UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DANIEL MARTINS
LEONARDO SILVA NASCIMENTO

ESTUDO DE MATRIZES POLIMÉRICAS FEITAS POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

DANIEL MARTINS
LEONARDO SILVA NASCIMENTO

ESTUDO DE MATRIZES POLIMÉRICAS FEITAS POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Mecânica
Curso de Engenharia Mecânica

TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DE MATRIZES POLIMÉRICAS FEITAS POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA

POR

DANIEL MARTINS

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado às 08:00hs do dia 22 de junho de 2017, como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO MECÂNICO, linha de pesquisa – materiais e projetos, no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho _____.

_____
Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami - Presidente (UTFPR)

_____
Prof. Me. Émillyn F. Trevisani Olívio
(UTFPR)

_____
Prof. Dr. Paulo Cezar Tulio

"A Folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação de Curso."

Dedico este trabalho à minha família e amigos, em especial aos meus pais, pelos seus ensinamentos, que contribuíram para minha formação.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, que sempre, me apoiaram nas decisões e me mostraram o caminho para crescer, não apenas como pessoa, mas também profissionalmente.

Minha namorada por me apoiar por todo este tempo, mesmo distante, sempre esteve ao meu lado ajudando nas dificuldades.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por disponibilizar toda o aparato necessário, para que tudo isto fosse possível, desde os professores até a estrutura universitária.

Aos amigos que sempre estavam ao meu lado, nas notas ruins e nas boas, que me faziam se esforçar cada vez mais, em especial o grupo SOF que sempre estavam preparados para um coffee break.

Aos amigos da Mansão que me proporcionaram momentos de descontração no encontro mensal de bolinho dota.

E aqueles que não sabemos o nome, mas sempre estavam compartilhando o conhecimento nos momentos oportunos.

Enfim, a todos que de alguma forma tivemos contato durante esse período de aprendizado e diversão.

“Se cheguei até aqui, foi porque me apoiei no ombro de gigantes. ”
Sir Isaac Newton.

RESUMO

MARTINS, Daniel, NASCIMENTO, S. Leonardo. **Estudo de Matrizes Poliméricas Feitas por Prototipagem Rápida**. 2017. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Os materiais poliméricos podem ser largamente utilizados na engenharia, que devido a suas características possuem algumas vantagens, como o custo e o baixo gasto energético para ser moldado em diferentes formas, quando comparado aos metais. Utilizando-se de métodos recentes, como a impressão 3D, facilitaram ainda mais a utilização de polímeros na indústria. Alguns desses polímeros possuem uma alta resistência à deformação térmica, comparados a outros polímeros, desta forma o presente trabalho de conclusão de curso, tem como objetivo, verificar a viabilidade do uso desses polímeros e dessa tecnologia para a rápida prototipagem de moldes de injeção. Tem com o objetivo específico, a comparação entre diferentes polímeros, que podem ser utilizados em matrizes para a injeção de plástico.

Palavras-chave: Matrizes Poliméricas. Injeção de Polímeros. Prototipagem Rápida. Impressão 3D.

ABSTRACT

MARTINS, Daniel, NASCIMENTO, S. Leonardo. **Study of polymer molds made by rapid prototyping.** 2017. 47 f. End-of-Course work (Bachelor of Mechanical Engineering) – Mechanical Engineering. Federal Technological University of Parana. Cornélio Procópio, 2017.

Polymeric materials can be widely used in engineering because of their characteristics and advantages, such as cost and low energy consumption to be shaped into different ways, when compared to metals. Using recent methods, like 3D printing, they facilitated further use of polymers in the industry. Some of these polymers have a high resistance to thermal deformation, compared to other polymers, this paper, aims verify the viability of use of these materials and the technology for rapid prototyping in injection molds, and with the main objective of comparison between different polymers that can be used in molds for plastic injection.

Keywords: Polymers Mold. Polymer Injection. Rapid Prototyping. Plastic Injection. 3D Printing.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros ABS 31
Tabela 2 - Parâmetros PLA 32
Tabela 3 - Parâmetros Digital ABS 32
Tabela 4 - Parâmetros da injeção do PP 39
Tabela 5 - Parâmetros II, injeção de PP 40
Tabela 6 - Parâmetro I, injeção PE 41
Tabela 7- Parâmetro II, injeção PE 42
Tabela 8 - Parâmetro da injeção ABS 42
Tabela 9 - Quadro comparativo custo por parte 44
Tabela 10 - Comparativo Alumínio x Digital ABS 44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo funcionamento injetora 14

Figura 2 - Exemplo funcionamento impressora FDM 16

Figura 3 - Exemplo funcionamento impressora SLS 18

Figura 4 - Exemplificação Polyjet 19

Figura 5 - Influência da temperatura sobre as características tensão-deformação ... 21

Figura 6 - Um esquema de um polímero linear-amorfo 22

Figura 7 - Módulo de Young com a mudança de temperatura para um tempo fixo de carregamento. 23

Figura 8 - Exemplo reptation 24

Figura 9 - Equivalência de temperatura-tempo para o módulo 24

Figura 10 - Exemplificação foto polímero 26

Figura 11 - Exemplificação de clivagem 27

Figura 12 - Equipamento utilizado para o ensaio de HDT 29

Figura 13 - Primeiro molde projetado 33

Figura 14 - Molde utilizado para injeção 34

Figura 15 - Temperatura do forno durante tratamento térmico 36

Figura 16 - Forno Sanchis MUFLA 36

Figura 17 - Injetora Haitian HTF 58-X 37

Figura 18 - Banho MQMBP-01 38

Figura 19 - Primeira injeção no molde 40

Figura 20 - Injeção satisfatória de PP 41

Figura 21 - Pino extrator 43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
1.1. OBJETIVOS 11
1.1.1. Objetivo principal 11
1.1.2. Objetivos Específicos 12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 13
2.1 INJETORAS DE POLÍMERO 13
2.2 IMPRESSORAS 3D 14
2.2.1. Escolha da impressora 15
2.3 POLÍMEROS 19
2.3.1. Propriedades Mecânicas do Polímero 20
2.3.2. Fotopolímeros 26
2.3.3. Viscosidade 27
2.3.4. Decomposição 28
2.3.5. Processamento dos termoplásticos 28
2.4. TEMPERATURA DE DEFLEXÃO TÉRMICA (HDT) 28
2.5. PROJETO DE MATRIZES 29
2.6. polímeros para prototipagem 30
2.6.1. Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) 31
2.6.2. Poliácido Láctico (PLA) 31
2.6.3. Digital ABS 32
3. MATERIAIS E MÉTODOS 33
3.1. ESCOLHA DO MATERIAL 33
3.2. MODELAGEM DA MATRIZ 33
3.3. TRATAMENTO TÉRMICO DO MOLDE 34

3.3.1. Procedimento do tratamento térmico 35
3.4. Processo de injeção 37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 39
5 CONCLUSÃO 45
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 46
REFERÊNCIAS 47

1 INTRODUÇÃO

Devido aos mercados globais dinâmicos, a fragmentação do mercado e a redução de ciclo-de-vida dos produtos, a customização em massa é introduzida cada vez mais no dia-a-dia das pessoas. Desta maneira, a criação de novas formas e tecnologias para suprir esta necessidade vem sendo desenvolvida e se expandindo por todas as áreas produtivas (RUOHONEN, et al 2003).

Uma das áreas de produção em massa que possui um elevado custo de produção, do seu projeto à manufatura do produto final, é a injeção de plásticos. Assim então, viabilizar o desenvolvimento e a produção de novos produtos em tempo reduzido, se demonstra de extrema necessidade nos dias atuais (MAGALHÃES, 2010).

Por estas, a necessidade de absorver a customização em massa na produção por injeção de polímeros e reduzir seu tempo de preparo para manufatura, se torna de extrema necessidade. Este trabalho propõe demonstrar a possibilidade de executar tais procedimentos, utilizando tecnologias recentes como a impressão 3D, e também comparando diferentes materiais a serem utilizados para este propósito, demonstrando na prática seu teste de injeção afim de validar o projeto.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo principal

Este trabalho propõe a utilização de moldes poliméricos em injetoras de plástico, criados a partir de prototipagem rápida, e consequentemente sua análise e comprovação.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Entender o funcionamento básico de máquinas injetoras de plástico;
- Entender o funcionamento básico de impressoras 3D e seus diferentes tipos;
- Análise dos diferentes tipos de polímeros para melhor desenvolvimento da matriz;
- Criação de um modelo digital para o molde;
- Teste prático de injeção de polímero sobre o molde polimérico;
- Verificar a viabilidade da substituição de matrizes metálicas por matrizes poliméricas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentada a revisão bibliográfica utilizada para elaboração do presente trabalho.

2.1 INJETORAS DE POLÍMERO

Um dos métodos de manufatura comumente escolhido para a produção em massa de partes de plásticos é o processo por injeção em moldes. Uma grande variedade de produtos diversificados em tamanho e formato podem ser facilmente produzidos usando a injeção em moldes. Este processo requer o uso de uma máquina injetora, plástico cru e um molde. O plástico é derretido dentro da máquina injetora e então injetado dentro do molde, onde se resfria e solidifica em seu formato final. A complexidade da peça produzida é limitada pela viabilidade produtiva do molde (MAGALHÃES, 2010).

A injeção de plásticos utiliza como ferramenta um molde, normalmente feito de aço ou alumínio. O molde consiste em duas metades, no qual ambas são presas na máquina injetora onde sua parte de trás é móvel, ou seja, ela abre e fecha para a produção em linha. O molde também possui um núcleo e uma cavidade. Quando o molde está fechado, o espaço entre o núcleo e a cavidade será preenchido com plástico derretido criando o formato desejado. Quando necessário, pode-se utilizar um molde com múltiplas cavidades a fim de produzir uma maior quantidade. Assim então, o núcleo e a cavidade são colocados na base do molde, no qual é fixada dentro da injetora nas placas de fixação. A metade da frente consiste em uma placa de suporte onde é fixada ao canal de alimentação, pelo qual irá escoar o material. A metade de trás, consiste em um sistema de ejeção e sua respectiva placa de suporte (MAGALHÃES, 2010), como pode ser observado na Figura 1.

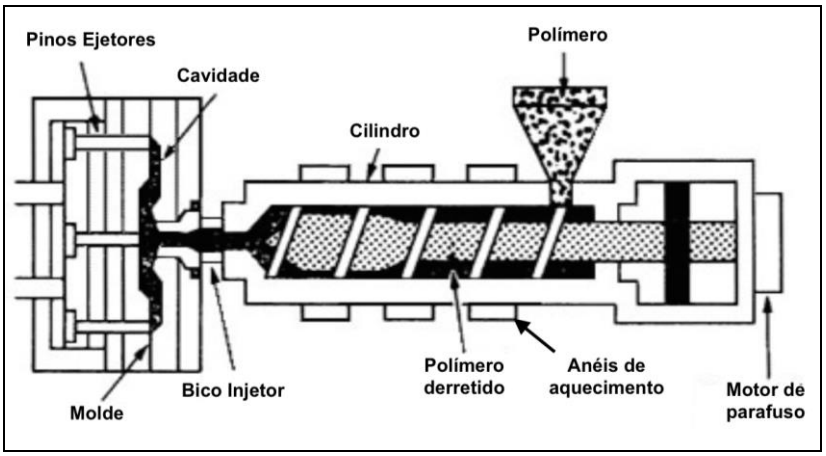

Figura 1 - Exemplo funcionamento injetora
Fonte: Anole (2017)

Quando estas necessitam ser separadas, a barra de ejeção atua no sistema empurrando a placa ejetora para frente e consequentemente acionando os pinos de extração da peça moldada. Estes pinos empurram a peça solidificada para fora da cavidade do molde. Em seguida os moldes se fecham utilizando os guias para não desalinharem e são presos sob pressão para que as partes se completem perfeitamente e não ocorra vazamentos. Desta maneira, os processos de injeção de plásticos em moldes são vantajosos na produção de partes plásticas em massa (MAGALHÃES, 2010). Contudo, este processo produz partes com qualidade e alta repetibilidade, que são justificados pelo seu alto custo e tempo envolvido na produção de suas ferramentas. Isso explica o porquê de não fazer parte do mercado de customização em massa.

2.2 IMPRESSORAS 3D

Nos tempos modernos, a necessidade de reduzir gastos com matéria prima e poder customizar o produto que o cliente necessita, se tornou algo imprescindível para a indústria. Com isso, a “Manufatura Aditiva” se torna definitivamente uma melhor opção, em relação as conhecidas até então como “Manufatura Subtrativa”, no qual, consiste em remover partes de um material bruto até chegar ao formato desejado.

O termo “Manufatura Aditiva”, se tornou popular após Hideo Kodama, 1981, imprimir um modelo sólido no Instituto de Pesquisa Industrial Municipal de Nagoya localizado no Japão. Assim então, o termo de Manufatura Aditiva foi espalhado pelo mundo e sendo reconhecido como Prototipagem Rápida ou Tecnologia de Impressão 3D. Como o termo sugere, manufatura aditiva é baseada na criação de materiais e objetos através de um modelo digital usando um processo de adição de camadas provenientes de uma matéria prima. Assim então, esta tecnologia vem se desenvolvendo até os dias de hoje, no qual está introduzida em diversas áreas de pesquisa e produção, como: na área militar, médica, de engenharia, construção, arquitetura, educação e outras (MARQUES, 2014).

O processo de Impressão 3D consiste em 3 etapas principais, a modelagem, a impressão e o aperfeiçoamento. Na fase de modelagem, afim de obter um modelo impresso, a impressora utiliza um projeto virtual e divide este modelo em diversas camadas transversais para desenvolver uma lógica de impressão. A partir daí, entramos na segunda fase, onde ocorre a fase de impressão, no qual consiste em transformar um modelo digital, em um modelo real. Esta fase consiste em depositar matéria prima fundida em uma placa, não aderente, para seu resfriamento. Após esta camada estar parcialmente solidificada, a próxima camada é depositada para se fundir com a anterior e assim sucessivamente até completar todas as camadas previstas no modelo digital. Esta técnica pode ser utilizada com diferentes materiais, tais como: termoplásticos, pó metálico, cerâmico, foto-polímero ou líquidos. E por fim, a terceira fase conhecida como o aperfeiçoamento, consiste em verificar a precisão do modelo impresso, comparado ao modelo digital, sendo necessário em alguns casos, o polimento da superfície a fim de reduzir medidas ou melhorá-lo esteticamente (ANOLE, 2017).

2.2.1. Escolha da impressora

Alguns conceitos são necessários a serem analisados quando um produto depende diretamente das propriedades do material escolhido e se a

impressora será capaz de utilizar este material. Assim então, pode-se descrever as impressoras em diferentes tipos, como descrito a seguir.

2.2.1.1. Impressoras FDM

Dentro de todos os tipos de impressoras 3D, a impressora conhecida como Fused Deposition Modelling (FDM), desenvolvida por S. Scott Crump em meados de 1988 e comercializada pela empresa canadense Stratasys, foi a mais utilizada durante os últimos anos. Esta pode ser utilizada com materiais do tipo Acrilonitrila butadieno estireno (ABS), poliácido láctico (PLA), policarbonato (PC), poliestireno (PS) e outros, porém esta tecnologia está atrelada a marca. Impressoras FDM possuem uma resolução que pode chegar a 0.127mm, utilizando apenas materiais sólidos (STRATASYS, 2017b).

O funcionamento da impressora do tipo FDM, pode ser exemplificado conforme a Figura 2.

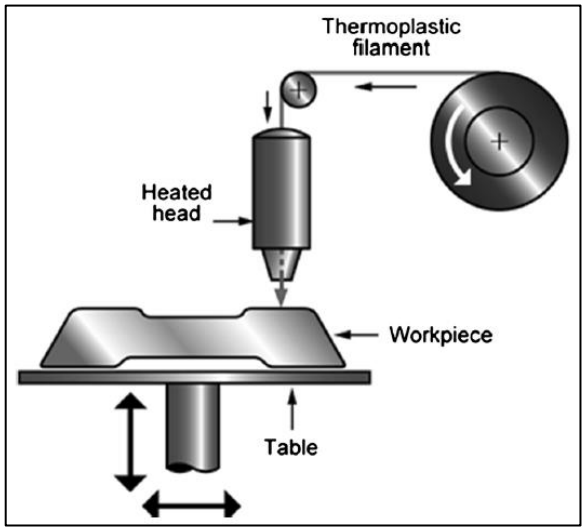

Figura 2 - Exemplo funcionamento impressora FDM
Fonte: Telfer et al 2012

2.2.1.2. Impressoras FFF

Este tipo de impressoras 3D, chamadas Fused Filament Fabrication (FFF) é relativamente um novo método de prototipagem rápida devido ao seu ano de lançamento, que ocorreu em meados de 2000. Estas atuam de forma similar a FDM, porém possuem patente de tecnologia aberta tornando-as mais comuns nos dias de hoje. Possuem resoluções tão boas quanto as FDM.xx

2.2.1.3. Impressoras SLS

Diferentemente de impressoras de extrusão, as conhecidas como Selective Laser Sintering (SLS) atuam utilizando lasers de alta precisão e potência, sinterizando materiais normalmente em pó ou em solução, como por exemplo, ligas metálicas e polímeros afim de criar o protótipo de acordo com o projeto digital, exemplificado na Figura 3. Possuem resoluções que podem chegar até 0,05mm. Altamente recomendadas para situações em que o desenho é muito complexo ou necessitam de uma superfície mais polida (EOS, 2017)

.

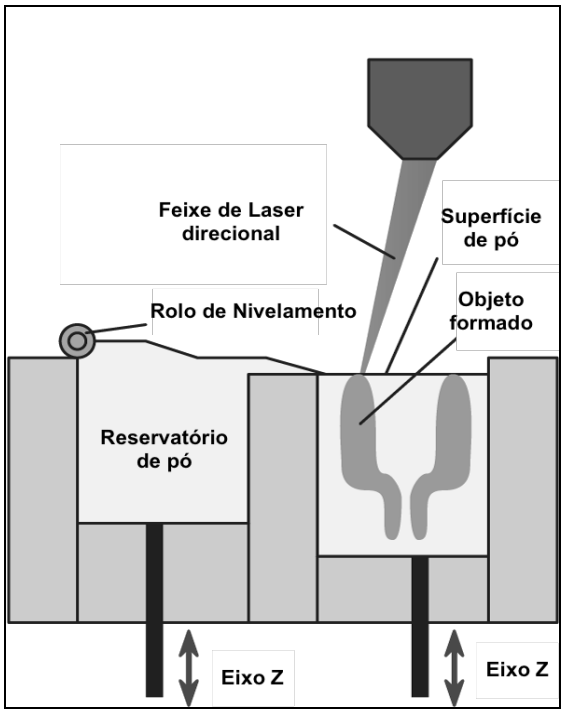

Figura 3 - Exemplo funcionamento impressora SLS
Fonte: Adaptado de Machine Design (2017).

2.2.1.4. Digital Light Projection (DLP)

Este tipo de impressão 3D é uma variante da SLS, no qual, usa luz visível para expor as resinas foto sensíveis. Sua principal vantagem é a resolução que pode ser alcançada no processo de impressão, além de um custo reduzido das impressoras. Porém, não é recomendado, quando a solicitação envolve uma moldagem simultânea de itens.

2.2.1.5. Polyjet

Polyjet é um tipo de impressão 3D, criada pela empresa de tecnologia em prototipagem rápida Stratasys, na qual deposita, camadas líquidas de fotopolímero que se cura instantaneamente, quando expostas, as luzes ultravioleta. Esta tecnologia produz peças com precisões de até 0.0016 mm e superfícies suaves,

onde pode-se aplicar misturas de polímeros. Este processo pode ser demonstrado conforme a Figura 4.

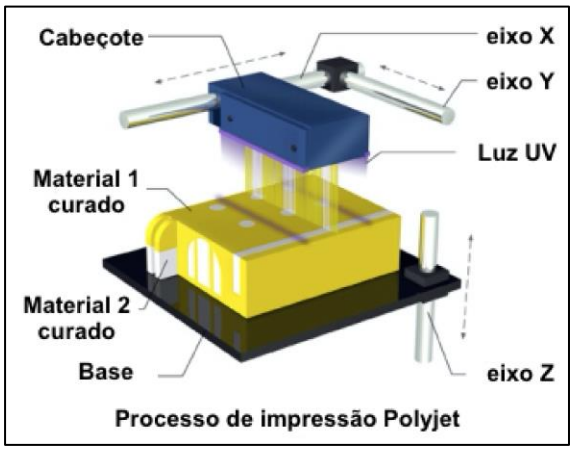

Figura 4 - Exemplificação Polyjet
Fonte: 3DAddFab (2017).

2.3 POLÍMEROS

A definição mais simples de um polímero é um composto químico, feito de muitas unidades de repetição. O nome polímero, do grego "poli" muitos e "-mero" partes ou unidades repetidas, pode ser entendido como muitas partes, ou unidades de repetição. Um polímero responde de forma diferente quando exposto à aplicação de uma força ou submetido a altas temperaturas, dependendo da sua estrutura molecular dominante. A classificação estrutural está diretamente relacionada a sua resposta devido a essas propriedades, como polímeros termofixos e termoplásticos (CALLISTER, 2008).

Os polímeros termofixos, são polímeros tridimensionais em rede. São fabricados com a mistura de uma resina e um endurecedor, os quais reagem e é endurecida formando o material, em temperatura ambiente ou elevada. O resultado é um polímero com ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes, isso também faz com que geralmente sejam amorfos. Durante um reaquecimento as cadeias secundárias adicionais desfazem, mas as ligações cruzadas previnem o verdadeiro derretimento ou amolecimento, portanto o polímero

não pode ser tratado termicamente, pois se torna uma borracha, e o constante aquecimento irá causar o rompimento dessas cadeias causando a degradação do mesmo (ASHBY, 2003).

Os polímeros termoplásticos são comumente descritos como polímeros lineares, pois as cadeias não são cruzadas, devido a isto, ele se torna mais dúctil quando aquecido. As cadeias secundárias, as quais conectam as moléculas entre si desfazem, permitindo assim, o material agir como um líquido viscoso, sendo possível moldá-lo em várias formas. As moléculas nos polímeros lineares, possuem uma faixa de peso molecular, e se agrupam em uma variedade de conFigurações. Essa variação de peso molecular e agrupamento cristalino, significa que, os termoplásticos não possuem um ponto de fusão crítico, ao invés disso, a viscosidade desce ao longo de um intervalo de temperatura (ASHBY, 2003).

2.3.1. Propriedades Mecânicas do Polímero

2.3.1.1. Comportamento tensão-deformação.

As propriedades mecânicas dos polímeros são especificadas por muitos parâmetros semelhantes aos usados para os metais, ou seja, módulo de elasticidade, limites de escoamento e de resistência a tração. Contudo, as características mecânicas dos polímeros, são muito mais sensíveis a mudanças de temperatura na vizinhança da temperatura ambiente (CALLISTER, 2008)

A influência da taxa de deformação sobre o comportamento mecânico também é importante. Em geral uma diminuição na taxa de deformação tem a mesma influência sobre as características tensão-deformação, do que um aumento na temperatura, isto é, o material se torna mais mole e mais dúctil. A influência da temperatura no comportamento mecânico dos polímeros, pode ser observada no gráfico tensão-deformação representado na Figura 5.

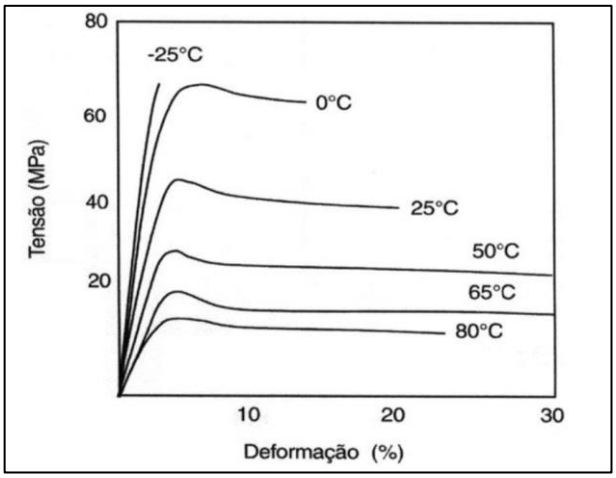

Figura 5 - Influência da temperatura sobre as características tensão-deformação Fonte: Ashby (2003).

2.3.1.2. Módulo de Young

Metais e cerâmicas possuem módulo de Young, que em temperatura ambiente, pode ser pensado como constante, diferentemente dos polímeros (CALLISTER, 2008).

Quando o polímero sofre um carregamento, reflete-se no aumento do módulo, levando em consideração o tempo *t* e a temperatura *T*. No descarregamento, a deflexão é elástica e a tensão desaparece novamente (embora isso também pode levar algum tempo). Então é usual falar do módulo em função da temperatura e tempo, *E(t, T)*. É, portanto, assim, definido como qualquer outro módulo de Young, como o estresse, σ, dividido pela deformação elástica (ε), como exemplificado na Equação 1. (ASHBY, 2003).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon(t,T)} \quad (1)$$

2.3.1.3. Regime vítreo e transição viscoelástica

A temperatura vítrea, Tg, é a temperatura na qual, as ligações secundárias começam a desfazer. Bem abaixo da Tg as moléculas de polímero se aglomeram firmemente juntas, seja em uma massa amorfa, ou em cristais mal organizados com materiais amorfos entre si, como simplificado na Figura 6 (ASHBY, 2003)

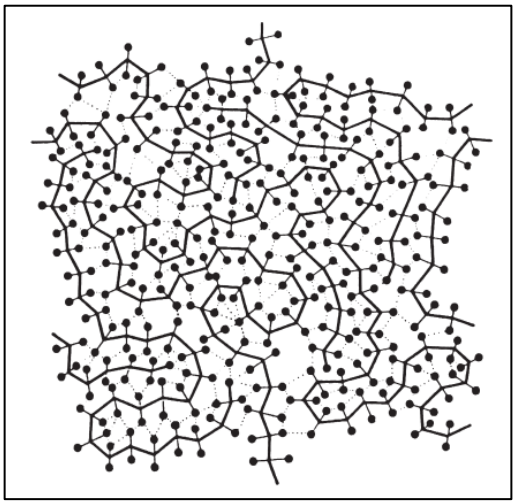

Figura 6 - Um esquema de um polímero linear-amorfo
Fonte: Ashby (2003).

A tração alarga as ligações, dando uma deformação elástica, a qual é recuperada com o descarregamento. Mas, existem dois tipos de ligações, a covalente, a qual forma a espinha dorsal das cadeias, e as ligações secundárias, que são mais frágeis como mostrado na Figura 5. A cadeia formada pelas ligações covalentes é mostrada como uma linha sólida, e os grupos adjacentes ou grupos radicais como círculos escuros, eles são ligados entre si por ligações secundárias, mostradas na Figura como linhas pontilhadas (ASHBY, 2003). A Figura 7 mostra o módulo de Young com a mudança de temperatura quando tracionado em um tempo fixo.

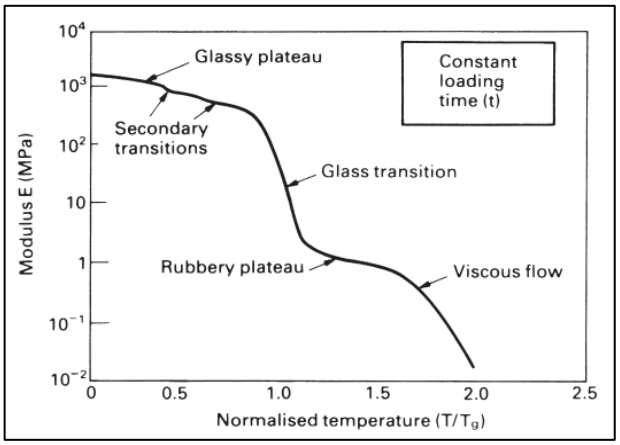

Figura 7 - Módulo de Young com a mudança de temperatura para um tempo fixo de carregamento.
Fonte: Ashby (2003).

Com o aumento da temperatura, as ligações secundárias começam a se desfazer, então os segmentos de cadeias podem deslizar em relação um ao outro, fazendo com que o módulo apresente uma queda acentuada. Quando o polímero é carregado, partes das moléculas deslizam no interior de “tubos”, como um canal, formando o que seriam “canais de cobra” ou “Reptation”, como pode ser observado na Figura 8 (ASHBY, 2003), ganhando assim, uma tensão extra e dissipando energia. Conforme a temperatura sobe e se torna superior a *Tg*, o polímero expande e ganha volume extra, o que diminui a densidade de empacotamento, permitindo assim, mais regiões sofrerem o deslizamento e levando a um módulo aparentemente baixo, no entanto, ainda existem porções que não deslizam (regiões elásticas). Durante a descarga, essas regiões elásticas puxam o polímero para a sua forma natural, embora eles, devessem agir contra o deslizamento reverso viscoso das moléculas, e isso demanda tempo. O resultado é um polímero que se chama de “semelhante ao couro” (ASHBY, 2003), devido as suas propriedades, assim como polietileno de baixa densidade e o PVC plastificado a temperaturas ambientes.

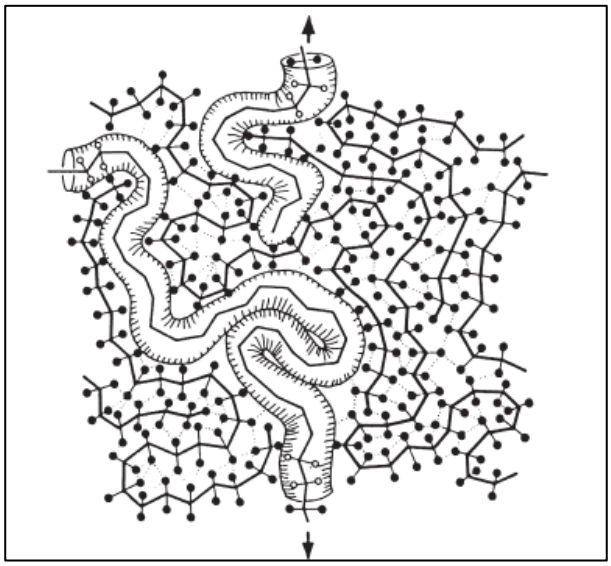

Figura 8 - Exemplo reptation
Fonte: Ashby (2003).

Dentro deste regime é possível verificar que o módulo E, em uma temperatura, pode ser relacionado a outro, por apenas uma mudança em escala de tempo, isto é, há uma certa “equivalência entre tempo e temperatura” (ASHBY, 2003). Isso significa que a curva descrevendo o módulo a uma temperatura, pode ser sobreposta, para outro por uma constante horizontal de deslocamento $log(a_T)$, ao longo do eixo *log(t),* como pode ser observado na Figura 9.

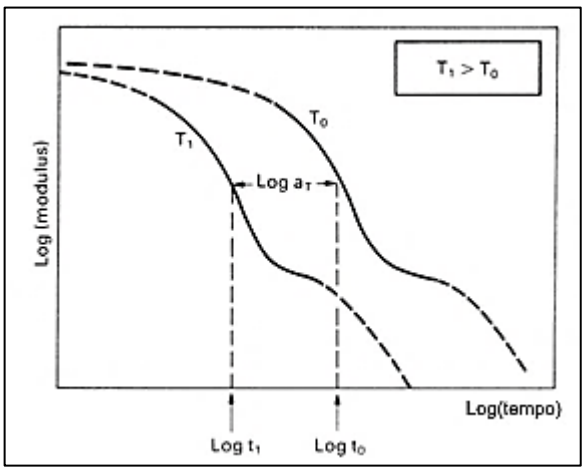

Figura 9 - Equivalência de temperatura-tempo para o módulo
Fonte: Ashby (2003).

Um exemplo notório desta equivalência de temperatura-tempo, é o estado estacionário de um metal ou cerâmica cristalina, o qual segue imediatamente a partir da ativação térmica cinética (Q) (ASHBY, 2003). Devido a uma taxa constante de estresse (σ), a taxa de fluência varia de acordo com a temperatura, como:

$$\dot{\varepsilon}_{ss} = \frac{\varepsilon}{t} = A\ exp(-\frac{Q}{RT}) \tag{2}$$

A partir da equação (1), o módulo E é dado por

$$E = \frac{B}{t}\exp(\frac{Q}{RT}) \tag{3}$$

Neste contexto, se quisermos encontrar o módulo da temperatura T_1 para uma temperatura T_0, como mostrado na Figura 8, utilizando de artifícios matemáticos (ASHBY, 2003), pode-se dizer que é dado por uma simples mudança no eixo do tempo por Log(aT), como demonstrado na Equação 4.

$$\log(a_T) = -\frac{Q}{2.3R}\left\{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}\right\} \tag{4}$$

O decaimento do módulo é causado pelo aumento da facilidade, com a qual, as moléculas podem deslizar uma sobre as outras. Nos metais que também possuem uma estrutura cristalina, isso reflete no número de lacunas (defeitos) e a taxa a qual átomos saltam entre eles. Nos polímeros amorfos, isto reflete no aumento do volume livre, o qual aumenta o número de “Reptation”. O fator de mudança então é dado pela Equação 5 (ASHBY, 2003):

$$\log(a_T) = \frac{C_1\,(T_1 - T_0)}{C_2 + T_1 - T_0} \tag{5}$$

Onde C_1 e C_2 são constantes. É chamada então de “Equação de WLF” por meio de seus descobridores, é comumente utilizada para prever o efeito da temperatura sobre o comportamento do polímero (ASHBY, 2003). Se for considerado T_0 como a temperatura vítrea Tg, então C_1 e C_2 são quase constantes para todos os polímeros amorfos e seus valores serão C_1 = 17.5 e C_2 = 52k.

2.3.2. Fotopolímeros

Um fotopolímero ou resina ativada por luz é um polímero que muda suas propriedades quando exposto à luz, a qual pode estar na região ultravioleta ou visível do espectro eletromagnético (CRIVELLO; REICHMANIS, 2013). Essas mudanças podem se manifestar estruturalmente, como por exemplo, aumentando sua dureza, que ocorre devido ao resultado de ligações cruzadas quando exposto a luz.

A Figura 10 retrata como a mistura de monômeros (do grego "mono", "um" e "meros", "parte"), oligômeros (um finito número de unidades de monômeros) e o fotoiniciador, endurece com as ligações cruzadas, através do processo chamado de “cura” (SIGNINDUSTRY, 2008).

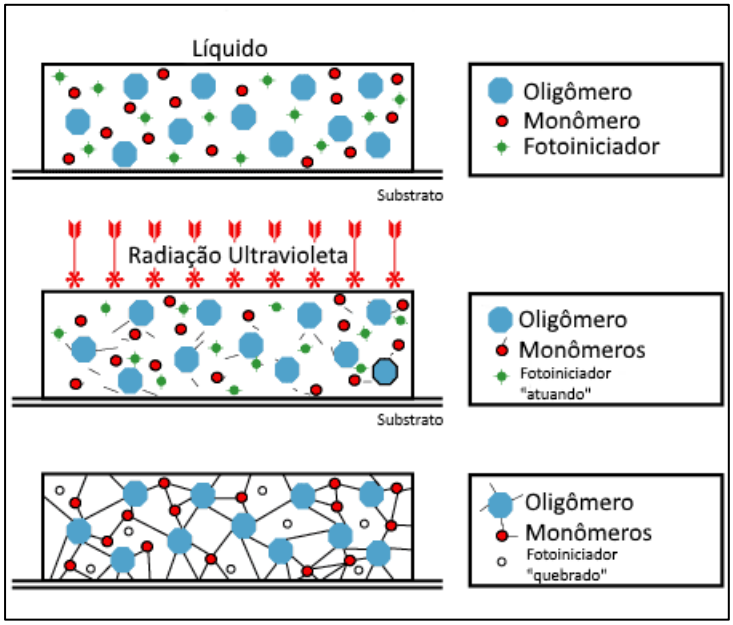

Figura 10 - Exemplificação foto polímero
Fonte: Signindustry (2008).

2.3.2.1 Fotoiniciadores

Fotoiniciadores podem ser descritos como moléculas que reagem a exposição de radiação (UV ou visível). Nos fotopolímeros é comumente utilizado fotoiniciadores sintéticos. Estes podem ser de dois tipos, radicais gerados através de abstração ou gerado por clivagem, conforme exemplificado pela Figura 11.

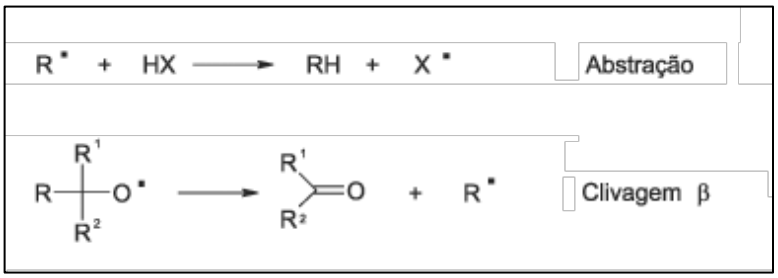

Figura 11 - Exemplificação de clivagem
Fonte: Cerqueira et al (2007).

2.3.3. Viscosidade

A exposição a temperaturas elevadas (>1.5T_g) faz com que as ligações secundárias se desfaçam e os pontos de entrelaçamento escorreguem. Esse regime, o qual, termoplásticos são moldados, os polímeros lineares se tornam líquidos viscosos. A viscosidade é sempre definida em cisalhamento. Se uma tensão de cisalhamento (σ_s), produz uma taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) então a viscosidade é dada pela Equação 6 (ASHBY, 2003):

$$\eta = \frac{\sigma_s}{10\dot{\gamma}} \tag{6}$$

2.3.4. Decomposição

Se um polímero é aquecido demasiadamente, a energia térmica excede a energia coesiva de alguma região da cadeia molecular, causando uma despolimerização ou uma degradação. Alguns se decompõem em monômeros, outros se degradam aleatoriamente em outros produtos. É comercialmente importante, que a decomposição não tome lugar, durante o processamento dos termoplásticos, para uma faixa de temperatura segura, toma-se como especificada $1.5T_g$ (ASHBY, 2003).

2.3.5. Processamento dos termoplásticos

O processamento, envolve a mudança de forma e tamanho desejável no estado sólido. Existem vários métodos para moldar um polímero, incluindo: termoformagem, extrusão, injeção, moldagem por sopro e rotomoldagem. Basicamente o material é aquecido até a temperatura apropriada ($<1.5T_g$) para que ocorra a quebra das ligações secundárias permitindo que haja uma viscosidade, e então o material é moldado e resfriado para preservar a forma adquirida.

2.4. TEMPERATURA DE DEFLEXÃO TÉRMICA (HDT)

A temperatura de deflexão térmica ou temperatura de distorção térmica é a temperatura à qual uma amostra de polímero ou plástico deforma ou sofre um decréscimo sob uma carga especificada. A temperatura de deflexão térmica é determinada pelo ensaio descrito pela norma ASTM D648 (Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load in the Edgewise Position), no qual o ensaio mede o efeito da temperatura a uma tensão em uma área definida

e a temperatura é então levada a uma taxa constante, como descrito por (ULLOA, 2007).

Segundo a norma ASTM D648, a amostra de teste é carregada em três pontos de dobragem na direção, a qual a borda mais alta fique em direção ao espectador. A tensão de fibra externa, utilizada para o ensaio é de 0,455 MPa ou 1,82 MPa, e a temperatura é aumentada para $2{,}0 \pm 0{,}2°C/min$ até o espécime desviar 0,25 mm, e então a temperatura é anotada como a temperatura de deflexão, sob a carga de flexão da amostra de teste. O equipamento utilizado para este ensaio pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Equipamento utilizado para o ensaio de HDT
Fonte: Ulloa (2007).

2.5. PROJETO DE MATRIZES

Para criação de um molde para máquinas injetoras, se faz necessário, levar em conta alguns parâmetros como a máquina injetora utilizada no processo, o material a ser injetado, pela mesma, a quantidade de itens a ser produzido, o orçamento estipulado e principalmente a geometria de peça a ser gerada (RODA, 2017).

Após definidos os parâmetros e medidas a serem utilizados, é necessário definir como serão os canais de acordo com suas funções, como descrito abaixo (RODA,2017):

- Canal de injeção: É o furo em formato cônico que liga o bico de injeção até o outro lado da placa fixa, sendo o primeiro canal a ser percorrido por polímero derretido.
- Canais de distribuição: É o caminho a ser percorrido pelo polímero para que ocorra uma distribuição uniforme nas extremidades do molde. Estes, são de extrema importância, pois se forem muito finos podem acarretar na solidificação do material, antes mesmo que chegue ao ponto esperado, ou se forem largos demais podem ocasionar a perda de pressão ou demora na solidificação do plástico.
- Canais de entrada: São os canais com dimensões reduzidas, cuja função é garantir que o fluxo de polímero não retorne aos canais de distribuição, e que facilite o destacamento da peça e controla o fluxo dentro da cavidade.

Um fator importante a ser levado em consideração, são os canais de refrigeração, no qual são responsáveis em reduzir a temperatura da peça para que esta se solidifique e possa ser extraída sem danos, reduzindo o tempo de ciclo de injeção (RODA,2017).

2.6. POLÍMEROS PARA PROTOTIPAGEM

Com base em toda a teoria apresentada, tornou-se necessário a escolha de materiais, que possam ser viáveis para a utilização como moldes de injeção. Alguns fatores são restritivos como, precisão de impressão, T_g e HDT.

2.6.1. Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)

O ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) é um plástico mecânico de baixo custo, que apresenta uma facilidade de uso elevada, seja para processá-lo ou fabricá-lo. Este material é ideal para uso em prototipagem, devido à sua excelente estabilidade dimensional e sua facilidade para pintar ou colar. O ABS é adequado para estruturas e aplicações onde, resistência ao impacto, força e rigidez são requeridas, tendo em vista pequenos esforços, conforme a resistência do mesmo (SMITHS, 2017).

Para a utilização do ABS comum, é necessária uma impressora FDM, pois este será utilizado em filamentos, que pode chegar a uma precisão de 0.127mm, variando de impressora para impressora. Suas propriedades estão representadas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Parâmetros ABS

ABS - Stratasys			
Parâmetros	**Norma**	**Unidade**	**Valor**
Resistência à Tração na Ruptura	D-638-03	MPa	38-43
Módulo de Elasticidade	D-638-04	MPa	2320
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	90
HDT, °C @ 0.45MPa Após tratamento térmico	D-648-06	°C	NA
Tg	DMA, E>>	°C	105-109

Fonte: Mathweb (2017).

2.6.2. Poliácido Láctico (PLA)

O PLA ou poliácido láctico é um material plástico renovável, oferecido como opção de material de baixo custo para iterações de peças de rascunho rápido. Este material oferece uma maior rigidez do que o ABS e seu baixo ponto de fusão e HDT significam menos calor e energia necessários para imprimir peças (STRATASYS, 2017c). Suas propriedades estão representadas na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Parâmetros PLA

PLA - STRATASYS			
Parâmetros	**Norma**	**Unidade**	**Valor**
Resistência à Tração na Ruptura	ISO 527	Mpa	48
Módulo de Elasticidade		Mpa	3039
HDT, °C @ 0.66MPa	ASTM 3418	°C	53
HDT, °C @ 0.45MPa Após tratamento térmico	NA	NA	NA
Tg	ASTM D3418	°C	63

Fonte: Stratasys (2017c).

2.6.3. Digital ABS

O material Digital ABS é um fotopolímero no qual é “fabricado” dentro da impressora PolyJet, da empresa Stratasys, onde dois materiais são combinados para formarem este novo composto. A união dos materiais RGD515 e RGD535 (materiais da empresa) formam o que é chamado de Digital ABS, que foi projetado para simular um ABS comum, combinando a resistência à altas temperaturas e dureza. Suas propriedades estão representadas na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Parâmetros Digital ABS

Digital ABS - Stratasys			
Parâmetros	**Norma**	**Unidade**	**Valor**
Resistência à Tração na Ruptura	D-638-03	MPa	55-60
Módulo de Elasticidade	D-638-04	MPa	2600-3000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	58-68
HDT, °C @ 0.45MPa Após tratamento térmico	D-648-06	°C	92-95
Tg	DMA, E>>	°C	47-53

Fonte: Stratasys (2017d)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. ESCOLHA DO MATERIAL

A seleção de um material se torna importante para evitar a perda dos moldes durante a injeção, a qualidade da peça a ser injetada, e a quantidade de injeções suportadas.

O material selecionado foi o Digital ABS, devido a sua qualidade de impressão, e com isso, a redução da superfície de contato entre as partes, aumentando a facilidade de descolamento do material injetado no molde polimérico.

3.2. MODELAGEM DA MATRIZ

Sabendo dos itens necessários para a criação de uma matriz de injeção, foi possível desenhar no software de modelagem 3D Inventor, um protótipo que atendesse todos os itens descritos neste trabalho, demonstrado na Figura 13.

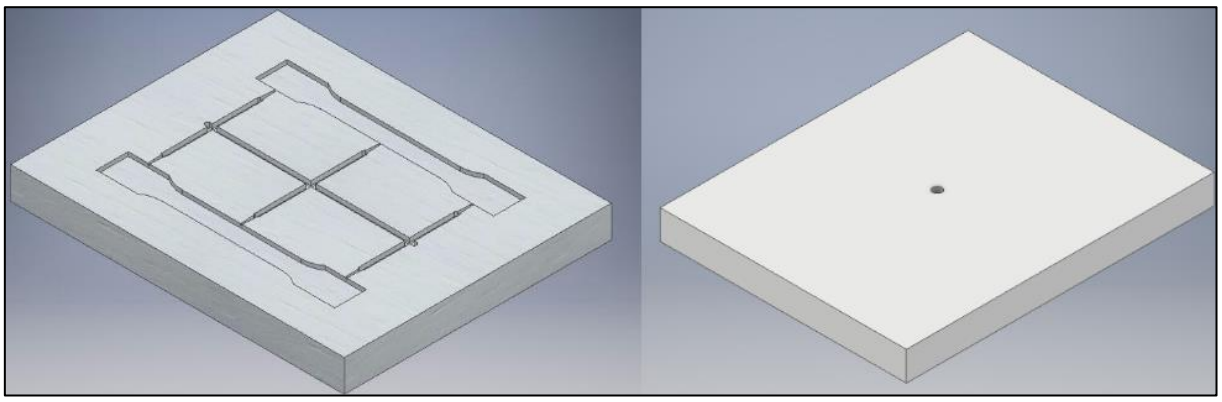

Figura 13 - Primeiro molde projetado
Fonte: Autoria própria, 2017.

Porém, afim de comparar resultados, o modelo digital de matriz utilizado para a prototipagem 3D foi cedido por Volpato (2016), no qual atendia as dimensões e características necessárias para a injeção na injetora Haitian HTF 58-X, disponibilizada pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (campus Curitiba). O molde foi produzido e cedido pela empresa de prototipagem rápida Stratasys, que se prontificou, durante o contato na Feira Internacional do Plástico (FEIPLASTIC).

A matriz polimérica produzida em Digital ABS foi testada computacionalmente por Volpato (2016), demonstrando a possibilidade de seu uso em injeções. Seu design é demonstrado na Figura 14..

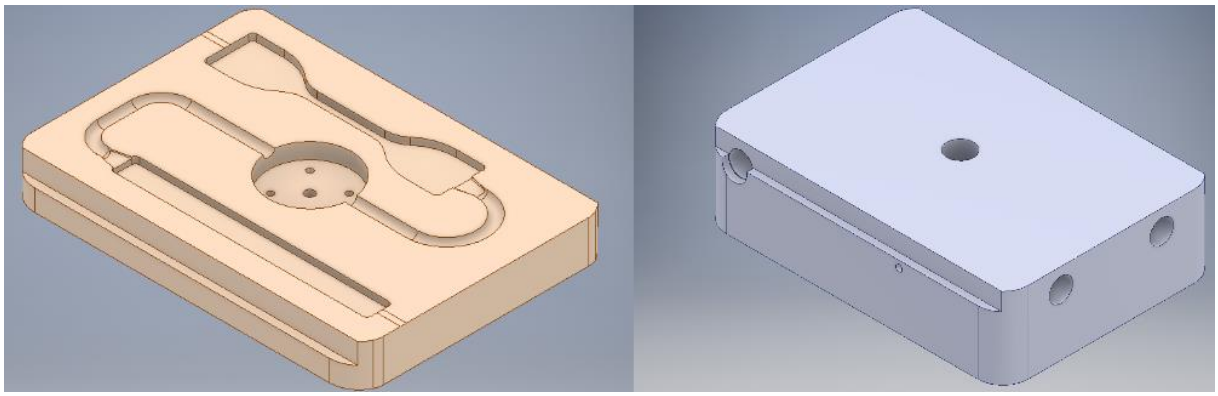

Figura 14 - Molde utilizado para injeção
Fonte: Autoria própria, 2017.

A matriz foi impressa, e cedida gratuitamente pela empresa Stratasys, após o contato com a mesma, na Feira Internacional do Plástico, que foi realizada em abril de 2017.

3.3. TRATAMENTO TÉRMICO DO MOLDE

O tratamento térmico de polímeros vem sendo considerado um dos métodos mais efetivos na modificação para abranger suas aplicações. Este tratamento pode melhorar as propriedades mecânicas e tribológicas dos polímeros. Isso ocorre devido ao aumento da fase cristalina na estrutura dos polímeros, onde a

parte elástica da viscoelasticidade do polímero aumenta, significativamente, sua resistência de compressão e condutividade térmica (ALLY, 2015).

3.3.1. Procedimento do tratamento térmico

A fim de alcançarmos um melhor HDT em nossa matriz polimérica, será necessário realizar um procedimento de tratamento térmico. Este consiste, em realizar etapas, no qual muda a temperatura a cada espaço de tempo, determinado pelo fabricante do material e possui duração total de aproximadamente 9 horas (STRATASYS, 2017a).

Primeiramente, foi necessário realizar uma limpeza superficial na peça e em seguida colocá-la em um forno com temperatura programável, ajustando uma rampa de incremento em 1°C por minuto. Assim então, ligar o forno para que atinja a temperatura de 60°C e a mantenha por aproximadamente duas horas. Após as duas horas, aumentar a temperatura do forno para 70°C de acordo com o incremento e assim que atingir a temperatura, manter por mais duas horas. Após este tempo, aumentar a temperatura para 80°C e mantê-la por apenas uma hora e após este, aumentar para 100°C esperando mais uma hora. Assim que a matriz passar por uma hora a 100°C, desligar o forno e deixar resfriar. A peça deve ser retirada quando atingir temperatura abaixo de 35°C. Este procedimento pode ser descrito conforme o gráfico representado na Figura 15.

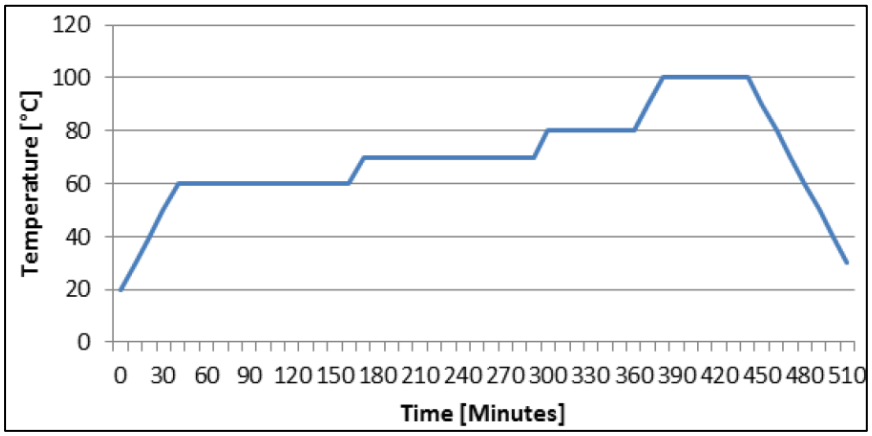

Figura 15 - Temperatura do forno durante tratamento térmico
Fonte: Stratays (2017a).

Para o tratamento térmico do molde, foi utilizado o forno Sanchis MUFLA, fornecido pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP), como mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Forno Sanchis MUFLA
Fonte: Autoria própria (2017).

3.4. PROCESSO DE INJEÇÃO

Para o processo de injeção, foi necessário o apoio da UTFPR (campus de Curitiba), onde foi utilizada a injetora Haitian HTF 58-X mostrado na Figura 17.

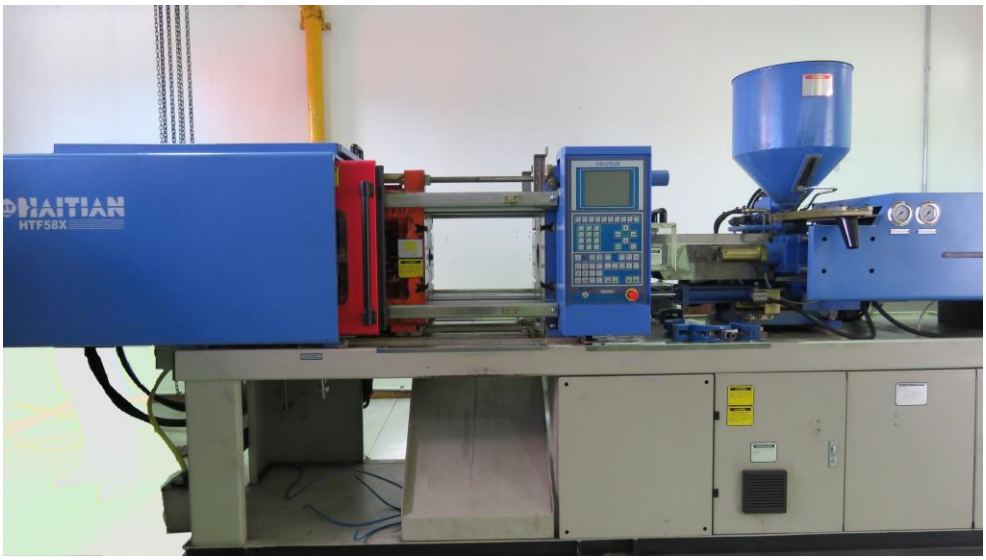

Figura 17 - Injetora Haitian HTF 58-X
Fonte: Autoria própria, 2017.

O preparo ou setup da máquina injetora de polímero iniciou-se com a retirada da matriz metálica, utilizada anteriormente e substituída pela matriz polimérica a ser estudada, no qual, foi fixada no porta-molde de acordo com o manual da injetora. Após este procedimento, foi necessário encaixar as mangueiras de refrigeração utilizada pelo Banho MQMBP - 01, mostrado na Figura 18, que por sua vez, não foi possível utilizar água como líquido refrigerante, devido a indisponibilidade do engate rápido, assim foi utilizando somente o fluxo de ar ambiente.

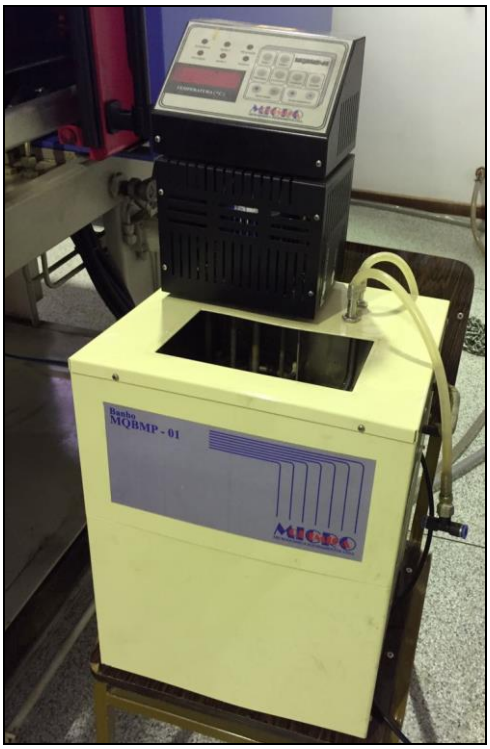

Figura 18 - Banho MQMBP-01
Fonte: Autoria própria (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por isso foi necessário ajustar os parâmetros da injetora para o melhor desempenho possível, quando utilizado diferentes polímeros injetados. Antes de realizar a injeção, foi feito o aquecimento dos anéis, e então, ligada a injeção, para fazer a retirada do material que estava no bico injetor da injetora. O primeiro material a ser injetado foi o polipropileno (PP). Os parâmetros utilizados foram adquiridos empiricamente conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros da injeção do PP

POLIPROPILENO (PP)		
Parâmetro	**Unidade**	**Valor**
Pressão	bar	15
Temperatura do Polímero	°C	190
Tempo de Resfriamento	s	20
Presão de Fechamento	bar	50

Fonte: Autoria própria (2017).

O resultado da injeção utilizando este parâmetro não foi satisfatório, pois as cavidades do molde não foram totalmente preenchidas como mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Primeira injeção no molde
Fonte: Autoria própria (2017).

Após duas primeiras injeções os parâmetros foram alterados, visando melhorar o produto obtido. Os parâmetros utilizados para as próximas injeções estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros II, injeção de PP

POLIPROPILENO (PP)		
Parâmetro	**Unidade**	**Valor**
Pressão	bar	30
Temperatura do Polímero	°C	190
Tempo de Resfriamento	s	20
Pressão de Fechamento	bar	50

Fonte: Autoria própria (2017)

A injeção apresentou resultados satisfatórios, sendo que toda a cavidade da matriz foi preenchida, como mostra o resultado na Figura 20.

Figura 20 - Injeção satisfatória de PP
Fonte: Autoria própria (2017)

Após 10 injeções utilizando PP, foi trocado o material de injeção para o poliestireno (PE), e em seguida para o ABS. Foram utilizados os seguintes parâmetros para as injeções, conforme Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8, respectivamente.

Tabela 6 - Parâmetro I, injeção PE

POLIETILENO (PE)		
Parâmetro 1	**Unidade**	**Valor**
Pressão	bar	38
Temperatura do Polímero	°C	190
Tempo de Resfriamento	s	20
Pressão de Fechamento	bar	50

Fonte: Autoria própria (2017)

Tabela 7- Parâmetro II, injeção PE

POLIETILENO (PE)		
Parâmetro 2	**Unidade**	**Valor**
Pressão	bar	45
Temperatura do Polímero	°C	190
Tempo de Resfriamento	s	20
Pressão de Fechamento	bar	50

Fonte: Autoria própria (2017)

Tabela 8 - Parâmetro da injeção ABS

ABS		
Parâmetro	**Unidade**	**Valor**
Pressão	bar	100
Temperatura do Polímero	°C	190
Tempo de Resfriamento	s	20
Pressão de Fechamento	bar	50

Fonte: Autoria própria (2017)

Os parâmetros não foram precisos para obter um bom resultado de injeção, e devido ao pouco tempo disponível para a utilização da injetora, os testes foram encerrados.

Após a injeção de 50 peças, não foi notado danos críticos ao molde polimérico, que poderiam ocasionar problemas nos produtos injetados. Também, não ocorreu o superaquecimento do molde, tão pouco a aderência do polímero injetado, sendo fácil sua retirada, mesmo com a ineficiência do pino extrator, demonstrado na Figura 21.

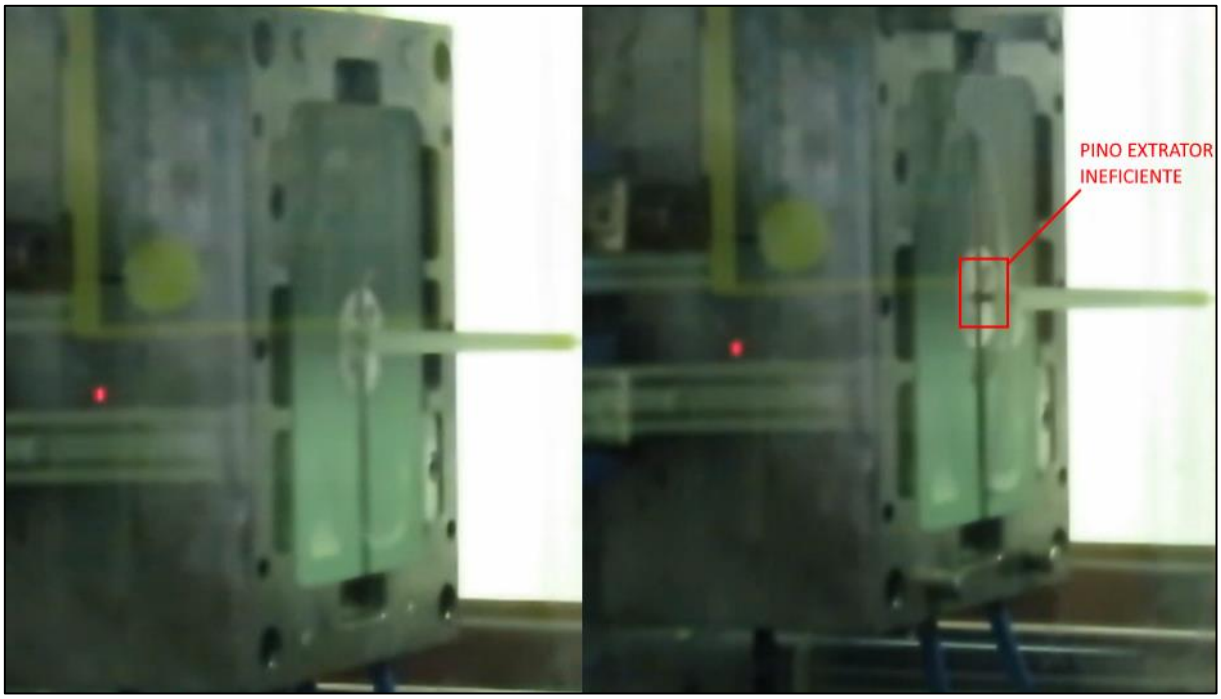

Figura 21 - Pino extrator
Fonte: Autoria própria (2017).

A ineficiência do pino extrator pode ser alterada, com o adicionamento de outro pino extrator, para que a peça possa ser removida com facilidade.

Em busca da utilização de prototipagem rápida para máquinas injetoras de plástico, o presente trabalho demonstrou a utilização do polímero Digital ABS após uma seleção dentre diferentes materiais, como matriz polimérica produzida por impressão 3D. Este se comportou de maneira a resistir, por pelo menos 50 injeções, mantendo suas propriedades e dimensões dentro do esperado. Isto demonstra que sua utilização em projetos de baixa produção ou mesmo na produção de protótipos, se torna viável, comparado a criação de uma matriz metálica. Porém, deve-se levar em conta os custos de produção de uma matriz e seu custo médio por peça produzida, no qual pode ser analisado através da Tabela 9, tendo como base uma matriz metálica para comparação.

Tabela 9 - Quadro comparativo custo por parte

Método de produção	Quantidade de peças	Material usado no protótipo	Custo Médio do Molde	Custo Médio por Parte
Impressão 3D FDM	10	FDM ou Plástico	N/A	Alto
CNC	100	Termoplástico	N/A	Alto
Moldagem por Silicone	100	Termofixo	Baixo	Médio
Injeção com Molde Polyjet	100	Termoplástico	Baixo	Médio
Injeção com Molde Metálico	20000+	Termoplástico	Muito Alto	Baixo

Fonte: Autoria própria.

Outro fato importante a ser analisado é o tempo de produção de um molde e seu preço, pois devido a necessidade de customização em massa, este deve estar pronto o mais rápido possível para o cliente. Podemos comparar o tempo de criação e o valor de um molde impresso com Digital ABS e outro feito em Alumínio conforme a Tabela 10, abaixo.

Tabela 10 - Comparativo Alumínio x Digital ABS

	Alumínio	Digital ABS
Tempo estimado	30 dias	7 horas
Custo estimado (dólares)	$1400,00	$396

Fonte: Autoria própria (2017).

O molde impresso em Digital ABS é 713 horas mais rápido do que o feito em alumínio e $1000,00 mais barato. Porém, deve ser ressaltada a baixa produtividade desses moldes, compensando apenas, para poucas injeções, mas com alta variabilidade de projeto.

5 CONCLUSÃO

O funcionamento básico dos processos envolvidos neste trabalho foi explicito e compreendido, podendo ser utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho.

Com isso, pode-se afirmar que a injeção do plástico pela injetora ocorreu da melhor maneira possível, resultando em dados satisfatórios que comprovam a eficiência do molde se tratando de baixa produtividade e alta customização. O material do molde se comportou como esperado, resistindo as temperaturas e pressões de injeção.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalho futuro, é imprescindível citar a necessidade de analisar a cavidade do molde como seu desgaste, a troca do inserto metálico por uma parte polimérica, a utilização de diferentes materiais e o controle de temperatura durante o processo. Estas análises trarão uma melhoria no entendimento do comportamento do molde.

REFERÊNCIAS

3D PRINTING INDUSTRY. **THE FREE BEGINNER'S GUIDE**. Disponível em: <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/processes/>. Acesso em 07 março 2017.

3DADDFAB. **3DAddFab - Powered by Objet Polyjet Technology.** Disponível em: <http://www.3daddfab.com/technology/>. Acesso em: 08 mar 2017.

ALY, A. A. Heat Treatment of Polymers: A Review**. International Journal of Materials Chemistry and Physics**, [S.l.], 19 ago. 2015. 2, p. 132-140. Disponível em: <http://www.aiscience.org/journal/allissues/ijmcp.html>. Acesso em: 08 mar. 2017.

ANOLE. **Injection molding process.** Disponível em < http://www.anole-hot-runner.com/injection-molding-process_296.htm> Acesso em: 04 mar 2017.

ASHBY, M. F. JONES, D. R. H. **Engineering Materials 2,** Amsterdam, HO : Elsevier, 2003, 381 p.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**, 7. ed. Rio Janeiro: LTC, 2008, 705 p.

CERQUEIRA, F. M.; MEDEIROS, M. H. G. de; AUGUSTO, O. Antioxidantes dietéticos: controvérsias e perspectivas. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 441-449, abril. 2007. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000200036&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 04 mar. 2017.

CRIVELLO, J. V.; REICHMANIS, Elsa. Photopolymer Materials and Processes for Advanced Technologies. **Chemistry of Materials** , [S.l.], v. 26, n. 1, p. 533-548, set. 2013. Disponível em: <http://pubs.acs.org/toc/cmatex/26/1>. Acesso em: 08 mar. 2017.

EOS. **Additive Manufacturing, Laser-Sintering and Industrial 3D printing.** Disponível em: < https://www.eos.info/additive_manufacturing/for_technology_interested> Acessado em: 01 abr 2017d.

GIBSON, I., ROSEN, D. W., STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies**, Springer, Nova Iorque, 2009

MACHINE DESIGN. **WHAT'S THE DIFFERENCE BETWEEN STEREOLITHOGRAPY AND SELECTIVE LASER SINTERING?.** Disponível em: <http://www.machinedesign.com/3d-printing/what-s-difference-between-stereolithography-and-selective-laser-sintering>. Acesso em: 07 mar 2017.

MAGALHÃES, P. I. G. **A validação de processos como garantia de conformidade dos produtos na indústria de dispositivos médicos**. 2010. 82 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010. Disponível em: <http://www.ufjf.br/ep/files/2014/07/2010_3_Pedro-Ivo.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2017.

MARQUES, K. **Manufatura Aditiva: o futuro do mercado industrial de fabricação e inovação (2014).** Disponível em: < http://www.eesc.usp.br/portaleesc/index.php?option=com_content&view=article&id=1193:manufatura-aditiva-o-futuro-do-mercado-industrial-de-fabricacao-e-inovacao&catid=115&Itemid=164 > Acesso em: 05 mar 2017.

RODA, Daniel Tietz. **Moldes para Injeção de Plásticos**. Disponível em: <http://www.tudosobreplasticos.com/moldes/moldes.asp>. Acesso em: 07 mar. 2017.

RUOHONEN et al. **Knowledge Based Mass Customization Strategies – Cases from Finnish Metal and Electronics Industries. (2003)**. Disponível em: <http://www.cs.uta.fi/is/julkaisut/2003/2003_ruohonen_1.pdf>. Acesso em: 23 abr 2017.

STRATASYS. **Application Note – Digital ABS.** Disponível em: < http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Best%20Practices_BP/BP_PJ_Digital ABS.pdf?v=635817315234043539> Acesso em 20 abr 2017a.

STRATASYS. **FDM Technology**. Disponível em: < http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology> Acessado em: 01 abr 2017b.

STRATASYS. **PLA - Economy thermoplastic for Stratasys F123 series printers.** Disponível em: <http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Shee ts/MSS_FDM_PLA_0117b_Web.pdf#_ga=2.157609471.432909516.1496521257117 6780189.1490354312 > Acessado em: 01 abr 2017c.

STRATASYS. **Polyjet Materials Data Sheet.** Disponível em: < http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_PJ_PJMaterialsDataSheet.pdf?v=635785205440671440> Acessado em: 01 abr 2017d.

TELFER, S. et al. Embracing additive manufacture: Implications for foot and ankle orthosis design: BMC Musculoskeletal Disorders, p. 2, Maio 2012.

ULLOA, M. E. P., Estudo do Efeito da Radiação Ionizante em Compósitos de Polipropileno/Pó de Madeira Usando Titanato de Bário como Agente de Acoplagem, Dissertação (Mestrado em Ciência em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2007.

VOLPATO, N., et al. **An analysis of Digital ABS as a rapid tooling material for polymer injection moulding.** Int. J. Materials and Product Technology,Vol. 52, Nos. 1/2, pp.3–16.