

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE ENGENHARIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

LUCAS DE OLIVEIRA ARAUJO

**PROJETO DE MOLDE PARA FABRICAÇÃO DE PEÇAS POR PRENSAGEM A
QUENTE A PARTIR DE MICROPLÁSTICO**

Juiz de Fora

2021

LUCAS DE OLIVEIRA ARAUJO

**PROJETO DE MOLDE PARA FABRICAÇÃO DE PEÇAS POR PRENSAGEM A
QUENTE A PARTIR DE MICROPLÁSTICO**

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

Orientador: Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini.

Juiz de Fora
2021

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

de Oliveira Araujo, Lucas.

Projeto de molde para fabricação de peças por prensagem a quente a partir de microplástico / Lucas de Oliveira Araujo. -- 2021.

43 p.

Orientador: Raphael Fortes Marcomini

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2021.

1. Molde. 2. PET. 3. Prensagem a quente. 4. Projeto. 5. Microplástico. I. Fortes Marcomini, Raphael, orient. II. Título.

LUCAS DE OLIVEIRA ARAUJO

**PROJETO DE MOLDE PARA FABRICAÇÃO DE PEÇAS POR PRENSAGEM A
QUENTE A PARTIR DE MICROPLÁSTICO**

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 09 de Março de 2021

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Luiz Gustavo Monteiro Guimarães
Universidade Federal de São João Del Rei

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me dar todas as condições necessárias para que eu pudesse atingir esse objetivo. Agradeço à minha mãe Aurora pela paciência, dedicação e motivação que foram cruciais para que eu chegasse até aqui. Agradeço ao meu pai Marcos por ser meu grande amigo e conselheiro. Ao meu irmão Davi e meu afilhado Gabriel por serem meu grande estímulo. À minha namorada Julia: obrigado por toda confiança, incentivo e amor. A todos os meus familiares que sempre acreditaram em mim e formam meu porto seguro.

Agradeço ao meu professor e orientador Raphael pela disponibilidade, paciência e ensinamentos que foram de grande ajuda neste trabalho.

RESUMO

Este trabalho teve o objetivo de projetar um sistema de molde para prensagem à quente de material polimérico (pó de PET) para aproveitamento de um material que atualmente é considerado pela indústria de reciclagem como resíduo e descartado. Foi projetado um molde simples, de baixo custo e que atende aos parâmetros necessários para que o processo ocorra de forma correta afim de gerar com sucesso um corpo de prova que será submetido futuramente a diferentes ensaios para melhor conhecimento de suas propriedades. O molde projetado foi simulado com a pressão indicada de uso de 30MPa e, também, com pressões extremas de 40 e 50MPa como fator de segurança e, como resultado, a peça está dentro dos limites de tolerância do material e tem sua produção considerada como viável pelo autor.

Palavras-chave: 1. Molde. 2. PET. 3. Prensagem a quente. 4. Projeto.

ABSTRACT

This work had the objective of designing a mold system for hot pressing polymeric material (PET powder) to use a material that is currently considered by the recycling industry as waste and discarded. A simple, low-cost mold that meets the basic parameters was designed for the process to occur correctly in order to successfully generate a specimen that will be subjected to different tests in the future to understand better its properties. The projected mold was simulated with the indicated pressure of use of 30MPa and also with extreme pressures of 40 and 50MPa as a safety factor and, as a result, the part is within the tolerance limits of the material and its production is considered viable by the author.

Keywords: 1. Hot pressing. 2. Mold. 3. PET. 4. Project.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Propriedade em relação ao aumento da massa molar (CANEVAROLO, 2006).	16
Figura 2: Volume específico durante um ciclo térmico (CANEVAROLO, 2006).	18
Figura 3: Etapas do processo de prensagem (REED, 1995).	20
Figura 4: Corpo de prova (AUTOR).	25
Figura 5: Vista isométrica da Base (AUTOR).	25
Figura 6: Vista frontal em corte da Base. (AUTOR).	25
Figura 7: Vista superior da Base (AUTOR).	26
Figura 8: Vista isométrica do Contramolde projetado (AUTOR).	26
Figura 9: Vista isométrica do Macho projetado (AUTOR).	27
Figura 10: Tensão de von Mises para 30 MPa (AUTOR).	28
Figura 11: Deslocamento do conjunto Macho e Contramolde para 30 MPa (AUTOR).	29
Figura 12: Tensão de von Mises para 40 MPa (AUTOR).	30
Figura 13: Tensão de von Mises para 50 MPa (AUTOR).	30
Figura 14: Deslocamento do conjunto Macho e Contramolde para 40 MPa (AUTOR).	31
Figura 15: Deslocamento do conjunto Macho e Contramolde para 50 MPa (AUTOR).	32
Figura 16: Tensão de von Mises para 30 MPa (AUTOR).	33
Figura 17: Vista da Base em corte para 30 MPa (AUTOR).	34
Figura 18: Tensão de von Mises para 40 MPa (AUTOR).	35
Figura 19: Tensão de von Mises para 50 MPa (AUTOR).	35
Figura 20: Vista da Base em corte para 40 MPa (AUTOR).	36
Figura 21: Vista da Base em corte para 50 MPa (AUTOR).	36
Figura 22: Desenho de detalhes da Base (AUTOR).	40
Figura 23: Desenho de detalhes do Macho (AUTOR).	41
Figura 24: Desenho de detalhes do Contra molde (AUTOR).	42
Figura 25: Renderização final (AUTOR).	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ângulos típicos das principais ligações covalentes (CANEVAROLO, 2006).....	15
Tabela 2: Valores de largura em função da espessura (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2003)	21
Tabela 3: Parâmetros utilizados para a produção de cada amostra (FERREIRA, 2016)	22
Tabela 4: Valores de densidade para cada amostra (FERREIRA, 2016)	22
Tabela 5: Volume final do corpo de prova (FERREIRA, 2016).....	23

LISTA DE SÍMBOLOS

cm ³	Centímetros cúbicos
l	Comprimento
h	Espessura
°C	Graus Celsius
T _{ci}	Início da cristalização a frio
b	Largura
MPa	Mega Pascal
mm	Milímetro
PET	Polietileno Tereftalato
kg	Quilograma
T _c	Temperatura de cristalização
T _m	Temperatura de fusão cristalina
T _g	Temperatura de transição vítrea

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2 MOTIVAÇÃO	12
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 Objetivo geral	13
1.3.2 Objetivos específicos	13
1.4 METODOLOGIA	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 POLÍMEROS	14
2.2 TEMPERATURA	16
2.3 SINTERIZAÇÃO	19
2.4 Prensagem a quente	19
3 LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS DO PROJETO	20
3.1 PARÂMETROS	20
3.2 PROJETO	23
3.3 SIMULAÇÕES	27
4 CONCLUSÕES	37
REFERÊNCIAS	38
APÊNDICE A	40

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria de reciclagem gera um grande refugo de pequenas frações de PET que são pequenas demais para serem utilizadas. Para aprimorar o destino deste material, ao evitar que o mesmo seja descartado, foi idealizado um molde que seja de baixo custo para que os pequenos pedaços de PET possam ser prensados à quente para serem transformados em corpos de provas a serem utilizados em ensaios mecânicos.

Conhecer as propriedades mecânicas do material amplia os horizontes para utilização e aplicação do mesmo que pode, futuramente, ser transformado em peças maiores e mais complexas que agreguem valor para a sociedade.

1.2 – MOTIVAÇÃO

O Polietileno Tereftalato (PET) é um polímero altamente cristalino obtido a partir de uma reação entre o ácido tereftálico e o etileno glicol. O PET nos dias de hoje tem diversas aplicações como embalagem para alimentos, bebidas e cosméticos. Suas aplicações vão além de embalagens com este produto sendo usado como matéria prima para peças de eletroeletrônicos e até mesmo seringas.

Além da alta versatilidade em sua utilização, o PET é uma matéria prima de baixo custo, baixo peso, boa resistência mecânica, inerte quimicamente e, por possuir propriedades termoplásticas, oferece a possibilidade de ser reprocessado e transformado diversas vezes.

Uma das transformações que podem ser aplicadas ao Polietileno Tereftalato é submeter esse produto a determinada temperatura e pressão para que o mesmo comece a ficar mole a ponto de ser moldado em diferentes formatos. O PET, ao ser reciclado, é transformado em pequenas esferas que são utilizadas para dar forma a novos produtos, porém, essa transformação produz frações que são pequenas demais para serem transformadas nessas esferas. Esses pequenos pedaços normalmente são descartados, pois não possuem utilidade para a indústria.

De acordo com o estudo de caso apresentado pelo trabalho de conclusão de curso de Wesley Ferreira, na empresa AG Plast, situada em Juiz de Fora, Minas Gerais, são gerados aproximadamente 700 kg por dia desse material.

Essas pequenas frações que são consideradas descartes atualmente geraram a motivação deste trabalho em encontrar uma forma de evitar que esse desperdício ocorra ao inseri-las novamente no ciclo de produção. (FERREIRA, 2016)

As frações do plástico possuem ainda um agravante: quando as partículas possuem tamanho máximo de 1 mm são consideradas microplásticos. Esse componente tem sido alvo de estudos por ser um material muito poluente, pois podem alterar a composição de certas partes do oceano e também prejudicam o ecossistema. Com o molde deste trabalho em funcionamento, o microplástico pode ser prensado a quente e transformado em diferentes corpos de provas e produtos, evitando, assim, seu descarte e futura poluição de mares e rios.

1.3 – OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Projetar um molde com controle de temperatura para obtenção de corpos de prova a partir do pó de PET no processo de prensagem a quente.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar um levantamento dos parâmetros como temperatura e pressão do processo de prensagem a quente de materiais poliméricos.
- Projetar um molde de baixo custo e de simples construção que possibilite a realização da prensagem a quente do pó de PET criando corpos de prova que, futuramente, serão ensaiados para que as propriedades do material após o processo sejam melhor conhecidas.

1.4 – METODOLOGIA

Como os processos de prensagem a quente, em sua maioria, são feitos por equipamentos que são grandes e caros o desafio deste trabalho foi conseguir projetar um molde que facilitasse essa tarefa através do uso somente do mesmo e de uma prensa hidráulica convencional.

A solução encontrada foi a utilização de um elemento de aquecimento junto ao molde projetado para que a amostra atinja a temperatura ideal enquanto o mesmo é pressionado na prensa hidráulica que deixará o material na pressão adequada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão apresenta os principais conceitos de polímeros que estão relacionados com este trabalho para entendimento das características, formação e faixas de temperatura relevantes. São mostrados também os processos de transformação pelos quais o PET a ser reaproveitado será submetido durante a utilização do molde projetado neste trabalho.

2.1 – POLÍMEROS

Canevarolo (2006) explica que polímero é uma grande molécula de alta massa molar composta por muitas pequenas moléculas chamados monômeros que se repetem ao longo da cadeia por conta da polimerização com uma unidade de repetição da cadeia polimérica que recebe o nome de mero. São fixas por ligações covalentes cujos ângulos e estruturas são apresentadas na Tabela 1. Esses polímeros podem ser divididos em plásticos, borrachas e fibras, dependendo da estrutura química, ligação, número médio de meros e número de monômeros.

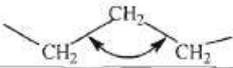
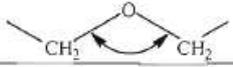
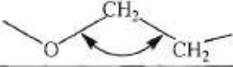
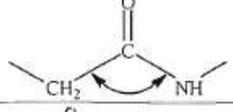
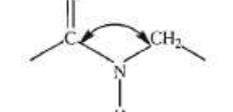
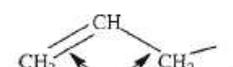
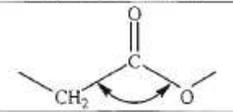
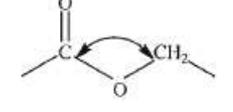
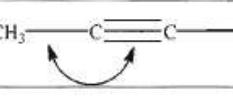
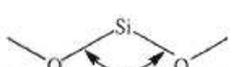
Ligação	Ângulo (° '")
	109° 28''
	108
	110
	113
	117
	122
	116
	113
	180
	142
	110

Tabela 1: Ângulos típicos das principais ligações covalentes mais comuns em polímeros.
Fonte: CANEVAROLO, 2006.

O comprimento molar dos polímeros pode variar em uma ampla faixa o que, conseqüentemente, varia sua massa molar, suas propriedades físico-químicas e suas características. Essas alterações irão determinar a aplicação adequada de cada tipo de polímero. A Figura 1 mostra como o aumento da massa molar de um polímero pode afetar uma determinada propriedade do mesmo.

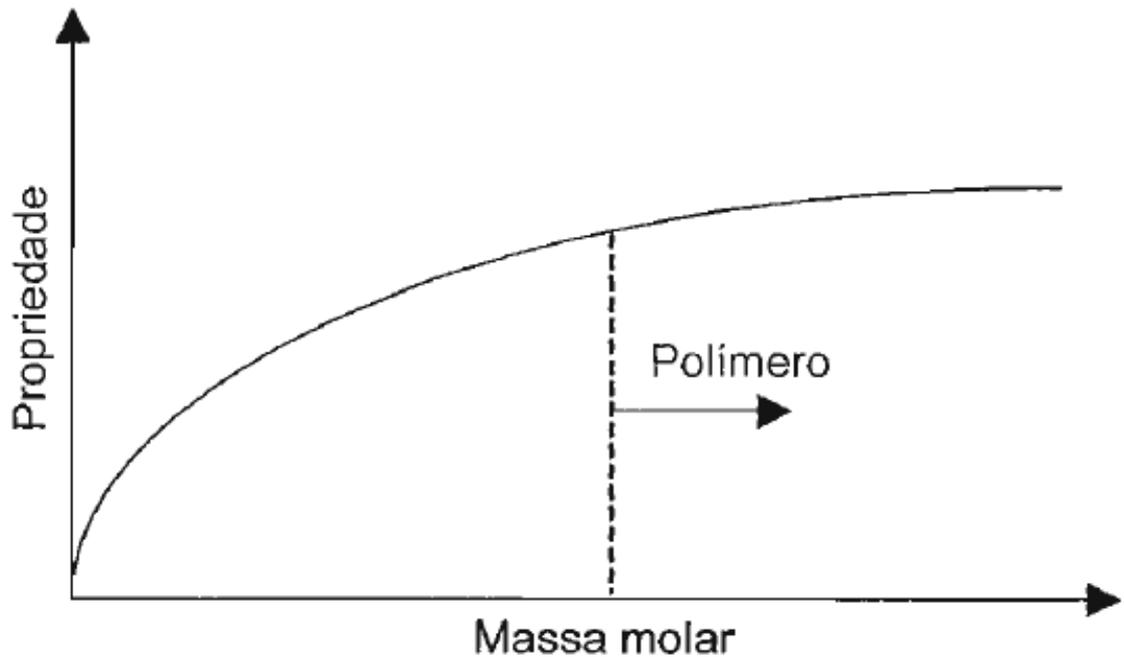


Figura 1: Variação de uma propriedade do polímero com o aumento da massa molar.
Fonte: CANEVAROLO, 2006.

Alguns fatores influenciam a síntese de polímeros e um desses parâmetros é a temperatura. Aumentar a temperatura faz com que a taxa de reação seja maior, visto que quanto maior a temperatura mais energia é fornecida ao sistema então a energia de ativação da reação é vencida de forma mais fácil. Esse processo tem um ponto ótimo de temperatura que após ser ultrapassado e a longo prazo faz com que a polimerização diminua por ser um processo exotérmico que, nestas condições, desloca o equilíbrio no sentido dos reagentes.

2.2 - TEMPERATURA

O grau de agitação dos átomos nas moléculas define o nível de mobilidade de uma cadeia polimérica que, por sua vez, determina características físicas do material como dureza e tenacidade. Essa agitação dos átomos é diretamente proporcional à temperatura. Para os polímeros podemos definir três temperaturas de transição importantes: transição vítrea, fusão cristalina e cristalização.

Canevarolo (2006) apresenta a temperatura de transição vítrea (T_g) como uma faixa de temperatura na qual o aquecimento de um material polimérico permite que as cadeias poliméricas passem por mudança de conformação. Essa temperatura deve ser atingida para

que o polímero possua energia interna suficiente para que uma cadeia seja deslocada em relação a outra em mudanças conformacionais. Quando o material está abaixo da T_g o mesmo encontra-se no estado vítreo que é caracterizado por ser duro, rígido e quebradiço. Com o aumento da temperatura o material tem energia suficiente para que as cadeias amorfas adquiram mobilidade e, então, quando se encontra acima da temperatura de transição vítrea o material apresenta propriedades borrachosas com comportamento flexível e dúctil. A transição vítrea ocorre macroscopicamente na mudança de algumas propriedades como capacidade calorífica, coeficiente de expansividade térmica e propriedades viscoelásticas.

A temperatura de fusão cristalina (T_m) é o valor médio da faixa de temperatura que, quando aquecido, as regiões cristalinas do material desaparecem por conta da fusão dos cristalitos. Essa temperatura representa o nível de energia interna na qual as forças intermoleculares secundárias são vencidas e o material passa do estado borrachoso para viscoso.

Quando um polímero semicristalino fundido é resfriado até certa temperatura suficientemente baixa as grandes cadeias poliméricas começam a se organizar de forma regular formando uma estrutura cristalina. Outras cadeias continuam essa ordenação espacial até que a massa polimérica esteja totalmente cristalizada. A temperatura na qual esse processo de organização espacial começa é conhecida como temperatura de cristalização (T_c) e está localizada entre a T_g e T_m , conforme pode ser visto na Figura 2.

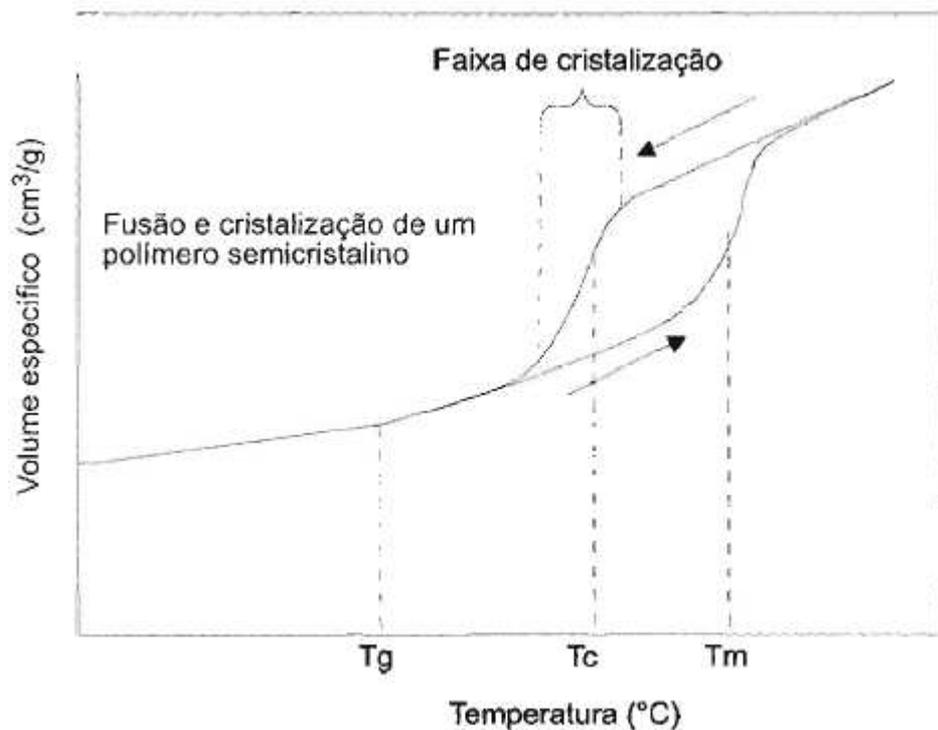


Figura 2: Variação do volume específico durante um ciclo térmico de aquecimento e resfriamento. Em destaque a faixa de temperatura que ocorre a cristalização. Fonte: CANEVAROLO, 2006.

Para uso na engenharia o plástico tem uma temperatura máxima recomendada, chamada de temperatura de amolecimento. De acordo com Canevarolo (2006) para polímeros pouco cristalinos e amorfos essa temperatura de amolecimento é ligeiramente abaixo da temperatura de transição vítrea enquanto para polímeros altamente cristalinos é próxima e abaixo da temperatura de fusão cristalina. Canevarolo (2006) define o Polietileno Tereftalato (PET) como um polímero altamente cristalino e coloca que a temperatura máxima de uso para engenharia do PET é de 100 °C abaixo da temperatura de fusão cristalina do mesmo. Caso esse valor seja ultrapassado a peça pode ser instabilizada devido à formação de pequenos cristais.

Os estados físico-mecânicos de um polímero semicristalino possuem três classificações simples em relação a temperatura: vítreo, borrachoso e viscoso. O polímero estará no estado vítreo quando sua temperatura é inferior à temperatura de transição vítrea, no qual o nível energético é baixo e insuficiente para gerar mobilidade das cadeias, sendo o polímero rígido e frágil. Já o borrachoso ocorre entre as temperaturas de transição vítrea e fusão cristalina, cujo nível energético é suficiente para que ocorra mobilidade para a fase amorfa, porém, de forma que a fase cristalina se mantenha rígida. O comportamento é semelhante ao da borracha vulcanizada. O estado viscoso é atingido em temperaturas superiores à temperatura

de fusão cristalina, onde o nível energético é alto e as cadeias poliméricas possuem alta mobilidade.

2.3 - SINTERIZAÇÃO

De acordo com Shackelford (2008), sinterização (do grego *sintar*, “escória” ou “cinza”) é qualquer processo que forma uma massa densa pelo aquecimento, porém, sem que ocorra a fusão. Os poros entre as partículas adjacentes encolhem continuamente devido à difusão do estado sólido em alta temperatura dos átomos para a parte externa do contorno dos grãos em direção ao poro, ou seja, é o processo de fabricação de um produto através da ligação das partículas de pó.

A difusão no estado sólido gera uma densificação do pó e esse processo ocorre em temperatura inferior à temperatura exigida na fundição. Essa temperatura alta o suficiente para permitir a ligação das moléculas no estado sólido permite, também, o crescimento do grão.

2.4 – PRENSAGEM A QUENTE

De acordo com Reed (1995) é considerado prensagem um processo em que ocorra, simultaneamente, a compactação e a modelagem de um pó ou material granular que esteja em uma matriz ou molde. Na primeira etapa do processo de prensagem o molde ou matriz fica aberto para que ocorra o enchimento. Em seguida, o mesmo é fechado e, então, ocorre a prensagem propriamente dita. Ao final desse processo o molde é aberto para ejeção do produto final. A Figura 3 apresenta as posições que a matriz ou molde assume durante cada etapa.

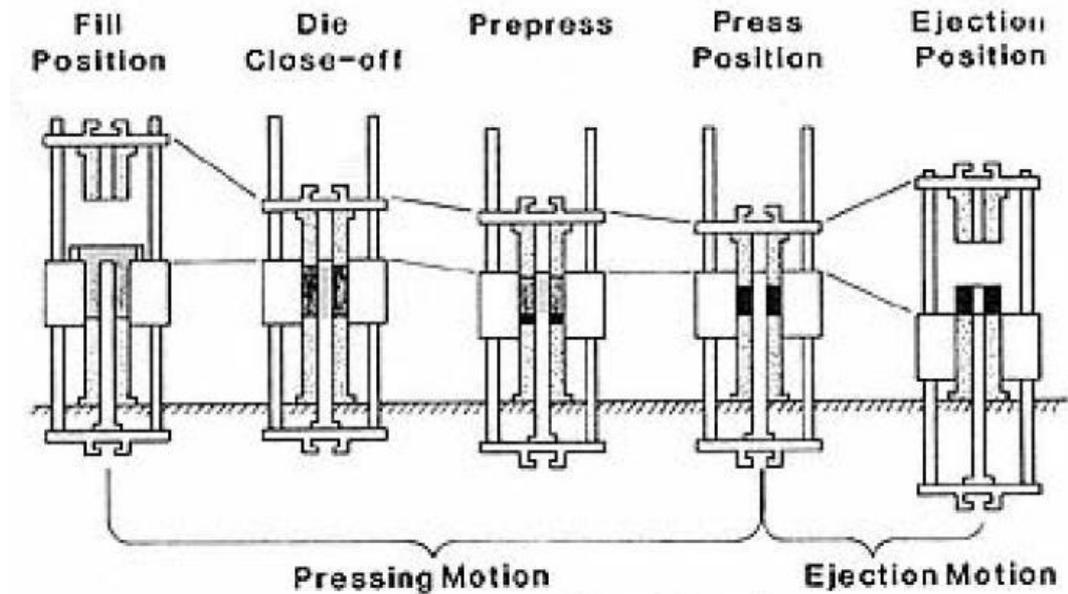


Figura 3: Etapas do processo de prensagem. Fonte: REED, 1995.

O processo de prensagem a quente é similar à sinterização, porém, é necessário que o material trabalhado esteja sob pressão durante o processo. Então, para que um equipamento realize a prensagem à quente é necessário que o mesmo possua um dispositivo mecânico capaz de aplicar a pressão no material e também uma fonte de calor para elevar o grau de agitação das moléculas. A temperatura realiza o aumento de transporte de material enquanto a pressão exercida é responsável por intensificar esse transporte.

3 LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS DO PROJETO

3.1 - PARÂMETROS

Com objetivo de conhecer melhor as propriedades do PET após o processo de prensagem a quente, no qual será utilizado o molde projetado no presente trabalho, serão feitos ensaios no produto final. Um dos primeiros ensaios a ser feito é o de flexão. Pelo menos cinco corpos de prova devem ser testados em cada direção. Caso seja necessária maior precisão no ensaio, mais de cinco corpos de prova podem ser utilizados. O corpo de prova para o ensaio de flexão deve ter, preferencialmente, 80 ± 2 mm de comprimento (l), $10,0 \pm 0,2$ mm de largura (b) e $4,0 \pm 0,2$ mm de espessura (h). Para corpos de prova de

dimensões diferentes das indicadas como preferenciais, algumas regras devem ser seguidas. A relação entre comprimento e espessura deve ser de 20 ± 1 . A tabela 2 apresenta os valores indicados para a largura do corpo de prova de acordo com sua espessura. (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2003)

Espessura (h)	Largura (b)
$1 < h \leq 3$	$25,0 \pm 0,5$
$3 < h \leq 5$	$10,0 \pm 0,5$
$5 < h \leq 10$	$15,0 \pm 0,5$
$10 < h \leq 20$	$20,0 \pm 0,5$
$20 < h \leq 35$	$35,0 \pm 0,5$
$35 < h \leq 50$	$50,0 \pm 0,5$

Tabela 2: Valores (em milímetros) de largura em função da espessura para corpos de prova. Fonte: ISO 178.

Levando em consideração as regras e recomendações da norma apresentadas acima, este projeto teve suas dimensões definidas de forma que após a prensagem à quente do pó de PET o corpo de prova tenha as dimensões citadas como preferenciais, conforme a Figura 4, ou seja, 80 mm de comprimento, 10 mm de largura e 4 mm de espessura.

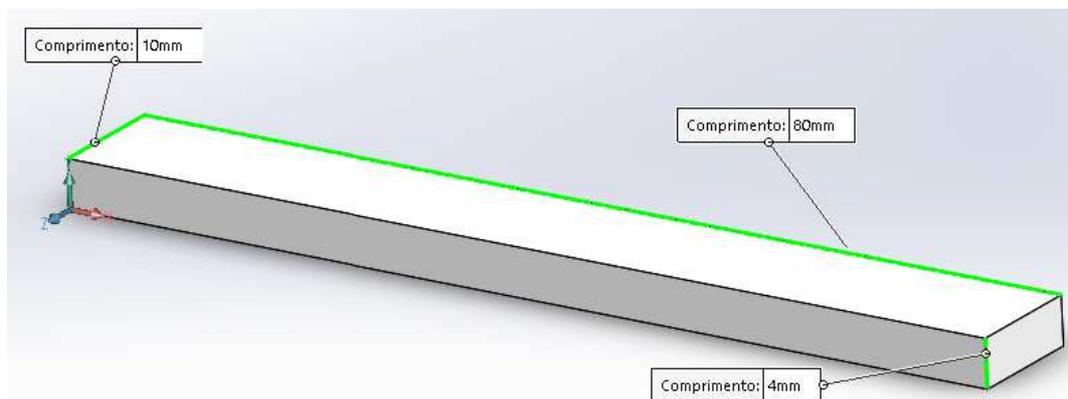


Figura 4: Corpo de prova após o processo de prensagem a quente. Fonte: AUTOR.

Outras considerações importantes feitas para o presente trabalho são temperatura e pressão necessárias para que o processo de prensagem à quente seja concluído com sucesso formando um corpo de prova denso e como peça única. Foram feitos diversos testes que variaram a temperatura, tempo de aquecimento e resfriamento e o tempo em que a amostra ficou na temperatura máxima definida. Todos os parâmetros mantiveram a pressão

constante de 30 MPa. Para esses testes foi utilizada uma embutidora que oferece a possibilidade de variar esses parâmetros, porém, o corpo de prova é feito somente em forma circular de diâmetro constante. (FERREIRA, 2016)

Wesley Ferreira (Ferreira, 2016), informa que as melhores amostras de corpos de provas produzidas foram no experimento em que a quantidade de massa colocada para ser prensada foi definida e rigorosamente controlada como 20 gramas. As condições mais adequadas foram: amostra comprimida a 110 °C por 2 minutos e 30 segundos, 130 °C por 3 minutos e 15 segundos e, por fim, 150 °C durante 2 minutos. Todos os ensaios foram feitos com pressão constante de 30 MPa. (FERREIRA, 2016)

Amostra	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Temperatura 1 (°C)	Temperatura 2 (°C)	Pressão (MPa)
1	00:14:00	00:03:00	00:02:00	39	150	30
2	00:11:00	00:03:00	00:03:15	39	130	30
3	00:08:00	00:03:00	00:02:30	39	110	30
4	00:07:00	00:03:00	00:02:50	39	90	30

Tabela 3: Parâmetros utilizados para a produção de cada amostra. Fonte: FERREIRA, 2016.

Na tabela 3 os valores de Tempo 1 e Tempo 2 fazem referência ao tempo necessário para aquecimento e resfriamento do equipamento, enquanto o Tempo 3 é o tempo no qual a amostra ficou submetida à temperatura máxima, representada por Temperatura 2 na tabela 3.

A temperatura máxima na qual o experimento foi realizado foi de 150 °C e as densidades finais do corpo de prova em cada amostra são apresentadas na Tabela 4 que apresenta, também, a densidade relativa desses corpos de prova quando comparados ao valor teórico de densidade do PET que é de 1,38 g/cm³.

Amostra	Tempo 1	Tempo 2	Temperatura 2 (°C)	Densidade do PET (g/cm ³)	Densidade relativa (%)
1	00:14:00	00:02:00	150	1,293	93,696
2	00:11:00	00:03:15	130	1,277	92,536
3	00:08:00	00:02:30	110	1,266	91,739
4	00:07:00	00:02:50	90	1,168	84,638

Tabela 4: Valores de densidade para cada amostra. Fonte: FERREIRA, 2016.

A quantidade de massa de pó de PET utilizada foi suficiente para gerar um bloco de volume 15,54 cm³ na condição de maior temperatura, conforme pode ser visto na tabela 3. De acordo com as dimensões definidas para o corpo de prova que será produzido pelo molde do presente trabalho, o volume final do mesmo deve ser de 3,2 cm³. Sendo assim, aproximadamente 4,14 gramas de material colocadas no molde projetado neste trabalho será suficiente para gerar o corpo de prova nas dimensões desejadas.

Amostra	Tempo 1	Tempo 3	Temperatura 2 (°C)	Massa (g)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm ³)
1	00:14:00	00:02:00	150	20,10	39,80	12,50	15,54
2	00:11:00	00:03:15	130	20,00	39,80	12,60	15,66
3	00:08:00	00:02:30	110	20,00	39,80	12,70	15,79
4	00:07:00	00:02:50	90	19,90	39,80	13,70	17,03

Tabela 5: Volume final do corpo de prova em função da temperatura máxima utilizada.
Fonte: FERREIRA, 2016.

A temperatura para que o processo ocorra deve ser superior à T_g, pois, conforme explicado no Capítulo 2 deste trabalho, abaixo desta temperatura as cadeias não permitem mobilidade, portanto o processo não teria sucesso. Na indústria em geral o PET tem suas pré-formas reaquecidas entre a temperatura de transição vítrea e o início da cristalização a frio (T_{ci}). A temperatura de transição vítrea do PET é de, aproximadamente, 71°C enquanto a temperatura de cristalização e a temperatura de fusão ficam em torno de 120°C e 255°C, respectivamente. Não é interessante, para o processo de prensagem a quente, que o material atinja temperaturas próximas ou superiores à temperatura de fusão, pois as alterações da estrutura interna e seu estado viscoso prejudicariam o processo.

3.2 – PROJETO

O molde projetado teve dois objetivos iniciais: baixo custo e facilidade de usinagem. Sendo assim, foi projetado um molde baseado nos que são amplamente utilizados na prensagem tradicional, porém, com adicional de um elemento de aquecimento o que

possibilita a realização de prensagem à quente somente utilizando o molde proposto por este trabalho e uma prensa hidráulica convencional.

O equipamento desenvolvido possui três componentes: uma base, um contramolde e um macho. A montagem final dos componentes e os desenhos de detalhes estão no Apêndice A.

A base é retangular com 120 mm de comprimento, 50 mm de largura e 30 mm de altura. Seu centro possui um vão de 80 mm de comprimento e 10 mm de largura no qual o pó de PET será depositado e prensado. Longitudinalmente a peça possui 4 furos passantes de diâmetro 8 mm cujo objetivo é alocar o elemento de aquecimento responsável por deixar todo o conjunto na temperatura desejada para que o processo ocorra. Esses canais foram feitos no eixo longitudinal da peça por conta da maior área de contato com o objetivo de maximizar a transferência de calor entre as peças e o elemento de aquecimento. Foi idealizado para utilização como elemento de aquecimento uma resistência convencional que é amplamente encontrada em fornos elétricos e grelhas elétricas, visto que esse elemento pode ser moldado em diferentes formatos e é capaz de atingir temperaturas inclusive superiores à temperatura solicitada pelo projeto. A peça contém um quinto furo passante em seu eixo longitudinal de 3,5mm de diâmetro cujo objetivo é alocar um termopar do tipo K comumente utilizado em fornos elétricos juntamente com o termostato que será responsável pela medida da temperatura de todo o conjunto. Foi definido que o furo para alocar o termopar deveria ser feito em uma região de menor solicitação de esforços mecânicos da peça e, também, o mais próximo possível ao vão interno da peça para que a medida da temperatura desta área tenha maior precisão. Esse local foi validado com o auxílio das simulações realizadas que são apresentadas no tópico 3.3 deste trabalho.

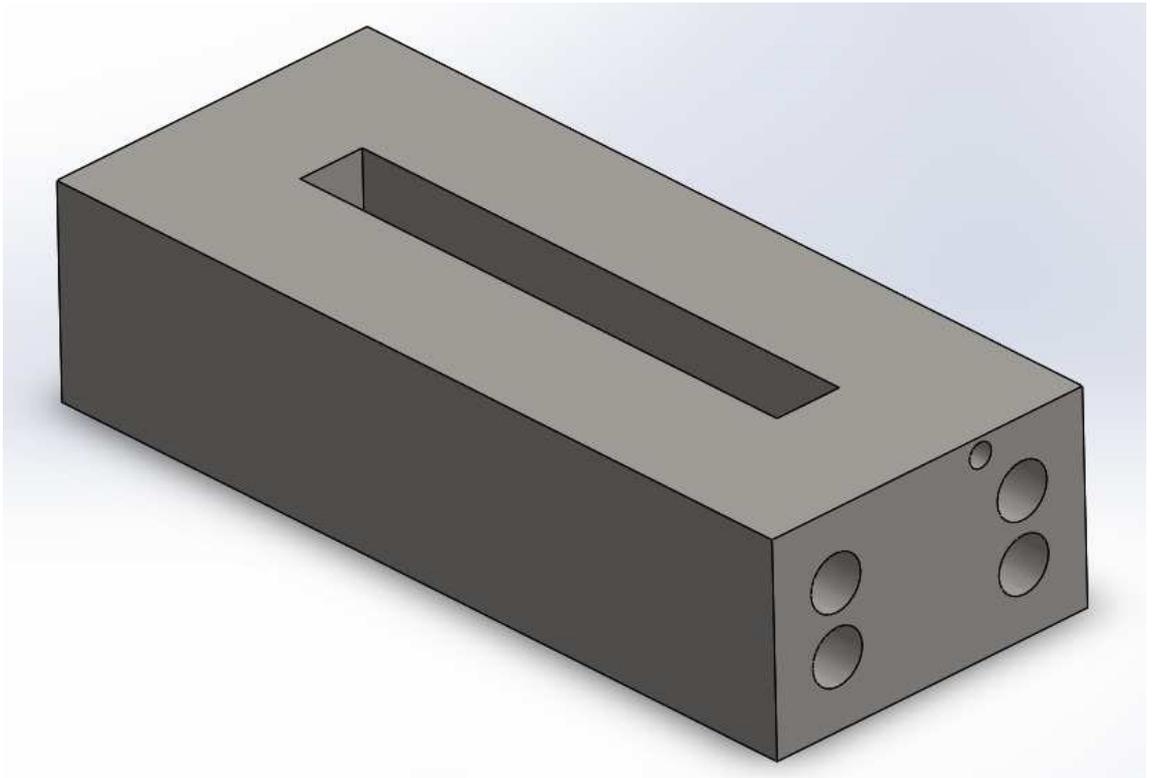


Figura 5: Vista isométrica da Base. Fonte: AUTOR.

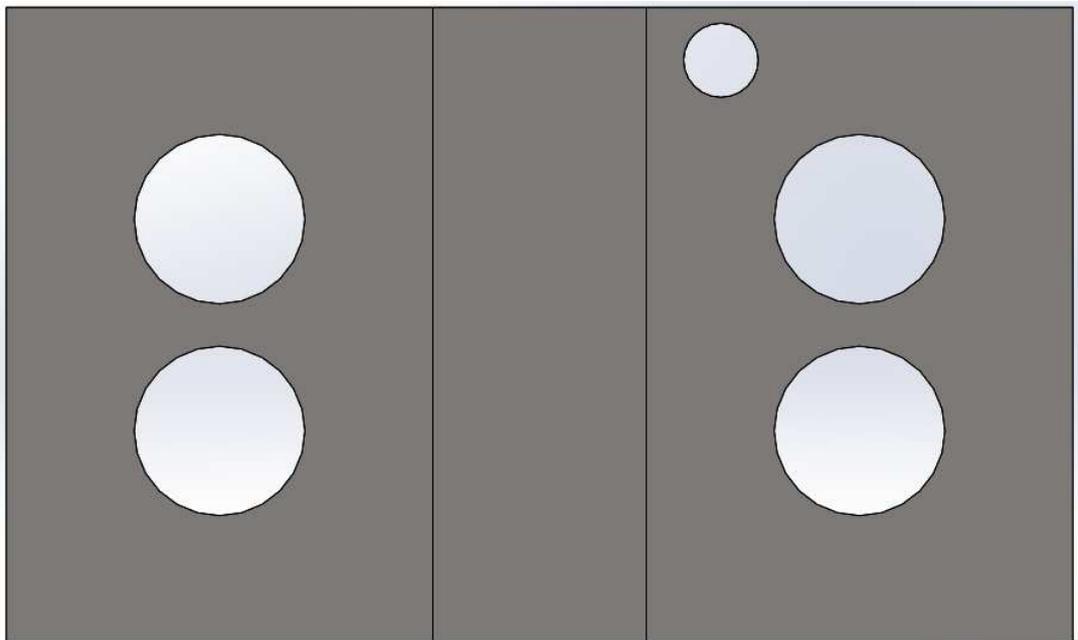


Figura 6: Vista frontal em corte da Base. Fonte: AUTOR

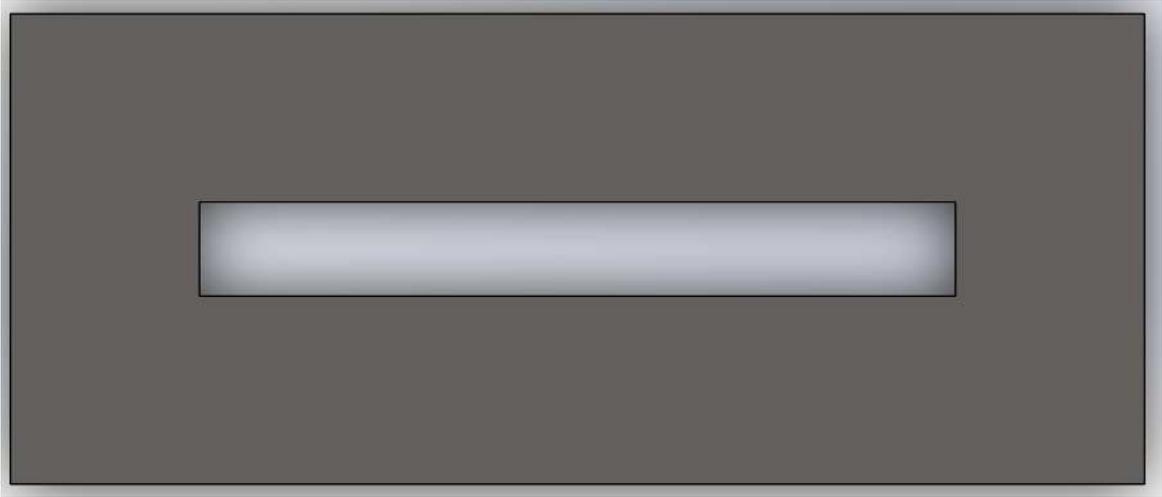


Figura 7: Vista superior da Base. Fonte: AUTOR

No fundo da seção retangular contida na Base é posicionado um contramolde de 80 mm de comprimento, 10 mm de largura e 10 mm de altura. Esse contramolde é responsável por cobrir o fundo da Base. É nessa peça que o material a ser prensado vai ser depositado. O contramolde exercerá também uma força de reação auxiliando para que o corpo de prova seja prensado de forma uniforme.

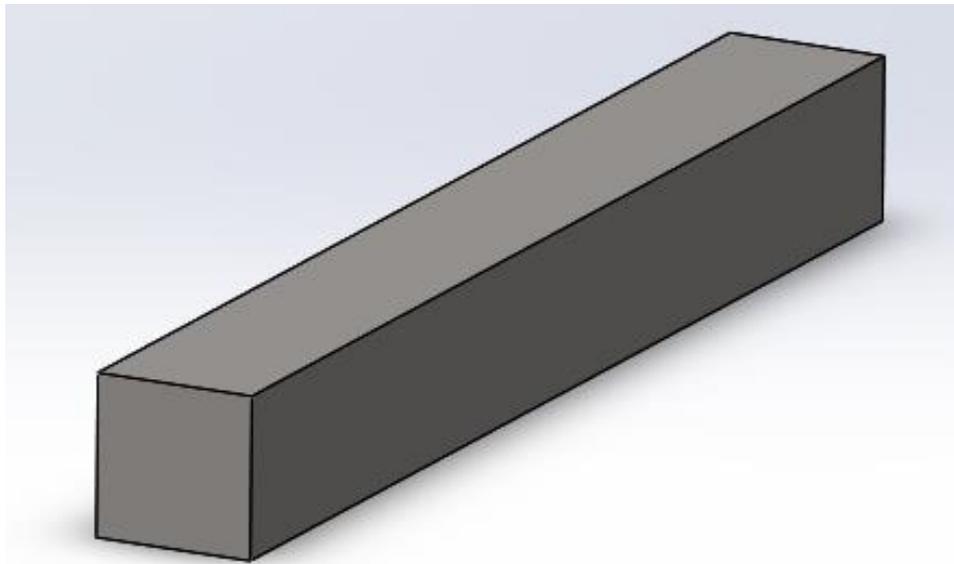


Figura 8: Vista isométrica do Contramolde projetado. Fonte: AUTOR.

Por fim, a terceira peça que integra o sistema é o Macho. Esse componente é similar ao Contramolde sendo um pouco maior. O Macho terá sua face inferior em contato com o corpo de prova que está sendo prensado e sua face superior em contato com a prensa hidráulica

responsável por fornecer a força de 24.000N para que a pressão interna seja de 30 MPa. Essa peça tem 80 mm de comprimento, 10 mm de largura e 20 mm de altura.

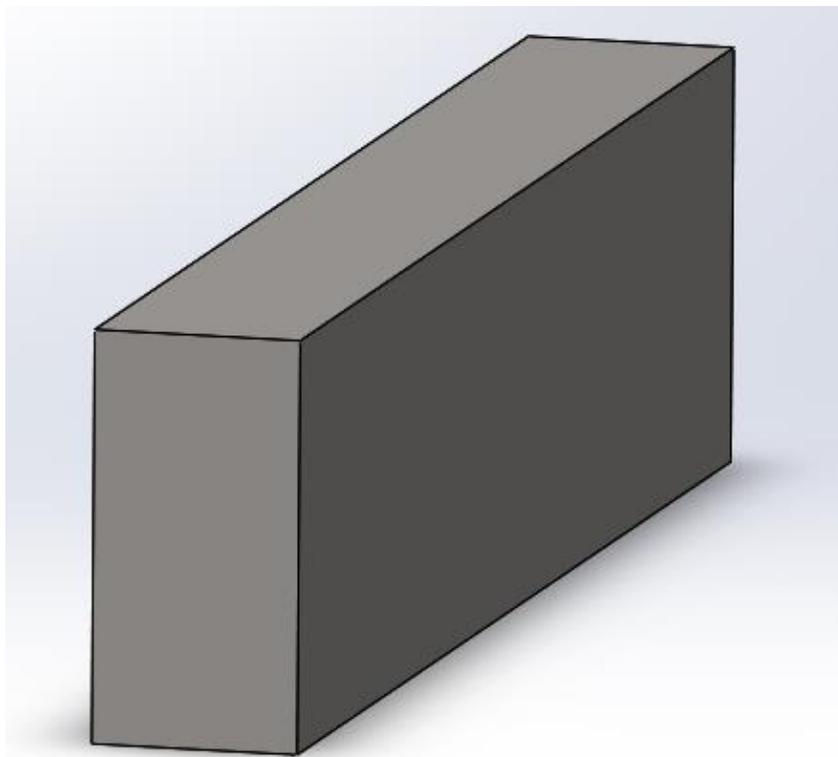


Figura 9: Vista isométrica do Macho projetado. Fonte: AUTOR.

3.3 – SIMULAÇÕES

Todos os três componentes foram projetados e idealizados para serem fabricados em Aço Inox 316L polido, pois é levado em consideração que o corpo de prova deve ser submetido a temperaturas superiores a 100 °C e a uma pressão de 30 MPa e o acabamento do molde deve ser refinado de modo que o ajuste entre as peças não permita a ocorrência de vazamento durante a prensagem. Sendo assim, todos os componentes devem ser rígidos o suficiente para suportar essas condições sem que haja deformação ou qualquer alteração que prejudique a qualidade final do corpo de prova. Como meio de validação dos componentes foram feitas simulações no software SolidWorks com o objetivo de verificar as tensões e deformações dos componentes.

As primeiras peças a serem ensaiadas foram o Macho e o Contramolde. Esses componentes foram colocados juntos e pressionados um contra o outro na simulação para verificar o comportamento do conjunto. Foi considerado, durante a simulação, um carregamento distribuído, pois a área superior do Macho é muito pequena e será praticamente toda preenchida pelo apoio da própria prensa hidráulica, sendo assim, o

carregamento real será distribuído por toda a peça. A Figura 9 apresenta o resultado da simulação feita para uma situação em que o conjunto é submetido a uma pressão de 30 MPa. Conforme é possível ver pela escala, pelo critério de falha de von Mises, o limite de escoamento do material é de 170 MPa e a tensão máxima presente no conjunto foi de 67,1 MPa, ou seja, muito inferior ao limite. Sendo assim, o componente é válido.

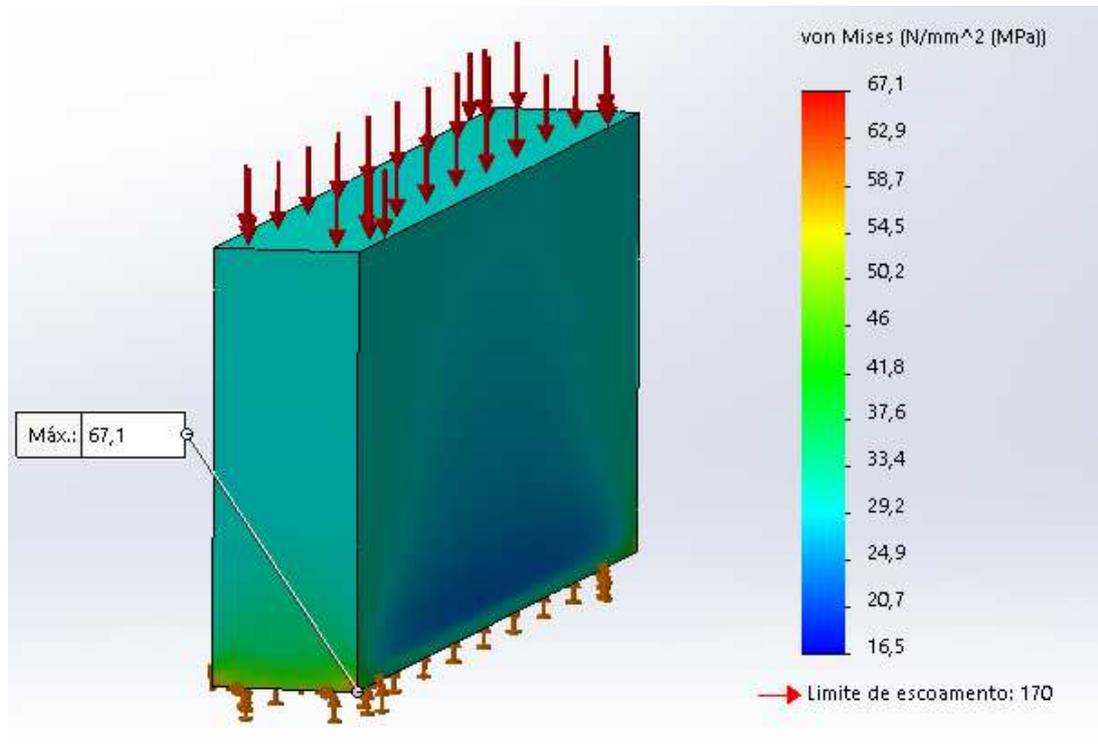


Figura 10: Tensão de von Mises para 30 MPa de pressão aplicada. Fonte: AUTOR.

Nas mesmas condições também foi analisado o deslocamento do conjunto com o objetivo de verificar o quanto cada peça se deformou. Através da Figura 10 é possível ver que o deslocamento máximo ocorrido no conjunto ficou concentrado no vértice superior. Esse deslocamento foi de 0,0049 mm aproximadamente. O deslocamento é extremamente baixo e, levando em consideração as incertezas das medidas do corpo de prova apresentadas nos parâmetros do projeto (Capítulo 3), é possível afirmar que esse deslocamento pode ser considerado como desprezível.

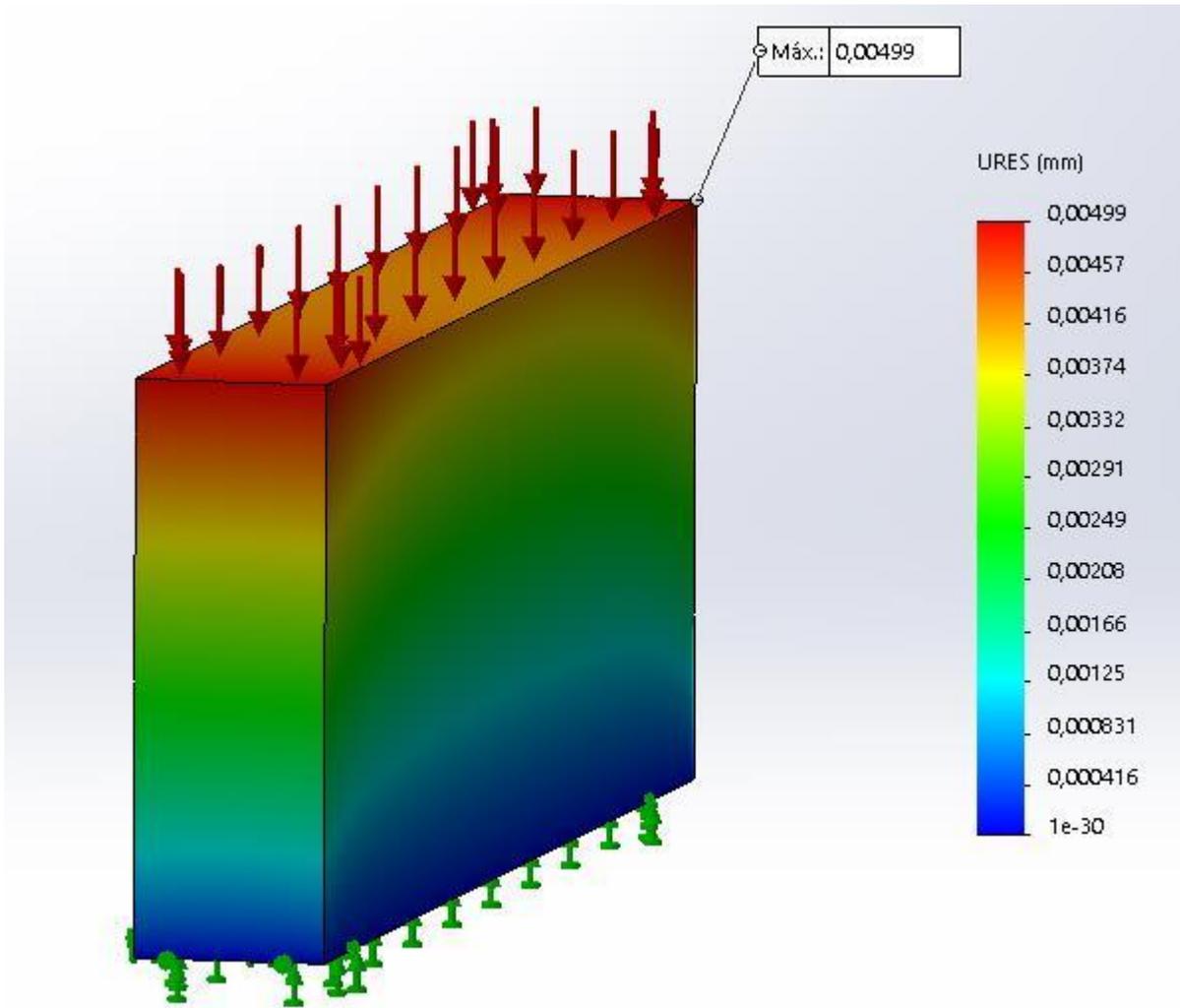


Figura 11: Deslocamento do conjunto Macho e Contramolde para 30 MPa de pressão aplicada.
Fonte: AUTOR.

Como fator de segurança foram feitas simulações em duas condições em que o conjunto é submetido a pressões superiores à pressão a qual o equipamento será utilizado. As mesmas peças foram simuladas para condição de serem expostas a 40 MPa e, por fim, 50 MPa de pressão. As Figuras 11 e 12 mostram que o conjunto de Macho e Contramolde quando exposto a 40 MPa e 50 MPa de pressão apresenta tensão de von Mises de 89,5 MPa e 112 MPa, respectivamente. Conforme visto na Figura 9, o limite de escoamento do material é de 170 MPa e, sendo assim, o conjunto suporta as duas condições extremas testadas e ficando, ainda, bem abaixo do limite de escoamento.

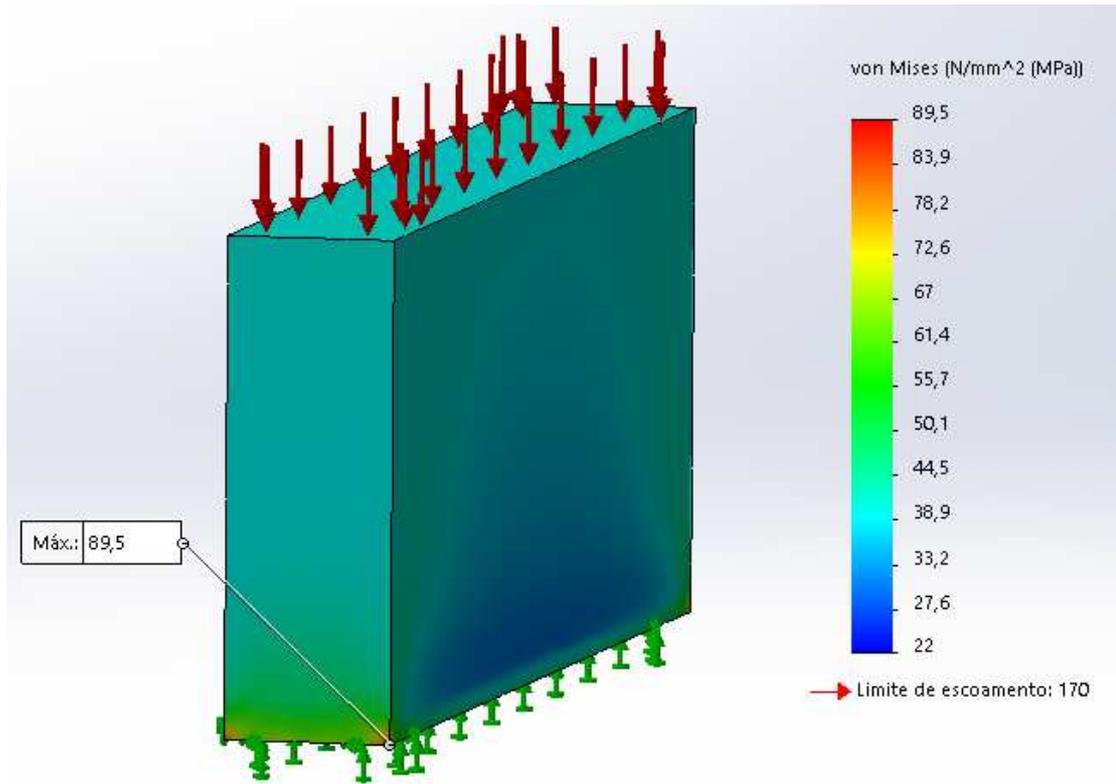


Figura 12: Tensão de von Mises para 40 MPa de pressão aplicada. Fonte: AUTOR.

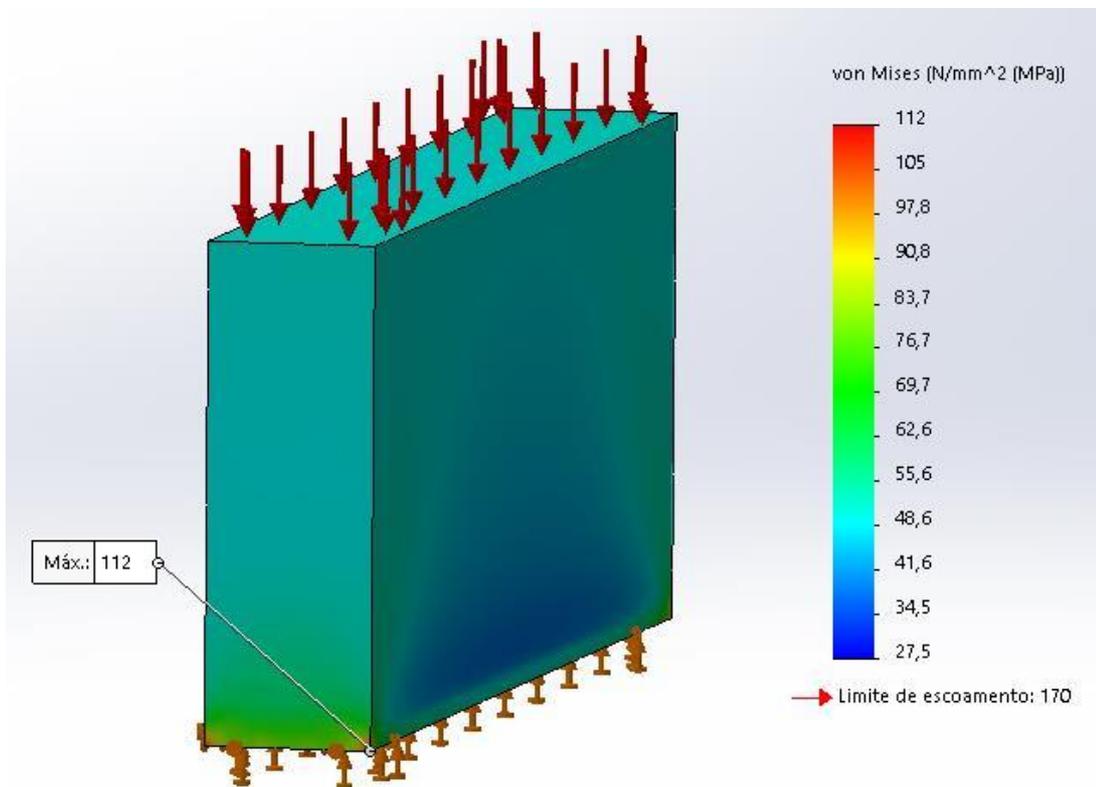


Figura 13: Tensão de von Mises para 50 MPa de pressão aplicada. Fonte: AUTOR.

Com as tensões validadas com grande margem de segurança foi analisado, por fim, o deslocamento do conjunto para as condições de pressão extrema aplicadas para verificar que o sistema não sofreria deformação grande o suficiente para prejudicar a qualidade do corpo de prova final. Como pode ser visto nas Figuras 13 e 14, o deslocamento, conforme era esperado, foi máximo no vértice superior como na situação anterior e teve valor de 0,00665 mm e 0,00831 mm para 40 MPa e 50 MPa, respectivamente. Sendo assim, ainda que nas condições extremas de pressão, o deslocamento foi mínimo e pode ser desconsiderado seu efeito no produto final.

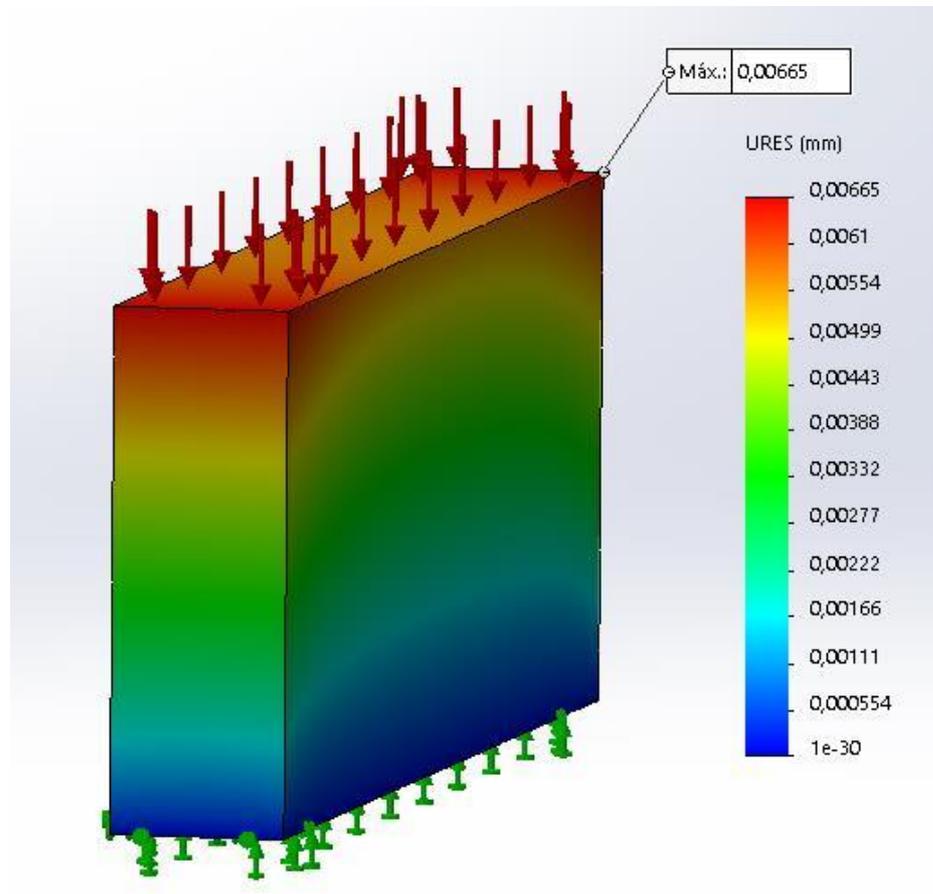


Figura 14: Deslocamento do conjunto Macho e Contramolde para 40 MPa de pressão aplicada.
Fonte: AUTOR.

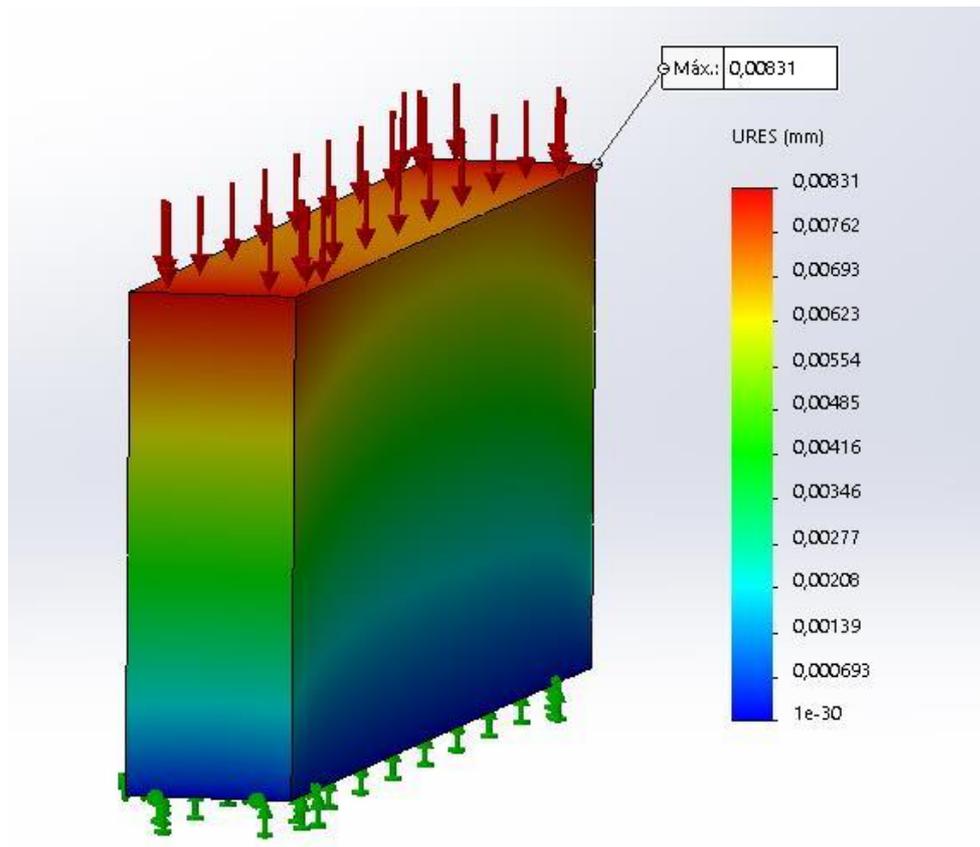


Figura 15: Deslocamento do conjunto Macho e Contramolde para 50 MPa de pressão aplicada.
Fonte: AUTOR.

Apesar de o processo ser uma prensagem uniaxial, é necessário levar em conta que o corpo de prova irá exercer força nas faces internas da base do molde durante o processo ao tentar se expandir como forma de resistir à pressão aplicada no mesmo. Levando isso em consideração, foi feita uma simulação que o corpo de prova aplicará a mesma pressão de 30 MPa nas paredes internas da Base. Essa pressão será aplicada pelas laterais da amostra, sendo assim, para fins de simplificação, foi considerado que a pressão lateral ocorrerá somente nessa área restrita. Na Figura 15 é possível ver, através do critério de falha de von Mises, que o limite de escoamento da Base do molde é o mesmo que o Macho e o Contramolde, conforme esperado, visto que todos são feitos em Aço Inox 316L. O ponto de maior solicitação, de acordo com a simulação, foi na aresta e teve valor de 49,2 MPa, ficando longe do limite de escoamento do material. Esse pico de esforço localizado na aresta já era um fato esperado, visto que esses pontos são grandes concentradores de tensão.

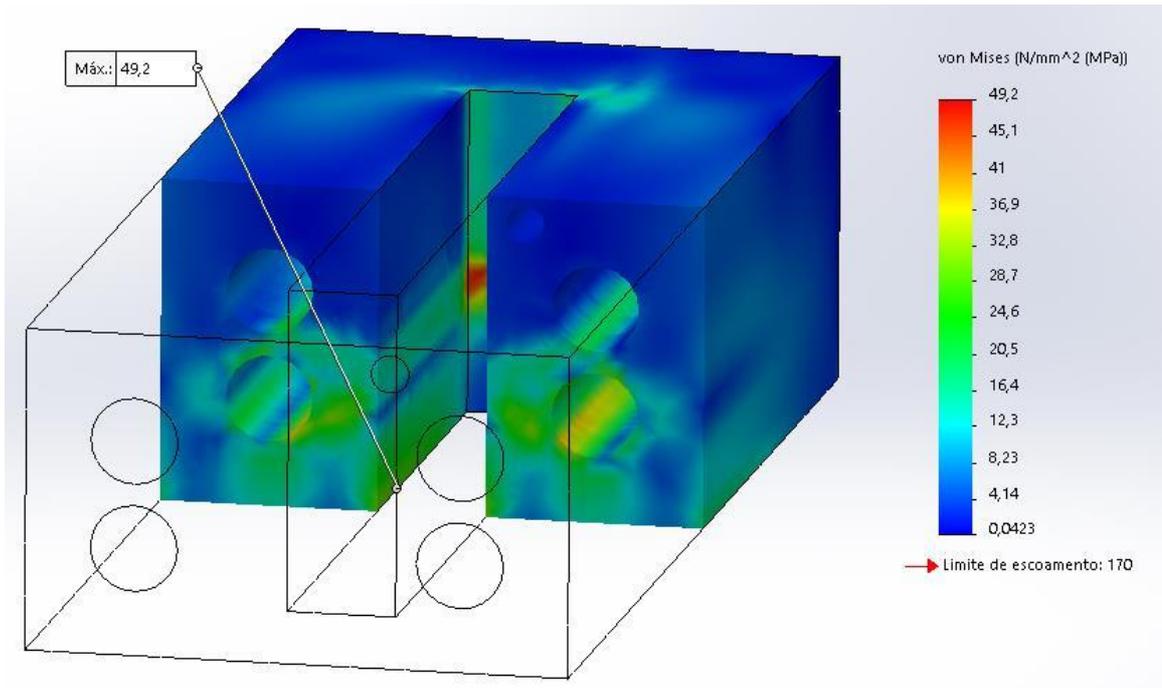


Figura 16: Tensão de von Mises para 30 MPa de pressão aplicada. Fonte: AUTOR.

Conforme feito nas demais peças, foi analisado, também, o deslocamento da Base cujo resultado é apresentado na Figura 16. É possível notar que o maior deslocamento ocorreu exatamente no meio da face longitudinal, ou seja, a maior face solicitada. Esse resultado também era esperado levando em consideração a grande diferença de comprimento entre as faces frontal e lateral. O maior deslocamento previsto pela simulação foi de 0,00318 mm e, conforme os deslocamentos das demais peças, é extremamente baixo e pode ser desconsiderado seu efeito sobre a qualidade do produto final. Sendo assim, a Base atende os requisitos de projeto não apresentando rupturas por tensão ou deformação significativa.

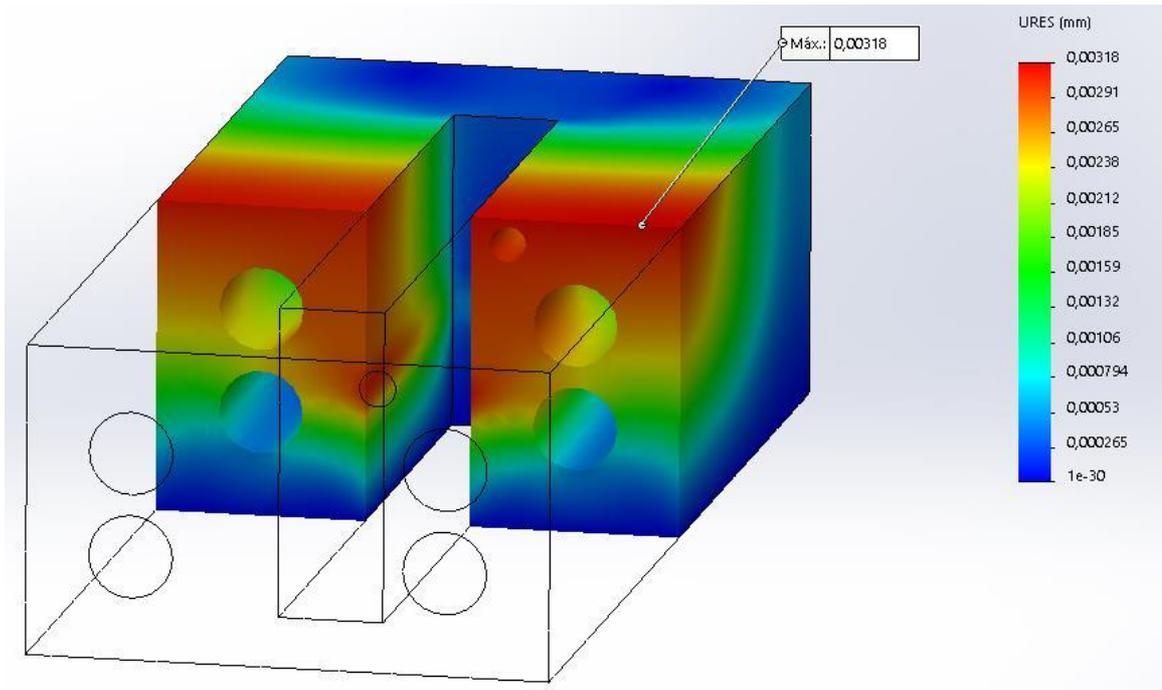


Figura 17: Vista da Base em corte apresentando o maior deslocamento para 30 MPa de pressão.
Fonte: AUTOR.

Novamente, por fatores de segurança do projeto, foram executadas mais duas simulações nas quais a Base do projeto é submetida à esforços superiores ao esforço para a qual a mesma foi projetada. Os esforços extremos foram de 40 MPa e 50 MPa de pressão aplicadas no mesmo ponto. Nas imagens do resultado é possível ver que o critério de falha de von Mises apresentou valores máximos de 65,6 MPa e 82 MPa quando aplicado 40 e 50 MPa, respectivamente. Ambos os valores são muito inferiores aos 170 MPa de limite de escoamento do material e, sendo assim, é possível afirmar que a Base resiste a essas pressões extremas e, portanto, sua utilização é segura.

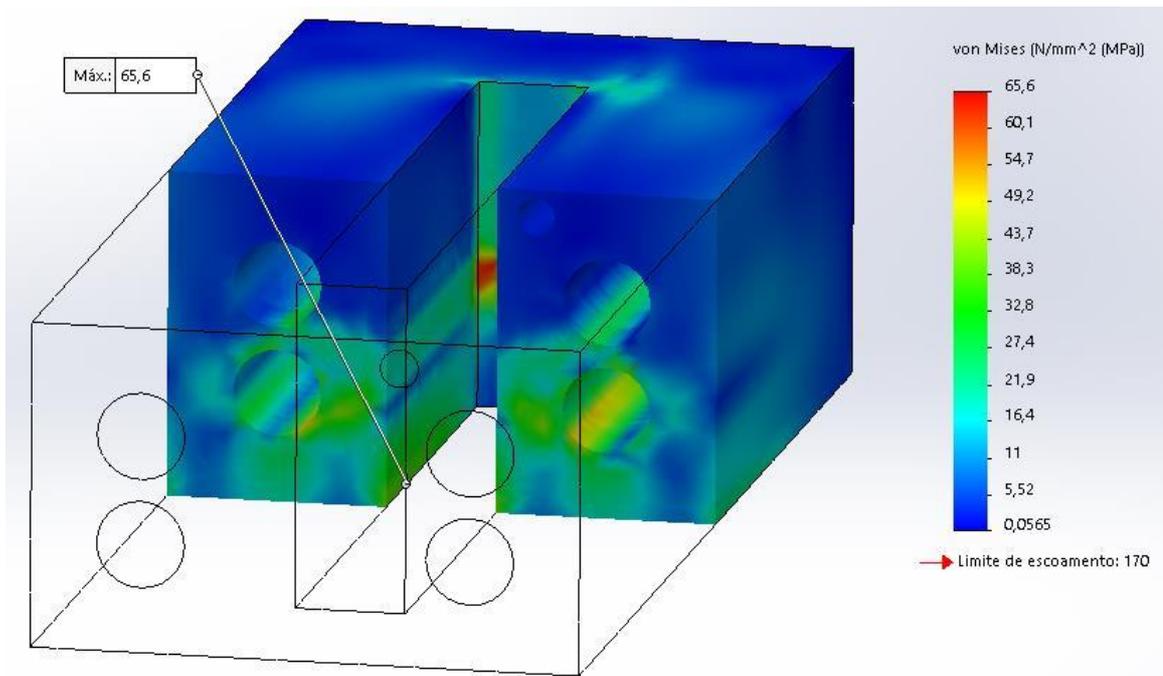


Figura 18: Tensão de von Mises para 40 MPa de pressão aplicada. Fonte: AUTOR.

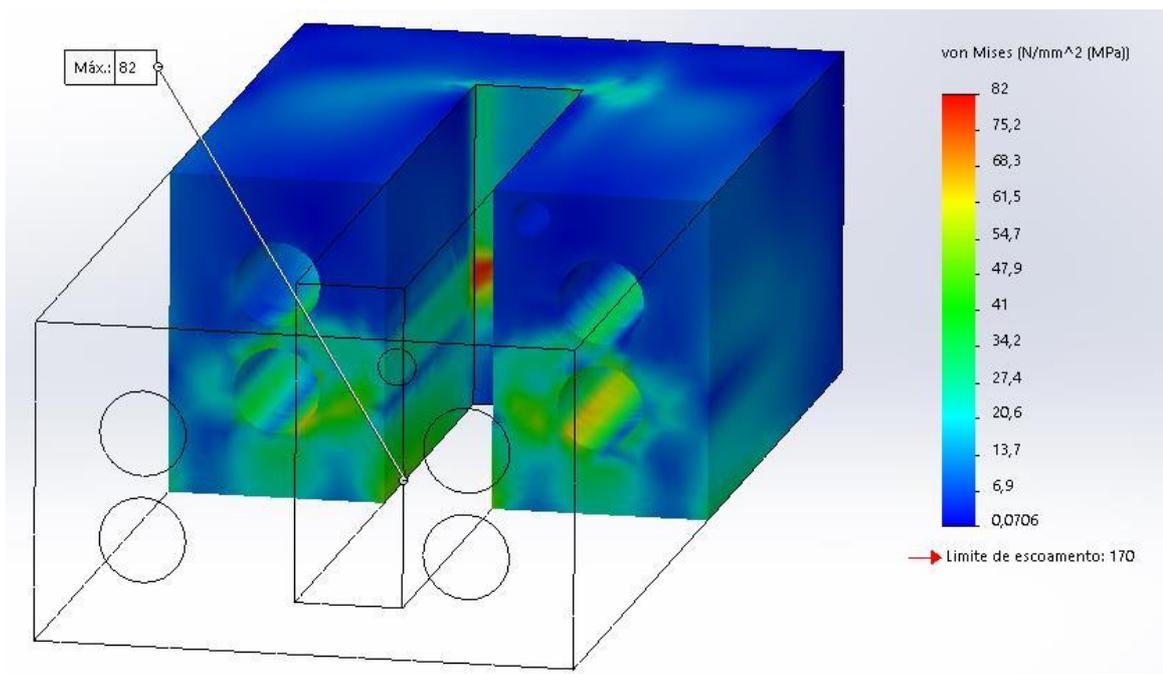


Figura 19: Tensão de von Mises para 50 MPa de pressão aplicada. Fonte: AUTOR.

Seguindo a rotina pré-estabelecida de simulações, o deslocamento da Base para as pressões extremas também foi analisado afim de finalmente validar todo o conjunto. Assim como no caso anterior, o deslocamento máximo foi apresentado na metade da face longitudinal, como é possível ver na imagem e teve valores máximos de 0,00424 mm e 0,0053 mm para 40 MPa e 50 MPa, respectivamente. Esses deslocamentos são muito

inferiores às incertezas das medidas recomendadas do corpo de prova e podem ser considerados desprezíveis como efeito na qualidade do produto final.

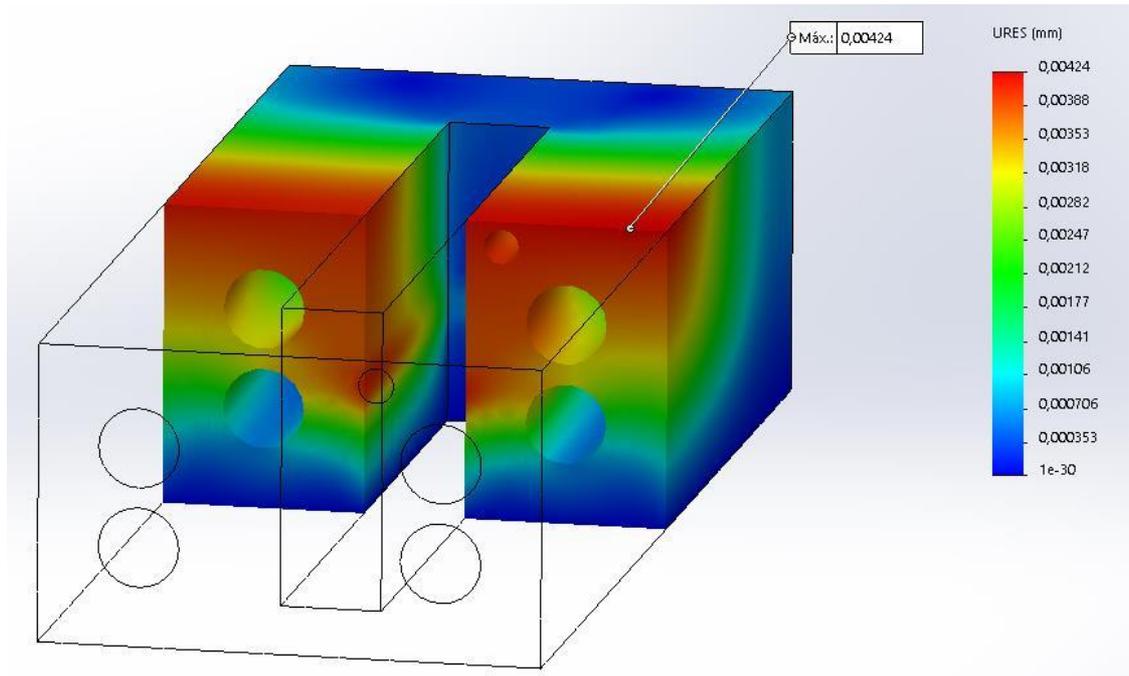


Figura 20: Vista da Base em corte apresentando o maior deslocamento para 40 MPa de pressão.
Fonte: AUTOR.

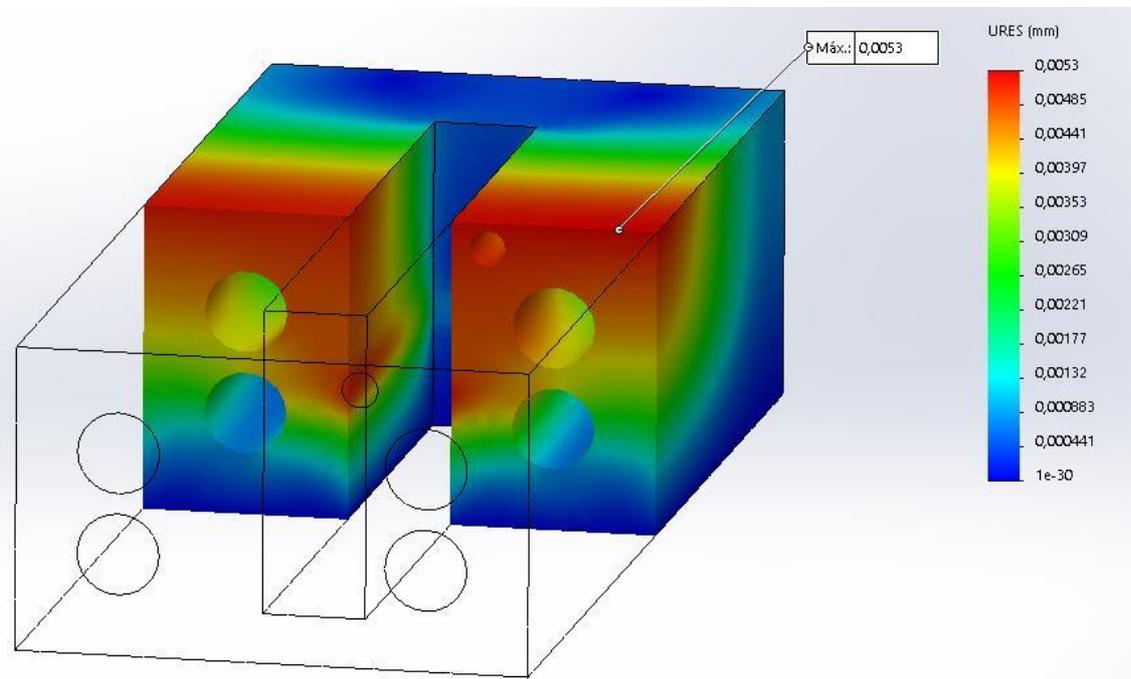


Figura 21: Vista da Base em corte apresentando o maior deslocamento para 50 MPa de pressão.
Fonte: AUTOR.

4 CONCLUSÕES

O molde projetado neste trabalho apresentou bom comportamento nas mais diversas condições que foram simuladas e podemos considera-lo aprovado mesmo quando para uso em condições extremas que são bem superiores às necessárias para que a prensagem à quente do material polimérico ocorra com sucesso.

Sua facilidade construtiva, simplicidade de funcionamento e baixo custo tornam esse molde um projeto muito interessante para ser aplicado no reaproveitamento do material que, ainda hoje, é considerado descarte. A aplicação desse molde ajudará a evitar desperdício de material tornando a reciclagem do PET ainda mais eficiente, visto que o material quase em sua totalidade poderá ser reciclado.

As dimensões do corpo de prova foram previamente pensadas para que o mesmo possa ser submetido a diferentes ensaios para melhor conhecimento das características do material final. Um dos conceitos do molde projetado por este trabalho é que, futuramente, o mesmo pode, guardando as devidas proporções, ser ampliado com o objetivo de gerar amostras de dimensões superiores que poderão ser utilizadas não somente para realização de testes e ensaios, mas sim com o objetivo final de gerar peças e produtos que possam ser utilizados e aplicados no dia a dia.

REFERÊNCIAS

CANEVAROLO, Sebastião V. **Ciência dos Polímeros**: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2ª. ed. rev. e aum. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

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.

POLITEREFTALATO DE ETILENO. **Wikipédia**, 2017. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Politereftalato_de_etileno. Acesso em: 13 out. 2020.

SHACKELFORD, James F. **Ciência dos Materiais**. 6ª. ed. rev. São Paulo: Pearson, 2008.

REED, James Stalford. **Principles of Ceramics Processing**. 2ª. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. (US), 1995.

RABELLO, M. S.; WELLEN, R. M. R. Estudo da cristalização a frio do poli (tereftalato de etileno) (PET) para produção de embalagens. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, 1 set. 2008. Disponível em: www.dema.ufcg.edu.br/revista. Acesso em: 10 nov. 2020.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª. ed. rev. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002

KUMAR, Anil; GUPTA, Rakesh K. **Fundamentals of Polymer Engineering**. 2ª. ed. rev. e aum. New York: Marcel Dekker, Inc, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 178: Plastics – Determination of flexural properties**. London. 2003.

AKCELRUD, Leni. **Fundamento da Ciência dos Polímeros**. 1ª. ed. Barueri: Editora Manole, 2007.

O USO DO PLÁSTICO. Movimento Plástico Transforma, 2016. Disponível em: <http://www.plasticotransforma.com.br/aplicacoes-do->

APÊNDICE A – Dimensões e renderização final

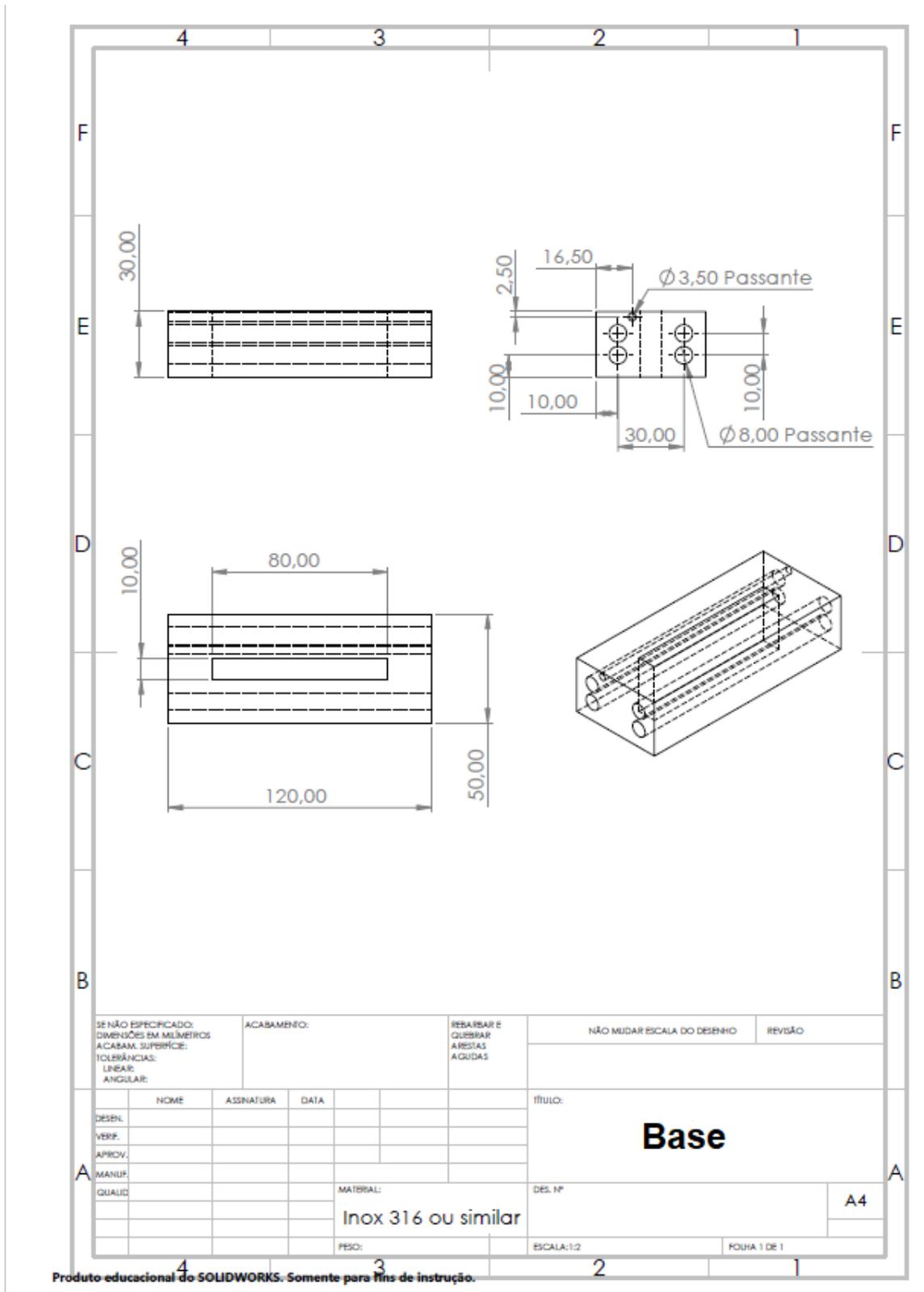


Figura 22: Desenho de detalhes da Base. Fonte: AUTOR.

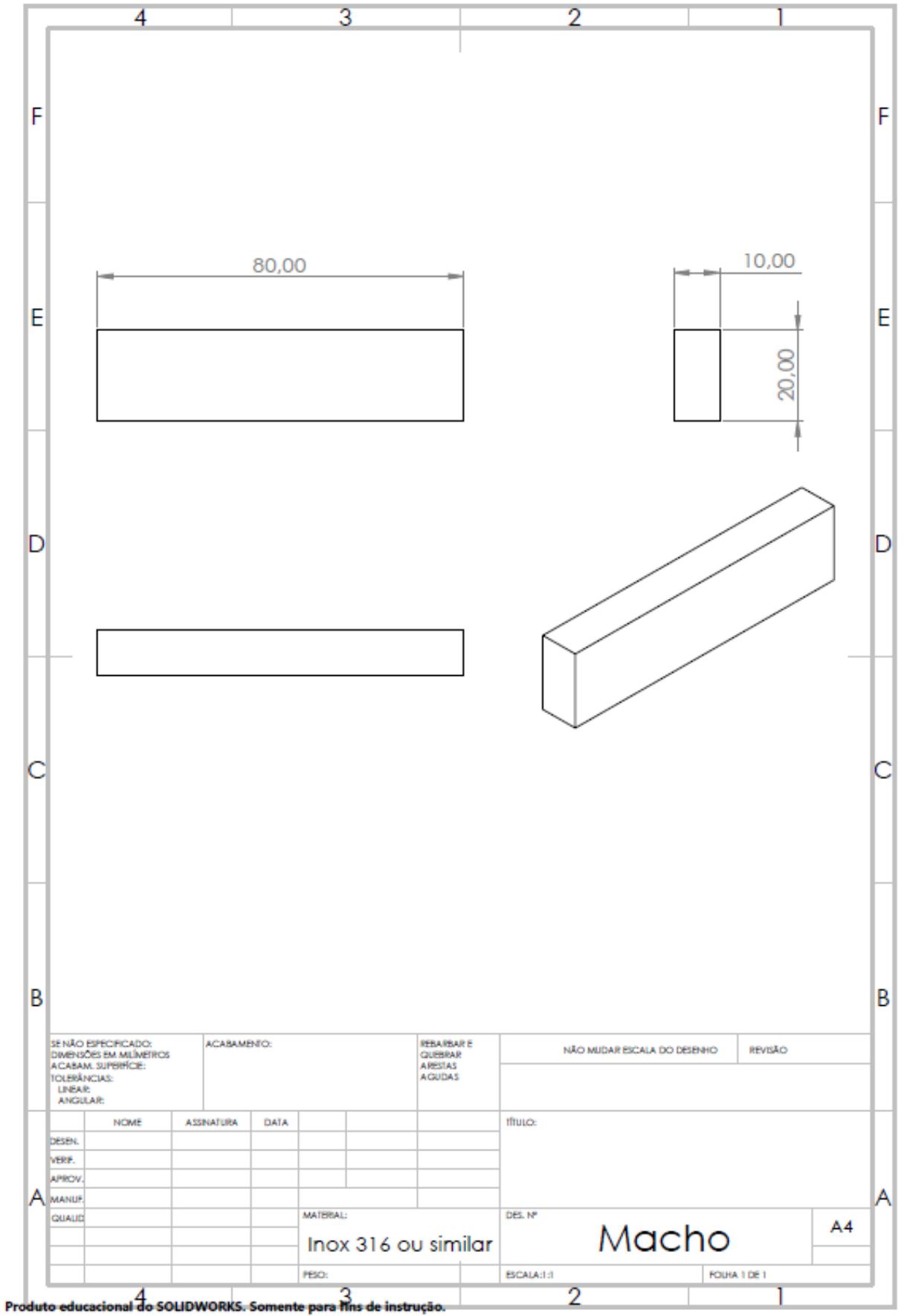


Figura 23: Desenho de detalhes do Macho. Fonte: AUTOR.

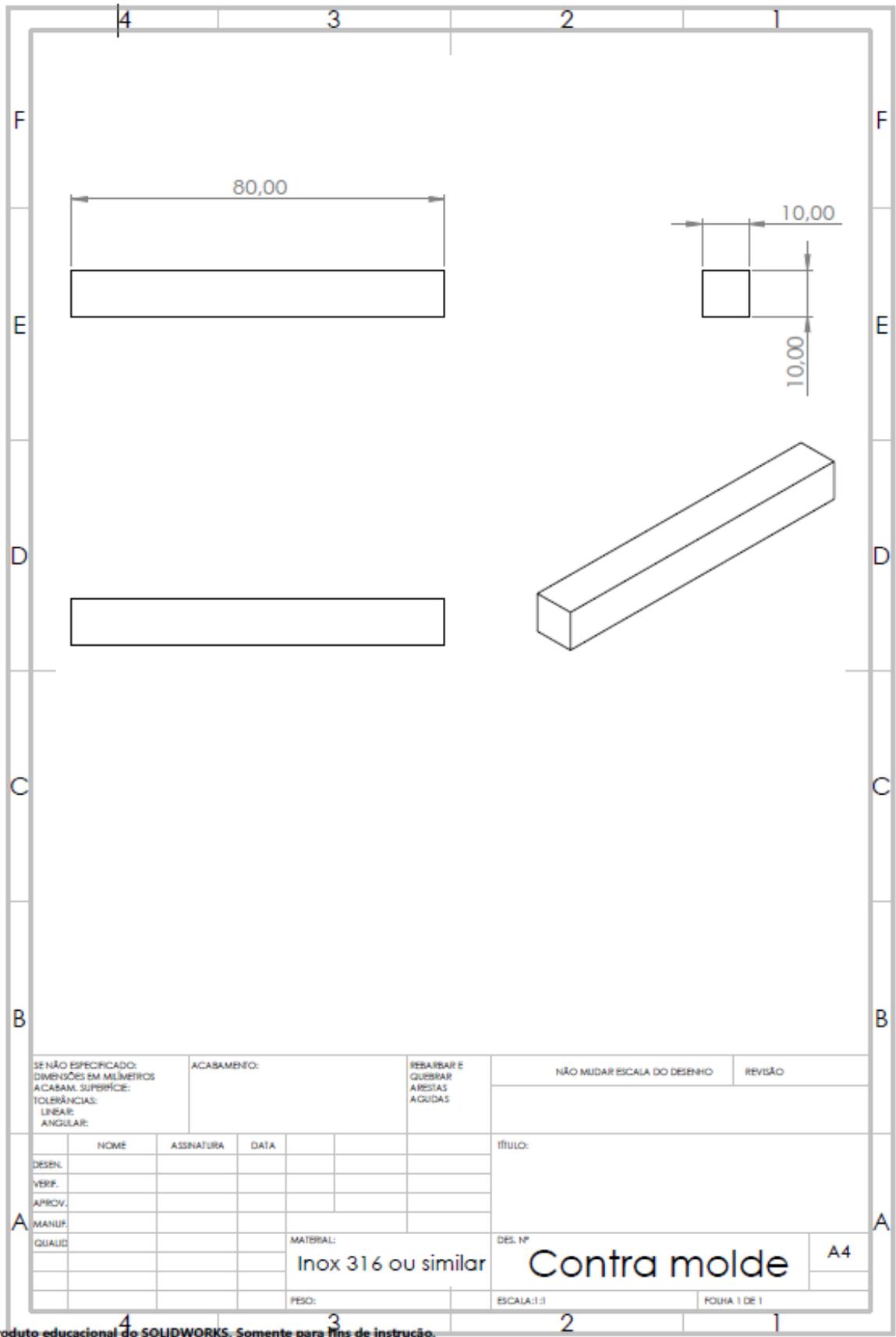


Figura 24: Desenho de detalhes do Contra molde. Fonte: AUTOR.

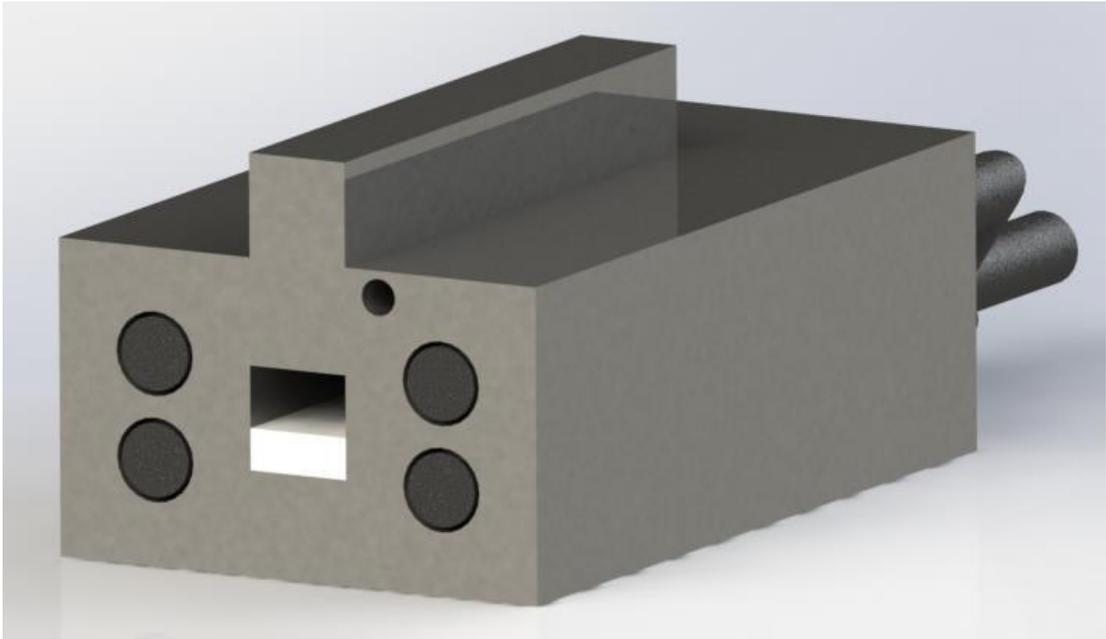


Figura 25: Renderização final. Fonte: AUTOR.