

ESTUDO REOLÓGICO DO PROCESSO DE INJEÇÃO EM MOLDES DE INJEÇÃO COM O USO DE FERRAMENTAS CAE

Letícia Vasconcelos

levasconcelos95@gmail.com

João Victor Dalla Costa Radomski

joaotito04@gmail.com

Carlos M. Sacchelli

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Centro Tecnológico de Joinville - CTJ

carlos.sacchelli@gmail.com

Resumo: Os componentes obtidos pelo processo de injeção cada vez mais ocupam lugar de destaque, principalmente na indústria automotiva devido a grande contribuição para a redução do peso total dos veículos. Para se obter um componente plástico é necessário um molde e máquina de injeção, sendo importante controlar diversos parâmetros como temperatura, pressão e contra pressão. Muitos destes parâmetros alteram conforme o material e a forma geométrica do componente injetado. Desta maneira, é recomendável a utilização de ferramentas para auxiliar o projetista na tomada de decisão em relação ao projeto do molde, assim, o objetivo principal deste trabalho é analisar a utilização da simulação CAE (Computer Aided Engineering) em projetos de molde de injeção. Para isso será realizada a simulação dos componentes injetados utilizando o software MoldFlow®. Como conclusão principal, tem-se que a utilização de uma ferramenta computacional pode auxiliar o projetista para a melhor performance do molde, como também o transformador que irá ajustar os parâmetros de processo de injeção na máquina.

Palavras-chave: Moldes de injeção; MoldFlow®; Simulação.

1. INTRODUÇÃO

A indústria brasileira de transformação de polímeros obteve faturamento de R\$ 90,8 bilhões, produzindo 7,3 milhões de toneladas de transformados plásticos, sendo 44% produzido pelo processo de injeção, apresentado pelo relatório anual da Associação Brasileira da Indústria do Plástico - ABIPLAST - de 2021. O mercado mundial de moldagem por injeção de plástico deve apresentar crescimento consistente até 2024, estima-se que o mercado seja avaliado em cerca de 345 bilhões de dólares. De acordo com Iyer (2019), um dos principais setores que contribuem para esse crescimento é o setor automotivo, fortemente impulsionado pelo objetivo de deixar os veículos mais leves, melhorando sua eficiência energética e também nos veículos elétricos, que em 2019 teve um crescimento de 63%.

Nas últimas décadas, os componentes injetados evoluíram em tamanho e complexidade contando com alta resistência e baixo peso, assim necessitando de uma injeção de alta eficiência. Para se atingir qualidade e rapidez atuais nos processos de injeção, houve avanço tanto nos processos quanto nas máquinas injetoras, ampliando a capacidade de injeção e a velocidade dos ciclos. Os moldes utilizados são cada vez mais resistentes, fabricados de materiais específicos para cada aplicação, em muitos casos com canais quentes e componentes padronizados, como aponta Harada (2004). Segundo Silva (2021) o aço é a principal matéria-prima dos moldes de injeção, incentivando empresas fornecedoras de moldes a investirem em pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias, como os “aços modificados” que são aços desenvolvidos para a obtenção de melhores resultados em dureza, textura ou polimento.

De acordo com Sacchelli (2007), somente após a finalização do desenvolvimento do molde, o mesmo passa por testes onde são detectadas falhas na produção do componente injetado, tais como os pontos de injeção mal localizados, defeitos decorrentes da refrigeração deficiente do molde, não preenchimento total das cavidades, degradação do material, linhas de solda e de junção visíveis ou deficitárias, e também bolhas de ar.

Para Anna (2008), um dos principais pontos desse avanço e solução para os problemas apontados por Sacchelli (2007), foram a implantação de softwares CAD (Computer-Aided Design), CAM (Computer-Aided Manufacturing) e CAE (Computer Aided Engineering), ferramentas que auxiliam em todas as etapas de processamento de um componente plástico, visando obter produto final com maior qualidade em menor tempo. Dentre esses sistemas Sahputra (2007), destaca as ferramentas CAE, que são softwares de simulação que predizem a interação entre o design do produto e o molde, reduzindo tempo de desenvolvimento, permitindo otimizar tolerâncias dimensionais das peças.

Conforme Sacchelli (2007) a utilização de softwares para a simulação do processo de injeção apresenta um menor custo em relação a efetivação de testes práticos com o mesmo fim, podendo ser utilizado na criação de produtos novos e na melhoria de produtos já disponíveis. Desta maneira, o objetivo principal deste trabalho é analisar a utilização da simulação CAE (Computer Aided Engineering) em projetos de molde de injeção.

2. MOLDES DE INJEÇÃO

De acordo com Gava (2020) o molde é uma das partes principais na indústria de injeção, sem o seu funcionamento correto, o componente injetado pode ser de baixa qualidade e desta maneira sofrer uma rejeição do mercado consumidor. O molde de injeção é constituído de um conjunto fixo e outro móvel, podendo possuir uma ou mais cavidades que dão forma ao produto, como mostrado na “Fig. 1”.

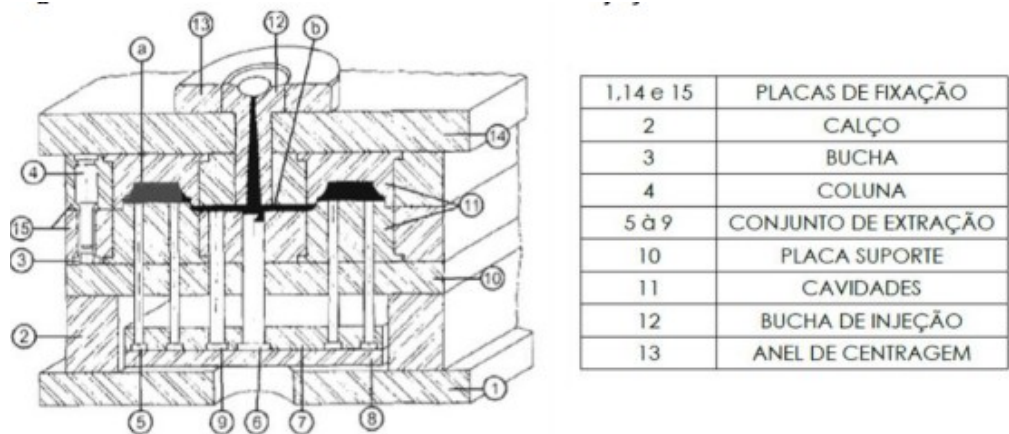


Figura 1. Estrutura Básica de um molde de injeção (Harada, 2004)

O processo de injeção inicia com a alimentação do polímero na máquina injetora através de um funil de alimentação e movimentado por uma rosca sem fim, onde é aquecido até a sua temperatura de fusão, sob pressão o polímero se desloca pelo canal de injeção do molde, até preencher toda a cavidade, após o produto ser moldado ocorre a etapa de resfriamento da peça, em que o material injetado solidifica. O molde é então aberto e os pinos extratores são ativados, sendo o produto extraído do molde, por fim o molde é fechado e está pronto para novamente ser realizado o próximo ciclo.

Rodrigues (2018) comenta que para os vários segmentos das engenharias há programas computacionais que representam a fenomenologia real com o intuito de prever quais as possíveis problemáticas ou até prováveis soluções para as mesmas. Na indústria de sistemas CAE há vários softwares voltados para a indústria de injeção de polímeros, entre esses, um dos mais utilizado é o *Moldflow*®.

Conforme Rodrigues (2018) este CAE permite ao usuário a utilização de várias ferramentas para injeção, para produtos com as mais diversas geometrias, o software também possibilita configurar informações colocadas em uma máquina injetora, além de possibilitar selecionar o material polimérico de escolha do usuário, podendo utilizar as informações disponíveis em sua base de dados ou adicionar manualmente as características do material. Ainda apresenta uma galeria de recursos para simulação como opções de enchimento, resfriamento, compactação, empenamento, resfriamento, entre outras.

Rodrigues (2018) ainda relata que os programas para simulação de eventos reais exigem a discretização do conjunto de estudo, sendo necessário uma malha de elementos finitos. O *Moldflow*® possibilita usar 3 tipos de malhas com elementos, sendo: *Midplane*, *Dual Domain* e *3D*, como mostrado na “Fig. 2”.

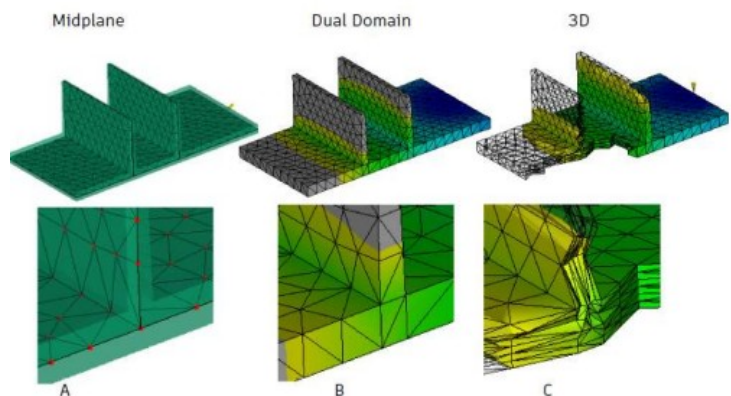


Figura 2. Tipos de malhas disponibilizadas pelo Moldflow® (Vaz, 2018)

3. SIMULAÇÃO DE INJEÇÃO

A simulação como comentado anteriormente, pode informar o projetista dados que auxiliam nas tomadas de decisões, como verificar a variação da pressão de injeção com a espessura do produto, locais de saída de ar, melhores pontos de injeção, dentre outros. Para demonstrar esta situação foi utilizado o sistema CAE denominado *Autodesk Moldflow® Synergy 2014*. O produto analisado foi uma placa que representa a área útil de porta moldes de uma empresa deste setor. Como parâmetros de variação foram empregadas as espessuras de 1,5, 3 e 5 mm para cada série pré definida.

Nesse estudo foi utilizado como padrão o material polimérico ABS Terluran GP-22 fornecido pela BASF, os parâmetros de processamento do material foram definidos conforme a biblioteca *MoldFlow®*. A malha escolhida foi a Dual Domain e como comprimento de aresta global na superfície foi utilizado o valor de 2,79 mm (valor este informado automaticamente pelo CAE baseado na geometria do componente). Para verificação deste parâmetro, foram realizadas cinco simulações iniciais, utilizando a área útil maior do molde da série de porta moldes 15.15, com 1,5 mm de espessura da placa. Os valores de comprimento da malha a serem testados foram 2 mm, 1,5 mm, 1 mm e 0,5 mm, sendo os resultados apresentados na “Tabela 1”.

Tabela 1. Dados obtidos com os cálculos do software Moldflow® da série 15.15

Simulação	Comprimento de aresta global (mm)	Aspect Ratio	Pressão Máxima (MPa)	Tempo de Processamento (s)
1	2,79 (automático)	2,8	20,91	1,11
2	2	4	20,85	1,11
3	1,5	8,3	20,54	1,11
4	1	6,5	20,40	1,11
5	0,5	16,3	20,21	1,11

Com os resultados obtidos analisaram-se os dados de Aspect Ratio e Pressão Máxima, notou-se uma variação de pressão máxima de apenas 3,4% validando todas as opções definidas. O Aspect Ratio segundo Koike (1995) é uma relação entre duas dimensões de um objeto, no *Moldflow®* é utilizado para descrever a relação entre a largura e a altura de um elemento triangular da malha. Quando o Aspect Ratio fica acima de 6, é recomendável modificar o elemento para que tenha uma relação menor. A simulação 1 obteve o melhor resultado do Aspect Ratio, sendo o maior valor de 2,8. Desta maneira para a sequência da análise o parâmetro de comprimento de aresta global foi fixado em 2,79 mm.

Para todas as simulações foi utilizada a temperatura de superfície do molde de 50°C e temperatura do material de 250°C, valores recomendados pela biblioteca do software, os demais parâmetros foram definidos pelo modo automático. Para a sequência de simulação foi utilizado somente a análise de enchimento, o ponto de injeção foi feito no centro de cada peça no sentido do eixo Z, como mostrado na “Fig. 3”.

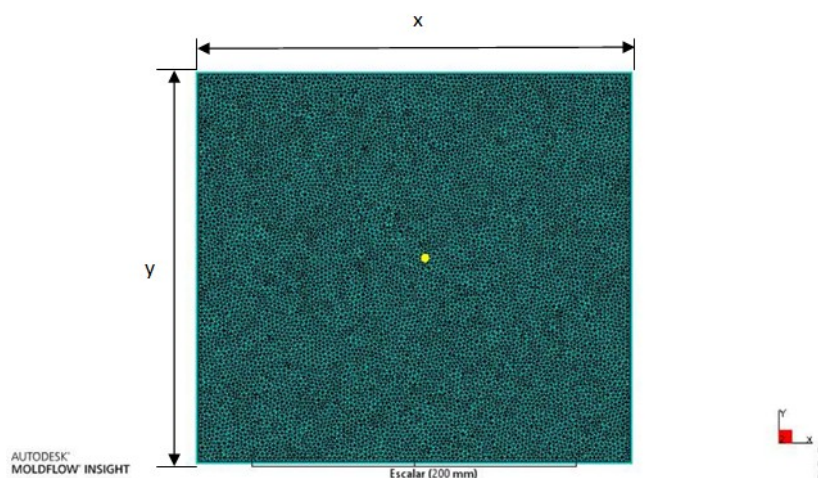


Figura 3. Local (ponto central) selecionado para injeção

A Tabela 2 apresenta as informações de medidas no eixo X e eixo Y respectivo a cada série e resultados de pressão máxima de injeção.

Tabela 2. Dados obtidos com os cálculos do software Moldflow®

MATERIAL ABS (Terluran GP-22)						
Série do porta molde	Espessura placa (mm)	X (mm)	Y (mm)	Pressão (MPa)	Tempo de injeção (s)	Velocidade de injeção (cm³/s)
15.15	1,5	88	42	20,91	0,74	7,90
15.15	3	88	42	5,27	1,41	8,52
15.15	5	88	42	2,82	0,46	46,2
20.20	1,5	116	72	30,28	0,87	15,59
20.20	3	116	72	7,56	1,63	16,70
20.20	5	116	72	4,85	0,78	59,66
25.40	1,5	148	246	25,09	1,37	45,51
25.40	3	148	246	8,29	2,26	51,9
25.40	5	148	246	3,52	3,86	50,52
35.35	1,5	256	196	70,03	1,41	62,58
35.35	3	256	196	22,96	2,47	65,34
35.35	5	256	196	8,71	4,07	65,98
40.40	1,5	266	238	77,16	1,44	78,64
40.40	3	266	238	25,93	2,71	75,78
40.40	5	266	238	10,02	4,29	79,05
45.45	1,5	316	288	88,48	1,557	104,25
45.45	3	316	288	29,20	3,036	97,15
45.45	5	316	288	11,36	4,608	105,68
50.50	1,5	366	322	98,82	1,532	135,06
50.50	3	366	322	32,69	3,354	113,58
50.50	5	366	322	12,06	4,894	127,85
50.80	1,5	322	598	141,74	1,639	219,98
50.80	3	322	598	54,61	3,973	159,26
50.80	5	322	598	22,42	6,074	168,46
60.60	1,5	466	422	124,59	1,811	208,8
60.60	3	466	422	46,69	4,259	154,58
60.60	5	466	422	18,10	5,724	185,19
70.100	1,5	522	798	177,94	2,437	443,03
70.100	3	522	798	74,06	4,594	310,17
70.100	5	522	798	32,59	7,881	283,74

Para uma melhor análise, os valores da Pressão Máxima por espessura podem ser observados também nas “Fig. 4” e “Fig. 5”.

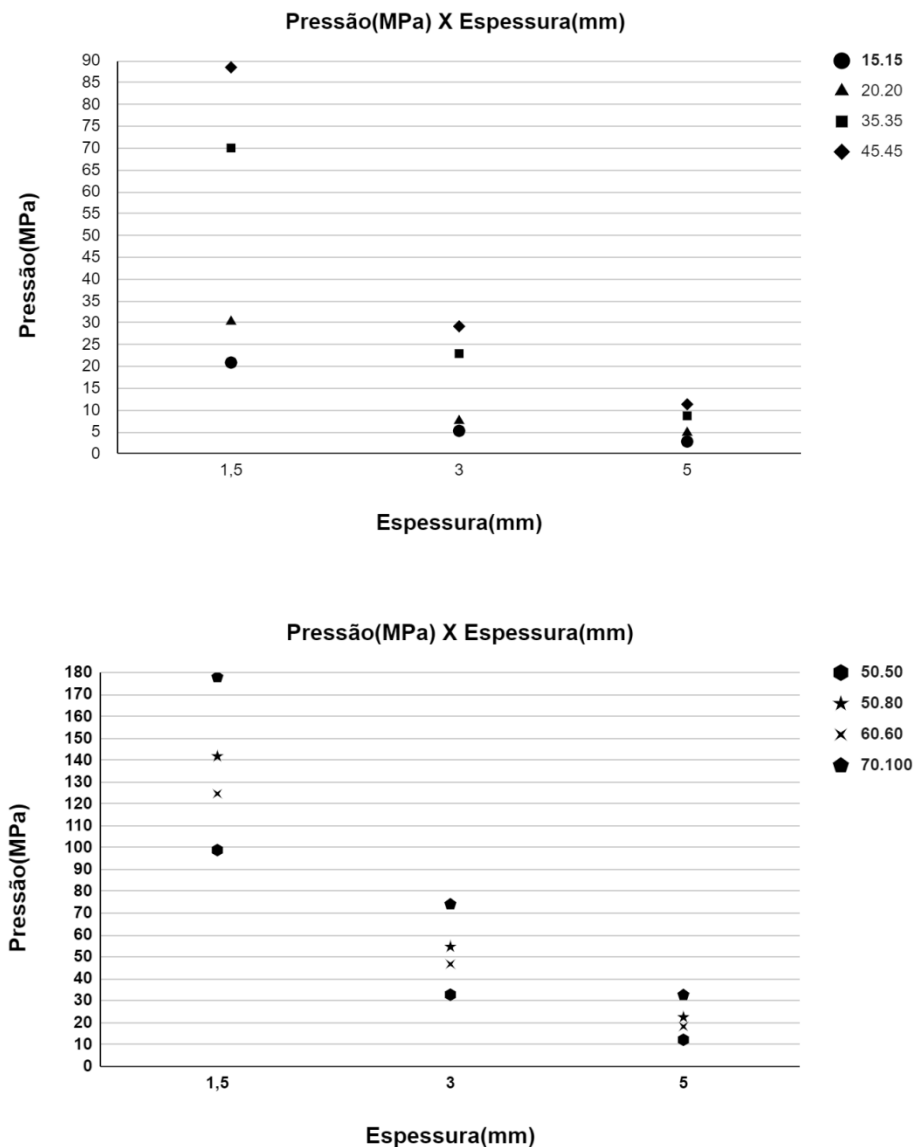


Figura 5. Relação de Pressão por Espessura das séries 50.50, 50.80, 60.60 e 70.100

Nota-se pelas Figuras anteriores, que com o aumento da espessura ocorre o decrescimento da pressão máxima, informando o projetista qual a pressão que o componente injetado irá demandar.

A velocidade de injeção refere-se à velocidade da frente de fluxo do material na cavidade do molde. Ela afeta diretamente a qualidade final da peça injetada, como sua aparência, propriedades mecânicas e dimensões.

Além dos resultados da pressão e velocidade de injeção, outras informações podem ser obtidas, como a análise do ponto de injeção no componente, a Taxa de Cisalhamento (Shear Rate), que é a taxa de variação da tensão de cisalhamento (*Shear Stress*) com o tempo. A tensão de cisalhamento é a razão da deformação do polímero devido a uma força de cisalhamento. Tanto a taxa de cisalhamento como a tensão devem ser menor que o valor máximo crítico para o material definido, para garantir que não ocorra a degradação do material.

Uma informação importante para o projetista é o melhor ponto de injeção, também conhecido como canal de entrada ou ataque (*gate*). Para ilustrar esta análise foram realizadas as simulações de diferentes pontos de injeção de material em uma geometria agora na forma de um corpo de prova de tração.

Nas simulações foram utilizados os mesmos parâmetros para estudo anterior, ou seja, a malha utilizada foi do tipo Dual Domain e com comprimento de aresta global de 2,79 mm, temperatura do molde 50°C e temperatura de injeção 250°C.

Na “Figura 6 A) e B)”, pode-se observar as geometrias analisadas e a localização dos pontos de entrada, e na “Fig. 7 A)” pode-se observar as saídas de ar nos círculos que estão na extremidade inferior, indicando locais para prever saídas de ar. Já na “Fig. 7 B)” pode-se visualizar a simulação de empenamento, onde a maior chance de empenamento, representado pela cor vermelho, ocorre no canal de injeção neste caso não afetando a geometria da peça.

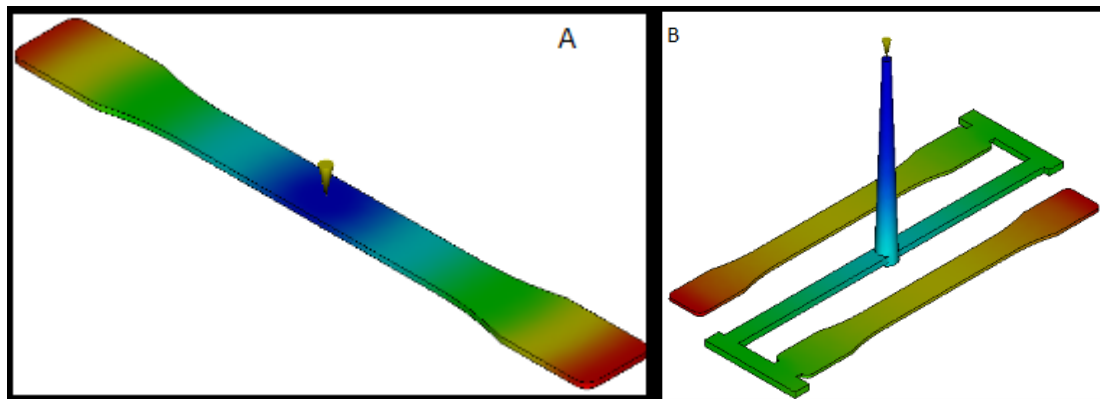


Figura 6. A) Corpo com injeção direta e B) Injeção sobre canal utilizando a entrada em uma extremidade

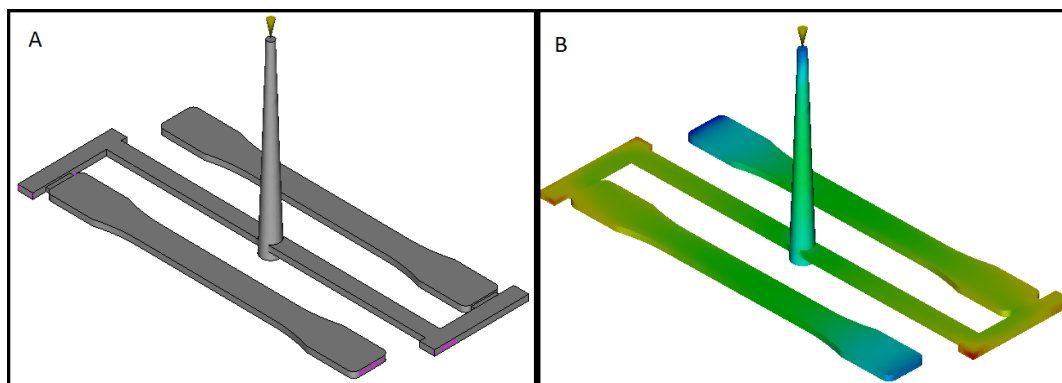


Figura 7. A) Representação da localização das saídas de ar e B) Representação do empenamento na peça

Com a simulação concluída passou-se às informações para a “Tab. 3”.

Tabela 3. Dados obtidos com os cálculos do software *MoldFlow*® para corpo de prova

Corpo de prova com entrada no centro - sem os canais de injeção						
Espessura (mm)	Pressão (MPa)	Volume de injeção (cm ³ /s)	Força de fechamento(t)	Tempo de injeção (s)	Shear Stress (MPa)	Shear Rate (1/s)
1,5	43,08	3,77	0,66	1,15	0,44	2003,37
3	11,8	12,59	0,40	0,71	0,25	1946,54
5	5,08	18	0,30	0,90	0,19	1012,47
Corpo de prova com a entrada nas extremidades - com canais de injeção						
Espessura (mm)	Pressão (MPa)	Volume de Injeção (cm ³ /s)	Força de fechamento(t)	Tempo de Injeção (s)	Shear Stress (MPa)	Shear Rate (1/s)
1,5	94,09	8,04	34,74	3,41	0,46	2101,64
3	49,91	7,25	15,66	4,89	0,61	2804,37
5	41,77	8,65	14,64	5,79	0,73	6176,47

Como resultado, observa-se a variação de parâmetros com a alteração do ponto de injeção. Sabendo destes resultados, o projetista pode optar qual solução que irá adotar, e até mesmo qual seria a característica da máquina que deverá receber o molde, considerando a força de fechamento.

Contudo, como podemos ter certeza se as condições de contorno foram adequadas e os valores obtidos na simulação, são os que realmente ocorrem no processo de injeção real?

Para avançar nesta questão, foi realizado o projeto de um molde de corpo de prova que será instrumentado, para fins de comparação dos resultados entre a simulação CAE e a injeção do componente na injetora utilizando os mesmos parâmetros.

O projeto prevê a utilização de sensores de pressão e temperatura em até 14 pontos para coleta de dados (8 presentes na parte móvel do molde e 6 presentes na para fixa), como demonstrado na “Fig. 8”, com esses pontos será possível analisar não somente o corpo de prova mas também os canais de alimentação. Para uma maior flexibilidade de análises, há ainda a possibilidade de fazer a troca dos canais de injeção, como demonstrado na “Fig. 9”.

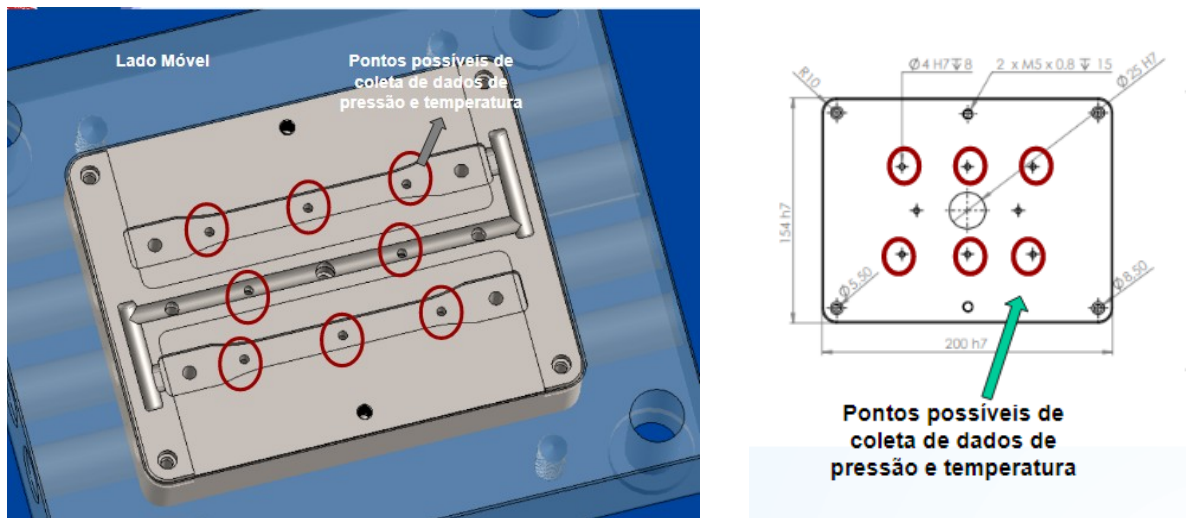


Figura 8. Possíveis pontos para coleta de dados reais (esquerda) e possíveis pontos para coleta de dados reais (direita)

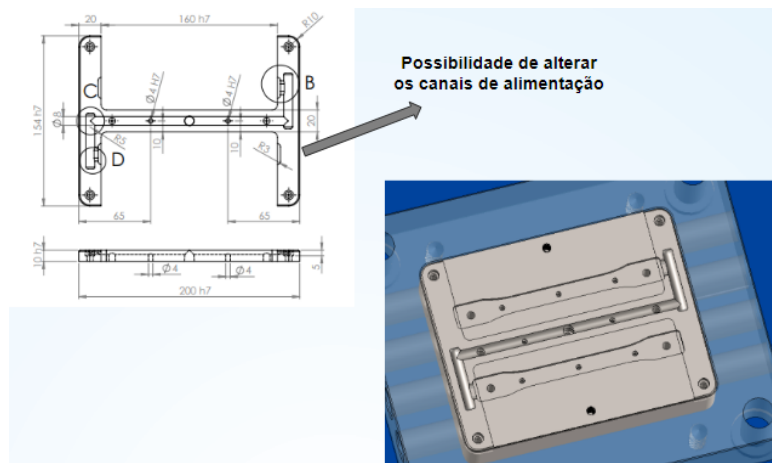


Figura 9. Possibilidade de alteração nos canais de injeção

4. CONCLUSÃO

O uso de componentes injetados nos mais variados ramos faz com que sejam necessários o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem o projetista de molde na tomada de decisão para melhores projetos. A utilização de softwares de CAE e em especial do *MoldFlow*® demonstrou ter grande importância na etapa de desenvolvimento do componente injetado e também no projeto do molde de injeção, pois pode possibilitar a redução do tempo de confecção dos moldes, reduzindo desta maneira os custos e evitando o excesso de alterações do produto final, pois cumpre o papel de elo de interligação entre as etapas.

No trabalho foi apresentado quais as escolhas que devem ser realizadas no início da simulação, como a definição da malha que será criada, bem como a dimensão dos elementos que irão impactar na qualidade e tempo da simulação. No exemplo que foi apresentado, o tamanho do elemento proposto pelo CAE foi considerado adequado, sendo um bom ponto de partida para a análise completa. Também foram demonstrados alguns resultados de análise que o CAE fornece, como as tensões de cisalhamento, pressão de injeção, força de fechamento, tempo de injeção, saídas de ar e empenamento, resultados estes que auxiliam o projetista do molde na tomada de decisão. Bem como auxiliam a empresa que irá realizar o processo de injeção na determinação da máquina injetora, baseado nos resultados obtidos na simulação.

Por fim, foi apresentado o projeto de um molde de injeção que será instrumentado para verificação entre os resultados reais e os resultados obtidos pelas simulações CAE. Com o molde finalizado e instrumentado será possível validar os dados obtidos pelas análises das simulações.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Rota 2030 - Linha IV “Ferramentarias Brasileiras Mais Competitivas” e a Fundep pelo apoio financeiro ao projeto 27194.01.01- "Melhoria da competitividade das ferramentarias através de Montagem e Tryout mais eficazes de moldes de injeção".

6. REFERÊNCIAS

- ANNA, J. P. S., 2008. Cae-cad-cam – softwares garantem eficiência no desenvolvimento das peças. 15 Jun 2022 <<https://www.plastico.com.br/cae-cad-cam-sofware-garantem-eficiencia-no-desenvolvimento-das-pecas/2/>>.
- ABIPLAST- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO, 2022. Relatório Anual perfil 2021. São Paulo.
- GAVA, D., 2020. *Projeto de molde para injeção aplicada a fabricação de tampas de garrafa do tipo squeeze*. SATC Educação e Tecnologia, Criciúma.
- HARADA, J., 2004. *Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos*. Artliber Editora Ltda., São Paulo.
- IYER, S., 2019. Six facts about the global injection molding market and the automotive industry. *Plastics Today*. 15 Out 2022 <<https://www.plasticstoday.com/injection-molding/six-facts-about-global-injection-molding-market-and-automotive-industry>>.
- KOIKE, T., 1998. *Integração do projeto e da fabricação de moldes para injeção de plásticos com auxílio de tecnologias CAD/CAE/CAM*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- SACCHELLI, C. M., 2007. *Sistematização do processo de desenvolvimento integrado de moldes de injeção de termoplásticos*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- SAHPUTRA, I. H., 2007. Comparison of two flow analysis software for injection moulding tool design. *IEEM*, Surabaya, Indonésia.
- SILCA, H., 2021. Os aços e a qualidade de molde. 01 Nov 2022 <<https://www.cefamol.pt/index.php?id=85&idn=419>>.
- RODRIGUES, P. D., 2018. *Simulação em Moldflow Insight da injeção de veios de engrenagem de pressão para previsão de empenos*. Dissertação de mestrado, Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) o(s) único(s) responsável(is) pelas informações incluídas neste trabalho.

RHEOLOGICAL STUDY OF THE INJECTION PROCESS IN INJECTION MOLDS USING CAE TOOLS

Leticia Vasconcelos

levasconcelos95@gmail.com

Carlos M. Sacchelli

carlos.sacchelli@gmail.com

João Victor Dalla Costa Radomski

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Centro Tecnológico de Joinville - CTJ

joaotitoo4@gmail.com

Abstract. *The components obtained by the injection process are increasingly occupying a prominent place, mainly in the automotive industry due to their great contribution to reducing the total weight of vehicles. To obtain a plastic component, a mold and injection machine are required, and it is important to control several parameters such as temperature, pressure and back pressure. Many of these parameters change according to the material and shape of the injected component. In this way, it is recommended the use of tools to assist the designer in making decisions regarding the mold design, thus, the main objective of this work is to analyze the use of CAE (Computer Aided Engineering) simulation in injection mold projects. For this, the simulation of the injected components will be carried out using the MoldFlow® software. As a main conclusion, the use of a computational tool can help the engineer to improve the performance of the mold, as well as the transformer that will adjust the injection process parameters in the machine.*

Keywords: *Injection Molds, MoldFlow®, Simulation.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.