

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
DEPARTAMENTO DE INDÚSTRIA, SEGURANÇA E PRODUÇÃO CULTURAL
ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE UM MOLDE POR INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS PARA
FABRICAÇÃO DE PARALAMAS DIANTEIRO E TRASEIRO DE UMA BICICLETA
INFANTIL

PEDRO LOPES DOS REIS JÚNIOR

TERESINA – PI

2019

PEDRO LOPES DOS REIS JÚNIOR

PROJETO DE UM MOLDE POR INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS PARA
FABRICAÇÃO DE PARALAMAS DIANTEIRO E TRASEIRO DE UMA BICICLETA
INFANTIL

Monografia apresentada, como requisito parcial, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, sob orientação do Prof. Msc. Ricardo Cardoso Soares.

TERESINA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Reis Junior, Pedro Lopes dos
R375p Projeto de um molde por injeção de termoplásticos para fabricação de
paralamas dianteiro e traseiro de uma bicicleta infantil / Pedro Lopes dos Reis
Junior. - 2019.
69 f.: il. color.
Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal do Piauí, Campus Teresina Central, 2019.
Orientador : Prof Me. Ricardo Cardoso Soares.
1. Termoplásticos. 2. Moldes. 3. Paralama. 4. Projeto preliminar. I. Título.

CDD - 620

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024

FOLHA DE APROVAÇÃO

TITULO: “PROJETO DE UM MOLDE POR INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS PARA FABRICAÇÃO DE PARALAMAS DIANTEIRO E TRASEIRO DE UMA BICICLETA INFANTIL”

Concludente: **PEDRO LOPES DOS REIS JÚNIOR**

MATRÍCULA: 20111EME0112

DATA: 16 de janeiro de 2020

Este trabalho foi julgado adequado e aprovado para a obtenção do título de graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí.

Assinado no original

Prof. Msc. Francisco José Patrício Franco
Coordenador Geral do Parfor/IFPI

COMISSÃO EXAMINADORA

Assinado no original

Prof. MSc. Ricardo Cardoso Soares
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
Orientador

Assinado no original

Prof. MSc. Edílson Rocha de Sousa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
Avaliador

Assinado no original

Prof. MSc. José Matias Ferreira Filho
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
Avaliador

Assinado no original

Profª. MSc. Patrícia da Silva Oliveira
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
Co-Orientadora

Teresina, 16 de janeiro de 2020

“Mas tu, Senhor, és Deus compassivo e cheio de graça, paciente e grande em misericórdia e em verdade.”

Salmos 86.15

A Deus, primeiramente, pelas bençãos, sabedoria, força e determinação.

Aos meus queridos pais, Pedro Lopes dos Reis e Maria Ferreira Lima, pela dedicação e incentivo aos meus estudos.

A minha amada, Patrícia da Silva Oliveira, por me coorientar nesse trabalho, e por acreditar no meu empenho como futuro engenheiro mecânico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ser prioridade em minha vida, pois tudo que tenho conquistado foi bênção do Senhor.

Aos meus eternos e amados pais, por sempre acreditarem no meu potencial e valorizarem a minha educação.

À minha memorável tia-mãe e professora Maria Elza dos Reis, pelos ensinamentos e por me impulsionar na minha carreira acadêmica e profissional.

À minha amada tia e professora, Francisca Lopes dos Reis Resende, pelos conselhos e palavras de fé e motivação.

À minha futura esposa, Patrícia da Silva Oliveira, pela coorientação no presente trabalho, e pelo incentivo acadêmico que tem me dado desde o primeiro dia do nosso relacionamento.

Ao meu orientador, Prof. Msc. Ricardo Cardoso Soares, pela sua confiança e paciência na execução deste trabalho.

À Dra. Marcela Rodrigues Machado, professora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília – UnB, pelas orientações e compartilhamento de materiais sobre injeção de termoplásticos.

Ao Engenheiro Civil e Chefe do Departamento de Desenvolvimento de Produto da Indústria Bike do Nordeste, Vinícius Antônio Lustosa Leão, pelas oportunidades concedidas durante minha caminhada profissional como futuro engenheiro mecânico.

Aos amigos de curso e trabalho, Delany Ramos de Sousa, Luzia Almeida de Sousa, Ernane de Macedo Santos, Héctor Kelson Rodrigues de Sousa, Guilherme Alceu Costa Borges e Riyadh Francisco Levi D’Nonat da Silva, pelas inúmeras contribuições e apoio cedidos à realização deste trabalho.

À Indústria Bike do Nordeste S/A, pelo período de experiência, grandes amizades e interação com a Engenharia Mecânica.

À toda Equipe NAPNE do Instituto Federal do Piauí – Campus Teresina Central, pela cooperação e apoio durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Instituto Federal do Piauí e a toda sua equipe, pelo conhecimento e experiência que adquiri ao longo da graduação.

Ao Instituto Federal de Brasília - Campus Taguatinga, pelos subsídios na execução deste projeto.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para minha chegada até aqui e almejaram meu êxito.

A sabedoria, porém, lá do alto é, primeiramente, pura; depois, pacífica, indulgente, tratável, plena de misericórdia e de bons frutos, imparcial, sem fingimento.

Epístola de Thiago 3:17

RESUMO

No mundo moderno, vários produtos são fabricados com materiais poliméricos, devido à multifuncionalidade desse material, à rapidez no processo de moldagem, assim como o fato de terem boa resistência ao impacto, e apresentarem um baixo custo de produção. Por essas particularidades, a injeção de termoplásticos tornou-se um dos serviços imprescindíveis em diversos segmentos industriais. O produto polimérico está inserido no cotidiano, das mais variadas formas e funcionalidades, desde uma simples tampa de garrafa pet, até peças complexas de carros, robôs e aeronaves. Nesse contexto, a realização deste trabalho provém da solicitação de uma indústria local de bicicletas e consiste em desenvolver o projeto preliminar do molde de um par de paralamas, dianteiro e traseiro, de uma bicicleta infantil, em termoplástico Polipropileno. Para tanto, foi selecionado um modelo único para o par de paralamas, modelado em *software* CAD; posteriormente, foi definido a máquina injetora e o porta molde; depois dessa seleção, um protótipo do paralama foi impresso em 3D e testado em uma bicicleta infantil; em seguida, foi realizado o dimensionamento do sistema de alimentação, bem como as simulações em *software* CAD/CAE, a partir do modelo 3D. Por último, foram feitas análises de preenchimento do paralama e do sistema de alimentação nas duas cavidades do produto. Dentre resultados obtidos, constatou-se que o modelo escolhido atendeu bem ao projeto preliminar do molde, ainda que sejam necessárias implementações do sistema de refrigeração e saída de gases.

Palavras-chave: Termoplásticos. Molde. Paralama. Projeto preliminar.

ABSTRACT

In the modern world, many objects feature parts that are made of polymeric materials, due to the multifunctionality of this material, the speed of the molding process as well as the fact that they have good impact resistance and have a low production cost. Due to these particularities, thermoplastic injection has become one of the indispensable services in several industrial segments. The polymeric product is inserted in everyday life, in a variety of shapes and functions, from a simple pet bottle cap to complex parts of cars, robots and aircraft. In this context, the realization of this work comes from the request of a local bicycle industry and is to develop the preliminary design of the mold of a front and rear fender pair of a polypropylene thermoplastic children's bicycle. For this, a unique model for the pair of fenders, modeled in CAD software, was selected; later, the injection molding machine and the mold holder were defined; After this selection, a prototype mudguard was printed in 3D and tested on a real kids bike; Then, the power system sizing was performed, as well as CAD / CAE software simulations, from the 3D model. Finally, we performed analysis of the filling mudguard and the feeding system in both cavities of the product. Among the results obtained, it was found that the chosen model met well the informational design of the mold, even though it is necessary to implement the cooling and exhaust gas system.

Keywords: Thermoplastics. Mold. Fender. Preliminary project.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Molde simples de duas placas: fixa e móvel	22
Figura 2 – Cavidade formada pelas placas que possuem "machos" e "fêmea"	22
Figura 3 – Elementos de um molde de injeção	23
Figura 4 – Comparação dos layouts das cavidades	24
Figura 5 – Sistema de alimentação indireta	26
Figura 6 – Representação de alimentação lateral e pelo centro	27
Figura 7 – Ilustração de entrada restrita-circular	27
Figura 8 – Representação dos canais de injeção recomendados	29
Figura 9 – Ilustração do sistema extrator por placa impulsora	30
Figura 10 – Imagem da posição dos pinos extratores	31
Figura 11 – Fases de preenchimento do molde, durante um ciclo de injeção	36
Figura 12 – Etapas de desenvolvimento do molde de injeção	36
Figura 13 – Fluxo de atividades relacionadas com o projeto de moldes	37
Figura 14 – Organograma preliminar do projeto informacional do molde	39
Figura 15 – Modelagem 3D da bicicleta infantil	40
Figura 16 – Modelagem de paralamas da bicicleta infantil	41
Figura 17 – Impressora 3D XYZ <i>Printing</i> Modelo Da Vinci 1.0 Pro	41
Figura 18 – Paralama impresso na impressora 3D XYZ <i>Printing</i>	42
Figura 19 – Ângulos positivos e negativos do paralama, analisados em <i>software</i> CAE	43
Figura 20 – Modelagem das cavidades em <i>software</i> CAE	44
Figura 21 – Especificação em conformidade ao Catálogo de Porta Molde de 2 placas-Polimold	44
Figura 22 – Máquina Injetora Romi Primax 450R	45
Figura 23 – Modelo geométrico do paralama, com geração de malha tetraédrica híbrida	46
Figura 24 – Sistema de alimentação do paralama: 1-Entrada restrita circular; 2-Canal secundário; 3-Poço frio; 4-Canal primário, 5-Entrada de injeção polimérica	47
Figura 25 – Cavidades do paralama traseiro e dianteiro com o galho de alimentação, da simulação efetuada	48
Figura 26 – Teste do paralama dianteiro na bicicleta infantil	49
Figura 27 – Teste do paralama traseiro	50
Figura 28 – Função máxima de entrada em função do tempo de preenchimento	51
Figura 29 – Tempo de preenchimento do paralama	51

Figura 30 – Marcas de dissipação durante a injeção do paralama	52
Figura 31 – Pressão ao final do preenchimento das cavidades	53
Figura 32 – Tempo de preenchimento das cavidades do paralama	53
Figura 33 – Facilidade de preenchimento das cavidades do paralama	54
Figura 34 – Vista da plotagem das linhas de solda	55
Figura 35 – Pressão ao término de recalque nas cavidades do paralama	56
Figura 36 – Vista da tensão residual na extremidade pós-preenchimento	56
Figura 37 – Pressão máxima de entrada em função do tempo de preenchimento e recalque	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Porcentagem de contração	21
Tabela 2 – Parâmetros de temperatura do polipropileno	42
Tabela 3 – Informações gerais do Porta Molde	44
Tabela 4 – Principais características técnicas da máquina injetora <i>Easymaster</i> EM80-SVP/2	45
Tabela 5 – Parâmetros obtidos na simulação de injeção e recalque	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Plásticos de importância industrial – Polipropileno (PP)	20
Quadro 2 – Sistemas funcionais na injeção de um molde	23

LISTA DE SÍMBOLOS

CAE – Engenharia Auxiliada por Computador

ETM – Especificação Técnica do Molde

PP – Polipropileno

PS – Poliestireno

PA – Material selecionado

V – Fator volumétrico

PS – Poliestireno

γ – Densidade (g/cm^3)

F – Força de fechamento (t)

P_{inj} – Hidrogênio

A_p – Área projetada da peça (cm^2)

C – Calor específico ($\text{Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$)

T – Temperatura de moldagem ($^\circ\text{C}$)

H – Hidrogênio

C – Carbono

T_m – Temperatura de fusão cristalina

T_g – Temperatura de transição vítrea

x – Contração no produto (%)

C_i – Capacidade de injeção (gramas-g)

C_p – Capacidade de plastificação (Kg/h)

d_1 – Diâmetro da entrada restrita circular (mm)

c – Comprimento da entrada restrita circular (mm)

D – Diâmetro do canal de alimentação secundário (mm)

β – Constante de valor 4,5

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS	19
2.1.1 Termoplásticos	19
2.1.2 Polipropileno	19
2.2 MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS	21
2.2.1 Cavidade e Machos	24
2.2.2 Centragem e Guiamento	25
2.2.3 Alimentação	25
2.2.4 Ventilação	29
2.2.5 Temperatura	29
2.2.6 Sistema de extração	30
2.2.6.1 Sistema de Extração por Placa Impulsora	30
2.2.6.2 Extração por Placa Impulsora-Pinos	30
2.2.7 Contração	31
2.2.8 Máquinas Injetoras	32
2.2.9 Ciclo de Injeção	33
2.2.9.1 Ciclo da Rosca Recíproca	33
2.2.9.2 Ciclo do Molde	34
2.2.10 Preenchimento do Molde	35
2.2.10.1 Fases de Preenchimento do Molde	35
2.2.11 Projeto do Molde	36
2.3 SOFTWARE CAE	38
3 METODOLOGIA	39
3.1 PROJETO INFORMACIONAL	39
3.1.1 Definição e Modelagem do Produto	39
3.1.2 Prototipagem do Paralama	40
3.1.3 Termoplástico Utilizado no Paralama	42
3.1.4 Contração do Termoplástico	42
3.1.5 Análise da Linha de Partição e Inclinação da Peça	43
3.1.6 Cavidades do Molde	43
3.1.7 Porta Molde	44

3.1.8 Máquina Injetora.....	45
3.1.9 Análise do Paralama.....	46
3.1.10 Dimensionamento do Sistema de Alimentação do Molde	46
3.1.11 Simulação em <i>Software</i> CAE das Cavidades com o Sistema de Alimentação.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 TESTE DO PROTÓTIPO DO PARALAMA	49
4.2 SIMULAÇÃO DE INJEÇÃO DO PARALAMA EM <i>SOFTWARE</i> CAE	50
4.2.1 Análise de Preenchimento do Paralama.....	50
4.2.2 Tempo de preenchimento do Paralama.....	51
4.2.3 Rechupes.....	52
4.3 SIMULAÇÃO DE PREENCHIMENTO DAS CAVIDADES DOS PARALAMAS	52
4.3.1 Pressão e Tempo de Preenchimento.....	53
4.3.2 Linhas de Solda.....	55
4.3.3 Recalque	55
4.4 PARÂMETROS GERAIS DA SIMULAÇÃO DA INJEÇÃO DO MOLDE	58
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
REFERÊNCIAS	62
ANEXOS	65
ANEXO A	65

1 INTRODUÇÃO

Uma breve análise do mercado permite verificar que, existe um considerável aumento no número de indústrias responsáveis pela fabricação de componentes à base de polímeros e que utilizam, para tanto, moldes, que possibilitam a transformação da matéria-prima em uma peça acabada. Para tanto, este tipo de ferramenta (molde), precisa ser devidamente dimensionada e usinada (SILVA, 2009).

Para que um molde desempenhe corretamente suas funções, é necessário satisfazer os seguintes requisitos: possuir uma ou mais cavidades com a forma da peça a ser produzida, assegurando as características dimensionais ciclo a ciclo; permitir o preenchimento das cavidades com o polímero em estado de fusão pelo interior dos canais do sistema; facilitar o resfriamento do material polimérico dentro das cavidades; promover a extração das peças injetadas. Os sistemas funcionais que permitem as funções citadas acima são: centragem, guiamento e alinhamento, saída de gases, controle de temperatura, extratores (MANRICH, 2005).

Com isso, para se obter um bom desempenho da peça, evitando-se posteriores problemas que porventura possam vir a provocar um aumento considerável no custo, é necessário que os fatores apresentados abaixo sejam analisados (HARADA, 2004):

- É possível moldar o produto nas formas desejadas?
- Qual será o material plástico indicado para este produto?
- A conformação e a determinação das medidas do produto são compatíveis com as exigências requeridas em sua aplicação?
- O método de moldagem é o mais conveniente para a forma e o material do produto?
- Relacionar o desenho do produto e os tipos de moldes mais apropriados.
- Determinar o custo de acordo com a produção requerida.

Para projetar, fabricar e entregar o molde para um cliente, a ferramentaria contratada deve coordenar uma série de informações, devendo estar bem definido o que fazer, quando fazer e como fazer (SACCHELLI, 2007).

O processo de projeto do molde é subjetivo, muito dependente da experiência e da atualização tecnológica dos responsáveis (JONES, 2008). Outro desafio no segmento, é a busca de técnicas e processos que resultem na produção eficiente dos componentes injetados (SILVA, 2009).

O uso de materiais poliméricos no processo de moldagem de componentes plásticos tem sido cada vez mais difundido e aplicado nos mais variados setores da economia mundial, como: automobilístico, eletroeletrônicos, eletrodomésticos, brinquedos, equipamentos cirúrgicos, embalagens, construção civil, alimentícios, entre outros (SACCHELLI, 2007).

Em virtude disso, o avanço da tecnologia de moldagem e suas técnicas de injeção ganharam notável crescimento na fabricação em materiais termoplásticos, que engloba desde um simples utensílio doméstico à componentes aeronáuticos. Os plásticos, antes utilizados com restrições e para geometrias de baixa complexidade, atualmente estão presentes em nosso meio em uma infinidade de produtos difíceis de serem fabricados.

Silva (2009) afirma que, o futuro da injeção é um desafio para toda a indústria. Um crescimento contínuo, bem como o sucesso de novas aplicações, requer a combinação de esforços, envolvendo tanto profissionais da engenharia e projetistas, quanto fabricantes de máquinas e matérias-primas.

Tendo em vista o potencial de fabricação com materiais poliméricos, o presente trabalho visa projetar e desenvolver um molde por injeção de termoplásticos, para fabricação dos paralamas dianteiro e traseiro, em Polipropileno (PP), de uma bicicleta infantil.

Os aspectos descritos e contextualizados acima, constituem-se como motivadores na concepção deste trabalho, não somente para a compreensão das tecnologias características da injeção de termoplásticos, necessárias para produzir peças complexas e que exigem alta qualidade, mas pela sua contribuição para uma indústria de bicicletas localizada em Teresina-PI, uma vez que, atualmente, o referido produto é importado de outro país, gerando um maior custo para a empresa. Entre outros pontos, o paralama de uma bicicleta é um acessório fundamental para quem deseja chegar limpo ao seu destino, pois poças d'água, jatos de lama, óleo e outras sujeiras ficam retidas nos paralamas. Além disso, a água jogada pela roda dianteira pode atingir o rosto do ciclista e provocar um acidente. Este trabalho está organizado conforme a estrutura apresentada a seguir.

O capítulo 1 corresponde à introdução, onde são destacados: as generalidades e contextualização do projeto proposto, a caracterização da problemática que envolve o tema, o objetivo geral, motivação e as justificativas que fundamentam a importância deste trabalho.

O capítulo 2 trata do referencial teórico sobre polímeros e projeto conceitual de moldes, e aborda o estado da arte referente aos tópicos gerais inerentes à produção de componentes injetados a base de materiais termoplásticos, no qual abrangerá os temas relacionados ao desenvolvimento de produtos plásticos injetados, moldes para injeção de

termoplásticos e sistema de refrigeração, descrevendo-se as técnicas, aplicações e seus mecanismos.

O capítulo 3 detalha a metodologia utilizada no desenvolvimento do projeto conceitual, que inclui a modelagem 3D do produto em *software* CAD, conforme a ETM (Especificação Técnica do Molde), o desenvolvimento da cavidade e o macho (postiços de formação do produto), em concordância com a especificação técnica do porta molde, e o estabelecimento dos sistemas funcionais, como: centragem e guiamento; alimentação; ventilação (saída de gases); resfriamento e extração.

O capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos a partir da simulação de escoamento do produto, realizado em *software* CAE, visando analisar os moldes do produto pelo protótipo e sistema de alimentação. Nesta fase, será simulado o preenchimento das cavidades do paralama, a fim de prever defeitos relacionados à fabricação, com o intuito de melhorar o molde, minimizando ou eliminando assim, um possível retrabalho do molde.

O capítulo 5 finaliza o trabalho, expondo as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, espera-se que o projeto de pesquisa proposto desperte o interesse dos discentes pela área de projetos e fabricação mecânica, com ênfase em moldes para injeção de termoplásticos, e que colabore diretamente para a sua formação profissional, em virtude da abrangência de conceitos técnicos e práticos deste trabalho, que podem ser aplicados na indústria moderna.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS

Os materiais poliméricos, as borrachas ou elastômeros, se distinguem por sua característica única de permitir grande alongamento, seguido instantaneamente de quase completa retração, especialmente quando se encontram na condição vulcanizada. Esse fenômeno foi primeiramente observado na borracha natural, e passou a ser conhecido como elasticidade. A borracha é o material considerado de importância estratégica, devido ao papel que desempenha principalmente no transporte de pessoas, matérias-primas, produtos acabados, alimentos, etc. (MANO; MENDES 2004).

Atualmente, o uso de polímeros é frequente, uma vez que fica difícil imaginar a vida sem os plásticos, pois contribuem para o desenvolvimento industrial e também proporcionam conforto. Eles estão em todo lugar, desde uma simples escova de dente, colchão, cadeiras até peças aeronáuticas, médicas, etc. Dessa forma, é indiscutível a relevância dos polímeros em nossas vidas (SILVA; SILVA, 2003).

Na década de 1940, a utilização de peças injetadas de material plástico restringia-se à produtos de, no máximo, poucas gramas. Com o crescimento do mercado devido à alta aplicabilidade desses produtos, os pedidos aos transformadores, profissionais que desenvolvem produtos, passaram a se concentrar em peças maiores e mais complexas (SILVA, 2009). Tecnicamente, chamamos materiais plásticos ou simplesmente plásticos, toda matéria orgânica que, sob oportunas ações térmicas e mecânicas, se deixam conformar ou moldar com relativa facilidade (PROVENZA, 1993).

2.1.1 Termoplásticos

Conhecidos como polímeros lineares, os termoplásticos requerem calor para fazê-los moldáveis e, após o resfriamento, retêm a forma na qual foram modelados. Esses materiais podem ser reaquecidos e moldados em novas formas em um número sucessivo de vezes, sem troca significativa nas suas propriedades mecânicas (SMITH; HASHEMI, 2012).

2.1.2 Polipropileno

Desde o desenvolvimento do Polipropileno (PP) em 1954, e do início de sua comercialização pela empresa Montecatini, em Ferrara (Itália), em 1957, a sua produção e uso tem experimentado espetacular progresso. Uma das razões para a boa aceitação do PP

comercial é porque o mercado requer produtos com qualidade de "plásticos de engenharia" a preços dos materiais *commodities* (MANRICH, 2005).

Em 2002, o PP era produzido em quase 180 fábricas, em cerca de 48 países, incluindo o Brasil. Cerca de 40 milhões de toneladas/ano de PP foram produzidas pelo mundo, o equivalente a, aproximadamente, 15% de tudo o que é produzido em plásticos. No Brasil, o PP representa em torno de 23% dos termoplásticos consumidos, e é um dos plásticos *commodities* de maior crescimento (MANRICH, 2005).

Segundo Abplast (2017), no Brasil o PP teve uso de 21,6% do consumo total de resinas poliméricas. O polipropileno é um termoplástico produzido a partir do gás propeno (ou propileno). Tem como principais propriedades o baixo custo, elevada resistência química, fácil moldagem e coloração, atóxico, alta resistência à fratura por flexão ou fadiga, boa estabilidade térmica e boa resistência ao impacto acima de 15°C. Somado a isso, o PP é extremamente reciclável e tem grande afinidade com cargas e fibras (ABPLAST, 2017). O Quadro 1 apresenta algumas características do polipropileno.

Quadro 1 – Plásticos de importância industrial – Polipropileno (PP)

Monômero	$H_2C = CHCH_3$ Propileno (gás); p.e.: -48°C
Polímero	$-(H_2C - CHCH_3)_n-$ Polipropileno
Preparação	Poliadição em lama. Monômero; catalisador de Ziegler-Natta, heptano, 60°C, 20 psi Poliadição em fase gasosa. Monômero, catalisador de Ziegler-Natta, 70-80°C, 230-260 psi.
Propriedades	Peso molecular: 10^4 - 10^5 ; d: 0,90; isotático Cristalinidade: 60-70%; T _g : 4-12°C; T _m : 165-175°C Material termoplástico. Propriedades mecânicas moderadas. Resistência química excelente.
Aplicações	Para-choques de automóveis. Carcaças de eletrodomésticos. Recipientes em geral. Fita lacre de embalagens. Brinquedos. Sacaria. Carpetes. Tubos para canetas esferográficas. Válvulas para aerossóis. Material hospitalar. Recipientes para uso em fornos de microondas.
Nomes comerciais	Propathene, Pro-fax, Prolen, Brasfax.
No Brasil	Fabricado por Polibrasil (SP, RJ, BA) e OPP (RS).
Observações	PP altamente isotático é obtido por mecanismo de coordenação aniônica; tem alta cristalinidade; como polímero apolar e de T _m elevada, é excelente material para resistir às radiações eletromagnéticas na região de micro-ondas. Por ter surgido mais tarde que outros polímeros, o PP procura deslocar outros materiais em diversas aplicações. A baixa densidade, o baixo custo e a facilidade de moldagem têm propiciado o crescente uso do PP na indústria automobilística.

Fonte: MANO E MENDES, 2004.

Uma característica muito importante para o projeto de moldes é sua contração volumétrica. Ela resulta uma diminuição em todas as dimensões do produto de acordo com o

coeficiente de contração do material (HARADA, 2004). A Tabela 1 mostra o intervalo de contração do polipropileno.

Tabela 1 – Porcentagem de contração – Polipropileno.

Material	Abreviatura	% de contração
Polipropileno	PP	1,5 - 3

Fonte: HARADA, 2004.

Para calcular o valor de contração no produto, deve-se usar a Eq. 1.

$$x = \frac{\% \text{ de contração}}{100} \quad (1)$$

2.2 MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

A moldagem por injeção é um método de processamento de plásticos que cresce continuamente. Nesse método, o material é prensado na cavidade do molde pelo aríete da máquina de injeção com pressão muito alta. A máquina alimenta-se automaticamente com a utilização de uma ferramenta adequada (SORS *et al.*, 2002).

As peças injetadas são produzidas através da moldagem automática do plástico fundido dentro de um molde. A injetora prepara essa massa, deixando-a no estado "plástico" (maleável), e, com o auxílio de uma rosca recíproca, injeta a mesma para dentro da cavidade do molde. O molde, por sua vez, possui uma cavidade com o formato da peça desejada e normalmente está a temperaturas baixas, solidificando rapidamente a massa quente que preenche seus vazios. Para chegar até a cavidade, o polímero flui através de canais, passando pela bucha (canal de injeção) e pelos canais de distribuição ou de alimentação. Na entrada da cavidade, a massa passa pelo ponto de injeção, que é uma estreita passagem separando o produto do sistema de alimentação (MANRICH, 2005).

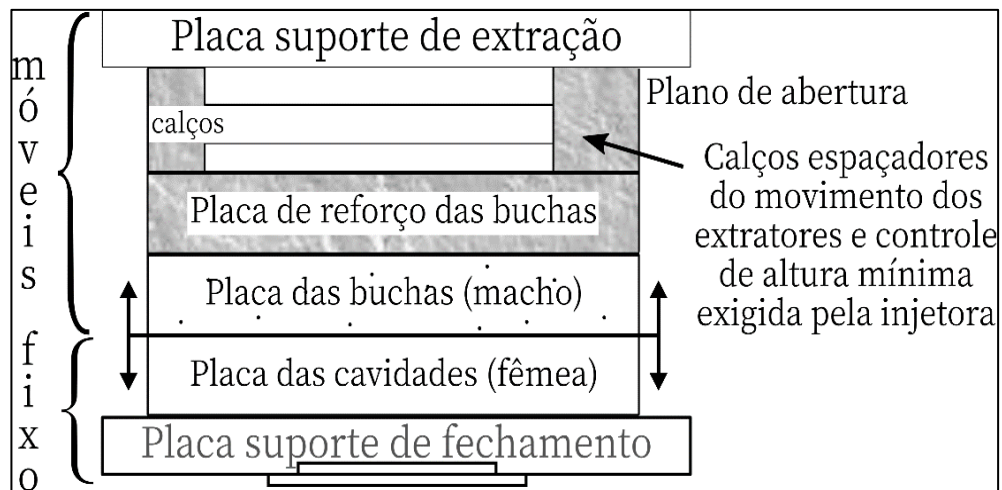
O molde possui, portanto, um sistema de resfriamento, onde um líquido refrigerante circula através de canais específicos que envolvem a cavidade. Além disso, o molde possui um sistema de extração (pinos extratores e placa extratora) para que a peça, agora constituída de massa dura ou sólida, possa se desprender do molde e ser retirada. Na maioria dos casos, somente é possível retirar a peça com o auxílio dos extratores, após o acionamento de abertura do molde (MANRICH, 2005).

Para que um molde desempenhe corretamente suas funções, é necessário satisfazer os seguintes requisitos: possuir uma ou mais cavidades com a forma da peça a ser produzida,

assegurando as características dimensionais ciclo a ciclo; permitir o enchimento das cavidades com o polímero fundido, através do sistema de canais; facilitar o resfriamento do material polimérico dentro das cavidades; e promover a extração das peças injetadas. Os sistemas funcionais que asseguram o atendimento aos requisitos mencionados acima, são: centragem; guiamento e alinhamento; saída de gases; controle de temperatura; e extratores (MANRICH, 2005).

O exemplo mais simples de um molde é o "molde de duas placas", como mostrado na Fig. 1.

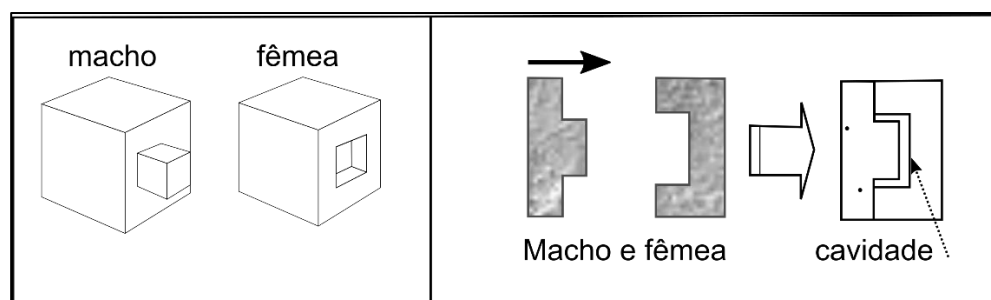
Figura 1 - Molde simples de duas placas: fixa e móvel



Fonte: MANRICH, 2005.

Na placa das cavidades é usinado um rebaixo - fêmea - que caracteriza o exterior da peça. Quando o molde é fechado, a placa das cavidades e a placa das buchas - macho - se encaixam, deixando os vazios entre essas ferramentas, e, conseqüentemente, definindo a geometria das peças a serem injetadas, como é mostrado na Fig. 2.

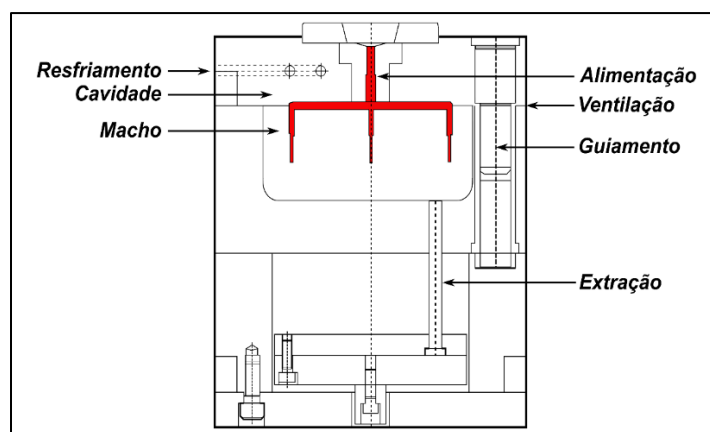
Figura 2 - Cavidade formada pelas placas que possuem "machos" e "fêmea"



Fonte: MANRICH, 2005.

No projeto de moldes, as placas são encaixadas e alinhadas através dos pinos guia, que evitam formação de uma cavidade com geometria diferente do desejado. Um molde pode moldar uma ou mais peças simultaneamente, iguais ou diferentes, e, o número de cavidades vai depender de fatores econômicos, tamanho de máquina e tipo de material. Portanto, pode-se interpretar um molde como uma estrutura (placas de aço usinadas, pinos, buchas e outros itens), cujos componentes são montados de acordo com o projeto, elaborando os sistemas funcionais, que permitem que o molde execute suas funções (DIAS, 2008). A Figura 3 mostra uma representação geral de um molde de injeção e seus principais sistemas funcionais. No Quadro 2 encontram-se os principais sistemas funcionais de um molde de injeção.

Figura 3 – Elementos de um molde de injeção



Fonte: DIAS, 2008.

Quadro 2 – Sistemas funcionais de um molde de injeção

Funções do Molde de Injeção	Sistema do Molde de Injeção
Dar forma, tamanho e acabamento à peça moldada.	Cavidade e Machos
Manter o alinhamento entre as duas metades do molde, garantindo a reprodutibilidade dimensional da peça.	Centragem e Guiamento
Guiar o polímero fundido desde a máquina de injeção até a cavidade moldante, permitindo seu enchimento.	Alimentação
Permitir que o ar e os gases existentes nas cavidades moldantes possam sair, possibilitando o seu enchimento com o polímero fundido.	Ventilação
Controlar a temperatura do molde para solidificar o material.	Temperatura
Permitir fazer a extração da peça	Extração

Fonte: TONOLLI, 2003; ARAÚJO *et al.*, 2003.

2.2.1 Cavidade e Machos

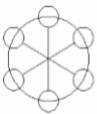
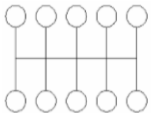
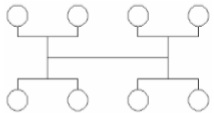
Normalmente o molde é composto por duas partes: a unidade fêmea, que dá o formato externo da peça injetada; e a unidade macho ou núcleo, que dá o formato interno da peça injetada. Podem ser usinadas na própria placa ou obtidas através de postiços, que são elementos que contém as cavidades e são constituídos de material de qualidade superior em relação aos que os envolvem, apresentando a vantagem de poderem ser substituídos quando houver avaria (DIAS, 2008).

Segundo Menges e Mohren (1993), as cavidades devem ser posicionadas a partir da bucha de injeção, de modo que as seguintes condições sejam satisfeitas:

- Todas as cavidades devem ser preenchidas ao mesmo tempo e com o plástico fundido à mesma temperatura;
- O comprimento dos canais deve ser minimizado, a fim de evitar refugo de material;
- A distância entre as cavidades deve ser suficientemente grande para proporcionar a passagem dos canais de refrigeração e dos pinos de extração, e deixar um canal de secção adequado para que o molde resista às forças da pressão de injeção;
- A soma de todas as forças reativas deve estar no centro de gravidade das placas.

Para que estas condições sejam atendidas, Menges e Mohren (1993), classificam os layouts das cavidades em três grupos: layout circular, layout em série e layout simétrico, conforme apresentado na Fig. 4.

Figura 4 – Comparação dos layouts das cavidades

	Vantagens	Desvantagens
Layout circular 	Comprimento do fluxo é igual para todas as cavidades.	Maior limitação de espaço em função do número de cavidades.
Layout em série 	Espaço maior para acomodar as cavidades.	Os diferentes comprimentos de fluxo desde o bico de injeção até cada cavidade podem causar problemas de enchimento. O balanceamento pode ser feito recorrendo a ferramentas de CAE.
Layout simétrico 	Comprimento do fluxo igual para todas as cavidades.	O sistema de alimentação normalmente é mais volumoso.

Fonte: MENGES e MOHREN, 1993.

A regra básica é que ocorra o preenchimento simultâneo das cavidades. Deve acontecer, sempre que possível, igual queda de pressão em todas as frentes de fluxo em cada cavidade. Com isso, se evita diferença de peso entre peças, diferença de estruturação (cristalinidade, orientação, tensões internas, etc.) bem como diferenças no aspecto (brilho, marcas de fluxo, etc.). O resfriamento das peças deve ser uniforme, isto é, cada peça deve ser resfriada em todas as posições ao mesmo tempo. Dispor as cavidades de forma a se obter um molde compacto, canais de distribuição curtos e fechamento balanceado, para evitar rebarbas localizadas (MANRICH, 2005).

Após a abertura do molde, ele deve regressar exatamente para a mesma posição em que se encontrava, de modo a iniciar um novo ciclo de moldagem. Para que isso ocorra, são utilizados os sistemas de guiamentos internos do molde que são as guias ou colunas guias, cuja função é guiar as duas metades do molde e as placas de extração (DIAS, 2008).

2.2.2 Centragem e Guiamento

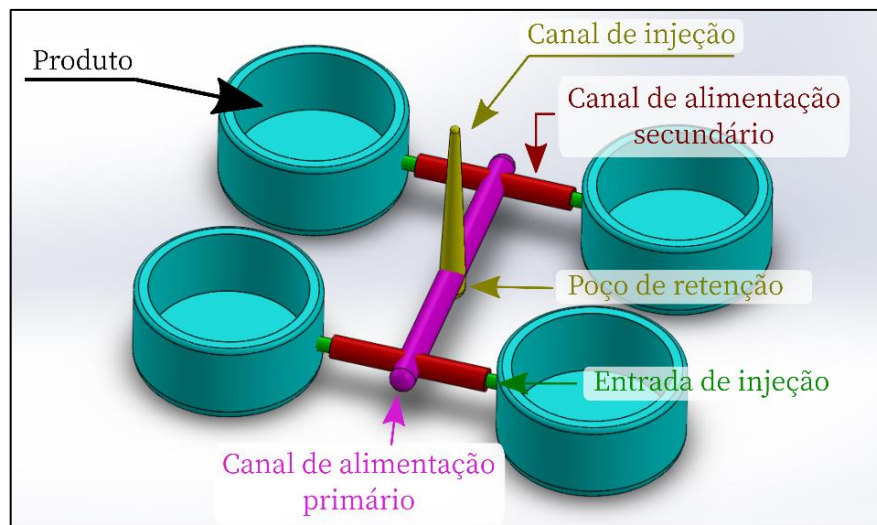
O sistema de centragem e guiamento permitem montar o molde na máquina injetora, para, então, ajustar a matriz e a fêmea do molde, garantindo a reprodutibilidade dimensional da peça (SANTOS, 2015).

É imprescindível promover uma perfeita centralidade do molde. Para certificar isso, os moldes são equipados com anéis de centragem, que têm como principal função centralizar a bucha de injeção com o bico da máquina injetora (DIAS, 2008).

2.2.3 Alimentação

Os canais de distribuição transferem o material desde o bico até as entradas das cavidades. Todo o percurso do material plástico fundido, desde a máquina injetora até a cavidade do molde, normalmente é formado, como ilustrado na Fig. 5, de canal de injeção da bucha, canal de distribuição (primário e/ou secundário), entrada ou ponto de injeção, produto moldado e poço frio/retenção (na alimentação indireta) (HARADA, 2004).

Figura 5 – Sistema de alimentação indireta



Fonte: Adaptado de DIAS, 2008.

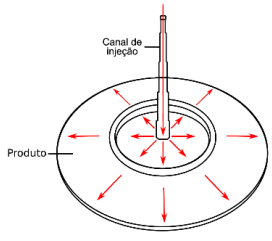
Na Figura 5, o canal de injeção consiste em um canal tronco-cônico divergente (esta conicidade é necessária para facilitar a sua extração), com ângulo de abertura de 2 a 5°, que liga o bico da injetora aos canais de alimentação ou à própria peça (no caso de moldes com apenas uma cavidade (HARADA 2004); a entrada ou ponto de injeção, por sua vez, é um canal ou orifício que une o sistema de alimentação à cavidade, e possui uma pequena superfície em relação aos demais canais do sistema de alimentação. Essa pequena seção é essencial para (SENAI-SP, 2011):

- Resfriar o material na entrada, logo que a cavidade esteja completa de polímero, para que, então, o êmbolo da máquina injetora retorne, sem provocar sucção na peça moldada;
- Propiciar a separação do sistema de alimentação da peça, no manual ou automática;
- Minimizar a marca do produto devido ao sistema de alimentação;
- Reduzir a pressão final de injeção, que, no decurso da moldagem, compensa a contração do material.

Segundo Senai-SP (2011), não existem medidas ideais para o ponto de injeção, uma vez que a dimensão da entrada depende da fluidez do material a ser moldado, da espessura da parede do produto, do volume do material a ser injetado, da temperatura do material fundido e da temperatura do molde. Além disso, a medida é geralmente fundamentada na experiência.

Dentre algumas entradas, vale destacar a restrita, no qual é usada para alimentação lateral ou pelo centro, conforme indicado na Fig. 6 (SENAI-SP, 2011).

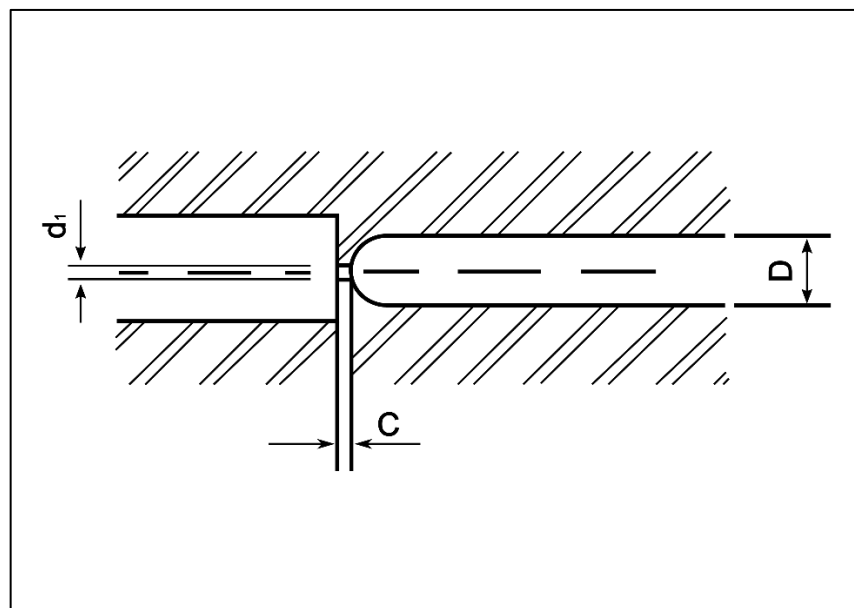
Figura 6 – Representação de alimentação lateral e pelo centro

Tipo	Característica
 Entrada direta	Pode ser utilizado em moldes de uma só cavidade. Deve ser utilizado para a injeção de peças com grande espessura. Vantagens: A queda de pressão no sistema de alimentação é relativamente baixa e produtos com alta qualidade e dimensões exatas. Desvantagens: Dificuldade em separar o jito da peça sem deixar marcas.
 Entrada lateral	É o tipo mais comum usado na moldagem por injeção. Vantagens: Grande exatidão dimensional e a facilidade de variação das suas dimensões. Desvantagens: Deixa marca na superfície visível do produto.

Fonte: DIAS, 2008.

Em geral, as entradas restritas têm diâmetros de 0,75 mm a 1,5 mm, ou correspondente à mesma seção para formas retangulares, e é comum, fazer o diâmetro, ou a espessura de entrada, igual à metade da espessura do produto no ponto de injeção. A Figura 7 mostra a entrada restrita-circular, onde o comprimento de entrada c é igual ao diâmetro da entrada d_1 (SENAI-SP, 2011).

Figura 7 – Ilustração de entrada restrita-circular



Fonte: HARADA, 2004.

O diâmetro da entrada circular (d_1) é determinado a partir da Eq. 2.

$$d_1 = \frac{D}{\beta} \quad (2)$$

Ainda com relação à Fig. 5, o poço de retenção ou poço frio, corresponde a um prolongamento dos canais, sendo fortemente recomendado nos moldes de múltiplas cavidades. Este prolongamento funcionará como receptáculo da primeira porção de plástico, que, sendo mais fria, prejudicaria a qualidade da peça ou o bom funcionamento do molde (HARADA 2004).

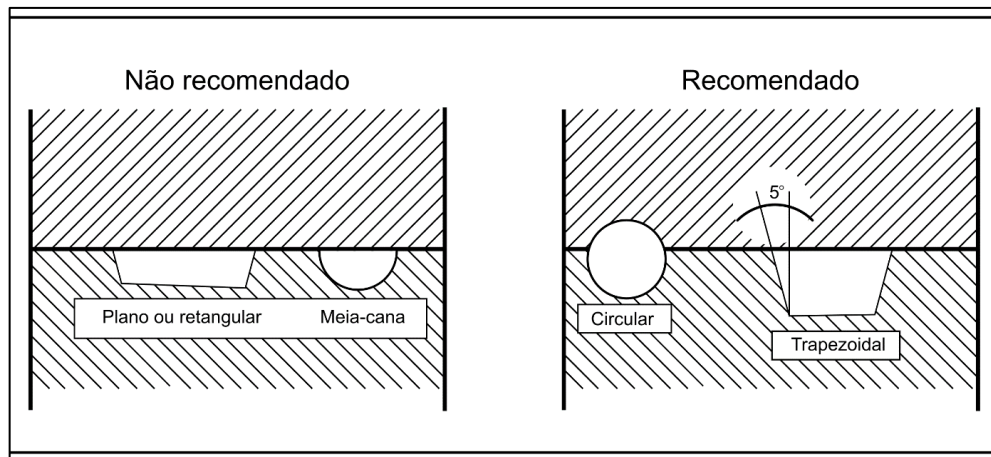
No que se refere aos canais de alimentação, têm como função ligar o canal de injeção à entrada das cavidades. A entrada ou ponto de injeção é um canal ou orifício que liga o sistema de alimentação à cavidade, e possui uma superfície pequena em comparação com o restante do sistema de alimentação (HARADA 2004).

De acordo com Menges e Mohren (1993), as principais funções dos canais de alimentação são:

- Conduzir o material plástico fundido, sem restrições até a cavidade, em um percurso o mais curto possível e com mínima perda de temperatura e pressão;
- Garantir que o material chegue a todos os pontos de injeção ao mesmo tempo, e com a mesma pressão e temperatura;
- Possuir seção transversal suficientemente grande, de modo a permitir que o tempo de resfriamento seja igual ou pouco superior ao tempo de resfriamento do molde. Em outras palavras, busca-se tornar a etapa de recalque mais eficiente.

De modo geral, Harada (2004) recomenda o uso de canais de alimentação circulares, conforme se observa na Fig. 8, pois apresenta uma superfície de contato mínima entre o polímero e o molde, minimizando, conseqüentemente, as perdas por atrito. Assim, a camada de plástico em contato com o molde solidifica-se rapidamente, de tal forma que o material continuará a fluir apenas no núcleo.

Figura 8 – Representação dos canais de injeção recomendados



Fonte: HARADA, 2004.

2.2.4 Ventilação

Permite que o ar e outros gases oriundos do termoplástico fundido possam escapar, pois a retenção desses gases pode prejudicar o fluxo de escoamento do polímero, causando defeitos de injeção, tais como: mau preenchimento, queimas, vazios, etc. Geralmente, os gases escapam pelo próprio plano de partição do molde ou, no caso de moldes postiçados, escapam pelos espaços, folgas entre os postiços e as placas. Quando isso não ocorre, pequenas aberturas são acrescentadas para sanar o problema (SANTOS, 2015).

2.2.5 Temperatura

A temperatura do molde deve ser mantida suficientemente baixa para obrigar o material quente a transferir seu calor de fusão sensível e latente às superfícies do molde, facilitando, assim, a extração do produto (HARADA, 2004).

Tal processo de resfriamento é feito através de canais (furos) de passagem de um fluido refrigerante, perto das cavidades. O esfriamento do material plástico quente injetado é feito por transferência de calor para as superfícies das cavidades (que estão com uma temperatura bastante inferior). Esse fluido refrigerante é normalmente água, mas pode ser usado qualquer líquido ou gás, como por exemplo, ar, responsável por absorver o calor. A água é o fluido mais eficiente e de menor custo. Esse processo tem grande importância na produtividade do molde, uma vez que controla o esfriamento das peças, que, na maioria dos casos, é a fase mais longa do ciclo de injeção (DIAS, 2008).

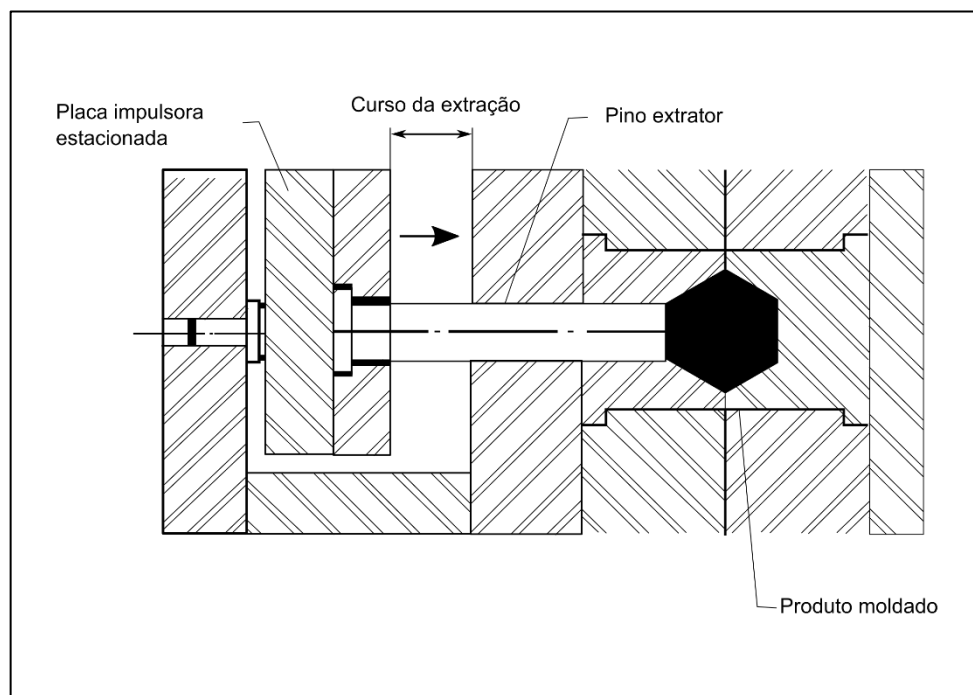
2.2.6 Sistema de Extração

Em boa parte dos processos de injeção, o produto continua na cavidade mesmo após a abertura do molde, devido a isso, é necessário um sistema de extração da peça. O sistema é normalmente composto por placas amovíveis (placas extratoras), sendo estas acionadas diretamente pela máquina injetora. Com a abertura do molde, estas placas acionam os elementos extratores, como pinos extratores, placa, lâminas extratoras, etc (MAIA, 2014).

2.2.6.1 Sistema de Extração por Placa Impulsora

É um sistema que permite a extração da peça moldada, onde elementos extratores atuam por intermédio de uma placa impulsora, diretamente acionada pela máquina injetora, conforme mostrado na Fig. 9 (SENAI-SP, 2011).

Figura 9 – Ilustração do sistema extrator por placa impulsora



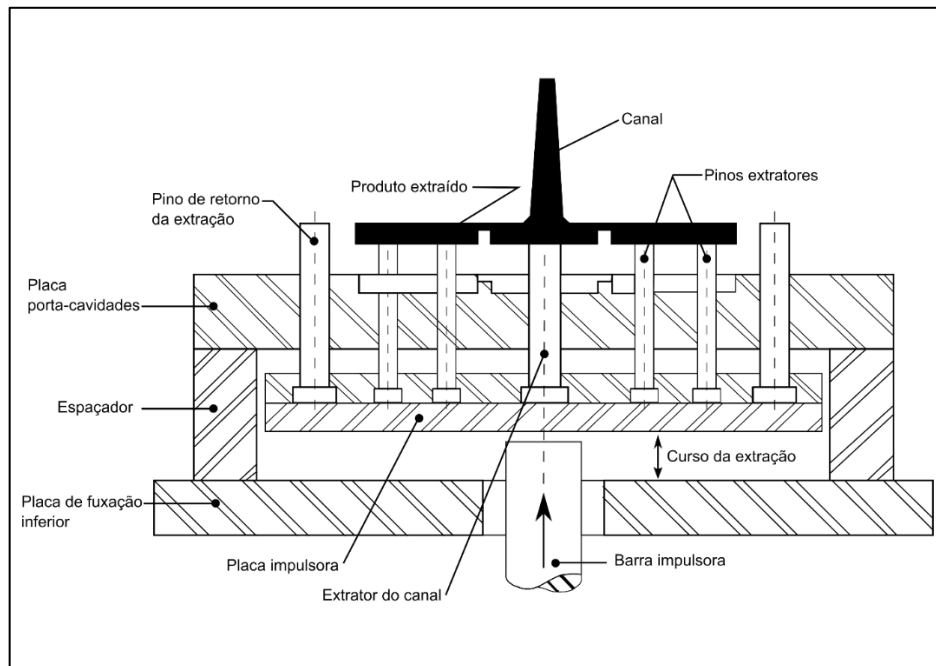
Fonte: SENAI-SP, 2011.

2.2.6.2 Sistema de Extração por Placa Impulsora - Pinos

Um dos mais simples tipos de extração, o elemento moldado é extraído pela execução de uma força, através de uma ou várias barras cilíndricas denominados pinos extratores (SENAI-SP, 2011).

Os pinos extratores são fixos na placa impulsora, e, após a extração, os pinos retornam à posição inicial, por intermédio dos pinos de retorno, que são ativados ao fechar o molde. A Figura 10 representa de modo simplificado a ação desses pinos.

Figura 10 – Imagem da posição dos pinos extratores



Fonte: SENAI-SP, 2011.

2.2.7 Contração

A contração desigual em uma peça moldada por injeção causa distorção dimensional ou rechupe, sendo o pior tipo de rechupe aquele causado pelo projeto deficiente da peça. Por isto, o produto deve ser projetado de forma a prevenir sua indesejável ocorrência. A contração é diretamente proporcional à espessura de parede que deve, logo, ser uniforme para que resulte em uma contração também uniforme. Espessuras de paredes diferentes num mesmo produto podem originar algum tipo de rechupe, tanto devido ao alívio de tensões, como à concentração de tensões no objeto moldado (HARADA, 2004).

Os poliméricos, em sua diversidade, possuem diferentes valores de contração e estes são fornecidos pelos seus fabricantes. No geral, é especificada uma faixa de valores de contração, em que a dimensão final dependerá do produto e das condições da máquina injetora. A contração da moldagem é volumétrica. Dessa forma, em todas as dimensões do produto deve-se levar em conta um coeficiente para compensar a contração. O termoplástico polipropileno, por exemplo, possui uma faixa estimada de contração entre 1,5 – 2,5% (SENAI-SP, 2011).

2.2.8 Máquinas Injetoras

Para obter-se uma boa versatilidade e qualidade, independentemente do tipo de máquina, os equipamentos devem apresentar as seguintes características (HARADA, 2004):

- Cilindro de Injeção: deve possuir pelo menos três zonas de aquecimento, controladas individualmente, preferencialmente do tipo proporcional, ou controles de temperaturas de voltagem dupla. A temperatura no bico deverá ser controlada separadamente, por pirômetro ou reostato individual;
- Pressão de injeção: deve ser variável e atingir, pelo menos, 1400 kg/cm², de preferência em dois estágios (pressão de injeção para encher o molde e recalque para evitar retorno do material ao cilindro), cada um controlado por um *timer*;
- Velocidade de injeção: deve ser variável e controlada, atingindo no máximo cerca de 150 cm/minuto;
- Alimentação ajustável: deve ser precisa para permitir um controle do peso e da quantidade de material injetado;
- *Timers*: devem ser precisos, alcançando até 0,1 segundo, a fim de medir o tempo de injeção, tempo de fechamento do molde, etc.

Antes de iniciar o projeto do molde, é necessário determinar a capacidade desejada da máquina injetora, de forma a estabelecer o tipo adequado de máquina injetora a ser empregada. Quando esta já estiver estabelecida, as informações necessárias quanto aos dados de projeto para a montagem, área da placa, distância entre as colunas, etc., podem ser obtidas no catálogo do fabricante (HARADA, 2004).

Aliado a isso, devem ser considerados os seguintes critérios (HARADA, 2004):

a) A capacidade de injeção - as máquinas injetoras são geralmente especificadas pelo peso máximo de material que pode ser moldado a cada injeção. Atualmente, o peso é dado em gramas de poliestireno. Se o material a ser usado difere daquele para o qual a máquina está especificada, deve ser efetuada a correção para qualquer diferença entre o seu peso, o fator volumétrico do material da especificação, e o que vai ser utilizado. Com isso, para se determinar a capacidade de injeção C_i de uma máquina para outro material, deve-se utilizar a Eq. 3.

$$C_i = (C_i)_{PS} \times \frac{\gamma_{PA}}{\gamma_{PS}} \times \frac{V_{PA}}{V_{PS}} \quad (3)$$

b) A capacidade de plastificação - é uma função do potencial de aquecimento da máquina. Dessa forma, a quantidade de material que pode ser levada à condição de moldagem em um determinado tempo, depende da temperatura de moldagem necessária e do calor específico do material. A capacidade de plastificação de uma máquina para qualquer material pode ser determinada, aproximadamente, pela Eq. 4.

$$C_p = (C_p)_{PS} \times \frac{C_{PA}}{C_{PS}} \times \frac{T_{PA}}{T_{PS}} \quad (4)$$

c) A pressão de injeção - a proporção exata da pressão de injeção a ser adotada depende da espessura de seção da moldagem e da facilidade de fluxo do material usado. As seções delgadas requerem uma alta pressão de injeção para enchimento, necessitando, portanto, de maior força de fechamento.

d) A força de fechamento F - é a força necessária para manter as placas do molde integralmente unidas durante a injeção do material nas cavidades, impedindo que o molde se abra, gerando rebarbas e imperfeições na peça. A Equação 5 permite determinar a força de fechamento.

$$F = P_{inj} \times A \quad (5)$$

2.2.9 Ciclo de Injeção

A injeção não é um processo contínuo, mas sim, intermitente, seguindo um ciclo conhecido como "ciclo de injeção", que pode possuir eventos que se interceptam e eventos que só ocorrem após terminar o antecedente. Pode-se dizer que existe um ciclo com ocorrências sequenciais da rosca recíproca e um ciclo com eventos sequenciais do molde, todavia, os ciclos da rosca e do molde são interdependentes (MANRICH, 2005).

2.2.9.1 Ciclo da Rosca Recíproca

Esse ciclo compreende as etapas descritas a seguir:

a) O polímero é alimentado na injetora através de um funil de alimentação. A rosca carrega o polímero do funil para a parte frontal desta, girando a 280°. Enquanto a rosca gira, ela se locomove para trás, pois precisa criar espaço à sua frente para depositar o polímero que ela mesma homogeneizou e fundiu. Portanto, a rosca deposita uma quantidade de polímero pronto para ser injetado em sua parte dianteira. Essa massa fundida não entra no molde ainda,

pois o bico de injeção está normalmente fechado por uma válvula durante esse tempo (MANRICH, 2005).

b) Assim que a rosca homogeneiza a quantidade necessária de polímero, pode existir um tempo de espera (para acabar o ciclo anterior do molde), até que o molde esteja vazio e fechado para receber a injeção da próxima quantidade de massa fundida. Nesse momento, então, a rosca, ao invés de atuar como parafuso sem fim, age como se fosse um pistão, fazendo movimento para frente, injetando propriamente a massa fundida para dentro do molde. Para isso, a válvula do bico de injeção se abre através de um dispositivo adequado. Por outro lado, para que o polímero não volte para trás, pelos canais da própria rosca, uma outra válvula existente na ponta desta se fecha. A rosca recebe o nome de rosca recíproca por atuar, ora como parafuso sem-fim, ora como pistão (MANRICH, 2005).

c) A rosca, após terminar de injetar o material para dentro do molde, tem um tempo chamado de tempo de empacotamento, onde ela continua a exercer pressão sobre o injetado (MANRICH, 2005).

d) Terminado o tempo de empacotamento ou de pressurização e recalque, como também é conhecido, a rosca volta para o evento descrito em (a), isto é, gira e volta para a direção do funil, produzindo a próxima dosagem (MANRICH, 2005).

2.2.9.2 Ciclo do Molde

O ciclo do modelo é formado pelas etapas abaixo:

a) O molde, para receber o polímero fundido, deve estar fechado e vazio. Deste modo, essa etapa consiste no preenchimento do molde, bem como, do resfriamento da peça. Assim que o polímero percorre os canais do molde, inicia o processo de resfriamento do fundido. Após o molde ser totalmente preenchido e pressurizado, atua sobre ele a pressão de recalque ou pressão de compensação (MANRICH, 2005).

b) Após a pressão de recalque não ser mais necessária, o molde ainda continua fechado para terminar o processo de resfriamento, que normalmente demanda maior tempo do total do ciclo (MANRICH, 2005).

c) Assim que o moldado estiver na temperatura desejada, o molde se abre, ejetando a peça (MANRICH, 2005).

d) O molde, então, é fechado novamente, voltando para o ponto descrito em (a) (MANRICH, 2005).

2.2.10 Preenchimento do Molde

O sucesso do processo de injeção de termoplásticos está diretamente ligado ao conhecimento do fluxo do fundido nos canais de um molde, desde que o projeto do molde seja apropriado. Para preencher o molde, é necessário que o polímero tenha fluidez suficiente para escoar pelos seus finos canais e estreitas paredes. Ainda que o material tenha boa fluidez, a pressão utilizada durante o preenchimento é da ordem de 300 a 1.200 bar. O polímero no estado fundido aumenta de volume por dilatação, podendo ampliar em torno de 25% em relação ao seu volume quando está na temperatura ambiente. Quando o molde é aberto e a peça ejetada, a temperatura está próxima à ambiente e, em alguns minutos, fora do molde, atinge a temperatura em torno dos 25 °C ou à temperatura daquele ambiente (MANRICH, 2005).

2.2.10.1 Fases de Preenchimento do Molde

Para preencher o molde, Manrich (2005), cita três estágios:

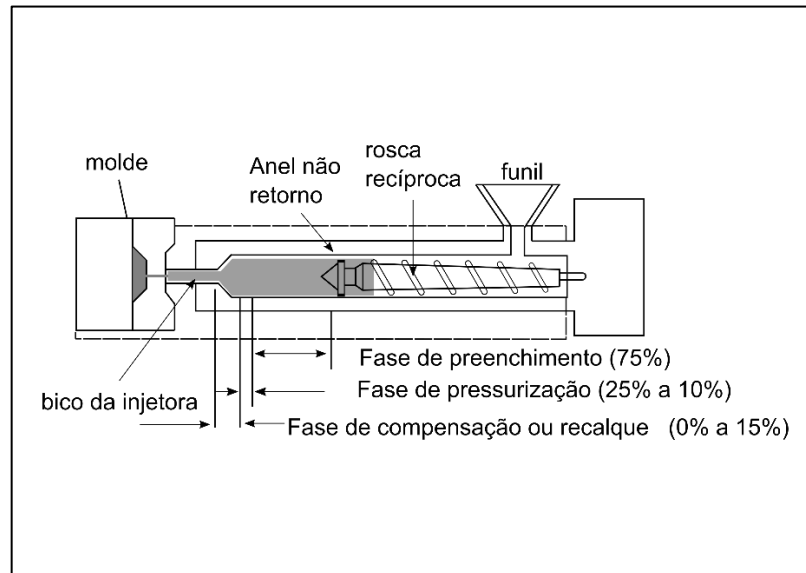
1. Preenchimento do molde: é a etapa onde a massa é empurrada para dentro do molde vazio, preenchendo-o completamente, porém, sem pressurização. Nessa etapa, o polímero está totalmente expandido (em torno de 25%, dependendo do tipo de sistema polimérico). Significa então que, se a massa for resfriada para a temperatura ambiente, ela vai encolher 25% e a peça ficará menor que o molde nessa mesma proporção. A fase de preenchimento propriamente dita envia, apenas, em torno de 75% da massa necessária para dentro do molde. Portanto, é essencial pressurizar, enviando mais massa para dentro do molde.

2. Fase de pressurização: essa etapa é a que pressuriza a massa a uma pressão controlada, e, normalmente, a pressão atingida é a máxima do ciclo como um todo. É possível, nesse estágio, enviar os 25% da massa necessária para compensar todo o encolhimento. Mas, dependendo do material, do molde e das limitações da máquina injetora, pode ser que mais massa só possa ser enviada se for criado espaço (que é gerado pelo encolhimento do que já está resfriando dentro do molde). A fase de pressurização, portanto, envia entre 25% a 10%

3. Fase de recalque ou fase de compensação: essa terceira fase é responsável pelo envio do restante da massa, se necessário, de 0% a 15%, e, em manter sob pressão, a massa dentro do molde, para que esta não retome. Essa fase é realizada sob pressões decrescentes e, na medida do possível, sempre inferiores à pressão de pressurização máxima. O ponto de comutação ou pressão de comutação é quando se muda da pressão de pressurização, segunda

fase, para a pressão de recalque, terceira fase. A Fig. 11 contém o esquema das três fases de preenchimento.

Figura 11 – Fases do preenchimento do molde, durante um ciclo de injeção

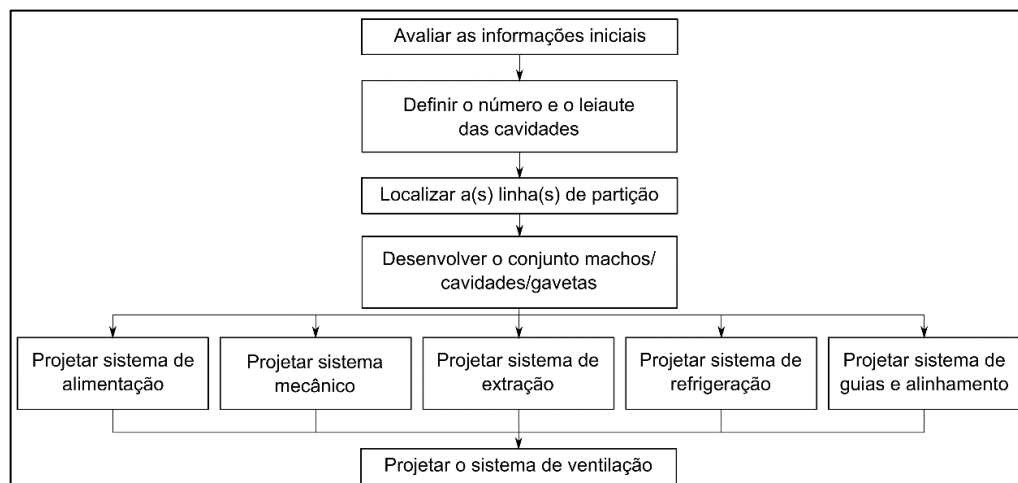


Fonte: MANRICH, 2005.

2.2.11 Projeto do Molde

Vários autores orientaram modelos de projeto de molde, porém não há um consenso de etapas para se projetar um molde (SANTOS, 2015). As etapas de projeto dos sistemas: de alimentação, mecânico, de extração, de refrigeração e de guias são realizadas de maneira interativa e simultânea, pois é difícil constituir uma sequência para o projeto de molde. Diante disso, um organograma guia é mostrado na Fig. 12 (DIAS, 2008).

Figura 12 – Etapas de desenvolvimento do molde de injeção (DIAS, 2008)

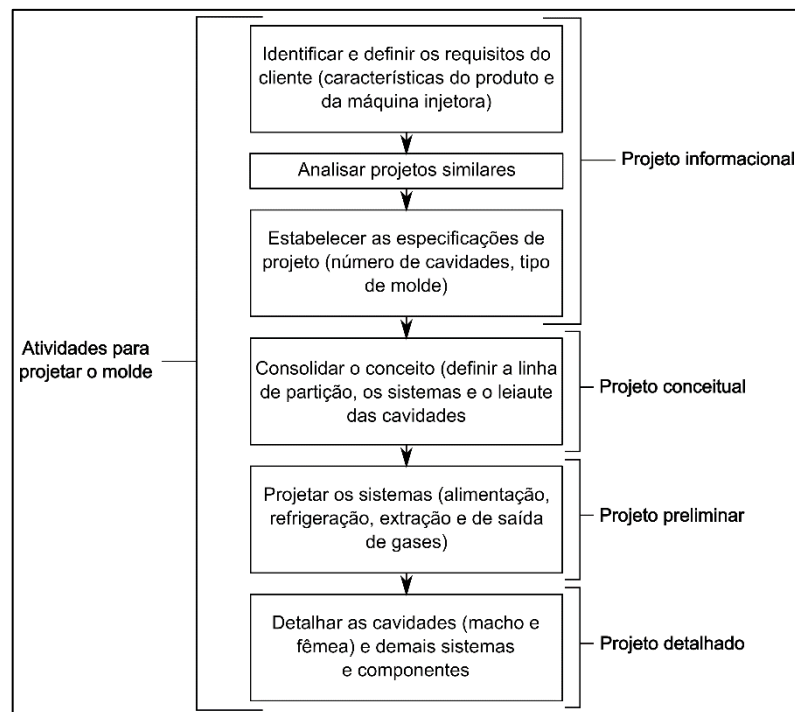


Fonte: (DIAS, 2008)

Ainda que uma indústria não se utilize de uma metodologia formal para o projeto de um molde, as fases identificadas são comuns e podem ser correlacionadas com as etapas de metodologia de Projeto de Desenvolvimento de Produto (PDP), encontradas na literatura (SANTOS, 2015).

Somado a isso, Sacchelli (2007) sugere uma sistematização de desenvolvimento de moldes para injeção polimérica, que relaciona as etapas envolvidas no projeto de molde, conforme a Fig. 13.

Figura 13 – Fluxo de atividades relacionadas com o projeto de moldes



Fonte: SACCHELLI, 2007.

Em geral, os profissionais/técnicos em injeção termoplástica podem realizar a fase de projeto de acordo com as considerações a seguir (CENTIMFE, 2003) :

- Uso dos componentes do molde normalizados, sem impedir o aspecto criativo;
- Conhecimento das vantagens da máquina injetora em uso;
- Projetar tendo em vista a otimização dos recursos disponíveis;
- Projetar pressupondo a maximização de trabalhos em uma mesma máquina, vetando assim, os transportes entre as máquinas durante a fabricação dos elementos do molde de injeção;
- Análise crítica do projeto, propondo soluções.

Com isso, o presente trabalho se concentra no projeto informacional, com ênfase na preparação das informações para o projeto preliminar, definindo algumas especificações técnicas do molde, como modelagem 3D em CAD, prototipagem da peça, simulações de injeção plástica do produto em *software* CAE, definição do número de cavidades do molde, escolha da máquina injetora, bem como do material polimérico a ser injetado, e dimensionamento do sistema de alimentação.

2.3 SOFTWARE CAE

A expressão CAE, vem do inglês *Computer Aided Engineering* (Engenharia Auxiliada por Computador), cuja finalidade é a solução ou prevenção de problemas de engenharia, para tomar medidas úteis no sistema/projeto.

Conforme Pinto (2002), a relevância do uso do programa CAE pode ser definido em três principais circunstâncias:

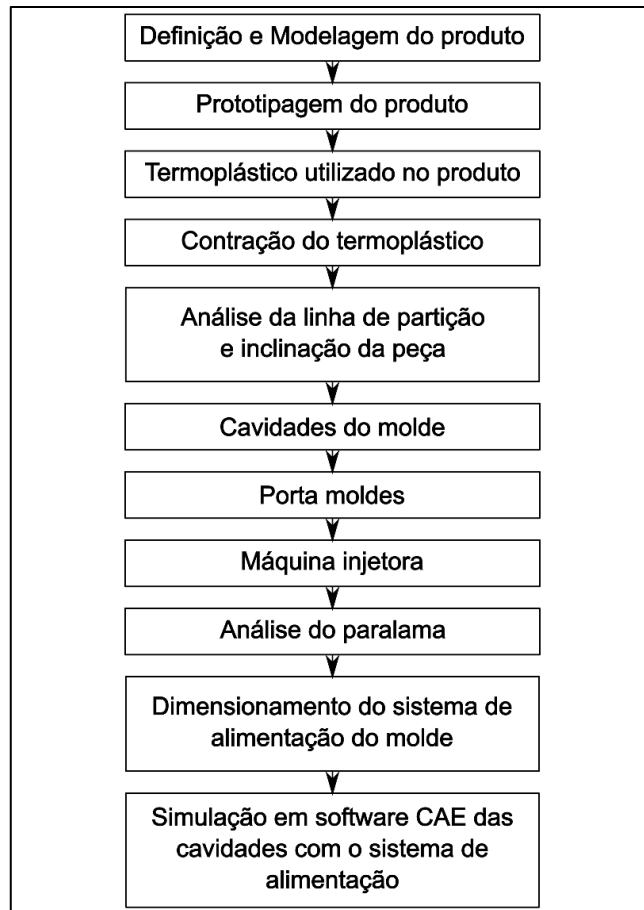
- Validação do conhecimento do processo;
- Redução da frequência de experimentos;
- Visualização de detalhes do processo difíceis de serem verificados experimentalmente, como gradientes de pressão e temperatura, velocidade de preenchimento e outros aspectos dependentes do tempo.

Na injeção de termoplásticos, os programas computacionais do tipo CAE permitem as mais variadas condições de simulações, como, por exemplo, diferentes geometrias, temperaturas e localização(ões) de(os) pontos(s) de injeção polimérica, propiciando ao usuário a interpretação dos resultados obtidos. Os sistemas CAE apresentam bancos de dados contendo informações técnicas de vários polímeros, de modo que seja possível selecioná-los e simular seu comportamento durante a injeção. Se os resultados forem devidamente interpretados e aplicados, é possível reduzir os problemas que podem ocorrer durante o preenchimento de moldes e cavidades (PINTO, 2002).

3 METODOLOGIA

De acordo com o conhecimento técnico adquirido com o referencial teórico deste trabalho, foi elaborado o organograma, mostrado na Fig. 14, que representa o procedimento adotado para projetar o molde e, assim, atingir o objetivo geral.

Figura 14 – Organograma preliminar do projeto informacional do molde



Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

3.1 PROJETO INFORMACIONAL

A princípio, o desenvolvimento deste trabalho foi motivado a partir da necessidade de uma indústria local desenvolver um molde para injeção de paralamas de bicicletas infantis, pois atualmente a mesma importa essas peças de outro país.

Para execução desse projeto, além do desenho da peça, foi necessário obter informações importantes sobre o produto, adquiridas em reuniões acadêmicas e fabris, integrado por projetistas do produto e do molde, engenheiros mecânicos e de produção, técnicos industriais da ferramentaria, e, também, por representantes de engenharia e desenvolvimento de produto.

3.1.1 Definição e Modelagem do Produto

A seleção do modelo do paralamas foi determinado por meio de vários aspectos, como: dimensões e geometria da peça, a espessura de parede e a massa do produto, a facilidade de usinagem, a aparência e o ângulo de saída.

Inicialmente foi realizado a modelagem 3D de uma bicicleta infantil em um *software* CAD, conforme ilustrado na Fig. 15. O quadro e os demais elementos, como garfo e gancheira da bicicleta, serviram de base para o trabalho de modelagem dos paralamas dianteiro e traseiro.

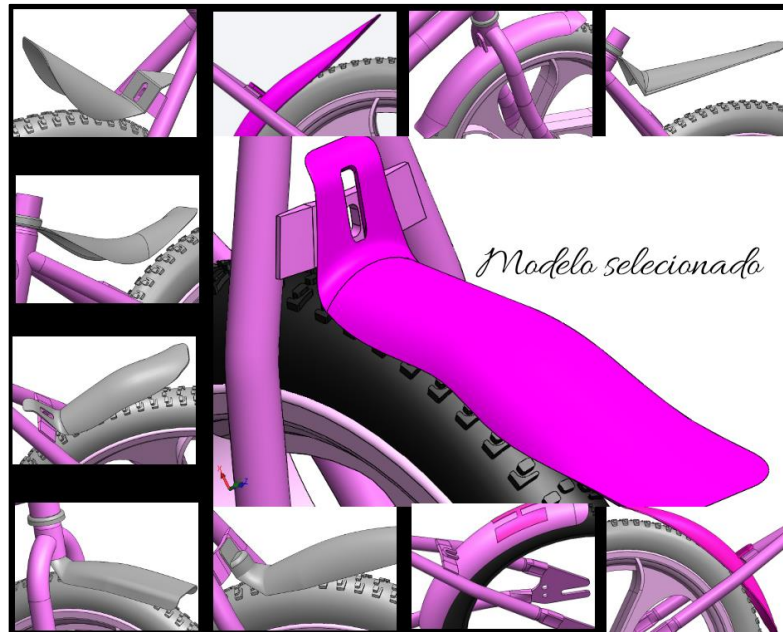
Figura 15 – Modelagem 3D da bicicleta infantil.



Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

Em seguida, foi modelado 10 modelos de paralamas, no qual foi escolhido um único tipo para a parte traseira e dianteira da bicicleta, como pode ser observado na Fig. 16. A fim de melhorar o balanceamento dos canais de alimentação no molde, uma vez que será produzido dois paralamas a cada ciclo de injeção termoplástica, o paralamas possui uma massa de 25,11 gramas.

Figura 16 – Modelagem de paralamas da bicicleta infantil



Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

3.1.2 Prototipagem do Paralama

A prototipagem tem importância relevante no projeto, pois auxilia nos testes de posicionamento na bicicleta, bem como possibilita analisar as condições técnicas e estéticas do produto a ser injetado. Com isso, com o intuito de obter informações preliminares, foi impresso em 3D um protótipo do paralama em escala real.

Uma vez definido o modelo, o arquivo CAD em 3D foi convertido para o formato .STL, e, então enviado para impressão na impressora 3D XYZ Da Vinci 1.0 Pro (pla, abs, petg), mostrada na Fig. 17. A mesma pertence ao Instituto Federal de Brasília – *Campus Taguatinga*, e o filamento de impressão empregado foi o ABS.

Figura 17 – Impressora 3D XYZ Printing, Modelo Da Vinci 1.0 Pro



Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

A Figura 18 ilustra o produto impresso.

Figura 18 – Paralama impresso na impressora 3D XYZ Printing



Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

3.1.3 Termoplástico Utilizado no Paralama

O material polimérico selecionado foi o polipropileno, devido à versatilidade em sua estrutura molecular (MANRICH, 2005). Trata-se de um tipo de plástico com capacidade de amolecer e fluir quando sujeito a um aumento de temperatura e pressão (CANEVAROLO, 2002). Dentre suas principais características, destaca-se o “efeito dobradiça”, que traz a possibilidade de formas complexas no próprio material. A Tabela 2 mostra os parâmetros de temperatura do polipropileno utilizado.

Tabela 2 – Parâmetros de temperatura do polipropileno

Temperatura de Fusão	230 ° C
Temperatura máxima de fusão	280 ° C
Temperatura mínima de fusão	200 ° C
Temperatura máxima do molde	80 ° C
Temperatura mínima do molde	20 ° C
Temperatura de extração	95 ° C
Temperatura de transição	135 ° C

Fonte: *Software CAE*, 2019.

3.1.4 Contração do Termoplástico

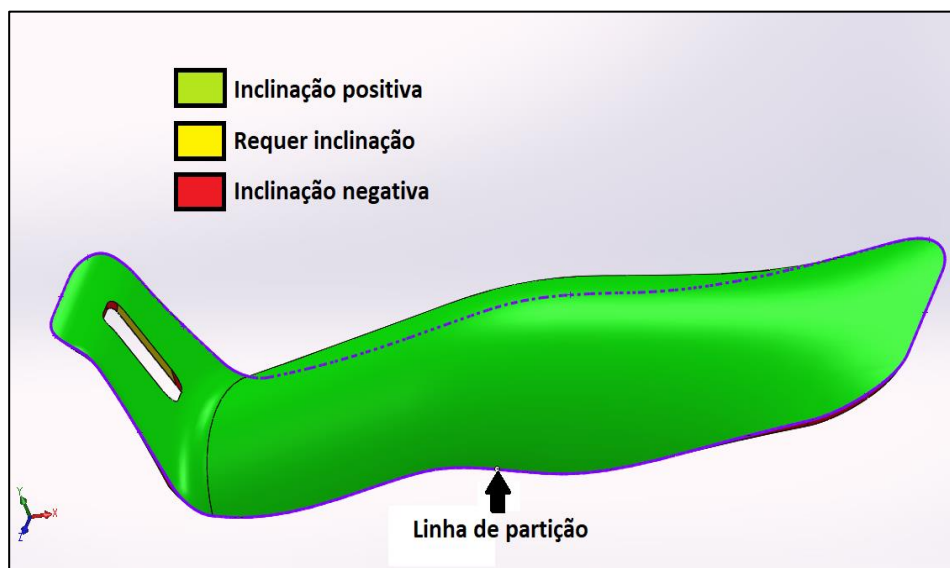
Para realização do projeto, estabeleceu-se uma contração de 1,015. Este valor contribuirá para as dimensões volumétricas planejadas, conforme as especificações dimensionais da peça.

3.1.5 Análise da Linha de Partição e Inclinação da Peça

Com a contração aplicada, a linha de partição do paralama (linha que divide as cavidades do molde de injeção) foi determinado pelo assistente do *software* CAD.

Nessa etapa também foi realizada a análise de inclinação dos ângulos de saída do paralama, possibilitando avaliar e melhorar a extração do produto da cavidade do molde, o que resulta, conseqüentemente, em uma injeção de qualidade, mantendo íntegra a sua geometria. O ângulo de saída foi aplicado na peça, conforme mostrado na Fig. 19.

Figura 19 – Ângulos positivos e negativos do paralama, analisados em *software* CAE

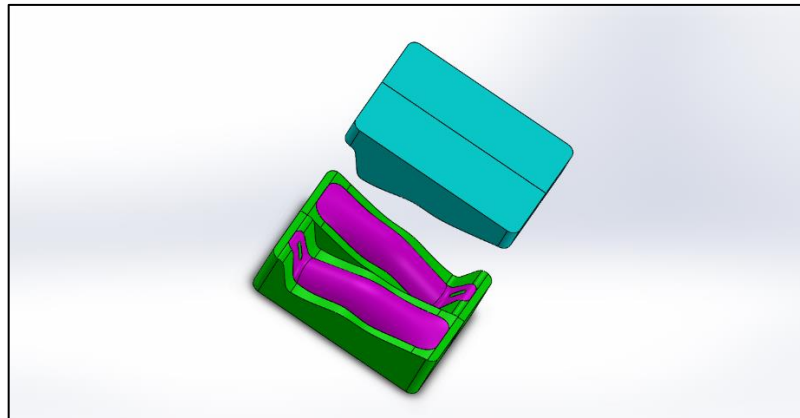


Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

A cor verde (ângulos positivos), presente na Fig. 19 e delimitada pela linha de partição, aponta que o paralama é separável em núcleo e cavidade.

3.1.6 Cavidades do Molde

Para este projeto, foram definidas duas cavidades do produto, de maneira que, a cada ciclo finalizado, obtém-se um conjunto de paralamas para uma bicicleta. A Fig. 20 mostra as duas cavidades modeladas.

Figura 20 – Modelagem das cavidades em *software* CAD.

Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

3.1.7 Porta Molde

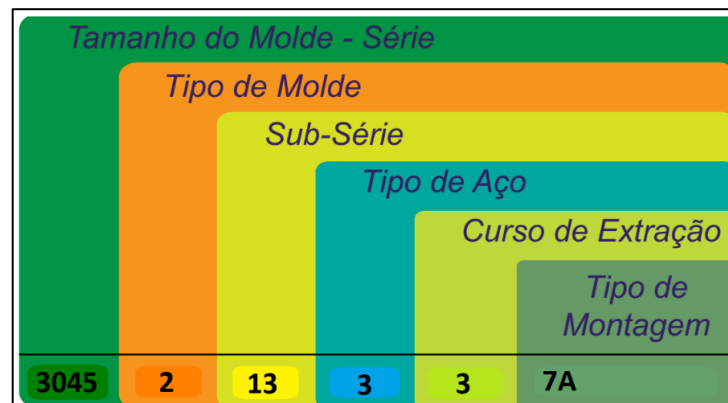
O porta molde foi escolhido de acordo com o catálogo do fabricante Polimold para aplicações convencionais em injeção plástica. A Tabela 3 e a Figura 21 mostram as informações gerais da seleção do porta molde.

Tabela 3 – Informações gerais do Porta Molde

Porta Molde	2 placas fornecido com ABA de fixação
Área útil do Porta Molde	X=206mm - Y=296mm
Espessura da placa matriz	P1=36mm
Espessura da placa Fêmea	P2=76mm
Espessura da placa extratora	PE=22mm
Altura de curso para extração do produto	c=53mm
Aço das placas P1 e P2	Aço P20
Aço para placas do Porta Molde	Aço SAE 1045 (DIN 1.1730)
Área útil de alojamento do molde	X= 164mm - Y= 242,78 mm
Montagem do Molde	Colunas P1 e P2 + pinos extratores
Colunamento do Molde	Guia nas placas cavidades P1 e P2

Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

Figura 21 – Especificação em conformidade com o Catálogo de Porta Molde de 2 placas-Polimold



Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

3.1.8 Máquina Injetora

As informações sobre a máquina injetora são relevantes para o projeto de moldes, pois a partir delas são definidas as restrições quanto às dimensões e requisitos funcionais do molde. Pensando nisso, e também na viabilidade da injetora na indústria local, foi escolhida a máquina *Easymaster* EM80-SVP/2, como ilustrado na Fig. 22. A Tabela 4 contém as principais características técnicas da injetora.

Figura 22 – Máquina Injetora *Easymaster* EM80-SVP/2



Fonte: EASYMASTER, 2019.

Tabela 4 – Principais características técnicas da máquina injetora *Easymaster* EM80-SVP/2

Unidade de fechamento		
Força de fechamento do molde-Máxima	t	80
Curso máximo de abertura	mm	320
Tamanho das placas (horizontal e vertical)	mm	545x490
Tamanho mínimo do molde	mm	130
Tamanho máximo do molde	mm	320
Força de extração	t	2,3
Unidade de injeção		
Diâmetro do parafuso	mm	36
Peso máximo de injeção (PS)	g	150
Pressão máxima de injeção	kgf/cm ²	1560
Razão de injeção (PS)	g/s	87
Capacidade de plastificação (PS)	g/s	12
Curso da unidade injetora	mm	160

Fonte: EASYMASTER, 2019.

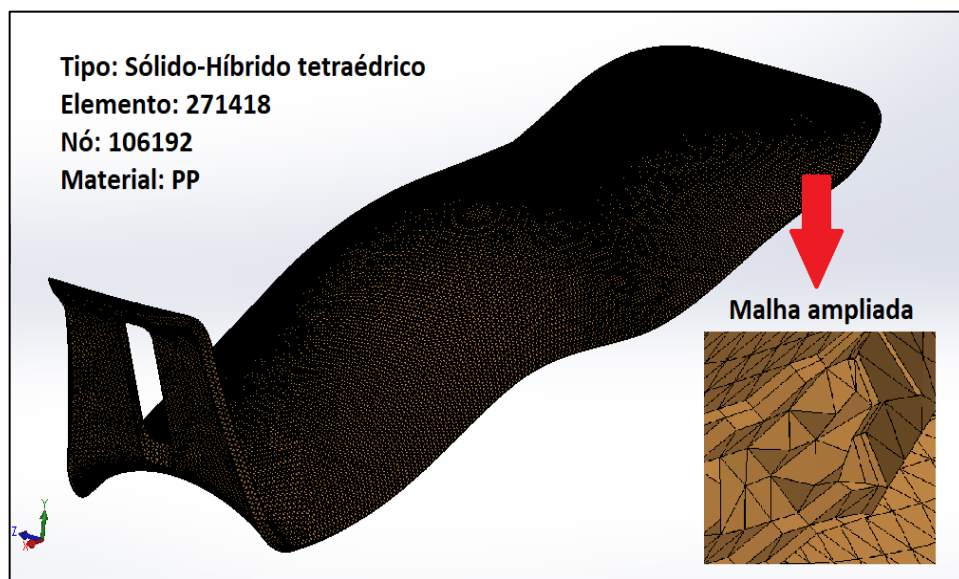
3.1.9 Análise do Paralama

Após a conclusão das etapas anteriores, foi executado uma simulação em *software* CAE, no qual o paralama modelado em 3D foi submetido a uma análise das condições de

preenchimento desse produto. Nessa simulação foram verificadas a temperatura e pressão de enchimento, as linhas de soldas, tempo, e, também, os pontos críticos de possíveis rechupes.

O procedimento de análise utiliza uma abordagem de discretização de plano binário, cuja base é uma malha de superfície triangular, classificada como uma malha *shell*. Na simulação, o *software* preenche o volume do paralama com 271.418 elementos de malha híbrida tetraédrica com base na malha de superfície. A Figura 23 mostra a geração da malha do paralama.

Figura 23 – Modelo geométrico do paralama com geração de malha tetraédrica híbrida

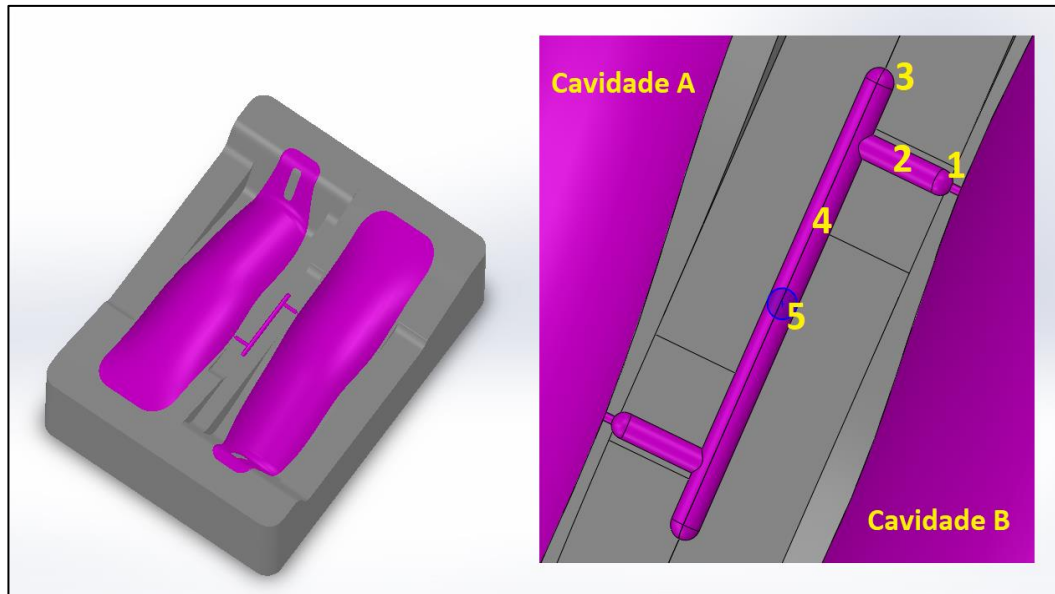


Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

3.1.10 Dimensionamento do Sistema de Alimentação do Molde

O sistema de alimentação (Canal frio) foi dimensionado em função das especificações do molde, da determinação do leiaute das cavidades e das linhas de partição do molde. Na Figura 24 encontram-se as cavidades dos paralamas, por meio de um sistema de alimentação indireta, com entrada restrita circular.

Figura 24 – Sistema de alimentação do paralama: 1 - Entrada restrita circular; 2 - Canal secundário; 3 - Poço frio; 4 - Canal primário, 5 - Entrada de injeção polimérica



Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

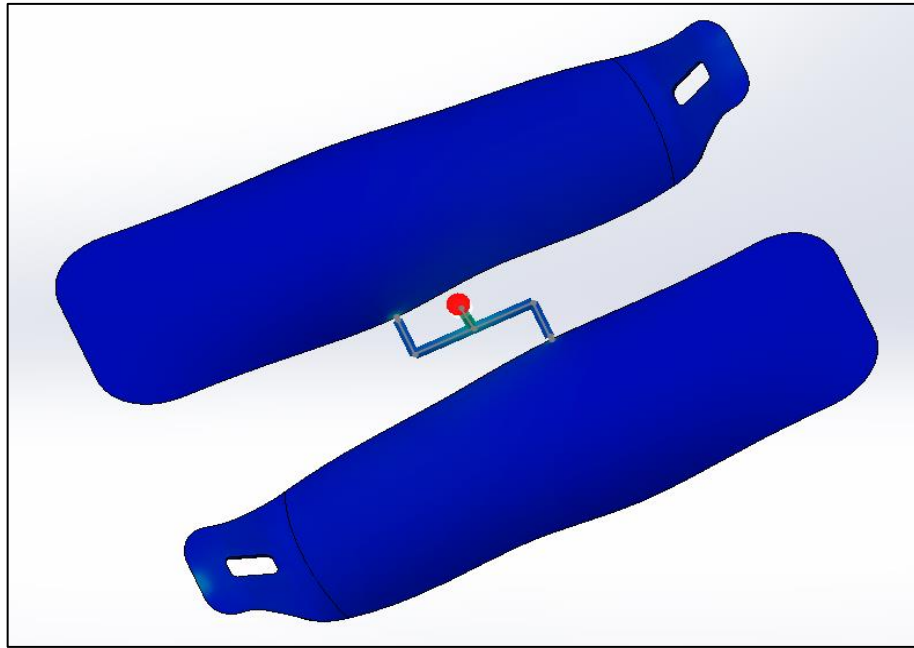
A distribuição das cavidades e canais presentes na Fig. 24 foram balanceadas, e a distância da bucha do galho central até cada cavidade do paralama foi espaçada de forma simétrica. Isto permite adquirir uma pressão de injeção igual em cada cavidade, e, conseqüentemente, as velocidades de entrada do material serão bem similares, facilitando assim, um bom preenchimento no molde.

A entrada restrita circular possui 1 mm de diâmetro, representando 50% da espessura do paralama. Para determinação da quantidade de ponto de injeção da cavidade, foi considerado a razão de fluxo do polipropileno (390:1) por espessura de parede. A razão de fluxo do paralama é de aproximadamente 60, o que resulta na aplicação de um único ponto de injeção (INNOVA, 2008).

3.1.11 Simulação em *Software* CAE das Cavidades com o Sistema de Alimentação

Com o canal de alimentação definido, foi realizado uma nova simulação, onde foi verificado o fluxo de preenchimento das duas cavidades, que corresponde ao paralama traseiro e dianteiro, como evidencia a Fig. 25.

Figura 25 – Cavidades do paralama traseiro e dianteiro com o galho de alimentação da simulação efetuada



Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

No sistema foi analisado o recalque, fase do processo que pode definir a qualidade do produto. Ela tem a função de finalizar o preenchimento da cavidade, como também impedir que o material fundido sob pressão no interior da cavidade retorne pelo canal de alimentação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 TESTE DO PROTÓTIPO DO PARALAMA

O teste do protótipo auxiliou na estética e funcionalidade da peça, possibilitando realizar observações, a fim de melhorar o projeto. Com o teste do modelo na parte dianteira da bicicleta, ficou perceptível a necessidade de aumentar a distância limite entre o paralama e o pneu da bicicleta, conforme ilustrado na Fig. 26. Uma solução rápida consiste em aumentar a inclinação da peça em relação à fixação do componente. Quanto às dimensões e estética do produto, ficou nítido a boa harmonização e proporção, nem muito pequeno e nem muito grande. Outra sugestão pertinente, seria ajustar mais os filetes nas extremidades do paralama. De forma geral, o modelo está simples, útil e dentro das expectativas esperadas.

Figura 26 – Teste do paralama dianteiro na bicicleta infantil



Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

Os resultados em relação ao paralama traseiro foram positivos, pois a peça não apresentou nenhum problema de fixação. Também foi constatado a presença de uma tolerância adequada das dimensões para ajustagem do sistema de freios, já que, no modelo testado, é do tipo cantilever, cujas hastes de acionamento de freios são acionadas por meio de cabo, que é puxado quando os manetes são movimentados. A Figura 27 mostra o teste realizado.

Figura 27 – Teste do paralama traseiro



Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

Como dito anteriormente, o modelo é único para a parte dianteira e traseira da bicicleta, e, apesar da inclinação necessária para ajustar o lado dianteiro, não há interferência no paralama traseiro.

Em linhas gerais, o teste se mostrou eficiente para agilizar no planejamento de desenvolvimento do molde, ou seja, a iteração entre o modelo 3D do produto, amostra física e o projeto informacional contribuíram para a execução das demais etapas do projeto do molde.

4.2 SIMULAÇÃO DE INJEÇÃO DO PARALAMA EM SOFTWARE CAE

A análise de injeção do paralama ocorreu por meio da ferramenta de simulação CAE, que ajuda prever defeitos de fabricação durante as etapas iniciais do projeto das peças e moldes, além de suprimir o custoso retrabalho do molde e melhorar a qualidade do produto. Portanto, com o auxílio dos *softwares* de injeção de termoplásticos, economiza-se energia, recursos, tempo e custo.

4.2.1 Análise de Preenchimento do Paralama

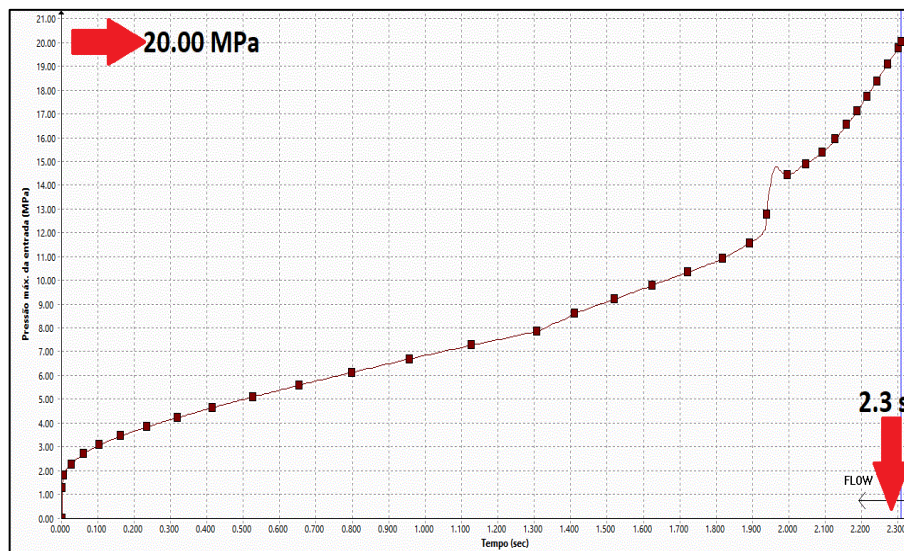
Com base no resultado obtido, o paralama pode ser preenchido com eficácia a uma pressão de 20.00 MPa (2899,11 psi). A temperatura máxima ao final do preenchimento permaneceu em 10 °C acima da temperatura do fundido, resultando em pouca ou nenhuma deterioração do material plástico. A temperatura de fusão da frente de fluxo, por sua vez, está dentro do intervalo aceitável de +/- 10°C à temperatura de fusão inicial. Isso ajuda a promover o preenchimento e o recalque do molde, minimizando as exigências de pressão da injeção,

permitindo a obtenção de integridade da linha de solda e a aparência boa, e propiciando uma maior chance de fabricar uma peça com propriedades ideais.

4.2.2 Tempo de Preenchimento do Paralama

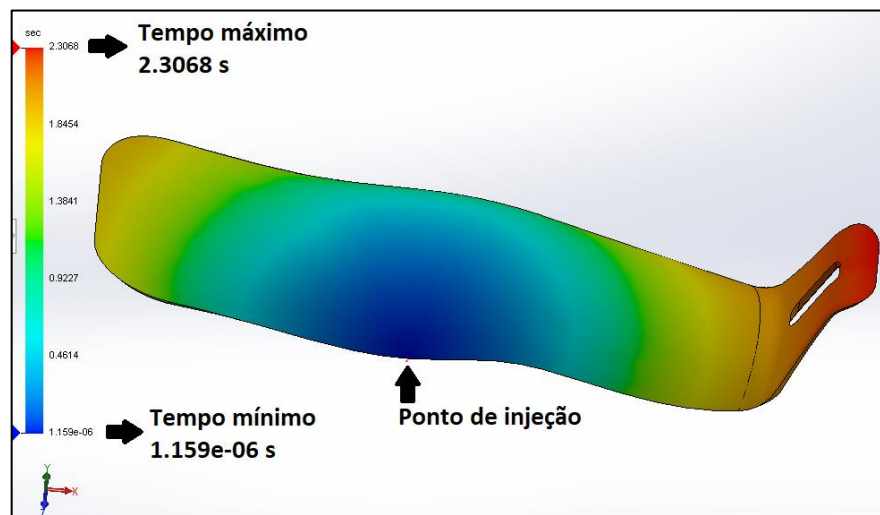
A Figura 28 contém o gráfico da pressão máxima de entrada em função do tempo de preenchimento, e representa o perfil de fundição do polipropileno à medida que ele passa por meio da cavidade da peça do molde durante o processo de moldagem por injeção. Na Figura 29, por outro lado, encontram-se ilustradas as curvas de nível para o tempo de preenchimento.

Figura 28 – Pressão máxima de entrada em função do tempo de preenchimento



Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

Figura 29 – Tempo de preenchimento do paralama



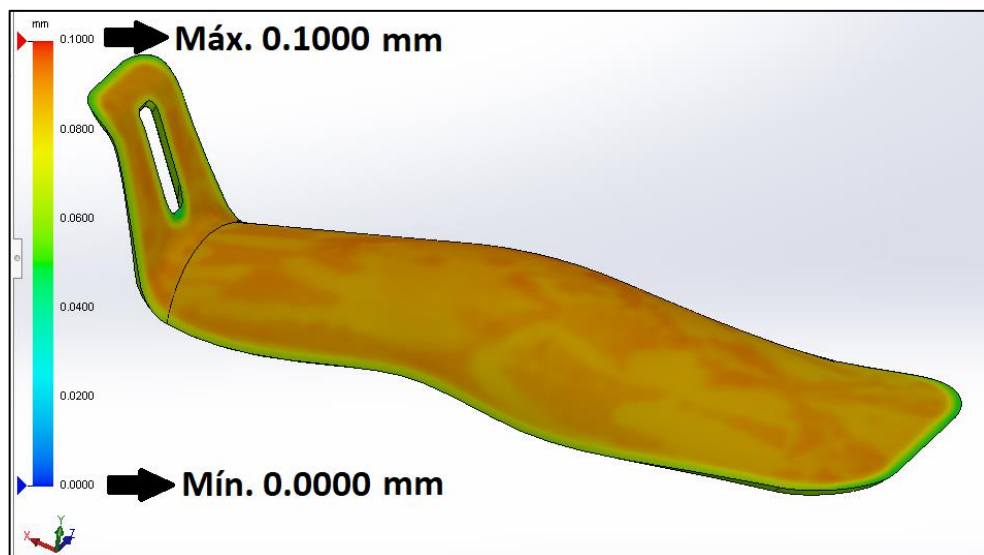
Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

As regiões de cor azul na Fig. 29 correspondem ao momento inicial da frente de fluxo, e, as regiões em vermelho, ao momento final da frente de fluxo, em determinado intervalo de tempo.

4.2.3 Rechupes

Dentre os resultados obtidos na simulação, foi detectado marcas de dissipação na superfície do paralama, devido à variação das taxas de resfriamento ao longo da peça. A Figura 30 mostra a dispersão irregular das depressões na superfície da peça, representadas em cores laranja e vermelho.

Figura 30 – Marcas de dissipação durante a injeção do paralama



Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

A partir dos resultados apresentados na Fig. 30, foi dedicado maior atenção ao tempo de recalque, pois possui elevada importância no processo de injeção. Dessa forma, esse tempo foi aumentado para injetar uma maior quantidade de material polimérico nas cavidades, e, assim, compensar a contração do material durante a solidificação, eliminando o efeito de rechupe das peças. Essa solução influencia diretamente no peso e dimensionamento do paralama.

4.3 SIMULAÇÃO DE PREENCHIMENTO DAS CAVIDADES DOS PARALAMAS

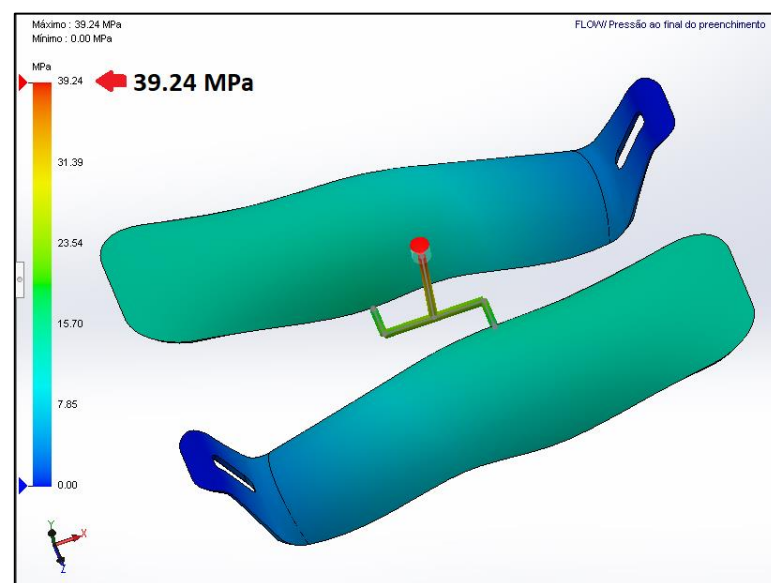
A simulação de preenchimento das cavidades com o sistema de alimentação foi executado em *software* CAE. De acordo com o assistente de resultados da simulação, a peça pode ser preenchida com êxito a uma pressão de injeção de 39,2 MPa (5.692,36 psi). A

temperatura máxima ao final do preenchimento permaneceu em 10 °C a partir da temperatura do fundido, informando que existe pouco ou nenhum risco de degradação do material plástico.

4.3.1 Pressão e Tempo de Preenchimento

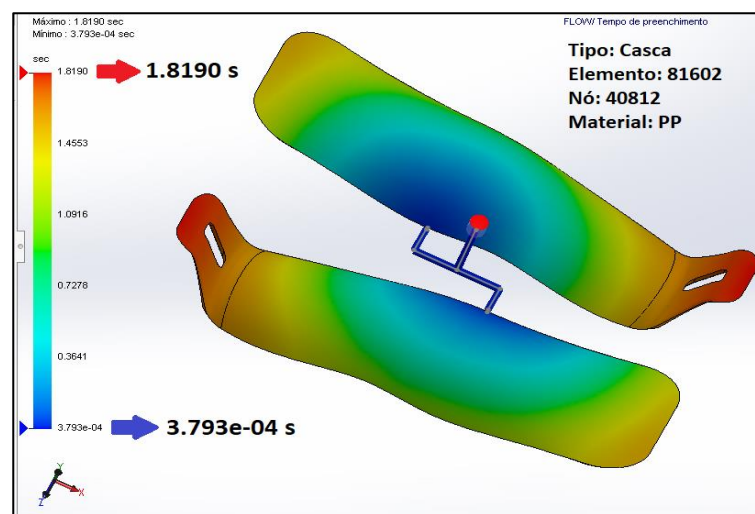
Essa nova simulação resultou em um aumento da pressão, e, consequentemente, na redução do tempo de preenchimento das cavidades do molde. A Figura 31 e 32 ilustram os resultados obtidos.

Figura 31 – Pressão ao final do preenchimento das cavidades



Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

Figura 32 – Tempo de preenchimento das cavidades do paralamas



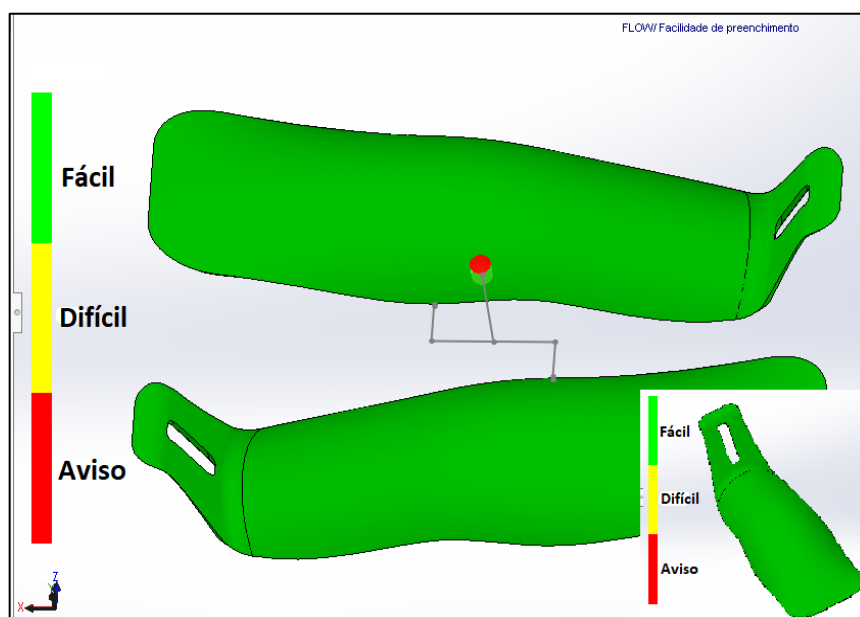
Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

A Figura 31 mostra que, a pressão no final do preenchimento proporciona uma distribuição homogênea da pressão em toda a cavidade, contribuindo de maneira positiva para o projeto do paralamas, melhorando o efeito das pressões de embalagem e do arrefecimento em toda a peça moldada.

A Figura 32 mostra o padrão de preenchimento e possibilita constatar que, o preenchimento ocorre do centro (cor azul) para a extremidade (cor vermelha), localizada em cada canto da peça. Uma vez que o tempo de preenchimento é uma função do comprimento do fluxo, os cantos mais afastados do local da injeção são os últimos a serem preenchidos. A escala de cores localizada à esquerda da peça indica o tempo que leva para a frente de fluxo chegar a uma determinada região da cavidade.

A simulação também possibilitou averiguar a facilidade de preenchimento das peças. Os resultados estão ilustrados na Fig. 33.

Figura 33 – Facilidade de preenchimento das cavidades do paralamas



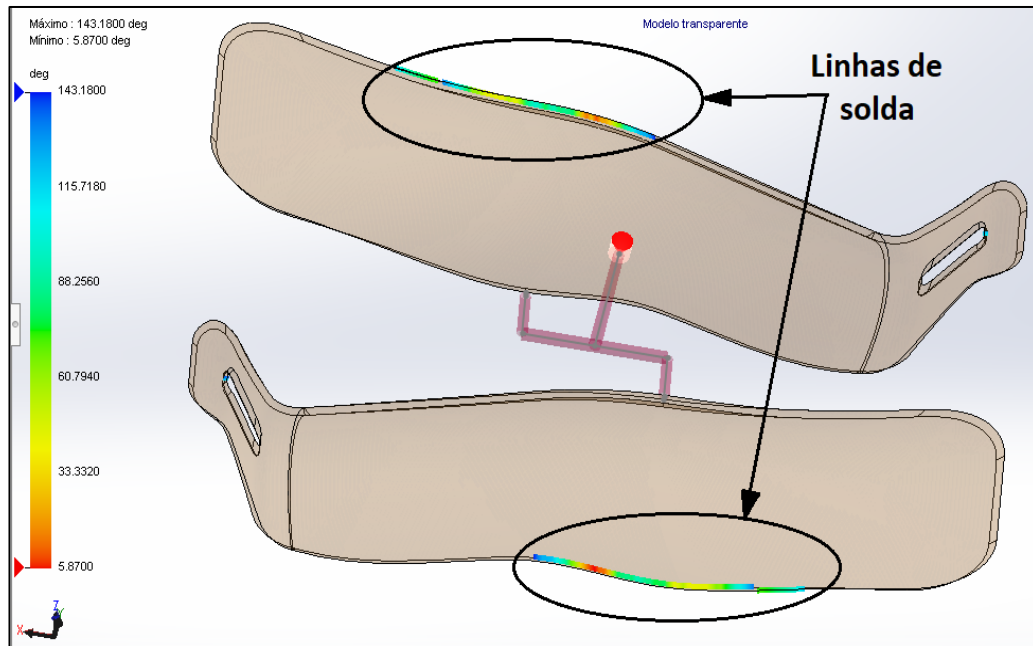
Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

Na Figura 33, as regiões verdes indicam as áreas que podem ser preenchidas em condições normais de pressão da injeção; as regiões amarelas indicam as áreas onde a pressão de injeção ultrapassa 70% da pressão máxima da máquina; os locais em vermelho, por outro lado, referem-se às áreas onde a pressão de injeção ultrapassa 85% da pressão máxima. Dessa forma, pode-se concluir que, as cavidades dos paralamas são de fácil preenchimento, validado também pela análise individual do produto, mostrado no canto direito inferior da Fig. 33.

4.3.2 Linhas de Solda

As linhas de solda ou linhas de junção de fluxo também foram analisadas. Elas são criadas quando dois ou mais caminhos do fluxo se encontram durante o processo de enchimento. A Figura 34 mostra as regiões de possíveis linhas de soldas.

Figura 34 – Vista da plotagem das linhas de solda



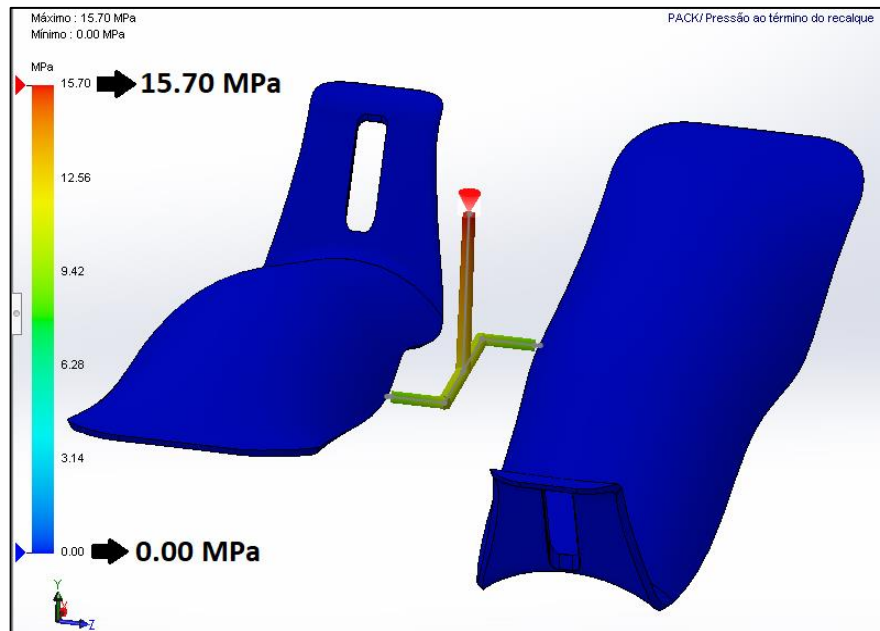
Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

O resultado obtido e apresentado na Fig. 34 possibilitou identificar dois locais de linhas de solda. Apesar de não ser possível eliminar essas linhas, de modo que fiquem em áreas menos críticas da peça quanto à qualidade ou aparência, pode-se minimizá-las variando-se a pressão, temperatura, localização ou até mesmo a dimensão das entradas de injeção. Em demasia, são visualmente inaceitáveis, pois são pontos de baixa resistência, que agem como concentradores de tensões, propiciando o início ou a propagação de trincas (HARADA 2004).

4.3.3 Recalque

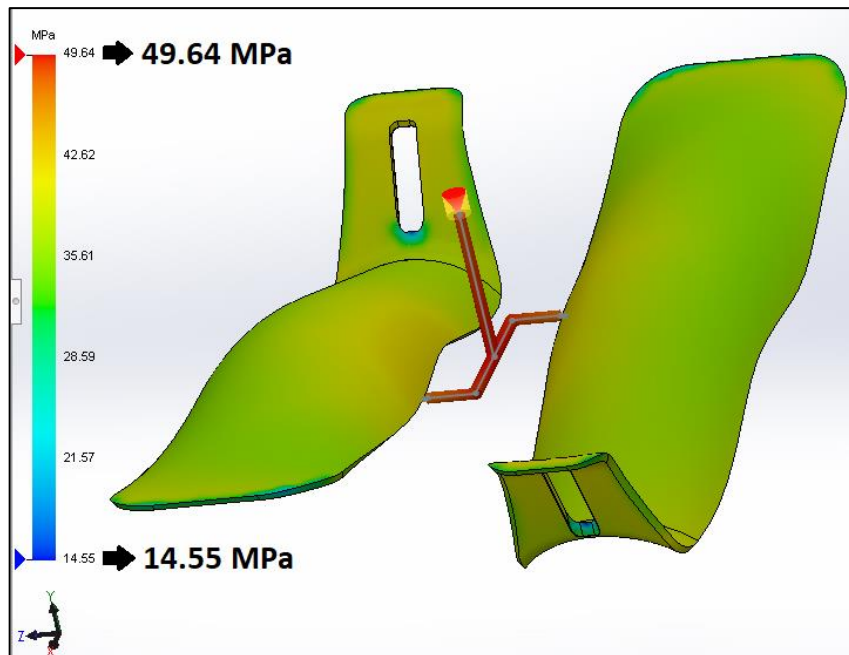
Após o preenchimento das cavidades da peça, o sistema foi analisado e os resultados encontram-se nas Fig. 35, 36 e 37.

Figura 35 – Pressão ao término de recalque nas cavidades do paralama



Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

Figura 36 – Vista da tensão residual na extremidade pós-preenchimento

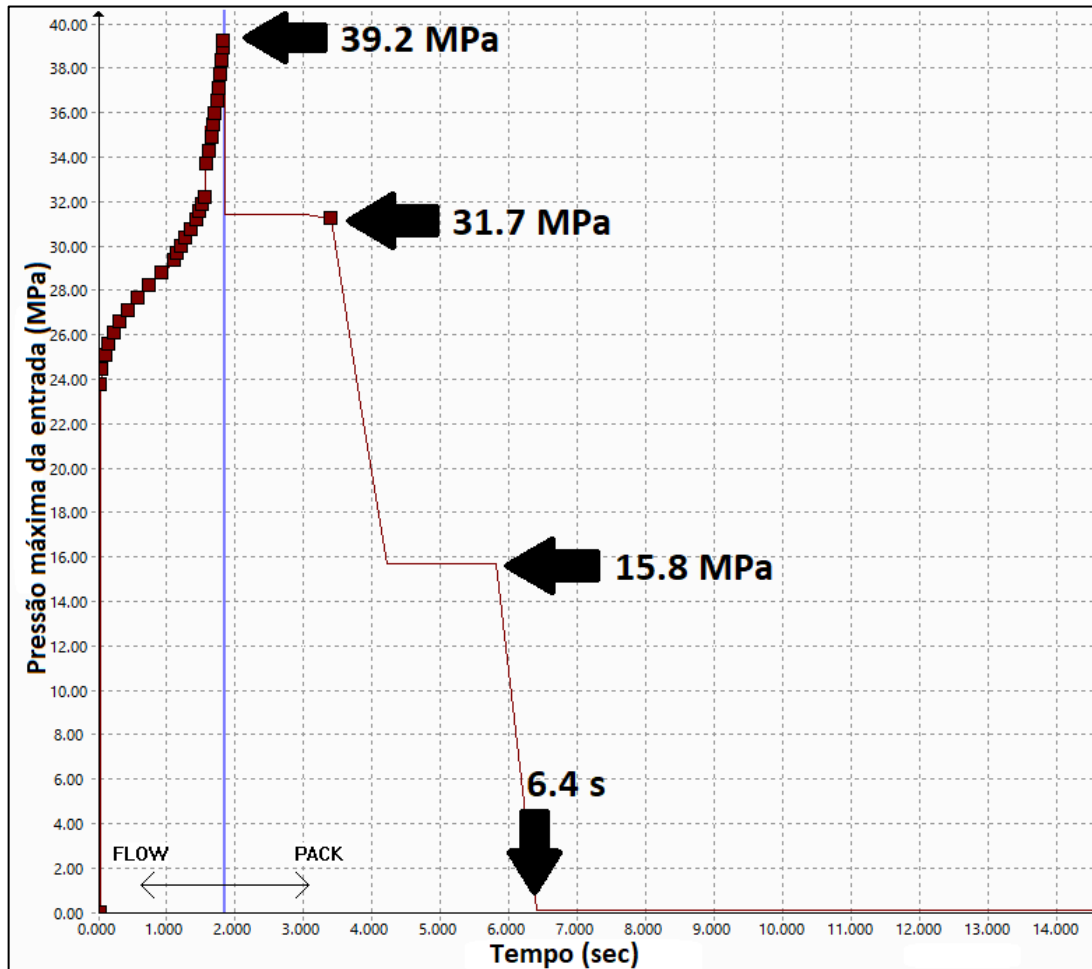


Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

Na Fig. 35, é possível verificar uma queda de pressão, distribuída ao longo do comprimento do fluxo, também mostrada na Fig. 36 e Fig. 37. Para as cavidades analisadas, altas pressões são necessárias, devido à espessura da parede das peças, pois a resistência do fluxo é maior através de uma área transversal mais fina. Se a pressão não for a definida pelo

projeto, o produto pode apresentar defeitos de superfícies, tais como marcas de dissipação, problemas no fluxo de preenchimento, e, possivelmente, a presença de vazios.

Figura 37 – Pressão máxima de entrada em função do tempo de preenchimento e recalque



Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

A Figura 36 demonstra que o polipropileno é exposto a tensões térmicas e físicas. Essas tensões residuais são forças travadas no interior do plástico à medida que ele resfria no estado derretido por meio da temperatura de transição vítrea. Tais tensões residuais são resultadas da falta de uniformidade de resfriamento, como também de variações de pressão que ocorrem no polímero viscoelástico durante o processo de injeção. Esse resultado mostrou que as tensões residuais estão em níveis aceitáveis; em níveis elevados, o produto pode fraturar ou sofrer outras alterações físicas depois do processo de moldagem.

Dessa forma, pode-se aferir que, o recalque é a fase do processo decisiva para a qualidade do produto. Portanto, essa etapa deve ser realizada com cuidado e conhecimento, para que seja possível melhorar o aspecto visual, controlar o dimensionamento, reduzir as

tensões e peso das peças, reduzir os tempos de ciclo e esforços da máquina, evitando a ocorrência de danos nas cavidades do molde, e, conseqüentemente, elevando a produtividade.

4.4 PARÂMETROS GERAIS DA INJEÇÃO DO MOLDE

A Tabela 5 mostra os principais parâmetros obtidos na simulação de injeção e recalque das cavidades do molde.

Tabela 5 – Parâmetros obtidos na simulação de injeção e recalque

Força de fechamento X-dir.	4,1200 Toneladas
Força de fechamento Y-dir.	23,7400 Toneladas
Força de fechamento Z-dir.	11,8900 Toneladas
Pressão de injeção obrigatória	39,2400 MPa
Temperatura máxima central	230,7900 °C
Temperatura máxima média	209,4500 °C
Máxima temperatura volumétrica	232,0200 °C
Tensão máxima de cisalhamento	0,3600 MPa
Taxa de cisalhamento máxima	184565,3100 1/segundo
Tempo de resfriamento perfeito médio	11,0500 segundos
Tempo de CPU	1617,66 segundos
Tempo de ciclo	28,82 segundos
1.Tempo de preenchimento	1,82 segundos
2.Tempo total no estágio de recalque	22,00 segundos
a) Tempo de manutenção da pressão	3.93 segundos
b)Tempo de resfriamento puro	18,07 segundos
3.Tempo de abertura do molde	5,00 segundos

Fonte: Produzido pelo Autor, 2019.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizado uma parte do projeto informacional e conceitual de moldes aplicado à injeção dos paralamas dianteiro e traseiro de uma bicicleta infantil, sendo definido um modelo único de paralama. Este projeto cumpre seu objetivo geral em partes, devido à sua complexidade de execução. Apesar dos bons resultados preliminares obtidos, espera-se realizar também análises computacionais referentes à refrigeração e saída de gases, pois são de extrema importância no projeto de moldes.

A partir dos resultados e discussões, pôde-se concluir que o modelo de paralama selecionado atende de modo satisfatório ao projeto. O protótipo impresso em 3D foi testado em uma bicicleta infantil, e, apesar da peça ser simples, tem uma aparência diferenciada quando comparado com os modelos infantis no mercado lojista. Somado a isso, as dimensões do produto estão convenientes e harmônicas com o perfil da bicicleta. Após esse teste, foi detectado a necessidade de uma pequena inclinação do produto, para melhor tolerância no posicionamento da parte dianteira da bicicleta entre o paralama e o pneu. Outra análise relevante foi a superfície do paralama, pois o produto é separável em matriz e macho, que o facilita na extração.

As análises do produto e do sistema de alimentação, por meio de simulações em *software* CAE, evidenciaram a presença de possíveis defeitos na peça, como rechupes, rebarbas e empenamento. Além disso, ajudaram na definição dos parâmetros de injeção, permitindo um maior controle e redução de custo do molde, e, até mesmo, uma possível melhora na produção. Não ocorreu estudos orçamentários, mas é incontestável o gasto com retrabalho do molde, o que implica em custos elevados. Essas análises também alertaram para a implementação dos sistemas de refrigeração e saída de gases, para uma validação mais eficiente do projeto.

Ainda no sistema de alimentação, ele foi dimensionado conforme o canal de injeção e de distribuição, conceitos aprendidos a partir do estudo das referências bibliográficas e da experiência de profissionais na área. Dessa forma, o sistema foi projetado sobre um conjunto de 2 paralamas injetados no mesmo molde, visando um balanceamento uniforme do preenchimento das cavidades, bem como economia no processo e redução de desperdício, impedindo prováveis retrabalhos.

Dentre as principais dificuldades encontradas ao longo desse trabalho, destaca-se a escassez de modelos práticos e a falta de experiência na injeção de termoplásticos, uma vez que, na literatura, não há um consenso quanto às etapas necessárias para se projetar um molde. Ainda que se encontre diversos trabalhos acadêmicos, bastantes úteis no projeto do

molde, eles não apresentavam um sequenciamento uniforme, gerando, em alguns momentos, dúvidas pertinentes ao processo de moldagem. Todavia, o trabalho foi desenvolvido com base no conhecimento teórico obtido em apostilhas e livros de injeção polimérica, e nas orientações de profissionais na área de fabricação de moldes.

Por fim, os conhecimentos adquiridos sobre o projeto de moldes contribuíram para a compreensão de muitos aspectos do processo de produtos plásticos injetados, como, por exemplo: estética do produto, preenchimento do molde, dimensionamento do sistema de alimentação, engenharia de produto, entre outros. Ademais, o trabalho colabora diretamente na formação profissional do estudante, como futuro engenheiro mecânico, devido à abrangência de conceitos técnicos e práticos obtidos, que podem ser aplicados na indústria moderna.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de dar prosseguimento a este projeto, almeja-se, como trabalhos futuros:

1) Realizar uma aplicabilidade integral do paralama – apresentar o projeto informacional do componente a uma indústria de bicicleta que compre a ideia, para, então, executar o desenvolvimento completo do molde (projeto, documentação do projeto e fabricação do molde).

2) Avaliar o sistema de refrigeração no molde do paralama – propor um sistema de melhor eficiência, objetivando redução no tempo de resfriamento, bem como analisar os parâmetros de injeção, verificar a influência dos canais de alimentação e avaliar os distintos tempos de ciclos para diferentes termoplásticos.

3) Estabelecer estimativas de custo do molde do projeto – traçar estimativas de custos relacionados com o projeto e execução do sistema refrigeração de um molde, por intermédio de ferramentas computacionais, avaliando a viabilidade do projeto.

4) Analisar a influência de outros parâmetros no processo de moldagem – investigar parâmetros como: velocidade de injeção, pressão e tempo de fechamento, com o intuito de verificar a qualidade do produto, e aumentar a produtividade e eficiência do processo.

5) Dimensionar sistemas de extração e saída de gases – para uma avaliação mais completa e eficaz do projeto do molde.

6) Elaborar o plano de usinagem do molde do paralama da bicicleta – relatar detalhadamente o processo de fabricação do molde projetado, como, por exemplo, os

componentes do porta molde, evidenciando todos os parâmetros de usinagem dos maquinários utilizados.

REFERÊNCIAS

AHRENS, C. H.; FERREIRA, C.; SALMORIA, G.; VOLPATO, N.; LAFRATTA, F. H.; FOGGATTO, J. A. 2002. **Estudo da estrutura e propriedades de peças de PP moldados por injeção em ferramentas de prototipagem**. Natal-RN. In: Anais do CBECIMAT 2002, CD-ROM.

ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico. Perfil 2017 da Indústria Brasileira de Transformação de Material Plástico. <<https://afinkopolimeros.com.br/6-plasticos-mais-consumidos-em-2017>> Acesso em: 28 out. de 2009.

BRITO, A. M.; ARAÚJO, B.; SOUSA, R.; PONTES, A. J. **Manual do Projectista para Moldes de Injeção de Plásticos**: Sistema de Extração Marina Grande, Centimfe, 2003.

CENTIMFE – Centro Tecnológica da Indústria de Moldes Ferramentas Especiais e Plásticos. **Manual do Projectista para Moldes de Injeção de Plástico**. Marinha Grande: Centimfe, 2003.

CANEVAROLO, S.V.Jr., **Ciências dos polímeros – Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros**, 2ª edição., Editora Artliber Ltda, São Paulo, 2002.

DIAS, K. P. **Proposta de um modelo para a gestão do conhecimento no projeto de moldes de injeção**. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

FELTRE, R. **Química: Química orgânica**. V.3, 6ª edição., São Paulo: Moderna, 2004.

HARADA, J., **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos**. São Paulo, Artliber Editora, 2004.

INNOVA. **Manual de Injeção**. 2008 <<https://innova.com.br/wp-content/uploads/2019/06/manual-de-injecao.pdf>> Acesso em: 28 out. de 2009.

JONES, P. **The Mould Design Guide**. Smithers Rapra Technology Limited: United Kingdom Published, 2008.

LIMA, M.A.M. **Introdução aos materiais e processos para designers**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2006.

MANRICH, Silvio. **Processamento de termoplásticos**. 1ª edição., São Paulo: Artliber Editora, 2005. 431 p.

MANO, E. B.; MENDES, L. C., **Introdução a polímeros**. 2ª edição., Revisada e Ampliada. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2004.

MENGES, G., MOHREN, P. **How to make injection molds**. 2ª ed. Munich: Hanser, 1993.

MAIA, Miguel José dos Santos, **Projecto de molde para peça para a indústria automóvel**. 2014. 278 f. Tese de mestrado (Departamento de Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal.

PINTO, S. U. **Avaliação de Critérios para a Determinação de Contra tipos de Termoplásticos aplicável em Simulação da Moldagem por Injeção**. CEPGEM – UFSC, Florianópolis, 2002. 132p.

PROVENZA, F.; **Moldes para plásticos**. São Paulo: F. Provenza, 1993.

POLIMOLD, **Catálogo de Porta Moldes de 2 placas**, disponível, em: www.polimold.com.br, acessado em: 17/11/2019.

SILVA, S. L., **Sistemática para o Projeto do Sistema de Refrigeração de Moldes para Injeção de Polímeros**. 136 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2009.

SACCHELLI, C. M. **Sistematização do processo de desenvolvimento integrado de moldes de injeção de termoplásticos**. 284 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SILVA, A. L. B. B.; SILVA, E. O. da. **Conhecendo materiais poliméricos**, 2003. Disponível em: <<http://www.unisalesiano.edu.br/biblioteca/monografias/56278.pdf>>. Acesso em: 28 out. de 2019.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5ª edição., Rio de Janeiro: Mcgraw Hill Brasil, 2012.

SORS, László; BARDÓCZ, László; RADNÓTI, István. **Plásticos: Moldes e matrizes**. Budapeste: Hemus, 2002.

SANTOS, Luís Umbelino dos. **Modelo e processo de desenvolvimento integrado de moldes para injeção de termoplásticos**. 167f. Dissertação de Mestrado Profissional em Produção – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2015.

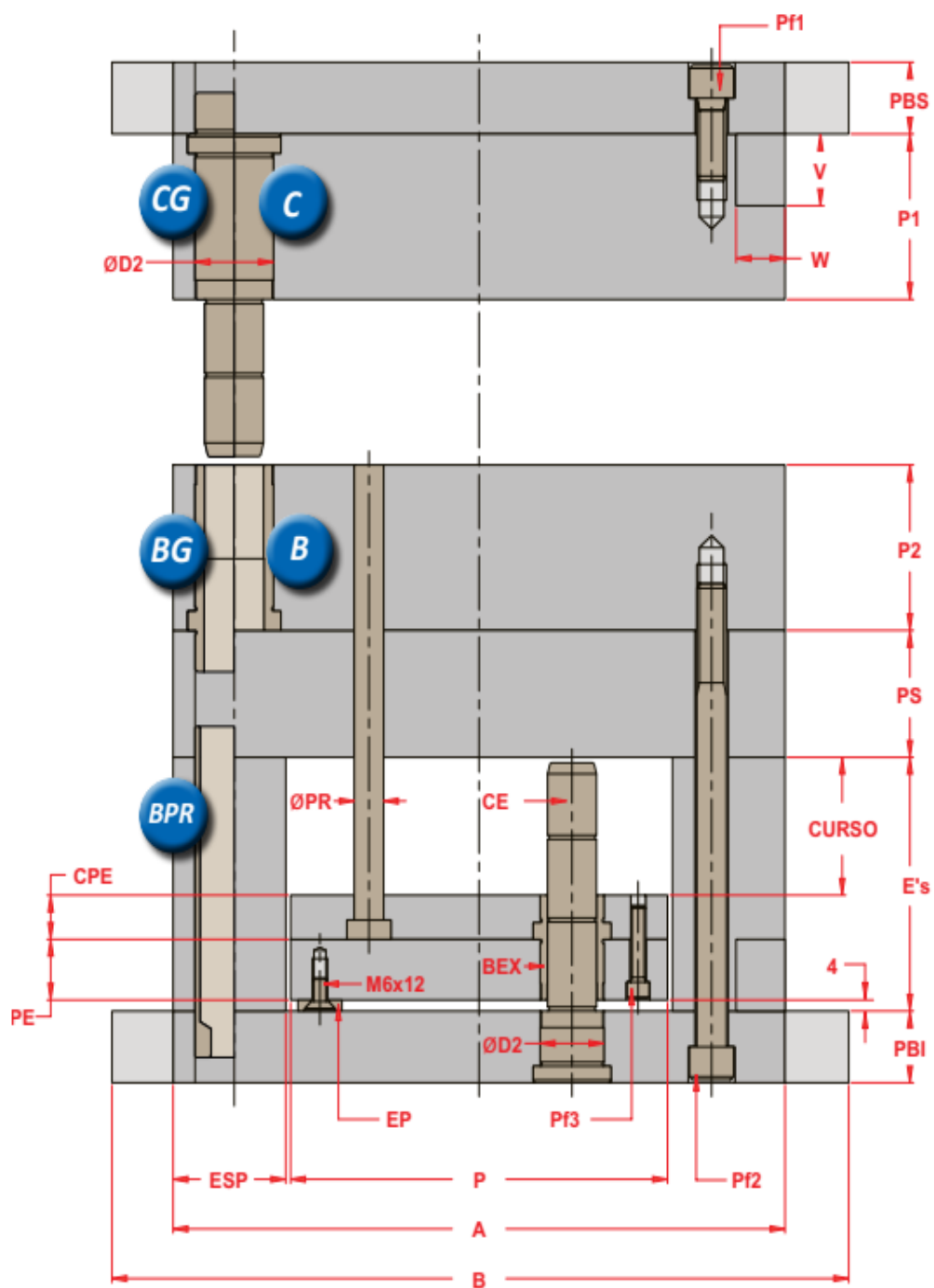
SENAI-SP. **Ferramenteiro de moldes plásticos**. Tecnologia aplicada I. São Paulo, 2011.

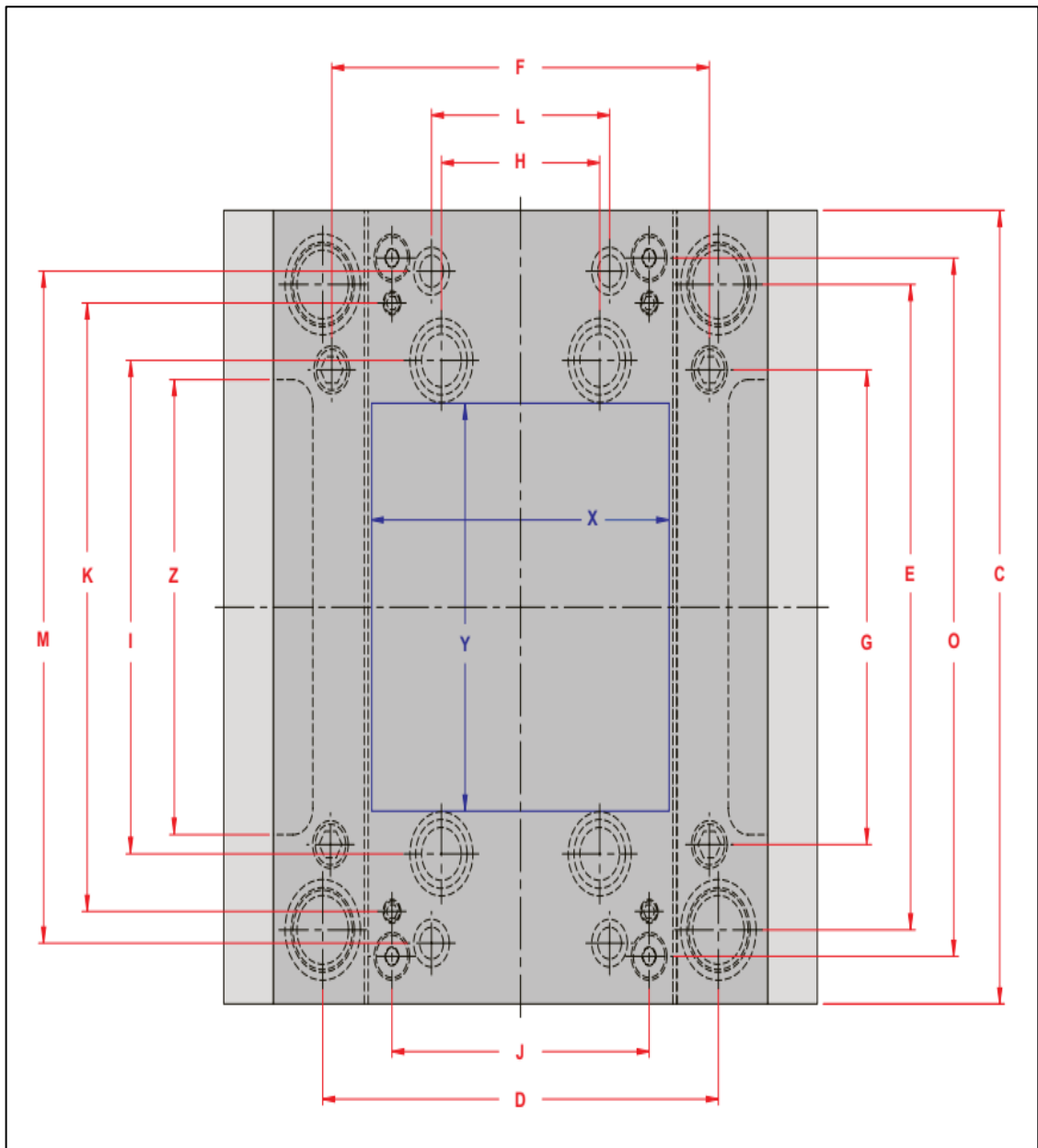
TONOLLI, E. J. Jr. **Ambiente colaborativo para o apoio ao desenvolvimento de moldes para injeção de plásticos**. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

“Materiais plásticos/Injeção e ajustes de máquinas,” Disponível em: <http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/art28.asp>. Acesso: 18 Nov 2019.

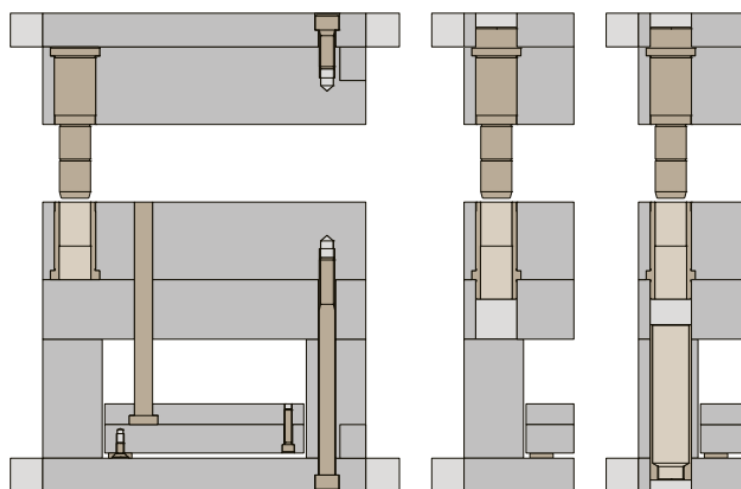
ANEXOS

Anexo A – Catálogo de Porta Moldes de 2 Placas - Polimold

Vistas Com Dimensões



Opções na Montagem 6



6A

6B

6C

Séries e Dimensões

polimold
A única que você confia.

Série	Molde	Dimensões de Placas											
		Comprimento - Largura				Área Útil		Espessura das Placas					
		A	B	C	P	X	Y	PBS	PS	ESP	CPE	PE	PBI
15.15	156 156	156,0	206,0	156,0	90,0	88,0	42,0	22,0	27,0	32,0	9,0	17,0	22,0
15.20	156 196	156,0	206,0	196,0	90,0	88,0	82,0	22,0	27,0	32,0	9,0	17,0	22,0
15.25	156 246	156,0	196,0	246,0	90,0	88,0	132,0	22,0	27,0	32,0	9,0	17,0	22,0
20.20	196 196	196,0	246,0	196,0	118,0	116,0	72,0	22,0	27,0	38,0	12,0	17,0	22,0
20.25	196 246	196,0	246,0	246,0	108,0	106,0	122,0	27,0	36,0	43,0	12,0	17,0	27,0
20.30	196 296	196,0	246,0	296,0	108,0	106,0	160,0	27,0	36,0	43,0	12,0	17,0	27,0
20.35	196 346	196,0	246,0	346,0	108,0	106,0	210,0	27,0	36,0	43,0	12,0	17,0	27,0
20.40	196 396	196,0	246,0	396,0	108,0	106,0	260,0	36,0	36,0	43,0	17,0	22,0	36,0
25.25	246 246	246,0	296,0	246,0	158,0	156,0	96,0	27,0	36,0	43,0	12,0	17,0	27,0
25.30	246 296	246,0	296,0	296,0	158,0	156,0	146,0	27,0	36,0	43,0	12,0	17,0	27,0
25.35	246 346	246,0	296,0	346,0	158,0	156,0	196,0	27,0	46,0	43,0	17,0	22,0	27,0
25.40	246 396	246,0	296,0	396,0	150,0	148,0	246,0	36,0	46,0	47,0	17,0	22,0	36,0
25.45	246 446	246,0	296,0	446,0	158,0	156,0	296,0	36,0	46,0	43,0	17,0	22,0	36,0
25.50	246 496	246,0	296,0	496,0	158,0	156,0	346,0	36,0	46,0	43,0	17,0	22,0	36,0
30.30	296 296	296,0	346,0	296,0	208,0	206,0	146,0	27,0	46,0	43,0	12,0	17,0	27,0
30.35	296 346	296,0	346,0	346,0	208,0	206,0	196,0	36,0	46,0	43,0	17,0	22,0	36,0
30.40	296 396	296,0	346,0	396,0	200,0	198,0	246,0	36,0	46,0	47,0	17,0	22,0	36,0
30.45	296 446	296,0	346,0	446,0	208,0	206,0	296,0	36,0	46,0	43,0	17,0	22,0	36,0
30.50	296 496	296,0	346,0	496,0	208,0	206,0	346,0	36,0	46,0	43,0	17,0	22,0	36,0
35.35	346 346	346,0	396,0	346,0	258,0	256,0	196,0	36,0	46,0	43,0	17,0	22,0	36,0

Sub-Séries e Cursos de Extração

polimold
A única que você confia.

Sub-Série	de 156x156 a 156x246		de 196x196 a 346x346		de 346x396 a 396x596		de 446x446 a 496x696		de 496x796 a 696x996	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
1	22	22	27	27	36	36	36	36	56	56
2	22	27	27	36	36	46	36	46	56	66
3	22	36	27	46	36	56	36	56	56	76
4	22	46	27	56	36	66	36	66	56	96
5	22	56	27	66	36	76	36	76	56	116
6	22	66	27	76	36	96	36	96	56	136
7	27	22	27	96	36	116	36	116	56	156
8	27	27	36	27	46	36	36	136	56	196
9	27	36	36	36	46	46	46	36	66	56
10	27	46	36	46	46	56	46	46	66	66
11	27	56	36	56	46	66	46	56	66	76
12	27	66	36	66	46	76	46	66	66	96
13	36	22	36	76	46	96	46	76	66	116
14	36	27	36	96	46	116	46	96	66	136
15	36	36	46	27	56	36	46	116	66	156
16	36	46	46	36	56	46	46	136	66	196
17	36	56	46	46	56	56	56	36	76	56
18	36	66	46	56	56	66	56	46	76	66
19	46	22	46	66	56	76	56	56	76	76
20	46	27	46	76	56	96	56	66	76	96
21	46	36	46	96	56	116	56	76	76	116
22	46	46	56	27	66	36	56	96	76	136

Série	Molde	Curso 1		Curso 2		Curso 3	
		Curso	Altura "E's"	Curso	Altura "E's"	Cursos	Altura "E's"
15.15	156 156	16	46	26	56	46	76
15.20	156 196	16	46	26	56	46	76
15.25	156 246	16	46	26	56	46	76
20.20	196 196	13	46	23	56	43	76
20.25	196 246	13	46	23	56	43	76
20.30	196 296	23	56	43	76	63	96
20.35	196 346	23	56	43	76	63	96
20.40	196 396	13	56	33	76	53	96
25.25	246 246	23	56	43	76	63	96
25.30	246 296	23	56	43	76	63	96
25.35	246 346	13	56	33	76	53	96
25.40	246 396	13	56	33	76	53	96
25.45	246 446	13	56	33	76	53	96
25.50	246 496	13	56	33	76	53	96
30.30	296 296	23	56	43	76	63	96
30.35	296 346	13	56	33	76	53	96
30.40	296 396	13	56	33	76	53	96
30.45	296 446	13	56	33	76	53	96
30.50	296 496	13	56	33	76	53	96
35.35	346 346	13	56	33	76	53	96

Sub-Séries e Cursos de Extração

polimold
A única que você confia.

Sub-Série	de 156x156 a 156x246		de 196x196 a 346x346		de 346x396 a 396x596		de 446x446 a 496x696		de 496x796 a 696x996	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
1	22	22	27	27	36	36	36	36	56	56
2	22	27	27	36	36	46	36	46	56	66
3	22	36	27	46	36	56	36	56	56	76
4	22	46	27	56	36	66	36	66	56	96
5	22	56	27	66	36	76	36	76	56	116
6	22	66	27	76	36	96	36	96	56	136
7	27	22	27	96	36	116	36	116	56	156
8	27	27	36	27	46	36	36	136	56	196
9	27	36	36	36	46	46	46	36	66	56
10	27	46	36	46	46	56	46	46	66	66
11	27	56	36	56	46	66	46	56	66	76
12	27	66	36	66	46	76	46	66	66	96
13	36	22	36	76	46	96	46	76	66	116
14	36	27	36	96	46	116	46	96	66	136
15	36	36	46	27	56	36	46	116	66	156
16	36	46	46	36	56	46	46	136	66	196
17	36	56	46	46	56	56	56	36	76	56
18	36	66	46	56	56	66	56	46	76	66
19	46	22	46	66	56	76	56	56	76	76
20	46	27	46	76	56	96	56	66	76	96
21	46	36	46	96	56	116	56	76	76	116
22	46	46	56	27	66	36	56	96	76	136

Série	Molde	Curso 1		Curso 2		Curso 3	
		Curso	Altura "E's"	Curso	Altura "E's"	Cursos	Altura "E's"
15.15	156 156	16	46	26	56	46	76
15.20	156 196	16	46	26	56	46	76
15.25	156 246	16	46	26	56	46	76
20.20	196 196	13	46	23	56	43	76
20.25	196 246	13	46	23	56	43	76
20.30	196 296	23	56	43	76	63	96
20.35	196 346	23	56	43	76	63	96
20.40	196 396	13	56	33	76	53	96
25.25	246 246	23	56	43	76	63	96
25.30	246 296	23	56	43	76	63	96
25.35	246 346	13	56	33	76	53	96
25.40	246 396	13	56	33	76	53	96
25.45	246 446	13	56	33	76	53	96
25.50	246 496	13	56	33	76	53	96
30.30	296 296	23	56	43	76	63	96
30.35	296 346	13	56	33	76	53	96
30.40	296 396	13	56	33	76	53	96
30.45	296 446	13	56	33	76	53	96
30.50	296 496	13	56	33	76	53	96
35.35	346 346	13	56	33	76	53	96