

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MARCELLY LULLEZ KARAM

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DO PROCESSO DE
INJEÇÃO UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(Tcc2)

CURITIBA

2019

MARCELLY LULLEZ KARAM

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DO PROCESSO DE INJEÇÃO UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientadora: Profa. Ph.D, Márcia Silva de Araújo.

Co-orientadora: Profa. Dra, Carla Cristina Amodio Estorilio.

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa " ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DO PROCESSO DE INJEÇÃO UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ", realizado pela aluna Marcellly Lullez Karam, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - TCC2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Ph.D, Márcia Silva de Araújo

DAMEC, UTFPR

Orientadora

Prof. David Kretschek

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof. Daphene Marques Solis

DAMEC, UTFPR

Avaliadora

Curitiba, 17 de junho de 2019.

RESUMO

KARAM, Marcelly Lullez. Análise da influência de parâmetros do processo de injeção utilizando simulação computacional. 80 f. Trabalho de conclusão de curso – Tcc2, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

As indústrias de transformação de polímeros termoplásticos por injeção vêm crescentemente adotado os sistemas CAE (*Computer Aided Engineering*) no desenvolvimento de peças e moldes, visando corrigir falhas de projeto antes da execução da ferramenta (molde). A ferramenta CAE permite simular um processo de injeção, considerando o desenho 3D da peça a ser injetada, mostrando o comportamento do polímero durante a injeção e as características da peça após a injeção sob parâmetros previamente especificados. Em 2012, a *Dassault Systemes* lançou o CAE *Solidworks Plastics*, porém, existe pouco material explorando o seu potencial e confiabilidade. Sendo assim, o objetivo desse trabalho é produzir um material didático para a melhor compreensão da influência dos parâmetros de processo de injeção com o auxílio da ferramenta *Solidworks Plastics*. Para isso, este trabalho testou o método de injeção progressiva para determinação dos parâmetros ótimos de injeção e simulou o preenchimento da cavidade usando esses parâmetros e variações entorno desta condição para melhor entender o funcionamento do programa, incluindo suas características e limitações e por fim, mostra um passo a passo do funcionamento das simulações de injeção usando a ferramenta *Solidworks Plastics*.

Palavras-chave: Injeção de Plásticos. Simulação. Solidworks Plastics.

ABSTRACT

KARAM, Marcelly Lullez. Analisis of the injection process parameters influency on a software simulator. 80 p. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Mechanical Engineering Department, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Injection thermoplastic polymer processing industries have been continuously adopting CAE (Computer Aided Engineering) on parts and molding development, aiming for design flaws correction before tool execution (mold). The CAE tool allows to simulate an injection process, considering the 3D drawing design of the part to be injected, demonstrating the polymer behavior during injection and the characteristics of the part after injection under specific parameters. In 2012, Dassault Systemes launched CAE Solidworks Plastics, however, there are not many documents prospecting its potential and reliability. Therefore, the main goal of this work is to produce a courseware to use in class for a better comprehension of the influence of the plastic injection process parameters with the help of the Solidworks Plastics tool. In order to do so, first the present study tested the short shot method to determine the optimum injection parameters for a specific material, then a part simulation was run using these parameters and a variation surrounding this condition to better understand the operation of the soft, including its characteristics and limitations and, finally shows a step-by-step operation of the injection simulation using the Solidworks Plastics tool.

Keywords: Plastics Injection. Simulation. Solidworks Plastics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Injetora coaxial de parafuso e êmbolo	19
Figura 2 - Esquema simplificado de um molde de duas placas.....	22
Figura 4 - Representação de um ciclo de injeção	24
Figura 4 - Menu de seleção de parâmetros do <i>SolidWorks Plastics</i> para malha casca	31
Figura 5 - Janela de seleção do polímero	32
Figura 6 - Janela seleção material do molde.....	32
Figura 7 - Configurações de preenchimento	33
Figura 8 - Configurações avançadas de preenchimento	34
Figura 9 - Configurações de preenchimento	35
Figura 10 - Configurações do empenamento	36
Figura 11 - Configuração do local de injeção	38
Figura 12 - Opções de execução da simulação	39
Figura 13 - Apresentação resultados <i>SolidWorks Plastics</i>	40
Figura 14 - Esquema do processo passo a passo do método de injeção progressiva	42
Figura 15 - Molde corpos de prova.....	46
Figura 16 - Tela inicial do programa <i>SolidWorks Plastics</i>	47
Figura 17 - Mensagem de múltiplos corpos na malha automática	55
Figura 18 - Malha casca automática	56
Figura 19 - Detalhamento canto do modelo 3D com a malha de casca automática..	56
Figura 20 - Comparação malha casca manual de 4 mm <i>versus</i> malha casca manual de 1 mm	57
Figura 21 - Exemplo de malha de 4 mm com refinamento local de 1 mm.....	58
Figura 22 - Correlação entre massa do corpo de prova e o tempo de CPU com o aumento do tamanho da malha.....	60
Figura 23 - Comparação malha casca <i>versus</i> malha sólida	62
Figura 24 - Malha aberta	64
Figura 25 – Tensão de cisalhamento - Simulação 2 <i>versus</i> Simulação 1 <i>versus</i> Simulação 3.....	71
Figura 26 – Vazão <i>versus</i> tempo - Simulação 6 <i>versus</i> Simulação 1 <i>versus</i> Simulação 7	72

Figura 27 – Diferença de largura do modelo 3D.....	72
Figura 28 – Volume, massa e tamanho do modelo 3D	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros iniciais para experimento de injeção.....	43
Tabela 2 - Parâmetros de processo que variaram na simulação	48
Tabela 3 - Resultados em valores médios da etapa de dosagem do método de injeção progressiva.....	50
Tabela 4 - Resultados em valores médios da etapa de velocidade de injeção do método de injeção progressiva.....	50
Tabela 5 - Resultados em valores médios da etapa de pressão de injeção do método de injeção progressiva	51
Tabela 6 - Resultados em valores médios da etapa de tempo de injeção do método de injeção progressiva	52
Tabela 7 - Resultados em valores médios da etapa de tempo de recalque do método de injeção progressiva	53
Tabela 8 - Parâmetros de processo resultantes do método da injeção progressiva .	54
Tabela 9 - Parâmetros selecionados para análise das malhas	58
Tabela 10 - Resumo seleção malha casca	59
Tabela 11 - Resumo seleção malha sólida	65
Tabela 12 - Resultados das simulações.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre programas de simulação de injeção	29
Quadro 2 - Condições de contorno malha casca <i>versus</i> malha sólida.....	37
Quadro 3 - Especificações técnicas injetora Haitian HTF58X B.....	45
Quadro 4 - Especificações técnicas do material HOSTACOM TRC.....	46
Quadro 5 - Parâmetros de processo que não variaram na simulação	48
Quadro 6 - Variações do modelo de malha sólida manual.....	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Pressão máxima de entrada <i>versus</i> tempo – Simulação 0	67
Gráfico 2 – Vazão de entrada <i>versus</i> tempo – Simulação 0	68
Gráfico 3 – Vazão de entrada <i>versus</i> tempo – Simulação 0	69
Gráfico 4 – Vazão <i>versus</i> tempo – Simulação 2.....	70
Gráfico 5 – Massa <i>versus</i> tempo – Simulação 1	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contexto do Tema	13
1.2	Caracterização do Problema	14
1.3	Objetivos	15
1.4	Justificativa	15
1.5	Conteúdo dos Capítulos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Polímeros	17
2.1.1	Polipropileno	18
2.1.2	Máquina Injetora	18
2.2	Processo de Injeção	20
2.2.1	Molde	21
2.2.2	Ciclo de Injeção	23
2.3	Parâmetros de Injeção	25
2.3.1	Principais Pressões	25
2.3.2	Velocidade de Injeção	26
2.3.3	Principais Temperaturas	26
2.3.4	Tempo de Injeção, Recalque	27
2.4	Simulação de Preenchimento de Cavidade de Molde	27
2.4.1	Pacotes Comerciais – Simuladores de Processos de Injeção de Termoplásticos	28
2.4.2	SolidWorks Plastics	29
3	PROCEDIMENTOS	41
3.1	Método da injeção progressiva	41
3.2	Injetora e Molde	44
3.3	Material	46
3.4	Simulação	46
3.4.1	Definição do Tipo de Malha	47
3.4.2	Definição dos parâmetros para simulação	47
4	RESULTADOS	49
4.1	Método da injeção progressiva	49
4.2	Definição do tipo de malha	54
4.2.1	Malha Casca	55
4.2.2	Malha Sólida	61
4.3	Simulação de injeção variando os parâmetros	65
5	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS	76
	APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DO MODELO UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES	80

1 INTRODUÇÃO

A indústria de processamento de polímeros é caracterizada por uma grande variedade de processos, técnicas e materiais. Basta notar que é praticamente impossível não fazer uso de algum produto plástico no cotidiano. A complexidade dos polímeros permitiu a substituição de matérias-primas metálicas e cerâmicas em diversos produtos desde 1870, com a introdução do celuloide, até os dias atuais [1]. Garrafas de vidro, sacolas de papel, tecidos de algodão, canecas de metal, são alguns dos produtos mais comuns que encontraram nos plásticos uma boa solução para custo, produção e diversidade.

A produção de plásticos é um dos segmentos industriais com maior ascensão global no mundo com uma média de 8,7% de crescimento ao ano no período de 1950 e 2012 [2].

Em 2012, o maior produtor desse segmento era a China, com 23% da produção global. O Brasil estava ocupando 2% desse mercado [3]. Em 2016, no Brasil, a indústria de transformação de plástico compreendia 12.539 empresas, sendo 1.108 delas localizadas no estado do Paraná. Essas empresas, foram responsáveis por um total de vendas de 64,9 bilhões de Reais, equivalente a 5,8 milhões de toneladas de transformados plásticos [4]. De acordo com o informe, o consumo de transformados de plástico aumentou quase 33% de 2007 a 2011. Entre as matérias-primas mais utilizadas, o polipropileno (PP) vem em primeiro lugar com 21,9% do mercado [5].

Neste contexto, é possível compreender a importância desta indústria para economia mundial e nacional e da necessidade de se continuar explorando este segmento por meio de investimentos em pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias. É cada vez maior o número de sistemas computacionais voltados a atender a área de desenvolvimento de produtos ou componentes de plástico injetados [6]. Dentre esses sistemas, destacam-se as ferramentas de *Computer Aided Engineering* (CAE), programas de computador desenvolvidos para auxiliar no planejamento de processos de engenharia por meio de simulação computacional.

Os *softwares* de simulação predizem a interação entre o design do produto e o molde, o que reduz custo e tempo de desenvolvimento, além de otimizar as tolerâncias dimensionais das peças [7]. Por isso, não é difícil notar cada vez mais este tipo de

sistema sendo utilizado nas indústrias de plástico, haja visto os ganhos que podem proporcionar na qualidade e produtividade do processo, desde a disposição dos canais de injeção e canais de resfriamento e refinamento de parâmetros como velocidades, pressões, tempos e temperaturas [6,8].

SolidWorks, *Autodesk® Simulation Moldflow®*, *Moldex3D* e *SIGMASOFT®* são alguns exemplos de softwares disponíveis no mercado que funcionam como simuladores que testam virtualmente as condições estabelecidas no projeto a fim de validar se o molde vai desempenhar como planejado.

1.1 Contexto do Tema

A partir de uma pesquisa na plataforma *Scopus*, verificou-se o crescimento da publicação de pesquisas relacionadas ao processo de injeção, sua simulação e o próprio programa *Solidworks Plastics*. Foram pesquisados os termos em inglês “*injection process simulation*” (simulação do processo de injeção), “*plastic injection process*” (processo de injeção de plástico) e “*Solidwork Plastics*” (nome do módulo de simulação de injeção de plásticos do programa *Solidworks*). As duas primeiras buscas retornaram mais de 10 mil resultados, enquanto a busca pelo termo “*SolidWorks Plastics*” retornou somente 128 resultados.

Apesar de serem poucos os estudos publicados que utilizaram a plataforma *SolidWorks*, o programa já era citado como solução para a simulação de injeção de plásticos mesmo antes do lançamento do *SolidWorks Plastics* em 2012 [9].

Kong *et al.* [10], citado por pelo menos 40 artigos de acordo com a busca do *Scopus*, apresenta ainda em 2003 o *SolidWorks* como uma das melhores opções para desenvolvimento de sistema de projeto de molde de injeção de plástico. No artigo são mencionadas três principais vantagens: ambiente semelhante ao *Windows*, fácil aprendizado e baixo valor aquisitivo. Como na época os *softwares* de simulação ainda exigiam alta capacidade das máquinas (*workstations*), essas características permitiram que pequenas e médias empresas pudessem migrar para computadores pessoais.

Nas publicações mais recentes, o *SolidWorks Plastics* foi aplicado na validação do alcance da injeção na geometria de peças plásticas com sistema de canais frios

por Moayyedian, Abhary & Marian, 2015 [11]. O *software* também foi utilizado em 2016 pelos mesmos autores [12] para simular e avaliar os possíveis defeitos internos e externos na injeção de peças plásticas. Ambos os estudos buscaram reduzir o descarte com a otimização das cavidades dos moldes.

Já Miranda & Nogueira [13] utilizaram o *SolidWorks* na análise das variações do processo de injeção variando a pressão de injeção, a temperatura de injeção e a temperatura de molde em um molde sem ventilação. Em todos os estudos, o *software* se mostrou eficaz e atendeu às necessidades das propostas.

Porém, no geral, os resultados ainda mostram uma preferência pelo *SolidWorks* para modelagem 3D das peças e dos moldes. A simulação da injeção plástica aparece discretamente e em raros artigos.

1.2 Caracterização do Problema

As ferramentas CAE têm sido amplamente utilizadas como ferramentas de simulação de processos industriais diversos [11,12,13]. No ramo da indústria de plásticos estes programas contribuem consideravelmente para o projeto de peças plásticas injetadas, uma vez que permitem prever possíveis defeitos ou pontos de melhorias antes mesmo de se fabricar o molde.

A fase virtual do desenvolvimento do projeto contribui na redução de tempo e custos uma vez que implica em maior assertividade na fase real, quando de fato se utiliza o tempo máquina, matéria-prima e outros recursos para realizar o projeto.

Dos programas existentes no mercado atual, o *Solidworks* proporciona uma plataforma multitarefa que permite ao usuário, além de projetar a peça plástica, simular seu processo de fabricação de forma conjunta. Dada a sua configuração, ainda contempla as plataformas *Computer Aided Design (CAD)* e *Computer Aided Engineering CAE*.

Todavia, o *Solidworks*, assim como outras ferramentas CAE, é pouco difundido no meio científico, (em se tratando de artigos, principalmente em português) até o momento (abril, 2018). E, mesmo sendo disponibilizadas licenças estudantis nos computadores dos laboratórios da UTFPR, a falta de um manual didático na língua portuguesa dificulta a aplicação do programa no curso de Engenharia Mecânica. A

melhor compreensão dos conteúdos englobados na disciplina de Processamento de Polímeros, por exemplo, poderia ser facilitada pela inserção de módulos de simulação computacional.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo produzir um material didático para uso em sala de aula para melhor compreensão da influência dos parâmetros de processo de injeção com o auxílio da ferramenta computacional *Solidworks Plastics*.

Para alcançar o objetivo principal, verificou-se como necessárias a compreensão e análise das funcionalidades e características da ferramenta *SolidWorks Plastics*, combinadas com a revisão do processo de injeção de plásticos. Também foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar experimentos de injeção seguindo o método de injeção progressiva para determinar as condições ótimas de injeção.
- b) Simular a injeção de um modelo 3D no programa *Solidworks Plastics* a partir da condição ótima estabelecida no item a.
- c) Gerar um roteiro para simulação de injeção em *Solidworks Plastics*.

1.4 Justificativa

A necessidade de se explorar as ferramentas CAE para injeção de plásticos, bem como o interesse da comunidade acadêmica da UTFPR em aprimorar os conhecimentos sobre a ferramenta *Solidworks Plastics*, sustentam a elaboração deste trabalho. Além disto, a execução deste estudo tem a intenção de compor os materiais acadêmicos didáticos sobre a temática Injeção de Plásticos, incluindo roteiro, exemplos de uso, e análises do produto alvo.

A UTFPR conta atualmente com licenças estudantis do *SolidWorks*, cujos recursos já estão disponíveis para utilização nas disciplinas de Processamento de Polímeros, Projeto Auxiliado por Computador, Métodos Numéricos Computacionais, entre outras.

1.5 Conteúdo dos Capítulos

Neste capítulo introdutivo, apresentou-se o problema da falta de difusão de ferramentas CAE que auxiliam no desenvolvimento de moldes de injeção de plástico a partir de *softwares* de simulação, com destaque para o *Solidworks Plastics*.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão da literatura disponível sobre o processamento de plásticos moldáveis por injeção, bem como um levantamento do histórico do desenvolvimento das ferramentas CAE. Nos tópicos iniciais é apresentado um breve resumo sobre o processo de injeção, as injetoras, os moldes e a matéria-prima que fundamentam o tema principal.

O terceiro capítulo, por sua vez, apresenta o método da injeção progressiva que será utilizado para a definição dos parâmetros ótimos de injeção e, também, apresenta utilização da ferramenta *Solidworks Plastics* com um descritivo sobre sua operação, suas variáveis de entrada e saída e demonstração de simulações.

No quarto capítulo é feita uma análise crítica dos resultados obtidos na simulação e da performance do software, como uma ferramenta de simulação de injeção de plásticos.

A conclusão é apresentada no quinto capítulo junto com as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são revisados os principais conceitos que dão base ao desenvolvimento deste trabalho. O texto inicia com a definição de polímeros, segue para a descrição do processo de injeção desses materiais, bem como os moldes utilizados e finaliza com a apresentação das ferramentas de simulação com foco no *SolidWorks Plastics*.

2.1 Polímeros

Todo polímero é um material composto de unidades químicas que se repetem ao longo da cadeia polimérica. Essas unidades são chamadas de mero e são ligadas entre si por meio de ligações primárias covalentes [14, 15, 16]. Alguns polímeros são constituídos pela repetição de um único mero, sendo denominados de homopolímero, como por exemplo o Polietileno e o Polipropileno. Já um polímero composto por dois ou mais meros diferentes, é chamado de copolímero. [14, 17]. A construção dessa estrutura de meros pode se dar de várias maneiras, como: em blocos, na qual uma sequência de meros tipo A é seguido por uma outra sequência de meros tipo B, como por exemplo o elastômero termoplástico de estireno e butadieno (SBS); alternada, na qual um mero A se alterna com um mero B, (ABABAB) ; de forma aleatória, sem que haja qualquer ordenamento na sequência dos meros (AABABABB), tal como o a borracha de estireno e butadieno (SBR) e, ainda, graftizado ou enxertado, no qual uma cadeia de um único mero se liga a cadeia principal constituída de outro mero, como o terpolímero de acrilonitrila, butadieno e estireno (ABS). A copolimerização tem por função criar um polímero com propriedades diferenciadas dos homopolímeros que podem ser formados a partir dos monômeros que os deram origem. [15, 17].

Polímeros podem ser classificados segundo a resistência mecânica em ordem crescente em: elastômeros, plásticos e fibras. Os elastômeros podem ainda ser subdivididos em borrachas e elastômeros termoplásticos e, os plásticos em termoplásticos e termorrígidos [17].

O trabalho proposto usou para estudo da simulação do processo de injeção um compósito de um copolímero termoplásticos de Polipropileno.

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 [14]. Esse tipo de polímero é mais utilizado em processos de moldagem por injeção, extrusão e sopro [15].

De maneira contrária, os polímeros termorrígidos, após serem curados, não é mais possível voltar ao seu estado anterior devido às ligações cruzadas formadas entre as cadeias [14]. Eles são mais utilizados nos processos de compressão e transferência, podendo também ser moldados por injeção em equipamento e condições diferentes dos termoplásticos [15].

O presente trabalho fez o uso de um polipropileno como matéria-prima, o qual tem suas características apresentadas na sequência.

2.1.1 Polipropileno

O PP foi criado na Itália em 1954 e desde então vem evoluindo, sendo considerado um dos plásticos em maior crescimento. Segundo Manrich (2005), o polipropileno (PP) é um dos polímeros mais utilizados no mundo. Em 2002, ele representava 15% da produção mundial de plásticos. Essa grande produção e, portanto, seu grande consumo se dá devido ao fato de o PP ser muito versátil nas suas propriedades. Muitos são os aditivos que podem ser utilizados para alterar as propriedades e características do polímero fazendo com que o PP seja tanto flexível quanto rígido, por exemplo. O PP possui uma temperatura de transição vítrea baixa (menor que a temperatura ambiente) o que torna difícil sua utilização em baixas temperaturas, entretanto, borracha é um exemplo de aditivo que pode ser utilizado para melhorar o desempenho do PP em baixas temperaturas. Cargas minerais, como talco e carbonato de cálcio, também podem ser adicionadas para formar um compósito, para deixar sua rigidez próxima a dos plásticos de engenharia, que são polímeros com descoberta mais recente e, portanto, mais caros. Por isso, o compósito de polipropileno foi escolhido para ser o utilizado no presente trabalho.

2.1.2 Máquina Injetora

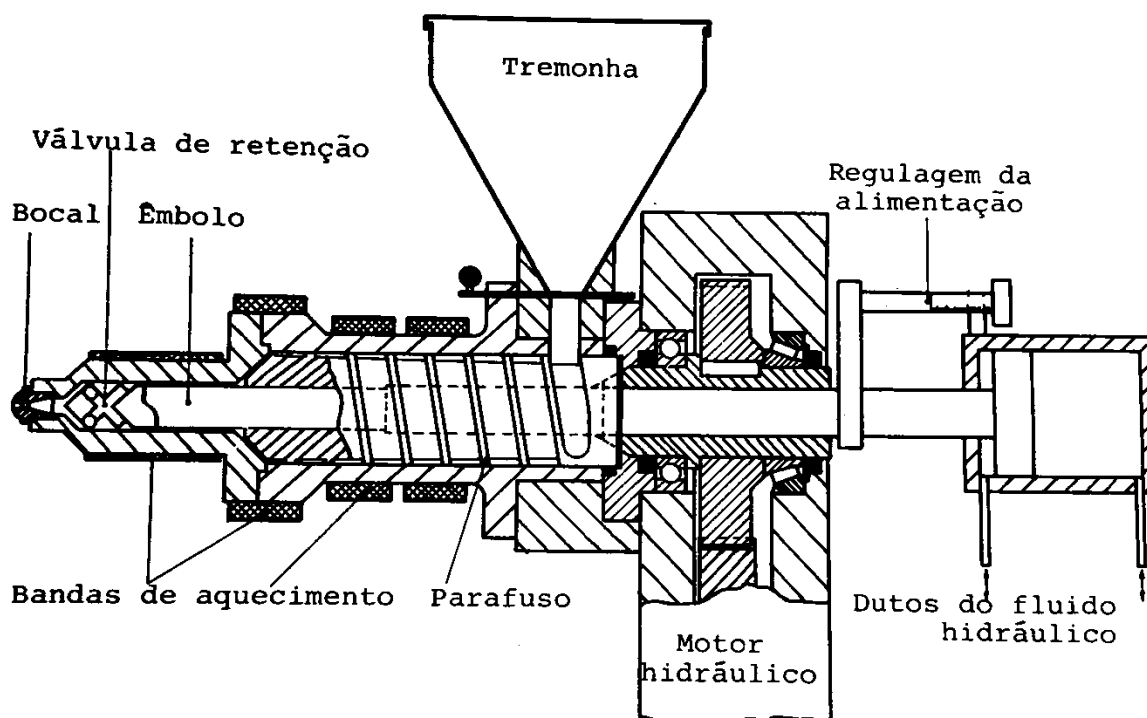
As máquinas injetoras têm como objetivo aquecer o material até a sua plastificação, aplicar uma carga sobre ele com o auxílio de um pistão, para que este seja “injetado” para dentro de um molde fechado, onde vai assumir o formato da

cavidade do molde e posteriormente ser extraído [15]. Essas máquinas possuem vários tamanhos, desde bem pequenas e manuais até modelos hidráulicos de 5,5 mil toneladas de força de fechamento [19, 20].

O presente trabalho será realizado na máquina injetora existente na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), trata-se de uma injetora de rosca recíproca a qual será apresentada em detalhes na sequência.

Segundo Blass [15], uma injetora de rosca recíproca é aquela que possui duas funções, a de fuso e de êmbolo [14], também conhecida como injetora coaxial de parafuso e êmbolo, e é apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Injetora coaxial de parafuso e êmbolo



Fonte: Autoria Própria adaptado de Blass (1988), pg. 162.

O sistema de alimentação da máquina é composto pela tremonha ou funil, o material fica armazenado na tremonha e quando a rosca se move, os *pellets* ou grânulos de matéria-prima entram no cilindro. O cilindro de injeção recebe o polímero em uma extremidade, onde fica localizada a tremonha e na extremidade oposta encontra-se o bocal. Em torno do cilindro encontram-se as bandas de aquecimento,

as quais são, normalmente, compostas de resistores elétricos. A região embaixo da tremonha coluna possui resfriamento a água para evitar que o material funda prematuramente no funil ou na rosca na zona de alimentação [15].

O polímero em contato com a rosca sem fim, que gira dentro do cilindro de aquecimento tem por função plastificar e transportar o material. Quando o fundido passa pela válvula de retenção ou não-retorno ele é acumulado na câmara a frente do bico de injeção da rosca, esta é utilizada para realizar a dosagem, ou seja, a separação da quantidade de polímero necessária para cada ciclo de injeção, este espaço é criado quando a rosca recua e retorna à posição inicial [15].

Quando o bocal da injetora encosta no molde, a rosca passa a atuar como um êmbolo e o bico de injeção da rosca avança e exerce uma pressão hidráulica para injetar o material, e então, o cilindro retorna à posição inicial [15]. O bocal é um furo restrito por onde o polímero deve passar para entrar no molde. Ele tem como finalidade aquecer o material, seja por resistência ou atrito e impedir o vazamento de material enquanto o molde está aberto. Ele é normalmente fechado e com a pressão de injeção a força da mola de fechamento do bocal é superada e ele se abre para dar passagem ao polímero.

Por fim, o motor hidráulico é o responsável por gerar as pressões necessárias no pistão para o seu deslocamento e aplicar as forças de fechamento no molde. As máquinas injetoras têm seu tamanho especificado em função da sua força de fechamento e pela relação entre o comprimento e o diâmetro da rosca [15].

2.2 Processo de Injeção

Na moldagem por injeção, a qualidade do produto está intimamente relacionada, não somente ao conceito da peça (projeto) e seu material, mas ao conjunto de variáveis inerentes ao processamento, isto é, há uma dependência da maneira como efetivamente o produto foi processado durante as etapas de trabalho [18], ou seja, dos parâmetros de processo.

Para entender os parâmetros do processo é interessante assimilar o conceito de ciclo de injeção. A injeção é um processo intermitente, ou seja, não contínuo e que pode ser dividido em duas etapas, na qual uma ocorre no módulo de injeção, que prepara o material a ser injetado, e outro, que ocorre no módulo do molde da injetora,

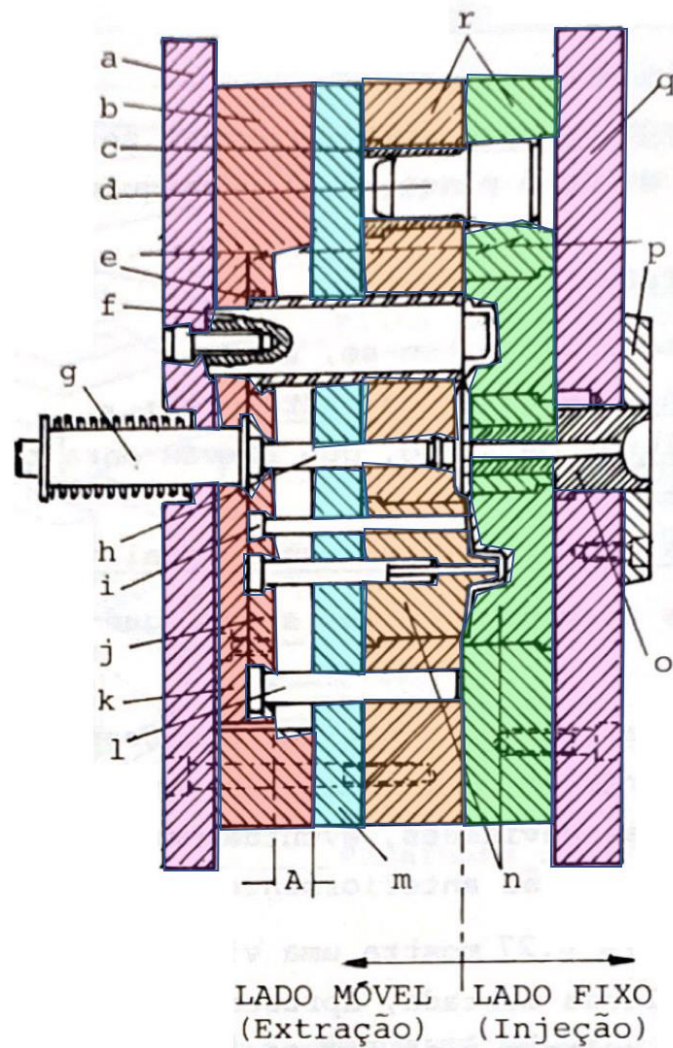
onde ocorre a efetiva injeção do material [14]. A fim de exemplificar esse ciclo, se faz necessário, primeiramente conhecer a máquina injetora e o molde, os quais serão apresentados na sequência.

2.2.1 Molde

Moldes para injeção de plásticos são complexos e possuem grande importância dentro do processo de injeção. Seu desenvolvimento se dá com base na injetora e na matéria-prima que serão utilizadas na produção. Existem diferentes tipos de moldes que podem ser classificados da seguinte forma: molde de duas placas, que se constitui na concepção mais simples; molde de 3 placas, onde a placa central pode abrigar o sistema de distribuição, tornando possível a extração separada dos canais e da peça, e; moldes com canal quente, o qual mantém o sistema de alimentação aquecido para que o material presente lá dentro seja utilizado no próximo ciclo de injeção. Esses três modelos de moldes também podem ser compostos de movimentos (partes móveis) para que seja possível a moldagem de peças com geometrias complexas. [15]

O presente trabalho fará o uso de um molde simples de duas cavidades, o qual será apresentado em detalhes na sequência. Para padronizar a nomenclatura dos componentes, será utilizado como base o Blass (1988). A Figura 2 apresenta um esquema simplificado de um molde de duas placas.

Figura 2 - Esquema simplificado de um molde de duas placas



Fonte: Autoria Própria adaptado de Blass (1988), pg. 186.

Representadas em rosa e marcadas com as letras “q” e “a”, são as placas de base frontal e posterior. Elas servem de base para as cavidades, e no caso da frontal, para os pinos guias e insertos também. A placa do lado fixo recebe o anel localizador da bucha de injeção (“p”) e a bucha de injeção propriamente dita (“o”).

Em verde, tem-se o lado fixo da cavidade (também conhecido como fêmea). É por este lado que o material é injetado. Logo em seguida, representado em laranja, tem-se o lado móvel da cavidade (também conhecido como macho). Nele se encontram os pinos extratores (utilizados para tirar completamente o moldado da cavidade). Neste exemplo, alguns insertos foram utilizados e os mesmos estão representados pela letra “n”.

Indicada pela letra “m” e pintada de cor azul, está a placa de apoio dos insertos que é utilizada para dar suporte.

Em vermelho tem-se os espaçadores, que são utilizados para dar espaço para os movimentos da placa dos extratores e, situada ao meio e indicada pela letra “j”, está a placa de apoio dos extratores que tem como objetivo, manter os pinos extratores em posição.

Na parte superior do molde, representado pela letra “d”, tem-se o pino de guia. Este é utilizado para alinhar ambos os lados do molde. Ao lado do pino guia, marcado pela letra “c”, está a bucha do pino guia, para manter o pino em posição. A letra “e” representa um pino extrator do tipo camisa ou bucha. Ele se encontra em torno de um pino-núcleo macho, indicado pela letra “f”. Este último é utilizado para dar forma ao moldado.

Ao centro, indicado pela letra “g”, está o mecanismo de operação e mola de retorno dos extratores. Em seguida, a letra “h” mostra a haste de tração do canal de alimentação.

Por fim, na parte inferior, encontram-se o pino extrator representado pela letra “i” e o pino de guia dos extratores indicado pela letra “l”.

Além dos sistemas acima indicados, o molde utilizado no presente trabalho, também possui um sistema de refrigeração. Esse sistema funciona a partir da circulação de água através de canais usinados em cada placa do molde [15].

2.2.2 Ciclo de Injeção

O ciclo de injeção é um processo intermitente, que pode ser dividido em ciclo da rosca e ciclo do molde [24].

2.2.2.1 Ciclo da Rosca

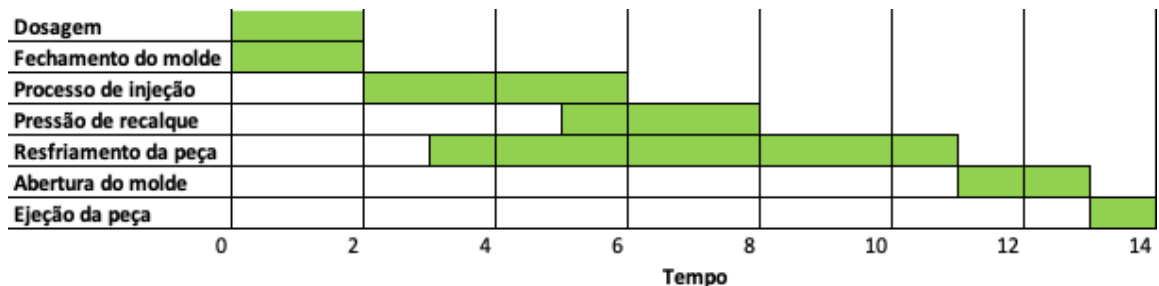
O ciclo da rosca se inicia com o carregamento do polímero, em formato de *pellets*, na injetora através do funil de alimentação. A rosca recíproca, presente dentro do canhão de injeção ou cilindro de aquecimento, recebe esses *pellets* e enquanto aquece e homogeneiza o polímero, também o transporta em direção ao molde por

meio de movimentos giratórios (como um parafuso sem fim), enquanto gira se move para trás. Uma quantidade de material fundido pré-estabelecida, conhecida como dosagem, passa pela válvula de não retorno na rosca e se acumula à frente do bico de injeção, na câmara de dosagem. Esta etapa é denominada de dosagem. Normalmente, a máquina injetora possui uma válvula no bico de injeção, a qual se abre quando o ciclo anterior já se encerrou e o molde encontra-se fechado.

Uma vez encerrado o ciclo de injeção anterior, a rosca para de atuar como parafuso sem fim e passa a empurrar o polímero para dentro da cavidade do molde, como se fosse um pistão. Esta dupla função da rosca dá a ela o nome de rosca recíproca. Após a etapa de injeção, na qual ocorre o preenchimento e a pressurização do molde, o ciclo passa por uma mudança de pressão, este ponto é denominado ponto de comutação. Essa segunda pressão é conhecida como pressão de recalque e faz parte da etapa de empacotamento ou recalque.

Terminado o recalque, a rosca retorna à posição inicial para produzir a próxima dosagem. A Figura 4 ilustra essas etapas:

Figura 3 - Representação de um ciclo de injeção



Fonte: Autoria Própria adaptado de Manrich (2005), pg. 287.

Como é possível observar na Figura 4, o ciclo de injeção, já apresentado, acontece em paralelo com outras etapas. As etapas não mencionadas fazem respeito ao ciclo do molde.

2.2.2.2 Ciclo do Molde

Para que o material fundido possa ser injetado, o molde deve estar fechado e vazio e assim se inicia o ciclo do molde, aplicando uma força de fechamento de molde. Após o polímero passar pelos canais de alimentação e distribuição, o processo de resfriamento começa. Para garantir que a(s) cavidade(s) do molde sejam 100%

preenchida(s) há a manutenção da pressão (etapa de recalque) para compensar a retração sofrida pelo material. O molde permanece fechado após o término das aplicações de pressão, aguardando o término do processo de resfriamento (etapa que demanda mais tempo). Neste tempo, enquanto o molde está fechado, após o tempo de recalque ocorre a dosagem do material para o próximo ciclo de injeção [14].

Uma vez atingida a temperatura solicitada, o molde se abre, a peça é ejetada e o ciclo se reinicia com o fechamento do molde.

Para a realização de ambos os ciclos, diversos parâmetros necessitam ser especificados. São eles que vão determinar as propriedades da peça final. Utilizando uma mesma injetora, mesmo molde e mesma matéria-prima, é possível alterar os parâmetros e ainda assim, obter resultados completamente diferentes.

2.3 Parâmetros de Injeção

Para atingir uma determinada qualidade de um produto injetado, é necessário saber selecionar os parâmetros de processo. Esses parâmetros podem variar com a escolha do material a ser moldado, com o molde, em função da máquina injetora com suas configurações e limitações e com o design da peça [14]. Dentro do conjunto dos parâmetros de processo, existem os parâmetros específicos de injeção que também variam com os fatores acima citados. Tratam-se dos controles de tempo, temperatura, pressão e velocidade. Suas principais propriedades serão exemplificadas na sequência.

2.3.1 Principais Pressões

Existem duas pressões no processo: pressão de injeção e pressão de recalque. A primeira refere-se a pressão exercida pela rosca sobre o material a ser injetado [21]. Ela deve ser aplicada em quantidade suficiente para preencher o molde e de modo a evitar defeitos como manchas (variação da coloração da peça), empenamentos e excessos de contração (peças torcidas ou maiores/menores do que o especificado em projeto), rechupes (variação na espessura da peça) e falhas (falta de preenchimento) [22].

A pressão de recalque auxilia na eliminação desses defeitos e tem como principal função, manter a massa polimérica dentro do molde sob resfriamento, contração uniforme sem retornar ao canhão de injeção [14]. Ela se inicia quando o pistão da máquina injetora para de avançar. É normalmente regulada para o valor de 50% a 60% da pressão de injeção [20], porém essa é somente uma medida de referência. Muitas vezes, o conhecimento utilizado para determinar o valor desses parâmetros é adquirido através do resultado de experimentos de “tentativa e erro” (técnica empírica) [14].

Além dessas duas pressões, também existem: a pressão na válvula do bico injetor, para impedir que vaze material do molde para o canhão, pressão de fechamento do molde (força de fechamento) para manter os dois lados do molde bem fechado e evitar rebarbas, entre outras [22].

2.3.2 Velocidade de Injeção

A velocidade de injeção diz respeito, na verdade, a vazão de material que entra no molde (normalmente medida em centímetros cúbicos por segundo). Ela é regulada de acordo com o formato do produto: peças com paredes finas utilizam velocidades mais altas de injeção e peças mais espessas, necessitam de velocidades mais baixas [22].

Velocidades elevadas geram ciclos menores e favorecem a redução das tensões internas, porém podem causar a queima (manchas com alteração de cor na peça) e esguichamento/turbulência (marcas de esguicho na superfície da peça). Enquanto que, velocidades menores de injeção evitam marcas de fluxo, porém geram um tempo de ciclo maior. Essa velocidade mais baixa também pode ser alcançada alterando a temperatura do material [21].

2.3.3 Principais Temperaturas

São duas as principais temperaturas do processo: temperatura de injeção e temperatura do molde. A temperatura de injeção é determinada com base no tipo de polímero que será injetado. Quanto maior a temperatura do polímero fundido, menor será sua viscosidade, o que reduz o valor da pressão de injeção necessária para

atingir uma determinada velocidade de injeção [21]. O valor ideal para temperatura de injeção vem indicado na tabela de propriedades do polímero escolhido, resta somente configurar o perfil de aquecimento do cilindro de injeção (canhão) [14].

Em relação à temperatura do molde: moldes com temperaturas mais altas geram uma superfície mais brilhante, com redução das linhas de fluxo e das tensões internas, porém resultam em um tempo de ciclo mais elevado pois necessitam de um tempo maior para o resfriamento da peça. Já os moldes com temperaturas mais baixas, resultam em um tempo de ciclo bem mais reduzido, entretanto, geram peças com tensões internas e com risco de quebra durante a extração, sem brilho e com marcas de fluxo. É recomendado a utilização de uma temperatura mínima de 20° C, não ultrapassando de 70° C [21].

2.3.4 Tempo de Injeção, Recalque

O espaço de tempo entre o momento em que a rosca começa a avançar, injetando material para dentro do molde até o momento em que o molde é completo e a rosca para de exercer pressão é denominado tempo de injeção. Ele está diretamente ligado à velocidade de injeção e pressão de injeção [21]. Quando o tempo de injeção não está apropriadamente regulado, pode gerar peças incompletas, ocas, empenadas ou com rechupe.

O tempo de recalque é a etapa que vem logo na sequência. Conforme já apresentado, trabalha-se com uma pressão de recalque baixa (50-60% do valor da pressão de injeção) e o mesmo é válido para o tempo de recalque. Isto se dá pois quanto maior a pressão de recalque e maior o tempo de manutenção dessa pressão, mais tensionada a peça ficará. O ideal é utilizar o mínimo tempo necessário para garantir uma peça com encolhimento controlado e gerando o mínimo de tensões e áreas com rechupe [14].

2.4 Simulação de Preenchimento de Cavidade de Molde

Na área de desenvolvimento de produtos as ferramentas *Computer Aided Design* (CAD) e *Computer Aided Engineering* CAE têm sido amplamente utilizadas [11,12,13]. No ramo da indústria de plásticos estes programas contribuem consideravelmente para o projeto de peças plásticas injetadas, uma vez que simulam

o preenchimento da cavidade do molde, permitindo prever possíveis defeitos ou pontos de melhorias antes mesmo de se fabricar o molde, contribuindo na redução de tempo e custos, uma vez que implica em maior assertividade na fase real, quando de fato se utiliza o tempo máquina, matéria-prima e outros recursos para realizar o projeto.

2.4.1 Pacotes Comerciais – Simuladores de Processos de Injeção de Termoplásticos

Somente ao final da década de 1970 foi lançado o primeiro programa comercial para simulação de preenchimento de molde, o *Moldflow*, criado pela companhia australiana *Moldflow Pty. LTD.* e seu fundador Eng. Colin Austin. Entre as opções em ferramentas CAE para simulação numérica do processo de injeção de termoplásticos, destacam-se os *softwares*: *Solidworks Plastics*, *Moldex*, *Moldflow* e *Sigma* [23],

Em 2013, o *SolidWorks*, que até então era utilizado como ferramenta CAD para a execução dos desenhos que serviam de base para esses programas; começou a comercializar seu próprio pacote de simulação. E, apesar de ser ainda uma novidade no mercado, a ferramenta já estreou competindo diretamente com esses simuladores mais conhecidos. Tanto que muitos usuários já testaram suas possibilidades e compartilham as suas opiniões nos principais fóruns e *sites* sobre *softwares* de injeção.

É o caso de Ed Honda, presidente da Honda Design LLC, que deixou clara sua preferência pelo *SolidWorks* no fórum da própria página [24, 25], alegando que a nova ferramenta traz três grandes vantagens: ambiente nativo *SolidWorks*, banco de dados com maior conteúdo do que o *Moldflow* e a possibilidade de configurar mais condições de processo.

A Revista *Automotive Design & Production Magazine* [26] também já fez sua comparação entre *Moldflow* e *SolidWorks* e, considerando as últimas atualizações de recursos de 2017 como a inserção de imagem de realidade na simulação do bloqueio de válvulas sequencial e as novas opções de controle de válvulas por taxa de volume e tempo, o *SolidWorks* entra no mesmo patamar do seu concorrente, que já está no mercado desde 1978.

A *Mold & Molding Solution Provider* [27], aumentou o leque de comparações e fez um *benchmarking* entre os softwares: *Moldex*, *Moldflow* e *Sigma*, resumido no Quadro 1.

Quadro 1 - Comparação entre programas de simulação de injeção

MOLDEX 3D	MOLDFLOW	SIGMA
<ul style="list-style-type: none"> • Opções limitadas para nível de malha. • Demora para apresentar os resultados. • Custo menor em comparação com os outros. • Fácil configuração dos parâmetros de simulação. • Pior em termos de acuracidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • O pacote básico permite realizar três simulações em paralelo. • Sensível com a qualidade do arquivo CAD. • Possibilidade de várias configurações e parâmetros de processo. • Necessário corrigir a malha. • Várias opções de visualização dos resultados. • Melhor banco de dados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Simulação do molde completo com melhores resultados. • Sem necessidade de corrigir a malha. • Simulação considera temperatura de água constante nas linhas de resfriamento. • Bom rastreamento de partícula para linhas de fechamento.

Fonte: Autoria própria adaptado de *Mold & Molding Solution Provider* [26].

2.4.2 SolidWorks Plastics

O programa *Solidworks* é uma ferramenta CAD de desenho de peças em 3D, no qual é possível projetar peças dos mais variados tipos de processos, inclusive plásticos. Nesta plataforma, foi criado em 2012 o recurso chamado *Solidworks Plastics*, que auxilia no projeto de moldes e peças plásticas por meio de simulação CAE do processo. Esta ferramenta simula o processamento realizado por uma injetora, como o plástico flui da entrada da bucha, em contato com o bico de injeção, até o final da cavidade do molde, resultando em análises úteis para o projeto da peça, prevendo se haverá ocorrência de defeitos comuns do processo [12].

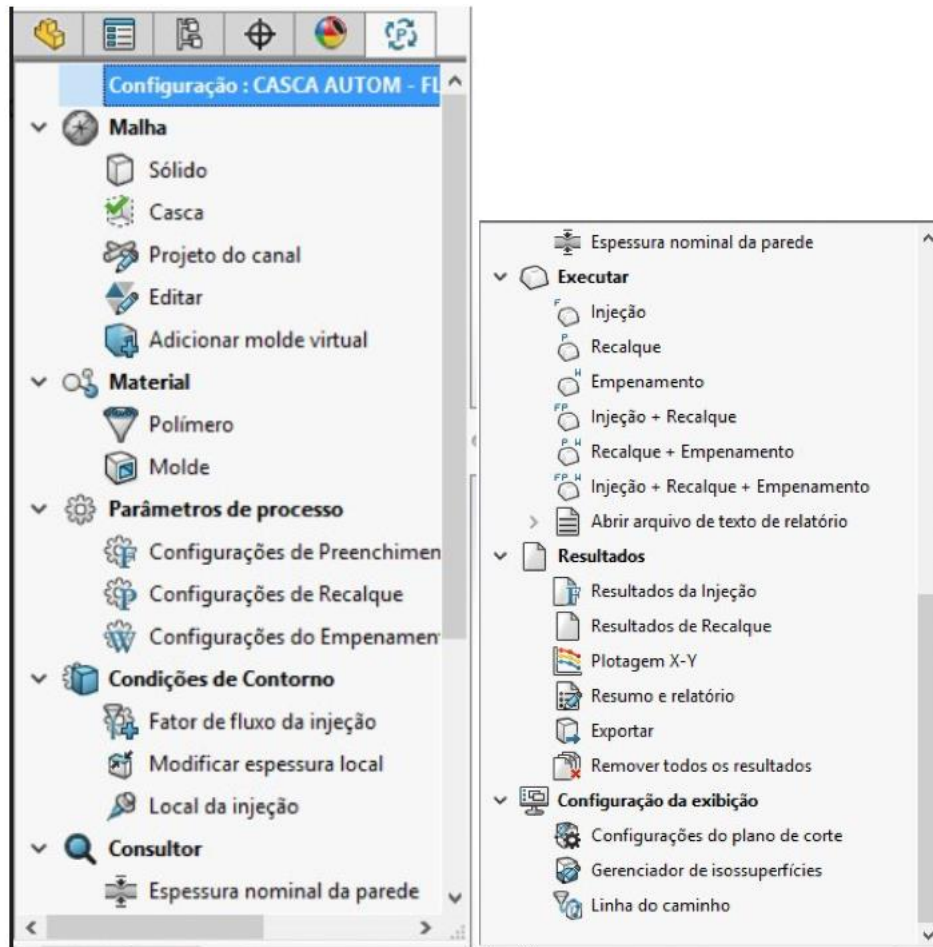
2.4.2.1 Seleção de malha e do material polimérico e do molde

A principal função do programa *SolidWorks Plastics* é apresentar a viabilidade de injeção de uma peça. Essa análise pode ser feita de dois ângulos diferentes: o primeiro é feito a partir de uma peça modelada, verifica-se junto ao programa qual seria a configuração de molde ideal para a injeção, ou seja, utilizar o programa para buscar informações sobre como e onde seria a melhor localização para o ponto de injeção, o melhor formato para os canais de injeção, alimentação, refrigeração e etc, além dos parâmetros de processo. O segundo modo, seria o usuário indicar as configurações de molde que pretende utilizar e receber um retorno do programa se é factível e quais os parâmetros de injeção mais indicados.

Em ambos os casos, é necessário possuir o modelo numérico da cavidade do molde que se pretende utilizar, isto é, um desenho 3D da peça desejada já incluindo a taxa de contração volumétrica necessária. Este modelo pode ser criado dentro do próprio *SolidWorks* e durante as simulações, também é possível editá-lo, caso haja alguma modificação necessária para seja possível realizar a injeção da peça desejada.

A Figura 4 apresenta o menu de opções apresentado pelo *SolidWorks Plastics*.

Figura 4 - Menu de seleção de parâmetros do *SolidWorks Plastics* para malha casca

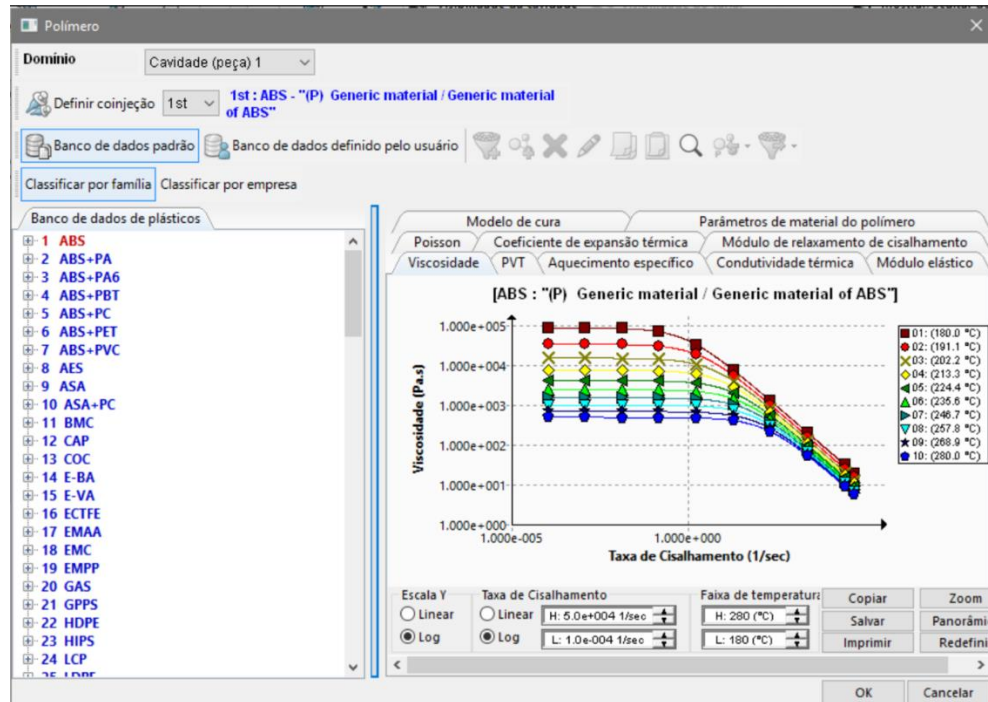


Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora

Dentro da subdivisão malha, é possível editar tanto o projeto dos canais quanto o projeto do molde. Não é possível editar a malha, pois uma vez alterada, perde-se todos os outros parâmetros já selecionados.

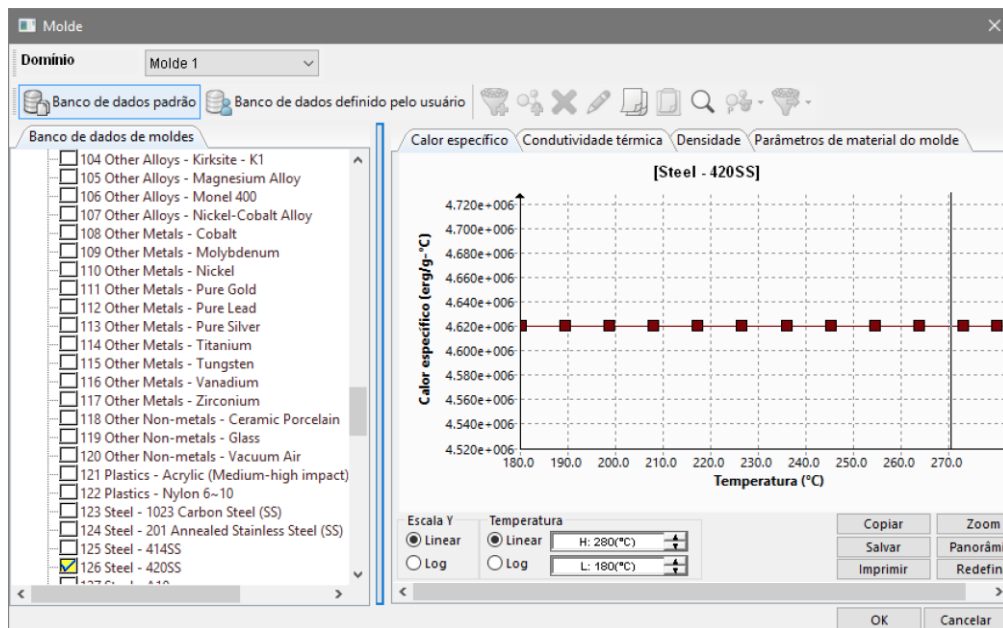
Na sequência, tem-se a aba de materiais. Nela, é possível selecionar tanto o material a ser injetado quando o material do molde a ser utilizado. Essa escolha é feita a partir de um banco de dados de matérias já existentes no próprio programa. Esse banco de dados já é bastante extenso, porém, se necessário, é possível inserir um material manualmente, carregando todas as suas propriedades disponibilizadas pelo fabricante. As Figura 5 e 6 mostram as janelas de seleção do polímero e do material do molde respectivamente.

Figura 5 - Janela de seleção do polímero



Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora

Figura 6 - Janela seleção material do molde



Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora.

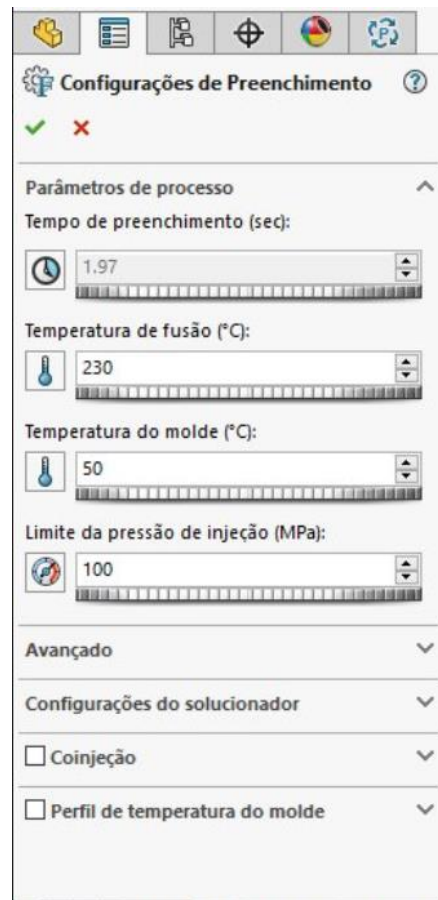
Em ambos os casos, o programa apresenta toda a ficha técnica do material. As informações provenientes dessas fichas técnicas também são utilizadas nas simulações, como por exemplo a temperatura de fusão, a qual não deve ser ultrapassada durante o processo de injeção.

A próxima aba são os parâmetros de processo. Eles são divididos em 3 partes: configuração de preenchimento, configuração de recalque e configuração de empenamento que serão apresentadas na sequência.

2.4.2.2 Configuração de preenchimento

A configuração de preenchimento possui a grande maioria dos parâmetros de processo que é selecionada. A Figura 7 mostra o menu de opções para essa configuração.

Figura 7 - Configurações de preenchimento

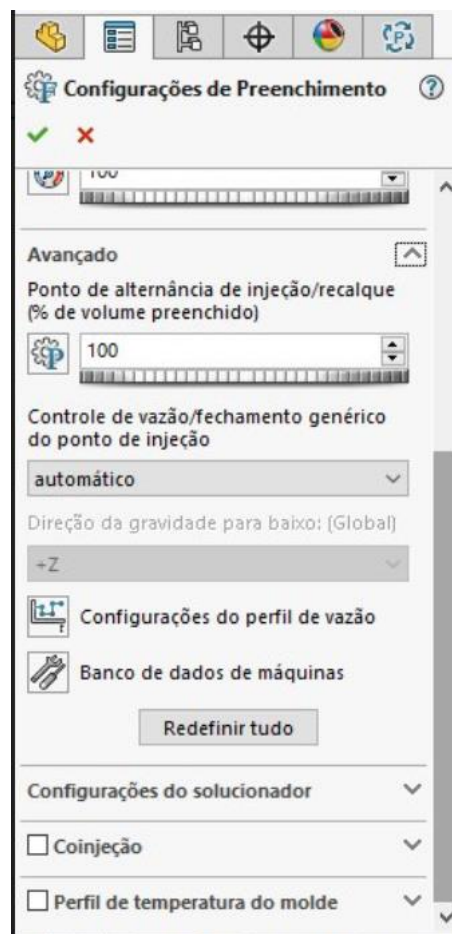


Fonte: Obtido da simulação no SolidWorks feito pela autora.

Todas as configurações já vêm pré-selecionadas pelo programa, porém, todas elas são possíveis de serem alteradas. O tempo de preenchimento sempre vem selecionado o que o programa entende como ideal. A temperatura de fusão é proveniente da base de dados do polímero. A temperatura do molde e o limite de pressão de injeção vem selecionados com 50° C e 100 MPa respectivamente, como padrão do programa.

A Figura 8 mostra a continuação do menu avançado.

Figura 8 - Configurações avançadas de preenchimento



Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora.

Neste campo, é possível selecionar o ponto de alternância entre a fase de injeção e a fase de recalque. Também existe a opção de controle de vazão/fechamento do ponto de injeção para o caso em que se tem mais de um ponto de injeção. Na configuração do perfil de vazão, é possível selecionar uma vazão que

varia em relação a posição da rosca do canhão de injeção (em mm) ou em relação a porcentagem de preenchimento ou tempo de preenchimento do molde.

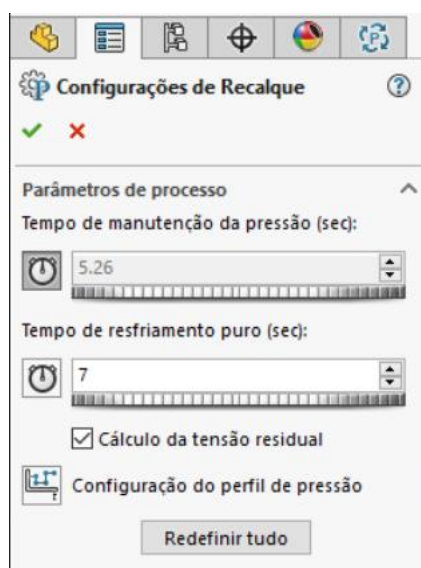
Dentro do *SolidWorks Plastics* existe um banco de dados de máquinas injetoras. Ele serve para auxiliar na escolha dos parâmetros que dependem dos limites da máquina, como por exemplo, o limite de pressão de injeção, porém ele é somente a título de informação, não sendo utilizado para nenhum cálculo.

Por fim, tem-se as configurações do solucionador, trata-se do método que o programa utiliza para fazer os cálculos e ainda existe a opção de incluir um processo de coinjeção e controlar o perfil de temperatura do molde, no caso de ter um molde aquecido, por exemplo.

2.4.2.3 Configurações de recalque

Dentro da configuração de recalque, é possível selecionar o tempo de manutenção da pressão de injeção (tempo de recalque), o tempo de resfriamento puro e, como configuração avançada, também é possível selecionar o perfil de pressão de recalque. É possível variar esse perfil de pressão de acordo com a porcentagem de preenchimento ou de acordo com o tempo. A Figura 9 mostra o menu de seleção destas configurações.

Figura 9 - Configurações de preenchimento

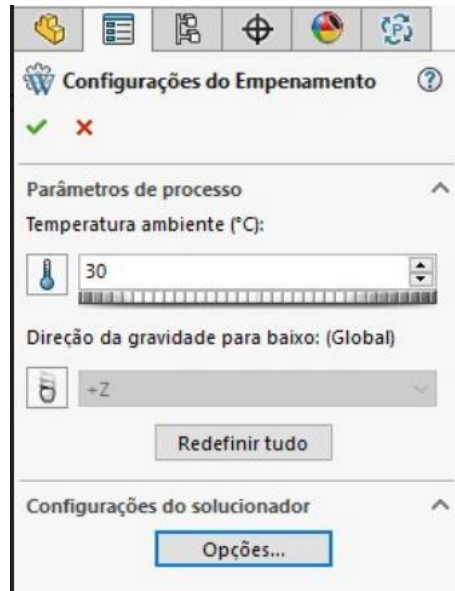


Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora.

2.4.2.4 Configurações do empenamento

A última configuração dos parâmetros de processo é a configuração de empenamento. A Figura 10 apresenta o seu menu.

Figura 10 - Configurações do empenamento



Fonte: Obtido da simulação no SolidWorks feito pela autora













Existem apenas dois parâmetros a serem selecionados: a temperatura do ambiente e a direção da gravidade.

A próxima aba de configurações trata das condições de contorno.

2.4.2.5 Condições de contorno

As condições de contorno variam de acordo com a malha selecionada. O Quadro 2 apresenta ambas as configurações disponíveis.

Quadro 2 - Condições de contorno malha casca versus malha sólida

MALHA CASCA	
<ul style="list-style-type: none">  Condições de Contorno <ul style="list-style-type: none">  Fator de fluxo da injeção  Modificar espessura local  Local da injeção 	
MALHA SÓLIDA	
<ul style="list-style-type: none">  Condições de Contorno <ul style="list-style-type: none">  Temperatura da parede do molde  Elemento do líquido refrigerante  Face da simetria  Canal quente preenchido  Local da injeção  Respiros de ar  Limite do empenamento 	

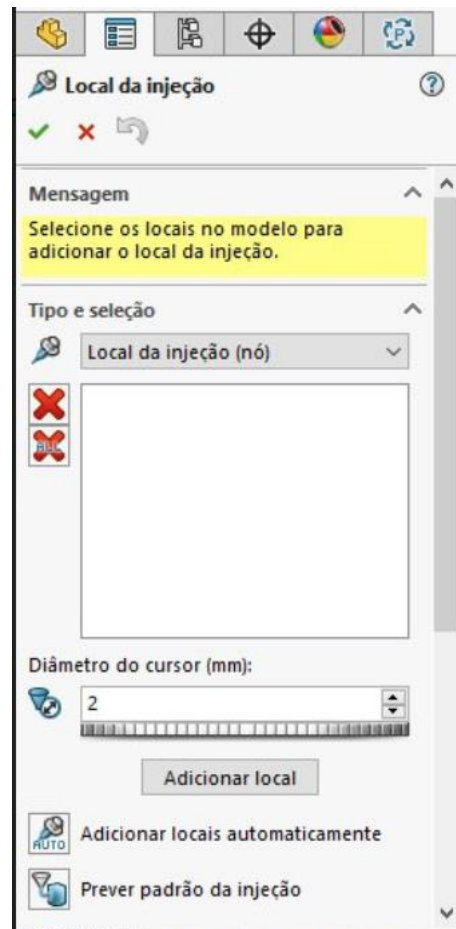
Fonte: Autoria Própria adaptado da simulação no *SolidWorks* feito pela autora.

As condições de contorno podem ser divididas em dois grupos: sistema de resfriamento e local de injeção.

Fator de fluxo de injeção, modificar espessura local, temperatura da parede do molde, elemento do líquido refrigerante, face de simetria, canal quente preenchido, respiros de ar e limite de empenamento são as opções pelas quais é possível determinar as condições de contorno para o sistema de resfriamento. Só é possível a ativação de uma das opções [28]. O método é aplicado nos elementos da malha selecionados.

O local de injeção é onde é feita a seleção do ponto de injeção. A Figura 11 mostra este menu.

Figura 11 - Configuração do local de injeção



Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora.

Nesta etapa, é possível fazer a inclusão de pontos de injeção e válvulas de controle. Os pontos de injeção são circulares e seu tamanho é definido pelo diâmetro do cursor. Para posicioná-lo, é possível optar pela face, onde o programa centralizará o ponto ou optar pelo nó específico em que se deseja colocá-lo. Também é possível optar pelo posicionamento automático dos pontos de injeção, onde o programa fará uma análise da peça e escolherá o local mais apropriado. Existe a possibilidade de prever qual será o padrão de injeção e determinar, neste momento, se o local de injeção se encontra na posição mais favorável.

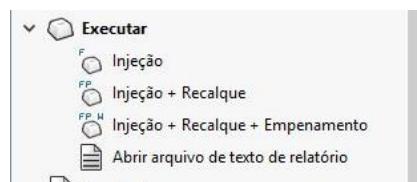
Além disso, é nesta etapa que se seleciona qual bico injetará cada material, quando se tem coinjeção e, a quantidade de cada material.

A última aba do menu antes das simulações é o consultor, nele, é possível analisar a uniformidade da espessura da peça e realizar alterações caso seja necessário.

2.4.2.6 Executando a simulação

Existem três formas de se executar as simulações, as quais são apresentadas na Figura 12.

Figura 12 - Opções de execução da simulação



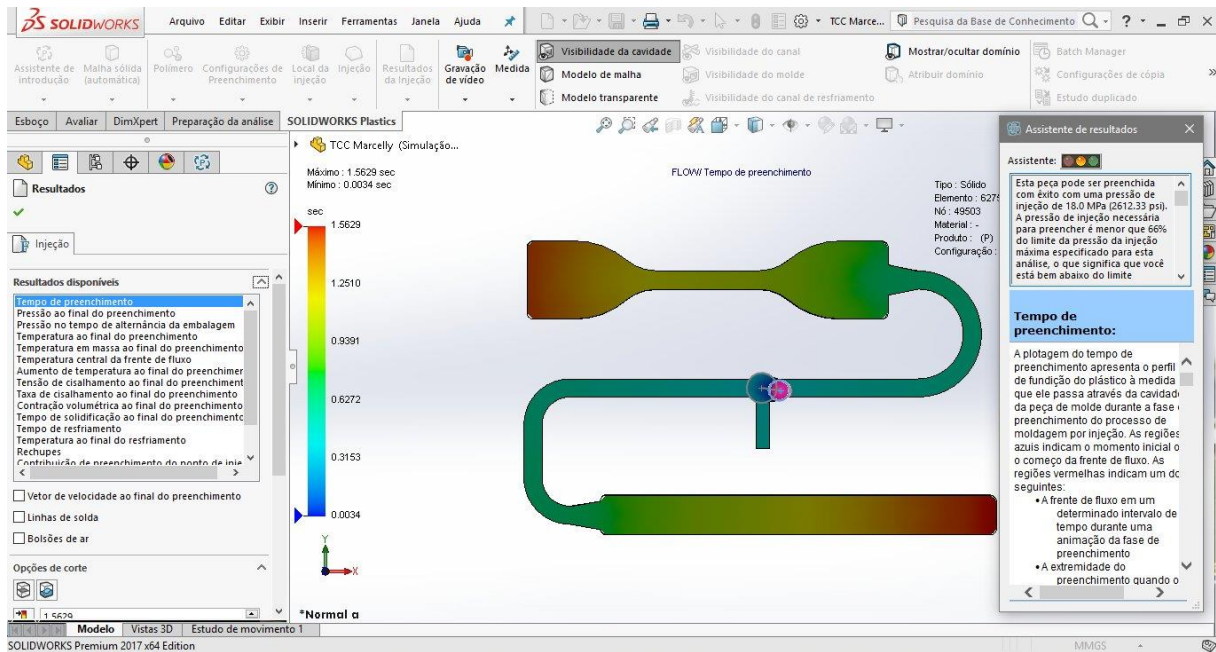
Fonte: Obtido da simulação no SolidWorks feito pela autora

Essas 3 opções existem somente na versão *Premium*, a mais completa. A versão *Standard*, a mais simples, só executa a injeção. A versão *Professional*, segunda na lista de versões, executa todos as 3 análises, porém não inclui a análise de refrigeração [29]. A escolha de qual opção usar depende da quantidade de informações que se deseja receber. Quanto mais fatores para simular, maior será o tempo que levará para o programa executar a simulação.

2.4.2.7 Formato de apresentação dos resultados

Quando a simulação se encerra, o programa automaticamente abre a tela com os resultados obtidos. A Figura 13 apresenta um exemplo destes resultados.

Figura 13 - Apresentação resultados SolidWorks Plastics



Fonte: Obtido da simulação no SolidWorks feito pela autora.

Juntamente com os resultados, o *SolidWorks Plastics* traz o “assistente de resultados”, uma janela onde ele apresenta como foi a injeção da peça, informando se é possível ou não injetar com os parâmetros selecionados e também indica quais são as melhorias ou correções que podem ser feitas.

Todos os resultados são possíveis de serem exportados em formato de imagem ou *gif* e um relatório também pode ser gerado em formato PDF ou Word. Esse relatório contém todos os dados de entrada que o programa utilizou e todos os dados de saída gerados.

3 PROCEDIMENTOS

No presente capítulo, são apresentados os procedimentos adotados para a realização deste trabalho. Esses procedimentos foram divididos em duas etapas: experimental e simulação.

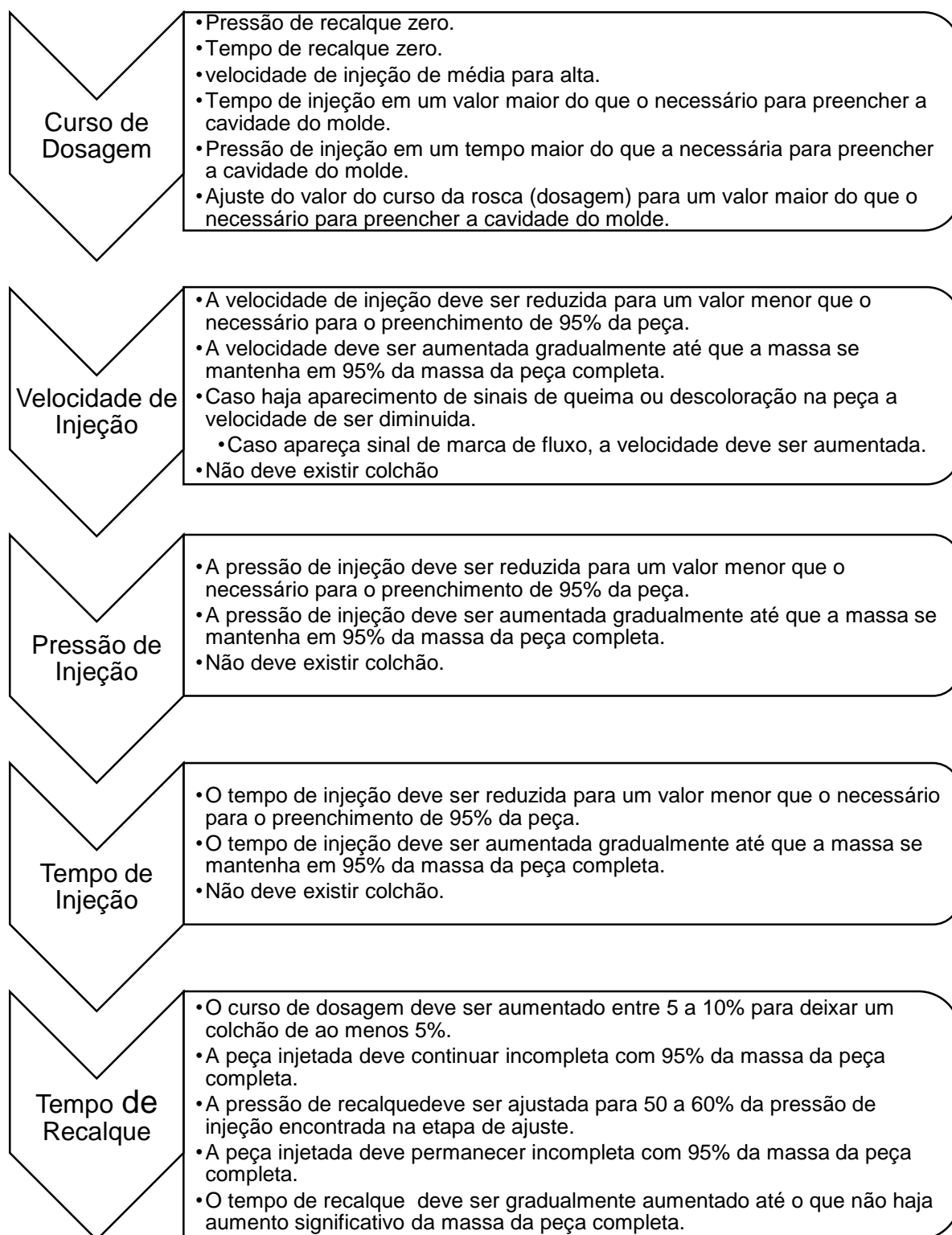
A primeira etapa apresenta o método da injeção progressiva: procedimento adotado para a realização dos ensaios experimentais de injeção, o qual resultou nos parâmetros de processo que foram tomados como base para as simulações computacionais.

A segunda etapa apresenta o modelo físico e numérico utilizado em ambas as etapas e os parâmetros que variaram e os que não variaram durante a simulação computacional em *SolidWorks Plastics*, assim como, a estratégia utilizada para definir as condições de contorno das simulações.

3.1 Método da injeção progressiva

O método da injeção progressiva, também conhecido como “*Short shot method*” apresentado por Barry *et al.* (Apud Busato [31]), consiste em ajustar os parâmetros de injeção passo a passo. O método trabalha com o ajuste dos seguintes parâmetros de processo: quantidade de material (dosagem); velocidade de injeção; pressão de injeção; tempo de injeção, e; tempo de recalque, tal como apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Esquema do processo passo a passo do método de injeção progressiva



Fonte: Autoria Orientadora feito a partir do texto de Busato (2004).

Para iniciar o método, foram estabelecidos parâmetros de injeção indicados na Tabela 1, no qual os valores em negritos foram os ajustados pelo método. O perfil de temperatura no cilindro de aquecimento foi 230, 230, 220 e 210 °C, visto que a temperatura de injeção indicada para este material é 230 °C segundo a biblioteca do *SolidWorks Plastics*.

Tabela 1 - Parâmetros iniciais para experimento de injeção

Parâmetros	Condições Iniciais
Perfil de temperatura	230 / 230 / 220 / 210 °C
Pressão de injeção (Pi)	90 MPa
Tempo de injeção (ti)	3s
Velocidade de injeção (vi)	20 mm/s
Pressão de recalque (Pr)	0
Tempo de recalque (tr)	0
Tempo de resfriamento	3 s
Temperatura do molde	20° C

Fonte: Autoria Própria

O primeiro parâmetro regulado é a dosagem. Trata-se da quantidade de material que será separado dentro do canhão da injetora para ser empurrado para dentro da cavidade do molde. Para o cálculo dessa quantidade de material, normalmente, também deve-se levar em consideração a quantidade de material a ser utilizada na fase de recalque, assim como, alguma sobra de material. Essa sobra é denominada colchão. O colchão representa 5% do material a mais do definido na dosagem para preencher a cavidade, mas que não é utilizado nesta etapa.

Assim sendo, nesse primeiro ajuste, a etapa de recalque não é considerada e os parâmetros para a etapa de injeção são maiores do que as necessárias para preencher a cavidade do molde, tal como exibido na Tabela 1, o que exige um conhecimento prévio do molde ou muita experiência. Peças são injetadas e o peso conferido, este deve aumentar ou diminuir até atingir de 95 a 98% do preenchimento completo, no experimento se optou por 95%, para isso foram feitos incrementos no

volume de material pelo aumento do cursor do fuso, sem colchão, ou seja, o fuso deve estar no seu fim de curso neste estágio. Ao final desta etapa ficou definida a dosagem do material sem colchão.

Na segunda etapa, a velocidade de injeção é ajustada, num primeiro momento é diminuída significativamente e depois gradualmente aumentada até que o valor de 95% da massa da peça completa seja atingido. Se houver próximo ao ponto de injeção queima ou descoloração, ou ainda, se a peça ficar muito mole após a extração esta deve diminuir mais, de modo sumir com o problema. Entretanto, se próximo do ponto de injeção houver marcas de fluxo (marca fria), então a velocidade de injeção deve ser reduzida. Ao final desta etapa não deve haver colchão e a peça deve continuar incompleta.

O ajuste do tempo de injeção da mesma forma que o ajuste da velocidade deve ser diminuído significativamente e depois aumentada gradualmente, ao final, a peça incompleta tem que se manter em 95% em massa do preenchimento na cavidade, sem deixar colchão.

Antes de ajustar o tempo de recalque o cursor da máquina é ajustado para 5 a 10% a mais do que o definido na primeira etapa de dosagem. No presente trabalho, o aumento foi de 10% e foi deixado um colchão de 5%. A peça injetada deve parecer com a anteriormente injetada, porém com colchão, já que o tempo e a pressão de recalque estão zerados. A pressão de recalque pode ser ajustada para 50 ou 60% da pressão de injeção, sendo 60% a escolhida. A peça injetada ainda deve se manter com 95% da massa. Somente então, o tempo de injeção deve ser aumentado até que não haja aumento significativo da massa na peça completa.

O resultado obtido desse procedimento foi utilizado como base para as simulações realizadas no programa *SolidWorks Plastics* para efeito comparativo.

3.2 Injetora e Molde

Para a realização do presente estudo, o Núcleo de Prototipagem e Ferramental (NUFER) da UTFPR permitiu o uso da injetora, concedeu o molde bipartido usado para injeção em termoplástico e, forneceu o modelo 3D utilizado para a sua confecção. O desenho 2D do modelo utilizado nas simulações encontra-se no Apêndice A.

As moldagens por injeções foram realizadas em uma máquina injetora Haitian HTF58XB, cujas especificações técnicas encontram-se no Quadro 3.

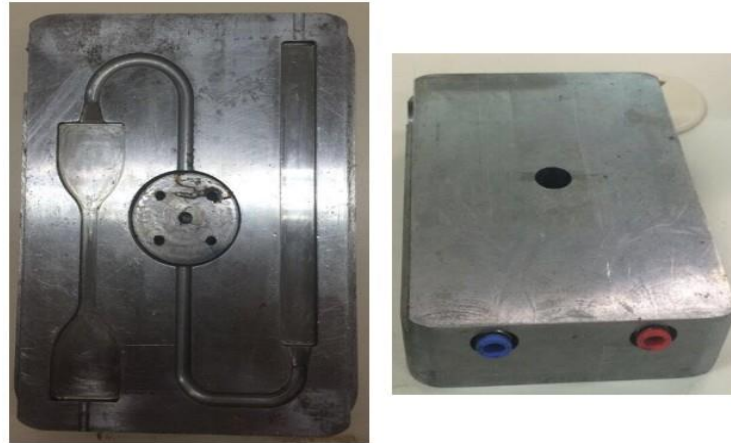
Quadro 3 - Especificações técnicas injetora Haitian HTF58X B

Propriedade	Unidade	Grandeza
Diâmetro do parafuso	mm	30
Razão do parafuso	L/D	21
Volume de injeção teórico (PS)	cm ³	88
Peso de injeção	g	80
Velocidade de injeção	mm/s	127,4
Capacidade de plastificação	g/s	9,3
Pressão máxima injeção	MPa	184
Velocidade da rosca	rpm	0-225
Força de fechamento do molde	kN	580
Curso abertura	mm	270
Espaço entre colunas	mm	310x310
Tamanho máximo do molde	mm	320
Tamanho mínimo do molde	mm	120
Curso de extração	mm	70
Força de extração	kN	22
Pontos de extração	PC	1
Pressão máxima bomba	MPa	17,5
Motor principal	kW	11
Potência de aquecimento	kW	5,1
Dimensões da máquina	m	404x1,0x1,72
Peso da máquina	T	2,5
Capacidade do funil	kg	25
Capacidade de óleo	L	140

Fonte: Catálogo Haitian (2010) [30].

O molde, apresentado na Figura 15, foi fabricado em aço AISI 1045 e é composto por duas cavidades sendo elas corpos de prova de tração (segundo a norma ASTM D638) e de flexão (segundo a norma ASTM D790).

Figura 15 - Molde corpos de prova



3.3 Material

A matéria-prima polimérica usada é um compósito termoplástico com carga mineral denominado HOSTACOM TRC 160N da Lyondell Basell. Suas especificações técnicas dadas pelo fornecedor encontram-se no Quadro 4.

Quadro 4 - Especificações técnicas do material HOSTACOM TRC

PROPRIEDADES REOLÓGICAS		
Índice de fluidez, MFI	14	g/10min
MFI Temperatura	230	°C
MFI Carga	2,16	kg
PROPRIEDADES MECÂNICAS		
Tensão de escoamento	18	MPa
Res. Impacto Charpy c/ entalhe, +23°C	45	kJ/m ²
Res. Impacto Charpy c/ entalhe, -30°C	4,5	kJ/m ²
PROPRIEDADES TÉRMICAS		
Temperatura de deflexão térmica, 1,80MPa	53	°C
Temperatura de deflexão térmica, 0,45MPa	90	°C
OUTRAS PROPRIEDADES		
Densidade	1010	kg/m ³

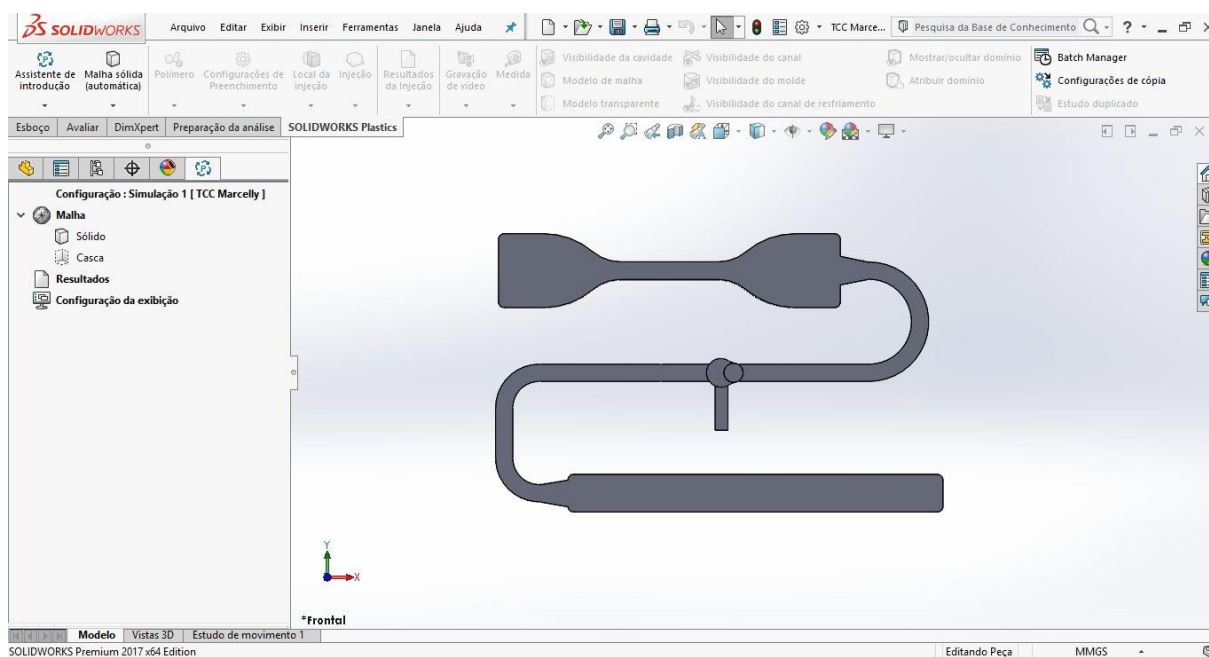
Fonte: Hostacom TRC 160N Data Sheet [32].

3.4 Simulação

Com o modelo 3D pronto, é possível iniciar a simulação. Para tal, foi utilizado o programa *SolidWorks Plastics 2017* na versão *premium* em um computador com processador intel i3, 4Gb de memória RAM, HD de 1Tb e Windows 10.

A Figura 16 mostra a tela inicial do programa *SolidWorks Plastics*.

Figura 16 - Tela inicial do programa *SolidWorks Plastics*



Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora

3.4.1 Definição do Tipo de Malha

A simulação se inicia com a seleção do tipo de malha, assim foram feitas simulações com a malha casca no modo automático e manual com aberturas de malha de 1 e 4 mm. Da mesma forma foi testada a malha sólida automática e manual com diferentes tipos de abertura (entre 10mm e 0,5mm). Uma comparação quanto ao número de nós e quantidade de elementos entre a malha casca e malha sólida foi feita no modo automático.

3.4.2 Definição dos parâmetros para simulação

A partir dos parâmetros ótimos encontrados na execução do método da injeção progressiva, esses foram variados em uma mesma proporção para cima e para baixo do valor encontrado e, testados individualmente com base na injeção ideal. A Tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros variados nas simulações. A simulação na condição automática do programa representa a simulação de número 0, sem seleção prévia dos parâmetros de injeção e, o resultado do método da injeção progressiva é de número 1.

Tabela 2 - Parâmetros de processo que variaram na simulação

PARÂMETROS	NÚMERO DA SIMULAÇÃO											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Pressão injeção (MPa)	15,83	30	50	10	30	30	30	30	30	30	30	30
Tempo injeção (s)	1,92	2,5	2,5	2,5	4,5	0,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Velocidade injeção (cc/s)	15,01	17	17	17	17	17	27	7	17	17	17	17
Tempo recalque (s)	5,43	2	2	2	2	2	2	2	4	0	2	2
Ponto de alternância (%)	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	100	90

Fonte: Autoria Própria

Como o programa não realiza a análise da máquina injetora, não foi possível ter como variável a inclusão do colchão, portanto, foi escolhido variar o ponto de alternância entre a fase de injeção e a fase de recalque. Para tal, foi adotado o valor de 95% como padrão, pois foi a porcentagem de preenchimento que o método da injeção progressiva buscou alcançar e o mesmo foi variado entre 100% e 90%.

Para realizar a variação da velocidade de injeção, se faz necessário a utilização da função de perfil de vazão do *SolidWorks Plastics* e para tal, adotou-se a opção de valor absoluto, variando a vazão em função do tempo de injeção. O mesmo se faz necessário para a pressão de recalque a qual é ajustada por meio do perfil de pressão. Os parâmetros que não foram variados nas simulações estão informados no Quadro 5.

Quadro 5 - Parâmetros de processo que não variaram na simulação

PARÂMETROS	CONDIÇÃO
MALHA	Sólida automática
POLÍMERO	PP HOSTACOM TRC160N
MOLDE	Aço 1045
TEMPERATURA DO MOLDE	20°C
DIÂMETRO DO PONTO DE INJEÇÃO	6mm
PRESSÃO DE RECALQUE	60% da pressão de injeção

Fonte: Autoria Própria

A seleção do polímero, material do molde, temperatura do molde, tamanho do ponto de injeção e a pressão de recalque, foram selecionados com base nos materiais e condições utilizados no procedimento experimental.

4 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados, primeiramente, os resultados experimentais e na sequência os resultados das simulações com base na metodologia explicada no Capítulo 3.

4.1 Método da injeção progressiva

Para garantir uma confiabilidade dos resultados experimentais, foram injetadas pelo menos 7 amostras de cada condição estabelecida, sendo as duas primeiras descartadas e para controle, as 5 peças remanescentes foram pesadas em balança analítica com precisão centesimal e realizada a média aritmética entre elas. Da mesma maneira, foram injetadas, em condições ideais já conhecidas, 5 peças completas para ter como referência o peso de uma peça 100% preenchida. Estas, tiveram como média o valor de 18,03g.

O início das simulações se deram com os parâmetros de injeção estabelecidos na Tabela 1 no Capítulo 3 Procedimentos, no qual os valores em negritos foram os ajustados pelo método da injeção progressiva.

O primeiro parâmetro testado foi a dosagem, nesse primeiro momento, foram definidos o tempo e a pressão de recalque iguais a zero, portanto, esta etapa do ciclo de injeção não foi realizado e também não foi permitido nenhuma quantidade de colchão, ou seja, 100% da matéria-prima preparada pela máquina injetora foi empurrada para dentro das cavidades do molde. No segundo teste, a peça injetada com 18,03g apresentou preenchimento do molde, assim foi escolhido como referência para o cálculo da percentagem, tal como mostrado na Tabela 3. O teste 4 foi o que apresentou o valor mais próximo de 95% que foi definido como a meta. Optou-se, então, por seguir com 27 centímetros cúbicos (cc) de material na dosagem, pois o mesmo encontrava-se dentro da faixa solicitada pelo método (de 95% a 98% preenchida).

Tabela 3 - Resultados em valores médios da etapa de dosagem do método de injeção progressiva

Teste	Dosagem* (cc)	Massa (%)
1	25	89
2	30	100
3	28	99
4	27	96

* cc = centímetro cúbico

Fonte: Autoria Própria

O segundo passo foi o ajuste da velocidade de injeção. Se fez necessário reduzir a velocidade de injeção neste estágio, que era inicialmente de 20 mm/s, para depois aumentar gradualmente, os resultados estão apresentados na Tabela 4. Foram, então, testadas 3 configurações variando a velocidade de injeção, visando manter a porcentagem de preenchimento da peça em torno de 95%. Como pode ser visto na Tabela 2, o Teste 1 apresentou a velocidade de 10 mm/s com 84% de preenchimento e, o Teste 2, 15 mm/s com 94% foram descartados por estar abaixo de 95%, apenas o teste 3 com velocidade de injeção de 17 mm/s atingiu 95%. Assim sendo, a velocidade escolhida foi de 17 mm/s, que não apresentou queima nem descoloração do material próximo ao ponto de injeção, não estava muito mole após a extração, nem tão pouco apresentou marcas de fluxo próximo ao ponto de injeção.

Tabela 4 - Resultados em valores médios da etapa de velocidade de injeção do método de injeção progressiva

Teste	Velocidade de Injeção (mm/s)	Massa (%)
1	10	84
2	15	94
3	17	95

Fonte: Autoria Própria

O terceiro passo diz respeito a pressão de injeção. No procedimento indicado pelo método, deve-se iniciar os testes selecionando uma pressão insuficiente para preencher o molde e, aumentar a mesma gradativamente até que a peça esteja, novamente, entre 95% e 98% preenchida e com aspecto similar ao apresentado na configuração selecionada no passo um e dois (27cc de material para dosagem e velocidade de injeção de 17 mm/s, e o restante dos parâmetros idênticos aos selecionados inicialmente). Como a pressão necessária para não preencher a cavidade é desconhecida, o procedimento inverso foi adotado: reduziu-se a pressão de injeção gradativamente até que a porcentagem de preenchimento estivesse abaixo de 95%. Foram necessárias seis diferentes configurações para atingir o objetivo, as quais são apresentadas na Tabela 5. A pressão mais alta alcançada ainda mantendo 95% de preenchimento, foi 50 MPa e, portanto, foi o valor inicialmente selecionado para dar sequência. A menor pressão na qual não houve alteração significativa no valor de 95% de preenchimento foi 30 MPa.

Tabela 5 - Resultados em valores médios da etapa de pressão de injeção do método de injeção progressiva

Teste	Pressão de Injeção (MPa)	Massa (%)
1	70	95%
2	60	95%
3	50	95%
4	40	94%
5	30	94%
6	20	71%

Fonte: Autoria Própria

O quarto passo do método trata do tempo de injeção, cujos resultados são mostrados na Tabela 6. Com a pressão de injeção definida como 50 MPa, a velocidade foi reduzida para 2s, que apresentou 93% da massa da peça completa, assim o tempo foi aumentado até 2,5 s, que atingiu 94%. Ainda não sendo o resultado esperado, testou-se, mais uma vez, a mesma configuração escolhida no passo 3 com 3 s de tempo de injeção, que resultou em 94% de preenchimento. Com esses

resultados, é possível perceber que na condição ensaiada de 50 MPa, uma variação de 0,5 s no tempo de injeção, na máquina injetora usada, não era significativa, mantendo o resultado de 2,5 segundos em 3 segundos. Nesta situação, foi realizada mais uma injeção com tempo de 5 segundos, entretanto, houve um aumento de apenas 1% com mais 2 s de injeção. As medições foram consideradas muito similares, confirmando que o valor de 3 segundos estava apropriado. Decidiu-se, então, manter o tempo de injeção em 3 segundos e seguir com o processo experimental do método de injeção progressiva.

Tabela 6 - Resultados em valores médios da etapa de tempo de injeção do método de injeção progressiva

Teste	Tempo de Injeção (s)	Massa (%)
1	2	93
2	2,5	94
3	3	94
4	5	95

Fonte: Autoria Própria

O quinto e último passo é o ajuste do tempo de recalque. As configurações anteriormente apresentadas não continham a operação de recalque. Entretanto, antes de iniciar a inclusão dessa etapa no processo, segundo o método, faz-se necessário reconfigurar a dosagem do material para que possa existir um colchão que será utilizado no recalque. Deve-se aumentar em 5% a 10% a dosagem, o valor escolhido foi 10%, ou seja, 30 cc, o que deveria garantir o preenchimento de 100% das cavidades e um colchão de pelo menos 5% deste valor. Na sequência, o método indica um teste, a injeção com os mesmos parâmetros selecionados na etapa anterior (sem pressão ou tempo de recalque), o resultado deve ser peças com as mesmas medidas e aparências.

Contudo, ao realizar o Teste 1 da Tabela 7, com os parâmetros de injeção de pressão de injeção de 50MPa, tempo de injeção igual a 3 s e pressão e tempo de recalque iguais a zero, resultou em peças com média de 100% de preenchimento, o que foge do objetivo do método. Levando em consideração que a máquina não é

sensível a pequenas modificações de tempo de injeção, conforme indicado no passo quatro, decidiu-se retornar ao passo 3 e alterar a pressão de injeção escolhida de 50 MPa para 30 MPa, a menor pressão com 94% de preenchimento. No Teste 2, a média dos valores encontrados de 99% de preenchimento ainda é maior que o esperado. Como a pressão tinha sido bastante reduzida, optou-se por alterar o tempo de injeção de 3 s, pois parecia muito longo, assim foram testados os tempos de 2 e 2,5 s, Testes 3 e 4, respectivamente, com resultados de 82% e 96%. Consequentemente, o tempo de injeção ideal foi alterado para 2,5 s, visando se aproximar da zona entre 95% e 98% de preenchimento das cavidades.

Tabela 7 - Resultados em valores médios da etapa de tempo de recalque do método de injeção progressiva

Teste	Pressão de Injeção (MPa)	Tempo de Injeção (s)	Pressão de Recalque (MPa)	Tempo de Recalque (s)	Massa (%)
1	50	3	0	0	100
2		3			99
3		2	0	0	82
4		2,5			96
5	30			0	96
6		2,5	18	1	99,5
7				1,5	99,8
8				2	100

Fonte: Autoria Própria

Desta forma, após a redução da pressão de injeção no passo três e do tempo de injeção no passo quatro, o método da injeção progressiva foi seguido normalmente. O quinto passo solicita a definição do tempo de recalque, partindo de zero e aumentando gradativamente até que encontre uma peça completa, no qual a cavidade do molde seja 100% preenchida, no presente trabalho optou-se por um tempo em que as cinco amostras obtidas no teste obtivessem essa condição, no caso o Teste 8 com 2 s de tempo de recalque.

O método da injeção progressiva, resultou nos parâmetros de injeção indicados em negrito na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros de processo resultantes do método da injeção progressiva

Parâmetros	Condições finais
Perfil de temperatura	230 / 230 / 220 / 210 °C
Dosagem	30 cc
Pressão de injeção (Pi)	30 MPa
Tempo de injeção (ti)	3s
Velocidade de injeção (vi)	17 mm/s
Pressão de recalque (Pr)	18 MPa (60% de Pi)
Tempo de recalque (tr)	2s
Tempo de resfriamento	3 s
Temperatura do molde	20° C

Fonte: Autoria Própria

Esses parâmetros foram utilizados para dar início às simulações no programa *SolidWorks Plastics*.

4.2 Definição do tipo de malha

Para o cálculo do preenchimento do molde, o *SolidWorks Plastics* utiliza o método dos elementos finitos para resolver as equações das pressões de processo. Todas as equações utilizadas pelo programa são explicadas por Miranda (2017). Esse método de cálculo, necessita que uma malha de elementos seja criada sob a peça para que o número de nós e elementos criados seja utilizado no cálculo. É de extrema importância a seleção/criação da malha, pois é ela que vai determinar o quão preciso são os resultados retornados pelo programa.

As malhas podem ser criadas de duas formas principais: casca ou sólida e dentro de cada uma delas, é possível gerar a malha manualmente ou automaticamente. Cada

uma das formas tem um objetivo e retorna um resultado diferente os quais são apresentados na sequência.

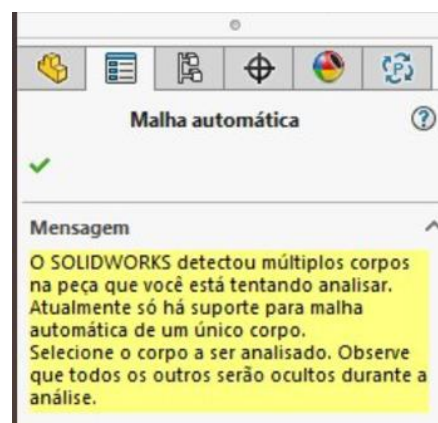
4.2.1 Malha Casca

A malha casca é a mais simples que o programa pode gerar. Ela leva em consideração somente o exterior (a “casca”) do modelo 3D e não sua espessura. Este tipo de estrutura é recomendado para uso em peças com espessuras menores que 3mm, na qual a sua área de seção transversal é muito menor que o tamanho da peça em si (exemplo: chapas) [28].

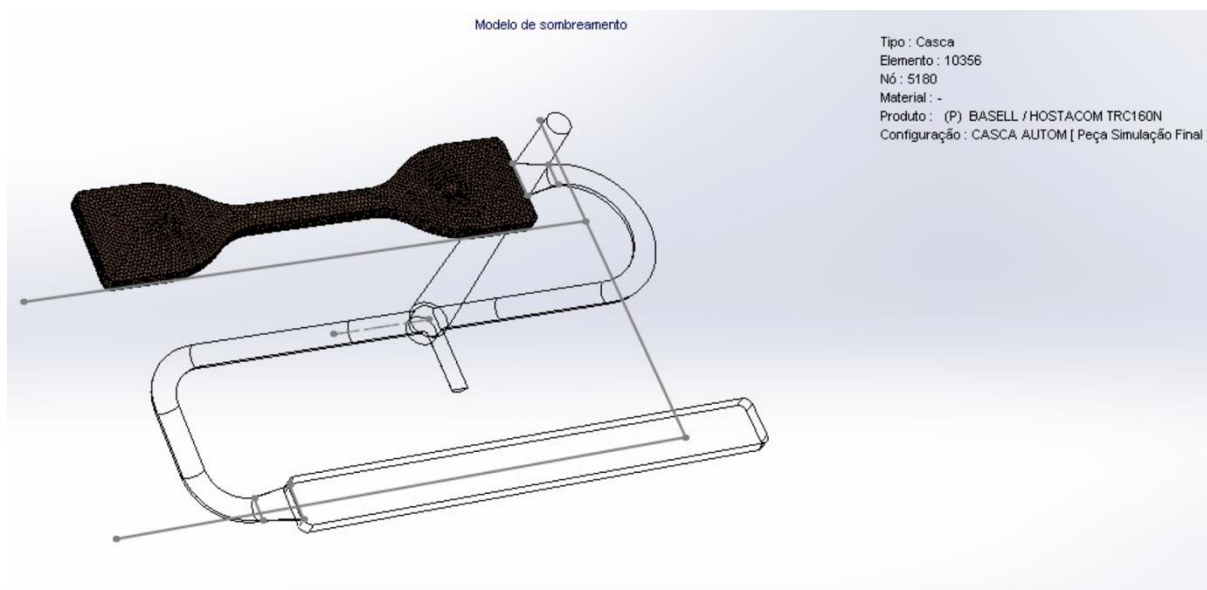
A malha casca automática só permite a seleção de um único corpo sólido conforme aviso apresentado na imagem da Figura 17. Isso quer dizer que não é possível simular mais de uma cavidade e nem o canal de alimentação/distribuição. Portanto, foi simulado, juntamente com as cavidades, os canais de alimentação e distribuição como se o conjunto todo fosse uma única cavidade no molde.

Nela, também não é possível selecionar o tamanho da malha (refinamento dos elementos que compõem a malha), porém, o programa já seleciona uma medida que melhor representa o corpo em questão. A Figura 18 mostra uma malha de casca gerada automaticamente pelo programa e a Figura 19 destaca o detalhamento da malha selecionada pelo programa e apresentada na Figura 18.

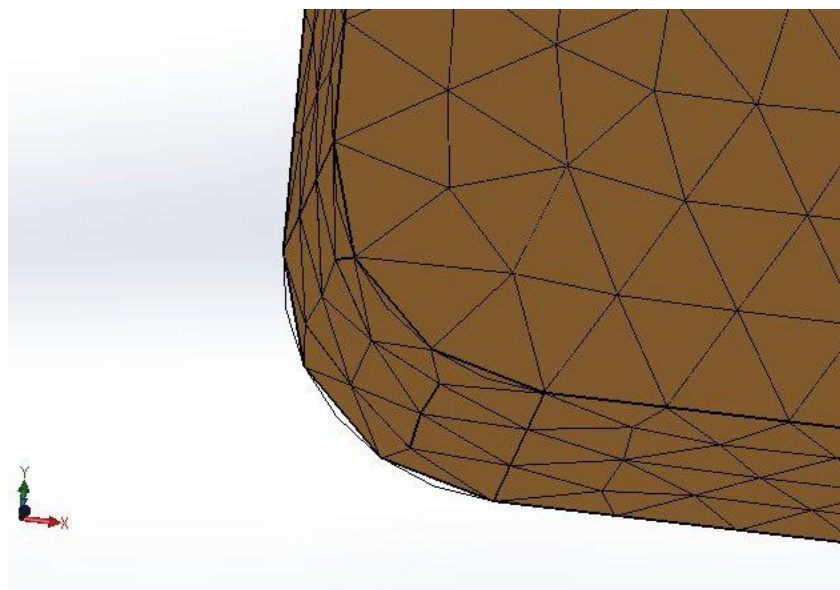
Figura 17 - Mensagem de múltiplos corpos na malha automática



Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora

Figura 18 - Malha casca automática

Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora

Figura 19 - Detalhamento canto do modelo 3D com a malha de casca automática

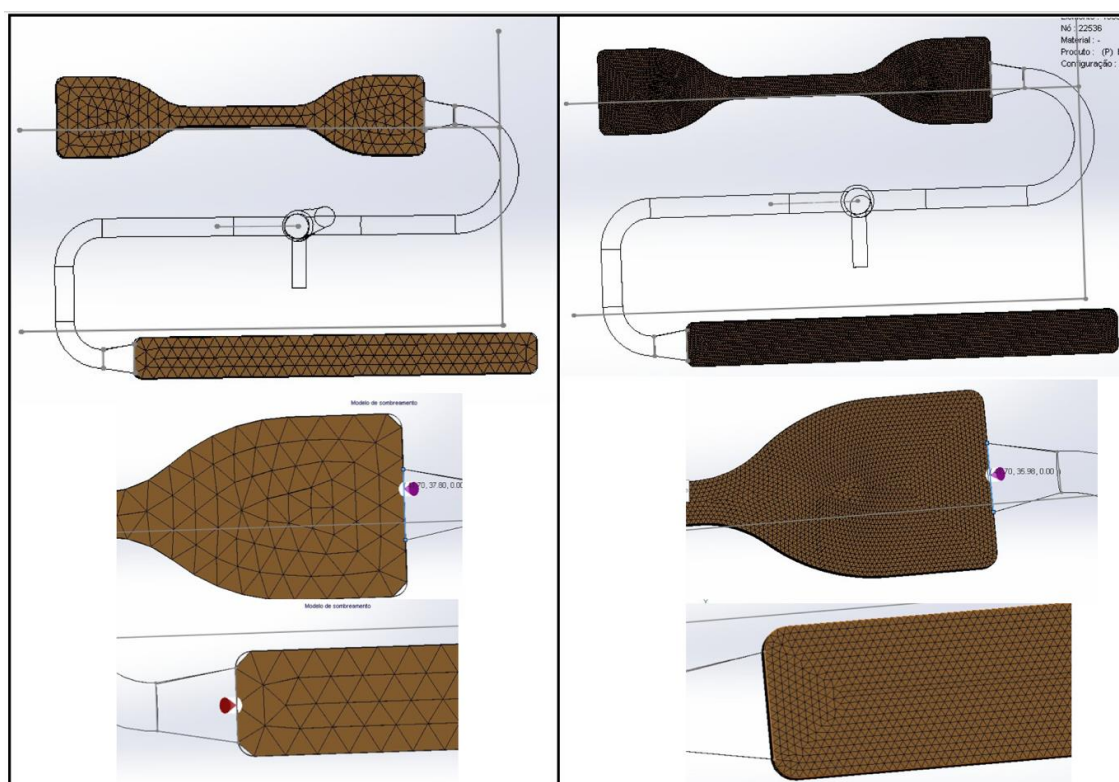
Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora

A linha curva presente na parte inferior do modelo 3D mostrado na Figura 8 representa o formato real do modelo utilizado. É possível observar que com a malha escolhida não se consegue fazer a curva perfeita do modelo, porém, chega bem próximo ao ideal. Esse refinamento da malha determina o quanto a simulação vai conseguir se aproximar do que é encontrado na prática. Vale ressaltar que quanto

mais refinada a malha for, maior será o tempo levado para o programa executar a simulação.

A malha de casca manual, permite a seleção de mais de um corpo sólido, entretanto, esses corpos são tratados somente como cavidades, não sendo possível a indicação ou criação de canais. Nessa opção, já é possível selecionar o tamanho do elemento da malha. A Figura 0 mostra uma comparação entre uma malha de casca criada manualmente com elementos de 4 mm e uma malha de casca criada manualmente com elementos de 1 mm.

Figura 20 - Comparação malha casca manual de 4 mm versus malha casca manual de 1 mm



Fonte: Obtido da simulação no SolidWorks feito pela autora

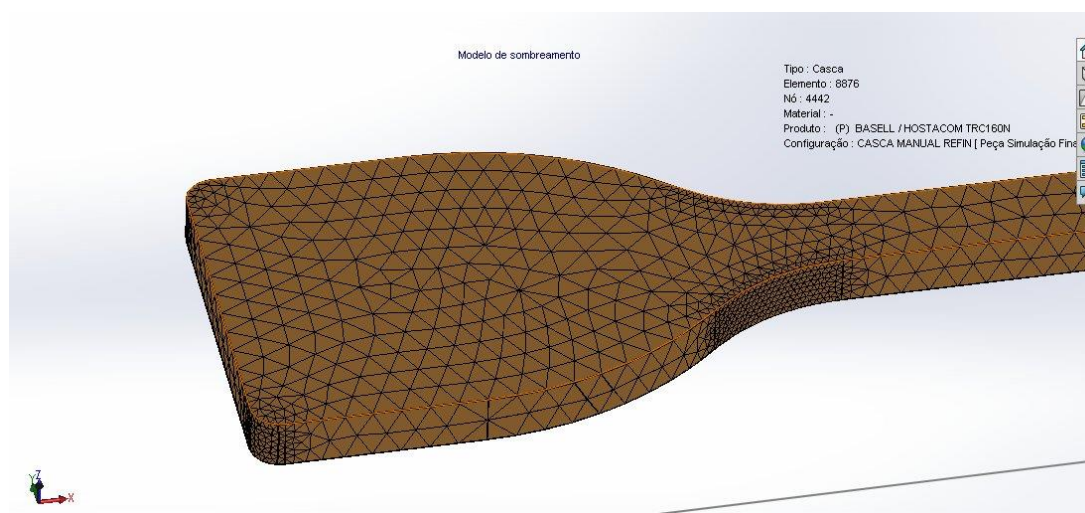
Na Figura 20, fica evidente a diferença de densidade de elementos presente em uma malha menos refinada e uma mais refinada. Também é possível observar como a malha da esquerda (4 mm) não conseguiu descrever os cantos do modelo 3D enquanto a malha da direita (1 mm) descreveu perfeitamente a curva.

Dependendo da geometria da peça a ser analisada, as vezes um refinamento tão grande não se faz necessário e tomará muito tempo. O modelo 3D apresentado

anteriormente, é de geometria simples, portanto, poderíamos utilizar uma malha menos refinada, porém, como já mostrado, a malha mais grosseira não consegue representar os cantos das peças.

Dentro da malha manual, o *Solidworks Plastics* oferece a opção de fazer um refinamento somente em algumas regiões. Isso permite manter uma malha mais grosseira e fazer um refinamento em regiões de furos, curvas, ponto de injeção etc., onde a geometria da peça é um pouco mais complexa e se faz necessária uma análise mais detalhada. A Figura 21 mostra um exemplo desse refinamento de malha.

Figura 21 - Exemplo de malha de 4 mm com refinamento local de 1 mm



Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora.

Para realizar as simulações, as cavidades juntamente com os canais de distribuição e alimentação foram considerados como um único corpo e foi utilizado como parâmetros uma simulação inicial com os valores gerados automaticamente pelo programa, cujos valores dos parâmetros estão apresentados na Tabela 9 e 10 e os resultados podem ser vistos na Tabela 11. A simulação com uma malha tipo casca gerada automaticamente resultou num valor de massa e de tempo de CPU entre as encontradas para as malhas com 2,5 e 1 mm, com o mesmo tempo de preenchimento de cavidade.

Tabela 9 - Parâmetros seleccionados para análise das malhas

Parâmetros seleccionados pelo programa

Tempo de preenchimento	1,83 s
Temperatura de fusão	230 °C
Temperatura do molde	20 °C
Limite de pressão de injeção	100 MPa
Ponto de alternância	100 %

Fonte: Autoria Própria

A partir da Tabela 10 foi construído o gráfico na Figura 22, na qual é possível perceber que a maior diferença de 10% entre as massas ocorre entre 5 e 2,5 mm de tamanho de aresta da malha com abertura em forma de triângulo, em relação à uma malha mais grossa, entre 10 e 5 mm, a diferença da massa é de 3,6%, em relação à uma malha menor, entre 2,5 e 1 mm cai para 2,5% e entre 1 e 0,5 mm para 0,5%. Já o tempo de CPU para simulações com malha de 2,5 mm é de 0,9 min, aumentando significativamente para malhas menores que 1 mm, passando de 500 s (8 min). Na Tabela 11, também é possível perceber que para malhas menores que 2,5 mm não há diferença no tempo de preenchimento da cavidade. Assim para verificar a influência de um refinamento localizado de 1mm em uma malha de 2,5 mm, foi feita uma simulação, na qual resultou em uma diminuição significativamente do tempo de CPU em relação a malha de 1 mm, porém em apenas um aumento de 0,05% da quantidade de massa em relação à obtida com a malha 2,5 mm.

Tabela 10 - Resumo seleção malha casca

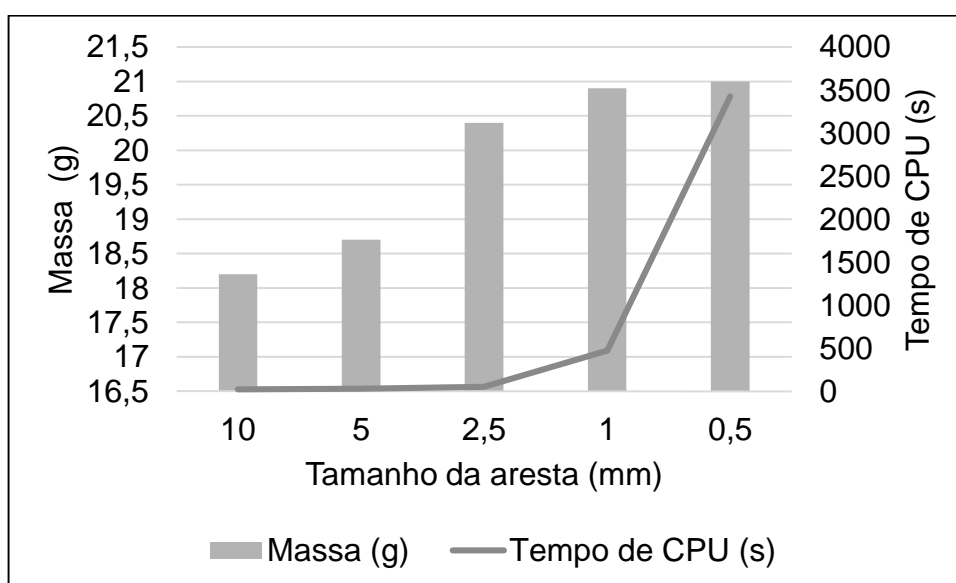
MALHA	ARESTA TRIÂNGULO [mm]	REFINAMENTO	NÚMERO DE ELEMENTOS	NÚMERO DE NÓS	TEMPO DE CPU [s] (simulação)	PREENCHEU A PEÇA	MASSA [g]	TEMPO DE PREENCHIMENTO [s]
Casca Automática	-	-	10038	5021	101,17	Sim	20,7	1,83

Casca manual	10	Sem	664	334	22,75	Sim	18,2	1,8
Casca manual	5	Sem	1548	776	28,66	Sim	18,7	1,61
Casca manual	2,5	Sem	5854	2929	52,55	Sim	20,4	1,83
Casca manual	1	Sem	35910	17957	473,32	Sim	20,9	1,83
Casca manual	0,5	Sem	143590	71797	3427,1	Sim	21	1,83
Casca manual	2,5	1mm	8712	4358	83,47	Sim	20,5	1,83

Fonte: Autoria Própria

Apesar de parecer bastante detalhada a malha de casca, ela ainda só está considerando o exterior da peça. Para um detalhamento ainda maior, se faz necessário uma malha sólida para comparar com a peça real com os canais de alimentação e distribuição.

Figura 22 - Correlação entre massa do corpo de prova e o tempo de CPU com o aumento do tamanho da malha



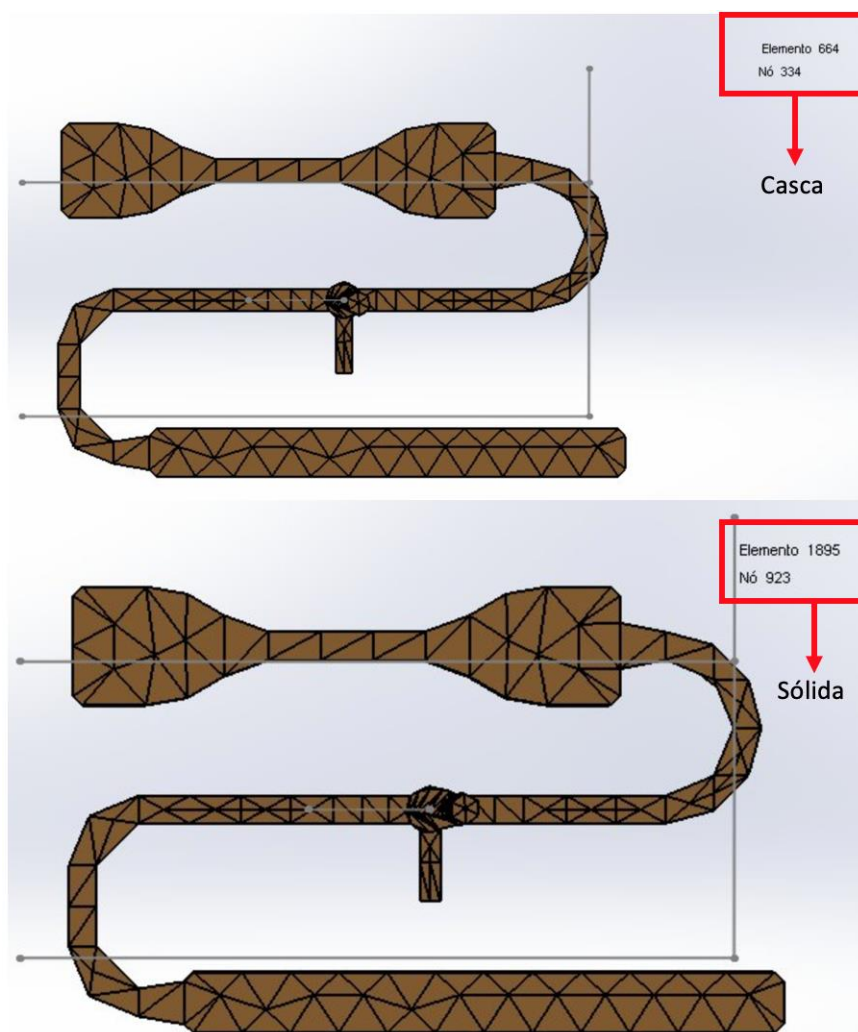
Fonte: Autoria Própria.

4.2.2 Malha Sólida

A malha sólida, diferentemente da malha casca, possui uma segunda etapa de geração de malha. Trata-se da malha interna. Independentemente do modo selecionado, automático ou manual, neste modelo de malha, a primeira etapa é sempre a geração da malha casca.

No caso da malha sólida automática, o programa apresenta a malha pronta da mesma maneira que realizado na malha casca automática, porém com um número maior de elementos, pois agora toda o interior da peça está sendo levado em consideração. A Figura 23 apresenta a quantidade de nós e elementos de uma malha de casca manual com elementos de 10mm em comparação com uma malha sólida manual com elementos tetraédricos de 10mm.

Figura 23 - Comparação malha casca versus malha sólida

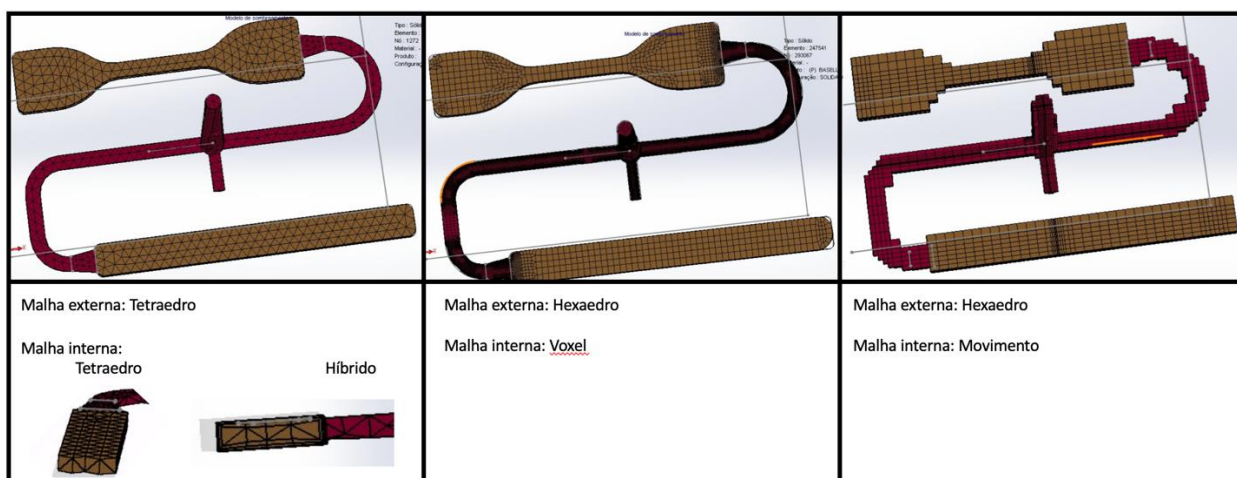


Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora

Na Figura 23 é possível perceber que a abertura da malha externa nos dois tipos de malha é igual, a única coisa que difere é a quantidade de nós e elementos gerados, que é maior no tipo de malha sólida.

Na malha sólida manual, é possível escolher o formato do elemento: tetraedro ou hexagonal para a malha externa e para a malha interna, ainda existem as opções híbrido (tetraedro e hexagonal juntas), voxel e movimento. O Quadro 6 apresenta os diferentes tipos de malhas externa e interna que se pode gerar.

Quadro 6 - Variações do modelo de malha sólida manual



Fonte: Autoria própria obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora.

Dentro da seleção da malha manual, também é possível indicar no desenho 3D o que representa cavidade e o que representa os canais de alimentação/distribuição/refrigeração, para o programa somente considerar a peça na sua análise.

Caso o desenho 3D seja somente da peça, o *SolidWorks Plastics* também fornece uma ferramenta de criação de canais de alimentação e distribuição. Nesta etapa também é possível indicar onde estão os canais de resfriamento e/ou criá-los, assim como é feito com os canais de alimentação e distribuição

Por último, ainda existe a opção de criar a malha para o molde. Para tanto, é gerado um bloco incorporando a peça. É possível ajustar todas as dimensões deste bloco e quando terminado, a geração da malha funciona da mesma forma que para a peça.

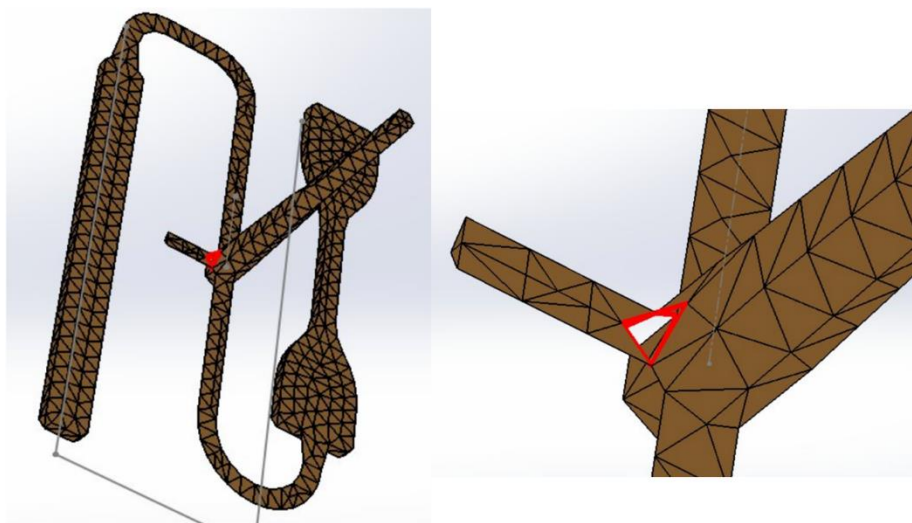
Terminado a geração da malha, o programa abre todas as opções de parâmetros para simulação do processo de injeção. Os parâmetros disponíveis variam com o pacote do *SolidWorks Plastics* e, também, em função da malha escolhida. A malha sólida possui mais opções de configurações e análise de resultados em comparação com a malha casca.

A malha sólida automática foi selecionada a partir de uma série de simulações realizadas variando todos os formatos de malha desde um valor grosseiro de tamanho

de elemento (10mm) até um valor mínimo de 5 mm, pois a massa entre os diferentes tamanhos de malhas, se manteve a mesma. Para tais simulações, foi utilizado como parâmetros uma simulação inicial com os valores gerados automaticamente pelo programa. Esses valores foram mantidos sendo a única variável o formato e tamanho da malha aplicada.

Para determinar qual a malha ideal para o trabalho, foram analisadas as variações dos resultados e principalmente o tempo levado para o computador realizar a simulação. A Tabela 11 apresenta um resumo dos resultados encontrados. As simulações que não preencheram completamente a cavidade foram descartadas, por ficarem com a malha aberta, quais sejam: as feitas com malha sólida manual tipo triângulo de tamanho de aresta maior do que 5 mm e a de 5 mm com formato tetraedro tanto na casca, quanto no preenchimento. Esta malha aberta pode ser vista na Figura 24. Para as simulações com formato de casca tetraédrico somente a com formato de preenchimento híbrido preencheu completamente a cavidade da peça, mas com resultado de massa inferior ao da simulação com formação de malha automática, que foi tomada como referência. As simulações com formato de casca hexaédrico e preenchimentos Voxel e Movimento apresentaram valores de massa e de tempo de preenchimento de cavidade idênticas às da geração de malha automática, porém com tempos maiores de CPU.

Figura 24 - Malha aberta



Fonte: Autoria própria obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora.

Para a realização das variações propostas, não é possível utilizar a malha de casca pois ela não retorna o gráfico de análise de massas. Dentre as malhas sólidas que preencheram a cavidade da peça, não houve uma variação significativa nos resultados de massa e tempo de injeção, entretanto, a malha sólida automática foi simulada pelo computador em menor tempo e por isso foi escolhida a malha sólida automática para a realização dos testes.

Tabela 11 - Resumo seleção malha sólida

MALHA	ARESTA [mm]	REFINAMENTO	FORMATO CASCA	FORMATO PREENCHIMENTO	PREENCHEU A PEÇA	MASSA [g]	TEMPO DE PREENCHIMENTO [s]	TEMPO DE CPU [s] (simulação)
Sólida automática	-	-	-	-	Sim	23,4	1,8	239,6
Sólida manual	10	Sem	Tetraedro	Híbrido	Não (malha fica aberta)	2,65	0,29	-
Sólida manual	8	Sem	Tetraedro	Híbrido	Não (malha fica aberta)	-	-	-
Sólida manual	5	Sem	Tetraedro	Híbrido	Sim	18,7	4,59	19,5
Sólida manual	5	Sem	Tetraedro	Tetraedro	Não (malha fica aberta)	-	-	-
Sólida manual	5	Sem	Hexaedro	Voxel	Sim	23,4	1,81	396,3
Sólida manual	5	Sem	Hexaedro	Movimento	Sim	23,4	1,81	415,1

Fonte: Autoria Própria

4.3 Simulação de injeção variando os parâmetros

A partir de uma malha sólida gerada automaticamente pelo *SolidWorks Plastics*, em função da geometria da peça, foram realizadas 11 diferentes simulações da condição automática, considerada a simulação de número 0, sendo a de número 1 a

condição encontrada pelo método de injeção progressiva, conforme apresentado na Tabela 2 do Capítulo 3 Procedimentos. Os resultados encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados das simulações

PARÂMETROS	Nº SIMULAÇÃO											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tempo de preenchimento [s]	1,91	1,56	1,5	3,77	1,56	1,56	0,995	3,72	1,55	1,49	1,56	1,53
Pressão ao final do preenchimento [MPa]	12,61	18,01	29,88	6,08	18,02	18,01	18,01	18,04	17,98	9,39	21,7	18,01
Pressão no tempo de alternância da embalagem [MPa]	15,93	16,60	16,607	9,99	16,59	-	18,64	12,95	16,06	16,6	-	16,29
Temperatura ao final do preenchimento [°C]	20,97	22,00	22,39	20,15	21,97	21,97	28,83	20,26	22,08	20	21,92	22,09
Temperatura em massa ao final do preenchimento [°C]	20,97	22,00	22,39	20,15	21,97	-	28,83	20,23	22,08	20	-	22,09
Tensão de cisalhamento ao final do preenchimento [MPa]	0,136	0,178	0,266	0,084	0,178	-	0,159	0,196	0,173	-	-	0,18
Taxa de cisalhamento ao final do preenchimento[1/s]	6553,3	2028,5	11752	81,31	2014	2014	2369	1382,5	2563,6	-	2411	2056,9
Contração volumétrica ao final do preenchimento [%]	15,00	15,11	15,11	15,2	15,1	-	15,47	14,56	15,13	15,8	-	15,1
Tempo de solidificação ao final do preenchimento [s]	1,91	1,55	1,50	3,61	1,56	-	0,987	3,716	1,54	1,49	-	1,53
Tempo de resfriamento	22,91	22,56	22,5	22,77	22,56	-	22,00	25,72	22,55	-	-	22,53
Temperatura ao final do resfriamento [°C]	20	20	20	20	20	-	20	20	20	-	-	20
Pressão máx. da entrada	15,83	17,98	30,0	10,08	17,99	17,99	18,54	17,99	17,99	16,5	21,6	17,99
Vazão de entrada	15,017	22,51	82,5	17,61	22,73	22,73	29,43	16,25	23,96	17,9	17,96	23,07
Massa da peça	27,06	26,01	26,3	25,88	26,07	26,07	26,00	26,25	26,54	23,9	26,16	26,01

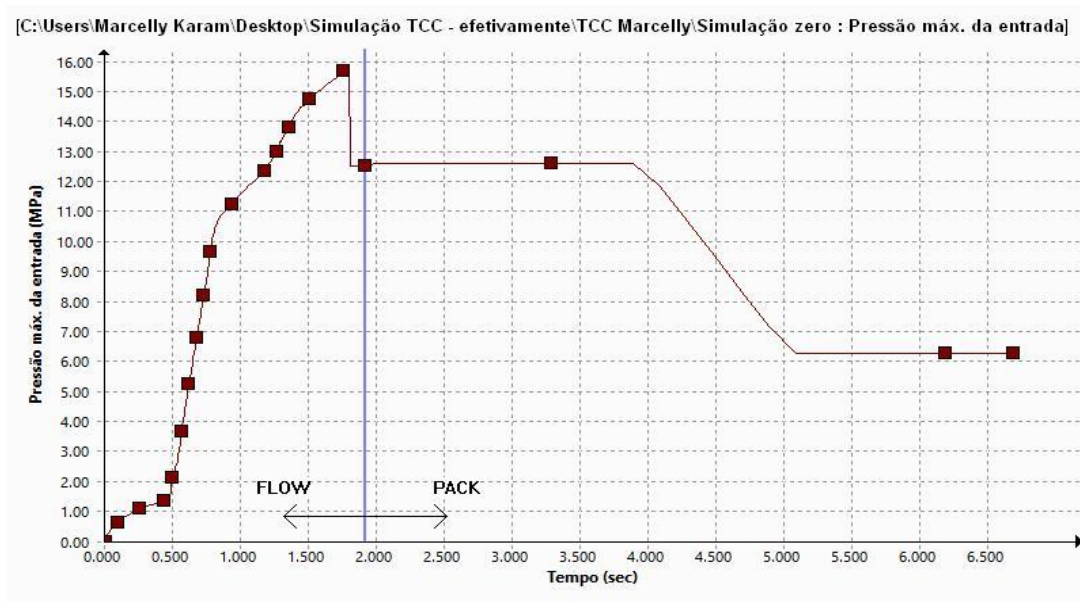
Fonte: Autoria Própria

Comparando a simulação na condição automática, simulação número 0 da Tabela 12, com a melhor condição encontrada pelo método de injeção progressiva, simulação número 1 da Tabela 12, nota-se que o tempo de injeção foram muito próximos, 1,91 e 2 segundos, respectivamente. Entretanto, a maior pressão encontrada na simulação foi de 15,96 MPa e a encontrada pelo método experimental foi 30 MPa. A vazão encontrada pela simulação foi maior, de 15,02 cc/s, em relação à experimental de 13,5 cc/s (calculado a partir da velocidade no tempo de injeção) com velocidade de 17 mm/s.

Visualizando a curva de pressão da simulação 0, Gráfico 1, é possível notar que o padrão do perfil de pressão gerado automaticamente é uma curva constituída de retas com diferentes inclinações. Geralmente, numa situação real, no início da etapa de injeção o aumento de pressão é lento constituindo a fase de preenchimento e a segunda é mais rápida denominada fase de pressurização. Na simulação, a “pressão

ao final do preenchimento” deve indicar a pressão requerida para o molde inteiro, incluindo: o canal de alimentação e de distribuição, a entrada da cavidade e a cavidade; visto que está tudo representado na malha, o programa a denomina de “pressão da injeção obrigatória” esse valor foi de 12,61 MPa, segundo o resumo de fluxo do programa apresentado na Tabela 12. Ao final da etapa de injeção a pressão na entrada da bucha atingiu um pico em 15,83 MPa, que é denominada pelo programa como a “pressão máxima de entrada”. Porém, o resumo de fluxo indica “a pressão no tempo de alternância da embalagem” como 15,93, o Gráfico 1 obtido do programa sinaliza que o final da fase de escoamento (*flow*) e o início do empacotamento ou recalque (*pack*) que foi na pressão de 12,61 MPa. Na simulação automática, a etapa de recalque apresenta dois platôs com pressões diferentes, uma a 80% igual a 12,61 MPa, e outra na metade do tempo de recalque de 40% da pressão máxima alcançada na etapa de injeção é de aproximadamente 6 MPa. Entretanto, estes valores podem ser mudados. Nas outras simulações, nas quais a pressão de recalque e o tempo de recalque foram estabelecidos, só haverá um único platô na etapa de recalque.

Gráfico 1 – Pressão máxima de entrada *versus* tempo – Simulação 0



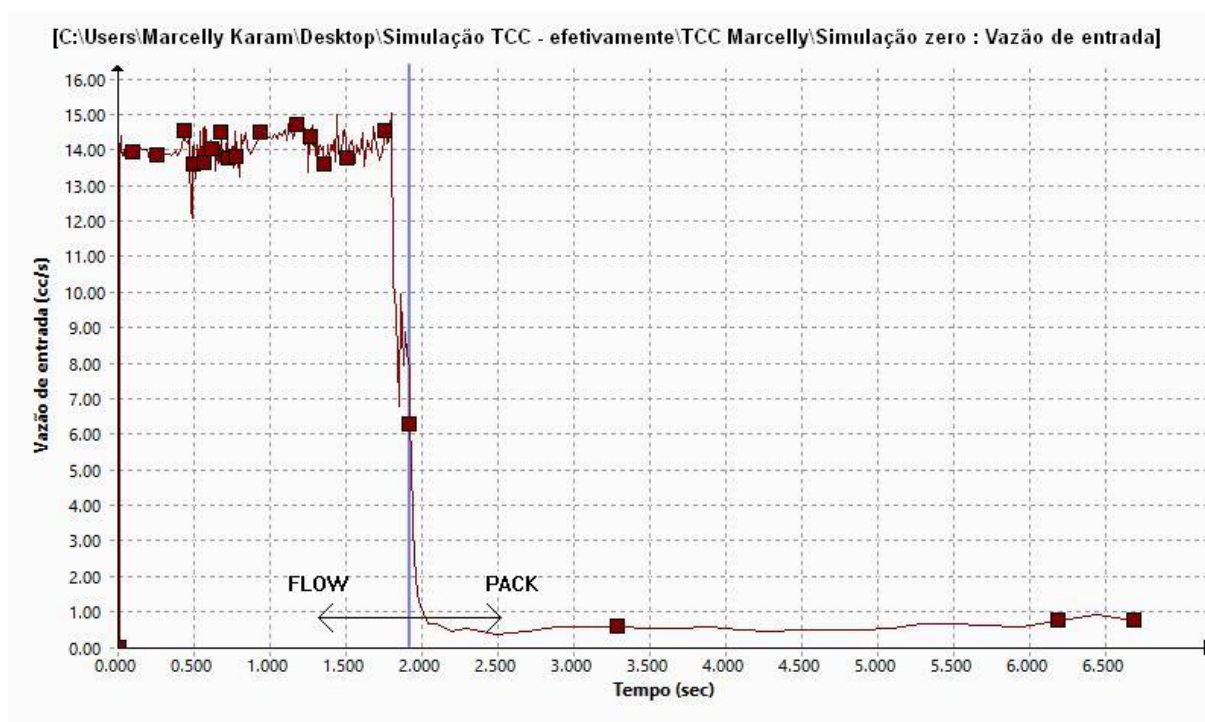
Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora

O valor padrão para tempo de injeção é estimado baseado no volume da correlação PVT (pressão, volume e temperatura) e na temperatura de fusão do

material e na temperatura do molde. Essas informações são usadas para determinar o quanto o plástico vai encolher à medida que resfria durante a moldagem por injeção.

Na etapa de injeção o preenchimento da cavidade é controlado pela taxa de fluxo, assim a pressão não é constante, ela varia para cima e para baixo de modo a alcançar uma taxa de fluxo controlada. A vazão de entrada na etapa de injeção varia entre um valor máximo de 15 cc/s e mínimo de 12 cc/s, como pode ser observado no Gráfico 2. Depois do ponto de comutação a vazão cai rapidamente para menos de 1 cc/s na etapa de recalque de aproximadamente 4,5 segundos, que é muito maior do que o encontrado experimentalmente de 2 segundos.

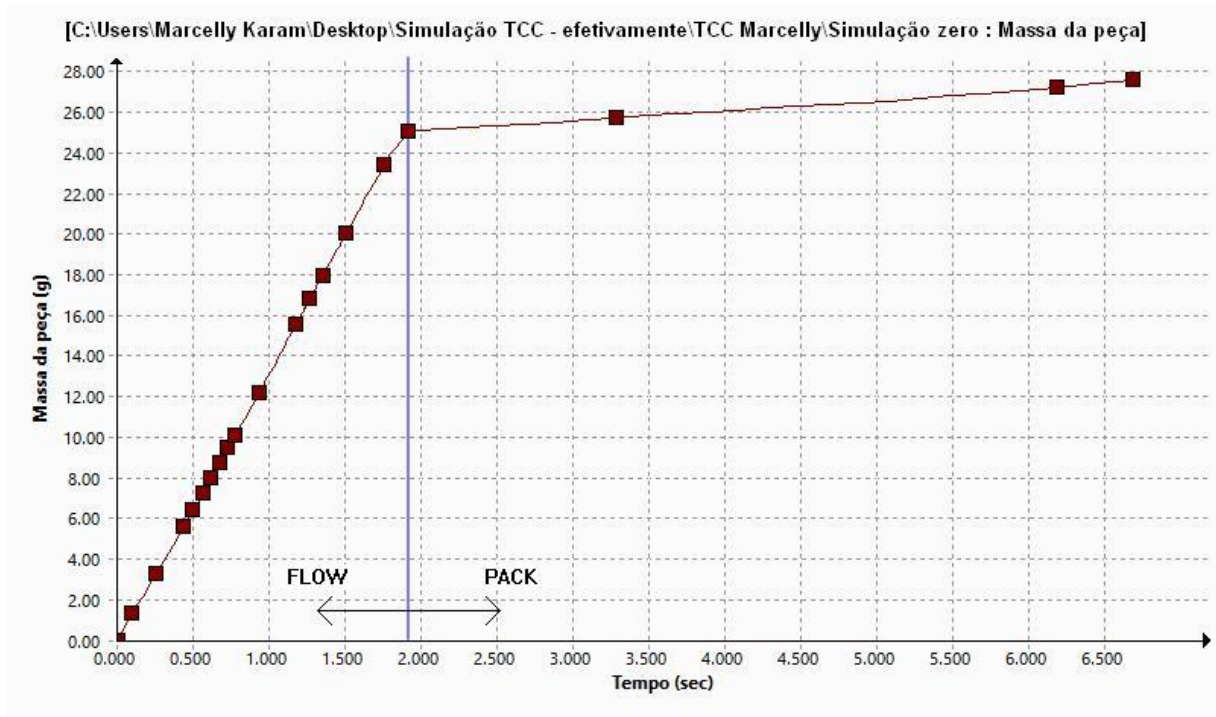
Gráfico 2 – Vazão de entrada versus tempo – Simulação 0



Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora

No Gráfico 3 é possível perceber que a massa aumenta linearmente na etapa de injeção até aproximadamente 25 g e depois de forma quase assintótica na etapa de recalque até atingir 27,06 g.

Gráfico 3 – Vazão de entrada versus tempo – Simulação 0



Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora

A partir da Tabela 12 é possível notar que independentemente do valor configurado para o tempo de injeção, o programa entende que uma vez preenchida a peça na percentagem especificada em volume para o ponto de comutação, que é chamado pelo programa de “alternância injeção/recalque”, pode-se avançar para a próxima etapa de recalque. Isto ocorre porque no menu configurações de preenchimento no item avançado denominado configurações de perfil de vazão, que pode ser visto na Figura 9, foi selecionada uma vazão que varia em relação à percentagem de preenchimento para o término da etapa de injeção e, não, o tempo de preenchimento do molde. É importante lembrar que o método de injeção progressiva é feito com base em percentagem mássica.

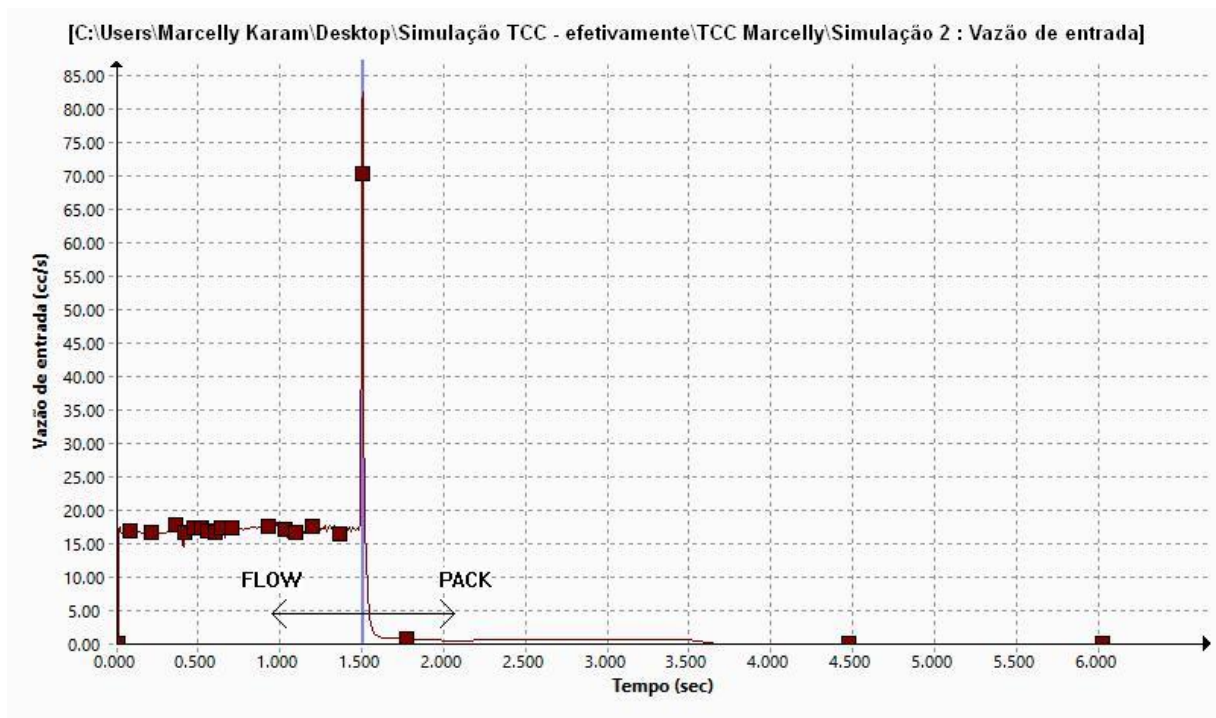
Isso acontece mesmo quando o tempo configurado não é suficiente, é o caso da simulação 5, na qual o valor selecionado foi de 0,5 segundos e o tempo utilizado pelo programa foi de 1,56 segundos. Outro exemplo é o da simulação 3, na qual o valor selecionado foi 2,5 segundos, porém com 10 MPa de pressão, foram necessários 3,77 segundos para o preenchimento de 95% em volume da peça. Esse comportamento do programa fez com que as simulações 4 e 5, as quais variavam o tempo de injeção, ficassem idênticas.

É importante ressaltar que tanto o tempo de preenchimento quanto o tempo de manutenção de pressão de injeção vêm bloqueados pelo programa, ou seja, não é possível alterar de imediato. É necessário liberar o campo para realizar a alteração do tempo.

A pressão durante o enchimento não é constante, ela aumenta de modo a manter a taxa de fluxo controlada, se um valor menor do que o mínimo necessário para preencher seja configurado, que é o caso da simulação 3, em que a pressão máxima de injeção selecionada foi 10 MPa, o programa não ultrapassará esse valor. Se a máxima pressão de injeção for insuficiente para completar a cavidade, o programa informará a impossibilidade de preencher a peça no seu assistente. Nesta simulação o tempo de injeção compensou a baixa pressão.

Já a pressão de recalque, devido a sua configuração por meio do perfil de injeção, é possível garantir o seu valor durante toda a fase de recalque. O fato de o valor dessa pressão não alterar, causa picos na vazão quando a pressão máxima de preenchimento (29,48 MPa) mais baixa em relação a pressão de recalque (30 MPa). É o caso da simulação 2, apresentado no Gráfico 4:

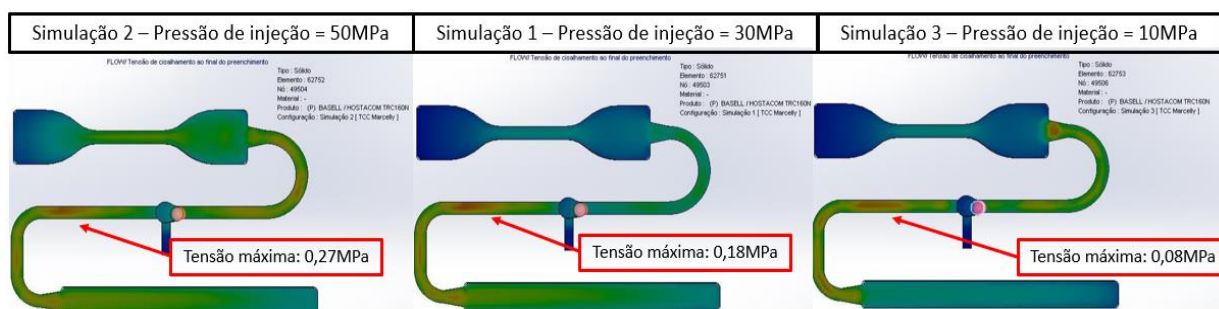
Gráfico 4 – Vazão versus tempo – Simulação 2



Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora

Apesar de não ser possível fixar um valor para a pressão de injeção, é interessante notar que o programa responde as variações de pressão de maneira coerente. As simulações 2 e 3, as quais variaram a pressão de injeção de 50 MPa e 10 MPa respectivamente, apresentaram valores bem diferentes para a tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento, sendo a peça com maior pressão a mais tensionada. A Figura 25 apresenta uma comparação da taxa de cisalhamento da Simulação 2 *versus* Simulação 1 (referência) *versus* a Simulação 3. Nela, as cores frias representam as regiões com menor tensão e as cores quentes, as regiões com maior tensão.

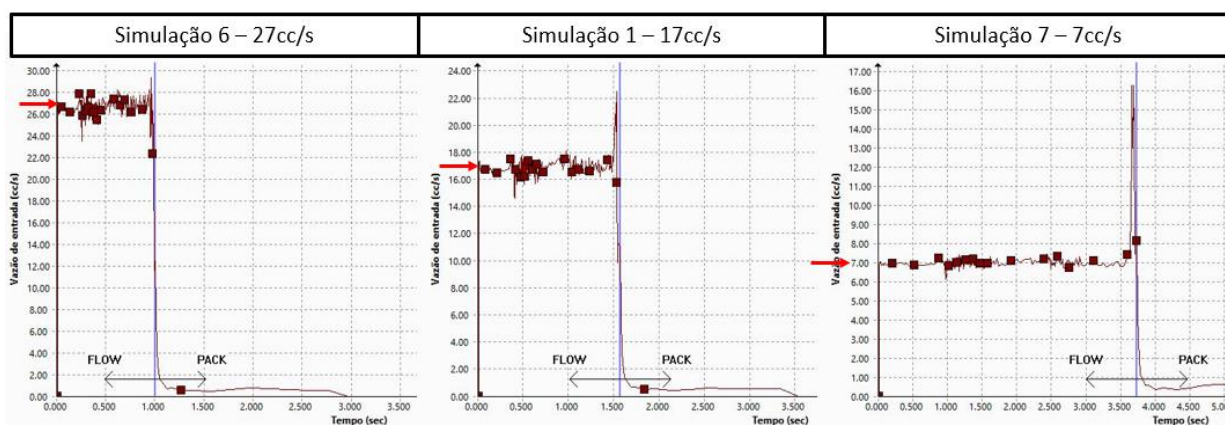
Figura 25 – Tensão de cisalhamento - Simulação 2 *versus* Simulação 1 *versus* Simulação 3



Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora

A vazão é selecionada a partir de um perfil, que pode ser alterada em função da posição do fuso no cilindro de injeção ou em função da porcentagem de preenchimento. Todas as simulações apresentaram uma variação da vazão, porém sempre mantendo a média. A Figura 26 apresenta os gráficos de vazão *versus* tempo das simulações 6, 1 e 7, as quais tem, respectivamente as vazões 27cc/s, 17cc/s e 7cc/s:

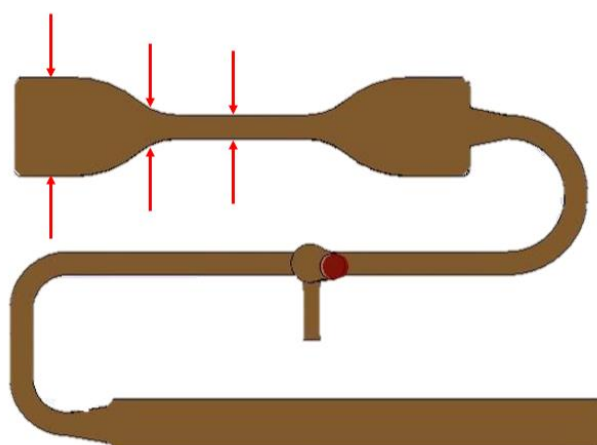
Figura 26 – Vazão versus tempo - Simulação 6 versus Simulação 1 versus Simulação 7



Fonte: Obtido da simulação no SolidWorks feito pela autora.

Essa variação de vazão se dá devido às diferentes seções transversais da peça, o que é o esperado no processo de injeção, visto que a vazão se calcula pela multiplicação da velocidade pela área da seção transversal, sendo que esta varia como mostra a vista frontal do modelo 3D na Figura 27.

Figura 27 – Diferença de largura do modelo 3D

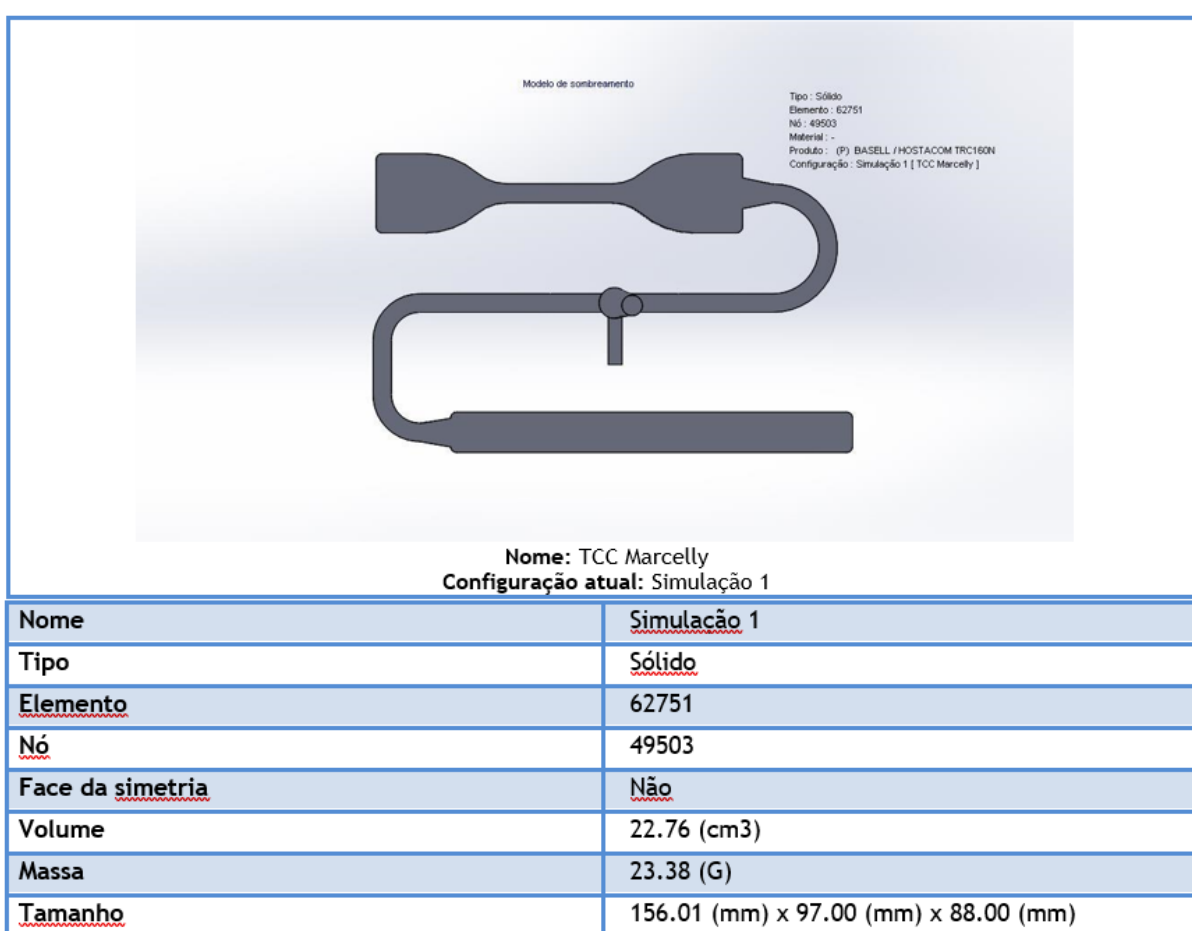


Fonte: Autoria própria

Resumindo a velocidade de injeção controla a etapa de injeção, definindo o tempo e a pressão máxima de entrada, já a pressão de recalque controla o tempo de empacotamento.

Por fim, a massa final injetada, registrada pelo programa e apresentada na Tabela 12, sofreu pouca variação entre as simulações o que é compreensível visto que as alterações entre uma simulação e outra não foram tão significativas. Entretanto, os valores encontrados na simulação estão praticamente 9 gramas mais pesados que os valores encontrados no experimento prático, no qual foi registrado peças completas com 18.03 g. O programa *SolidWorks* calcula automaticamente o volume da peça e o seu peso com base na densidade do material escolhido para a simulação. Esse valor se encontra na Figura 28.

Figura 28 – Volume, massa e tamanho do modelo 3D

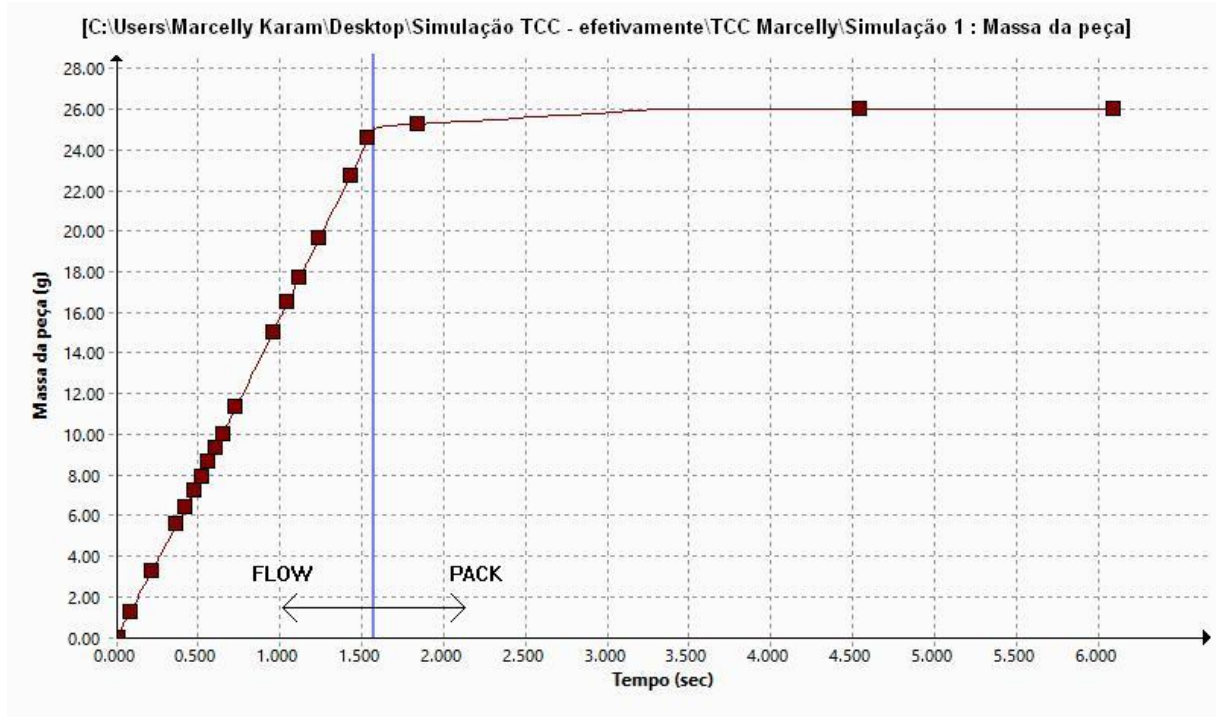


Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora

O valor apresentado na Figura 28 ainda é em torno de 3 gramas mais leve que os resultados apresentados na Tabela 12. Isso pode ocorrer devido a fase de recalque, no qual, após o preenchimento da cavidade, mais massa polimérica é compactada dentro do molde. O Gráfico 5, retirado da Simulação 1 (utilizada como

referência para todas as outras simulações), apresenta uma massa de pouco menos que 25 g até o ponto de alternância e 26,01 ao final do ciclo.

Gráfico 5 – Massa versus tempo – Simulação 1



Fonte: Obtido da simulação no *SolidWorks* feito pela autora

Independentemente do valor de massa encontrado, os resultados da simulação ainda são válidos, visto que se trabalhou com a proporção de valores entre a injeção experimental e a simulação e não os valores brutos.

Ainda sobre a variação da massa, as simulações 8 e 9 variaram o tempo de manutenção de pressão na fase de recalque, sendo a Simulação 8 configurada com 4 segundos e a simulação 9 configurada com 0 segundos, obtiveram valores de massa bem diferentes: 26,54 g para a simulação com recalque e 23,9 g para a simulação sem recalque, o que sustenta a afirmação sobre a variação da massa teórica, calculada a partir do volume e da densidade, para a massa encontrada na simulação. A título de informação, para ser possível a realização da simulação com tempo zero de recalque, se fez necessário configurar a pressão de recalque para zero também. Do contrário, o programa ainda analisa a etapa de recalque.

5 CONCLUSÕES

O programa computacional *SolidWorks Plastics* tem como função auxiliar o desenvolvimento de moldes de injeção plástica, bem como as peças a serem injetadas. Portanto, parte-se do pressuposto que o usuário que está buscando o programa tem um modelo 3D definido e deseja conhecer a factibilidade da injeção do mesmo ou deseja verificar os parâmetros de injeção mais apropriados, ou ainda, está desenvolvendo um molde e gostaria de verificar se é factível a injeção com o molde proposto e o que poderia ser modificado para melhorar. Isto quer dizer que o programa sempre buscará simular valores ideais e evitar erros, com base nas limitações de processo que o usuário impõe. Essas limitações de processo são: o limite de pressão que a máquina injetora a ser utilizada suporta, o material a ser injetado, a matéria-prima que será utilizada para a confecção do molde, se o molde terá canais de resfriamento, se será aquecido, ou não etc.

O presente trabalho visou fixar parâmetros de processo como: pressões de injeção e de recalque, velocidade de injeção, tempos de injeção e recalque, e o ponto de alternância entre injeção e recalque, para verificar se o retorno do programa seria similar ao encontrado na injeção experimental. Os resultados foram, em sua maioria, positivos. As inconsistências se dão justamente em tentar impor parâmetros como variáveis independentes, que normalmente o *SolidWorks Plastics* retorna como resultado (variáveis dependentes), tais como os tempos de injeção e de recalque.

Por fim, foi construído um guia prático para a simulação de injeção de plásticos utilizando a ferramenta *SolidWorks Plastics* que certamente será de grande ajuda para o meio acadêmico, podendo ser ensinado em sala de aula para auxiliar no entendimento do processo de injeção, seus parâmetros e suas consequências: defeitos, aspecto, tamanhos e etc. além de ensinar mais uma função presente no programa *Solidworks*, o qual já está presente na grade do curso de Engenharia Mecânica da UTFPR.

REFERÊNCIAS

- [1] MEIKLE, Jeffrey L. **American plastic: a cultural history**. Rutgers University Press, 1995.
- [2] GOURMELON, Gaelle. Global plastic production rises, recycling lags. **New Worldwatch Institute analysis explores trends in global plastic consumption and recycling**. Recuperado de <http://www.worldwatch.org>, 2015.
- [3] SILVA, Martim Francisco de Oliveira et al. A indústria de transformação de plásticos e seu desempenho recente. **BNDES Setorial**, v. 38, p. 131-172, 2013.
- [4] ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **PERFIL 2016**. Disponível em: http://file.abiplast.org.br/file/noticia/2017/folder_preview_perfil2016_separado.pdf >. Acesso em: 07.10.2017
- [5] COELHO, J. **O Setor De Transformados Plásticos**. Disponível em: http://file.abiplast.org.br/download/apresentacao_abiplast_seminario_frente_parlamentar.pdf > . Acesso em: 07.10.2017
- [6] SANTANA, Ricardo Rogério de et al. **Sistema computacional de apoio ao projeto de componentes de plástico injetados, via internet**. 2001
- [7] SAHPUTRA, Iwan Halim. Comparison of two flow analysis software for injection moulding tool design. In: **2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**. IEEE, 2007. p. 607-611.
- [8] GRANADA, J. **Simulação Da Etapa De Preenchimento No Processo De Moldagem Por Injeção De Polímeros**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Curso de Engenharia Química, 2012.
- [9] SOLIDWORKS Brasil. **SolidWorks anuncia o SolidWorks Plastics Advanced**. Disponível em: <https://blogs.solidworks.com/solidworksbrasil/2014/02/solidworks-anuncia-o-solidworks-plastics-advanced.html> >. Acesso em: 01.05.2019
- [10] Kong, L, Fuh, J. Y. H, Lee, K. S, Liu, X. L, Ling, L. S, Zhang, Y. F, Nee A. Y. **A Windows-native 3D plastic injection mold design system**. Disponível em: <

<https://www-scopus.ez48.periodicos.capes.gov.br/record/display.uri?eid=2-s2.0-0038787670&origin=resultslist&sort=cp-f&src=s&st1=solidworks+plastics&st2=&sid=784837f686d66e2f1db12ce460f2e37f&sot=b&sdt=b&sl=34&s=TITLE-ABS-KEY%28solidworks+plastics%29&relpos=0&citeCnt=40&searchTerm=>>. Acesso em: 01.05.2019

[11] MOAYYEDIAN, Mehdi; ABHARY, Kazem; MARIAN, Romeo. **New design feature of mold in injection molding for scrap reduction**. *Procedia manufacturing*, v. 2, p. 241-245, 2015.

[12] MOAYYEDIAN, Mehdi; ABHARY, Kazem; MARIAN, Romeo. Gate design and filling process analysis of the cavity in injection molding process. **Advances in Manufacturing**, v. 4, n. 2, p. 123-133, 2016

[13] MIRANDA, Diego Alves de; NOGUEIRA, André Lourenço. Simulation of an Injection Process Using a CAE Tool: Assessment of Operational Conditions and Mold Design on the Process Efficiency. **Materials Research**, v. 22, n. 2, 2019.

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

[15] BLASS, A. **Processamento de polímeros**. Ed. da UFSC, 1985.

[16] MANO, E. B; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2ª. 2004.

[17] CANEVAROLO JR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**. Artliber editora, São Paulo, 2002.

[18] ROSATO, M. G.; ROSATO, D. V. **Concise encyclopedia of plastics**. Springer Science & Business Media, 2012.

[19] PLÁSTICO.COM.BR. **Injetoras: Linha de elevada força de fechamento suprem necessidades automotivas**. Disponível em: < <https://www.plastico.com.br/injetoras-linhas-de-elevada-forca-de-fechamento-suprem-necessidades-automotivas/> >. Acesso em: 10.06.2019

[20] ENGEL. **Engel duo: A injetora poderosa para peças grandes**. Disponível em: < <https://www.engelglobal.com/pt/br/solucoes/injetoras/duo.html> >. Acesso em: 10.06.2019

- [21] HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos**. Artliber, 2004.
- [22] DA CRUZ, SERGIO. **Moldes de Injeção**. Hemus, 2002.
- [23] DE MIRANDA, D. A. **Estudo experimental e de simulação computacional para análise e melhoria da eficiência de um molde de injeção de termoplásticos**. Dissertação de mestrado – UNIVILLE. Joinville, 2017.
- [24] FORUM SOLIDWORKS. **SW Plastics Premium or Autodesk Moldflow**. Disponível em: < <https://forum.solidworks.com/thread/56548> >. Acesso em: 03.06.2019
- [25] COMPUTER AIDED TECHNOLOGY. **Ed Honda, 40 years in Plastics engineering and more**. Disponível em: < <https://www.cati.com/blog/2012/05/ed-honda-40-years-in-plastics-engineering-and-more/> >. Acesso em: 03.06.2019
- [26] AUTOMOTIVE DESIGN & PRODUCTION. **Simulating Injection Molding Gets Even Better**. Disponível em: < <https://www.adandp.media/articles/simulating-injection-molding-gets-even-better-> >. Acesso em: 03.06.2019
- [27] ACO Mold. **Benchmark Simulation Software: Moldflow, Moldex, Cadmould**. Disponível em: < <http://www.acomold.com/benchmark-simulation-software-moldflow-moldex-cadmould.html> >. Acesso em: 03.06.2019
- [28] SOLIDWORKS Instructor Guide. **SolidWorks Plastics Handbook: Introduction to SolidWorks Plastics using simulation**. 2016.
- [29] SOLIDWORKS. **Qual pacote do SOLIDWORKS Plastics é ideal para você?**. Disponível em: < <https://www.solidworks.com/pt-br/product/solidworks-plastics>>. Acesso em: 03.06.2019
- [30] **Catálogo Haitian**. Disponível em: < <https://groups.google.com/forum/#!topic/mecanica-utfpr-2010/3QWGC2E65yU> >. Acesso em: 08.11.2017.
- [31] BUSATO, F. A., **Parâmetros de moldagem por injeção de termoplásticos em moldes fabricados por estereolitografia com resina SOMOS 7110^a**. Dissertação de mestrado - UFSC, Florianópolis, 2004.

[32] **Material Data Center – Hostacom TRC 160N Data Sheet.** Disponível em: < <https://www.materialdatacenter.com/ms/pt/Hostacom/LyondellBasell+Industries/Hostacom+TRC+160N/a8574fa2/314#page31811> >. Acesso em: 08.11.2017

APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DO MODELO UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES

