplicação em divisórias de ambiente e tampo de mesas para escritório.

Palavras-chave: PET. Sinterização. Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

Over the last decades, there has been a large increase in the use of packaging produced from polymers, especially the PET (Polyethylene Terephthalate) due to its mechanical properties and economic reasons. This increase boosts the quantity of waste generated by these materials, which often are discarded in the environment, or with the advancement of awareness is recycled. The recycling of PET packaging has increased year after year, and during the recycling process is generated a significant amount of debris that is not used, because it has inadequate size for the conventional recycling process, so it is discarded. This study aims to set parameters of sintering for this material, assess the mechanical properties of the sintered material and thus verify possible applications for this residue of the recycling process. Raised the main parameters of sintering for the material in question, such as pressure, temperature, time of sintering, and amount of material needed. The material was analyzed according to the results obtained experimentally, and the possibility of application in partition walls and tabletop tables for offices was verified.

Key-words: PET. Sintering. Mechanical Properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Molécula de Polietileno	15
Figura 2 – Comportamento de diversas propriedades dos polímeros com o aumento da massa molar	16
Figura 3 – Classificação dos polímeros	17
Figura 4 – Consumo de embalagens PET no Brasil.	19
Figura 5 – Arranjo amorfo.	20
Figura 6 – Arranjo cristalino.	20
Figura 7 – Arranjo semicristalino.	21
Figura 8 – Pré-forma de PET como um material: a) Amorfo; b) Parcialmente cristalino e c) cristalino.	22
Figura 9 – Variação do volume específico com a temperatura para o polímero amorfo e semicristalino.	23
Figura 10 – Módulo de elasticidade versus Temperatura de um material polimérico.	24
Figura 11 – Reação de polimerização em etapas para a obtenção do PET.	24
Figura 12 – Evolução da reciclagem do PET no Brasil.	26
Figura 13 – Simbologia utilizada para a identificação e separação de materiais plásticos em processos de reciclagem.	27
Figura 14 – Processo de prensagem do pó na sinterização.	29
Figura 15 – Curva característica de um ensaio de compressão de materiais poliméricos.	30
Figura 16 – Curva característica de um ensaio de compressão de materiais poliméricos com offset de 0,2%.	32
Figura 17 – Curva dos comportamentos dos materiais poliméricos.	32
Figura 18 – Fluxograma de metodologia	34
Figura 19 – Refugo utilizado como matéria prima.	35
Figura 20 – Corpo de prova	36
Figura 21 – prensa utilizada para sinterização dos corpos de prova.	37
Figura 22 – Molde da máquina onde o material é sinterizado.	38
Figura 23 – Equipamento utilizado para realização do ensaio de compressão.	39
Figura 24 – Corpo de prova posicionado para ser ensaiado.	40
Figura 25 – Corpo de prova posicionado para ensaio de compressão diametral.	41
Figura 26 – Resultado da sinterização na temperatura de $155^{\circ}C$	43
Figura 27 – Resultado da sinterização na temperatura de $160^{\circ}C$	43
Figura 28 – Curva tensão x deformação para 3 diferentes temperaturas de sinterização.	44
Figura 29 – Curva de aquecimento da prensa.	46
Figura 30 – Controlador de Tempo e Temperatura Microprocessado utilizado na prensa.	46

Figura 31 – Balança de precisão utilizada para avaliação da massa dos corpos de prova.	47
Figura 32 – Amostras fabricadas para avaliação da altura ideal.	48
Figura 33 – Corpo de prova sinterizado com os parâmetros definidos.	48
Figura 34 – Planilha utilizada para tratamento dos dados do ensaio de compressão.	49
Figura 35 – Curva tensão x deformação de um dos corpos de prova ensaiados.	50
Figura 36 – Corpo de prova após o ensaio de compressão.	50
Figura 37 – Curva tensão x deformação de um corpo de prova que permaneceu sob ação de uma força mesmo após o rompimento.	52
Figura 38 – Curva tensão x deformação referente ao ensaio de compressão diametral.	53
Figura 39 – Corpo de prova após o ensaio de compressão diametral.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais propriedades do PET.	19
Tabela 2 – Parâmetros de ensaio.	40
Tabela 3 – Parâmetros do ensaio de compressão diametral.	41
Tabela 4 – Avaliação do controle da pressão no processo de sinterização.	42
Tabela 5 – Influência da temperatura na qualidade da sinterização.	43
Tabela 6 – Influência da temperatura na tensão suportada.	44
Tabela 7 – Influência do tempo na qualidade da sinterização.	45
Tabela 8 – Altura resultante de acordo com a massa de PET utilizada.	47
Tabela 9 – Parâmetros definidos para sinterização.	48
Tabela 10 – Resultado dos ensaios de compressão.	51
Tabela 11 – Propriedades mecânicas levantadas para o pó de PET sinterizado a 155°C.	51
Tabela 12 – Resultado da análise do ensaio de compressão diametral.	52
Tabela 13 – Resistência à tração levantadas para o pó de PET sinterizado a 155°C.	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abipet	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Cempre	Compromisso Empresarial para Reciclagem
ISO	International Organization Standardization
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PET	Politereftalato de etileno
S.I	Sistema Internacional
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
d	Diâmetro do corpo-de-prova
E	Módulo de Elasticidade
F	Força
$f_{t,D}$	Resistência à tração por
L	Comprimento do corpo-de-prova
T_g	Temperatura de transição vítrea
T_m	Temperatura de Fusão compressão diametral
σ	Tensão
ϵ	Deformação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivo específico	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Polímeros	15
2.1.1	O Polietileno Tereftalato - PET	17
2.1.2	Estrutura Morfológica	19
2.1.3	Polimerização	24
2.1.4	Reciclagem do PET	25
2.2	Sinterização	27
2.3	Propriedades Mecânicas e Ensaio	29
2.3.1	Resistência à tração por compressão diametral	33
3	METODOLOGIA	34
3.1	Matéria prima	34
3.1.1	Corpo de Prova	35
3.2	Parâmetros de fabricação	36
3.2.1	Pressão	36
3.2.2	Temperatura	36
3.2.3	Tempo	37
3.2.4	Fabricação	37
3.2.5	Variação das características de fabricação	38
3.3	Ensaio mecânico	39
3.3.1	Resistência à tração por compressão diametral	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	Parâmetros de fabricação	42
4.1.1	Pressão	42
4.1.2	Temperatura	42
4.1.3	Tempo	44
4.1.4	Variação das características de fabricação	47
4.2	Resultados ensaio de compressão axial	49

4.3	Resultados ensaio de compressão diametral	52
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	54
5	CONCLUSÃO	56
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a reciclagem de materiais poliméricos vem sendo bastante estudada, a fim de retirar esses materiais do meio ambiente e também para a utilização como matéria prima para outros produtos. Este trabalho visa exatamente estudar e propor a utilização do refugo do processo de reciclagem do PET, material que atualmente não é utilizado na reciclagem por não possuir as características necessárias (como tamanho do grão), para prosseguir no processo. O refugo de PET foi submetido a uma prensa e sinterizado, ou seja, submetido a uma elevada temperatura e pressão, formando assim um tarugo cilíndrico que foi utilizado para a determinação das suas propriedades mecânicas. Conhecendo as propriedades mecânicas da sinterização do PET, pode-se verificar sua aplicação nas mais diversas áreas. Este trabalho verifica a aplicação deste material na fabricação de divisórias de ambiente e tampo de mesas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o aumento significativo do uso de embalagens utilizando o PET, há também o aumento da preocupação com o destino final deste material. Atualmente, segundo a Abipet (2016) a reciclagem do PET representa apenas 51% de todo material consumido no Brasil, e como identificado no processo de reciclagem há ainda uma fração deste material que não é aproveitada na peletização, e acaba sendo descartada. Por isso a importância de se identificar um potencial uso para este material, evitando o mesmo de ser descartado e assim aumentar os incentivos para a reciclagem do PET. Já se estuda a utilização deste material misturado com outros, como o concreto, por exemplo para sua aplicação na engenharia civil, porém este trabalho apresenta as análises realizadas para a sinterização exclusivamente do refugo de PET.

Ainda segundo a Abipet (2016) a reciclagem do PET apresenta diversos benefícios, pois a matéria-prima reciclada substitui material novo em muitos outros produtos, nos segmentos mais variados. Porém, mesmo no processo de reciclagem, há essa parcela que é descartada, o que diminui a eficiência da reciclagem do PET. A reciclagem ainda economiza recursos naturais, como água e energia. Diante de todos os benefícios, e considerando que há um crescimento anual superior a 11% na reciclagem de todo PET produzido, torna-se bastante interessante e conveniente buscar meios de se aproveitar todo este material.

A aplicação deste material em divisórias de ambiente e tampos de mesa pode apresentar um produto final de grande qualidade e por um preço acessível, uma vez que a matéria prima a ser utilizada é atualmente descartada.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho possui como objetivo a avaliação das propriedades mecânicas do refugo que não é aproveitada no processo de reciclagem do PET, levantando os parâmetros de sinterização deste material e com estes definidos avaliar as propriedades mecânicas do corpo de prova sinterizado. O objetivo de se levantar as propriedades do material é analisar a possível aplicação deste material em divisórias de ambiente, que atualmente são fabricadas com madeira, gesso, ou PVC e em tampos de mesas para escritórios, que atualmente são comumente fabricados de vidro ou madeira.

1.2.2 Objetivo específico

1. Determinar os valores ideais de cada um dos parâmetros de sinterização do refugo de PET, tais como temperatura, pressão, e tempo. Esses parâmetros são definidos de acordo com análises experimentais;
2. Fabricar corpos de prova com os parâmetros definidos para realização do ensaio de compressão, com objetivo de levantar suas propriedades mecânicas, como tensão de ruptura e tensão de escoamento do material;
3. Com os resultados obtidos, determinar uma aplicação para o material, como por exemplo, na fabricação de divisórias de ambiente e tampos de mesas para escritório.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Polímeros

De acordo com Canevarolo Jr. (2006) a palavra polímeros origina-se do grego poli e meros, que significam respectivamente muitas e partes, o nome se dá pois o polímero é uma macromolécula composta por muitas unidades de repetição denominadas meros. A Figura 1 mostra a molécula de Polietileno, exemplificando a formação de um polímero a partir de diversos monômeros.

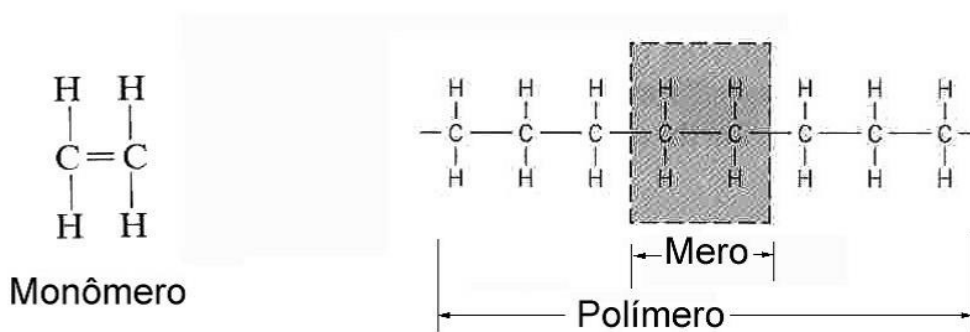


Figura 1 – Molécula de Polietileno

Fonte: Adaptado de Callister (2002)

Os polímeros são formados por unidades de repetição denominados monômeros, que dependendo de sua estrutura química, números de partes por cadeia e tipo de ligação covalente formam as três principais classes de polímeros que são divididas em plásticos, borrachas e fibras. Essas moléculas por possuírem diferentes comprimentos, ou seja, diferentes valores de massa molar, é esperado que haja uma grande variação de suas propriedades em função desta variação de comprimento. O gráfico da Figura 2 ilustra a variação das propriedades em geral em função da massa molar do polímero.

Segundo Canevarolo Jr. (2006) as características dos polímeros são diretamente ligadas a sua massa molar. Os polímeros possuem comprimento molecular bastante vasto, o que possibilita uma grande variação em suas propriedades, tornando-os muito interessante nas aplicações industriais. A variação da massa molar em relação às propriedades do material é afetada assintoticamente, ou seja, moléculas pequenas apresentam maior mudança em suas propriedades físicas em comparação com as moléculas maiores.

Essa variação das propriedades em função da massa molar do polímero torna-o bastante interessante para aplicações diversas, pois com o aumento tem-se os seguintes efeitos: aumento do alongamento de ruptura, resistência ao impacto e viscosidade. Além disso, diminui a cristalização, resistência a tração e fluidez.

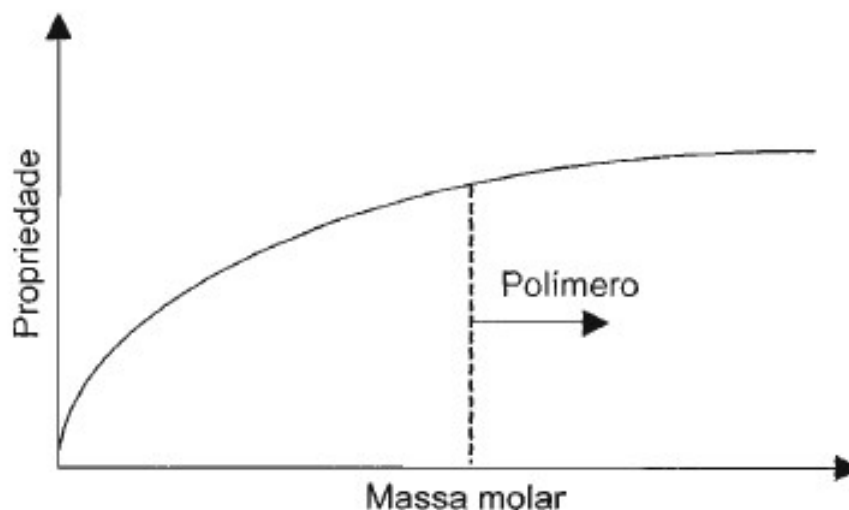


Figura 2 – Comportamento de diversas propriedades dos polímeros com o aumento da massa molar

Fonte: Canevarolo Jr. (2006)

Diante da grande variedade de materiais poliméricos existentes, torna-se conveniente organizar estes de acordo com características semelhantes, proporcionando assim uma melhor compreensão e facilidade no estudo destes materiais. Na literatura, encontram-se diversos critérios de classificação dos polímeros, sendo o critério de categorização definido de acordo com a escolha do autor.

Carothers (1929) classificou-os em dois grupos, de acordo com sua estrutura, ou seja, em relação aos monômeros e a formação das cadeias durante a reação de polimerização. Ainda segundo o autor, os polímeros são classificados em polímeros de adição e de condensação. Mais tarde, Flory (1953) focando nos mecanismos de reação da polimerização sugeriu uma nova classificação, onde as reações foram divididas como polimerização em cadeia, ou também conhecido como poli adição, e em etapa, frequentemente encontrado como poli condensação.

Kiparissides (1996) propôs uma classificação mais abrangente, sugerindo que os polímeros poderiam ser classificados de acordo com seu número de unidades estruturais presentes no polímero, estrutura molecular e mecanismo de crescimento da cadeia polimérica.

Podemos ver que por mais que haja diferença na classificação proposta pelos autores, de modo geral, todas elas são justificadas de acordo com aspectos de sua composição, configuração e tipo de reação envolvida na formação do polímero. Assim devido a diversidade de estruturas que as macromoléculas podem apresentar, os polímeros podem ser classificados de acordo com o diagrama proposto exibido na Figura 3.

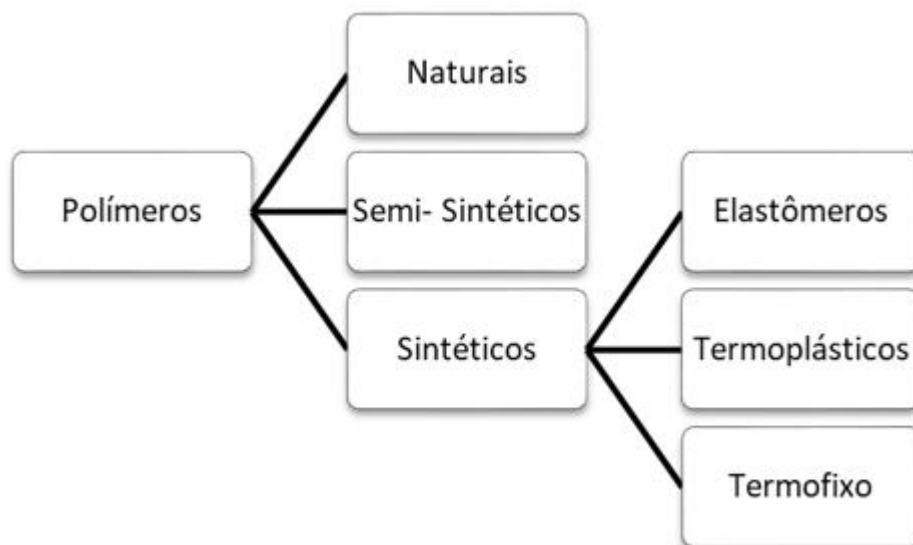


Figura 3 – Classificação dos polímeros

Fonte: Adaptado de Timmons (2006)

Os polímeros naturais são os que podem ser obtidos diretamente da natureza, como é o caso látex, da celulose e do algodão. Os polímeros semissintéticos, ou também conhecidos como artificiais, são obtidos através de reações químicas a partir de polímeros naturais, como é o caso da caseína. Já os polímeros sintéticos são os produzidos exclusivamente por reações de transformação, como reações químicas por exemplo.

De acordo com Canevarolo Jr. (2006), os termoplásticos são materiais que, quando submetidos a um aumento de temperatura e pressão, apresentam a capacidade de amolecer e escoar-se e, quando se retoma a temperatura e pressão iniciais, o material apresenta novamente formas definidas. Este é um comportamento físico reversível.

Diferentemente das resinas termoplásticas, os termofixos se encontram em um estado irreversível mesmo sob influência da variação de temperatura, ou seja, não se fundem, por conta de sua estrutura molecular interligada, de ligações cruzadas. Os elastômeros possuem como principal característica a elasticidade, podendo, em condições normais, sofrer grandes deformações e rapidamente voltar ao seu estado inicial.

2.1.1 O Polietileno Tereftalato - PET

O PET foi patenteado em 1941 pelos químicos ingleses John RexWhinfield e James TennantDickson que criaram o primeiro poliéster chamado de terylenepela pela Imperial Chemical Industries, enquanto procuravam uma fibra para substituição da seda. Em

1973 com o processo de injeção e sopro, sistema desenvolvido pela Du Pont permitiu o desenvolvimento de garrafas PET, revolucionando o mercado de embalagens.

Segundo a Abipet (2016), o PET é o material que apresenta o melhor e mais resistente plástico para fabricação de garrafas, frascos e embalagens em geral. Tudo isso devido à alta resistência mecânica e química proporcionada por este material. Além disso, o PET assegura uma excelente barreira a odores, por isso é amplamente utilizado em embalagens, sendo possível armazenar produtos com segurança e higiene. Dentre suas aplicações o PET tem grande participação na indústria de bebidas em todo o mundo, sendo considerado o recipiente ideal para transporte e armazenamento deste tipo de produto.

A garrafa PET é comumente encontrada em nosso cotidiano, uma vez que é utilizada para embalar grande parte dos líquidos que consumimos diariamente, como bebidas e até mesmo em frascos de medicamentos. Porém esse polímero é também encontrado em outros setores, como o têxtil, que usa o material como matéria-prima para a fabricação de roupas, tapetes e até mesmo vassouras.

No Brasil esse polímero teve surgimento no ano de 1988, sendo primeiramente muito utilizado na indústria têxtil. E a partir de 1993 passou a ser utilizado significativamente na indústria de embalagens nacional onde as vantagens imediatas para estas indústrias foram a substituição das embalagens retornáveis, que necessitavam de sistemas de logística reversa por outras descartáveis, sem retorno, mais baratas, versáteis e sem necessidade de manutenção e reposição das perdas.

Para os consumidores, a praticidade do descarte imediato após o consumo, sem necessidade de guardar e devolver na próxima compra, o que alavancou a utilização do PET em embalagens, e atualmente, segundo a Abipet (2016), corresponde a 71% da aplicação deste material. A crescente utilização de embalagens PET no Brasil pode ser verificada claramente no gráfico mostrado na Figura 4.



Figura 4 – Consumo de embalagens PET no Brasil.

Fonte: Adaptado de Abipet (2016)

A Tabela 1 apresenta segundo Stuart (2002) as principais propriedades do PET. Na sequência, têm-se a verificação a importância de cada uma delas.

Tabela 1 – Principais propriedades do PET.

Propriedade	Valor]
Densidade	1,38 a 1,41 g/cm ³
Temperatura de fusão	245-265°C
Temperatura de transição	69°C
Resistência a Tração	80 MPa
Modulo de Elasticidade	2 GPa

Fonte: Stuart (2002)

2.1.2 Estrutura Morfológica

A organização molecular, ou seja, como as moléculas estão arranjadas tem efeitos de grande importância nos polímeros, pois está diretamente relacionada com a sua cristalinidade.

De acordo com Lokensgard (2013), os plásticos apresentam dois tipos de arranjos, o amorfo, em que as cadeias moleculares estão todas desordenadas e o tipo cristalino, que apresentam uma estrutura altamente ordenada.

O arranjo amorfo é representado na Figura 5. São plásticos facilmente identificados pois são transparentes, isso graças ao arranjo aleatório das cadeias que não interrompem a

passagem da luz.

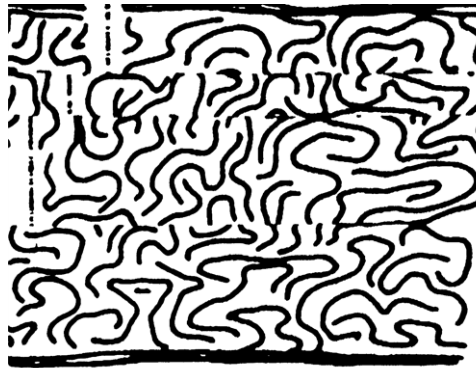


Figura 5 – Arranjo amorfo.

Fonte: (Lokensgard, 2013)

Já os polímeros cristalinos apresentam o arranjo mostrado na Figura 6. Essas moléculas organizadas resultam em materiais opacos, pois a organização destas moléculas não permite a passagem de luz.

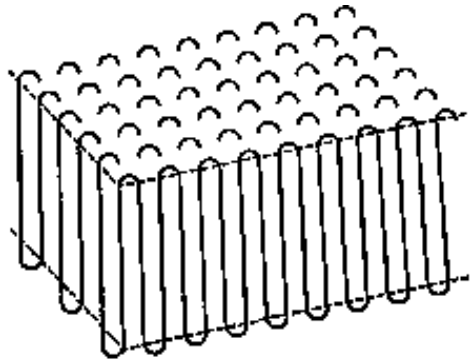


Figura 6 – Arranjo cristalino.

Fonte: (Lokensgard, 2013)

Ainda segundo Lokensgard (2013), as regiões cristalinas são alteradas pelo calor, fazendo com que uma região cristalina ao ser submetida a calor se torne totalmente amorfa, com o resfriamento algumas regiões tornam-se ordenadas e outras desordenadas. Plásticos cristalinos são chamados de materiais semi-cristalinos, uma vez que os plásticos não se cristalizam totalmente, apresentando assim regiões cristalinas e regiões amorfas que pode ser visto na Figura 7.

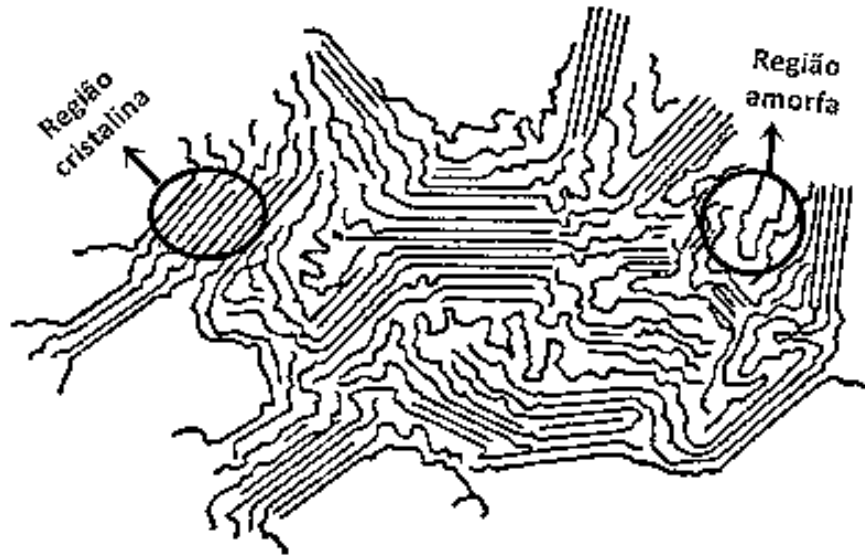


Figura 7 – Arranjo semicristalino.

Fonte: (Lokensgard, 2013)

De acordo com Rabello & Wellen (2008), o PET pode existir tanto como um material amorfo quanto como um material semicristalino, dependendo das condições de resfriamento do material. Ambas as formas são desejáveis na indústria, dependendo da aplicação a que se destina.

O PET semicristalino pode ser obtido quando, a partir do estado fundido, o material é submetido a um processo de resfriamento lento, assim as cadeias têm tempo de se rearranjar de forma organizada. Para obter o PET no estado amorfo, é necessário submeter o polímero, a partir do estado fundido, a um processo de resfriamento rápido, e como consequência as cadeias não têm tempo de se organizar.

A Figura 8 apresenta as pré-formas de uma garrafa de PET como um material amorfo, parcialmente cristalino e cristalino. A fração cristalina do PET varia de acordo com o seu processo de fabricação e as temperaturas atingidas em seu aquecimento e resfriamento.



Figura 8 – Pré-forma de PET como um material: a) Amorfo; b) Parcialmente cristalino e c) cristalino.

Fonte: Adaptado de Rabello & Wellen (2008)

Uma outra característica importante dos polímeros é a temperatura de transição vítrea (T_g), que é observada apenas nos materiais poliméricos e vítreos. Esta caracteriza a faixa de temperatura na qual o material, quando submetido a um aumento de temperatura, permite que as cadeias poliméricas fiquem livres e movimentem-se uma sobre as outras com maior facilidade, ou seja, o material fica mais dúctil. O polímero se torna viscoso, até pegajoso, mas não chega a ocorrer reação química, trata-se de um fenômeno exclusivamente físico (Canevarolo Jr., 2006).

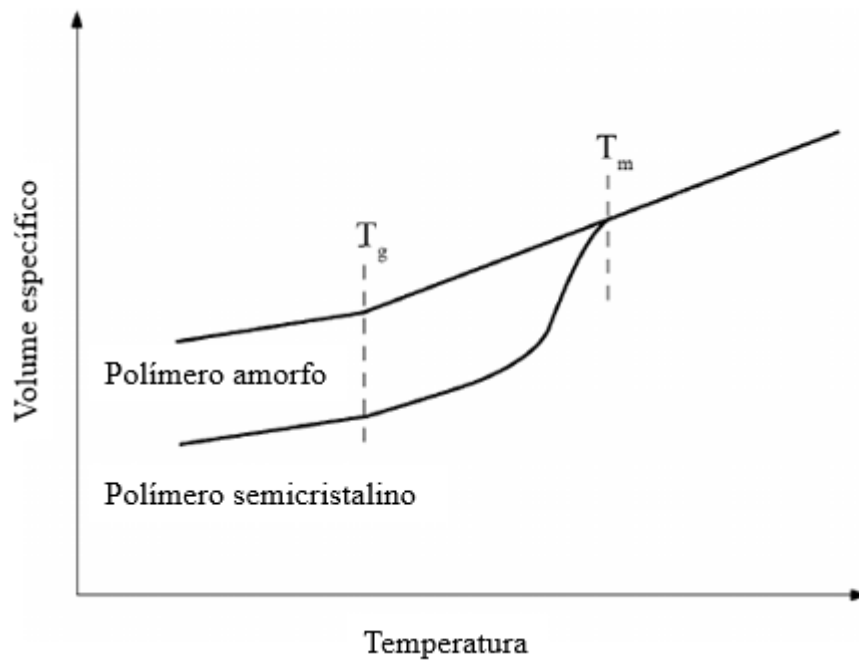


Figura 9 – Variação do volume específico com a temperatura para o polímero amorfo e semicristalino.

Fonte: Adaptado de (Yan; Shi; Hao, 2011)

O conhecimento da T_g é um parâmetro muito importante na definição de um polímero, pois através deste é possível determinar sua resistência a temperatura, o que para os processos envolvendo polímeros é de fundamental conhecimento, além do mais a T_g influencia diretamente no comportamento mecânico do material que passa de frágil para dúctil. A Figura 10 mostra o comportamento do módulo de elasticidade em função da temperatura. A temperatura de fusão, T_m , é a temperatura na qual as cadeias adquirem mobilidade, e o polímero se torna viscoso, podendo ser moldado.

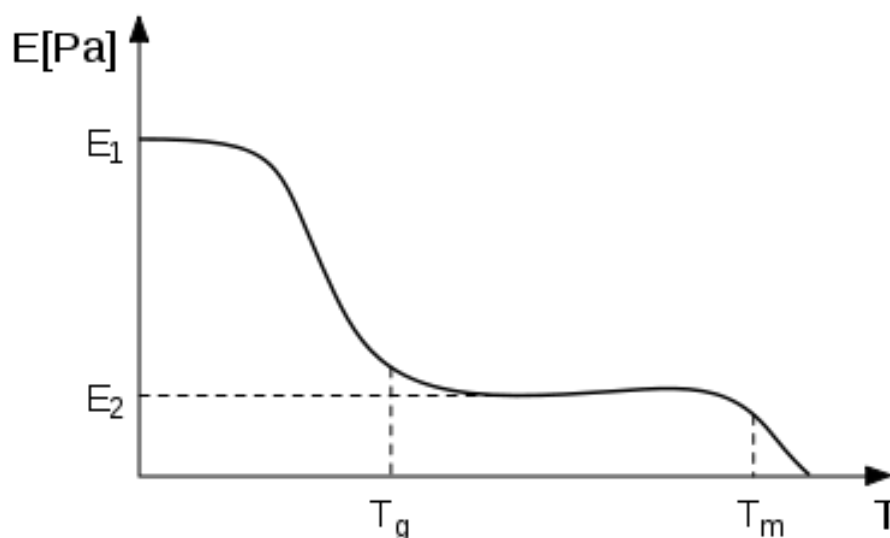


Figura 10 – Módulo de elasticidade versus Temperatura de um material polimérico.

Fonte:(Poppe, 2007)

2.1.3 Polimerização

A polimerização é o nome de um conjunto de reações onde as moléculas menores, os monômeros, reagem entre si por mecanismos distintos e sob determinadas condições, formando as macromoléculas chamadas de polímeros (Canevarolo Jr., 2006).

As características dos polímeros são definidas durante o seu processo de formação, por isso os diversos fatores que podem influenciar no processo de polimerização, como a pureza dos reagentes, o tipo e concentração dos iniciadores, a temperatura e o tempo de reação, viscosidade e o pH do meio, são fundamentais na determinação das propriedades finais da macromolécula formada (Silva Filho, 2005).

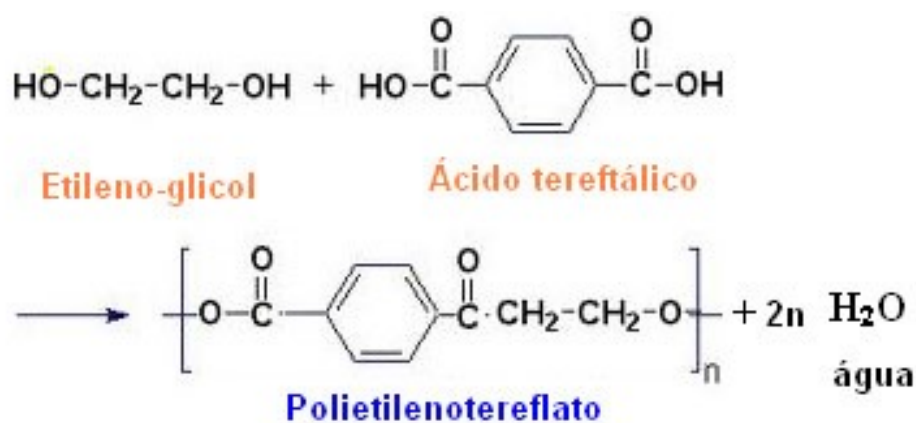


Figura 11 – Reação de polimerização em etapas para a obtenção do PET.

Fonte: (Kotz; Treichel, 1998)

Segundo Mano & Mendes (2004), os métodos de preparação de polímeros apresentam características que podem servir como parâmetros de classificação, como a cinética da reação e o mecanismo envolvido. Considerando a cinética de reação, os polímeros podem ser formados de duas maneiras, por crescimento em cadeia ou em etapas. Flory (1953) propôs uma diferenciação dos processos de polimerização em duas categorias, estabelecendo como critério o mecanismo de reação envolvido no crescimento da cadeia. Considerando o mecanismo envolvido podemos ter a polimerização por crescimento em cadeia, ou adição, e a polimerização em etapas, ou condensação.

De acordo com Stuart (2002), a polimerização em cadeia ocorre na poliadição, o tamanho final das cadeias poliméricas é atingido quase que de imediato, logo após o início da reação. Para que as moléculas reajam é necessário utilizar uma espécie ativa, onde o centro reativo pode ser um radical livre, um cátion ou um ânion. A polimerização ocorre, com a propagação das espécies reativas através de adições sucessivas de moléculas de monômero, o crescimento da cadeia polimérica é interrompido quando o centro ativo é desativado.

Resumidamente, segundo Akcelrud (2007) temos que as três etapas que formam a reação de polimerização por crescimento em cadeia são a iniciação, onde ocorre a formação de espécies reativas; a propagação, onde a espécie reativa gerada na iniciação incorpora sucessivamente moléculas monoméricas, formando a cadeia; e a terminação, onde há a desativação do sítio ativo, interrompendo a propagação do polímero.

Ainda segundo Stuart (2002), a polimerização em etapas envolve reações sucessivas entre pares de funções reativas, ou seja, duas moléculas se combinam para formar uma única onde o peso molecular aumenta lentamente ao longo da reação e a taxa de polimerização diminui à medida que o número de grupos funcionais diminui.

Akcelrud (2007) sugere que a polimerização em etapas esta associada à presença de grupos funcionais e consumo rápido de monômeros. Consiste na condensação sucessiva de grupos funcionais reativos existentes nos materiais iniciais com a eliminação de moléculas de baixa massa molar, como por exemplo, a água sendo gerada como subproduto. A polimerização em etapas não apresenta mecanismos de reação, ou seja, sem iniciação, propagação e terminação.

2.1.4 Reciclagem do PET

Segundo Neiman & Motta (1991) os plásticos em geral são altamente poluentes, pois a grande maioria são produzidos a partir do petróleo. Além de tóxicos, possuem um biodegradabilidade muito lenta. O PET leva cerca de 500 anos para que seja degradado completamente na natureza.

O PET é um plástico muito utilizado no mundo atualmente, sua importância é reconhecida devido as suas propriedades, como resistência mecânica e e baixa densidade. Tudo isso, aliado a um produto altamente reciclável, flexível em sua utilização e baixo custo em relação ao vidro, por exemplo, ressalta sua importância no mercado atual, principalmente no de embalagens. De acordo com Weiner (1992) esse tipo de embalagem é 100% reciclável e a sua composição química não libera nenhum produto tóxico.

Chisholm (1994) diz que a embalagem de PET quando reciclada tem inúmeras vantagens sobre outras embalagens do ponto vista da energia consumida, consumo de água, benefícios sociais e principalmente ambiental.

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 como o ácido tereftálico e o etileno glicol, e também reaproveitando esse material. A Reciclagem de PET no Brasil é uma das mais desenvolvidas no mundo e conta com um índice relativamente alto de reciclagem e uma grande gama de aplicações para o material reciclado. A Figura 12 mostra a evolução da reciclagem no Brasil.

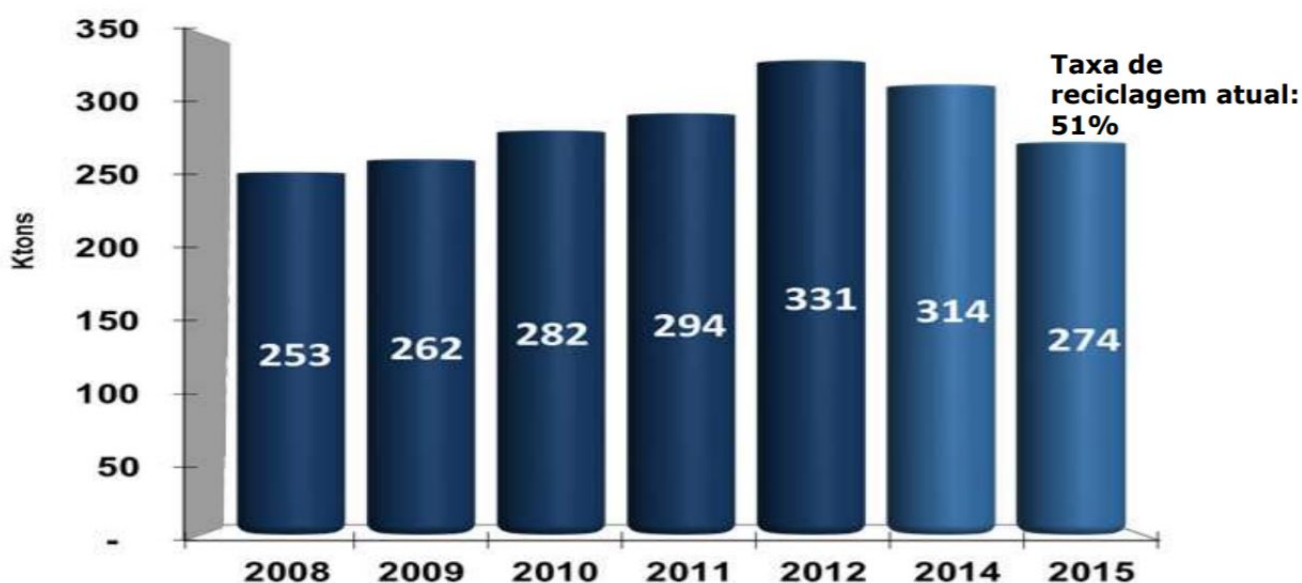


Figura 12 – Evolução da reciclagem do PET no Brasil.

Fonte: Abipet (2016)

O CEMPRE. . . (1992) é uma associação sem fins lucrativos que se dedica a promover a reciclagem do lixo dentro do conceito de gerenciamento integrado. A associação trabalha para conscientizar a sociedade sobre a importância da redução, reutilização e reciclagem de lixo através de publicações, pesquisas e seminários. Os diversos segmentos que compõem o mercado de reciclagem no Brasil, como a coleta, triagem e processamento dos materiais em

indústrias recicladoras geraram um faturamento estimado em 10 bilhões de reais. O cenário é decorrência de investimentos em novas plantas de reciclagem, aumento da capacidade instalada e desenvolvimento e pesquisa de novas tecnologias, além do fomento a novas atitudes de consumo por parte da população.

A fim de facilitar a identificação e a separação de materiais plásticos para o processo de reciclagem existe uma norma regulamentada pela ABNT NBR13230. A simbologia referente a essa norma é apresentada na Figura 13.

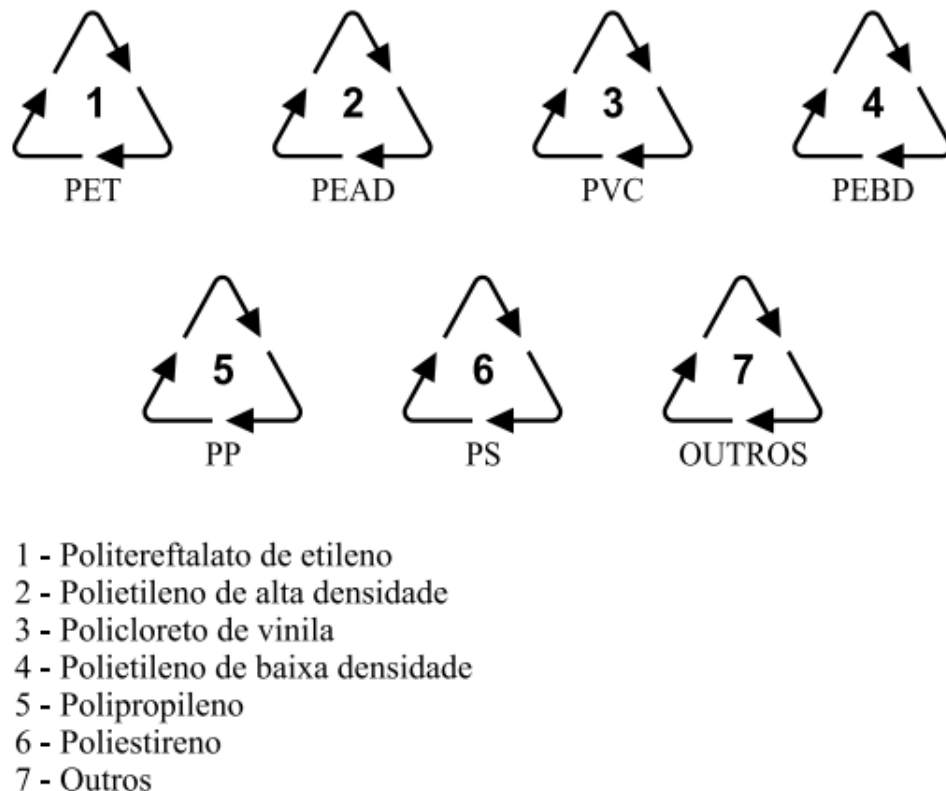


Figura 13 – Simbologia utilizada para a identificação e separação de materiais plásticos em processos de reciclagem.

Fonte: ABNT (2008)

Como cita Forlin & Faria (2002) o sucesso na reciclagem de materiais de embalagem descartados pós-consumo ou retornáveis está estreitamente relacionado com fatores culturais, políticos e sócio-econômicos da população.

2.2 Sinterização

Segundo Silva & Júnior (1998) a sinterização é um processo físico que ao fornecer uma variação de temperatura e pressão ocorre a supressão dos poros entre as partículas

do estado inicial do material em questão, transformando-se em um corpo rígido um tanto denso, adquirindo o material, resistência mecânica. Em outras palavras, a sinterização é o aquecimento do material que aumenta a ligação entre as partículas e modifica-as pela eliminação dos espaços vazios em um corpo compacto de maior resistência mecânica.

A sinterização é usada na fabricação de peças metálicas, cerâmicas e compósitos metal-cerâmica, fazendo parte da técnica denominada metalurgia do pó e cerâmica, que se encarregam exatamente da fabricação de produtos metálicos e cerâmicos a partir dos pós dos constituintes, conferindo as propriedades físicas e mecânicas desejadas.

No processo de sinterização, ocorre a progressiva transição do estado de aglomeração (partículas em simples justaposição) para uma unidade na qual as partículas fundem-se umas com as outras. Existem dois métodos essenciais de fabricação sinterizada: de estado sólido e fase líquida. Como o próprio nome indica, a sinterização de estado sólido é a fusão ou formação de material em pó em um produto sem realmente haver a liquefação do material. Por outro lado, o processo de fase líquida apresenta um passo líquido no processo de aquecimento dos grãos de pó. O método de sinterização fase líquida é geralmente mais fácil e mais rentável do que a sinterização de estado sólido.

O processo de sinterização a partir do pó é relativamente simples como podemos verificar na Figura 14. O primeiro passo é o enchimento da cavidade da matriz com pó do material a ser sinterizado, com o material na matriz abaixa-se o punção superior da matriz até penetrar na cavidade da matriz e entrar em contato com o pó. Ocorre então a aplicação de pressão, de maneira automática ou manual, geralmente por ação hidráulica.

No caso da prensa utilizada nesta pesquisa, a pressão é aplicada de forma manual, com o bombeamento de um cilindro hidráulico. A prensa apresenta um sistema de aquecimento na matriz, a temperatura pode ser controlada por um sistema eletrônico disposto na própria prensa. Após o tempo estipulado para sinterização retira-se o punção superior e eleva-se o punção inferior ate que a amostra seja retirada da matriz.

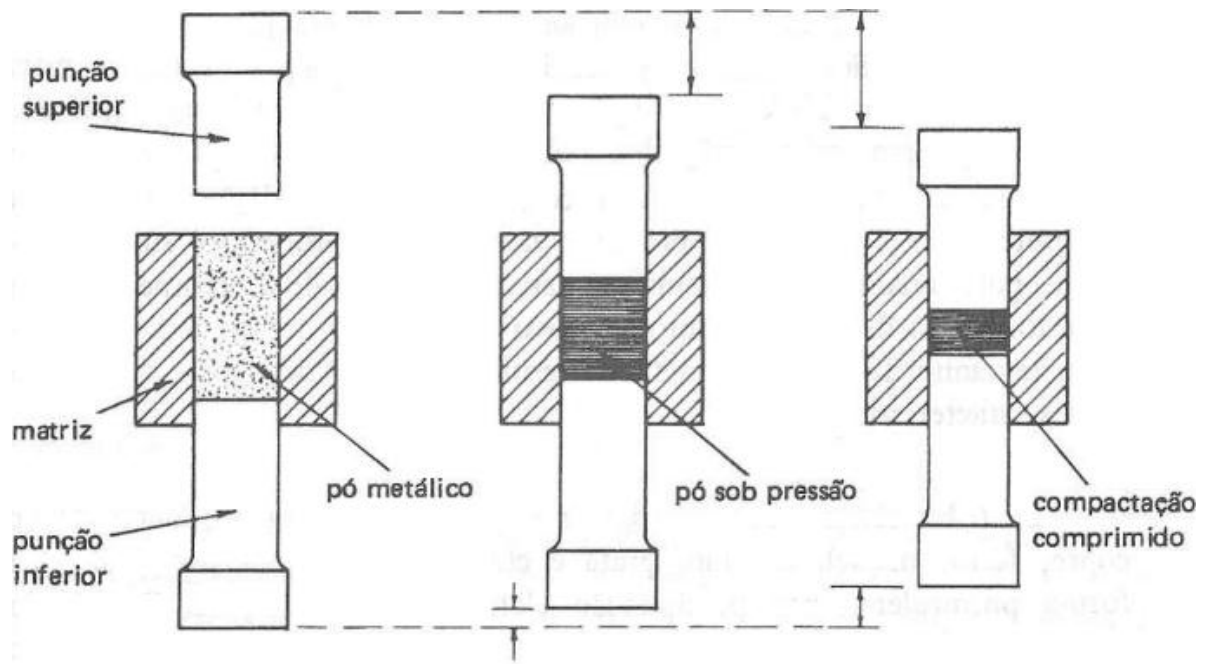


Figura 14 – Processo de prensagem do pó na sinterização.

Fonte: Chiaverini (1986)

2.3 Propriedades Mecânicas e Ensaio

De acordo com Lokensgard (2013) as propriedades mecânicas de um material descrevem como o mesmo se comporta diante da aplicação de cargas, seja elas concentradas em um ponto do material ou distribuídas ao longo do mesmo. Neste trabalho, tem-se um estudo mais aprofundado nas propriedades mecânicas do material quando submetido à força de compressão. Para um melhor entendimento e estudo dessa propriedade, alguns conceitos são de fundamental conhecimento.

De acordo com Hibbeler (2010) a resistência de um material é avaliada de acordo com sua capacidade de suportar uma carga sem que ocorra uma deformação capaz de alterar as características para o qual o material foi projetado ou mesmo sua ruptura. Essa propriedade é uma característica do próprio material e pode ser determinada por métodos experimentais.

Um dos testes mais importantes para o levantamento das propriedades dos materiais é o ensaio de tração ou ensaio de compressão. Através destes ensaios é possível determinar muitas propriedades mecânicas importantes de um material. Estes ensaios visam determinar a relação entre a tensão normal média e a deformação normal média nos mais diversos materiais utilizados na engenharia, como metais, cerâmicas, polímeros e compósitos.

O gráfico mostrado na Figura 15 indica o resultado de um típico ensaio de com-

pressão de um polímero. A partir desses resultados podemos observar dados importantes para a avaliação das propriedades mecânicas do material.

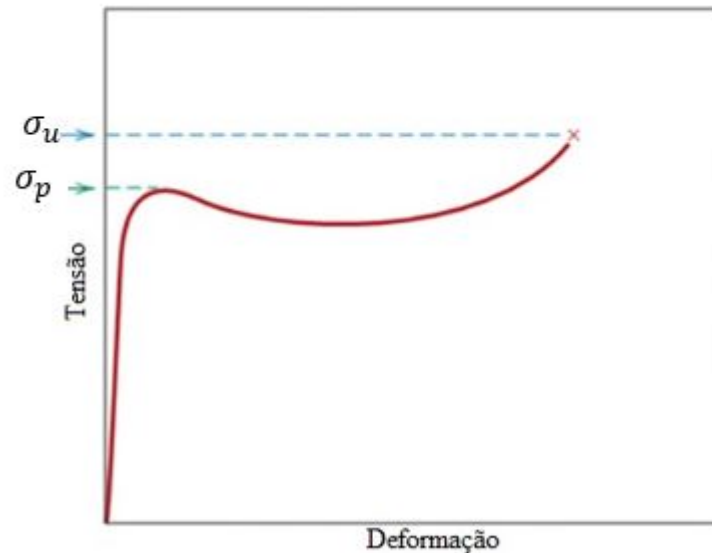


Figura 15 – Curva característica de um ensaio de compressão de materiais poliméricos.

Fonte: Adaptado de Callister (2002)

Onde os pontos identificados no gráfico são:

- σ_u , tensão de ruptura, ou limite de resistência é o ponto onde ocorre a fratura do material ensaiado;
- σ_p limite de escoamento é ponto onde se tem início o escoamento do material, ou seja, a partir deste ponto a deformação do material é irreversível.

A tensão em um material é definida como uma força aplicada sobre uma área. A Formula 2.1 mostra a relação matemática que descreve essa propriedade. A unidade desta grandeza no Sistema Internacional (SI) é dada em Pascal (Pa).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

De acordo com Hibbeler (2010) a deformação (ϵ) de um material é a medida do alongamento ou contração de um segmento de reta por unidade de comprimento, sendo assim, a deformação é uma grandeza adimensional. No ensaio de tração de um material, é interessante a análise do alongamento sofrido por este, já na compressão de um material

o interesse é na contração que este sofre com a aplicação de uma carga, que pode ser determinada pela Equação 2.2.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.2)$$

Onde l representa a deformação do material e l_0 o comprimento original do material. A deformação é uma grande adimensional, que usualmente é dada em porcentagem.

O módulo de elasticidade (E), também conhecido como módulo de Young nas bibliografias específicas de resistência dos materiais, é a razão entre a tensão e a deformação na direção da carga aplicada, avaliando a máxima tensão que o material suporta sem sofrer deformação permanente. Matematicamente, tem-se a Equação 2.3. Pode-se verificar também que E é idêntico à inclinação da porção linear da curva tensão-deformação.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

De acordo com Stuart (2002) a região elástica inicial de muitos polímeros não apresenta comportamento linear, por isso, não é possível determinar o módulo de elasticidade pela inclinação da curva de tensão-deformação como é geralmente feito em metais como o aço. Por isso, para polímeros geralmente é tomado a inclinação da reta da curva de tensão-deformação em uma deformação específica de geralmente 0,2%, assim é possível a determinação do módulo de elasticidade através da curva resultante de um ensaio mecânico, como podemos verificar na Figura 16.

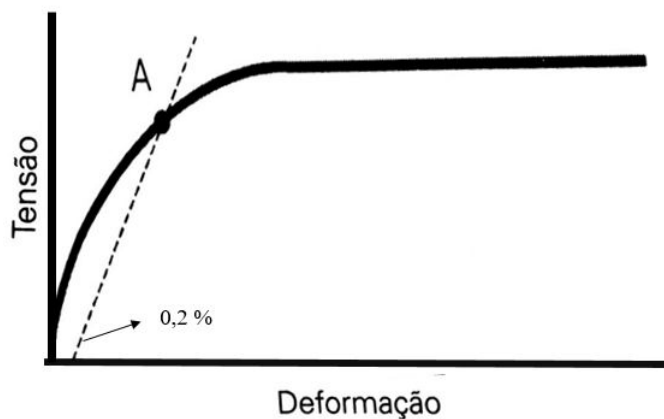


Figura 16 – Curva característica de um ensaio de compressão de materiais poliméricos com offset de 0,2%.

Fonte: Adaptado de Lokensgard (2013).

Ainda segundo Stuart (2002), existem três comportamentos observados nas curvas de tensão-deformação dos polímeros. Os polímeros frágeis, como o representado pela curva A, da Figura 17, deforma elasticamente até que ocorra a fratura do material. O polímero plástico, exemplificado na curva B da mesma figura, apresenta um comportamento parecido com o dos metais, onde apresenta um comportamento inicial elástico e posteriormente a fase de deformação plástica. Na curva C, pode-se verificar um comportamento totalmente elástico, característicos dos elastômeros, que apresentam uma grande deformação elástica com baixa tensão aplicada.

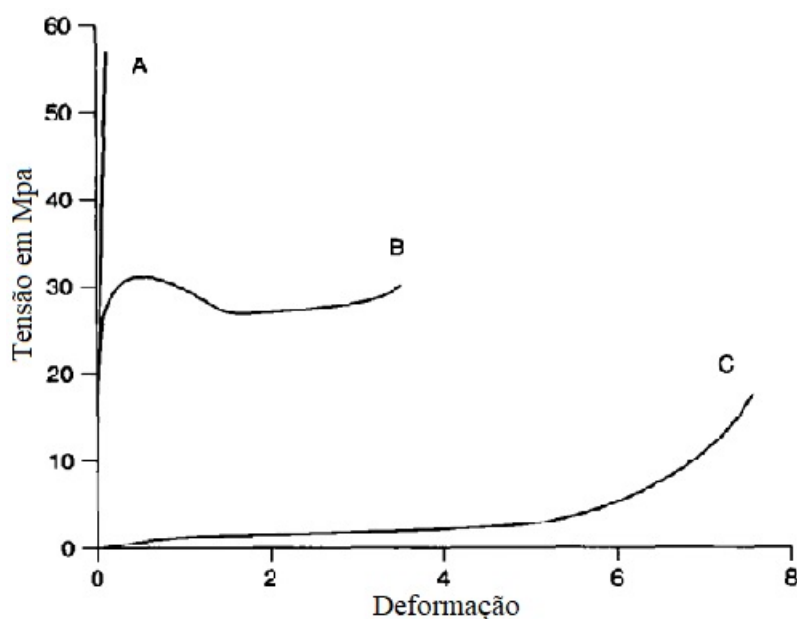


Figura 17 – Curva dos comportamentos dos materiais poliméricos.

Fonte: Stuart (2002)

2.3.1 Resistência à tração por compressão diametral

Este ensaio tem por objetivo avaliar a resistência à tração, por compressão diametral de corpos-de-prova, mediante aplicação de uma carga distribuída em torno da altura do cilindro. Segundo Freitas (2012) é o ensaio mais utilizado para determinar a resistência a tração, por ser simples de ser executado e utilizar o mesmo corpo de prova cilíndrico do ensaio de compressão. É conhecido internacionalmente como Ensaio Brasileiro, pois foi desenvolvido por Lobo Carneiro, em 1943. Este é um ensaio usualmente aplicado ao concreto e suas misturas.

A tensão de compressão gera uma tensão de tração transversal uniforme ao longo do diâmetro, e cada elemento, submetido a um estado duplo de tensões, não romperá por compressão, mas por uma tração.

Este ensaio é normatizado pela ABNT (1994) - NBR7222, a norma diz que a carga deve ser aplicada continuamente até a ruptura do corpo de prova. De acordo com a norma, a resistência à tração por compressão diametral é calculada pela Equação 2.4.

$$f_{t,D} = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot L} \quad (2.4)$$

Onde:

$f_{t,D}$: resistência à tração por compressão diametral,

F : Força máxima aplicada;

L : comprimento do corpo-de-prova;

d : diâmetro do corpo-de-prova.

Segundo Almeida (2002) experimentalmente observa-se que a resistência à tração axial é cerca de 80% a 85% menor que aquela determinada no ensaio de compressão diametral. Assim de modo conservador, temos que a tração é dada pela Equação 2.5.

$$f_{t,D} = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot L} * 0,85 \quad (2.5)$$

3 METODOLOGIA

A Figura 18 apresenta a metodologia seguida neste trabalho.

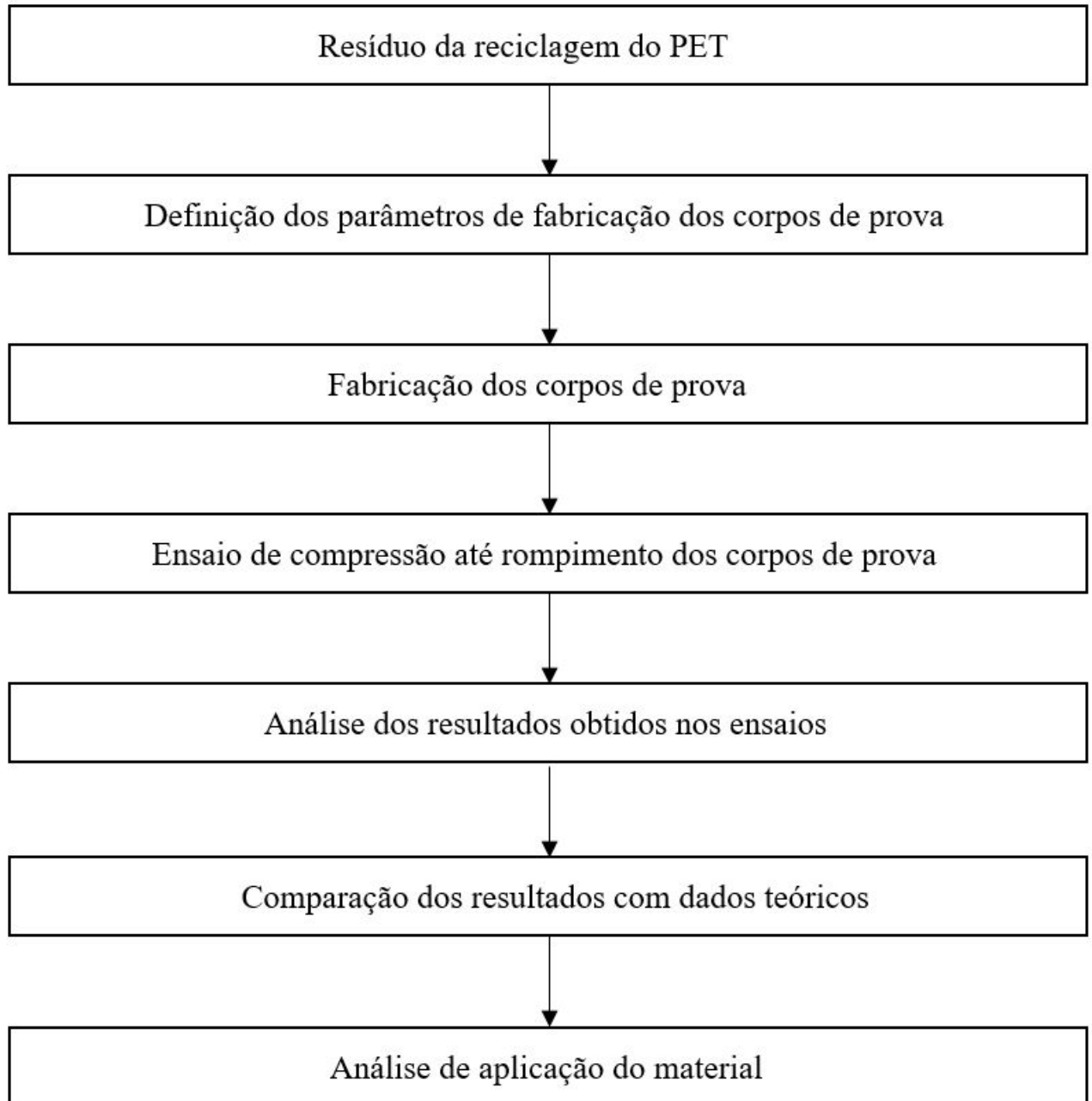


Figura 18 – Fluxograma de metodologia

Fonte: Autor

3.1 Matéria prima

O material utilizado neste trabalho provém das sobras resultantes do processo de reciclagem do PET. Este resíduo não é aproveitado na fabricação de novos produtos, pois apresenta dimensões que impedem sua utilização, é atualmente descartado. Como

citado no trabalho de Ferreira (2016), a AG Plast, empresa que fabrica frascos em PET localizada em Juiz de Fora - Minas Gerais, que em média são gerados 700 kg deste tipo de material por dia que é estocado ou descartado por não ser utilizado. Devido à grande quantidade do rejeito produzido diariamente deste material, indicado na Figura 19, este trabalho propõe determinar uma utilização deste refugo e, conseqüentemente aumentar a parcela total que pode ser reutilizada na reciclagem de garrafas PET.



Figura 19 – Refugo utilizado como matéria prima.

Fonte: Autor

3.1.1 Corpo de Prova

Para a realização deste trabalho foram fabricados diversos corpos de prova com objetivo de determinar os parâmetros ideais de fabricação. As variáveis de fabricação foram definidas com base em procedimentos experimentais como descrito nos itens abaixo. O diâmetro das amostras é fixo e definido pelo diâmetro da cavidade da prensa utilizada na fabricação, e tem diâmetro de 40 milímetros. Ao todo foram fabricadas mais de 50 amostras para determinar os parâmetros de fabricação e para a realização dos ensaios, com objetivo de levantar suas propriedades mecânicas. O modelo de corpo de prova é apresentado na Figura 20.

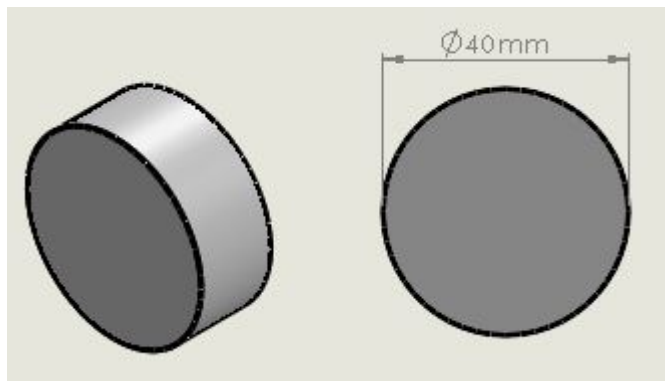


Figura 20 – Corpo de prova

Fonte: Autor

3.2 Parâmetros de fabricação

Os parâmetros de fabricação foram definidos com base em procedimentos experimentais realizados anteriormente, o que permitiu conhecer um ponto de partida e então determinar os parâmetros ótimos para sinterização do material, que foram analisados variando-se um parâmetro e mantendo os outros constantes, a fim de determinar o ponto ideal de cada um dos parâmetros. Primeiramente considerou-se valores extremos, e então a partir destes foi-se analisando os valores ótimos de acordo com as características finais do corpo de prova.

3.2.1 Pressão

Para se obter uma amostra uniforme, unindo os grãos do material no processo de sinterização, a aplicação de uma pressão constante durante toda fabricação é fundamental. Por limitações do equipamento, a pressão máxima que se pode atingir é de 70 kgf/cm^2 , porém manter a amostra sob essa pressão constante é impraticável, pois com o tempo é difícil manter o controle da pressão em uma faixa aceitável, ocorrendo muitos picos de pressão. Diante do problema de controle da pressão a 70 kgf/cm^2 determinou-se experimentalmente uma pressão, de modo que o controle da mesma fosse feito de forma constante durante todo processo.

3.2.2 Temperatura

A faixa de temperatura para o processo de sinterização foi definida de forma experimental, onde foram avaliadas diversas amostras sinterizadas em temperaturas diferentes.

3.2.3 Tempo

O tempo total no processo de sinterização foi também definido com base nos experimentos realizados. A princípio era desejado um tempo, tal que, a amostra ficasse submetida por no mínimo 5 minutos na temperatura máxima, ou seja, em 155°C .

3.2.4 Fabricação

A fabricação das amostras foi realizada no laboratório de metalografia da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, onde se dispunha de todo equipamento, materiais e apoio necessário para a condução deste trabalho.

A sinterização ou, neste caso, a fabricação das amostras, é um processo relativamente simples, onde os grãos de PET são inseridos no molde da prensa e submetidos a uma pressão constante e uma temperatura abaixo da de fusão do material.

A prensa utilizada neste trabalho, indicada na Figura 21, é da marca Fortel, modelo EFD40, que permite a sinterização de materiais no formato cilíndrico com diâmetro constante, conforme pode ser notado na Figura 22, permitindo apenas a variação da altura da peça sinterizada. Este modelo apresenta um sistema automático digital de controle e comando de tempo de embutimento, tempo de refrigeração e controle de temperatura por termopar.



Figura 21 – prensa utilizada para sinterização dos corpos de prova.

Fonte: FORTEL INDÚSTRIA E COMÉRCIO (2017)

O primeiro passo para a fabricação das amostras é realizar a medida da massa do pó de PET que será inserida na prensa (no Item ?? foi definida a quantidade ideal de material a ser utilizado), por isso a necessidade do uso de uma balança de precisão como a mostrada na Figura 31 . Logo após a quantidade de material ser depositada na cavidade da prensa e a mesma ser fechada, a temperatura máxima, o tempo de aquecimento e tempo de resfriamento são inseridos no sistema digital de controle da prensa. Com todos parâmetros inseridos, inicia-se o sistema e ao mesmo tempo movimenta-se a alavanca localizada no lado direito da prensa a fim de aplicar pressão sob o pó, ao longo do processo, é necessário o controle da pressão movimentando-se a alavanca afim de se manter a pressão constante.

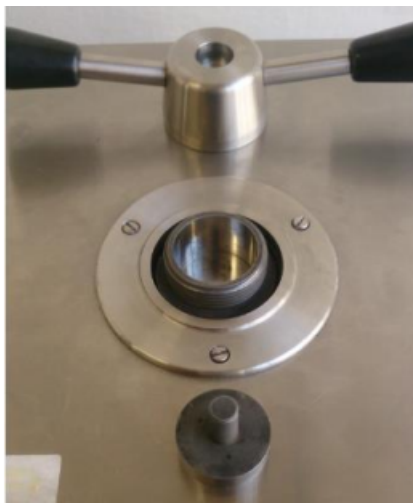


Figura 22 – Molde da máquina onde o material é sinterizado.

Fonte: Autor

Ao fim do tempo de aquecimento, a prensa emite um aviso sonoro, e em seguida inicia-se a refrigeração, que é realizado por água corrente. Ao fim do processo, retira-se a trava e a amostra da cavidade. Por mais simples que o processo pareça, é necessária atenção aos parâmetros inseridos, sempre observando se os mesmos permanecem constantes e uma atenção especial é dada a pressão, que tem que ser corrigida frequentemente.

3.2.5 Variação das características de fabricação

Como citado anteriormente, a única característica que é possível alterar na fabricação das amostras é a altura da mesma, uma vez que o diâmetro é determinado pela prensa. A Tabela 8 lista as diferentes variações de altura das amostras fabricadas. Observou-se que as amostras com altura abaixo de 15 mm, ou referenciado pela massa abaixo de 25 gramas, apresentavam um acabamento superficial de baixa qualidade, provavelmente devido a faixa de temperatura utilizada. Acima de 25 gramas de material, as amostras apresentavam boas características e acabamento superficial. Diante destas observações realizadas, definiu-se

que para os ensaios realizados neste trabalho seria utilizado 30 gramas do pó de PET, o que resulta em uma amostra com altura de 18 milímetros.

3.3 Ensaio mecânico

Após a sinterização das amostras com as características determinadas, foi realizado o ensaio de compressão desses corpos de prova a fim de avaliar uma aplicação deste material. Os ensaios de compressão foram realizados no laboratório do Núcleo de Metalurgia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais campus de Juiz de Fora. O equipamento utilizado para o ensaio foi da empresa Time Group, modelo WDW-200E conforme indicado na Figura 23, que conta com um sistema de aquisição de dados digital, onde são enviados todos os dados de força e deslocamento coletados diretamente para o computador. Os ensaios foram realizados até o rompimento dos corpos de prova, a fim de se realizar o levantamento de suas propriedades mecânicas.



Figura 23 – Equipamento utilizado para realização do ensaio de compressão.

Fonte: Guizhou Sunpoc Tech CO. (2011)

A Tabela 2 mostra os parâmetros que foram inseridos na máquina universal de ensaios. O primeiro passo, foi preparar a mesma para o ensaio de compressão, trocando as garras pelo dispositivo de compressão, que são discos redondos, a fim de garantir a maior área de contato possível com o corpo de prova. Após toda configuração e parâmetros de ensaio alterados para o ensaio desejado, foi realizada a compressão dos corpos de prova.

Tabela 2 – Parâmetros de ensaio.

Parâmetro	Valor
Velocidade	0,084 <i>mm/s</i>
Carga de ensaio	1,38 <i>MPa/s</i>
Temperatura Ambiente	25 °C

Fonte: Autor

A máquina possui um software de aquisição de dados, o qual coleta todas as cargas aplicadas e a deformação sofrida pelo material. A coleta dos dados foi realizada a cada 40 *Newtons* de carga aplicada, até o rompimento do corpo de prova. A Figura 24 mostra a máquina de ensaio universal preparada para o ensaio de compressão, e com o corpo de prova posicionado para início de ensaio.

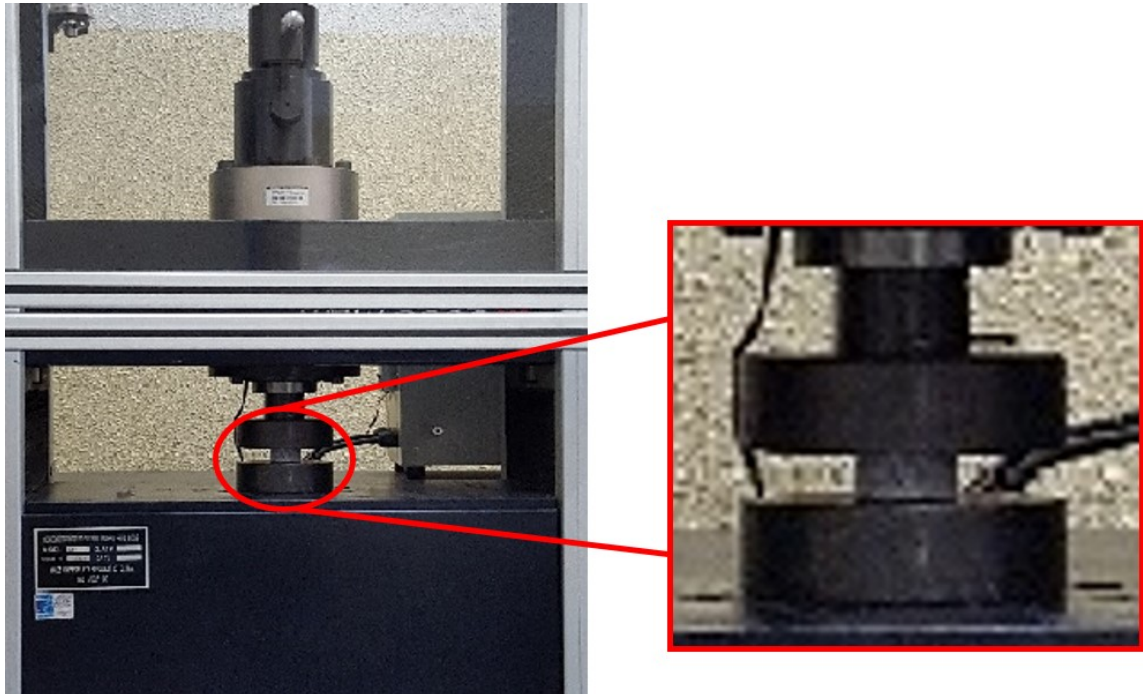


Figura 24 – Corpo de prova posicionado para ser ensaiado.

Fonte: Autor

3.3.1 Resistência à tração por compressão diametral

Foram realizados dois ensaios de compressão diametral, a fim de avaliar sua resistência à tração. Para o ensaio foi utilizado o mesmo equipamento e o mesmo corpo de prova, ou seja, os mesmos parâmetros de sinterização. A Tabela 3 indica os parâmetros que foram utilizados para o ensaio.

Tabela 3 – Parâmetros do ensaio de compressão diametral.

Parâmetro	Valor
Velocidade	0,080 <i>mm/s</i>
Carga de ensaio	0,094 <i>MPa/s</i>
Temperatura Ambiente	25 °C

Fonte: Autor

O ensaio compressão diametral é realizado conforme mostra a Figura 25. Do mesmo modo que no ensaio de compressão axial, a coleta dos dados é feita pelo sistema de aquisição do equipamento.

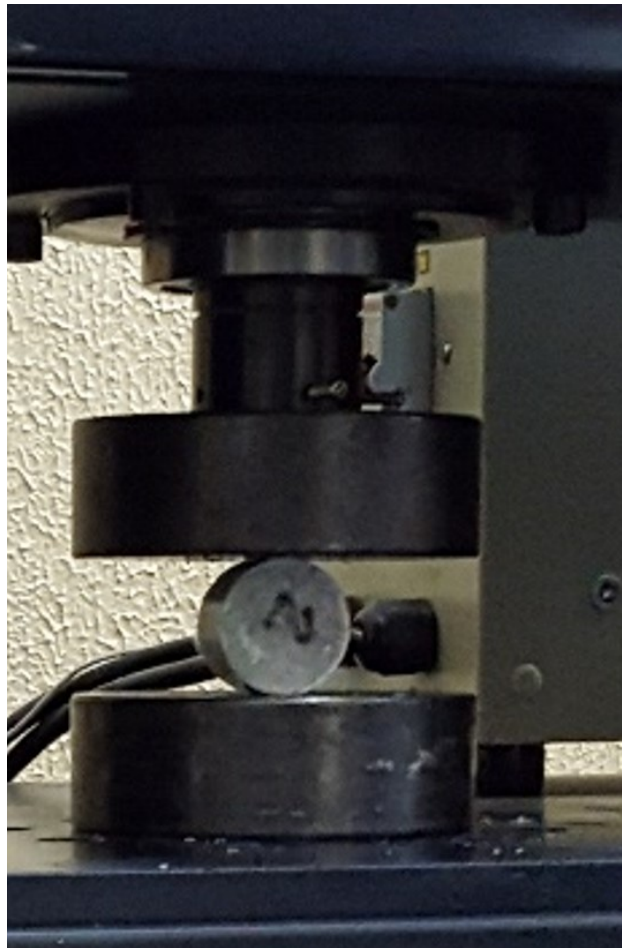


Figura 25 – Corpo de prova posicionado para ensaio de compressão diametral.

Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Parâmetros de fabricação

4.1.1 Pressão

Após diversos ensaios (vide Tab. 4), foi observado que a maior pressão viável de manter constante era 40 kgf/cm^2 , uma vez que a pressão de 20 kgf/cm^2 era muito baixa para a realização do processo. Diante disto, definiu-se para a fabricação de todas as amostras a pressão constante de 40 kgf/cm^2 .

Tabela 4 – Avaliação do controle da pressão no processo de sinterização.

Corpo de Prova	Pressão [kgf/cm^2]	Controle
1	70	Difícil
2	60	Moderado
3	40	Bom
4	20	Bom

Fonte: Autor

4.1.2 Temperatura

A Tabela 5 apresenta as respectivas temperaturas de fabricação e o resultado da análise da qualidade superficial para cada amostra.

A faixa de temperatura para o processo de sinterização foi definida de forma experimental, onde foram avaliadas diversas amostras sinterizadas em temperaturas diferentes. A Tabela 5 apresenta as respectivas temperaturas de fabricação e o resultado da análise da qualidade superficial para cada amostra.

A qualidade superficial ajuda a verificar se os grãos do PET foram bem unidos no processo de sinterização, o que é facilmente verificado em sua qualidade superficial. Nas amostras 1 e 2, verificou-se que devido à baixa temperatura, os grãos não se uniram como esperado, o que resultou em uma superfície extremamente rugosa, ou seja, havia a necessidade do aumento da temperatura. Nas amostras 3 e 4, pode-se verificar uma melhora significativa na união dos grãos de PET, porém ainda se verificava uma rugosidade exagerada. Nas amostras 5 e 6 foram verificados os melhores resultados, onde se teve uma sinterização do pó de PET como esperado, resultando em uma superfície lisa com baixa rugosidade (vide Figura 26). Ao aumentar a temperatura, pode-se verificar nas amostras 7 e 8 que o excesso da temperatura fazia com que parte do material grudasse no molde da prensa, o que resultava em crateras na superfície da amostra, uma vez que parte do material permanecia preso no molde da prensa. Pode-se verificar o efeito da alta

temperatura na Figura 28.

Tabela 5 – Influência da temperatura na qualidade da sinterização.

Corpo de Prova	Temperatura [$^{\circ}C$]	Qualidade Superficial
1	130	Ruim
2	135	Ruim
3	140	Aceitável
4	145	Aceitável
5	150	Boa
6	155	Boa
7	160	Ruim
8	165	Ruim

Fonte: Autor



Figura 26 – Resultado da sinterização na temperatura de $155^{\circ}C$

Fonte: Autor

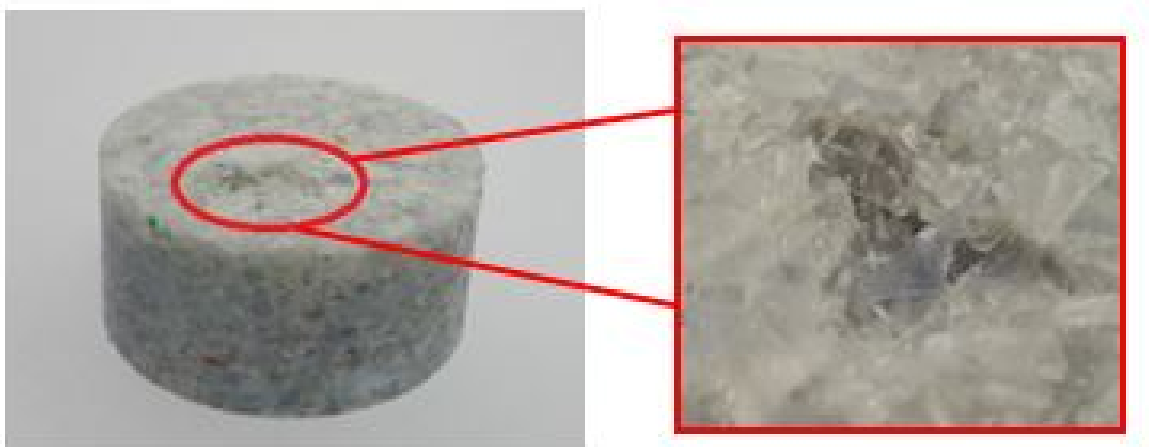


Figura 27 – Resultado da sinterização na temperatura de $160^{\circ}C$

Fonte: Autor

Foram ensaiados 3 corpos de prova a fim de validar a escolha da temperatura máxima de sinterização. Este foi o único parâmetro analisado pois, foi verificado que os outros eram basicamente determinados por limitação da prensa utilizada neste trabalho. A Tabela 6 apresenta os parâmetros de sinterização dos corpos de prova ensaiados.

Tabela 6 – Influência da temperatura na tensão suportada.

Corpo de Prova	Temperatura [°C]	Tempo Aquec.[min]	Tempo Resf.[min]	Altura [mm]
1	140	15	4	18
2	150	15	4	18
3	155	15	4	18

Fonte: Autor

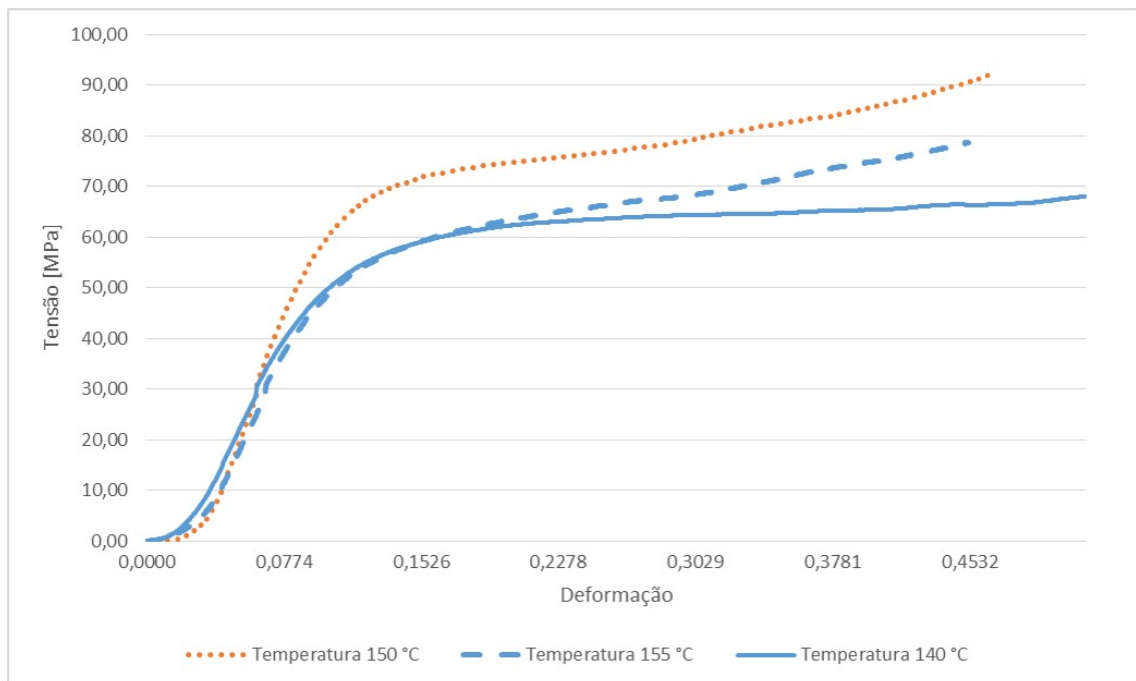


Figura 28 – Curva tensão x deformação para 3 diferentes temperaturas de sinterização.

Fonte: Autor

Portanto ficou definido uma temperatura máxima de 155°C , uma vez que o objetivo era encontrar a maior temperatura para sinterização, sob uma pressão de 40 kgf/cm^2 para a fabricação das amostras, tendo ainda em consideração que o corpo de prova nestas condições apresentaram maior resistência a compressão que as demais.

4.1.3 Tempo

A prensa aumenta a temperatura gradualmente até a máxima determinada. Com isso, observou-se que o tempo mínimo para que a mesma atingisse a temperatura de 155°C era de 10 minutos em média. Com a realização dos ensaios, verificou-se que os

melhores resultados de sinterização se davam com o tempo de aquecimento da amostra de 15 minutos. O tempo de resfriamento não apresentou nenhuma influência no processo de sinterização, apenas tinha influência na hora de se retirar a amostra da prensa. Com isso, determinou-se que o tempo de resfriamento suficiente para se chegar a uma temperatura na qual a amostra pudesse ser retirada da com segurança era de 4 minutos. Pode-se verificar na Tabela 7 as faixas de tempo avaliadas para o aquecimento e resfriamento.

Tabela 7 – Influência do tempo na qualidade da sinterização.

Corpo de Prova	Temperatura [$^{\circ}C$]	Tempo de Aquec.[<i>min</i>]	Tempo de Resfr.[<i>min</i>]
1	155	10	10
2	155	11	8
3	155	12	6
4	155	13	4
5	155	14	4
6	155	15	4
7	155	16	4

Fonte: Autor

A Figura 29 apresenta a curva levantada experimentalmente do tempo de aquecimento da prensa utilizada. Esta curva foi de grande importância para a determinação deste parâmetro, pois pode-se verificar o tempo que a mesma leva para se estabilizar na temperatura desejada e, ainda, ver que o tempo de resfriamento de 4 minutos é o suficiente para que a temperatura chega a temperatura ambiente, podendo retirar a amostra sem risco de danificar a amostra e até mesmo sem risco de queimadura.

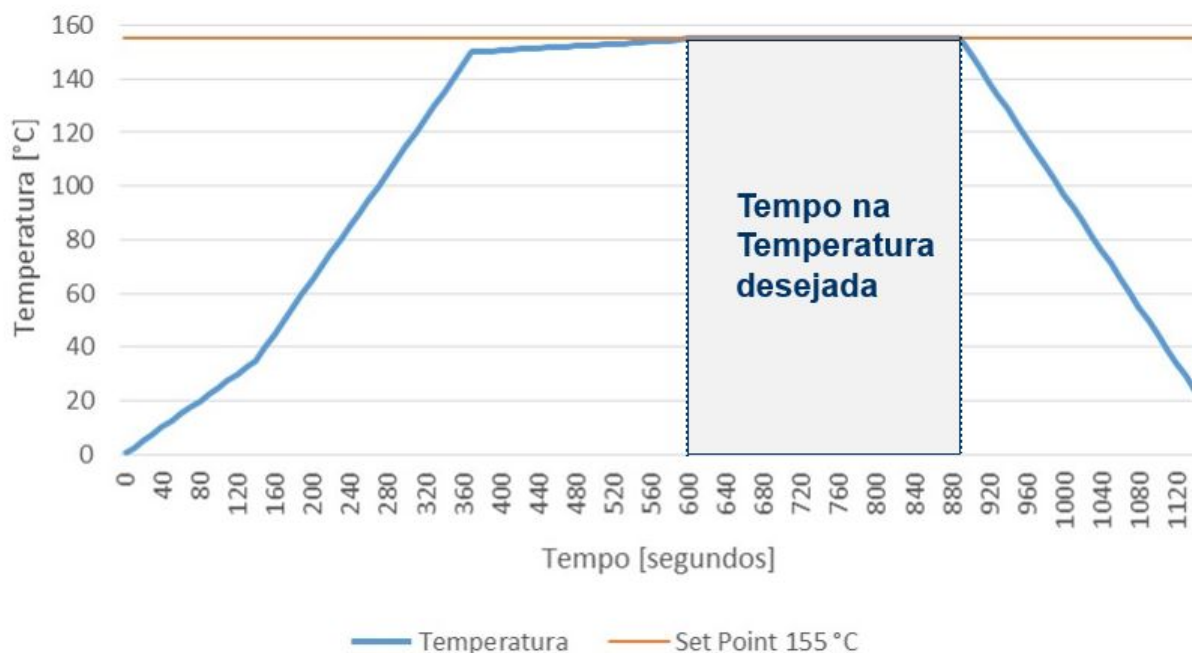


Figura 29 – Curva de aquecimento da prensa.

Fonte: Autor

Para o controle da temperatura e tempo do processo de sinterização, a prensa conta com um sistema eletrônico de controle da marca Coel, conforme mostrado na Figura 30. Este controlador permite a definição da temperatura máxima de sinterização, onde uma vez alcançada a temperatura desejada o sistema de aquecimento liga e desliga de forma a manter essa temperatura constante. O controlador permite ainda a definição do tempo de aquecimento e resfriamento do processo.



Figura 30 – Controlador de Tempo e Temperatura Microprocessado utilizado na prensa.

Fonte: (Coel, 2017)

4.1.4 Variação das características de fabricação

Para a medição da massa de PET a ser utilizado na sinterização, foi utilizado uma balança de precisão conforme indicada na Figura 31, para se ter uma maior precisão na quantidade de matéria prima utilizada e uma melhor avaliação do corpo de prova final, já sinterizado.



Figura 31 – Balança de precisão utilizada para avaliação da massa dos corpos de prova.

Fonte: BEL Equipamentos Analíticos LTDA (2017)

Tabela 8 – Altura resultante de acordo com a massa de PET utilizada.

Corpo de Prova	Massa do material [g]	Altura [mm]
1	35	21
2	30	18
3	25	15
4	20	12
5	15	9

Fonte: Autor

A Figura 32 mostra a altura obtida do corpo de prova, de acordo com a massa de matéria prima utilizada na sinterização. Pode-se verificar que foi realizado o ensaio desde a altura máxima permitida pela prensa até a altura mínima de sinterização possível, permitindo assim definir qual apresentaria melhores resultados para os ensaios.



Figura 32 – Amostras fabricadas para avaliação da altura ideal.

Fonte: Autor

Após definido os parâmetros de sinterização dos corpos de prova, os quais são mostrados na Tabela 9, foram fabricados cerca de 25 amostras e selecionadas as 20 melhores para serem ensaiadas até o rompimento. A Figura 33 exibe o corpo de prova pronto, logo após sua sinterização.

Tabela 9 – Parâmetros definidos para sinterização.

Parâmetro	Valor
Pressão	40 kgf/cm^2
Temperatura	155 °C
Tempo de aquecimento	15 minutos
Tempo de resfriamento	4 minutos
Diâmetro	40 mm
Altura	18 mm

Fonte: Autor

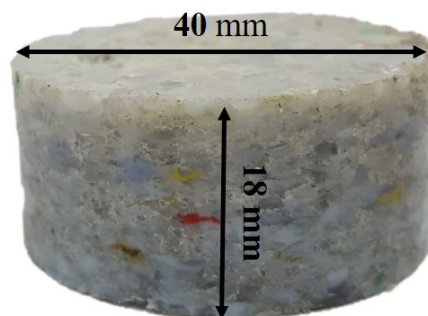


Figura 33 – Corpo de prova sinterizado com os parâmetros definidos.

Fonte: Autor

4.2 Resultados ensaio de compressão axial

O ensaio de compressão permite analisar as propriedades do material ensaiado facilmente através da curva tensão-deformação gerada. O equipamento utilizado fornece a força aplicada no material e deslocamento sofrido. De posse destes dados e com auxílio software Excel, foi possível calcular todas propriedades de interesse e ainda traçar o gráfico tensão-deformação do corpo de prova. A Figura 34 mostra como foram inseridos no Excel os dados, e com a inserção de formulas o software realizou todos os cálculos necessários.

Diametro	Área	Altura		$E_{máx}$	Valor Resultante dos Cálculos	Mpa
d [mm]	A [mm ²]	h [mm]		Tensão Escoamento		Mpa
40	1256.64	18		Tensão Ruptura		Mpa
		$\varepsilon = \delta / L_0$	$\sigma = E \cdot \varepsilon$	$\sigma = F / A$		
Deslocamento	Força	Deformação	Elasticidade	Tensão		
δ [mm]	F [N]	ε	E	σ [MPa]		
Dado do Ensaio	Dado do Ensaio	Valor Calculado	Valor Calculado	Valor Calculado		

Figura 34 – Planilha utilizada para tratamento dos dados do ensaio de compressão.

Fonte: Resultados da análise

Como cada ensaio realizado gerava uma grande quantidade de informações, uma média de mais de 1000 pontos de coleta eram efetuados por ensaio, foi necessário desenvolver a tabela no Excel para auxiliar no tratamento de toda essa informação. A planilha facilitou bastante a análise dos resultados, e ainda facilitou a realização dos cálculos das grandezas necessárias, como tensão, área, módulo de elasticidade e deformação. O software usado também permitiu facilmente encontrar os pontos máximos de tensão e a tensão de escoamento.

Os gráficos foram também gerados com base nos dados tratados na tabela criada, o que facilitou muito, uma vez que o número de amostras era consideravelmente grande .

A Figura 35 mostra a curva tensão-deformação de um dos corpos de prova ensaiado. Todos eles apresentam o mesmo comportamento, que era exatamente o esperado, de um material dúctil.

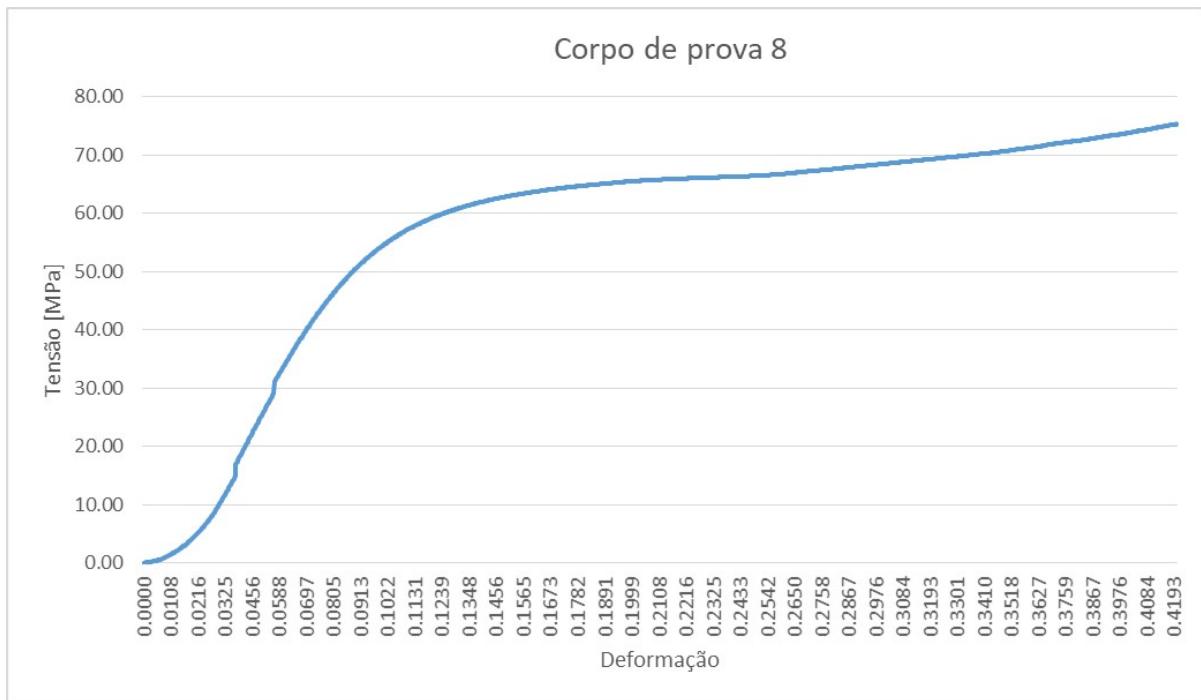


Figura 35 – Curva tensão x deformação de um dos corpos de prova ensaiados.

Fonte: Resultados da análise

O ensaio de compressão é um ensaio destrutivo, ou seja, após a realização deste o material é literalmente esmagado, como podemos verificar na Figura 36.



Figura 36 – Corpo de prova após o ensaio de compressão.

Fonte: Resultados da análise

A Tabela 10 mostra o resultado do ensaio dos 20 corpos de prova analisados. Cada ensaio foi tratado na planilha do Excel, a fim de se determinar as propriedades mecânicas deste material.

Tabela 10 – Resultado dos ensaios de compressão.

Corpo de Prova	Módulo Young [MPa]	$\sigma_{escoamento}$ [MPa]	$\sigma_{ruptura}$ [MPa]
1	459,30	57,36	79,48
2	550,62	59,71	100,68
3	449,18	42,21	80,53
4	362,23	55,00	88,81
5	481,06	62,48	81,39
6	348,96	69,81	89,51
7	678,46	54,65	94,70
8	576,20	43,02	75,38
9	476,15	42,26	87,76
10	497,22	55,75	91,00
11	631,65	54,67	92,50
12	514,88	42,38	133,88
13	518,56	54,96	72,61
14	516,00	42,91	78,62
15	541,76	40,68	68,04
16	629,56	45,98	77,28
17	436,28	57,54	79,07
18	453,87	44,97	74,85
19	532,36	61,21	79,89
20	363,33	60,87	78,25

Fonte: Resultados da análise

Alguns dos corpos de prova, como o 2, 7 e 12 apresentaram uma tensão de ruptura mais elevada que os demais, pois estes permaneceram sendo ensaiados por um determinado tempo mesmo após a ruptura do corpo de prova. A Tabela 11 apresenta o valor médio encontrado das propriedades mecânicas do refugo de PET sinterizado.

Tabela 11 – Propriedades mecânicas levantadas para o pó de PET sinterizado a 155°C.

Material	Módulo Young[MPa]	$\sigma_{escoamento}$ [MPa]	$\sigma_{ruptura}$ [MPa]
Refugo de PET	508,12 ± 88,78	51,86 ± 8,62	87,66 ± 14,09

Fonte: Resultados da análise

Um comportamento interessante observado nos ensaios, foi que mesmo após a ruptura do corpo de prova, a tensão se mantinha crescente. Podemos verificar na Figura 37 um corpo de prova que permaneceu sob a ação da força de compressão mesmo após o rompimento do corpo, atingindo valores significativamente altos de tensão. A grande maioria dos corpos de prova não foram ensaiados dessa forma, pois o intuito era levantar suas propriedades mecânicas máximas, ou seja, até a ruptura do material, que são parâmetros importantes para se determinar a aplicação de um material em um produto.

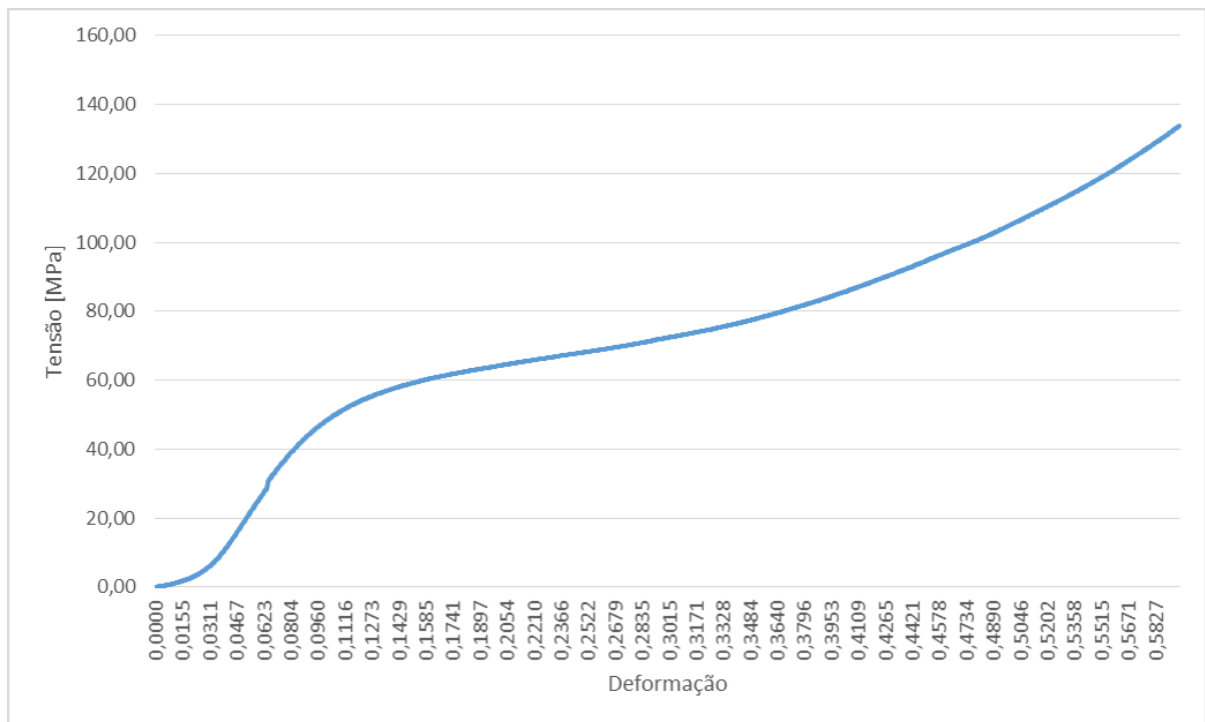


Figura 37 – Curva tensão x deformação de um corpo de prova que permaneceu sob ação de uma força mesmo após o rompimento.

Fonte: Resultados da análise

4.3 Resultados ensaio de compressão diametral

Do mesmo modo que no ensaio de compressão axial, os dados gerados pelo ensaio foram analisados. Para este ensaio foram considerados apenas 2 corpos de prova. A Tabela 12 mostra o resultado do ensaio dos 2 corpos de prova analisados.

Tabela 12 – Resultado da análise do ensaio de compressão diametral.

Corpo de Prova	Módulo Young[MPa]	Resistência à tração[MPa]
1	47,98	2,13
2	52,69	2,34

Fonte: Resultados da análise

A Figura 38 mostra a curva tensão-deformação deste ensaio. A mesma figura, exibe a curva dos dois corpos de prova ensaiados. Pode-se verificar que a resistência à tração deste material é bastante baixa, o que era esperado.

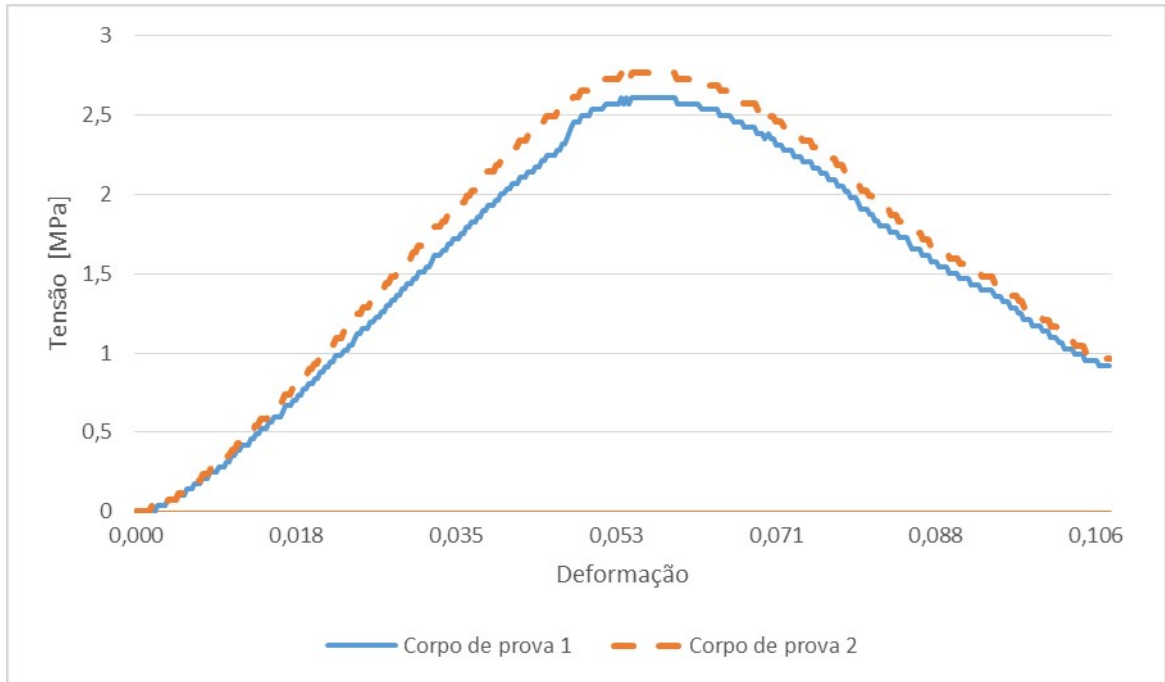


Figura 38 – Curva tensão x deformação referente ao ensaio de compressão diametral.

Fonte: Resultados da análise

A Tabela 13 apresenta o valor médio encontrado das propriedades mecânicas do refugo de PET sinterizado para o ensaio de compressão diametral.

Tabela 13 – Resistência à tração levantadas para o pó de PET sinterizado a 155°C.

Material	Módulo Young[MPa]	Resistência à tração[MPa]
Refugo de PET	50,33 ± 3,33	2,24 ± 0,15

Fonte: Resultados da análise

Pode-se verificar na Figura 39 a diferença entre o resultado final do corpo de prova quando comparado com o do ensaio de compressão axial apresentado na Figura 38: o comportamento deste material à tração, é frágil; já em relação a compressão, o mesmo apresenta grande resistência.



Figura 39 – Corpo de prova após o ensaio de compressão diametral.

Fonte: Resultados da análise

Os resultados obtidos nos ensaios foram satisfatórios e condizentes com o esperado, de acordo com o comportamento deste material. As variações apresentadas são comuns em ensaios práticos, principalmente quando se trata de materiais sinterizados. A resistência a compressão do refugo de PET sinterizado como verifica-se no resultado dos ensaios, foi elevada. Nas referências bibliográficas encontram-se apenas dados referente ao PET, como na Tabela 1, e não encontram-se dados para o refugo de PET sinterizado para comparação.

O ensaio de compressão diametral, é regido pela norma ABNT (1994) - NBR7222, e por limitações no processo de sinterização, não era possível atingir as dimensões exigidas pela norma. Por esse motivo este ensaio foi realizado com apenas dois corpos de prova, a fim de analisar seu comportamento e verificar a tensão de tração do material.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O principal intuito do levantamento das propriedades mecânicas deste refugo de PET é justamente verificar um destino final para esse material que atualmente é descartado, ou seja, verificar um aplicação do material. Inicialmente foi proposto o uso deste material na fabricação de divisórias de ambiente e tampo de mesas para escritório.

A norma ABNT NBR 11680:1990 (Divisórias leves internas moduladas - Determinação da resistência à compressão excêntrica - Método de ensaio) que determinava os métodos de ensaio e valores de referência para a resistência a compressão de divisórias de ambiente, foi cancelada em 20/07/2015. Com isso, foram comparados os resultados

obtidos com resultados de materiais comumente utilizados como divisórias de ambiente, como o gesso e a formica.

O gesso, segundo Pinho (2003), utilizado na confecção de divisórias, possui uma resistência a compressão superior a 5 MPa, e em sua pesquisa a autora com variações na composição do gesso, chegou a um valor de 8,4 MPa. Portanto, comparando com o valor obtido com o refugo de PET sinterizado, cujo valor de resistência a compressão na pior das amostras é superior a 5 vezes a resistência à compressão do gesso.

A formica é largamente utilizado em móveis e construção para prateleiras, divisórias convencionais ou sanitárias, estandes e entre outros. De acordo com a FORMICA® (2017) a resistência a compressão deste material é de 23,54 MPa. Mais uma vez verifica-se que em relação a resistência à compressão, o PET sinterizado apresenta valor superior.

Verificando a aplicação deste material em tampos de mesas, pode-se comparar os valores de resistência a compressão do PET sinterizado com o material usualmente usado na confecção de tampo de mesas, a madeira compensada. De acordo com a pesquisa realizada por Stamato & Junior (2002), onde foram analisadas diversas chapas de madeira compensada, tem-se que a maior resistência a compressão se deu com o compensado Formplus de 18 mm obtendo o valor de 29,6 MPa. Ao comparar com o resultado obtido do PET sinterizado, observa-se que o valor obtido é bastante superior ao da madeira.

Assim, como na análise das divisórias, a resistência a compressão é apenas uma das propriedades analisadas. Para o caso de tampo de mesas, um outro teste muito importante de se realizar na seleção de um material é a resistência a flexão e dureza.

5 CONCLUSÃO

Para a realização deste trabalho foram necessárias primeiramente determinar os parâmetros ideais para a sinterização do material, que foram determinados de modo experimental, sempre focando em se obter o melhor resultado possível com o equipamento disponível. Com os ensaios foi verificado que parâmetros selecionados atenderam o esperado. Acredita-se que pode haver um aumento da resistência a compressão com o aumento da temperatura e pressão de sinterização, o que para ser confirmado necessitaria de uma prensa que permitisse uma maior abrangência nestes parâmetros.

Foram levantadas algumas das propriedades mecânicas do refugo de PET sinterizado, tal como a resistência a compressão, modulo de elasticidade e uma estimativa da resistência a tração. Os ensaios realizados foram condizentes com as bibliografias consultadas e melhores que o esperado, uma vez que surpreendeu quanto sua capacidade de resistir a compressão, apresentando uma tensão de escoamento de $51,86 \pm 8,62$ MPa.

Verificou-se que no quesito de resistência a compressão, este material sinterizado pode facilmente substituir alguns dos materiais comumente utilizados na fabricação de divisórias de ambiente, substituindo materiais como gesso que apresenta uma resistência a compressão de 8,4 MPa, e a formica que apresenta uma resistência de compressão de 23,54 MPa, ambos os materiais apresentam a resistência a compressão bastante inferior a do PET sinterizado obtido. Porém, este trabalho realizou a análise de aplicação deste material considerando apenas a resistência a compressão. Algumas outras propriedades devem ser analisadas, como inflamabilidade, absorção de líquidos e condutibilidade térmica.

A aplicação do PET sinterizado como matéria prima para tampos de mesa se mostrou bastante viável, sendo que este possui uma resistência a compressão bastante superior a do material que é geralmente usado para esta aplicação, a madeira compensada apresenta uma resistência a compressão de 29,6 MPa, sendo assim o material estudado apresenta um melhor resultado. Porém, assim como nas divisórias de ambiente outras propriedades, como a resistência a flexão e dureza, devem ser levadas em consideração para o veredito final da aplicação do refugo de PET sinterizado como material.

Em geral, este trabalho cumpriu com seu objetivo, que era determinar um destino ao refugo de PET. Ao sinterizar esse material, verificou-se que o mesmo apresenta grande resistência a compressão, o que abre uma gama de aplicações além das analisadas neste trabalho.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Há muito ainda a ser explorado acerca das propriedades do PET sinterizado e acerca dos parâmetros de sinterização. Como sugestão para futuros trabalhos, foi verificado que seria importante o levantamento das outras propriedades mecânicas, como dureza, condutibilidade térmica, resistência a flexão e o teste de absorção de água. Tais parâmetros são de extrema importância para se definir um destino para o refugo de PET da maneira mais eficiente e economicamente atrativa.

Seria interessante também a avaliação do aumento da pressão e temperatura no processo de sinterização do refugo de PET, o que pode levar melhores propriedades e aplicações mais abrangentes.

Outro potencial de pesquisa na área é a avaliação de misturas do refugo de PET com outros materiais, como por exemplo concreto.

REFERÊNCIAS

- ABIPET. **Censo da Reciclagem de PET no Brasil**. 2016. Acessado em: 08/06/2017. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br>>.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR7222 Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. [S.l.]: Rio de Janeiro, 1994. 3 p.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR13230 Embalagens e acondicionamento plásticos recicláveis - Identificação e simbologia**. [S.l.]: Rio de Janeiro, 2008. 8 p.
- AKCELRUD, Leni. **Fundamentos da ciência dos polímeros**. [S.l.]: Editora Manole Ltda, 2007.
- ALMEIDA, L. C. **Concreto**. Universidade Estadual de Campinas, 2002. Acessado em: 07/08/2017. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Concreto.pdf>>.
- BEL Equipamentos Analíticos LTDA. **BALANÇA DE PRECISÃO M**. 2017. Acessado em: 05/10/2017. Disponível em: <<http://www.belequipamentos.com.br/capa.asp?pi=catalogo>>.
- CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª edição. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- Canevarolo Jr., Sebastião V. **Ciência dos Polímeros**. 2ª edição. ed. [S.l.]: Editora Artliber, 2006.
- CAROTHERS, Wallace H. Studies on polymerization and ring formation i: An introduction to the general theory of condensation polymers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 51, p. 1637–1659, 1929.
- CEMPRE, Compromisso Empresarial para Reciclagem. 1992. Acessado em: 01/09/2017. Disponível em: <<http://cempre.org.br>>.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica Vol. 1**. 2ª edição. ed. [S.l.]: Mcgraw-Hill, 1986.
- CHISHOLM, Anne. **Processos de reciclagem: Uma estratégia para sobrevivência**. Rio de Janeiro: Zahar, 1994.
- COEL. **Controlador de Tempo Cíclico e Temperatura Microprocessado**. 2017. Acessado em: 01/10/2017. Disponível em: <<http://sousacouto.com.br/coel/products/view/92.html>>.
- FERREIRA, Wesley. **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 em Engenharia Mecânica — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2016.
- FLORY, Paul J. **Principles of Polymer Chemistry**. [S.l.]: New York: Cornell University Press, 1953.

FORLIN, Flávio J.; FARIA, José de Assis F. Considerações sobre a reciclagem de embalagens plásticas. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 12, p. 1–10, 2002.

FORMICA®. **Datasheet Formica® TS Estrutural (PDF)**. 2017. Acessado em: 01/10/2017. Disponível em: <<http://www.formica.com.br/produtos/datasheets-/Estrutural.pdf>>.

FORTEL INDÚSTRIA E COMÉRCIO. **Prensa Embutidora Metalográfica Inox 40mm**. 2017. Acessado em: 09/10/2017. Disponível em: <<https://fortel.com.br/produtos/detalhes-produtos/prensa-embutidora-metalografica-inox-40-mm>>.

FREITAS, Renan Perreira de. **Controle de qualidade em concreto endurecido: Ensaios Mecânicos**. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012.

Guizhou Sunpoc Tech CO. **WDW-200E - Máquina de ensaios universal**. 2011. Acessado em: 05/09/2017. Disponível em: <<http://www.sunpoc.com/En/ProductView-.Asp?ID=142>>.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7ª edição. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2010.

KIPARISSIDES, C. Polymerization reactor modeling: A review of recent developments and future directions. *Elsevier*, v. 51, p. 2548–2559, 1996.

KOTZ, John C.; TREICHEL, Paul M. **Química e Reações Químicas - Volume II**. 3ª edição. ed. [S.l.]: Cengage Learning, 1998.

LOKENS GARD, Erik. **Plásticos Industriais Teoria e Aplicações**. 5ª edição. ed. [S.l.]: São Paulo - Cengage Learning, 2013.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. **Introdução a Polímeros**. 2ª edição. ed. [S.l.]: São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

NEIMAN, Zysman; MOTTA, Cristiane Pires da. O mundo que se tem e o mundo que se quer. São Paulo: Atual, 1991.

PINHO, Renata Dourado. **Avaliação das propriedades mecânicas dos Pré-moldados de gesso alterados Microestruturalmente e estudo das causas Do amarelamento pós-pintura**. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) — Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

POPPE, Philip. **Módulo de elasticidade versus Temperatura**. 2007. Acessado em: 09/09/2017. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Rubber_plateau.svg>.

RABELLO, M. S.; WELLEN, R. M. R. Estudo da cristalização a frio do poli (tereftalato de etileno) (pet) para produção de embalagens. <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/71/94>, v. 3.2, 2008. Disponível em: <<http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/71/94>>.

SILVA, Angelus Giuseppe Pereira da; JÚNIOR, Clodomiro Alves. A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização. *Cerâmica*, scielo, v. 44, p. 225 – 232, 12 1998.

Silva Filho, Jorge Ferreira da. **Estudo de parâmetros de síntese do gel termossensível Poli(N-isopropilacrilamida)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

STAMATO, Guilherme Corrêa; JUNIOR, Carlito Calil. **RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA COMPENSADA**. 2002. Acessado em: 01/09/2017. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova_versao/pdf/cee18_49.pdf>.

STUART, Barbara H. **Polymer Analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

TIMMONS, Ana Barros. **POLÍMEROS - Conceitos Gerais**. 2006. Acessado em: 04/07/2017. Disponível em: <<http://www2.dq.ua.pt/qne/doc/polimeros.pdf>>.

WEINAR, Jonathan. **Os próximos cem anos: Em nossas mãos o destino da terra**. Rio de Janeiro: Campus, 1992.

YAN, Chunze; SHI, Yusheng; HAO, Liang. Investigation into the differences in the selective laser sintering between amorphous and semi-crystalline polymers. v. 26, 09 2011.