

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

LUCAS SILVA LUCIANO

PROJETO DE UM MOLDE DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICO MODULAR.

Joinville
2021

LUCAS SILVA LUCIANO

PROJETO DE UM MOLDE DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICO MODULAR.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Automotiva, no curso Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Mauricio Sacchelli

Joinville
2021

LUCAS SILVA LUCIANO

PROJETO DE UM MOLDE DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICO MODULAR.

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Automotivo e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 07 de maio de 2021

Prof. Modesto Hurtado Ferrer, Dr. Eng

Coordenador do curso

Banca examinadora:

Prof. Carlos Maurício Sacchelli, Dr. Eng.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Wagner Maurício Pachekoski, Dr. Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Kelly Patricia Dias, M. Eng.

Instituto Federal de Santa Catarina

RESUMO

Devido as necessidades de redução de emissão e conseqüentemente de redução de peso dos veículos automotores, cada vez mais cresce o investimento no desenvolvimento de novos materiais que possam por exemplo substituir o aço. Dentre tais os materiais poliméricos são uma boa opção em diversas aplicações em diferentes partes dos veículos. Um dos processos mais utilizados na fabricação de produtos plásticos é o processo de injeção, este tipo de processo utiliza moldes de injeção para fabricar as peças plásticas. Estes moldes apresentam alta complexidade logo, a otimização dos parâmetros do projeto representa uma vantagem competitiva para qualquer indústria que se utilize deste processo. No projeto do molde, vários sistemas são necessários considerar, dentre eles, o de alimentação, refrigeração, extração e saída de gases. Assim, o objetivo deste trabalho é realizar o projeto de um molde de injeção de termoplástico modular, possibilitando este molde ser útil para estudos variados de sistemas de alimentação e refrigeração. Para suportar o projeto, foi realizado a análise do processo de injeção através do software CAE Moldflow. Foram utilizados 7 materiais diferentes na simulação sendo eles POM, ABS, PP, PET, PA, PS, PA6. De acordo com os resultados obtidos da simulação concluímos que o projeto do canal de injeção tem efeito principalmente na tensão de cisalhamento durante o processo de injeção, e a necessidade de alterar as dimensões da cavidade do molde afim de reduzir os efeitos de empenamento da amostra simulada. Como resultado principal do trabalho tem-se de maneira detalhada o projeto do molde de injeção.

Palavras-chave: Injeção de Termoplástico. Projeto de Molde de injeção. Simulação.

ABSTRACT

Due to the emission reduction needs and consequently the weight reduction of motor vehicles, the investment in the development of new materials that can replace steel, increasingly grows. Among these, polymeric materials are a good option in several applications in different vehicle parts. One of the most used processes in the manufacture of plastic products is the injection process, this type of process uses injection molds to manufacture the plastic parts. These molds are highly complex so the optimization of the design parameters represents a competitive advantage for any industry that uses this process. In the mold design, several systems are necessary to consider, among them, the supply, cooling, extraction and output of gases. Thus, the objective of this work is to carry out the design of a modular thermoplastic injection mold, making this mold useful for varied studies of runners and refrigeration systems. To support the project, the injection process was analyzed using the CAE Moldflow software. Seven different materials were used in the simulation: POM, ABS, PP, PET, PA, PS, PA6. According to the results obtained from the simulation, we concluded that the design of the injection channel has an effect mainly on the shear stress during the injection process, and the need to change the dimensions of the mold cavity in order to reduce the warping effects of the simulated sample. As a main result of the work, the injection mold design was detailed.

Keywords: Thermoplastic injection. Injection Mold Design. Simulation.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e força para completar esta jornada .

Agradeço a minha família por todo o apoio principalmente a meus pais Catia Silva Luciano e Gilson Luciano que serviram de alicerce para as minhas conquistas.

Deixo um agradecimento a meu orientador Prof. Dr. Carlos Mauricio Sacchelli pelo incentivo e dedicação de seu tempo ao meu projeto de pesquisa.

Também quero agradecer à Universidade Federal de Santa Catarina e a todos os professores do meu curso pela elevada qualidade do ensino oferecido.

E por fim agradeço a todos os integrantes do Laboratório de Inovação e Desenvolvimento de Produtos e Processos (LID) pela cooperação e conhecimento compartilhado.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Projeção da produção de transformados plásticos até 2023..... | 11 |
| Figura 2 - Processos produtivos na produção de transformados plásticos (2016) .. | 12 |
| Figura 3 - Efeito da temperatura de injeção | 14 |
| Figura 4 - Pressão X Tempo | 15 |
| Figura 5 - Efeito da pressão de injeção | 16 |
| Figura 6 - Máquina injetora. | 19 |
| Figura 7 - Sub sistemas injetora..... | 19 |
| Figura 8 - Molde de injeção de termoplástico..... | 20 |
| Figura 9 - Molde de injeção de duas placas..... | 22 |
| Figura 10 - Molde de injeção de três placas | 23 |
| Figura 11 - Canais de alimentação quentes | 24 |
| Figura 12 - Corpo de prova ensaio de tração | 26 |
| Figura 13 - Desenho técnico corpo de prova..... | 26 |
| Figura 14 - Gates | 27 |
| Figura 15 - Disposição em formato de S | 28 |
| Figura 16 - Disposição em formato de T..... | 28 |
| Figura 17 - Malha do Produto | 30 |
| Figura 18 - Modelo 3D do molde | 31 |
| Figura 19 - Tensão de cisalhamento formato de S | 33 |
| Figura 20 - Distribuição de tensão para PA canal em formato de S | 34 |
| Figura 21 - Tempo até a extração formato de S..... | 34 |
| Figura 22 - Eficiência canal de refrigeração inserto S | 35 |
| Figura 23 - Tensão de cisalhamento formato de T | 37 |
| Figura 24 - Distribuição de tensão para ABS canal em formato de T..... | 37 |
| Figura 25 - Distribuição de tensão para PA canal em formato de T..... | 38 |
| Figura 26 - Tempo até a extração formato de T | 38 |
| Figura 27 - Eficiência canal de refrigeração inserto T..... | 39 |
| Figura 28 - Empenamento PS..... | 40 |
| Figura 29 - Empenamento POM..... | 40 |
| Figura 30 - Inserto canais em S | 41 |
| Figura 31 - Inserto canais em T..... | 41 |
| Figura 32 - Alojamento Termopar | 42 |
| Figura 33 - Alojamento Termopar corte | 42 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Características físicas e de transformação dos termoplásticos..... | 13 |
| Tabela 2 - Valores médios de contração | 18 |
| Tabela 3 - Funções dos componentes de um molde de injeção | 21 |
| Tabela 4 - Dimensões dos Gates | 27 |
| Tabela 5 - Materiais Analisados..... | 29 |
| Tabela 6 - Propriedades de processamento..... | 29 |
| Tabela 7 - Configurações da simulação | 30 |
| Tabela 8 - Canal de alimentação em formato de S | 32 |
| Tabela 9 - Canal de alimentação em formato de T..... | 35 |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 9 |
| 1.1 | Objetivo Geral | 10 |
| 1.2 | Objetivos Específicos | 10 |
| 2 | INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS | 11 |
| 2.1 | Mercado de Plásticos | 11 |
| 2.2 | Materiais Plásticos | 12 |
| 2.3 | Moldagem por injeção | 13 |
| 2.4 | Parâmetros do processo de injeção | 14 |
| 2.4.1 | Temperatura de injeção | 14 |
| 2.4.2 | Temperatura do molde | 15 |
| 2.4.3 | Pressão de injeção | 15 |
| 2.4.4 | Tempo de injeção..... | 16 |
| 2.4.5 | Rotação da rosca | 17 |
| 2.4.6 | Velocidade de injeção | 17 |
| 2.5 | Contração e empenamento do produto | 17 |
| 2.6 | Maquina injetora | 18 |
| 2.7 | Moldes para injeção | 20 |
| 2.7.1 | Moldes com canais frios ou convencionais | 22 |
| 2.7.2 | Moldes de canais isolados | 23 |
| 2.7.3 | Moldes com canais quentes..... | 23 |
| 3 | METODOLOGIA | 25 |
| 3.1 | Simulação computacional | 25 |
| 3.1.1 | Geometria simulada | 25 |
| 3.1.2 | Parametros da simulação | 27 |
| 4 | RESULTADOS | 32 |
| 4.1 | Canal de alimentação em formato de S | 32 |
| 4.2 | Canal de alimentação em formato de T | 35 |
| 4.3 | Contração e empenamento do produto | 39 |
| 4.4 | Projeto do molde | 41 |
| 5 | CONCLUSÕES | 43 |
| | REFERÊNCIAS | 45 |
| | APÊNDICE A | 46 |

1 INTRODUÇÃO

Devido a crescente necessidade de se reduzir o consumo de combustível e as emissões geradas pelos veículos automotores, a indústria automotiva vem cada vez mais procurando por novos materiais e processos de fabricação.

Para atender a tais necessidades, a utilização de materiais plásticos vem crescendo, devido às suas características de fácil processamento, fácil modelagem, leveza e a facilidade de alterar as propriedades através do uso de diferentes aditivos. Com os avanços das tecnologias de processamento de plásticos, tornou-se possível inclusive substituir alguns materiais metálicos e aços-liga (LO, 2016).

Hoje, até mesmo espaços que eram considerados inóspitos, por causa das altas temperaturas e da contaminação por produtos químicos, já podem ser feitos de plástico. Assim, os atuais 44 kg médios de plástico nos veículos substituem cerca de 350 kg de aço. Na Europa esse número já chega a 100 kg de plástico em automóveis (ARTSIM, 2014).

O percentual de plástico nos carros deve subir de atuais 15% para 25% a 30% em 2030. Este é um crescimento significativo e esta matéria-prima ainda pode conquistar um espaço ainda maior. A Braskem, maior petroquímica das Américas e líder na produção de polímeros, foi uma das empresas que se antecipou a este cenário, com o desenvolvimento de resinas para aplicações automotivas. São soluções customizadas (fruto da mistura de diferentes resinas como talco, elastômero, entre outras), de acordo com as demandas dos próprios clientes (ARTSIM, 2014).

O Uno, da Fiat, por exemplo, tem seus para-choques e painel de instrumentos feito de plástico. No Prisma, da Chevrolet, o console frontal também é feito deste material. Já no Renault Logan, a coluna de proteção do cinto de segurança é proveniente do plástico. São parceiros da Braskem no desenvolvimento destes produtos as empresas Basell, Borealis, Styron e Produmaster Advanced Composites (ARTSIM, 2014).

Entre os vários métodos de processamento de plásticos, o método de moldagem por injeção é um dos mais promissores, pois molda de uma só vez de forma rápida (LO, 2016).

Pode-se dividir o processo de injeção em quatro etapas sendo elas, preenchimento, empacotamento, resfriamento e extração. Dentre estas etapas a etapa de resfriamento é a que consome maior tempo do processo no total cerca de três quartos do mesmo (PRUST et al., 2018). Sendo assim determinar a influência

dos diversos fatores que interferem no processo é importante para garantir o menor tempo de resfriamento e conseqüentemente reduzir o tempo de ciclo e aumentar a produtividade do processo.

Peças fabricadas por injeção tem suas propriedades dependentes da sua microestrutura que são, por sua vez, dependentes da matéria-prima, das variáveis de processamento e da própria geometria da peça (VIEIRA et al., 2012).

Além dos parâmetros apresentados por Vieira et al. (2012), a geometria dos canais de alimentação do molde também influenciam diretamente na qualidade final da peça. Moayyedian, Abhary e Marian (2015) destacam que o design inadequado dos canais de alimentação, leva a escoamentos turbulentos de material fundido nas cavidades, que resultam em defeitos na geometria das peças como zonas sem preenchimento de material e a formação de marcas de rechupe nas peças.

Uma forma de se definir quais seriam os parâmetros mais adequados para a fabricação de uma peça por processo de injeção, é através de uma análise prévia feita com o auxílio de alguma ferramenta computacional. Atualmente no mercado existem vários softwares CAE que possibilitam o estudo do processo de injeção, dentre eles um dos mais utilizados é o software Moldflow.

Tendo em vista a complexidade relacionada ao projeto de um molde de injeção e a possibilidade da aplicação de métodos computacionais para estudar e auxiliar na definição de parâmetros relacionados ao projeto do molde, o presente estudo busca projetar um molde de injeção modular como também utilizar a simulação CAE do processo por meio do software Moldflow visando, estudar os diferentes impactos da alteração das configurações dos canais de alimentação e refrigeração a fim de contribuir para o projeto do molde e identificar quais os impactos de tais alterações no produto final.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo realizar o projeto de um molde de injeção de termoplástico modular, utilizando informações provenientes de simulação computacional.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a. Projetar um molde de injeção de termoplástico com sistemas intercambiáveis;
- b. Simular o processo de injeção;
- c. Analisar os dados obtidos na simulação e otimizar o projeto do molde;

2 INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

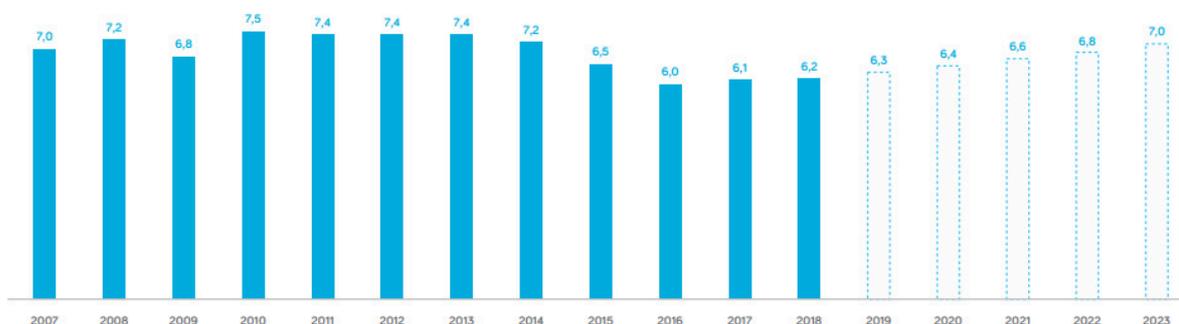
2.1 Mercado de Plásticos

No ano de 2018 a produção de produtos plásticos chegou a 358 milhões de toneladas, sendo o grande produtor mundial o mercado asiático responsável por 51% deste valor a América latina é responsável por uma quantidade muito menor desse valor, apenas 4% (PLASTICS EUROPE,2019).

Porem apesar do baixo valor quando comparado com a produção mundial, a indústria brasileira de produtos plásticos é responsável pela geração de 312934 empregos diretos e gera um faturamento anual de 78,3 bilhões de reais (ABIPLAST,2019).

Segundo a ABIPLAST (2019), o mercado de produtos plásticos no país possui a tendência de crescer nos próximos anos como apresentado na figura 1.

Figura 1 - Projeção da produção de transformados plásticos até 2023.

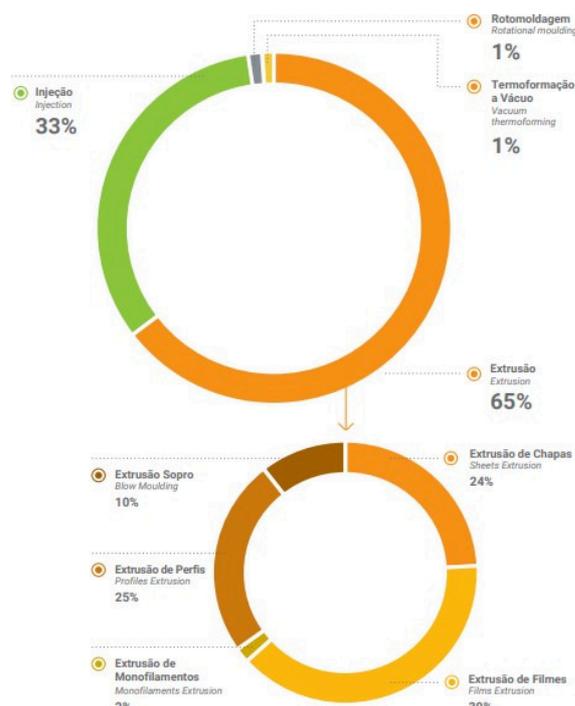


Fonte: ABIPLAST(2019) .

A indústria automotiva brasileira é responsável pelo consumo de 7,2% da produção de matérias plásticos brasileiros, a tornando o 4º maior consumidor perdendo apenas para o setor de construção civil com 23,8%, a indústria alimentícia com 20,2% e o setor de atacado e varejo com 10,5% (ABIPLAST,2019).

Dentro dos processos de fabricação de plásticos utilizados no Brasil o processo de injeção é o segundo mais utilizado perdendo só para o processo de extrusão como pode ser visto na figura 2 .

Figura 2 - Processos produtivos na produção de transformados plásticos (2016) .



Fonte: ABIPLAST(2019) .

2.2 Materiais Plásticos

Podemos definir os materiais plásticos como compostos de resinas naturais ou sintéticas que, através de pressão e calor, podem fluir e adquirir uma forma determinada (HARADA, 2004).

Ainda segundo Harada (2004), a definição oficial de "materiais plásticos" divulgada pela *Society of Plastics Engineers (SPE)*, dos EUA, é a seguinte: Um grande e variado grupo de materiais, que consiste ou contém como ingrediente essencial uma substância de alto peso molecular, que é sólido no estado final, e que em algum estágio de sua manufatura é suficientemente mole para ser moldado em várias formas, muito usualmente através da aplicação (sejam separadas ou juntas) de calor e pressão.

Podemos separar os materiais plásticos em dois tipos, materiais termoplásticos e materiais termofixos.

Os termoplásticos têm como característica atingir o estágio de amolecimento ao serem aquecidos, podendo então ser moldados. Esta troca de estado não altera sua estrutura química, o que permite que, uma vez resfriado, ele possa ser novamente aquecido e reaproveitado (HARADA, 2004).

Os termofixos após sofrerem a polimerização sofrem uma transformação química em sua estrutura, o que não permite sua reversão ao estado original, impedindo, portanto, a sua reutilização (HARADA, 2004).

As características físico químicas dos polímeros está intimamente ligada com o resultado final dos processos de fabricação em que estes são aplicados. A tabela 1 apresenta algumas características dos matérias aplicados no processo de injeção.

Tabela 1 - Características físicas e de transformação dos termoplásticos

| Nome genérico | Abreviatura | Peso específico (g/cm) | Temperatura de transformação (°C) | Temperatura máxima de resistência no serviço (°C) |
|------------------------------------|-------------|------------------------|-----------------------------------|---|
| Acetato de Celulose | CA | 1,34 | 184 - 230 | 60 |
| Acetato-Butirato de Celulose | CAB | 1,22 | 160 - 200 | 70 |
| Poliamida(Náilon) | PA | 1,15 | 180 - 290 | 100 |
| Cloreto de Polivinila Rígido | PVC | 1,45 | 175 - 200 | 65 |
| Cloreto de Polivinila Flexível | PVC | 1,45 | 175 - 200 | 65 |
| Polimetilmetacrilato | PMMA | 1,18 | 180 - 230 | 80 |
| Poliestireno | PS | 1,04 | 180 - 210 | 80 |
| Acrilonitrila - Butadieno Estireno | ABS | 1,05 | 180 - 250 | 80 |
| Acrilonitrila-Estireno | SAN | 1,08 | 220 - 240 | 85 |
| Poliétileno Baixa Densidade | PEBD | 0,92 | 150 - 175 | 90 |
| Poliétileno Alta Densidade | PEAD | 0,96 | 185 - 220 | 105 |
| Polipropileno | PP | 0,91 | 200 - 220 | 140 |
| Policarbonato | PC | 1,2 | 240 - 290 | 130 |
| Polioximetileno (Acetal) | POM | 1,4 | 175 - 190 | 95 |

Fonte : Harada (2004).

2.3 Moldagem por injeção

A moldagem por injeção consiste fundamentalmente de aquecer a matéria prima polimérica, que deve ser empurrado (injetado) sob pressão para dentro da cavidade de um molde (com uma temperatura menor que o polímero fundido) e ai mantido até que a massa moldada esteja completamente solidificada, tendo a matéria prima polimérica adquirido a geometria da cavidade do molde. Esta transformação é

realizada por uma máquina injetora cuja função é realizar todas as operações citadas, além de comportar o molde fechado (HARADA; UEKI, 2012).

Devido às elevadas velocidades e pressões envolvidas, e a rápida troca de calor com as paredes do molde, a estrutura (ou morfologia) final do polímero transformado sofre alterações, e conseqüentemente seu comportamento no uso ao qual se destina. Assim deduz-se que as propriedades finais do produto transformado serão uma combinação das propriedades inerentes do polímero com as condições (pressão, velocidade e troca de calor) a que este foi sujeito durante sua conformação (HARADA; UEKI, 2012).

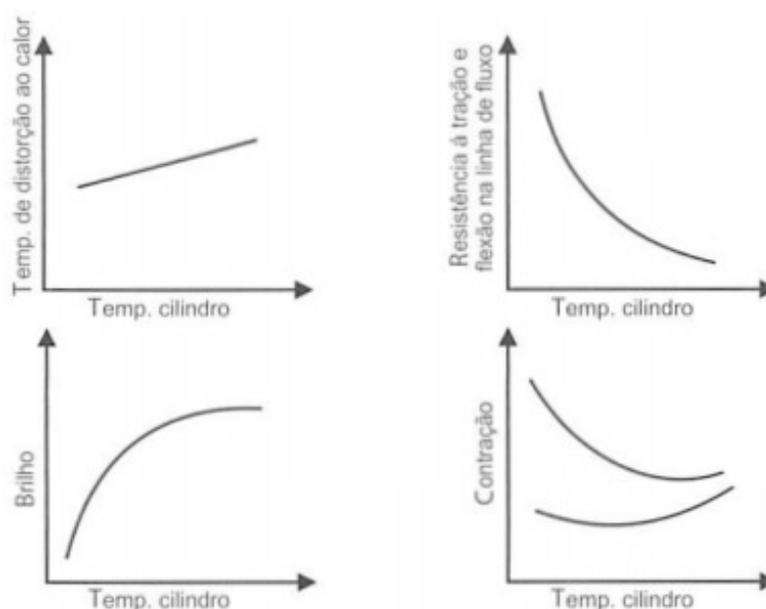
2.4 Parâmetros do processo de injeção

Vários são os parâmetros que influenciam no resultado do processo de injeção, o objetivo desta seção é apresentar os principais e seus efeitos no processo.

2.4.1 Temperatura de injeção

À medida que a temperatura aumenta, a viscosidade do material fundido diminui e, portanto, menos pressão é necessária para atingir a velocidade de injeção desejada. Copolímeros contendo borracha são mais propensos à oxidação a temperaturas elevadas (HARADA, 2004).

Figura 3 - Efeito da temperatura de injeção.



Fonte: Adaptado (HARADA; UEKI, 2012).

2.4.2 Temperatura do molde

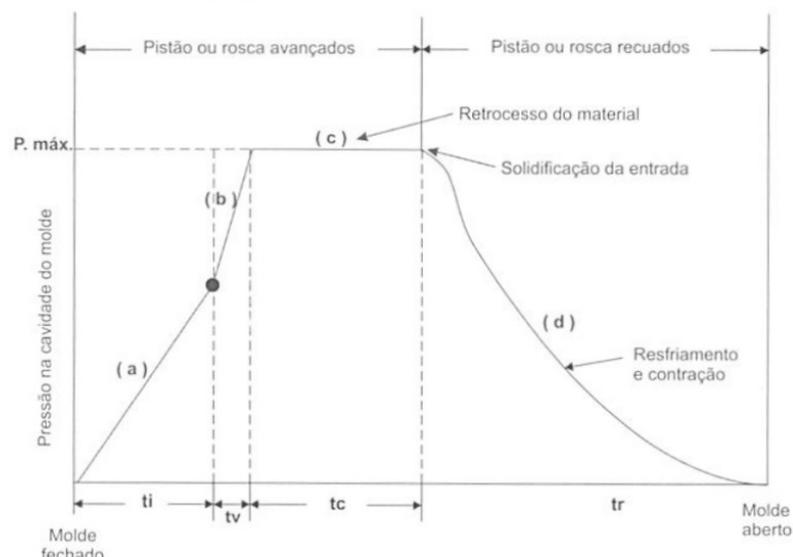
Moldes com temperaturas altas reduzem tensões internas, originam superfícies mais brilhantes e minimizam linhas de junção e marcas do fluxo do material. Infelizmente, altas temperaturas requerem ciclos maiores para que o plástico solidifique e possa ser retirado do molde. Temperaturas baixas permitem ciclos mais rápidos, mas têm a séria desvantagem de causar tensões internas, superfícies pouco brilhantes, além de salientar as linhas de junção (HARADA, 2004).

2.4.3 Pressão de injeção

A pressão de injeção exercida pela rosca ou pistão depende dos seguintes fatores: tipo de material e de máquina, das temperaturas de plastificação do material, do tamanho do orifício do bico, do desenho do molde, do tamanho da entrada, da lubrificação dos grãos, etc. Para se obter ciclos mais rápidos é preferível trabalhar simultaneamente com altas pressões e temperaturas reduzidas no cilindro (HARADA, 2004).

A figura 4 traz a distribuição de pressão na cavidade do molde durante o ciclo de injeção.

Figura 4 - Pressão X Tempo.



Fonte: (HARADA; UEKI, 2012).

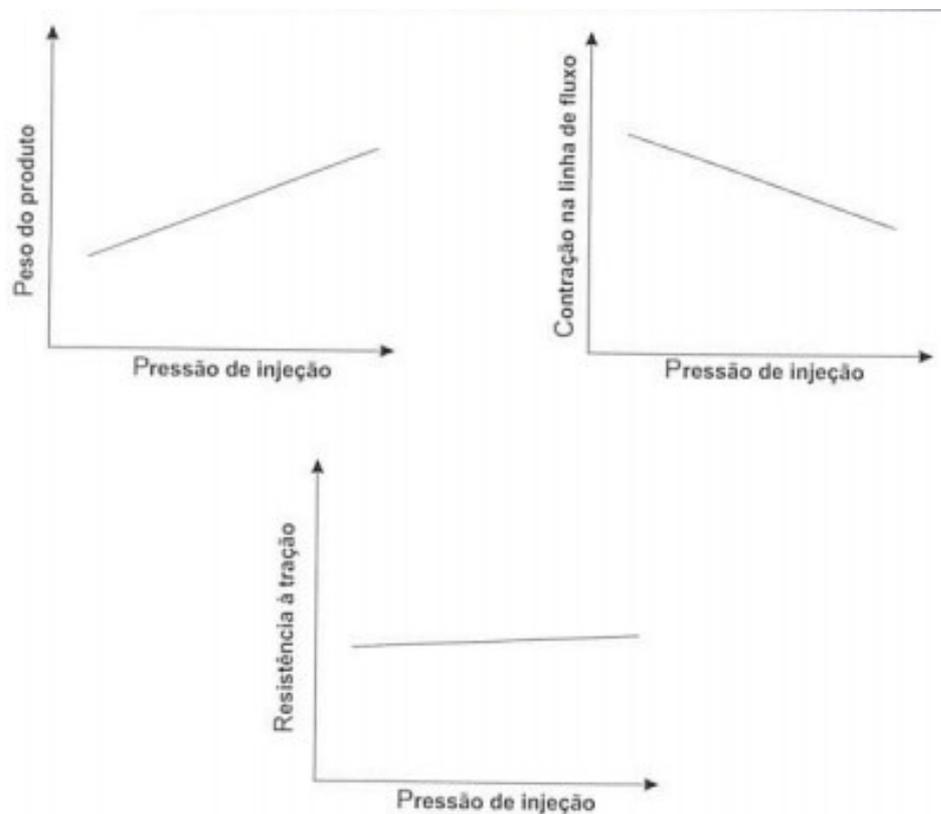
Onde as etapas são:

- a. Preenchimento do molde;
- b. Pressurização ;
- c. Recalque;
- d. Resfriamento.

HARADA e UEKI (2012) definem a pressão de injeção como a pressão de preenchimento do molde mais a pressão necessária para pressurizar o polímero fundido contra as paredes do molde. A pressurização tem a função de imprimir todos os detalhes na superfície do moldado e ainda preencher todas as reentrâncias da cavidade.

Várias falhas podem se originar devido a utilização de pressões de injeção abaixo do recomendado, como rechupes, redução do peso do moldado e contração excessiva do material. A figura 5 traz alguns dos efeitos da pressão de injeção nas características do produto final.

Figura 5 - Efeito da pressão de injeção.



Fonte: (HARADA; UEKI, 2012).

2.4.4 Tempo de injeção

É o intervalo de tempo entre o instante em que a rosca avança e o momento em que a pressão de injeção para de atuar. O período inicial da injeção, correspondente ao avanço da rosca em alta velocidade, chama-se "tempo de enchimento" ou "avanço da rosca" este avanço será gradualmente mais lento até que a entrada da cavidade esfrie e fique sólida.

2.4.5 Rotação da rosca

A capacidade de plastificação é controlada, principalmente, pela velocidade de rotação da rosca que, ao ganhar mais aceleração, vai gerar uma maior produção. O calor gerado pela rotação da rosca é proporcional ao quadrado da velocidade de rotação. Porém, o aumento da velocidade de rotação da rosca reduz o tempo de rotação desta durante a injeção. Um excesso de velocidade de rotação pode causar degradação térmica resultando em peças malformadas por exemplo, com tensões internas, e com manchas pretas (HARADA, 2004).

2.4.6 Velocidade de injeção

Altas velocidades favorecem a redução de tensões internas e a obtenção de ciclos mais curtos, sendo apropriadas para peças de paredes finas. No entanto, entradas ou bicos mal dimensionados (muito pequenos, por exemplo), impõem um limite no ritmo da injeção por que uma velocidade muito alta pode causar esguichamento, queima ou delaminação na entrada. Por outro lado, peças de espessuras maiores, exigem uma injeção mais lenta para evitar marcas de fluxo e outros defeitos superficiais (HARADA, 2004).

2.5 Contração e empenamento do produto

A contração nada mais é que a deformação dimensional do produto injetado no sentido de encolhimento devido ao resfriamento.

Quanto maior a densidade, a espessura de parede do produto e a temperatura do molde maior serão os efeitos da contração.

Já o empenamento se dá devido a contração diferencial da peça, devido principalmente a diferenças de temperatura no comprimento da peça durante o processo de refrigeração.

Para se garantir as tolerâncias dimensionais dos produtos injetados deve-se compensar os efeitos da contração e tentar se minimizar ao máximo os efeitos de empenamento.

A contração do produto pode ser prevista no projeto da cavidade do molde aplicando-se um off-set das medidas do produto afim de manter as medidas finais do produto, outras soluções que ajudam a combater a contração são o aumento da área do ponto de injeção, o aumento da pressão de injeção, o aumento da velocidade de resfriamento do produto e o aumento do tempo da operação de recalque.

A tabela 2 traz valores típicos de contração para os materiais simulados.

Tabela 2 - Valores médios de contração

| Material | Contração (%) |
|-----------------|----------------------|
| POM | 2 - 2,5 |
| ABS | 0,5 - 0,7 |
| PP | 1 - 3 |
| PET | 1,5 - 3 |
| PA | 1 - 2,5 |
| PS | 0,2 - 0,8 |
| PA6 | 0,7 - 1,5 |

Fonte: HARADA e UEKI (2012)

Logo para se minimizar as diferenças geométricas entre o produto projetado e o produto final se torna necessário corrigir as dimensões da cavidade do molde de acordo com a contração do material escolhido para a injeção como apresentado na tabela 2.

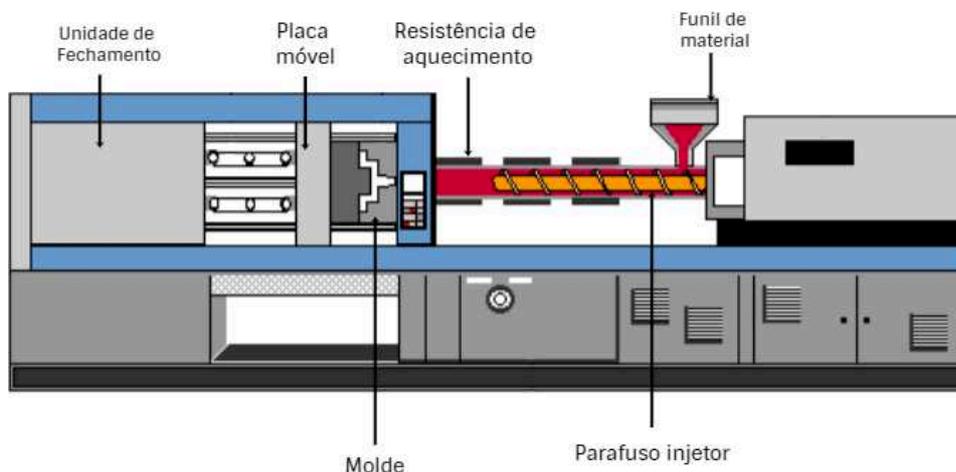
Assim como a contração muda para cada material é obvio que os efeitos de empenamento também vão variar dependendo do material injetado na cavidade, é de se esperar que as peças injetadas com PS tenham menor contração quando comparadas as peças injetadas com POM que apresentam a maior contração entre os matérias estudados.

2.6 Máquina injetora

Uma máquina injetora pode ser definida como uma máquina que conforma peças de maneira descontínua (em ciclos), principalmente de materiais plásticos. A conformação é feita aplicando pressão sobre uma massa fundida dentro da cavidade de um molde e, após resfriamento, a massa solidifica e adquire a forma da cavidade (HARADA; UEKI, 2012).

Segundo HARADA e UEKI (2012) é importante conhecer, além das variáveis de processo e características da matéria prima, as partes que compõem uma máquina injetora e suas funções, pois a qualidade da peça injetada também depende da correta operação destas partes. A figura 6 apresenta um esquemático de uma máquina injetora.

Figura 6 - Máquina injetora.

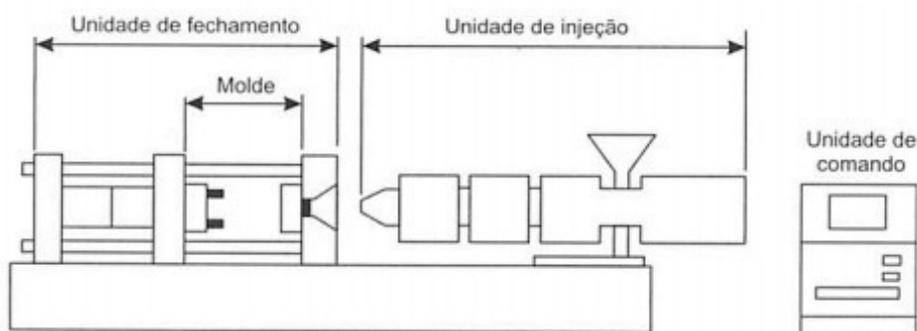


Fonte: Adaptado C-MOLD DESIGN GUIDE (1991) .

HARADA e UEKI (2012) dividem uma injetora em dois subsistemas principais, a unidade de injeção responsável pelo aquecimento e injeção do polímero no molde e a unidade de fechamento, que suporta o molde e é responsável pela abertura e fechamento do mesmo, além de promover a extração das peças do interior do molde durante a abertura.

A figura 7 apresenta respectivamente a divisão dos subsistemas.

Figura 7 - Sub sistemas injetora.



Fonte: (HARADA; UEKI, 2012).

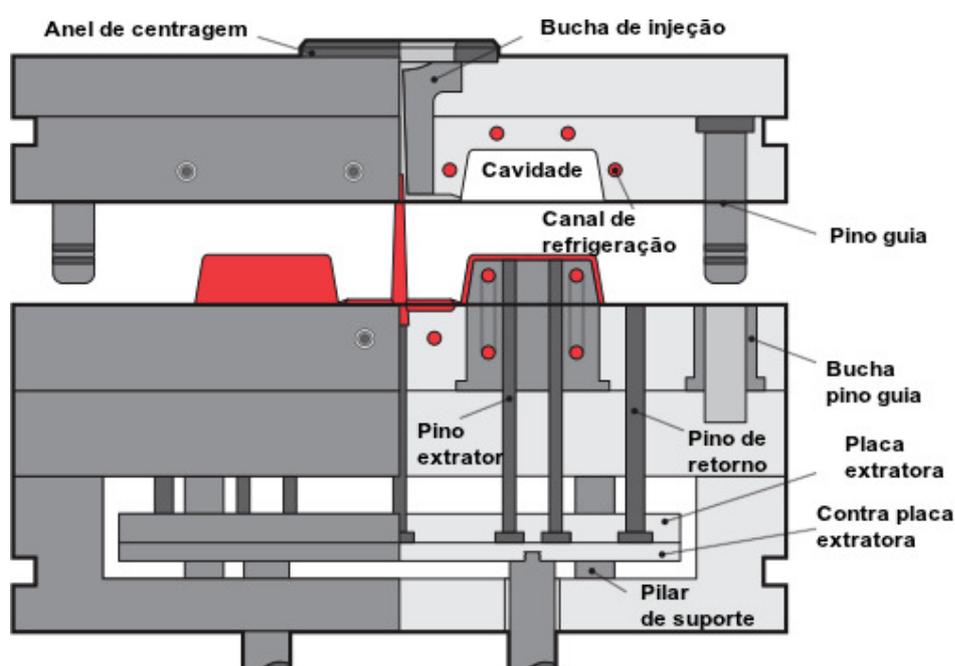
O processo de injeção começa com a alimentação do polímero através do funil de alimentação até a câmara de aquecimento (canhão ou cilindro da máquina injetora), onde funde sobre ação de fonte de calor externo gerado por resistências elétricas e calor proveniente do cisalhamento induzido (shear induced) pela rotação de uma rosca (parafuso sem fim). Durante o transporte do polímero da região de alimentação até a outra extremidade do canhão onde se localiza o bico da injetora, ele é plastificado e homogenizado. A rotação da rosca é o que faz o material se movimentar para frente do canhão. A medida que o material é levado para frente do canhão, é gerado uma pressão que faz a rosca se deslocar axialmente na direção oposta. Uma vez que a quantidade de material na frente do canhão atinge o valor preestabelecido, a rosca irá atuar como pistão, forçando o material plastificado a preencher o molde (HARADA; UEKI, 2012).

2.7 Moldes para injeção

O molde de injeção é uma unidade completa com condições de produzir peças moldadas. Suas cavidades possuem as formas e as dimensões da peça desejada. O molde é adaptado ao final da máquina de injeção e recebe, em sua cavidade, o material plástico fundido, introduzido por meio de pressão (HARADA, 2004).

A figura 18 apresenta os principais componentes de um molde de injeção de termoplástico.

Figura 8 - Molde de injeção de termoplástico.



Fonte: Adaptado de Part and mold design LANXESS Corporation (2007).

Segundo Harada (2004) o projeto básico de um molde depende de alguns fatores, o tamanho e forma da peça, o número de cavidades e o tamanho e capacidade da máquina em que o molde será usado.

Todos estes fatores estão interligados com o tamanho e o peso do objeto moldado, limitando o número de cavidades e determinando também a capacidade necessária da máquina. As dimensões das placas, por exemplo, limitam o número de cavidades de um molde (HARADA, 2004).

A tabela 3 apresenta a função dos principais componentes presentes em um molde de injeção de plástico.

Tabela 3 - Funções dos componentes de um molde de injeção

| Componentes do molde | Função |
|-------------------------|---|
| Base do molde | Mantém a cavidade |
| Pinos guias | Mantém o alinhamento entre as duas cavidades do molde |
| Bucha de injeção | Controla a entrada de material para a parte interna do molde |
| Canais | Controlam a passagem de material desde o bico até a cavidade |
| Entradas | Controlam a entrada de material na cavidade |
| Cavidades e macho | Controlam o tamanho, a forma e a superfície da peça |
| Sistema de refrigeração | Controla a temperatura das superfícies do molde para solidificar o material |
| Gaveta, pino, lateral | Formam os furos, rebaixos, e roscas do produto final |
| Saídas | Permite a saída de gás e ar |
| Mecanismo de extrusão | Extraí a peça rígida da cavidade |
| Pinos de retorno | Retornam os extratores para a posição inicial quando o molde se fecha e prepara o próximo ciclo |

Fonte: Adaptado de Harada (2004)

Segundo Manrich (2013) pode-se classificar os moldes de injeção em basicamente três tipos:

- Convencionais ou com canais frios, que podem ser de duas placas ou três placas;
- Com canais isolados, que podem ser divididos em convencionais ou com aquecimento;
- Com canais quentes, sendo esses divididos em moldes com distribuidor frio e com distribuidor quente.

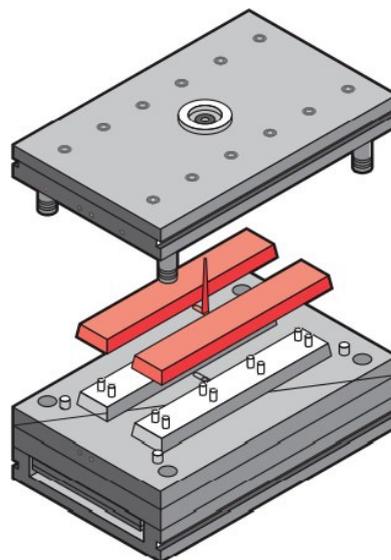
2.7.1 Moldes com canais frios ou convencionais

Esse tipo de molde extrai os galhos formados pelo sistema de injeção ao mesmo tempo em que a peça moldada, logo durante o processo de injeção são produzidas as peças mais os "galhos", que são rejeitos recicláveis constituídos pelos canais de injeção.

Podemos separar os moldes convencionais em dois tipos:

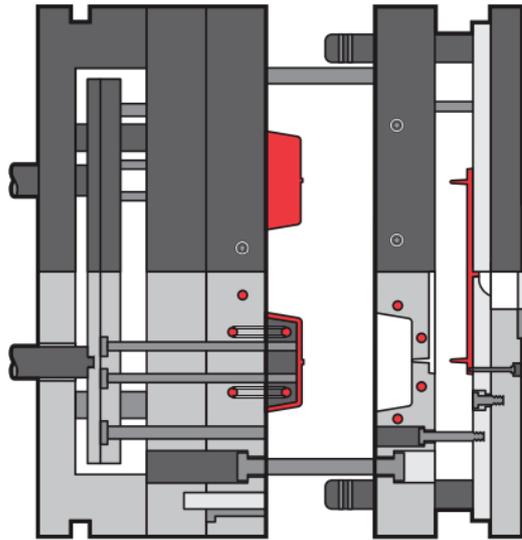
- Moldes de duas placas: Este tipo de molde pode ser separado em duas partes uma fixa e uma móvel, quando a parte móvel entra em movimento ela aciona o sistema de extração a figura 9 traz uma ilustração deste tipo de molde.
- Moldes de três placas: Neste tipo de molde temos 2 partes moveis e uma fixa esse tipo de configuração permite que as placas se movimentem com velocidades diferentes que permite a separação automática dos canais de alimentação dos produtos como ilustrado na figura 10 .

Figura 9 - Molde de injeção de duas placas.



Fonte: Adaptado de Part and mold design LANXESS Corporation (2007).

Figura 10 - Molde de injeção de três placas.



Fonte: Adaptado de Part and mold design LANXESS Corporation (2007).

Devido ao desenvolvimento dos moldes com canais quentes, os moldes convencionais estão sendo cada vez menos utilizados para a produção de grandes lotes, especialmente de peças pequenas, uma vez que apresentam desvantagens relacionadas à rejeitos no processo provenientes dos canais frios extraídos junto com as peças e dificuldade de extração em alguns casos.

2.7.2 Moldes de canais isolados

Este tipo de molde possui canais de alimentação com grandes diâmetros. Que permitem que o volume de material no interior dos canais resfrie apenas na superfície em contato com o molde mantendo o miolo do canal quente acima da temperatura de não-fluxo, permitindo o material fluir no próximo ciclo sem a necessidade de se remover os canais de alimentação.

Devido a problemas com a refrigeração em demasia dos canais de alimentação que causavam o entupimento dos canais, e de problemas com gotejamento de polímeros nas peças durante o processo de extração este tipo de molde caiu em desuso.

2.7.3 Moldes com canais quentes

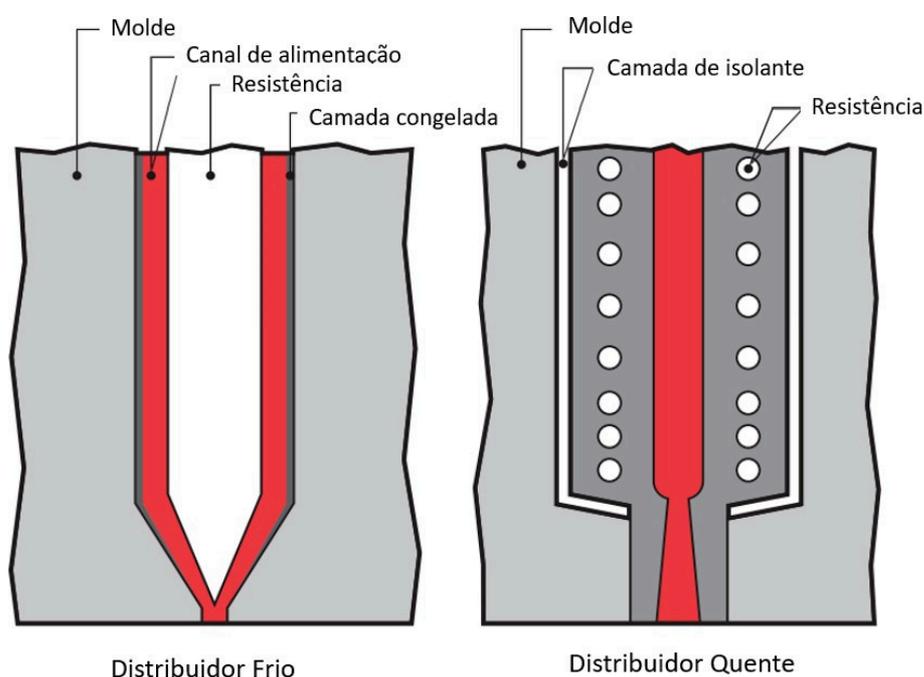
Neste tipo de molde os canais de injeção são mantidos sempre na temperatura ideal de fluxo para injeção, fazendo com que os canais não necessitem serem extraídos junto com as peças.

Os canais são mantidos quentes por um manifold que consiste de um sistema com aquecedores elétricos, isoladores, termopares entre outros componentes afim de

controlar a temperatura dos canais de alimentação.

Este tipo de molde pode ainda ser dividido em dois tipos, molde com distribuidor frio que possui resistências elétricas para aquecimento dispostas no centro dos canais fazendo com que as resistências elétricas não transmitam calor para o resto do distribuidor assim se mantendo frio com o resto do molde, e molde com o distribuidor quente, nele as resistências elétricas são montadas na parte externa dos canais mantendo todo o distribuidor quente, e tendo que ser isolado do resto do molde. A figura 11 ilustra a diferença entre os dois tipos de distribuidor.

Figura 11 - Canais de alimentação quentes



Fonte: Adaptado de Part and mold design LANXESS Corporation (2007).

De modo geral a utilização de moldes com canais quentes traz vantagens relacionadas a redução do consumo de energia durante o processo, diminuição do tempo de resfriamento e economia de material e mão de obra devido a não ser necessário moer os canais frios presentes nos moldes com canais frios.

já como desvantagem podemos destacar os custos relacionados ao projeto, fabricação e manutenção desse tipo de molde.

3 METODOLOGIA

Primeiramente neste trabalho será realizada a simulação computacional de todas as etapas do processo de injeção do produto a ser injetado.

Os dados obtidos na simulação suportarão o projeto do molde.

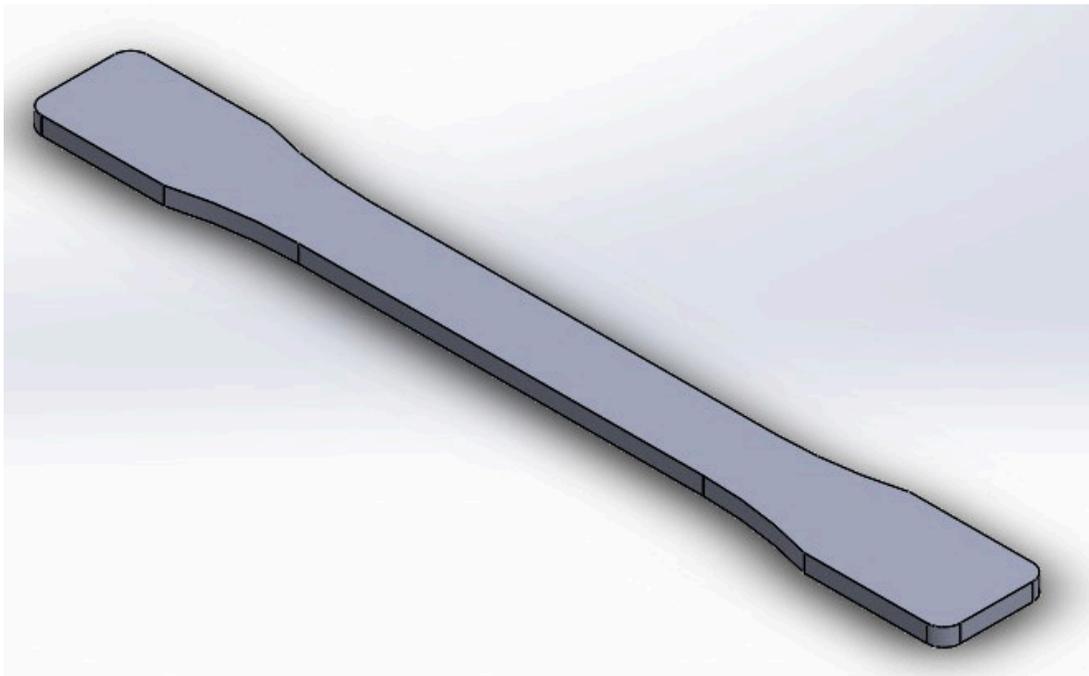
3.1 Simulação computacional

A simulação computacional empregada neste trabalho, foi feita através do software CAE Moldflow[®]. A sequência de análise utilizada foi a de Enchimento + Arrefecimento + Enchimento + Compactação+Empeno (Fill+Cool+Fill+Pack+Warp), a escolha desta opção de simulação se deve a comparações de trabalhos anteriores que atestaram este modelo como mais próximo do real.(SACCHELLI; CARDOSO, 2007).

3.1.1 Geometria simulada

O processo de simulação começa com a definição de um modelo computacional do produto, o modelo simulado se trata de um corpo de prova de ensaio de tração seguindo as dimensões do corpo tipo I da ASTM D638-14 a figura 12 traz o modelo 3D do corpo de prova gerado no software Solidworks[®]. Esta geometria foi escolhida pois se pretende analisar em trabalhos futuros as propriedades mecânicas dos componentes de acordo com a variação dos parâmetros de injeção.

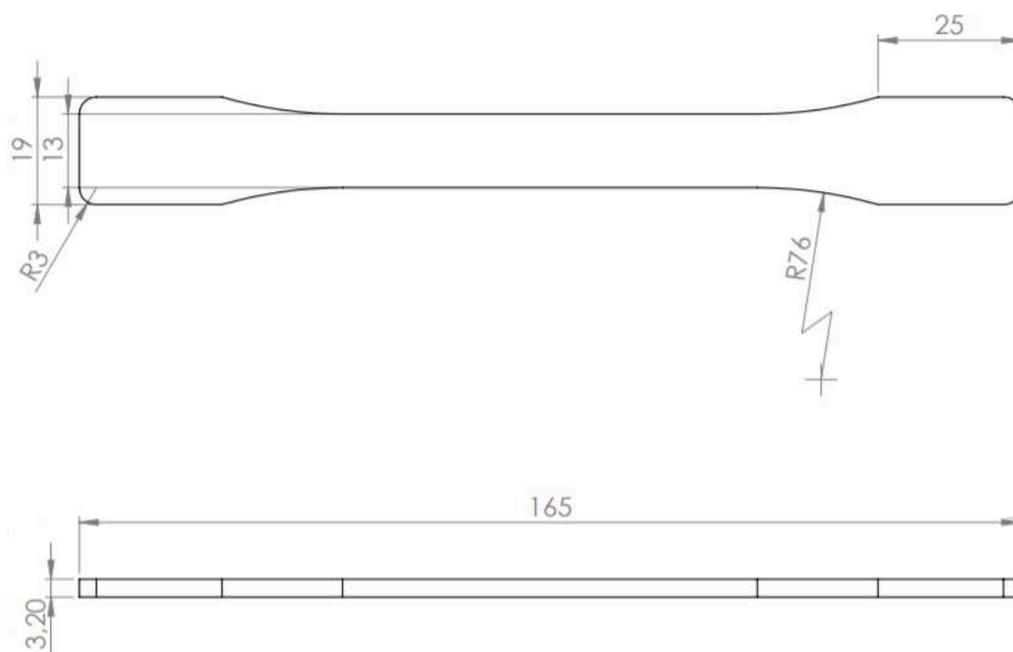
Figura 12 - Corpo de prova ensaio de tração.



Fonte: O autor (2021).

A figura 13 traz o desenho técnico do corpo de prova simulado.

Figura 13 - Desenho técnico corpo de prova.



Fonte: O autor (2021).

3.1.2 Parametros da simulação

Como já citado para simulação do processo de injeção foi utilizado o software CAE Moldflow.

O processo de injeção foi simulado para duas configurações diferentes de posicionamento dos canais de alimentação e 3 configurações diferentes de tamanhos de gates seguindo as dimensões da ASTM D3641-15. A tabela 4 traz as dimensões para os gates em formato retangular.

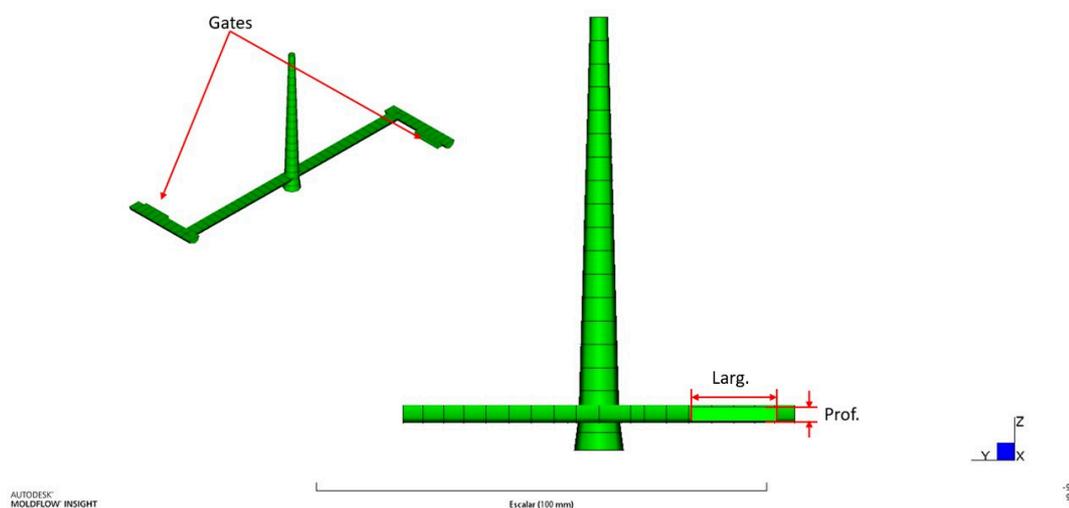
Tabela 4 - Dimensões dos Gates

| Configuração | Profundidade(mm) | Largura(mm) |
|--------------|------------------|-------------|
| 1 | 3,2 | 19 |
| 2 | 2,65 | 15,85 |
| 3 | 2,1 | 12,7 |

Fonte : American Society for Testing and Materials (2015)

O modelamento dos gates pode ser visto na figura 14.

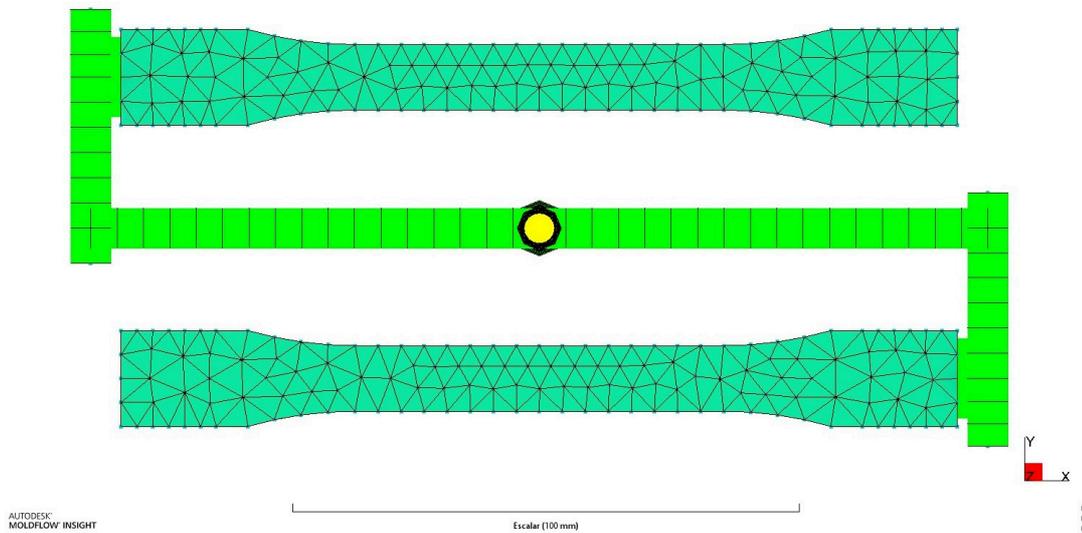
Figura 14 - Gates



Fonte: O autor (2020).

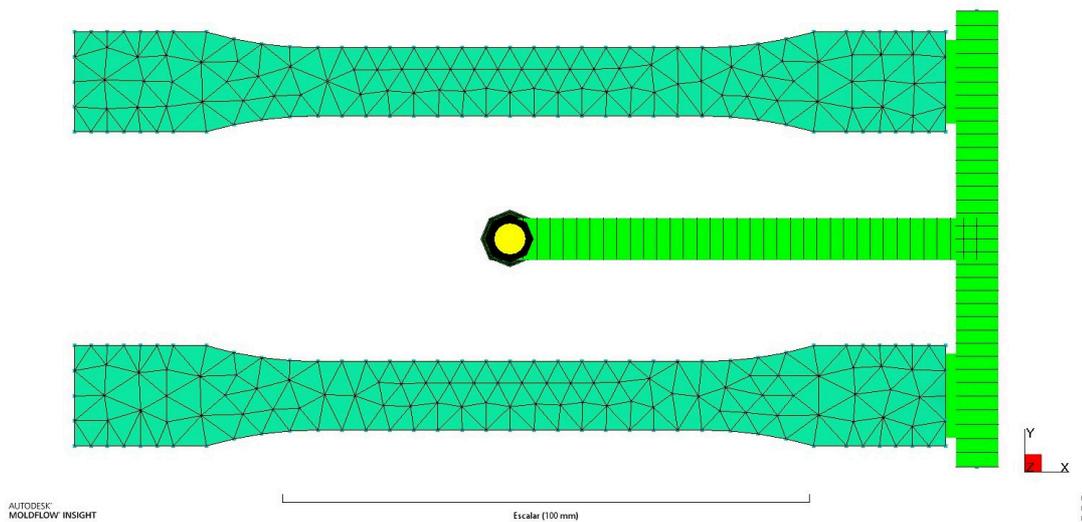
As figuras 15 e 16 trazem as 2 disposição de canais de alimentação indicados pela ASTM 3641-15 simulados.

Figura 15 - Disposição em formato de S.



Fonte: O autor (2020).

Figura 16 - Disposição em formato de T.



Fonte: O autor (2020).

Para as três configurações dimensionais de gates e duas disposições de canal de alimentação foram realizadas simulações para 7 materiais diferentes como apresentado na tabela 5.

Tabela 5 - Materiais Analisados

| Nome Genérico | Fabricante | Nome Comercial |
|--|---|-----------------------|
| Polioximetileno (POM) | Ticona | Celcon M90 |
| Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) | BASF | Terluran GP-22 |
| Polipropileno (PP) | Braskem S A | H 105 |
| Polietileno Tereftalato (PET) | Kaneka | Hyperite 5251 |
| Poliamidas (PA) | Mitsubishi Engineering Plastics Corporation | Reny W38 |
| Poliestireno (PS) | Styrolution | Empera 350N |
| Nylon (PA6) | Rhodia Engineering Plastics | Technyl C 216 Natural |

Fonte : O autor (2020)

Com os materiais definidos baseados na biblioteca do Software são apresentadas na tabela 6 ,as propriedades de processamento que são indicadas pelos fabricantes dos materiais.

Tabela 6 - Propriedades de processamento

| Polímero | POM | ABS | PP | PET | PA | PS | PA6 |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Temperatura da superfície do molde (°C) | 90 | 50 | 40 | 95 | 90 | 50 | 60 |
| Temperatura do fundido (°C) | 180 | 250 | 230 | 285 | 265 | 230 | 260 |
| Temperatura de extração (°C) | 130 | 93 | 110 | 204 | 133 | 80 | 170 |
| Shear rate (1/s) | 40000 | 50000 | 100000 | 50000 | 100000 | 40000 | 60000 |
| Shear stress (MPa) | 0,45 | 0,3 | 0,25 | 0,5 | 0,31 | 0,24 | 0,50 |
| Máxima pressão de injeção (MPa) | 58,00 | 48,96 | 16,13 | 60,89 | 71,15 | 33,11 | 45,79 |
| Calor específico (J/Kg°C) | 2128,32 a 180°C | 2447 a 250°C | 2820 a 230°C | 1460 a 297°C | 1900 a 270°C | 1700 a 235°C | 2820 a 260°C |
| Condutividade térmica (W/m°C) | 0,235 a 180°C | 0,16 a 250°C | 0,13 a 230°C | 0,303 a 250°C | 0,49 a 280°C | 0,13 a 235°C | 0,2 a 260°C |

Fonte : Biblioteca Moldflow (2020)

Como apresentado na tabela 6 a pressão de injeção não foi fixada, deixando o software ajustar uma melhor pressão para cada material.

Com a definição da configuração das dimensões do gate e das propriedades de processamento dos materiais a ser testado torna-se necessário a definição dos demais parâmetros da simulação, como por exemplo tipo de malha, tipo de elementos, numero de elementos, numero de nós, razão de aspecto e sequencia de analise, a tabela 7 traz as configurações utilizadas na simulação.

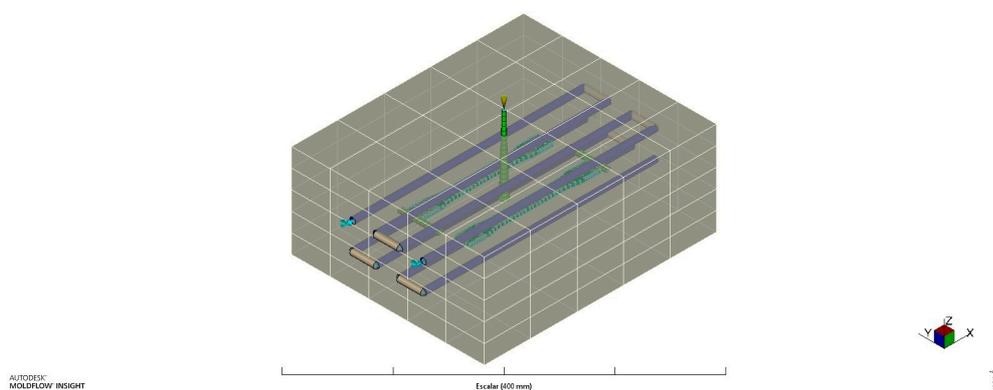
Tabela 7 - Configurações da simulação

| Canal de alimentação em formato de S | |
|---|--|
| Tipo de Malha | Dual Domain |
| Tipo de Elementos | Triangulares |
| Numero de Elementos | 2377 |
| Numero de Nós | 1150 |
| Razão de Aspecto Máxima | 4,32 |
| Sequencia de Analise | Enchimento + Arrefecimento+ Enchimento+Compactação+Empeno |
| Canal de alimentação em formato de T | |
| Tipo de Malha | Dual Domain |
| Tipo de Elementos | Triangulares |
| Numero de Elementos | 1298 |
| Numero de Nós | 1151 |
| Razão de Aspecto Máxima | 4,32 |
| Sequencia de Analise | Enchimento + Arrefecimento+ Enchimento+Compactação+Empeno |

Fonte : O autor (2021)

A figura 17 traz a malha utilizada na simulação contendo além do modelo do produto, os canais de alimentação e de refrigeração do molde e o corpo do molde.

Figura 17 - Malha do Produto



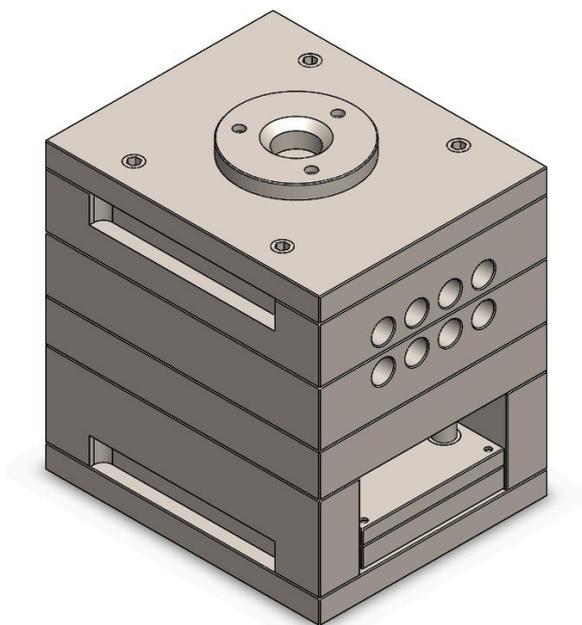
Fonte: O autor (2021).

Após a simulação do processo de injeção e validação de algumas dimensões dos canais, foi possível passar para a etapa de projeto do molde de injeção.

O molde foi projetado utilizando o software solidworks, e foi baseado nos padrões de porta molde da MDL especificamente o porta molde 25.30, este modelo de

porta molde foi escolhido para o projeto devido as suas dimensões serem adequadas para a cavidade a ser projetada, a figura 18 apresenta o modelo 3d do molde.

Figura 18 - Modelo 3D do molde



Fonte: O autor (2021).

4 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações para ambas as configurações de canal de alimentação apresentados na metodologia. Para a análise dos resultados iremos avaliar o tempo de ciclo, tempo de enchimento, taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento. Também será apresentado o conceito do molde projeto.

4.1 Canal de alimentação em formato de S

A tabela 8 apresenta os valores de tempo de enchimento, tempo até a extração, taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento obtidos para as simulações dos 7 materiais utilizando a configuração em formato de S para o canal de alimentação e alterando as dimensões dos gates conforme apresentado anteriormente.

Tabela 8 - Canal de alimentação em formato de S

| Material | Dimensão do gate (mm x mm) | Tempo de Enchimento (s) | Tempo até Extração (s) | Taxa de Cisalhamento (1/s) | Tensão de Cisalhamento (Mpa) |
|----------|----------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------------|
| POM | 3,2 X 19 | 4,374 | 56,53 | 1077,7 | 0,3455 |
| | 2,65X15,85 | 4,518 | 56,92 | 1033,1 | 0,3397 |
| | 2,1x12,7 | 4,509 | 56,91 | 1031,9 | 0,3396 |
| ABS | 3,2 X 19 | 2,637 | 96,14 | 1724,3 | 0,2965 |
| | 2,65X15,85 | 2,621 | 96,37 | 1721,9 | 0,2971 |
| | 2,1x12,7 | 2,606 | 96,36 | 1719,9 | 0,2970 |
| PP | 3,2 X 19 | 1,079 | 95,58 | 4310,8 | 0,0938 |
| | 2,65X15,85 | 1,072 | 95,57 | 4304,8 | 0,0938 |
| | 2,1x12,7 | 1,067 | 95,56 | 4299,8 | 0,0938 |
| PET | 3,2 X 19 | 1,847 | 21,99 | 2586,4 | 0,4049 |
| | 2,65X15,85 | 1,831 | 21,98 | 2582,8 | 0,4047 |
| | 2,1x12,7 | 1,823 | 21,97 | 2579,8 | 0,4045 |
| PA | 3,2 X 19 | 1,45 | 18,86 | 3233 | 0,3958 |
| | 2,65X15,85 | 1,44 | 18,85 | 3228,5 | 0,3956 |
| | 2,1x12,7 | 1,617 | 18,77 | 2866,4 | 0,3793 |

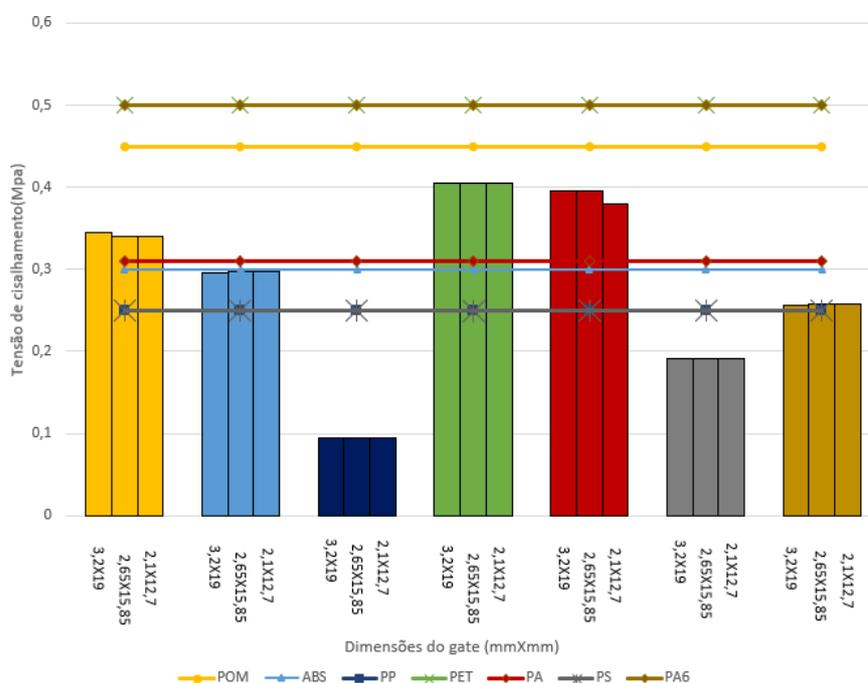
| | | | | | |
|------------|------------|-------|-------|--------|--------|
| PS | 3,2 X 19 | 1,926 | 82,68 | 2351,3 | 0,1914 |
| | 2,65X15,85 | 1,914 | 82,67 | 2348 | 0,1918 |
| | 2,1x12,7 | 1,91 | 82,66 | 2345,3 | 0,1919 |
| PA6 | 3,2 X 19 | 1,581 | 55,58 | 2873,8 | 0,2567 |
| | 2,65X15,85 | 1,57 | 55,82 | 2869,8 | 0,2579 |
| | 2,1x12,7 | 1,563 | 55,81 | 2866,5 | 0,2575 |

Fonte: O autor(2020)

Podemos notar que a alteração das dimensões do gate tem pouca influencia tanto no tempo de enchimento como no tempo até a extração para os 7 materiais. Para os valores da taxa de cisalhamento e da tensão de cisalhamento a influencia se mostrou um pouco maior porem ainda é pequena.

Uma analise mais detalhada da tensão de cisalhamento demonstra que para a poliamida (PA) o limite máximo recomendado para tensão de cisalhamento na parede do material é ultrapassado como apresentado na figura 19.

Figura 19 - Tensão de cisalhamento formato de S



Fonte: O autor (2021).

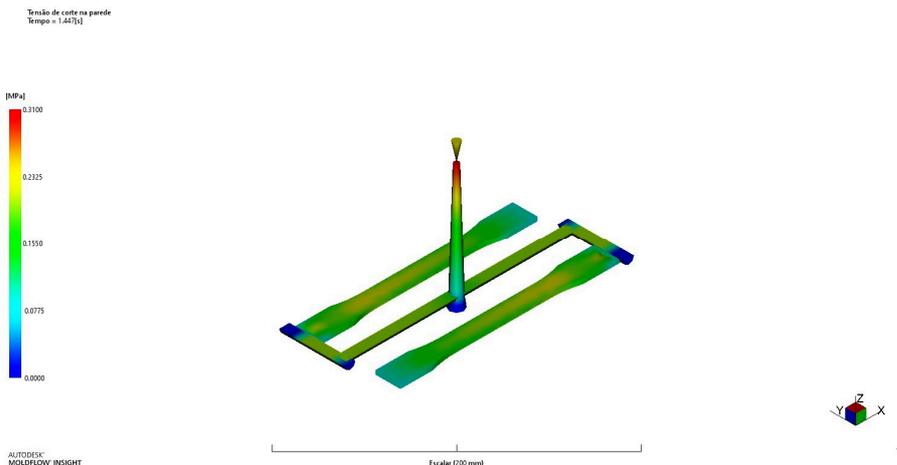
Uma analise detalhada da ficha técnica do PA utilizado na simulação o Reny W38, demonstra que este material tem um reforço de fibra de vidro em sua composição oque explica os níveis de tensão de cisalhamento, devido ao atrito gerado pela fibra.

A região em que o limite de tensão de cisalhamento durante o processo de

injeção é ultrapassado é o começo do canal de alimentação.

Uma forma de contornar o problema da tensão de cisalhamento é aumentar as dimensões do canal de alimentação do molde na região apontada na figura 20, essa alteração garantiria que o molde simulado pudesse ser utilizado no processo de injeção dos 7 materiais.

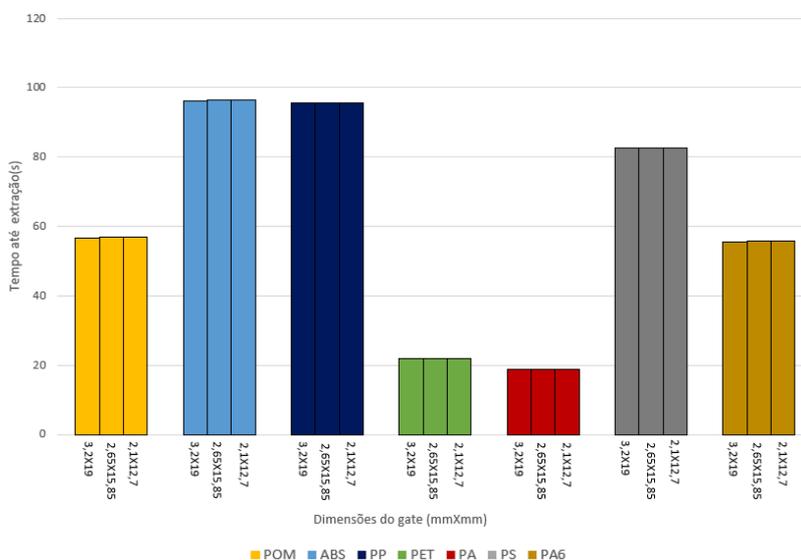
Figura 20 - Distribuição de tensão para PA canal em formato de S



Fonte: O autor (2021).

Ainda analisando os valores apresentados na tabela 8, podemos notar a diferença no tempo de resfriamento dos corpos de prova para cada material, a figura trás um comparativo entre os tempos até a extração para cada material.

Figura 21 - Tempo até a extração formato de S



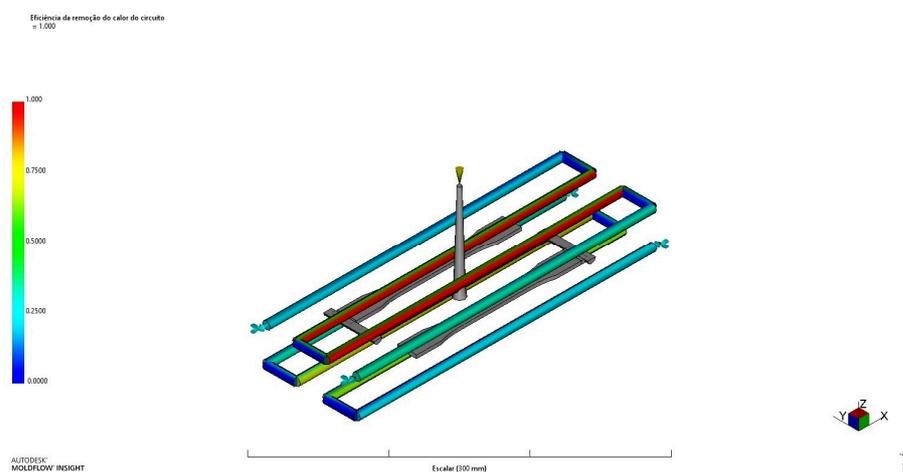
Fonte: O autor (2021).

A figura 21 deixa claro que a mudança nas dimensões do gate apesar de acrescentar mais massa aos canais de alimentação tem pouca influencia no tempo de resfriamento dentro da faixa de variação das dimensões utilizadas, outro fato que fica claro é a diferença no tempo de resfriamento entre os materiais, quando comparamos o ABS por exemplo que tem um tempo de resfriamento médio de 96 s e o PA que tem um tempo de aproximadamente 18 s.

Tanto o PET quanto o PA tem um tempo até a extração menor quando comparado aos outros materiais, isso acontece devido as suas propriedades térmicas principalmente calor específico e condutividade térmica.

A eficiência do sistema de refrigeração utilizado no projeto do molde pode ser visto na figura 22.

Figura 22 - Eficiência canal de refrigeração inserto S



Fonte: O autor (2021).

4.2 Canal de alimentação em formato de T

A tabela 9 apresenta os valores de tempo de enchimento, tempo até a extração, taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento obtidos para as simulações dos 7 materiais utilizando a configuração em formato de T para o canal de alimentação e alterando as dimensões dos gates conforme apresentado anteriormente.

Tabela 9 - Canal de alimentação em formato de T

| Material | Dimensão do gate (mm x mm) | Tempo de Enchimento (s) | Tempo até Extração (s) | Taxa de Cisalhamento (1/s) | Tensão de Cisalhamento (Mpa) |
|----------|----------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------------|
| POM | 3,2 X 19 | 4,045 | 59,21 | 1102,2 | 0,4083 |
| | 2,65X15,85 | 4,193 | 59,6 | 1053,6 | 0,4044 |
| | 2,1x12,7 | 4,173 | 59,58 | 1054,9 | 0,4019 |

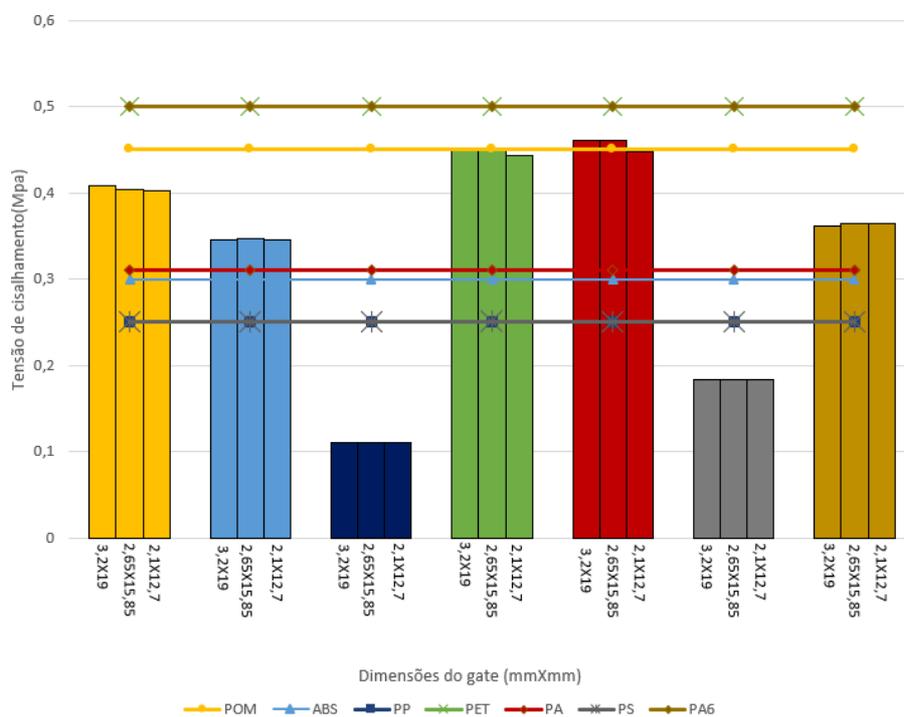
| | | | | | |
|------------|------------|--------|-------|--------|--------|
| ABS | 3,2 X 19 | 2,449 | 96,2 | 1763,5 | 0,3452 |
| | 2,65X15,85 | 2,432 | 96,18 | 1760,5 | 0,3467 |
| | 2,1x12,7 | 2,419 | 96,42 | 1758,1 | 0,346 |
| PP | 3,2 X 19 | 0,9986 | 96 | 4408,7 | 0,1109 |
| | 2,65X15,85 | 0,9917 | 95,99 | 4401,4 | 0,1111 |
| | 2,1x12,7 | 0,9867 | 95,98 | 4395,3 | 0,1111 |
| PET | 3,2 X 19 | 1,708 | 22,61 | 2645,2 | 0,4485 |
| | 2,65X15,85 | 1,694 | 22,59 | 2640,8 | 0,4488 |
| | 2,1x12,7 | 1,686 | 22,59 | 2637,1 | 0,4437 |
| PA | 3,2 X 19 | 1,34 | 19,25 | 3306,5 | 0,4602 |
| | 2,65X15,85 | 1,331 | 19,24 | 3301 | 0,4608 |
| | 2,1x12,7 | 1,501 | 19,15 | 2930,2 | 0,4474 |
| PS | 3,2 X 19 | 1,613 | 93,87 | 3333,8 | 0,1832 |
| | 2,65X15,85 | 1,603 | 93,85 | 3189,7 | 0,1842 |
| | 2,1x12,7 | 1,757 | 93,75 | 2731,8 | 0,1842 |
| PA6 | 3,2 X 19 | 1,468 | 55,72 | 2939,1 | 0,3621 |
| | 2,65X15,85 | 1,458 | 55,71 | 2934,2 | 0,3644 |
| | 2,1x12,7 | 1,45 | 55,70 | 2930,2 | 0,3639 |

Fonte: O autor(2021)

Da mesma forma que na configuração de S as dimensões do gate tem pouca influencia tanto no tempo de enchimento como no tempo até a extração, na taxa de cisalhamento e na tensão de cisalhamento.

A figura 23 traz os valores de tensão de cisalhamento na parede e taxa de cisalhamento para a simulação com os canais de alimentação em formato de T.

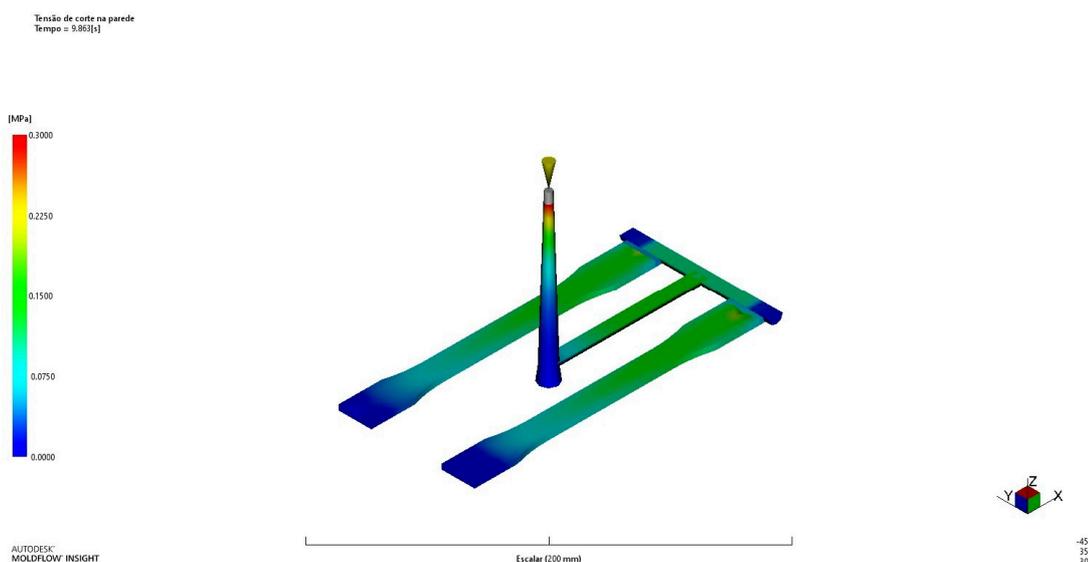
Figura 23 - Tensão de cisalhamento formato de T



Fonte: O autor (2021).

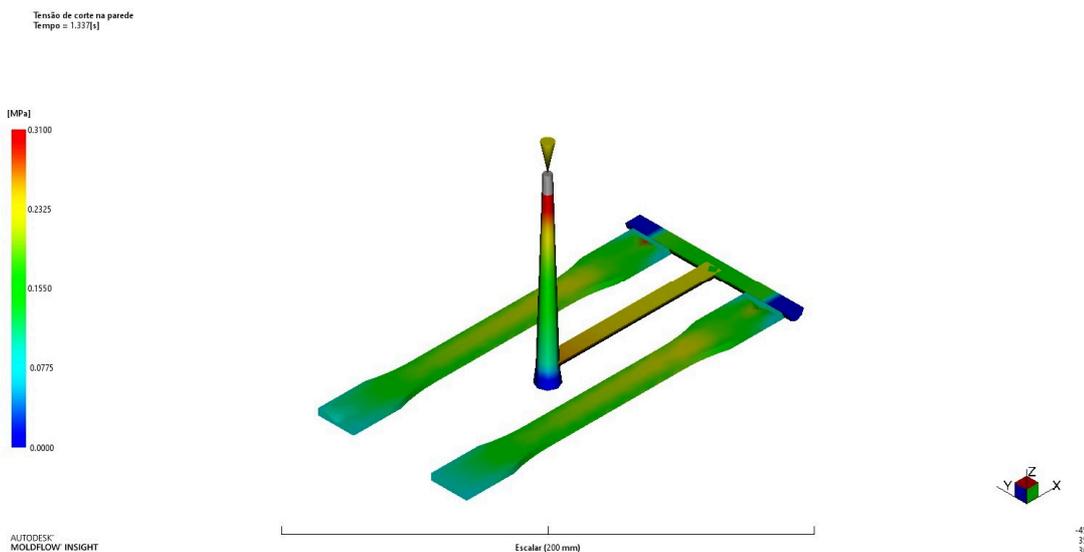
Podemos notar que o comportamento é um pouco diferente para este processo de injeção agora o ABS e o PA ultrapassam o limite máximo de tensão de cisalhamento. As figuras 24 e 25 trazem a distribuição da tensão de cisalhamento durante o processo de injeção no momento em que a máxima tensão é atingida.

Figura 24 - Distribuição de tensão para ABS canal em formato de T



Fonte: O autor (2021).

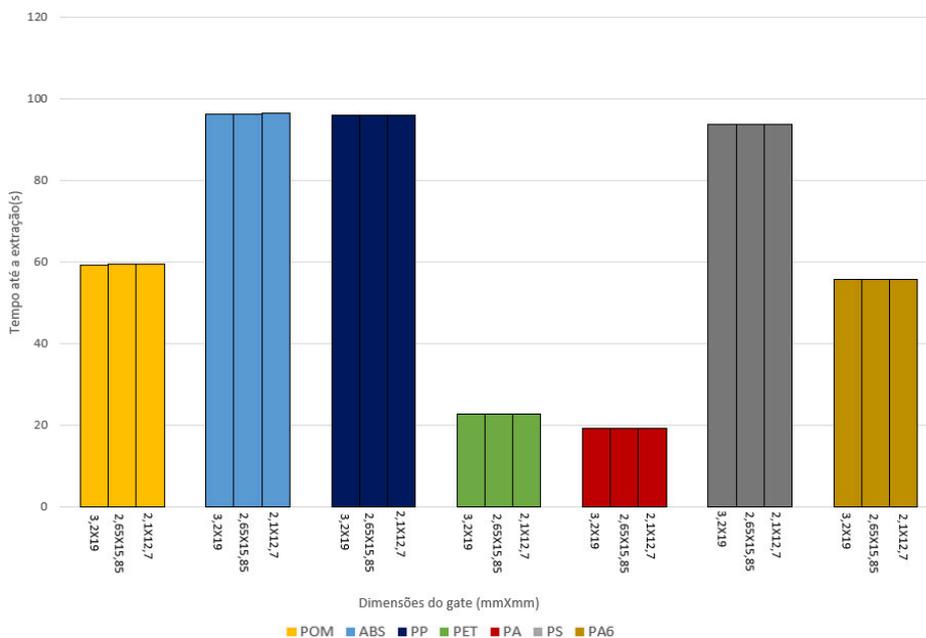
Figura 25 - Distribuição de tensão para PA canal em formato de T



Fonte: O autor (2021).

O tempo de resfriamento até extração para a simulação com os canais de alimentação em formato de T, apresentam comportamento similar ao do simulado na configuração em S como já era esperado a figura 26 apresenta um comparativo dentre os materiais.

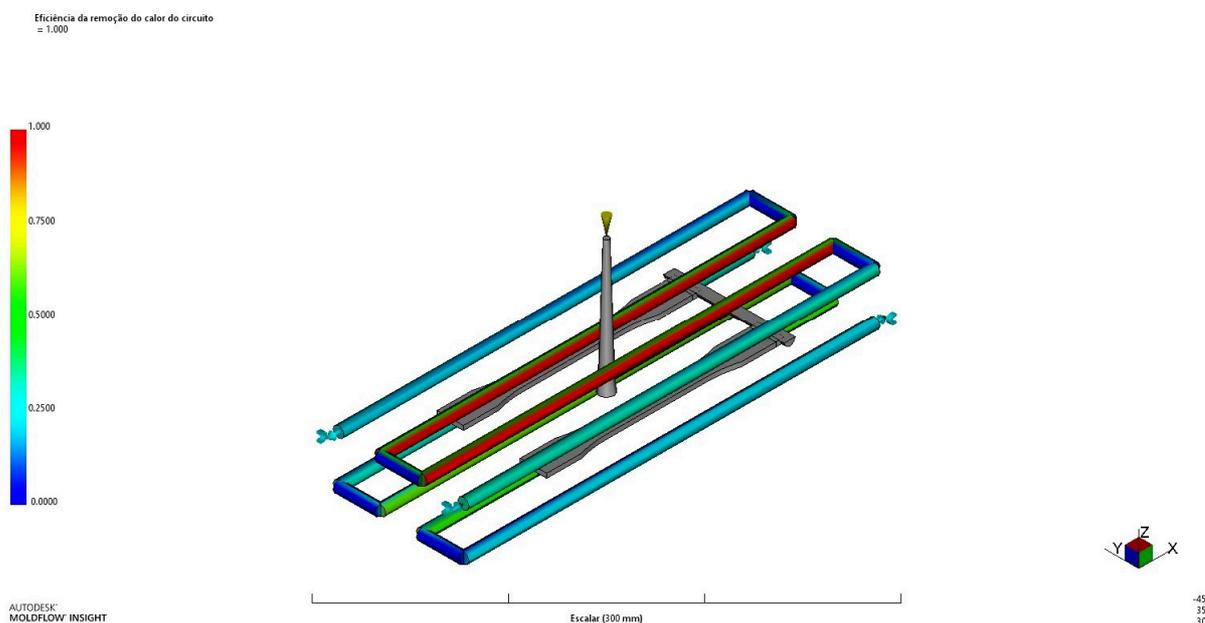
Figura 26 - Tempo até a extração formato de T



Fonte: O autor (2021).

A eficiência de remoção de energia do canal de refrigeração pode ser vista na figura 27 .

Figura 27 - Eficiência canal de refrigeração inserto T



Fonte: O autor (2021).

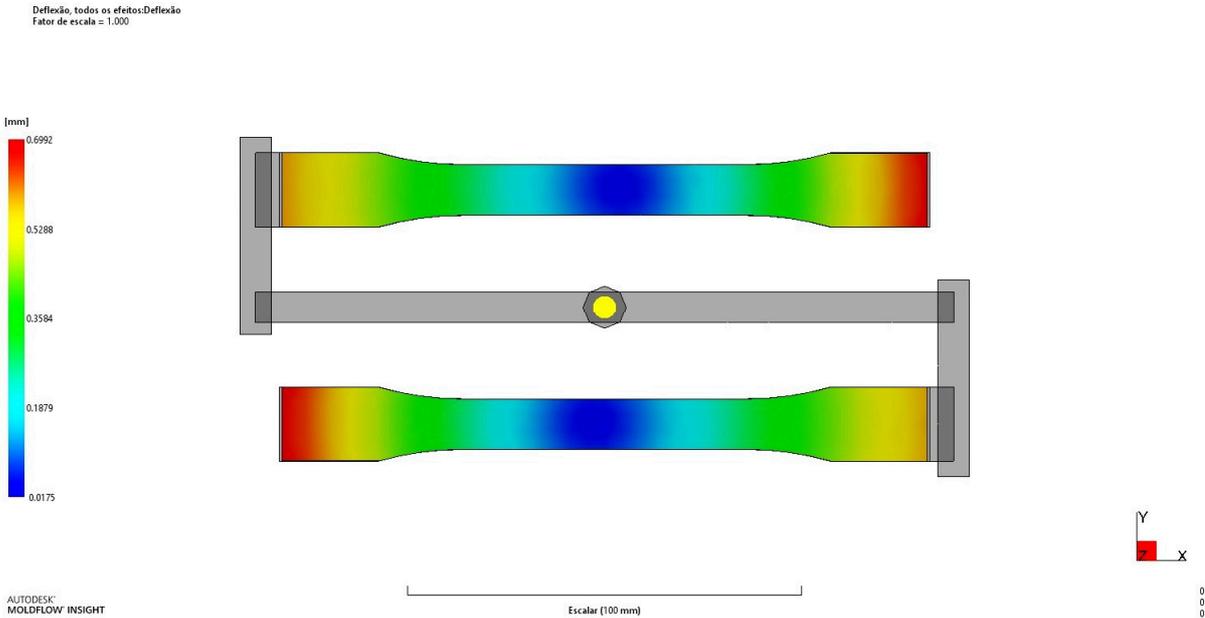
4.3 Contração e empenamento do produto

Os efeitos da contração variam de um material para outro, logo as dimensões da cavidade do inserto de injeção precisam ser corrigidas para cada material que se pretende injetar.

Analisando a tabela 2 apresentada na seção de revisão da literatura podemos definir dois valores de off-set que atendem aos materiais simulados, um off-set de 0,7% atende aos materiais, PA6, PS e ABS, e um off-set de 2% atende ao POM, PP, PET e PA.

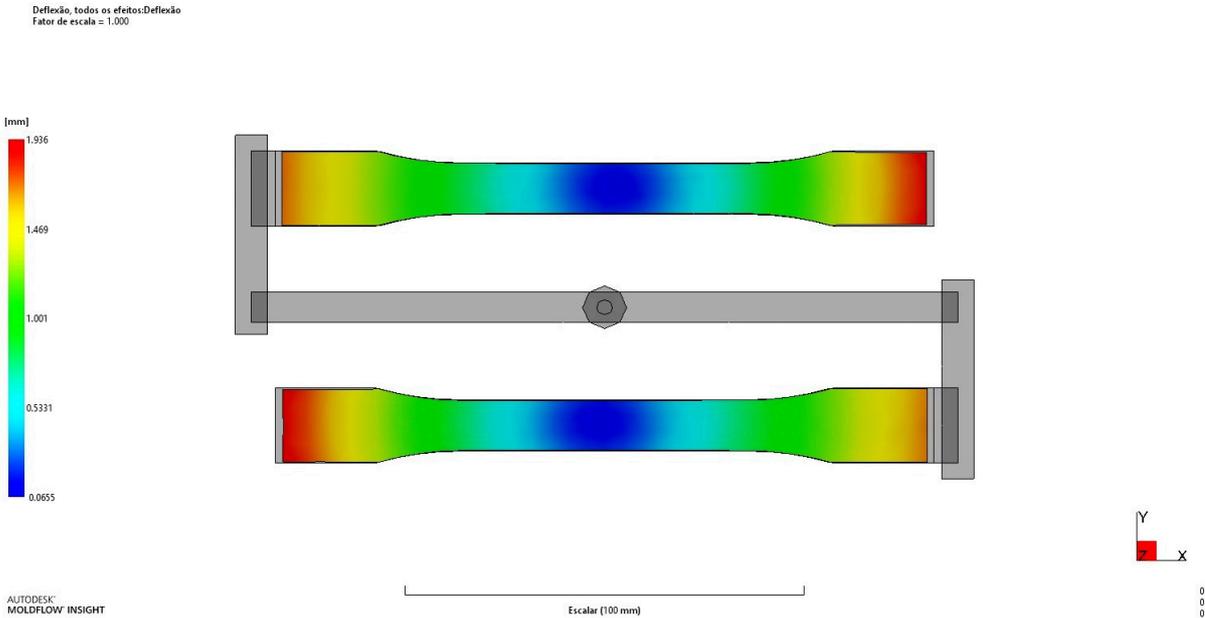
Já os efeitos de empenamento ficam clara ao se analisar as figuras 28 e 29, nelas podemos notar que a deflexão máxima no corpo de prova em POM chega a 1,936 mm enquanto que no corpo de prova em PS a deflexão máxima é de 0,6992 mm.

Figura 28 - Empenamento PS



Fonte: O autor (2021).

Figura 29 - Empenamento POM



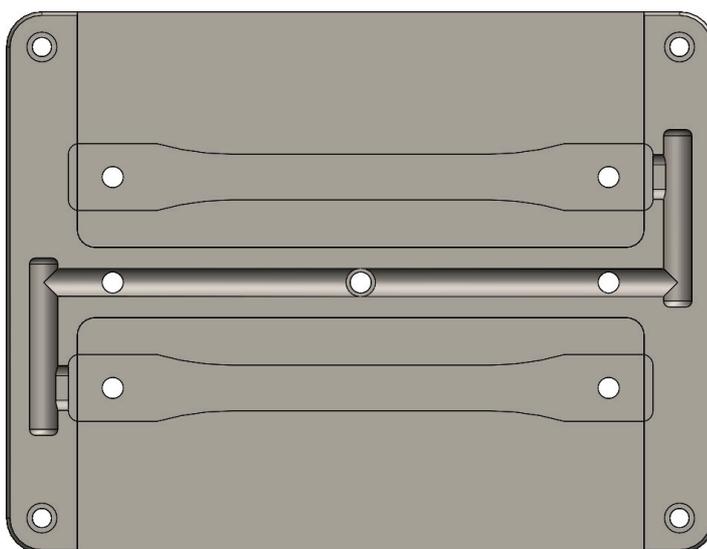
Fonte: O autor (2021).

Como já citado anteriormente a principal causa de empenamento na peça é a diferença de temperatura na peça durante seu resfriamento logo, estudar diferentes configurações de sistema de refrigeração é um método para reduzir o empenamento, o aumento do tempo de recalque também pode ser utilizado para reduzir os efeitos de empenamento.

4.4 Projeto do molde

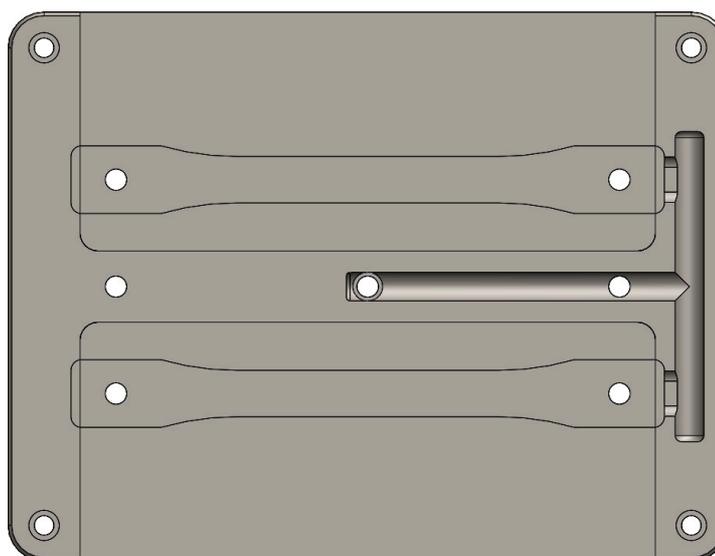
Visando uma maior flexibilidade na utilização do molde, o mesmo foi projetado com canais de refrigeração e cavidade insertada, permitindo a troca dos insertos no porta molde assim permitindo o estudo do processo de injeção com ambas configurações de canal de injeção e também possibilita o estudo do efeito da alteração do sistema de refrigeração, as figuras 30 e 31 trazem os modelos 3d dos insertos.

Figura 30 - Inseto canais em S



Fonte: O autor (2021).

Figura 31 - Inseto canais em T



Fonte: O autor (2021).

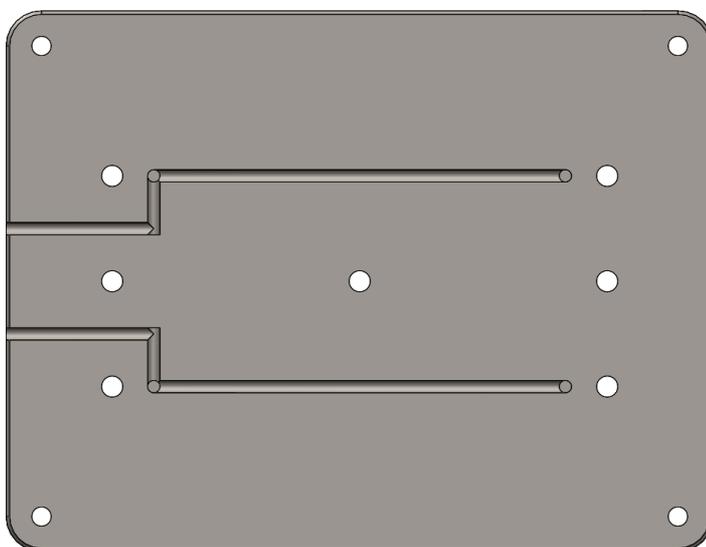
O projeto dos insertos separa os canais de alimentação e refrigeração do

inserto em dois componentes separados assim possibilitando a troca do tipo de canal de alimentação de maneira rápida e prática.

O sistema de refrigeração na base do inserto pode ser trocado da mesma forma que os canais de alimentação do molde, assim permitindo o estudo dos impactos da alteração do sistema de refrigeração no processo de injeção do corpo de prova.

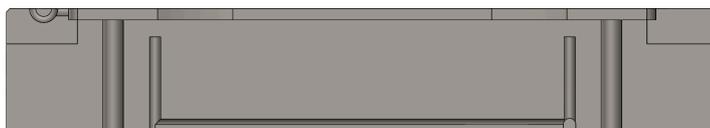
Outra particularidade interessante dos insertos é que o projeto dos mesmos também prevê alojamento para sensores termopares como apresentado nas figuras 32 e 33 estes sensores permitem um controle maior do processo de injeção e uma futura validação dos dados obtidos na etapa de simulação do processo de injeção.

Figura 32 - Alojamento Termopar



Fonte: O autor (2021).

Figura 33 - Alojamento Termopar corte



Fonte: O autor (2021).

O detalhamento do projeto completo se encontra no apêndice A deste trabalho.

5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi de realizar o projeto de um molde de injeção de termoplástico modular, tendo a possibilidade deste molde ser útil para estudos variados de sistemas de alimentação e refrigeração, utilizando recursos de ferramentas computacionais.

Quando comparamos as 3 dimensões de gate estudadas notamos que os efeitos delas são pequenos quando analisamos o tempo de enchimento e o tempo até a extração do produto.

Já ao analisar as taxas de cisalhamento e máxima tensão de cisalhamento podemos notar que para a configuração em formato de S somente o PA ultrapassa os limites permissíveis para o material na região inicial do canal de alimentação, já para a configuração em formato de T além do PA o ABS também ultrapassa o limite máximo permitido, como no formato em S o fluxo de massa é dividido em dois canais os efeitos do cisalhamento nele são menores que no formato em T, um aumento da área inicial do canal de alimentação resolveria este problema em ambos os casos.

Em relação ao tempo até a extração podemos observar que o tempo de ciclo para o PET e o PA são menores quando comparados aos demais materiais, isso acontece devido a suas altas condutividades térmicas e baixo calor específico que favorecem o resfriamento das amostras.

A Configuração do canal de refrigeração escolhida para o inserto se mostrou satisfatória, ela é de fácil usinagem e possui boa eficiência na remoção do calor da amostra.

Quando analisamos a contração dos corpos de prova fica claro que utilizar o mesmo molde para injetar diferentes materiais é inviável caso suas contrações sejam muito diferentes, como para os materiais analisados as contrações são similares é possível gerar dois insertos um de 0,7% de off-set e um de 2% de off-set e deste modo atender a todos os materiais.

Para controlar o empenamento podemos realizar durante o processo de injeção um ajuste do tempo de recalque, ou alterar as configurações do sistema de refrigeração de modo a aumentar a eficiência do mesmo.

O projeto de moldes modulares como o deste trabalho permite ganhos relacionadas a economia de material, pois permite a usinagem apenas dos incertos além da reutilização do porta molde reduzindo os custos de desenvolvimento do ferramental.

Também foi previsto no projeto a fabricação de alojamentos para sensores de temperatura no incerto, estes sensores nos permitem controlar melhor o processo de injeção e validar os resultados obtidos na simulação.

Sugere-se como pesquisas futuras fabricar o molde de injeção que o projeto encontra-se no apêndice A e validar os resultados encontrados na simulação, outras pesquisas podem envolver o projeto de outras configurações para o sistema de refrigeração dos incertos afim de procurar melhorias para o molde.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D638 14: Injection Molding Test Specimens of Thermoplastic Molding and Extrusion Material**. Nova York, 2015.

ARTSIM. Plástico na indústria automobilística. **Tecnologia de Materiais – Tecnologia de Materiais**, 2014. Disponível em: <http://www.tecnologiademateriais.com.br/portal/noticias/plasticos_engenharia/2014/junho/automobilistica.html>. Acesso em: 13 out. 2019.

Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST). **Perfil 2018**. São Paulo, 2019.

Associação Europeia dos Fabricantes de Plástico (PLASTICS EUROPE). **Plastics The Facts 2019**. Bélgica, 2019.

HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos**. [S.l.]: Artliber, 2004.

HARADA, J.; UEKI, M. M. **Injeção de termoplásticos: produtividade com qualidade**. Artliber, São Paulo, Brasil, v. 220, 2012.

LO, C.-H. Analysis of injection molding for computer cooling fans by taguchi method and grey relational analysis. **Filomat**, JSTOR, v. 30, n. 15, p. 4199-4211, 2016.

MANRICH, S. **Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes**. [S.l.]: Artliber, 2013.

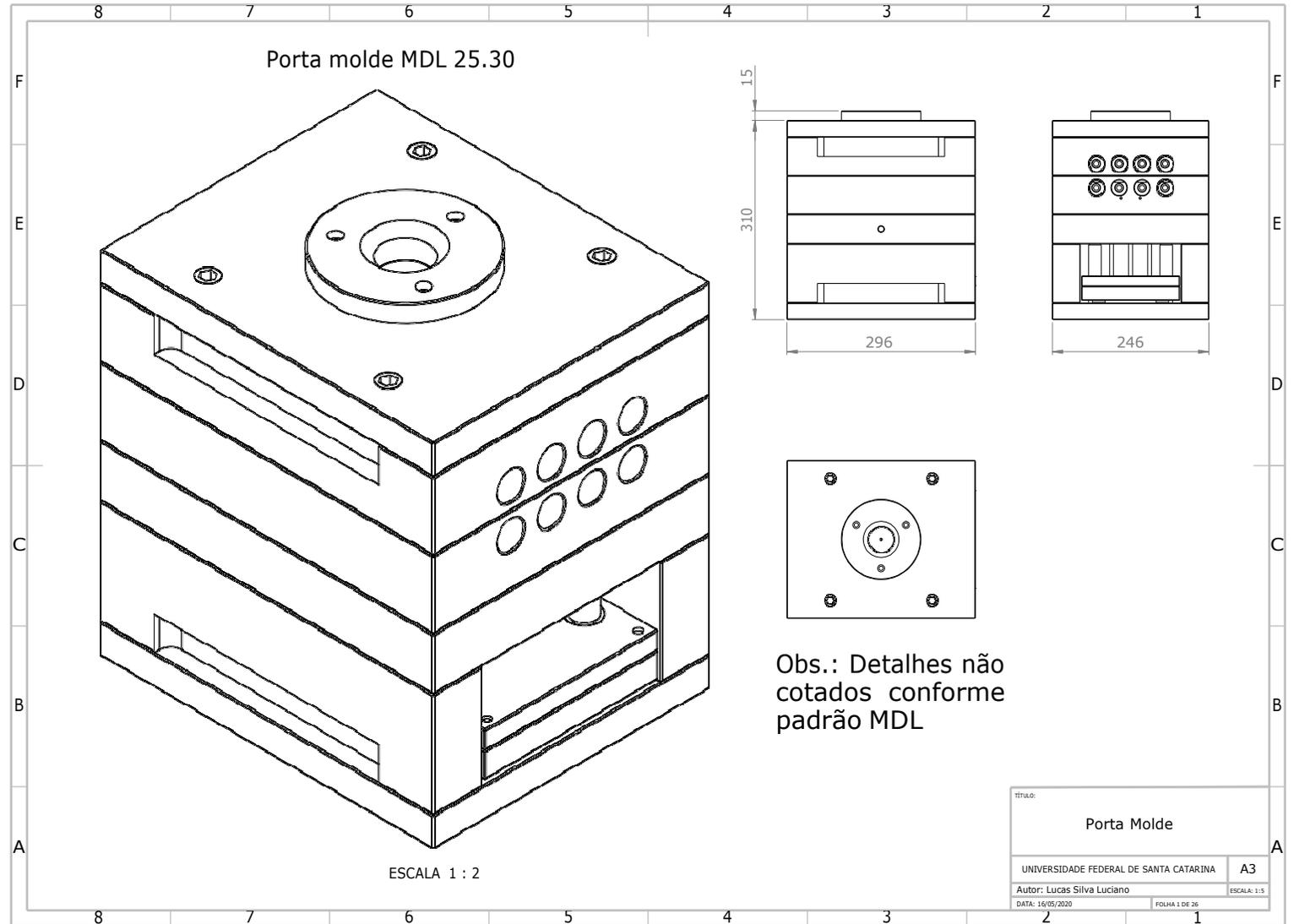
MOAYYEDIAN, M.; ABHARY, K.; MARIAN, R. Improved gate system for scrap reduction in injection molding processes. **Procedia Manufacturing**, Elsevier, v. 2, p. 246-250, 2015.

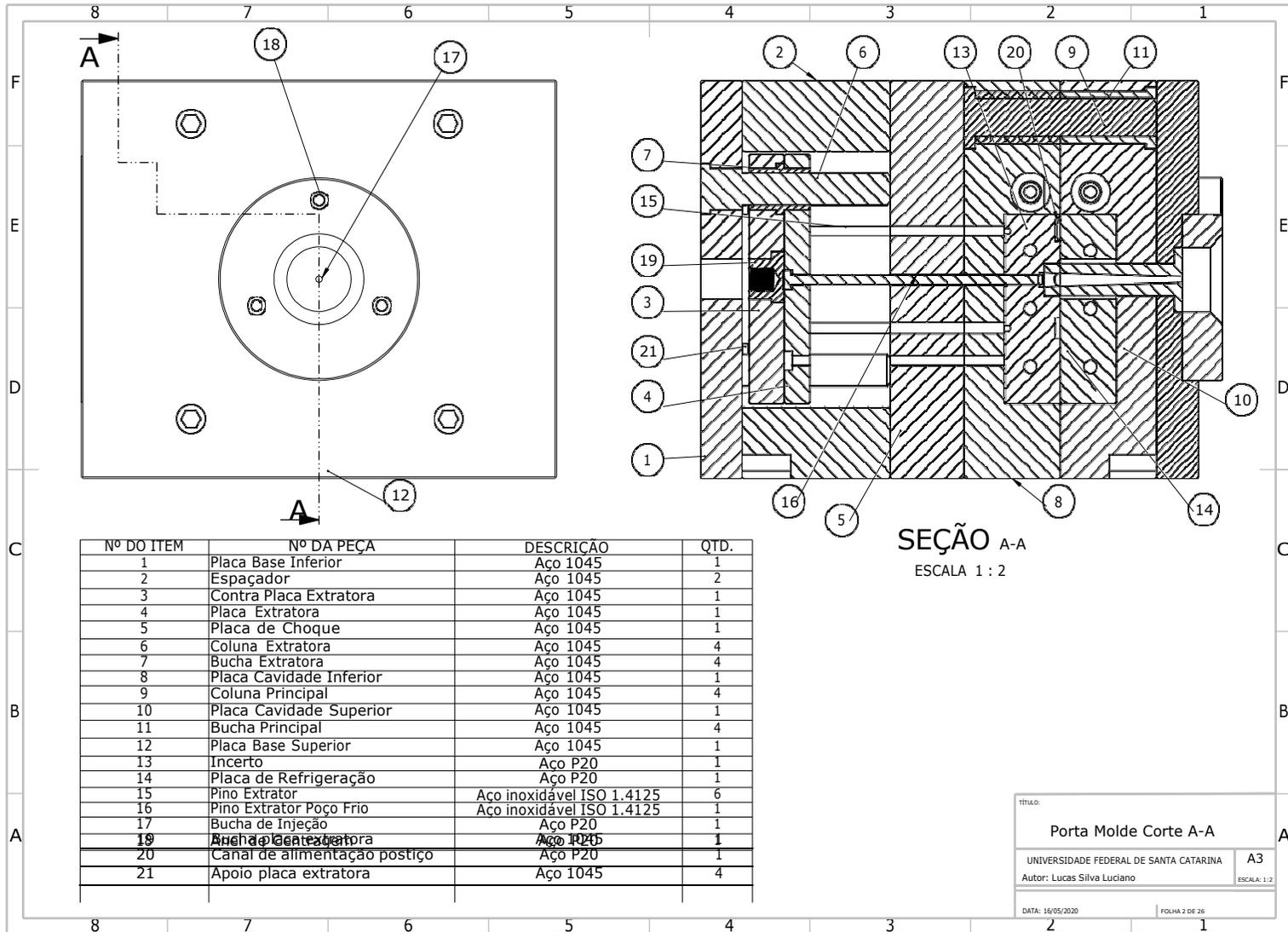
PRUST, R. et al. **Influência do material das placas de refrigeração do molde no tempo do ciclo de injeção para diferentes polímeros**. Joinville, SC, 2018.

SACCHELLI, C. M.; CARDOSO, C. A. Análise da simulação de refrigeração no processo de injeção de termoplásticos. **Brasil, Artigo**, 2007.

VIEIRA, L. F. et al. **Influência de parâmetros de processamento e geometria em propriedades mecânicas de peças de PS, PC e PLA moldadas por injeção**. 2012.

APÊNDICE A



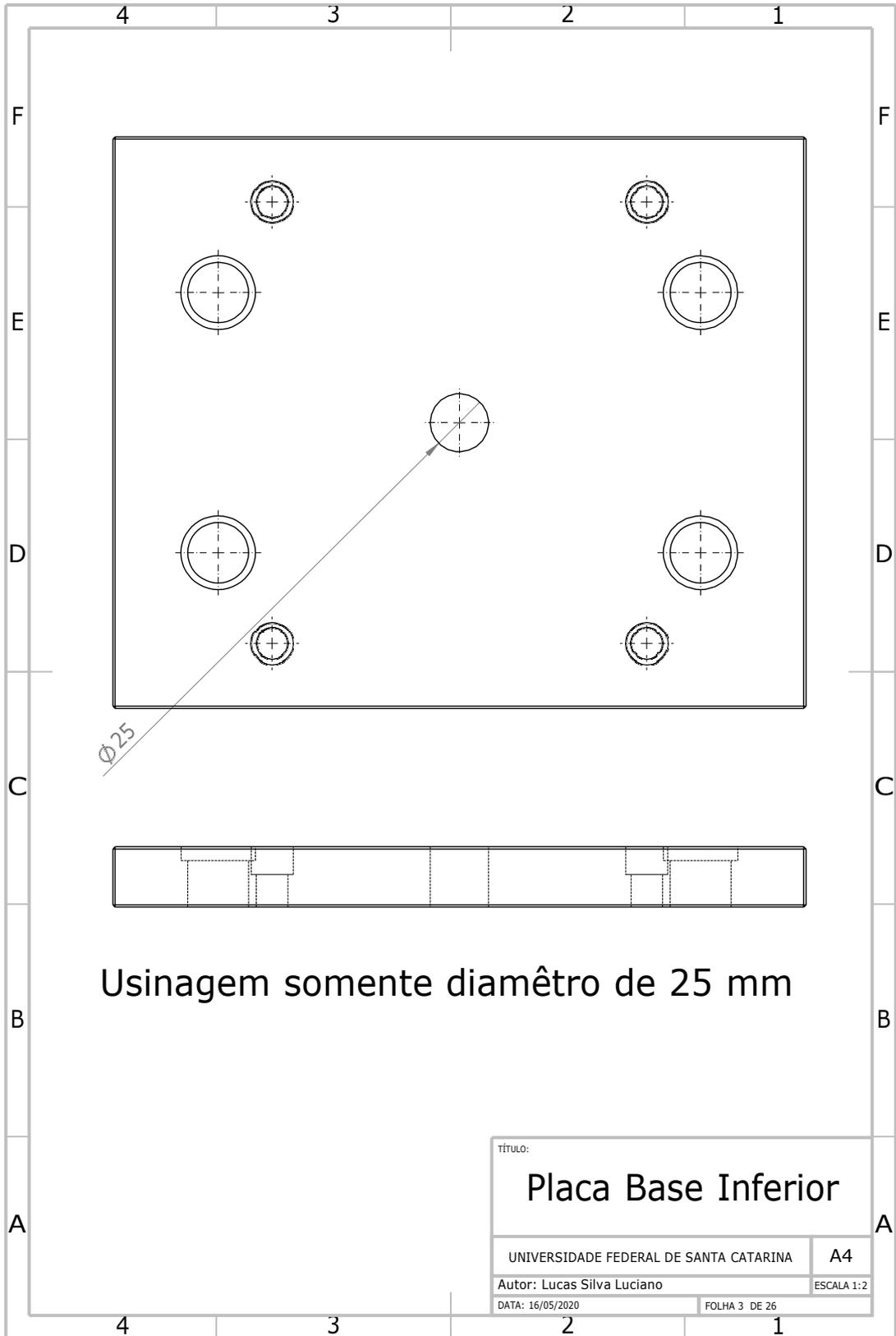


TÍTULO:
Porta Molde Corte A-A

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
Autor: Lucas Silva Luciano

ESCALA: 1:2

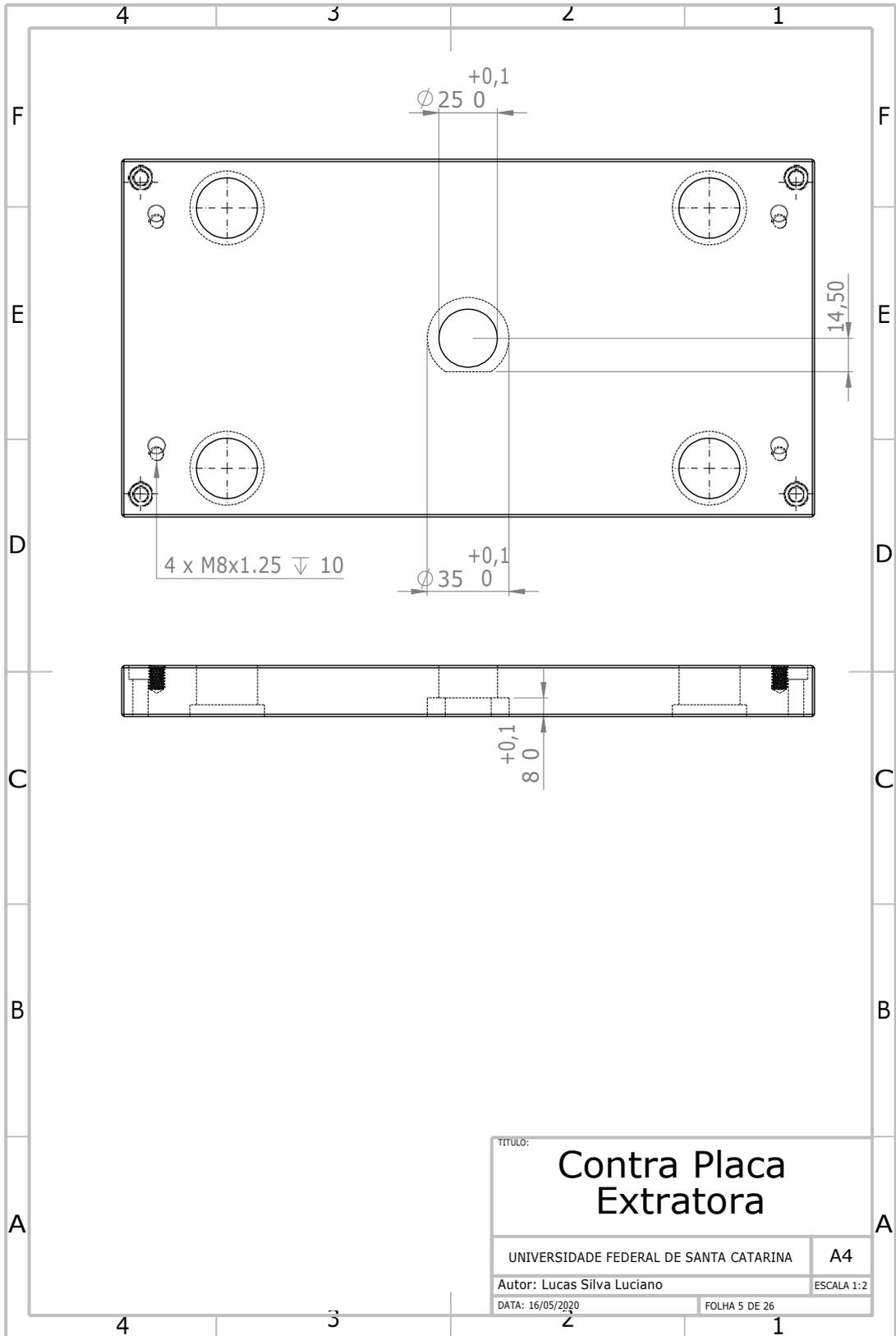
DATA: 16/05/2020 FOLHA 2 DE 26

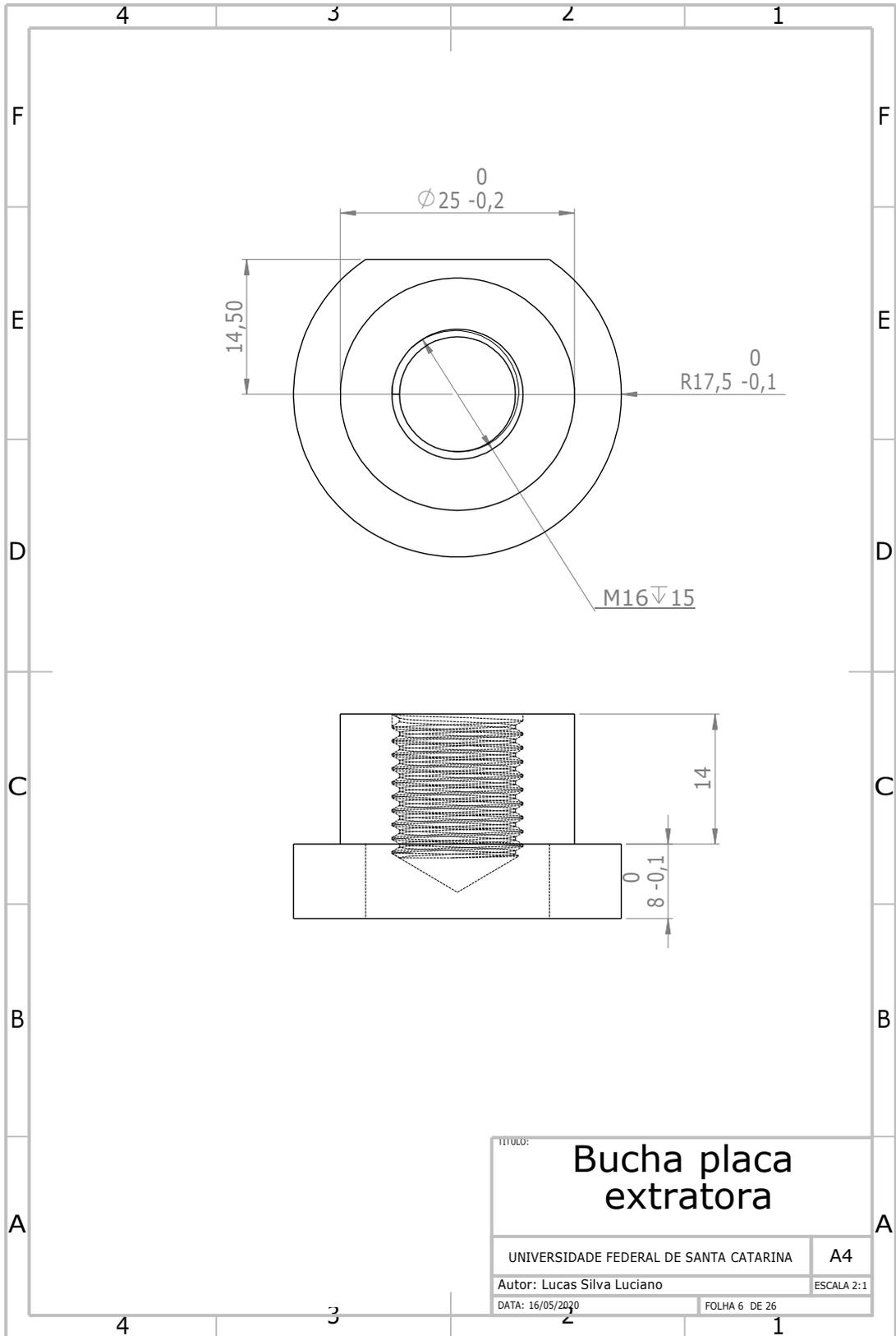


Usinagem somente diâmetro de 25 mm

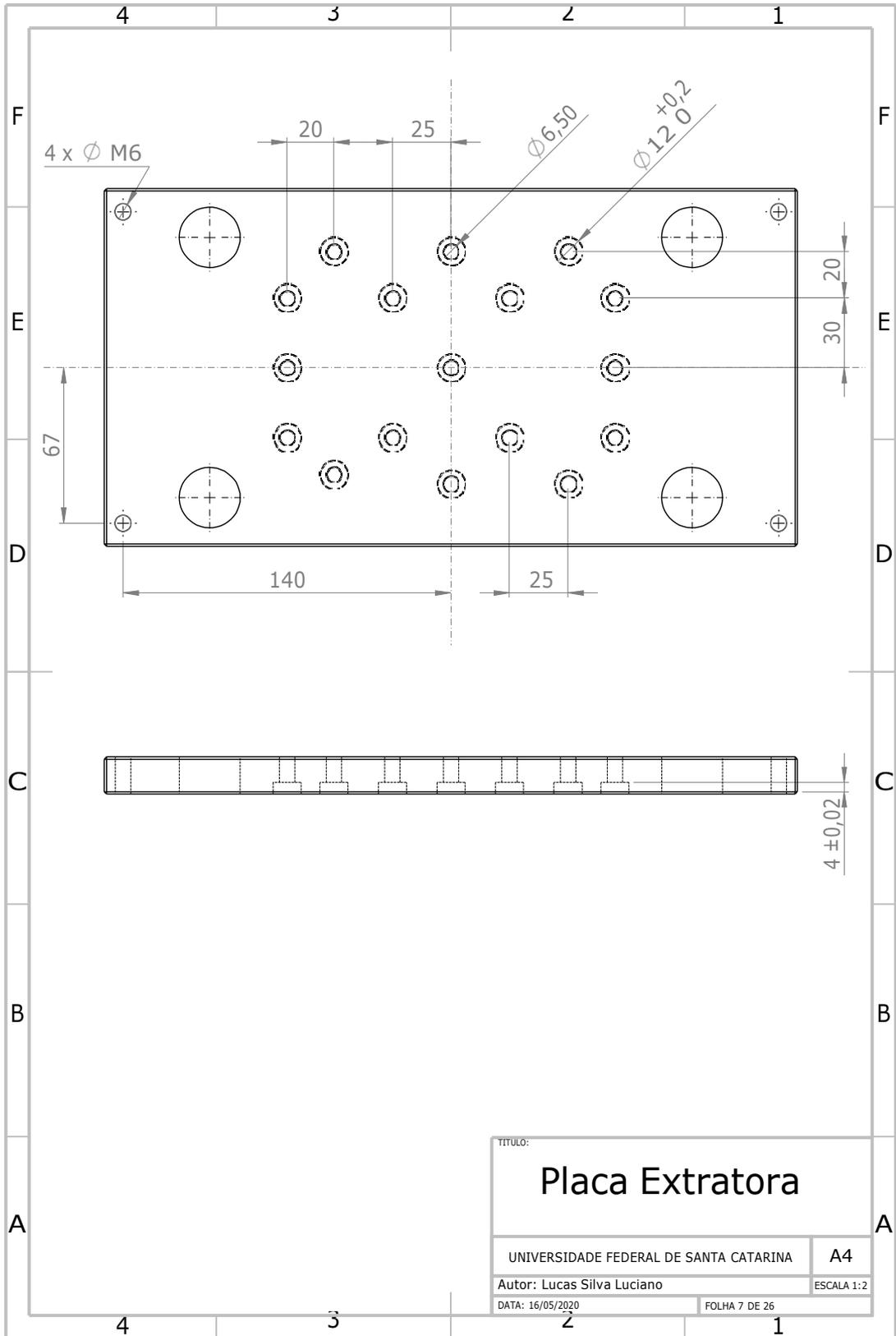
| | |
|--|---------------|
| TÍTULO: | |
| Placa Base Inferior | |
| UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA | A4 |
| Autor: Lucas Silva Luciano | ESCALA 1:2 |
| DATA: 16/05/2020 | FOLHA 3 DE 26 |

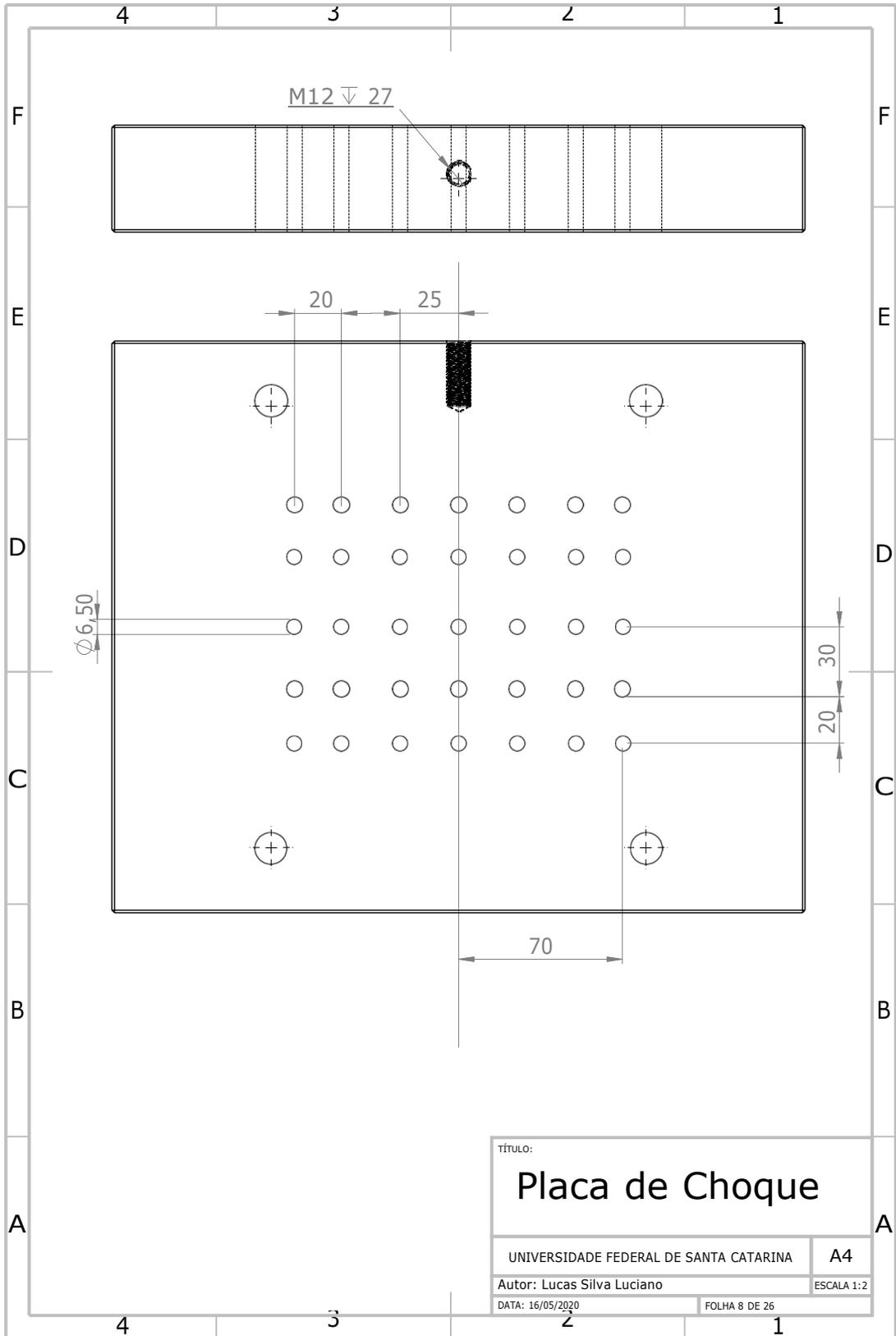


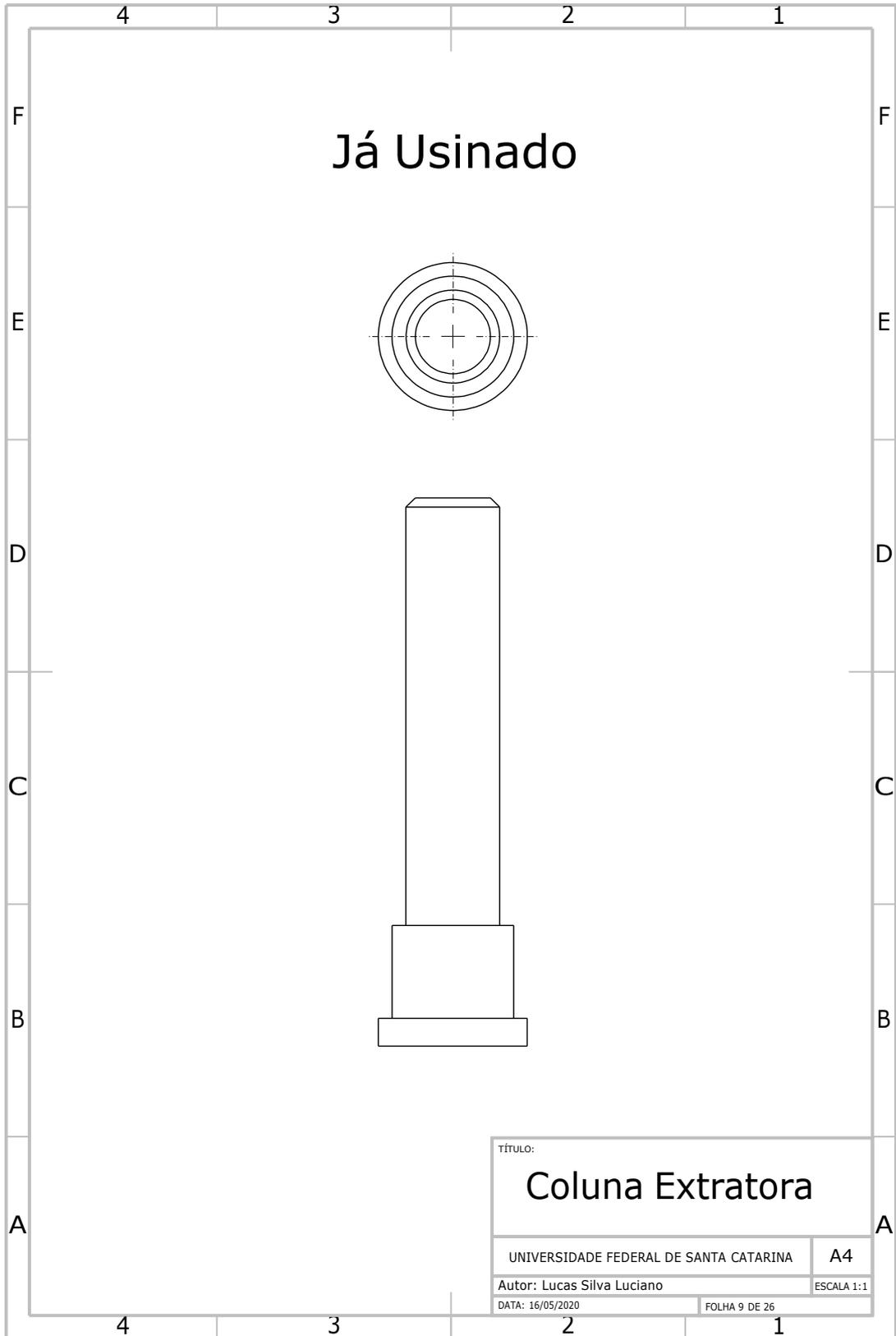


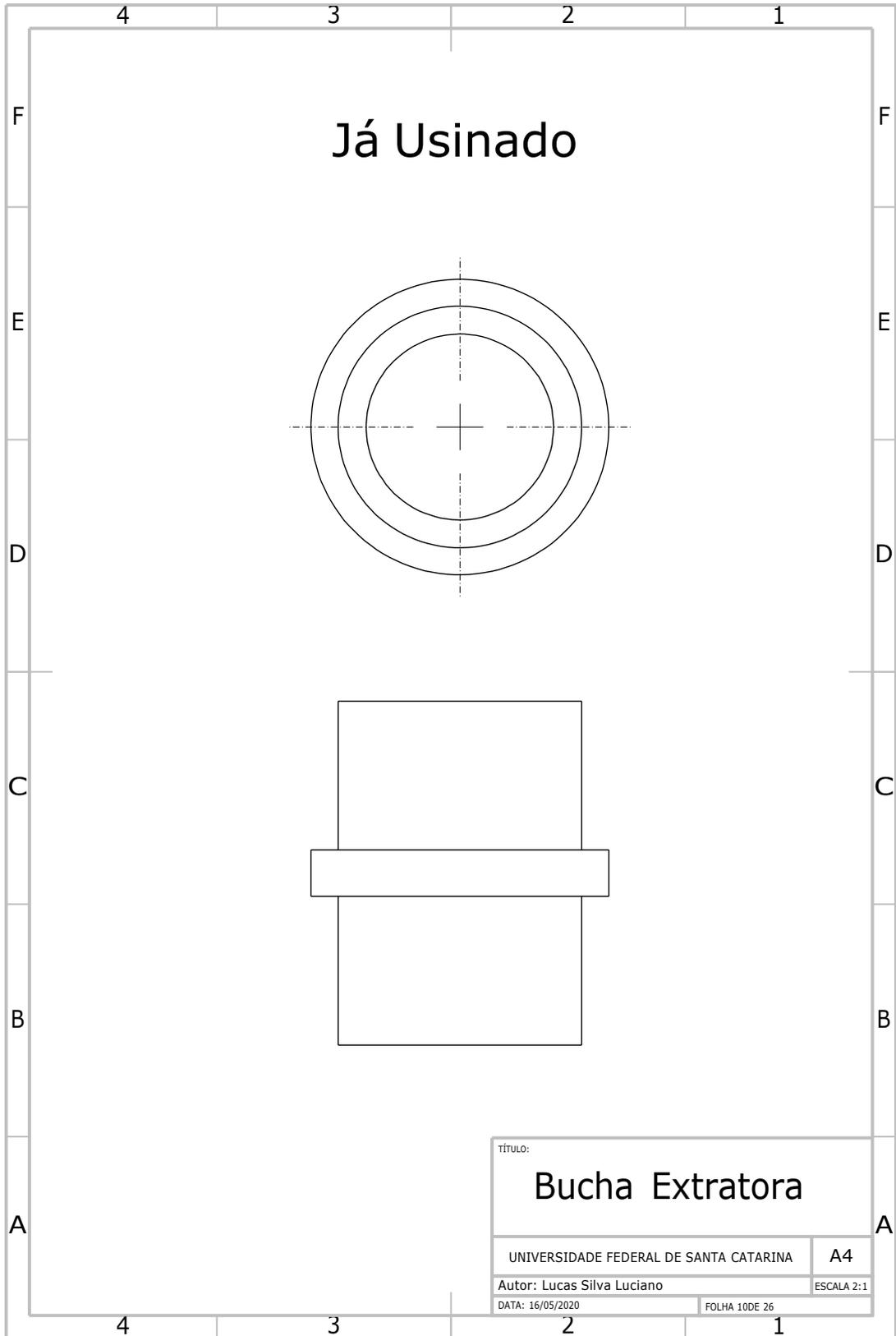


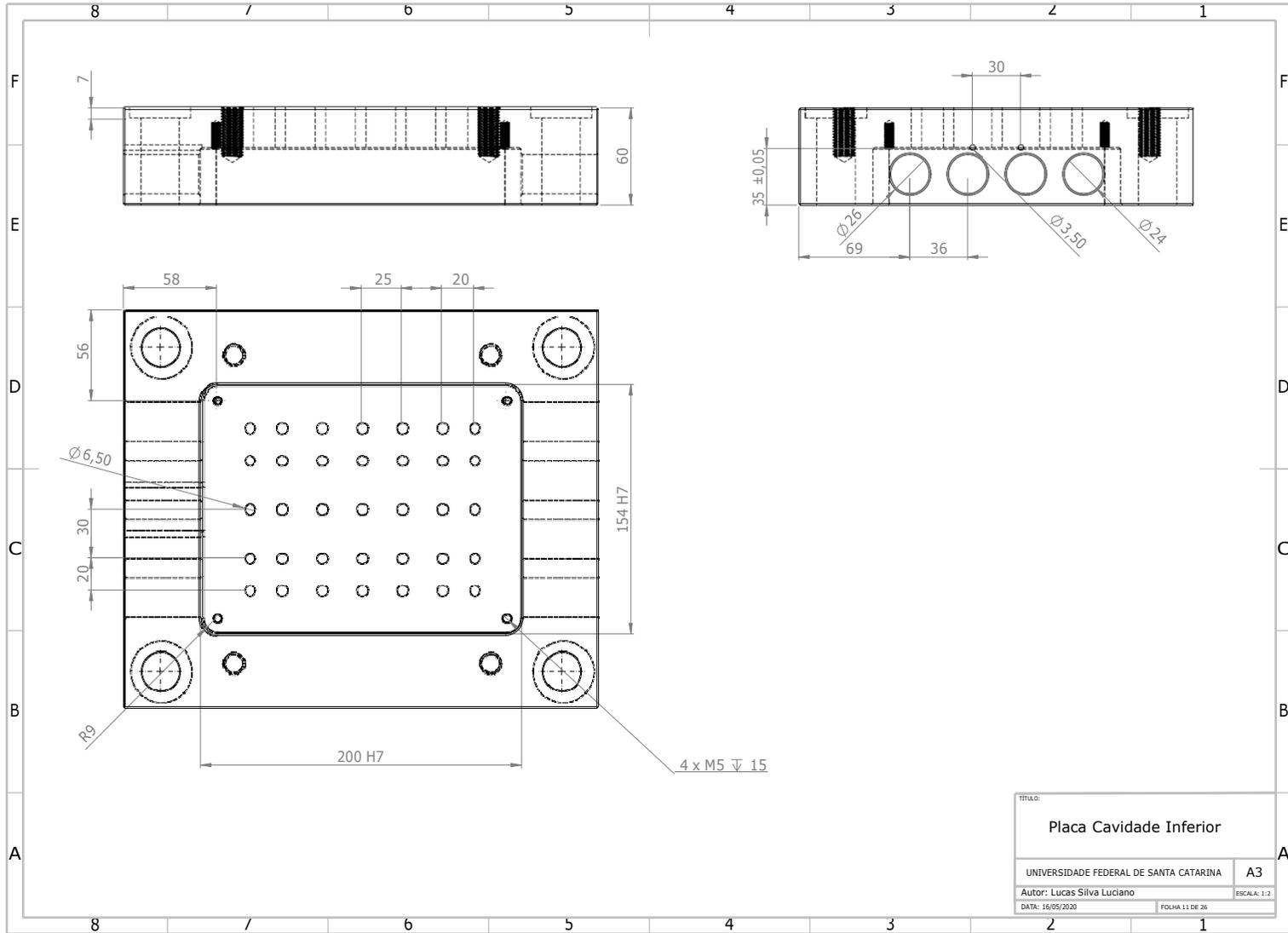
| | | | |
|--|--|------------------------------|--|
| TÍTULO: | | Bucha placa extratora | |
| UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA | | A4 | |
| Autor: Lucas Silva Luciano | | ESCALA 2:1 | |
| DATA: 16/05/2020 | | FOLHA 6 DE 26 | |

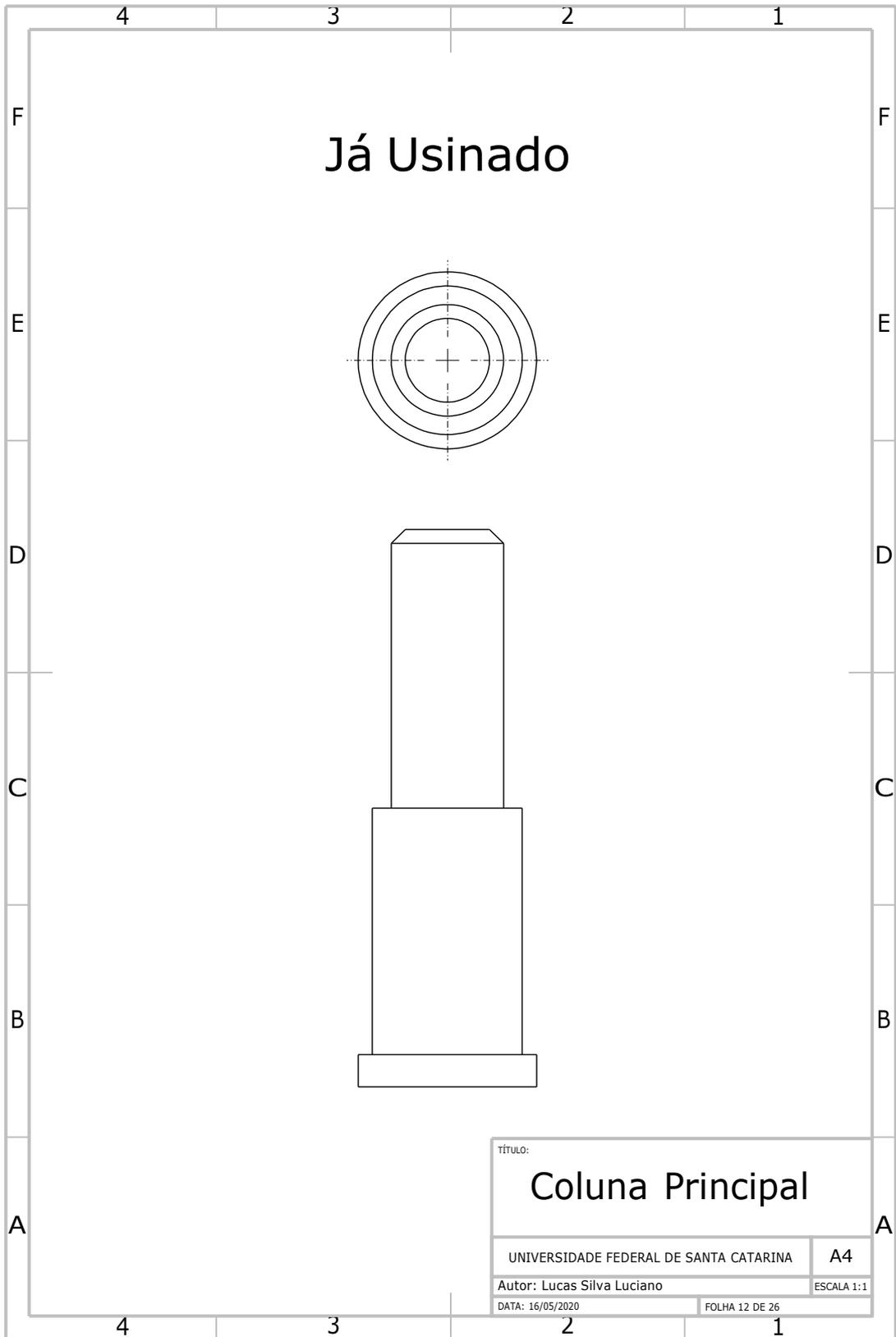


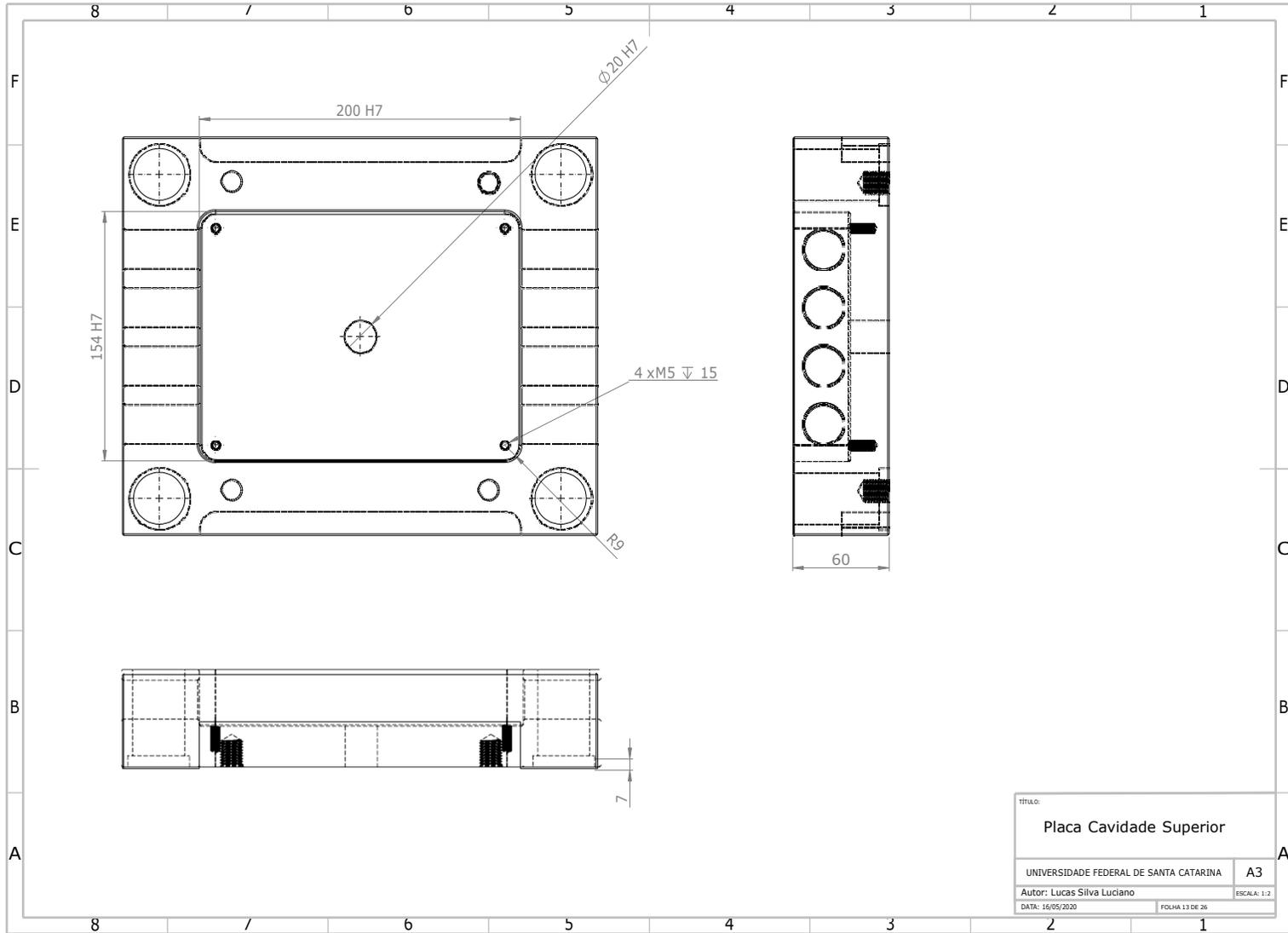


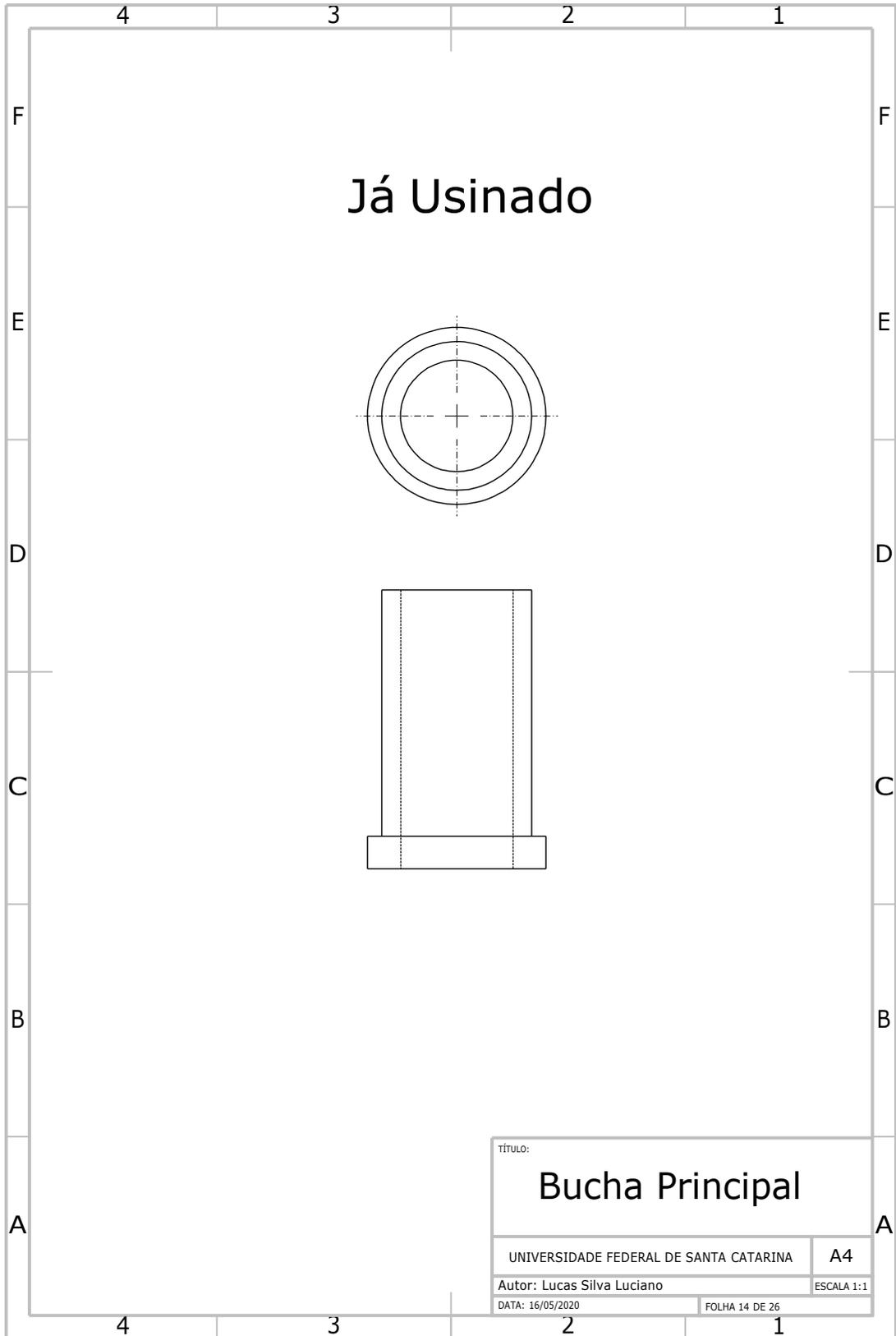


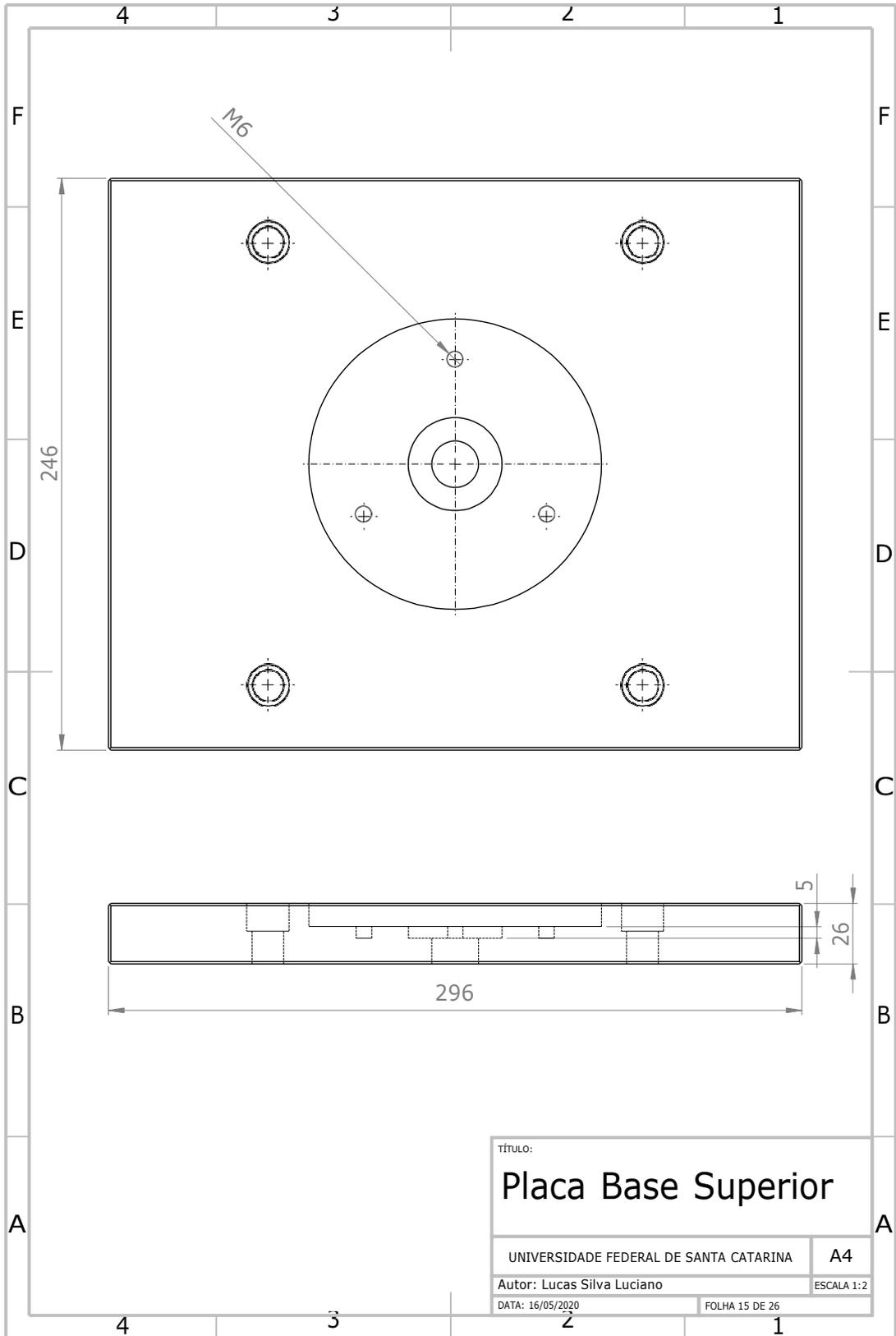


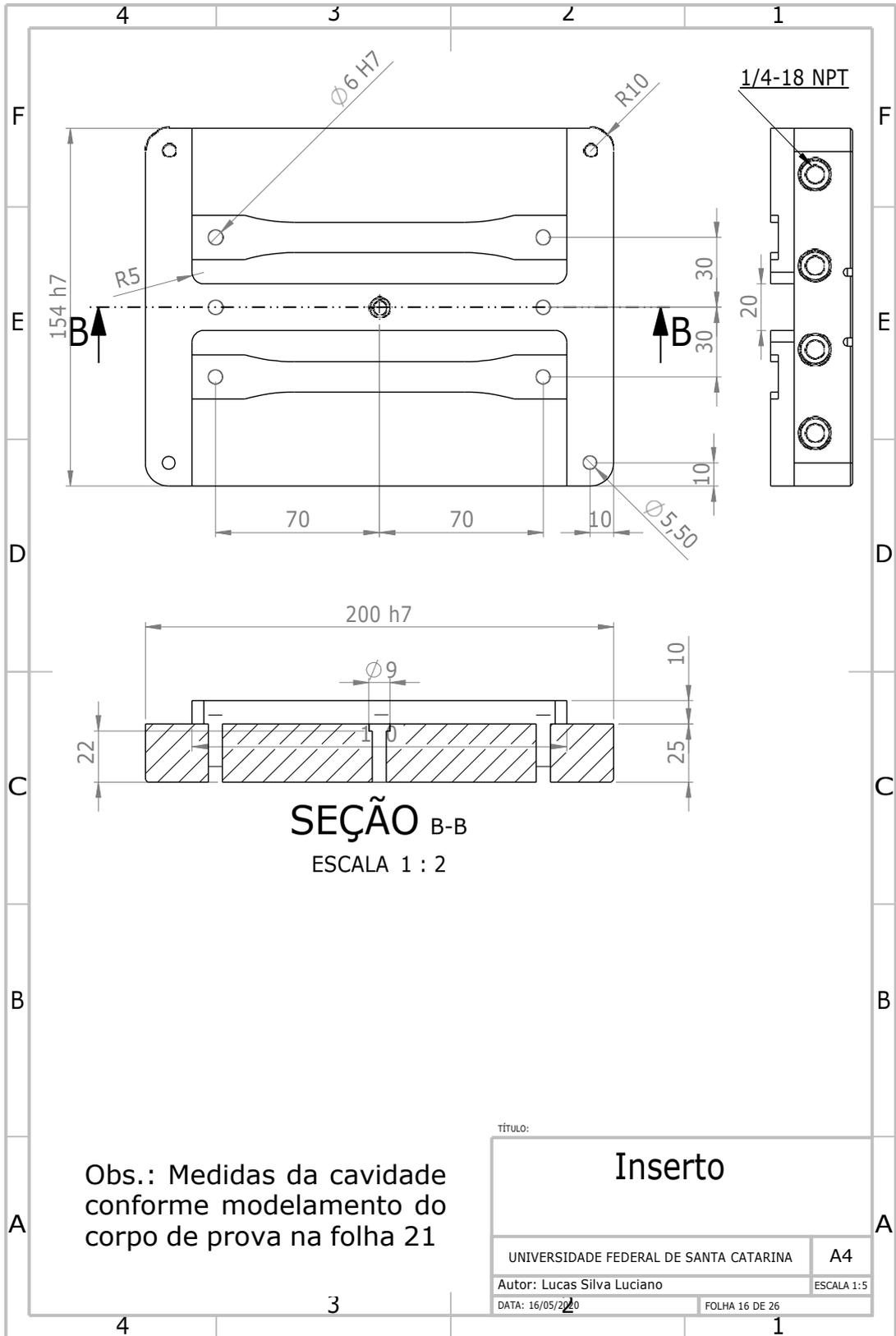






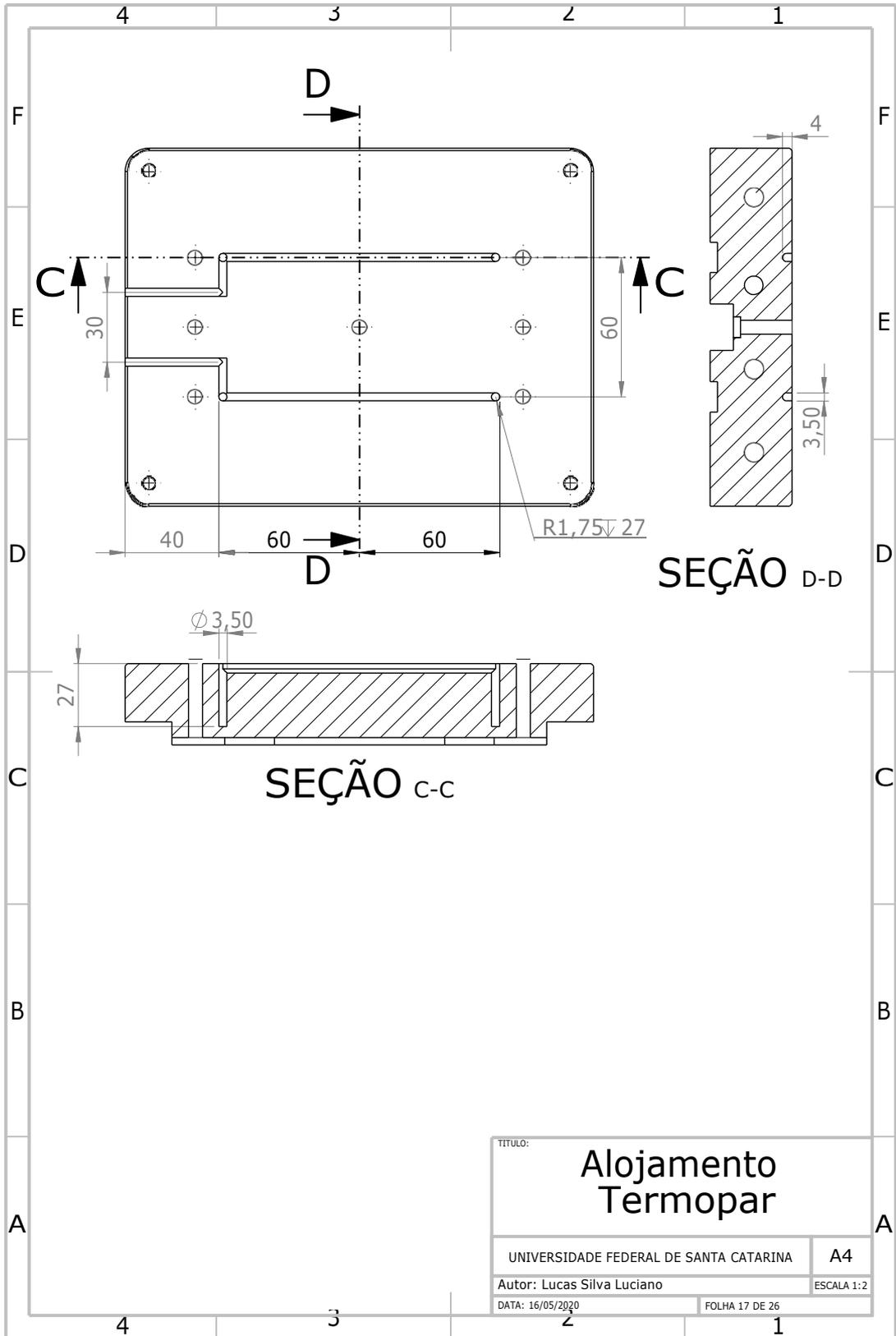


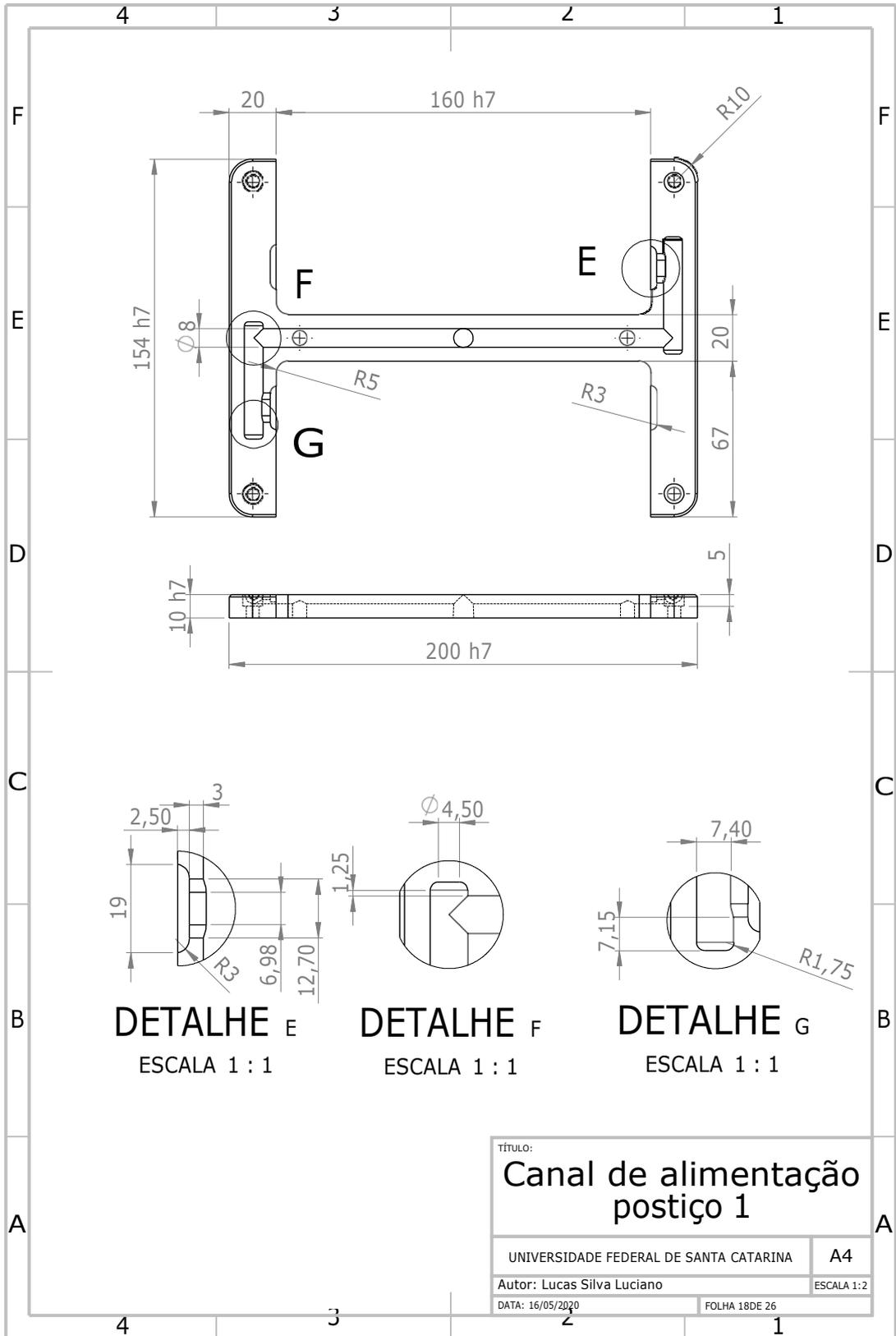


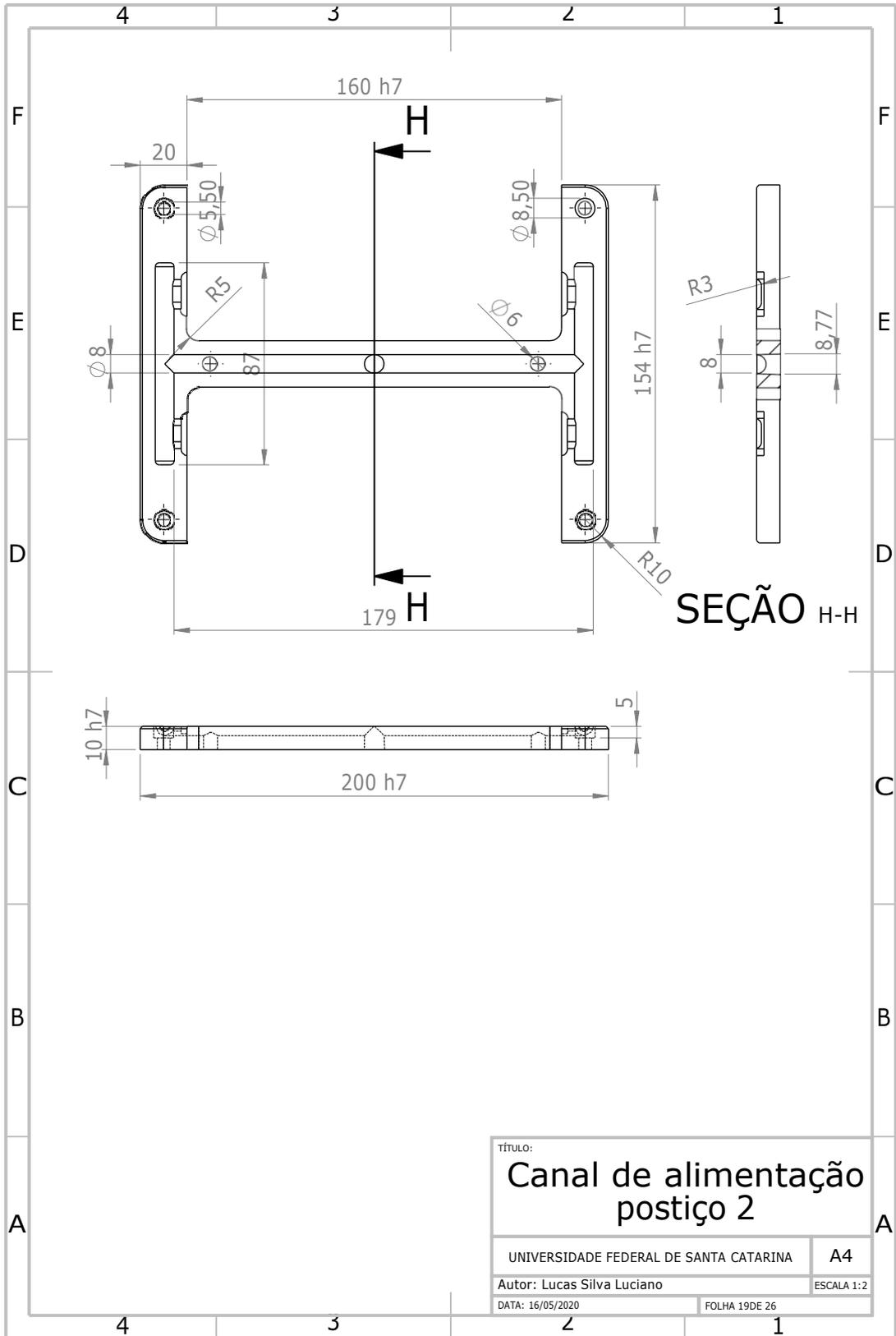


Obs.: Medidas da cavidade conforme modelamento do corpo de prova na folha 21

| | |
|--|----------------|
| TÍTULO: | |
| Inserto | |
| UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA | A4 |
| Autor: Lucas Silva Luciano | ESCALA 1:5 |
| DATA: 16/05/2020 | FOLHA 16 DE 26 |







| | |
|---|----------------|
| TÍTULO: | |
| Canal de alimentação postiço 2 | |
| UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA | A4 |
| Autor: Lucas Silva Luciano | ESCALA 1:2 |
| DATA: 16/05/2020 | FOLHA 19 DE 26 |

