

APLICAÇÕES DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA MELHORIAS E REDUÇÃO DE CUSTOS NO PROCESSO DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

APPLICATIONS OF COMPUTER SIMULATIONS TO IMPROVE AND REDUCE COSTS IN THE THERMOPLASTIC INJECTION PROCESS

Rayanne do Nascimento Guerra Melo Ribeiro¹
José Fernando Dagnone Figueiredo²

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a importância do uso de simulações computacionais com o software Inventor Moldflow 2019 para estudo dos principais defeitos e possibilidade de redução de custos no processo de injeção de termoplásticos como benefício da utilização de conceitos da indústria 4.0. Foram estudados os termoplásticos Polietileno de Alta densidade (PEAD ou HDPE) e o Polipropileno (PP) para simulação do processo de injeção do componente plástico do cone espremedor de laranja doméstico. Os resultados mostraram que os parâmetros de injeção são influenciados pelas propriedades morfológicas dos polímeros, sendo que a cristalinidade influenciou diretamente na contração e pressão de injeção dos termoplásticos. Portanto, foi possível mostrar o potencial das simulações computacionais como ferramenta para diminuição de custos no processo de injeção de termoplásticos.

Palavras-chave: Simulação; Termoplásticos; Injeção.

ABSTRACT

The present project is intended to study the importance using computer simulations with the Inventor Moldflow 2019 software to study the main defects and the possibility of cost reduction in the thermoplastic injection process as a benefit of using industry 4.0 concepts. For this, thermoplastics High Density Polyethylene (HDPE or HDPE) and Polypropylene (PP) were studied to simulate the injection process of the plastic component of the domestic orange juice cone. The results induced that the injection parameters are influenced by the morphological properties of the polymers, with the crystallinity being directly induced in the contraction and injection pressure of thermoplastics. So, it was possible to show the potential of computer simulations as a tool for cost reduction in the thermoplastic injection process.

Keywords: Simulation; Thermoplastics; Injection.

INTRODUÇÃO

A busca por alta produtividade, redução de custos, agilidade, inovação e sustentabilidade faz com que a indústria se

¹ Bacharelanda em Engenharia de Materiais - Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho. 2021

² Orientador do Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia de Materiais – Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho.

mantenha em constante transformação que pode ser impulsionada pela utilização da tecnologia em processos industriais.

A indústria 4.0 pode ser entendida como um impulso para um novo futuro industrial, em que os processos de criação de valor devem ser mais inteligentes e eficientes. (BARZ et al, 2019)

Muito mais do que apenas benefícios para o chão de fábrica, a introdução do conceito de indústria 4.0 ao ambiente produtivo possibilita incríveis ganhos de produtividade, eficiência e flexibilidade em toda a cadeia produtiva, além de permitir a otimização da tomada de decisão e a rastreabilidade de ponta a ponta do processo (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

O Boston Consulting Group (2015) estima que somente na Alemanha, onde a Indústria 4.0 encontra-se mais avançada, os ganhos de produtividade variam de 15% a 25%.

As simulações computacionais transformaram-se em uma diferenciação competitiva, com a possibilidade de antecipar possíveis defeitos no processo produtivo permitindo assim que as empresas desenvolvam produtos mais eficientes, de maior qualidade, em menor tempo e com menor custo.

Em 2019, o setor de processamento de plásticos registrou 7,1 milhões de toneladas em produção, grande parte direcionada para o setor da construção civil no formato de tubos e conexões. (ABIPLAST, 2021)

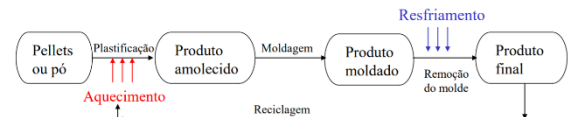
Os polímeros, como podem ser comumente chamados de plásticos, possuem diversas propriedades que permitem a sua inserção nas novas demandas da sociedade.

Polímero é qualquer material orgânico ou inorgânico, sintético ou natural, que tenha um alto peso molecular e com variedades estruturais repetitivas (monômeros).

E ainda segundo Manrich, podem ser classificados de maneiras diferentes dependendo do objetivo a ser classificado. As classificações mais comuns são: da estrutura química; do método de preparação; das características tecnológicas e do comportamento mecânico.

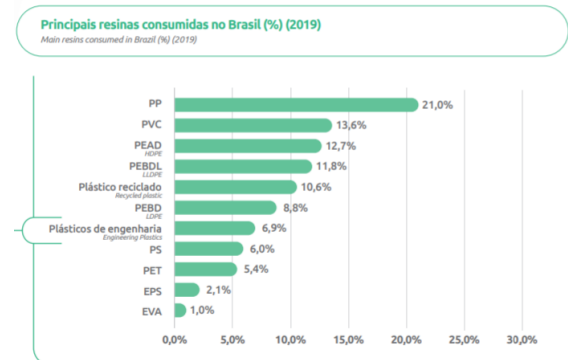
O Termoplástico refere-se ao polímero de cadeia linear ou ramificada que pode ser plastificado e moldado um certo número de vezes, sofrendo pouca alteração nas suas propriedades básicas. (MANRICH, 2005)

Figura 1: Ciclo de vida dos termoplásticos



Fonte: Autora. Adaptado do Callister, 2017.

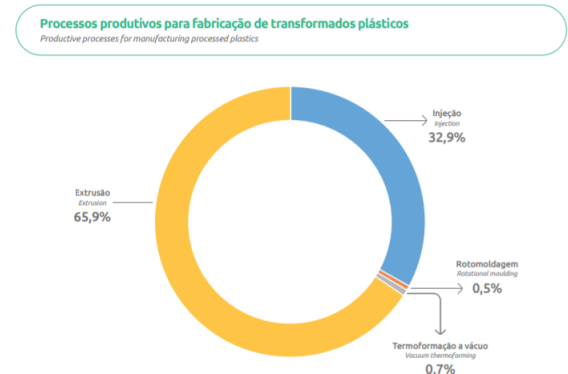
Figura 2: Principais termoplásticos consumidos no Brasil



Fonte: ABIPLAST, 2021.

O processo de injeção é um dos mais utilizados para moldagem de termoplásticos na indústria, como podemos observar na figura 3.

Figura 3: Principais processos produtivos para termoplásticos.



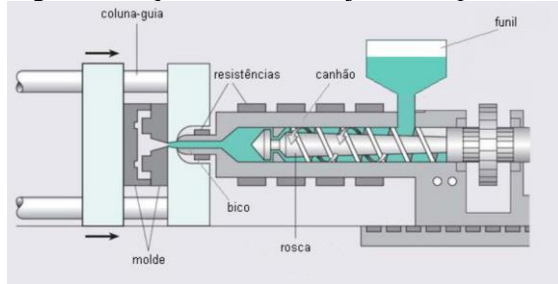
Fonte: ABIPLAST, 2021

A propriedade reversível, de fundir sob aquecimento e solidificar por resfriamento, faz com que termoplásticos possam ser reciclados com maior facilidade, sendo

assim de processamento fácil e de baixo custo (LOPES, 2007)

O processo de injeção consiste no confinamento e transporte do plástico pelos estágios de alimentação, compressão, fusão e injeção. Os componentes da máquina injetora podem ser observados na figura 4:

Figura 4: esquema de uma injetora de plásticos



Fonte: Tudo sobre Plástico

Como princípio básico de injeção, o material sólido é fundido por aquecimento no canhão da máquina e injetado dentro da cavidade de um molde, no qual sofre um resfriamento e a peça é ejetada da máquina, resultando no produto (KENNEDY, 2008). As etapas do ciclo de injeção são fechamento do molde, injeção, recalque, plastificação, resfriamento, abertura do molde e extração da peça. O tempo total de cada ciclo será a soma do tempo total de cada etapa do processo de injeção.

Segundo (Michaeli, et al, 1992), pode-se listar algumas características vantajosas da moldagem por injeção de termoplásticos como a passagem direta do material fundido para a peça pronta; quase não é necessário nenhum acabamento na peça; elevada produtividade da peça; elevada qualidade da peça.

Estão relacionadas à produção, custo de mão de obra e qualidade da peça injetada. Entre as desvantagens, cita-se a de o molde ser uma das partes com maior custo desse processo. (KENNEDY, 2008)

Os problemas de moldagem por injeção mais comuns são estrias marrons, pontos pretos, carbonização, estrias prateadas, delaminação, linha de solda, esguichamento, marcas ao redor do ponto de injeção, peças incompletas, chupagem e vazios, trincas ao redor do inserto, bolhas,

variações na contração, peças quebradas, escorrimento pelo bico de injeção, má dispersão de cor, marcas de fluxo, rebarbas, peças translúcidas e leitosas, áreas foscas, peças presas no molde, fissuras, contração e empenamento por estresses residuais (KAMAL, et al 2002).

No desenvolvimento de projeto ou melhorias em processos de injeção são comumente utilizadas as ferramentas do tipo CAD (Computer Aided Design), CAE (Computer Aided Engineering) e CAM (Computer Aided Manufacturing). Os softwares CAD dispõem de modelos volumétricos em três dimensões (3D) que possibilitam projetar moldes de injeção, e permitem ter o acompanhamento do dimensionamento exato de todas as medidas, cotas, estruturas etc. (OLIAEI et al., 2016)

A utilização do software Inventor Moldflow para simulação do processo de moldagem por injeção de termoplásticos em conjunto com os recursos disponíveis dos softwares Autodesk, possibilitam informações do processo no intuito de prevenir o aparecimento de defeitos e erros gerais de processamento.

Esse trabalho pretende destacar a importância do uso de simulações computacionais no processo de injeção de termoplásticos, contribuindo assim com a redução de custos do processo produtivo, bem como, minimizar defeitos e comparar resultados das simulações com diferentes termoplásticos auxiliando na escolha prévia dos materiais.

METODOLOGIA

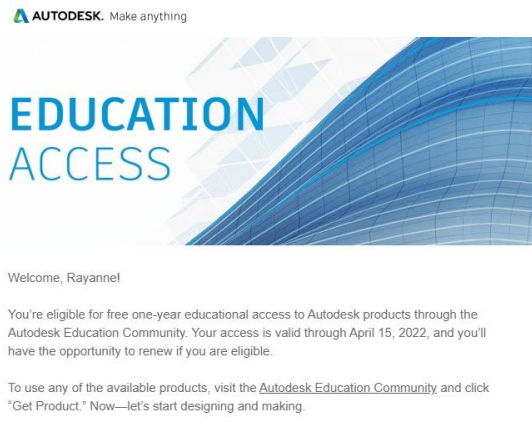
Software e funções utilizadas

O software CAD Inventor® fornece ferramentas profissionais para projetos mecânicos 3D, documentação e simulação de produtos. (Autodesk, 2021)

Para uso do software Autodesk Inventor 2019 Professional foi utilizada a licença Education que proporciona acesso gratuito a professores e estudantes ao avançado

portfólio de softwares e recursos didáticos da Autodesk utilizados amplamente na indústria.

Figura 5: Licença Education Autodesk



Fonte: Autora

As funções utilizadas para realização da simulação:

- **Part Design:** Utilizado para criação do arquivo Mold Design no qual todos os elementos de design são armazenados e, em seguida, coloca-se uma ou mais peças no projeto de design de molde.
- **Mold Design:** Funcionalidade de molde integrada ao Autodesk Inventor. Usando as ferramentas inteligentes e catálogos fornecidos no Mold Design, gerando rapidamente projetos de moldes precisos diretamente de protótipos digitais.
- **Tensile Strength:** Uma análise de tensão prévia ajudando a encontrar as melhores alternativas de projeto para uma peça ou montagem. Desde o início de desenvolvimento do projeto, é possível certificar-se de que um projeto é executado de forma satisfatória no uso esperado sem quebras ou deformações.
- **MoldFlow:** Foi utilizado via plugin instalado no Autodesk Inventor. O software de simulação Moldflow® permite solucionar problemas com injeção de plástico e moldagem por

compressão. Ferramentas avançadas que ajudam a enfrentar os desafios de fabricação, como empenamento de peças, eficiência do canal de resfriamento e redução do tempo de ciclo. (Autodesk, 2021)

Modelo e materiais a serem injetados

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, a laranja é a fruta mais produzida no Brasil, em 2019 produziu-se mais de 15 milhões de toneladas para consumo e exportação. Por isso, o produto escolhido para realização das simulações computacionais foi o cone do espremedor de laranja, componente plástico e indispensável para o uso do espremedor de laranja doméstico.

Figura 6: Modelo da peça a ser injetada



Fonte: Autora

O Moldflow possui um banco de materiais com mais de 7500 materiais. Para sua escolha é utilizado um filtro de pesquisa simples com base na aplicação final do material. Os materiais escolhidos para realização da simulação foram os termoplásticos Polietileno de Alta Densidade (PEAD ou HDPE, em inglês) e o Polipropileno (PP) disponíveis na biblioteca de materiais do software, ambos possuem fabricantes com base no Brasil.

Segundo a ABIPLAST (2021), o PP e PEAD representam cerca de 34% da utilização dos termoplásticos em indústrias no Brasil.

A escolha do polietileno de alta densidade foi motivada por ser um polímero atóxico, inodoro e sem sabor, ideal para aplicações que envolverão manipulação de alimentos.

O Polietileno de alta densidade (PEAD) tem mais resistência à tração, maior temperatura de deformação térmica, maior viscosidade e resistência química do que o polietileno de baixa densidade (PEBD) quando comparado.

O polipropileno (PP) foi escolhido devido a ser um polímero termoplástico atóxico, inodoro e sem sabor, translúcido e semicristalino muito utilizado na indústria devido ao baixo custo, que apresenta uma excelente resistência a diversos produtos químicos.

Figura 7: Ficha técnica do PEAD CC252, fabricante Sabic Automotive.

Thermoplastics material				
Mechanical Properties	Shrinkage Properties	Filler Properties	Environmental Impact	Quality Indicators
Description	Recommended Processing	Rheological Properties	Thermal Properties	pVT Properties
Family name	POLYETHYLENES (PE)			
Trade name	SABIC HDPE CC252			
Manufacturer	SABIC Innovative Plastics, PP Automotive			
Link				
Family abbreviation	HDPE			
Material structure	Crystalline			
Data source	Autodesk Moldflow Plastics Labs - pVT-Measured - mech-Measured			
Date last modified	20-DEC-12			
Date tested	19-DEC-12			
Data status	Non-Confidential			
Material ID	20966			
Grade code	SN6651			
Supplier code	SABIC			
Fibers/fillers	[Unfiled]			

Fonte: Material cadastrado na biblioteca MoldFlow Inventor 2019.

Figura 8: Ficha técnica do PP 1930.01, fabricante A. Shulman

Thermoplastics material				
Mechanical Properties	Shrinkage Properties	Filler Properties	Environmental Impact	Quality Indicators
Description	Recommended Processing	Rheological Properties	Thermal Properties	pVT Properties
Family name	POLYPROPYLENES (PP)			
Trade name	Polyfor PP 1930.01			
Manufacturer	A. Shulman			
Link				
Family abbreviation	PP			
Material structure	Crystalline			
Data source	Other - pVT-Supplemental - mech-Supplemental			
Date last modified	10-AUG-05			
Date tested				
Data status	Non-Confidential			
Material ID	4258			
Grade code	CM4258			
Supplier code	SCHULMAN			
Fibers/fillers	[Unfiled]			

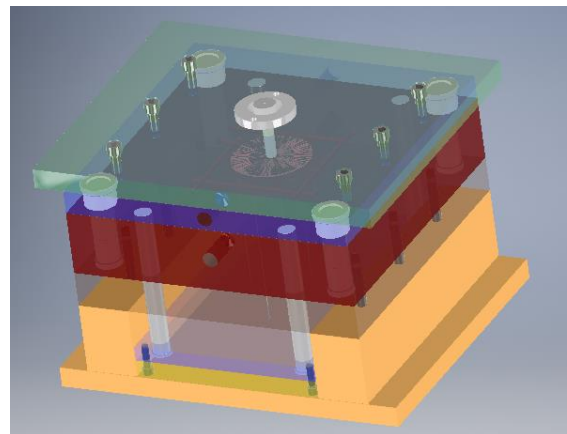
Fonte: Material cadastrado na biblioteca MoldFlow Inventor 2019

Molde para simulação do processo de injeção dos termoplásticos

Um molde de injeção pode ser entendido como um conjunto de sistemas funcionais que permitem um espaço em que a peça será moldada, definido pela cavidade, sejam preenchidas com o plástico fundido em

condições controladas, pelos outros sistemas que garantem a qualidade dimensional e estrutural das peças produzidas. (Garcia, 2016) Escolhido como material do molde o aço inoxidável martensítico AISI 420 comumente destinado a moldes para injeção de polímeros e bastante utilizado no processo de injeção de termoplásticos. (Pinedo, 2019)

Figura 9: Molde utilizado para simulações



Fonte: Inventor.

Principais pontos a serem projetados no molde são a geometria da peça a ser injetada, interação do material do molde com o plástico, canais de alimentação, canal de resfriamento, sistema de escapamento de gases e extração do molde.

Processo de Injeção

A moldagem por injeção envolve diversos fatores, como poderemos observar, as partes individuais deste processo são muito curtas, todo o processo de moldagem por injeção normalmente leva de 2 segundos a 2 minutos e existem quatro fases no ciclo: fixação, injeção, resfriamento e ejeção. Fixação é a etapa de preparo do molde para a injeção do material.

A injeção inicia com os pellets de plástico alimentados através de um funil na máquina de moldagem por injeção, que se movem em direção ao molde através da unidade de injeção. O calor que envolve o barril e a pressão servem para derreter os pellets. O

tempo de injeção termina quando 95% - 99% de preenchimento ou o molde é totalmente preenchido.

O processo de resfriamento envolve o plástico dentro do molde que começa a esfriar logo após o contato inicial com as paredes do molde. Conforme o plástico esfria e endurece, ele assume a forma desejada. A peça pode encolher ligeiramente durante o resfriamento. Somente depois de decorrido o período de resfriamento é que o molde pode ser aberto. É a partir da espessura da parede da peça e das propriedades termodinâmicas do material escolhido que o tempo de resfriamento pode ser estimado.

A última etapa é a ejeção da máquina. Quando o molde se abre, a peça é empurrada para fora, deve-se usar força porque a peça encolhe e gruda no molde. O molde pode ser fechado novamente após a ejeção e outra injeção pode ser iniciada para reinício do processo.

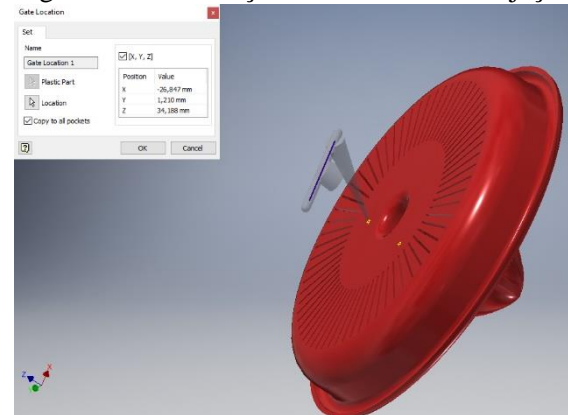
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Simulação do processo de injeção dos termoplásticos

Após definido a peça a ser injetada, projetado o molde e materiais a serem utilizados na simulação, inicia-se propriamente dita a simulação do processo de injeção de um termoplástico:

1. Utilizou-se o Mold design na função Gate Location para definir o ponto de injeção, como pode ser observado na figura 10:

Figura 10: Definição do Ponto de injeção

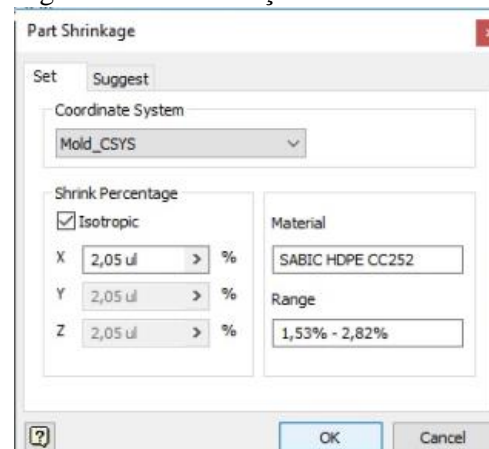


Fonte: MoldFlow Inventor 2019

A posição de injeção fornecida no Gate Location é importante devido a recomendação dos locais de injeção para sua peça com base na minimização da resistência ao fluxo.

Alguns parâmetros devem ser levados em consideração antes da injeção do material, sendo eles a cristalinidade do material, temperatura de molde e fusão, propriedades térmicas do material, viscosidade do material, materiais compósitos para molde por injeção, impacto ambiental de materiais de projeto de molde e outros. A maioria dos parâmetros são controlados pelo software após a escolha do material como podemos observar o exemplo da possibilidade de contração do PEAD na figura 11:

Figura 11: Contração do PEAD CC252

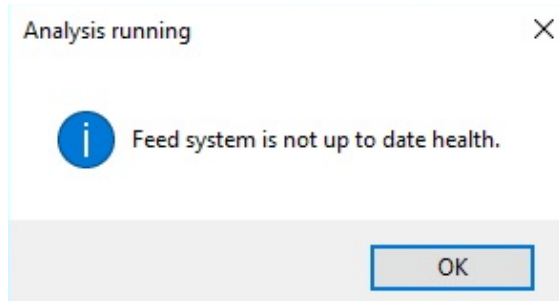


Fonte: Moldflow Inventor 2019

2. Início do processo da simulação de injeção do PEAD após validação dos

parâmetros de injeção de acordo com especificações de fabricante:

Figura 12: Aviso de alimentação irregular no MoldFlow



Fonte: MoldFlow Inventor 2019

O Software interrompeu a simulação por falhas na alimentação, nesse caso o ponto de injeção deverá ser modificado. Após interrupção é gerado um relatório com os principais pontos para análise como mostrado na figura 13:

Figura 13: Parâmetros gerais do processo

Your part has not completed filling and is a short shot. Part quality will be unacceptable.	
View the Confidence of Fill plot and use the Results Adviser to get help on how to improve the filling of the part.	
Actual filling time	3.49 (s)
Actual injection pressure	132.569 (MPa)
Clamp force area	219.1857 (cm ²)
Max. clamp force during filling	16.011 (tonne)
Velocity/pressure switch-over at % volume	98.41 (%)
Velocity/pressure switch-over at time	3.39 (s)
Estimated cycle time	652.48 (s)
Total part weight	112.450 (g)
Shot volume	148.4728 (cm ³)
Cavity volume	146.6620 (cm ³)
Runner system volume	1.8107 (cm ³)
Clamp force estimate during packing using:	
20% of the injection pressure	58.971 (tonne)
80% of the injection pressure	235.896 (tonne)
120% of the injection pressure	353.829 (tonne)

Fonte: MoldFlow Inventor 2019

O erro apresentado na figura 12 ocorreu devido à falta de sinalização da necessidade do processo try out (testes). Para continuidade da simulação, seguiu-se em processo de try out para melhor adequação do processo antes de efetuar simulações com objetivo elevar a qualidade do processo.

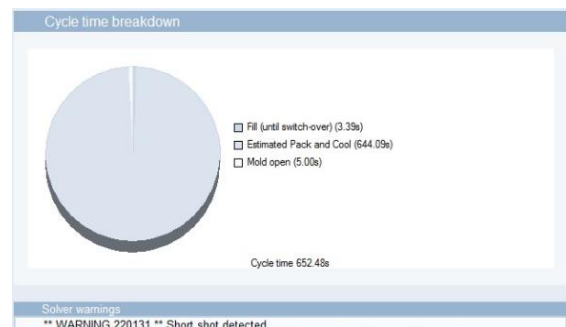
Sinalização por meio das cores do farol:

- Farol verde: significa processo com qualidade 100%;
- Farol amarelo: Processo possível, desde que ocorram pequenos ajustes de parâmetros da injetora.

- Farol vermelho: Processo inviável, precisando revisar o projeto e executar as mudanças necessárias com base no laudo gerado.

Considerando o processo com sinal em vermelho, fez-se necessário a análise da quebra do tempo de ciclo e aviso de solução para detecção de falha de tiro curto, conforme figura 14:

Figura 14: Quebra do tempo de ciclo e aviso de solução



Fonte: MoldFlow Inventor 2019

Quanto a figura 13, o processo retornou farol vermelho que sinaliza a qualidade inaceitável para continuação da simulação dos processos de injeção. Na figura 14 é registrado a análise de quebra de ciclo (Cycle time breakdown) e a sinalização do erro encontrado no processo.

A análise de quebra de ciclo corresponde ao tempo necessário para realização das três etapas: preenchimento total, estimativa de empacotamento e resfriamento e abertura do molde. A sinalização da falha de tiro curto (short shot) ocorre quando existe erro em alguns dos principais parâmetros de injeção algumas possibilidades são: temperatura ou pressão insuficientes, baixa taxa de injeção, material incompatível com o processo e sistema de alimentação incorreto.

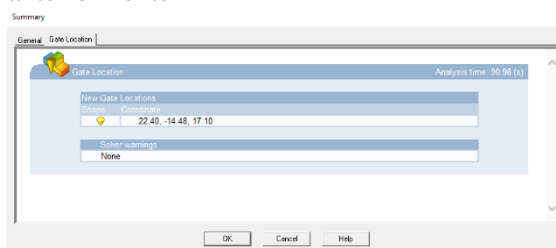
Devido ao relatório sinalizar um tempo mais elevado para empacotamento e resfriamento, escolheu-se alterar a posição do canal de alimentação como possível solução do erro, pois ao determinar as posições ideal de injeção, o algoritmo Gate

Location não considera as condições de processamento, geometria da peça ou dados do material, por isso a sua utilização é fundamental, porém limitada. Fazendo-se necessário a análise de cada simulação de acordo com o material utilizado. (Autodesk, 2019)

Para maior entendimento do erro, pode-se realizar um teste para análise de fluxo de alimentação, pois com alguns parâmetros como tempo de injeção, pressão de injeção, temperatura da frente de avanço, temperatura do material no final do preenchimento, contração volumétrica após a injeção, aprisionamento de gases, força de fechamento e outros, sendo provável a detecção de possíveis falhas de projeto que possam prejudicar o processo de injeção, dessa forma a produtividade e o nível de qualidade exigido para a peça moldada são assegurados e até mesmo a eliminação de retrabalhos após o tryout pode ser eliminada, possibilitando a redução dos custos de fabricação.

Para modificações nos parâmetros iniciais do ponto de injeção é necessário retornar para a função Gate Location e receber novos pontos de injeção como podemos observar na figura abaixo.

Figura 15: Novas coordenadas de injeção com o gate location com base nos erros apresentados anteriormente



Fonte: Moldflow Inventor 2019

Figura 16: Nova localização do ponto de injeção



Fonte: Moldflow Inventor 2019

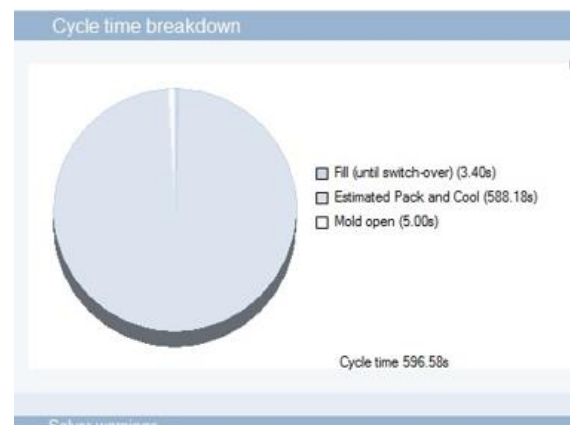
Após os ajustes sugeridos pelo software, a simulação do processo de injeção foi concluída e a peça atingiu os seguintes resultados de processo conforme figuras 17 e 18:

Figura 17: Relatório dos parâmetros gerais do processo

General		Fill	Analysis
Your part can be filled easily but part quality may be unacceptable.			
View the Quality Prediction plot and use the Results Adviser to get help on how to improve quality of the part.			
Actual filling time		3.48 (s)	
Actual injection pressure		92.513 (MPa)	
Clamp force area		219.1097 (cm ²)	
Max. clamp force during filling		14.766 (tonne)	
Velocity/pressure switch-over at % volume		98.47 (%)	
Velocity/pressure switch-over at time		3.40 (s)	
Estimated cycle time		596.58 (s)	
Total part weight		114.597 (g)	
Shot volume		152.5608 (cm ³)	
Cavity volume		149.9128 (cm ³)	
Runner system volume		2.6380 (cm ³)	
Clamp force estimate during packing using:			
20% of the injection pressure		41.327 (tonne)	
80% of the injection pressure		165.309 (tonne)	
120% of the injection pressure		247.964 (tonne)	

Fonte: Moldflow Inventor 2019

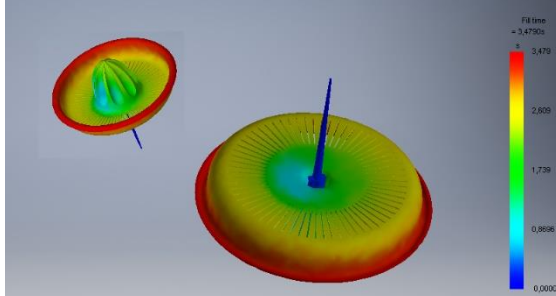
Figura 18: Quebra do tempo do ciclo



Fonte: Moldflow Inventor 2019

Ao encerrar a simulação é emitido o relatório do tempo de preenchimento como podemos observar na figura 19.

Figura 19: Gráfico de tempo de preenchimento PEAD com estimativa em 3,479 segundos



Fonte: Moldflow Inventor 2019

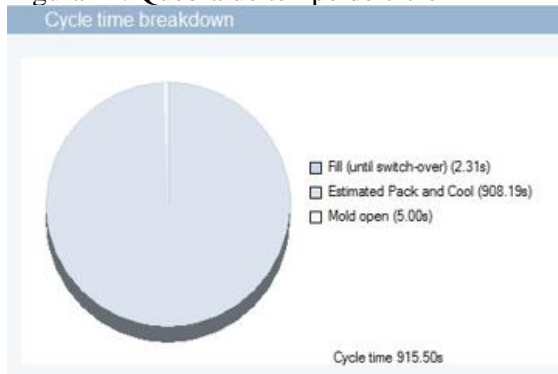
3. Realizando a simulação processo de injeção para o PP após validação dos parâmetros de injeção de acordo com especificações de fabricante utilizando o Gate Location para ponto de injeção (figura 5), diferente do processo com o PEAD, com o PP foi possível seguir na primeira tentativa de simulação:

Figura 20: Dados do processo do PP

General Fill	
Your part can be filled easily but part quality may be unacceptable.	
View the Quality Prediction plot and use the Results Adviser to get help on how to improve quality of the part.	
Actual filling time	2.33 (s)
Actual injection pressure	33.132 (MPa)
Clamp force area	217.0055 (cm ²)
Max. clamp force during filling	6.040 (tonne)
Velocity/pressure switch-over at % volume	99.48 (%)
Velocity/pressure switch-over at time	2.31 (s)
Estimated cycle time	915.50 (s)
Total part weight	117.167 (g)
Shot volume	150.7147 (cm ³)
Cavity volume	147.3194 (cm ³)
Runner system volume	3.3953 (cm ³)
Clamp force estimate during packing using:	
20% of the injection pressure	14.658 (tonne)
80% of the injection pressure	58.634 (tonne)
120% of the injection pressure	87.951 (tonne)

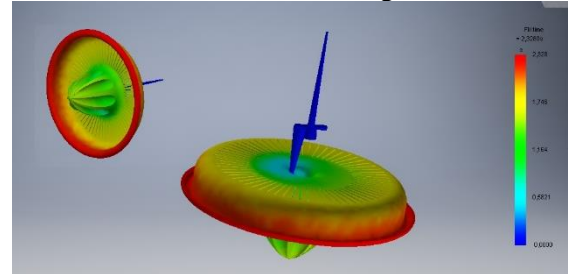
Fonte: Moldflow Inventor 2019

Figura 21: Quebra do tempo de ciclo



Fonte: Moldflow Inventor 2019

Figura 22: Gráfico de tempo de preenchimento PP com estimativa em 2,328 segundos



Fonte: Moldflow Inventor 2019

Apesar de ambos os materiais serem cristalinos, PEAD possui cristalinidade de 85% a 95% possuindo uma propensão maior a contração, tem-se por recomendação a projeção de um encolhimento maior devido sua taxa de contração, pois os polímeros cristalinos possuem a tendência a maior contração devido continuidade de sua estruturação molecular mesmo após o fim da injeção, processo denominado de cristalização. Na figura 11, podemos observar os dados de contração entre 1,53% a 2,82%.

Segundo Manrich 2005, com a adição de mais cavidade no molde com objetivo de compensar a contração, evita-se também bolhas e rechupes, porém pode ocasionar um peso final maior à medida que o tempo de recalque é aumentado.

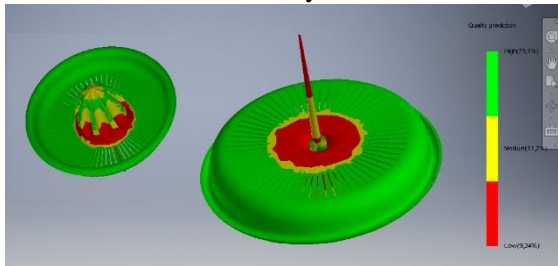
Devido a particularidade de cada material é fundamental a realização de try out.

Try out é o teste que permite a definição dos principais parâmetros de injeção, proporcionará maior quantidade possível de informações e variáveis do processo. Na simulação do processo de injeção é necessário apenas sinalizar a necessidade do try out, diferentemente quando efetuado em indústrias pois convém que ele seja feito em condições bastante controladas, o que implica em realizá-lo em máquinas que estejam em bom estado de conservação e apresentem todos os recursos necessários para o correto funcionamento do molde.

Nas figuras 23-26 pode ser observado a diferença das simulações sem e com try out em cada material. Ao conhecer cada

parâmetro do processo com base nas características de cada material é possível chegar a 100% de qualidade na simulação do processo de injeção de termoplásticos, possuindo assim aproximadamente 21% do aumento da qualidade.

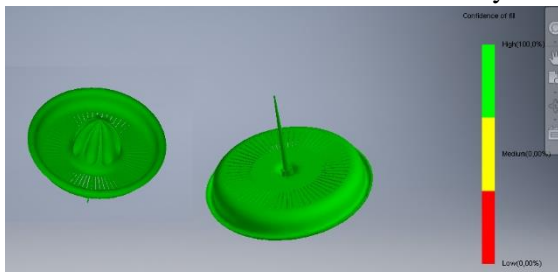
Figura 23: Gráfico de qualidade de preenchimento de pré qualidade do PEAD sem utilizar try out:



Fonte: MoldFlow Inventor 2019

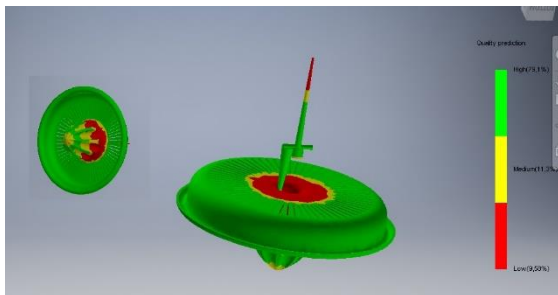
Parâmetros gerais fornecidos pelo software: 79% boa qualidade; 11,7% média qualidade; 9,24% baixa qualidade.

Figura 24: Gráfico de qualidade de preenchimento do PEAD com qualidade de 100% utilizando os dados obtidos via try out:



Fonte: Moldflow Inventor 2019

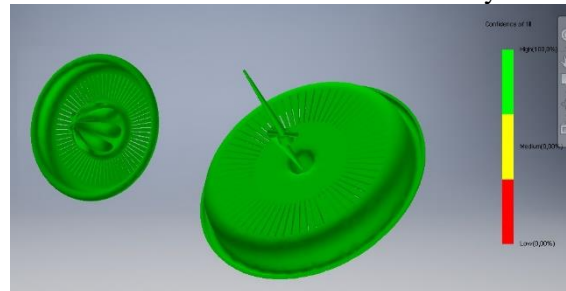
Figura 25: Gráfico de pré-qualidade de peça de PP



Fonte: Moldflow Inventor 2019

Parâmetros gerais fornecidos pelo software: 79,1% boa qualidade; 11,3% média qualidade; 9,58% baixa qualidade.

Figura 26: Gráfico de qualidade de preenchimento do PP com qualidade de 100% utilizando os dados obtidos via try out:



Fonte: Moldflow Inventor 2019

Em comparação com o PEAD, o PP resultou um maior tempo total de ciclo e menor pressão de injeção. Conforme observado nas simulações e relacionado com Telles (2007), podemos relacionar o aumento da temperatura e conseqüentemente aumento da fluidez do PP, favorecendo o surgimento de rebarbas na peça injetada.

Tabela 1 – Principais dados de injeção do PEAD e PP, respectivamente

Tempo de enchimento do molde (s)	Pressão de injeção (MPa)	Peso da peça (g)	Tempo total de ciclo (s)
3,48s	92,513 MPa	114,597g	596,58s
2,33s	33,132 MPa	117,167g	915,50s

Fonte: Autora

Com isso, um dos métodos para eliminar este efeito é a diminuição do volume de injeção e a pressão aplicada, resultando assim, em um ciclo de injeção mais longo, semelhante ao ocorrido nas simulações.

A pressão de injeção depende diversos fatores como tipo de material a ser processado, tipo de máquina, temperaturas de plastificação e características do molde como as dimensões do sistema de alimentação. Dificuldades para extração podem acontecer em caso de uso de alta pressão de injeção devido à alta compactação e gerar tensões internas causando trincas e quebras. A pressão de injeção baixa poderá acarretar o não preenchimento da cavidade, peças com rechupe e provocar um acabamento irregular.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Para a utilização proposta, apesar de apresentar menor tempo de preenchimento do molde, porém maior tempo de ciclo total, o material que possibilitaria maior vantagem de processamento seria o polipropileno (PP) devido a sua larga utilização no mercado e menor custo em comparação com o PEAD.

Quanto a contração do PEAD pode ser controlada com um ciclo maior de injeção e breve aumento da pressão de injeção favorecendo a menor contração. Podendo ainda ser controlada de acordo com a espessura da parede do molde, pois quanto menor for a espessura, mais acelerará o resfriamento. Assim, o resfriamento mais rápido poderá auxiliar na diminuição da contração.

Embora não tenha baixo custo a utilização de software para simulação, pelo retorno obtido compensa o investimento necessário. Com a utilização ideal do sistema CAD e CAE 3D integrado, as indústrias de moldagem por injeção podem melhorar muito as suas capacidades de processo, prever possíveis defeitos antes do teste de fabricação, identificar as causas dos defeitos e obter componentes de alta qualidade a baixo custo, em menos tempo e aumentar significativamente a competitividade da indústria. (MUSTAPHA, 2016)

Usando estas ferramentas computacionais, as interações podem ser facilmente implementadas para simular um novo cenário, sendo que o custo e o tempo destas interações são exponencialmente menores, reduzindo assim, a quantidade de possíveis try-outs e testes dos moldes sem sucesso no futuro.

As simulações auxiliam na minimização de erros de projeto antes do início da fabricação do molde, possibilitando a rastreabilidade de todo processo e garantindo um maior nível de qualidade da peça a custos relativamente baixos.

Quanto ao projeto do molde, entende-se que ele é um fator chave para determinar a qualidade do produto acabado. A

resistência, durabilidade, forma e tamanho dependem do tipo de molde usado. O molde deve ser robusto e capaz de suportar as pressões envolvidas durante o processo de injeção, devendo ser cuidadosamente projetado para permitir a transferência de calor para controlar o processo de resfriamento. O polímero também deve fluir adequadamente pelo molde.

Por isso, a sugestão de continuidade do trabalho é o estudo do molde utilizado para rastreabilidade e melhorias do projeto, simulações de ensaios para medir as propriedades mecânicas de cada material injetado e testar novos termoplásticos na simulação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ORG.). Perfil 2019: **Indústria brasileira de transformação de material plástico**. Disponível em: http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2020/09/Perfil_2019_web_abiplast.pdf Acesso em: 14 jun. 2021.

AUTODESK. **Suporte e Aprendizado – Inventor 2019**. Disponível em: <https://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2019/PTB/?guid=GUID-AEC6AA27-9662-44E2-AD12-ABD2FE44A14B> Acesso em: 20 de jun. 2021.

BARZ, C., JALBA, C. K., ERDEI, Z., & HAHN, S. M. L. (2019). **Approaches for the planning and implementation of Industry 4.0**. Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 7(1), 375-380. Disponível em: <http://pen.ius.edu.ba/index.php/pen/article/view/397/280> Acesso em: 20 de jun. 2021.

BOSTON CONSULTING GROUP. **Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries**. BCG Perspectives, 2015. Disponível em: <https://www.bcg.com/publications/2015/en>

gineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries Acesso em: 25 de jun. 2021

CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais. Uma abordagem integrada.** 4ª edição. Cap.4, item 4.9; Cap 13, itens 12-15; Cap. 14, itens 11-15 – Rio de Janeiro: LTC, 2017.

GARCIA, M.; **Moldes para injeção de termoplásticos.** CEFET-RS Disponível em:
https://www.academia.edu/13129661/MOLDES_PARA_INJE%C3%87%C3%83O_DE_TERMOPL%C3%81STICOS_1_INTRODU%C3%87%C3%83O Acesso em: 11 de maio 2021

KAGERMANN, Henning; WAHLSTER, Wolfgang.; HELBIG, Johannes. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0.** Final Report, Acatech, 2013. Disponível em:
<https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/> Acesso em: 11 de maio 2021

KAMAL, M.R.; LAI-FOOK, R.A.; HERNANDEZ-AGUILAR **Residual thermal stresses in injection moldings of thermoplastics: a theoretical and experimental study,** *Polymer Engineering and Science*, Volume 42 Issue 5 pp. 1098-1114 (2002). Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/229865840_Residual_thermal_stresses_in_injection_moldings_of_thermoplastics_A_theoretical_and_experimental_study Acesso em: 16 de maio 2021

KENNEDY, P. K. **Practical and scientific aspects of injection molding simulation.**

2008. 155 f. Thesis for doctor in Eindhoven University of Technology, Netherlands. 2008. Disponível em:
<https://pure.tue.nl/ws/files/3111902/200810899.pdf> Acesso em 11 de maio 2021.

LOPES, L. **Introdução a polímeros.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Semana de polímeros do IMA, 1., Rio de Janeiro, 2007. Disponível em:
<http://www.ima.ufrj.br/uploads/2010/01/30/o-que-sao-polimeros-sinteticos.pdf> Acesso em 11 de maio 2021.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes.** Artliber Ed., 2005.

MICHAELI, W.; et al, **Tecnologia dos Plásticos**, Editora Edgar Blucher Ltda, São Paulo, 1992, pp 103 -115.

MUSTAPHA M.; et al, **Application of CAD/CAE Tools in the Design and Analysis of Plastic Injection Mould.** IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) Volume 13, Issue 1 Ver. IV (Jan. - Feb. 2016), PP 38-40. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/323199122_Application_of_CADCAE_Tools_in_the_Design_and_Analysis_of_Plastic_Injection_Mould Acesso em: 21 de maio 2021

OLIAEI, E.; HEIDARI, B. S.; DAVACHI, S. M.; BAHRAMI, M.; DAVOODI, S.; HEJAZI, I.; SEYTI, J. **Warpage and Shrinkage Optimization of Injection-Molded Plastic Spoon Parts for Biodegradable Polymers Using Taguchi, ANOVA and Artificial Neural Network Methods.** *Journal of Materials Science & Technology.* Elsevier Limited, 2016. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1005030216300688> Acesso em 25 de junho 2021

PINEDO, C.; **Tratamento térmico e superficial do aço inoxidável martensítico AISI 420 destinado a moldes para injeção de polímeros - parte I tratamento térmico.** 2o Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes – ABM, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.heattech.com.br/trabalhos/2004%20-%202o%20ABM%20Moldes%20-%20AISI%20420%20Parte%202.pdf>
Acesso em: 27 de maio 2021.

RODA, D.; **A injetora de Plásticos.** Tudo Sobre Plásticos, 2011. Disponível em: <https://www.tudosobreplasticos.com/processo/injecao.asp> Acesso em: 10 jun. 2021.

TELLES, S. F. I; **Um modelo em rede de Petri para o sistema automático de injeção de uma máquina injetora de plástico.** 2007. Dissertação – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2007-1/2007030901-2007030901/file>. Acesso em 21 de jun. 2021.

TOTI, F. A ; et al, A simulação Criativa, Criando Valor e Tecnologia para Pequenas Empresas e Microempresas no Parque Tecnológico de Sorocaba. *In: XII Ciclo de Debates em Economia Industrial, Trabalho e Tecnologia*, 2016, São Paulo. **Anais do XIV Ciclo de Debates em Economia Industrial, Trabalho e Tecnologia.** São Paulo: EEIT-PUC-SP, 2014. Disponível em: <http://fatecjahu.edu.br/wp-content/uploads/2020/03/Anais-Mostrari-2019-ISBN-978-65-990581-0-3.pdf>
Acesso em: 13 de jun 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a UFRPE pela luta por uma universidade pública, gratuita e de qualidade; Ao Autodesk pela licença

estudantil que permitiu a execução das simulações; A Jessé Dias pela contribuição com o projeto do molde; A coordenadora Verônica Diniz por todo apoio durante a graduação; Ao meu orientador Fernando Dagnone e banca pela atenção e contribuições significativas para o trabalho desenvolvido; Aos meus pais e família pelo incentivo à educação; Ao meu noivo, Fernando Máximo, por todo amor e apoio. Aos amigos que fizeram a graduação mais leve.