

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE – UNIVILLE PROGRAMA DE
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA
ANÁLISE E MELHORIA DA EFICIÊNCIA DE UM MOLDE DE INJEÇÃO DE
TERMOPLÁSTICOS**

DIEGO ALVES DE MIRANDA

Joinville – SC

2017

DIEGO ALVES DE MIRANDA

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA
ANÁLISE E MELHORIA DA EFICIÊNCIA DE UM MOLDE DE INJEÇÃO DE
TERMOPLÁSTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia de Processos da Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE como requisito final para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.
Orientador: Prof. Dr. André Lourenço Nogueira

Joinville – SC

2017

Catálogo na publicação pela Biblioteca Universitária da Univille

M672e Miranda, Diego Alves de
Estudo experimental e de simulação computacional para análise e melhoria da eficiência de um molde de injeção de termoplásticos/ Diego Alves de Miranda; orientadora Dr. André Lourenço Nogueira. – Joinville: UNIVILLE, 2017.

112 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos – Universidade da Região de Joinville)

1. Injeção de plásticos - Simulação por computador. 2. Plásticos - Moldagem. 3. Termoplásticos. I. Nogueira, André Lourenço (orient.). II. Título.

CDD 668.412

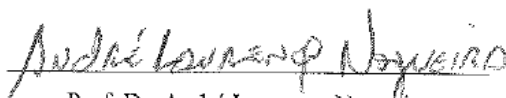
Termo de Aprovação

“Influência dos Parâmetros de Processo e da Presença de Saída de Gases na Eficiência de Moldes para a Injeção de Peças em Poliestireno Cristal”

por

Diego Alves de Miranda

Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, área de concentração Engenharia de Processos e Tecnologias Limpas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Mestrado em Engenharia de Processos.

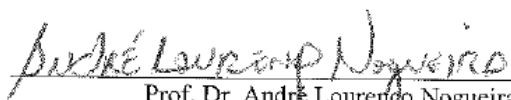


Prof. Dr. André Lourenço Nogueira
Orientador (UNIVILLE)



Profa. Dra. Ana Paula Testa Pezzin
Coordenadora do Programa de Mestrado em Engenharia de Processos (UNIVILLE)

Banca Examinadora:



Prof. Dr. André Lourenço Nogueira
Orientador (UNIVILLE)



Prof. Dr. Carlos Mauricio Sacchelli
(UFSC)



Profa. Dra. Noeli Sellin
(UNIVILLE)

Joinville, 09 de fevereiro de 2017.

"Não desampare a sabedoria e ela te guardará, ame-a e ela te conservará. Exalte-a e ela te exaltará, abrace-a e ela te honrará. Pois a sabedoria é a coisa principal, adquire o conhecimento em troca tudo o que possuis."

(Provérbios 4: 5 - 7)

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de agradecer a Deus, por ter primeiramente o privilégio de estar vivo, e conseqüentemente, abençoado com a oportunidade de descrever este trabalho.

Agradeço também ao professor Dr. André Lourenço Nogueira, meu orientador que tanto me ajudou neste projeto e entrou a fundo comigo neste trabalho.

Aos meus pais que sempre me apoiaram e estão comigo em todas as quedas e conquistas. A minha esposa Poliana Linzmeyer, a quem tem me compreendido por disponibilizar mais tempo aos estudos do que para ela. Ao meu filho Pietro Linzmeyer, o qual tenho lhe dado todo amor, carinho, afeto e dedicação, se tornando o maior presente que Deus me proporcionou, para unir esta família que está se formando agora e que tanto amo.

Aos professores do Mestrado em Engenharia de Processos que também contribuíram para a realização deste projeto. À Universidade da Região de Joinville e todos os amigos que sempre se ajudaram para passar nas matérias, enfim todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste projeto.

RESUMO

Na fabricação de produtos oriundos do processo de injeção de termoplásticos, busca-se constantemente otimizar as condições de processamento para reduzir custos e melhorar a qualidade do produto. Para que erros de fabricação do molde sejam corrigidos ainda na fase de projeto, a simulação da injeção de termoplásticos é uma ferramenta essencial, porém atualmente utilizada por uma minoria de empresas transformadoras de plásticos e ferramental. No presente trabalho, um estudo experimental e de simulação foi realizado buscando compreender as razões para a alta ineficiência de injeção de um molde de um copo com duas cavidades que não passou por um estudo de simulação antes de ser fabricado, e gerava uma grande quantidade de refugos quando em operação. O *software Solid Works Plastics* foi utilizado para realizar as simulações do processo de injeção dos copos utilizando o termoplástico GPPS (*General Purpose Polystyrene*). Variando-se alguns parâmetros operacionais (pressão de injeção, temperatura de injeção e temperatura do molde) nos ensaios experimentais e de simulação, identificou-se que o aprisionamento de gases era o principal fator responsável pela ineficiência das injeções, caracterizadas principalmente por preenchimento insuficiente das cavidades do molde. Visando resolver o problema do processo, saídas de gases foram incluídas no projeto virtual do molde e testadas via simulação computacional. Com base nos resultados simulados de melhora de eficiência do processo, as saídas de gases foram executadas no molde real, e os resultados experimentais obtidos corroboraram as previsões do modelo. Consequentemente, conseguiu-se um significativo aumento da eficiência da injeção, assim como uma significativa redução na geração de refugo e no custo energético do processo. O modelo matemático utilizado pelo software foi validado comparando-se as médias das massas injetadas experimentalmente com as massas simuladas. Uma análise estatística baseada em planejamento experimental foi realizada, e os resultados demonstraram que a pressão de injeção é o parâmetro mais importante do processo, seguido pela temperatura de injeção e pela temperatura do molde. A realização deste estudo possibilitou ainda identificar as faixas de valores para os parâmetros de injeção capazes de otimizar o processo estudado, tanto do ponto de vista econômico quanto de qualidade do produto.

Palavras-chave: *moldagem por injeção; molde; termoplástico, aprisionamento de gases; simulação.*

ABSTRACT

The constant increase of the worldwide consumption of plastics products made by injection moulding, associated to the strong market competition, has motivated engineers and researchers to sought to optimize the processing conditions aiming to reduce costs and enhance the quality of the product. Computational simulation of injection processes is a powerful tool that can be used to identify and correct mistakes in injection molds in the phase of its project. Although the inherent advantages, only few companies in the field of plastic processing and mold manufacturing uses processes simulation. The present study developed an experimental and a simulation study to identify and understand the reasons for the low efficiency of an injection mold that has not been submitted to a simulation study before its construction. As a consequence, the mould was generating large amounts of scraps. The software *Solidworks Plastics* was used to perform the simulations of the injection of glasses with the thermoplastic GPPS (General Purpose Polystyrene). The results obtained experimentally and mainly in the simulations by varying the process parameters (injection pressure and temperature, and mould temperature) revealed that main cause for the low process efficiency was the gas trapping in the mould. This problem was causing an incomplete filling of the mould cavities by thermoplastic. In order to reduce or solve the problem, gases exits were included in the virtual project of the mould and hereafter computationally simulated to evaluate the process performance. Once the simulation findings showed a significant increase of the process efficiency, the gases exits were made in the real mould. The experimental results obtained with the modified mould corroborated the simulation findings and, consequently, there was a significant improvement of the process efficiency as well the reduction of the scrap production and energy costs. The mathematical model used by the software was validated by comparing the injected masses experimentally obtained with those generated by simulation. A statistical analysis based on a design of experiment was performed and the results revealed that the injection pressure is the most important parameter of the process, followed by the injection temperature and the mould temperature. On the basis of the findings obtained in this study, it was possible to identify the range of values for the studied process parameter in which is possible to optimize the process from the economical and product quality point of view.

Keywords: *injection moulding, mould, thermoplastic, air trapping, simulation*

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Forma geral da conservação de massa	21
Equação 2 – Forma geral da quantidade de movimento.	37
Equação 3 – Forma geral da quantidade de energia.	37
Equação 4 – Fluxo de calor expresso pela lei de Fourier.....	38
Equação 5 – Simplificação da equação da conservação de massa.....	38
Equação 6 – Simplificação da equação da quantidade de movimento.	38
Equação 7 – Simplificação da equação da quantidade de energia.	38
Equação 8 – Forma geral da taxa de cisalhamento.	39
Equação 9 – Tensão de cisalhamento de lei das potências	39
Equação 10 – Conservação de massa introduzida no <i>software</i>	21
Equação 11 – Quantidade de movimento introduzida no <i>software</i>	21
Equação 12 – Quantidade de energia introduzida no <i>software</i>	21
Equação 13 – Fluidiez.....	40
Equação 14 – Gradiente de Pressão.	40
Equação 15 – Velocidades no eixo “x”.....	40
Equação 16 – Velocidades no eixo “y”.....	40
Equação 17 – Taxa de cisalhamento.	40
Equação 18 – Valores iniciais de velocidades.....	40
Equação 19 – Valores iniciais de temperatura.	40
Equação 20 – Razão inicial da pressão pela viscosidade.	40
Equação 21 – Velocidade do fluido na camada congelada.	40
Equação 22 – Temperatura das extremidades.....	40
Equação 23 – Temperatura da camada congelada.....	41
Equação 24 – Eficiência de injeção.....	56
Equação 25 – Desvio da simulação.	62
Equação 26 – Energia consumida pela bomba fixa.	65
Equação 27 – Energia consumida pelo motor elétrico.	65
Equação 28 – Energia consumida por zona térmica.	65
Equação 29 – Consumo de energia por ciclo de injeção.....	65
Equação 30 – Custo da matéria prima por produto.....	66
Equação 31 – Custo de energia consumida por injeção.	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do processo de fabricação de um produto termoplástico.	17
Figura 2 – Estruturação do trabalho.	19
Figura 3 – Consumo de transformados plásticos no Brasil em milhões de toneladas.	22
Figura 4 – Consumo de plásticos no Brasil em 2015 por tipo de resina.	22
Figura 5 – Esquema de uma máquina injetora convencional.	24
Figura 6 – Representação de um ciclo de injeção.	25
Figura 7 – Esquema da formação de uma bolha de ar devido a presença de um obstáculo (gravura) no percurso do polímero.	31
Figura 8 – Força de cisalhamento resultante do escoamento de um polímero.	35
Figura 9 – Representação de uma cavidade retangular e seu domínio, como base das simulações executadas pelo software Solid works plastics.	39
Figura 10 – Malha de elementos finitos.	41
Figura 11 – Aprisionamento de gases oriundos dos compostos usados para pigmentação.	42
Figura 12 – Contração do PLA, com atuação dos canais de refrigeração.	43
Figura 13 – Tempo de preenchimento. a) Canal de injeção com seção transversal redonda, b) canal de injeção com seção transversal elíptica.	44
Figura 14 – Fluxograma das etapas executadas no presente trabalho.	45
Figura 15 – Amostras retiradas do processo de injeção do molde do copo. a) amostra injetada em baixas pressões e temperaturas de injeção, b) amostra retirada em altas pressões e temperaturas de injeção, c) peça considerada boa para comercialização.	46
Figura 16 – Falhas de injeção de peças que preencheram totalmente as cavidades. a) Frisos internos, b) bolhas de ar.	42
Figura 17 – Período das etapas de injeção do molde do copo injetado em GPPS nas melhores condições de processamento.	48
Figura 18 – Modelo do produto “copo”.	49
Figura 19 – Detalhes das cavidades do projeo do molde. a) extração da cavidade superior, b) extração da cavidade inferior.	51
Figura 20 – Localização do ponto de injeção.	52
Figura 21 – Cavidade inferior (fêmea). a) Cavidade usinada, b) cavidade projetada.	

.....	53
Figura 22 – Vista em corte do posicionamento dos termopares na cavidade do molde.....	52
Figura 23 – Casca do produto escalonado (domínio das simulações).....	52
Figura 24 – refinamento de malha triangular. a) vista ampliada da borda do copo, b) tamanho do vértice 5 mm, c) tamanho do vértice 2 mm, d) tamanho do vértice 1 mm, e) tamanho do vértice 0,5 mm.....	58
Figura 25 – Definição do material injetado.....	59
Figura 26 – Definição do material das cavidades.....	59
Figura 27 – Definição dos parâmetros de processamento.....	60
Figura 28 – Definição da localização e diâmetro do ponto de injeção.....	61
Figura 29 – Representação do motor elétrico e a bomba fixa de uma máquina injetora convencional.....	64
Figura 30 – Amostras ineficientes (refugo) do processo de injeção do copo. a) amostra com baixíssima eficiência, b) amostra com baixa eficiência.....	49
Figura 31 – Eficiências de injeção variando as pressões e temperaturas de injeção. a) temperatura do molde de 20 °C, b) temperatura do molde de 30 °C, c) temperatura do molde de 40 °C, d) temperatura do molde de 50 °C	73
Figura 32 – Influência do tamanho de malha nos resultados das simulações, nas condições, a) condição de menor eficiência de injeção, b) condição com a maior eficiência de injeção.....	75
Figura 33 – Comparação qualitativa da simulação com o processo real em condições de iguais. a) massa simulada de 122,75 g, b) massa injetada 114,90 g.....	79
Figura 34 – Desvios das simulações variando as pressões e temperaturas de injeção. a) temperatura do molde de 20 °C, b) temperatura do molde de 30 °C, c) temperatura do molde de 40 °C, d) temperatura do molde de 50 °C.....	80
Figura 35 – Aprisionamento de gases.....	82
Figura 36 – Representação da gravura acumuladora de gases.....	83
Figura 37 – Alterações mecânicas da cavidade inferior: saídas de gases.....	84
Figura 38 – Período das etapas de injeção do molde do copo com saídas de gases, injetando nas melhores condições.....	87
Figura 39 – Produto de boa qualidade para comercialização.....	88
Figura 40 – Eficiências de injeção variando as pressões e temperaturas de injeção, considerando o molde modificado. a) temperatura do molde de 20 °C, b) temperatura	

do molde de 30 °C, c) temperatura do molde de 40 °C, d) temperatura do molde de 50 °C.	89
Figura 41 – Desvios das simulações variando as pressões e temperaturas de injeção considerando o molde modificado. a) temperatura do molde de 20 °C, b) temperatura do molde de 30 °C, c) temperatura do molde de 40 °C, d) temperatura do molde de 50 °C.	91
Figura 42 – Gráficos 3D dos perfis de preenchimento mássico das cavidades do molde em função da pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 40 °C e com o molde sem as alterações realizadas: a) Massas simuladas, b) médias das massas de amostras de injeção.....	93
Figura 43 – Gráficos 2D dos perfis de preenchimento mássico das cavidades do molde em função da pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 40 °C e com o molde sem as alterações realizadas: a) Massas simuladas, b) médias das massas de amostras de injeção.....	94
Figura 44 – Gráficos 3D dos perfis de preenchimento mássico das cavidades do molde em função da pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 40 °C e com o molde com as alterações realizadas: a) Massas simuladas, b) médias das massas de amostras de injeção.....	95
Figura 45 – Gráficos 2D dos perfis de preenchimento mássico das cavidades do molde em função da pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 40 °C e com o molde com as alterações realizadas: a) Massas simuladas, b) médias das massas de amostras de injeção.....	96
Figura 46 – Diagrama de Pareto do planejamento fatorial 3 ³ com um nível mínimo de 95% de confiança.....	99
Figura 47 – Superfície de resposta da interação das variáveis independentes na eficiência mássica de injeção. a) pressão de injeção (MPa) e temperatura de injeção (°C), b) pressão de injeção (MPa) e temperatura do molde (°C), temperatura de injeção (°C) e temperatura do molde (°C)..	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do aço P20.	30
Tabela 2 – Ficha técnica do GPPS.	50
Tabela 3 – Características da máquina injetora HAITIAN – PL 860/270 C.	51
Tabela 4 – Parâmetros de injeção utilizados nos testes experimentais e nas simulações.	55
Tabela 5 – Níveis para os fatores e seus valores codificados para planejamento fatorial 3 ³	63
Tabela 6 – Leitura das temperaturas da parede do molde em diferentes pontos das cavidades.	68
Tabela 7 – Valores médios das massas injetadas com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma temperatura de molde de 20 °C.	68
Tabela 8 – Valores médios das massas injetadas com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma temperatura de molde de 30 °C.	70
Tabela 9 – Valores médios das massas de injeção com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma temperatura de molde de 40 °C.	71
Tabela 10 – Valores médios das massas de injeção com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma temperatura de molde de 50 °C.	72
Tabela 11 – Resultados das simulações da injeção do copo no Solid works Plastics, variando a pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 20 °C.	76
Tabela 12 – Resultados das simulações da injeção do copo no Solid works Plastics, variando a pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 30 °C.	77
Tabela 13 – Resultados das simulações da injeção do copo no Solid Works Plastics, variando a pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 40 °C.	78
Tabela 14 – Resultados das simulações da injeção do copo no Solid Works Plastics,	

variando a pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 50 °C.	79
Tabela 15 – Valores médios das massas injetadas com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma temperatura de molde de 20 °C.....	85
Tabela 16 – Valores médios das massas injetadas com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma temperatura de molde de 30 °C.....	86
Tabela 17 – Valores médios das massas injetadas com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma temperatura de molde de 40 °C.....	87
Tabela 18 – Tabela 17 - Valores médios das massas injetadas com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma temperatura de molde de 50 °C.....	88
Tabela 19 – Resultados das médias das amostras de injeção e seus desvios padrões no planejamento fatorial 3 ³ , com as variáveis independentes codificadas e reais.....	98
Tabela 20 – Valores utilizados nos cálculos de custo de injeção para o molde sem alterações.....	101
Tabela 21 – Comparação dos indicadores de processo antes e após as alterações realizadas.....	103
Tabela 22 – Comparação dos custos de processamento e receita gerada antes e após as alterações realizadas.....	103

LISTA DE SIGLAS

PS – Poliestireno

GPPS – Poliestireno Cristal (*General Purpose Polystyrene*)

CAD – Projeto Auxiliado por Computador (*Computer Aided Design*)

CAE – Engenharia Auxiliada por Computador (*Computer Aided Engineering*)

3D – Três Dimensões

PE – Polietileno

PP – Polipropileno

EVA – Acetato-vinilo de Etileno (*Ethylene Vinyl Acetate*)

AISI – Instituto Americano de Classificação de Metais (*American Iron and Steel Institute*)

PVC – Policloreto de Polivinila (*Polyvinyl Chloride*)

ASTM – Orgão de Normatização de Materiais (*American Society for Testing and Materials*)

ISO – Organização Internacional de Padronização (*International Organization for Standardization*)

IF – Índice de Fluidez

PLA – Termoplástico de Ácido Polilático (*Polylactic Acid*)

LISTA DE SÍMBOLOS

η – Viscosidade (Pa·s)

ρ – Densidade (kg/m³)

$\vec{\nabla}$ – Gradiente

∂ – Derivada

u – Velocidade (m/s)

t – Tempo (s)

P – Pressão (Pa)

τ – Tensão de cisalhamento (Pa)

g – Aceleração da gravidade (m/s²)

C_V – Calor específico em volume constante (J/kg.K)

T – Temperatura (K)

q – Fluxo de calor (W)

K – Condutividade térmica (W/m.K)

C_P – Calor específico à pressão constante (J/kg.K)

γ – Taxa de cisalhamento (s⁻¹)

S – Fluidez (m³.s/kg)

Q – Vazão mássica (kg/s)

w – Largura (m)

L – Comprimento (m)

h – Altura (m)

x – Eixo x

y – Eixo y

z – Eixo z

n_i – Eficiência de injeção (%)

δ_s – Desvio de simulação (%)

M_{sim} – Massa simulada (g)

\bar{M}_{inj} – Média de massas injetadas (g)

M_t – Massa total estimada (g)

E_{inject} – Consumo de energia por injeção (W)

T_{inject} – Temperatura de injeção (°C)

P_{inject} – Pressão de injeção (MPa)

$P_{holding}$ – Pressão de recalque (MPa)

T_{wall} – Temperatura do molde (°C)

E_{bf} – Consumo de energia da bomba fixa (W)

ZT – Consumo de energia de cada zona térmica da injetora (W)

$\$MP$ – Custo do material utilizado para fabricar um produto (R\$)

$\$I$ – Custo por injeção (R\$)

C_i – Tempo do ciclo de injeção (s)

$\$E$ – Custo da energia fornecida pela estatal (R\$/KWh)

$\$M$ – Custo da matéria prima (R\$/kg)

N_c – Número de cavidades do molde

\dot{V} – Velocidade de injeção (cm³/s)

SUMÁRIO

LISTA DE EQUAÇÕES	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE SIGLAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS	13
SUMÁRIO	14
INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo geral.....	20
2.2 Objetivos específicos	20
3 REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1 Plásticos.....	21
3.1.1 Poliestireno Cristal de Propósito Geral (<i>GPPS – General Purpose Polystyrene</i>).....	23
3.2 Processo de injeção.....	23
3.2.1 Máquina injetora	24
3.2.2 Ciclo de injeção	25
3.2.3 Parâmetros de injeção	26
3.2.3.1 Temperatura de injeção	26
3.2.3.2 Temperatura do molde	27
3.2.3.3 Pressão de injeção	27
3.2.3.4 Pressão de recalque.....	27
3.2.3.5 Velocidade de injeção.....	27
3.3 Molde de injeção.....	28
3.3.1 Projeto de um molde de injeção de termoplásticos	28
3.3.2 Cavidades do molde.....	28
3.3.3 Ponto de injeção	29
3.3.4 Materiais (aço P20).....	29
3.3.5 Avanço da frente de enchimento	30
3.3.6 Camada congelada.....	30
3.4 Falhas de injeção.....	30
3.4.1 Aprisionamento de gases	31
3.4.2 Tensões residuais.....	32

3.4.3	Refugo.....	32
3.5	Propriedades e características dos polímeros fundidos.....	32
3.5.1	Reologia.....	33
3.5.2	Viscoelasticidade.....	33
3.5.3	Viscosidade.....	33
3.5.4	Índice de fluidez.....	34
3.5.5	Tensão de cisalhamento.....	34
3.5.5	Taxa de cisalhamento.....	35
3.6	Simulação numérica aplicada a processo de injeção.....	35
3.6.1	Pacotes comerciais – Simuladores do processo de injeção de termoplásticos.....	36
3.6.2	Modelo matemático utilizado pelo <i>Solid Works Plastics</i>	37
3.7	Estado da arte.....	42
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
4.1	Problemática.....	46
4.2	Análise do projeto inicial do produto.....	48
4.2.1	Geometria e complexidade do produto.....	48
4.2.2	Material do produto a ser injetado.....	49
4.2.3	Contração do produto a ser injetado.....	50
4.2.4	Número de cavidades do molde.....	50
4.2.5	Máquina injetora para produzir o produto.....	51
4.3	Projeto do molde de injeção.....	52
4.3.1	Ponto de injeção.....	52
4.3.2	Materiais das cavidades e tratamento térmico.....	53
4.4	Ensaio experimental de injeção dos copos de GPPS.....	53
4.5	Simulação do processo de injeção.....	56
4.5.1	Geração do domínio (casca escalonada).....	56
4.5.2	Geração de malha.....	57
4.5.3	Definição de polímero.....	59
4.5.4	Definição do material das cavidades.....	59
4.5.5	Introdução dos parâmetros de injeção no software.....	60
4.5.6	Definição do ponto de injeção.....	61
4.6	Metodologia de validação do modelo matemático usado nas simulações.....	62
4.7	Planejamento experimental.....	62
4.7.1	Planejamento Fatorial 3 ³	63
4.8	Energia consumida por ciclo de injeção.....	64
4.8.1	Cálculos do custo por ciclo de injeção.....	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67

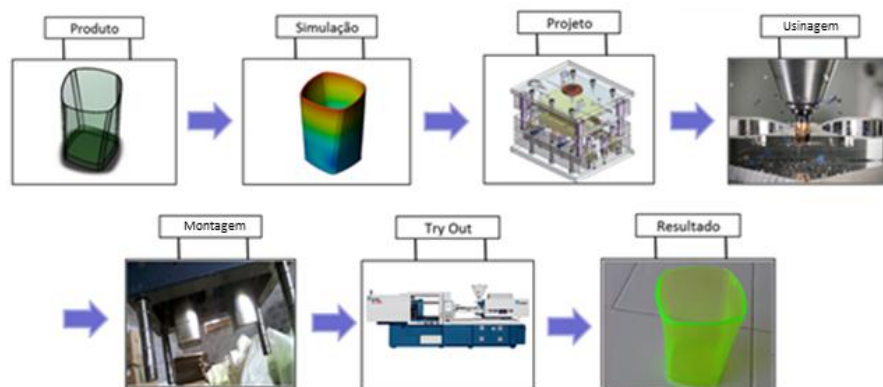
5.1	Ensaio experimentais da injeção dos copos	67
5.2	Resultados das simulações	74
5.3	Melhorias de projeto	83
5.4	Injeção das amostras com o molde modificado	84
5.5	Considerações finais sobre o modelo matemático usado nas simulações	93
5.6	Planejamento experimental.....	97
5.7	Otimização energética de processamento	101
	CONCLUSÕES.....	105
	REFERÊNCIAS	107

INTRODUÇÃO

A moldagem por injeção de termoplásticos é um processo de custo muito elevado, com moldes fabricados em aço-ferramenta. Neste processo, o material termoplástico é alimentado, através de um funil, em um canhão aquecido contendo uma rosca recíproca, onde será fundido e submetido a um processo de mistura na presença de aditivos (ELIAS, 2003). O resultado desta etapa de mistura gera uma resina no estado fundido que é injetada nas cavidades do molde matriz (LESKO, 2004).

Nas últimas décadas, o consumo de termoplásticos vem crescendo conforme as demandas por produtos inovadores, e com o aumento do desenvolvimento de peças e componentes em setores como o de eletrodomésticos, moveleiro e automobilístico (LÓPEZ *et. al*, 2016). Até que um produto final feito em material termoplástico esteja pronto para comercialização, ele deve passar pelas etapas de fabricação apresentadas na Figura 1.

Figura 1– Etapas do processo de fabricação de um produto termoplástico.



Fonte: Primária, 2017.

Atualmente, a engenharia de projetos de moldes de injeção tem garantido grande precisão na fabricação destes componentes, tendo em vista a existência de ferramentas computacionais capazes de simular o processo de injeção de termoplásticos, o que tem gerado resultados que auxiliam o desenvolvimento e a execução destes moldes (ZHUANG *et al.*, 2016). Desta forma é possível, desenvolver processos mais eficientes e produtos de melhor qualidade (GOMEZ-LÓPEZ *et al.*, 2013).

Para desenvolver projetos ou executar melhorias em moldes de injeção, ferramentas do tipo *CAD* (*Computer Aided Design*), *CAE* (*Computer Aided Engineering*) e *CAM* (*Computer Aided Manufacturing*) vêm sendo utilizadas para se avaliar computacionalmente o desempenho do processo. Os *softwares CAD* dispõem de modelos volumétricos em três dimensões (3D) que possibilitam projetar moldes de injeção, e permitem ter o acompanhamento do dimensionamento exato de todas as medidas, cotas, estruturas etc (OLIAEI *et al.*, 2016). Estas ferramentas computacionais são as mais indicadas para esta tarefa, pois além de auxiliarem e facilitarem significativamente a construção de moldes de injeção, também reduzem o tempo de desenvolvimento do projeto do molde (SOUZA, 2004; BEAUMONT, 2004).

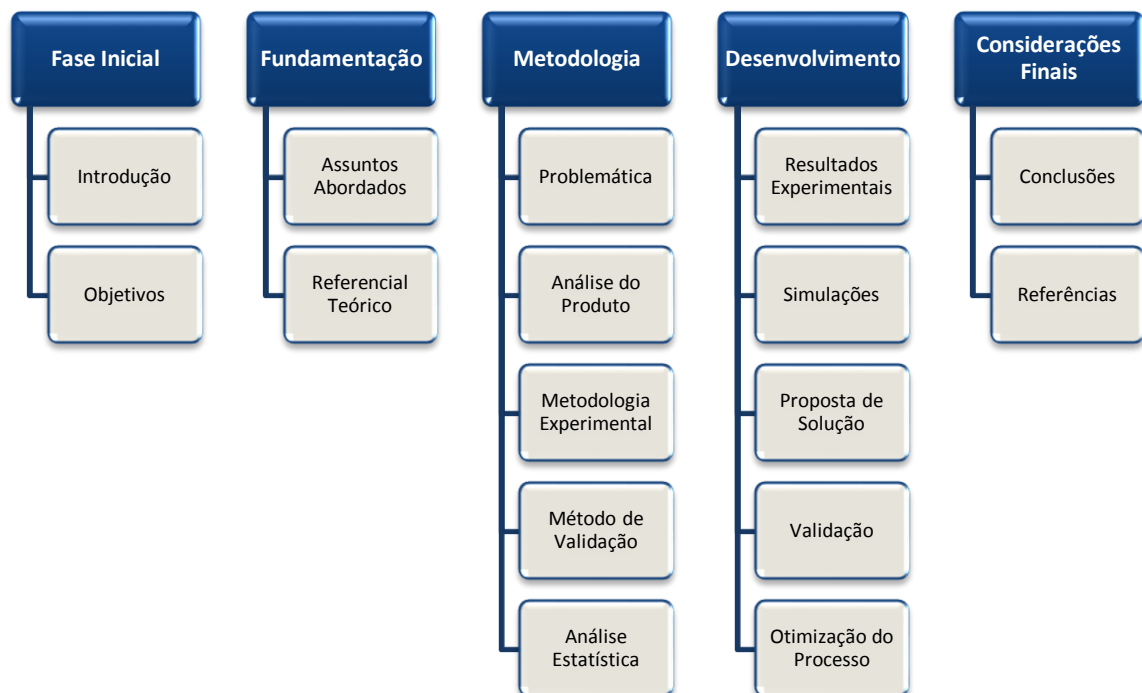
De acordo com Blasio (2007), em casos nos quais empresas fabricantes de moldes de injeção de termoplásticos não utilizam a engenharia de simulação como ferramenta de projeto, as indústrias transformadoras de plásticos detectam falhas no produto injetado somente depois de testar o molde fabricado. Essas falhas podem ocorrer devido a um preenchimento incompleto das cavidades, ponto de alimentação ou canais de injeção mal localizados, bolhas de ar, defeitos causados por refrigeração inadequada das cavidades ou degradação do material injetado (HARADA, 2004). Isso implica que o molde deve ser repensado e retrabalhado recorrentemente até que o mesmo seja capaz de injetar peças sem falhas. O projeto de moldes de injeção de termoplásticos pode ainda estar inapropriado para a máquina injetora, ou até mesmo ao material injetado (MANRICH, 2013).

Estudos de simulação computacional do processo de injeção com defeitos podem fornecer importantes informações sobre os fatores causadores de ineficiência de processamento (KIM e TURNING, 2004). Com base nas informações geradas por simulações do processo injeção, alternativas de melhoria no projeto do molde ou até mesmo do produto podem ser executadas para se aumentar a produtividade do processo e minimizar a geração de refugos.

Dentro deste contexto, neste estudo utilizou-se uma ferramenta de simulação numérica do tipo *CAE*, o *Solid Works Plastics*, para estudar o comportamento de um molde de injeção de termoplásticos utilizado na produção de copos em poliestireno cristal (GPPS – *General Purpose Polystyrene*) que, em condições normais de operação, apresentava falhas de injeção no produto causadas principalmente pelo não preenchimento total das cavidades em ciclo normal (baixa eficiência de injeção). Este problema resultava na ineficiência de produção (elevados ciclos de injeção) e

grande geração de refugos em uma empresa transformadora de plásticos da região de Joinville - SC. Análises da influência de alguns parâmetros na eficiência do processo foram realizadas e, com base nos resultados obtidos, modificações no molde foram propostas e executadas. Um estudo estatístico utilizando planejamento fatorial foi desenvolvido depois das alterações realizadas no molde com o objetivo de identificar os principais parâmetros de processamento que mais influenciam na eficiência de injeção. A execução do presente estudo ocorreu em parceria com uma empresa transformadora de polímeros da região de Joinville. A estruturação do documento, com as principais etapas do desenvolvimento deste estudo, está apresentada resumidamente na Figura 2.

Figura 2 – Estruturação do trabalho.



Fonte: Primária, 2017.

De acordo com a Figura 2, a na fase inicial do trabalho realizado uma introdução e serão mostrados os objetivos. Na segunda parte é feita a fundamentação do trabalho com a revisão bibliográfica, seguida da metodologia realizada no estudo. Em seguida são demonstrados os resultados com o desenvolvimento do trabalho, encerrando com as conclusões e referências do trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar experimentalmente e por simulação computacional o comportamento do processo de injeção de copos em GPPS, visando identificar as causas da ineficiência do mesmo e propor melhorias no projeto do molde para otimizar o processo real e reduzir a geração de refugos.

2.2 Objetivos específicos

Como este estudo envolve diferentes etapas, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- ❖ Analisar experimentalmente a influência de parâmetros do processo no comportamento de um molde de injeção empregado na fabricação de copos em poliestireno cristal (GPPS);
- ❖ Identificar os fatores responsáveis pelos problemas de preenchimento ineficiente das cavidades do molde;
- ❖ Simular o processo de injeção do GPPS no molde para copos utilizando uma ferramenta CAE (*Solid Works Plastics*) para avaliação virtual do comportamento do processo;
- ❖ Validar o modelo matemático usado nas simulações utilizando dados experimentais do processo;
- ❖ Efetuar melhorias virtuais no projeto do molde utilizando o *software* CAD de engenharia *Solid Works*, para reduzir a quantidade de refugos gerada;
- ❖ Aplicar na prática as alterações propostas para melhoria do projeto do molde de injeção;
- ❖ Revalidar o modelo confrontando os resultados de simulação os obtidos no processo industrial no qual o estudo está baseado;
- ❖ Identificar os parâmetros de injeção que possuem maior influência na eficiência de injeção empregando um planejamento experimental.
- ❖ Mapear a faixa de valores dos parâmetros de processo capaz de otimizar o custo do processo de injeção do termoplástico poliestireno cristal (GPPS).

3 REVISÃO DA LITERATURA

No presente capítulo será apresentada uma revisão conceitual sobre os materiais plásticos, o processo de injeção destes materiais, assim como os moldes usados neste processo. Serão apresentadas ainda as ferramentas de simulação comercialmente disponíveis e que podem ser utilizadas para suportar o projeto de moldes de injeção e avaliar o comportamento dos mesmos quando em operação.

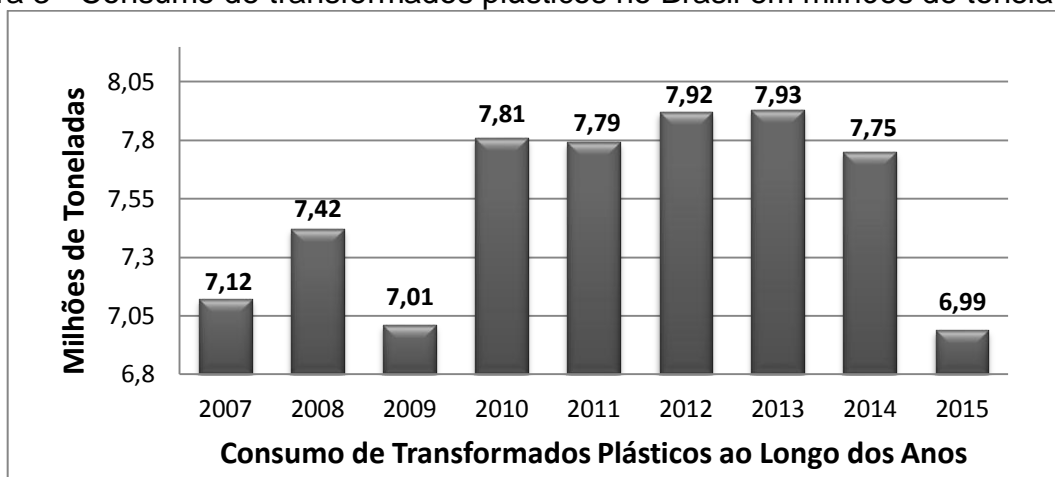
3.1 Plásticos

Segundo Oswald *et al.* (2006), plásticos são materiais formados pela união de grandes moléculas chamadas de cadeias poliméricas. Essas cadeias são constituídas por várias moléculas de monômeros ligadas entre si, que se repetem ao longo da estrutura molecular do polímero. Os plásticos podem ser classificados de distintas maneiras com relação à suas características de processamento, estes materiais podem ser classificados em termoplásticos e termorrígidos (CALISTER Jr. e RETHWISH, 2012). Os termorrígidos são plásticos cuja rigidez não se altera com a temperatura, diferente dos termoplásticos que amolecem e fundem-se quando adequadamente aquecidos. Diferentemente dos termoplásticos, uma vez aquecidos em altas temperaturas, os polímeros termorrígidos se decompõem, não podendo ser novamente fundidos e remoldados.

Pelo fato dos materiais plásticos terem densidade menor que os metais e as cerâmicas, diversos setores industriais, como o de transportes, embalagens, equipamentos esportivos e etc., têm investido constantemente no desenvolvimento de peças plásticas que sejam capazes de substituir os tradicionais e mais pesados materiais em diversas aplicações, sem que as propriedades necessárias ao produto final sejam comprometidas (ARAÚJO, 2010).

De acordo com a Associação Brasileira de Plásticos (ABIPLAST), somente no ano de 2015, foram consumidas cerca de 7 milhões de toneladas de transformados de plásticos no Brasil (Figura 3).

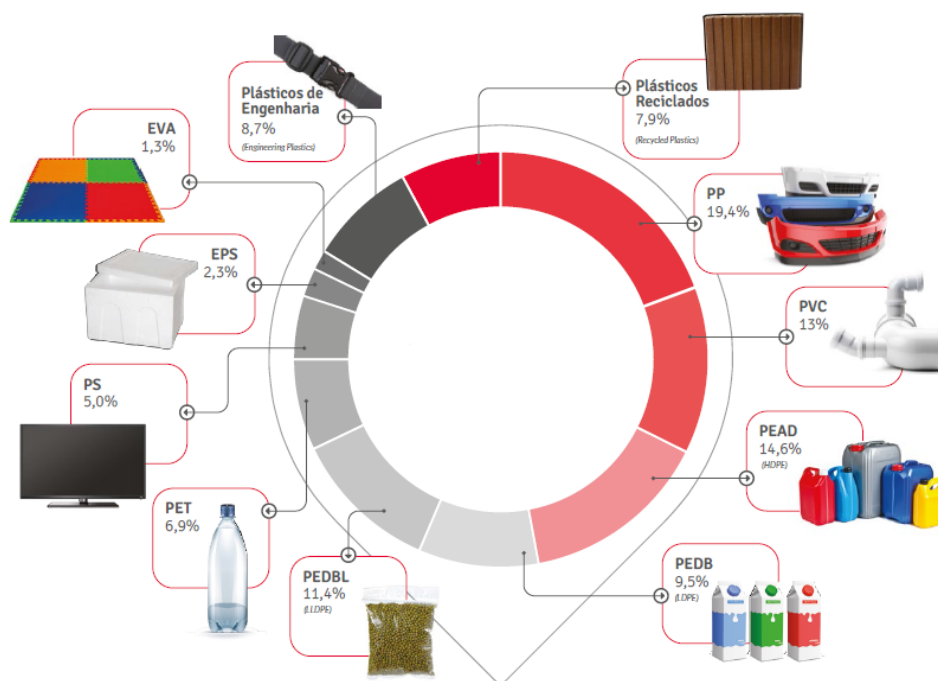
Figura 3 - Consumo de transformados plásticos no Brasil em milhões de toneladas.



Fonte: adaptada de ABIPLAST, 2016.

Conforme informações da ABIPLAST (Figura 4), as resinas termoplásticas com maior consumo em 2015 foram as poliolefinicas (PP e PE), seguidas pelo PVC. Enquanto a maioria das outras resinas foi consumida em proporções relativamente equilibradas, com exceção do EVA.

Figura 4 – Consumo dos plásticos no Brasil em 2015 por tipo de resina.



Fonte: ABIPLAST, 2016.

De acordo com a Figura 4, somente a resina de poliestireno representou 5% do consumo total em 2015, que se comparada com os valores da Figura 3, representa cerca de aproximadamente 350 mil toneladas de poliestireno.

3.1.1 Poliestireno cristal de propósito geral (GPPS – *General Purpose Polystyrene*)

O poliestireno, também chamado de PS, é um polímero termoplástico que tem uma estrutura molecular predominantemente amorfa. Apesar de ser um dos tipos de polímeros menos utilizados como material de engenharia, principalmente devido a sua fragilidade (WIEBECK e HARADA, 2004), é bastante utilizado em outras aplicações, como em brinquedos, isolantes elétricos, partes de refrigeradores e embalagens.

Em 2015, conforme dados da ABIPLAST, o PS representou 5% das aplicações de resinas plásticas no país (Figura 4). Mesmo representando apenas 5% do consumo nacional em 2015, cerca de 350 mil toneladas de PS foram industrializadas e transformadas em produtos (valor calculado com base no consumo de transformados plásticos contido na Figura 3).

A maior parte do poliestireno produzido comercialmente é obtida pelas técnicas de polimerização em massa ou suspensão. O poliestireno cristal, especificamente, é produzido continuamente pela polimerização em massa do estireno iniciada termicamente (HARPER, 2000). O PS cristal é conhecido internacionalmente como GPPS (*General Purpose Polystyrene*), sendo comercializado na forma de *pellets* de uma resina transparente ou em cores opacas (JARM, 2012).

Algumas das principais características do GPPS incluem seu fácil processamento, fácil coloração, baixo custo, elevada resistência a ácidos e álcalis, baixa densidade e absorção de umidade, além de baixa resistência a solventes orgânicos (NESTLE *et al.*, 2007). Os processamentos usualmente empregados a este termoplástico incluem a injeção, extrusão e termoformagem.

3.2 Processo de injeção

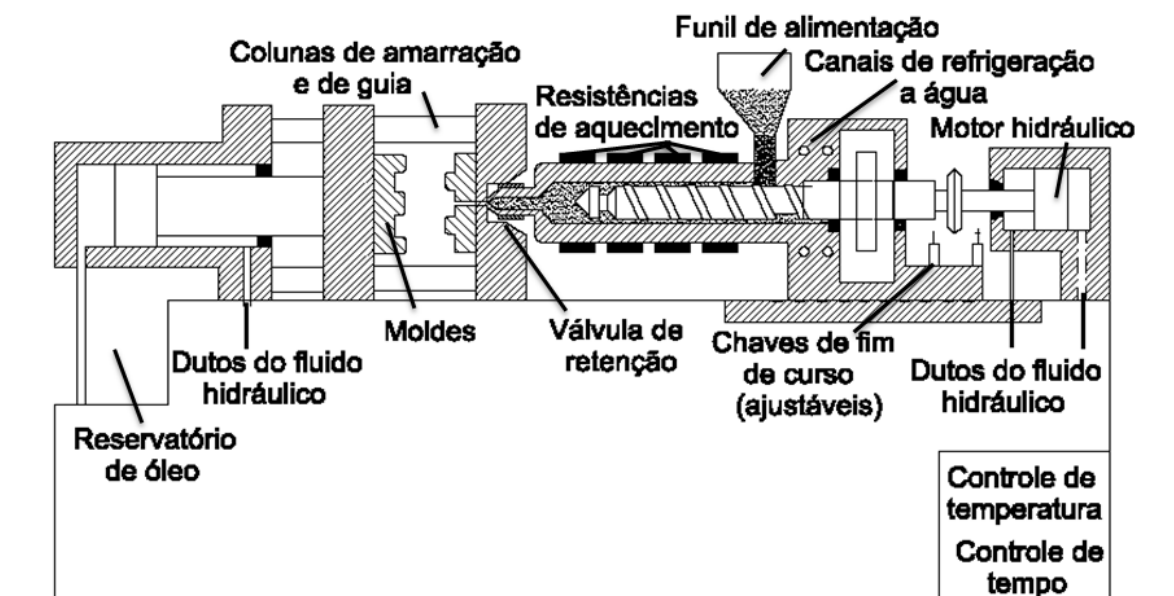
De acordo com Tonolli (2003), a injeção é um processo intermitente (não contínuo), que segue uma sequência de etapas que constituem um ciclo de injeção. O polímero fundido só entra no molde de injeção quando ele se encontra fechado e vazio. Na sequência do ciclo, o molde é preenchido de polímero aquecido e devidamente amolecido/fundido, sob condições controladas de pressão e temperatura (THOMAZI, 2009; DARÉ, 2001). Depois do preenchimento e

pressurização do molde, uma pressão de compensação, também dita pressão de recalque, deve ser empregada para garantir que todos os espaços vazios da cavidade do molde sejam adequadamente preenchidos pelo polímero (GUILONG *et. al*, 2010). Concomitantemente, o molde é resfriado por um sistema de refrigeração interno para solidificar a peça. Em seguida, a peça plástica final, devidamente resfriada e solidificada, é ejetada da máquina injetora com a forma geométrica da cavidade do molde (KERZNER, 2002). A retirada do produto pode ser realizada por extração mecânica ou pneumática. Na mecânica, o molde aciona os pinos extratores para expulsar as peças de dentro das cavidades, e na pneumática, a peça é ejetada por válvulas que permitem a passagem de ar comprimido (MANRICH, 2013).

3.2.1 Máquina injetora

A máquina injetora possui um sistema capaz de amolecer, fundir, homogeneizar e injetar o polímero fundido em um molde. Para isso, essa máquina utiliza uma rosca recíproca, que pode ser acionada por sistemas mecânicos, elétricos, pneumáticos e hidráulicos (CARNEIRO, 2006). Na Figura 5 é apresentado um esquema de uma máquina injetora, assim como as partes/peças/componentes principais de funcionamento.

Figura 5 - Esquema de uma máquina injetora convencional.



Fonte: LESKO, 2004.

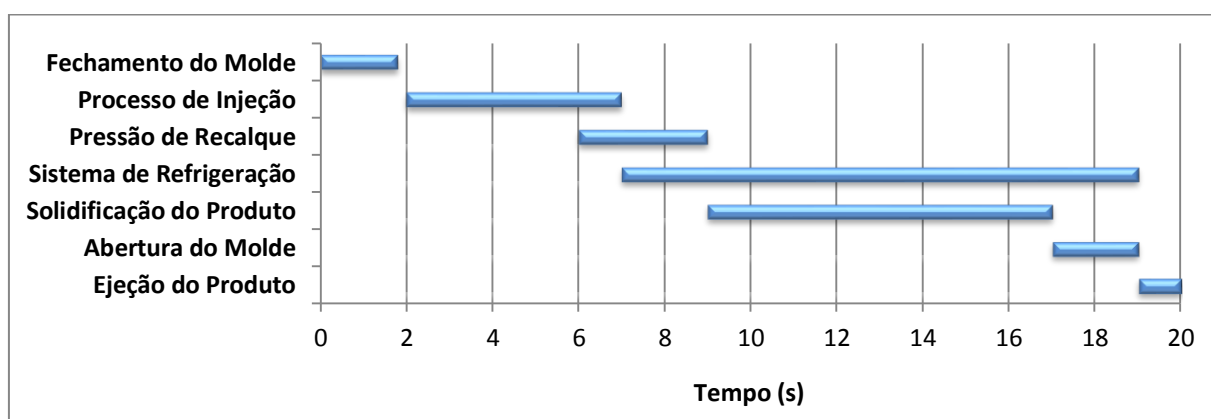
No esquema representado na Figura 5, os termoplásticos são introduzidos pelo funil de alimentação e são empurrados pela rosca recíproca da injetora. No meio deste percurso, as resistências de aquecimento amolecem o polímero que entra líquido nas cavidades do molde fechado. Em seguida, é acionado o sistema de refrigeração interna do molde que promove a solidificação do polímero. Só então as cavidades se abrem e o processo de extração promove a ejeção da peça pronta (LESKO, 2004).

3.2.2 Ciclo de injeção

De acordo com Cruz (2002), o processo de injeção é um processo contínuo, mas sim processo intermitente, ou seja, contem etapas que compõe o ciclo de injeção. Nos ciclos de injeção existem estágios nos quais podem ocorrer paradas ou eventos que só acontecem após o término de um evento antecessor.

O ciclo de injeção é subdividido em dois ciclos menores, um decorrente da rosca recíproca e outro decorrente do molde, sendo ainda os dois interdependentes (OSSWALD; LIH-SHENG & GRAMANN, 2008). Na Figura 6 são representadas as etapas de um ciclo de injeção completo em função do tempo.

Figura 6 - Representação de um ciclo de injeção.



Fonte: Adaptada de KAZMER, 2007.

Conforme representado na Figura 6, o ciclo de injeção se inicia quando o molde se fecha, em seguida a rosca recíproca empurra o polímero para o processo de injeção das cavidades. Antes que do preenchimento se concluir, é acionada uma pressão de recalque para que o polímero não retorne pelo canal de injeção, após o fim da injeção, o sistema de refrigeração é acionado para iniciar a solidificação do

polímero. Quando o molde se abre a peça pronta é ejetada finalizando o ciclo de injeção, que retorna a iniciar quando o molde se fecha novamente.

3.2.3 Parâmetros de injeção

Para se obter um produto termoplástico injetado com qualidade, é extremamente importante utilizar valores adequados dos parâmetros de processamento. Estes parâmetros variam inicialmente entre o tipo de molde e o tipo de máquina injetora (BRITO *et al.*, 2004). Entretanto, cada máquina possui limites distintos, como a pressão de fechamento do molde, o torque para giro da rosca, as pressões exercidas pelo pistão sobre a massa fundida, entre outras características. O conjunto destes parâmetros é conhecido como parâmetros de injeção (KAZMER, 2007).

3.2.3.1 Temperatura de injeção

Segundo Hassan e colaboradores (2010), a temperatura de injeção é a temperatura na qual o polímero entra nas cavidades do molde através do canal de injeção. Porém, a temperatura do polímero fundido varia enquanto escoar pelo caminho percorrido durante o preenchimento das cavidades. Quanto mais baixas forem as temperaturas de injeção, maior será a viscosidade da massa polimérica fundida e, conseqüentemente, maiores serão as dificuldades de escoamento da massa viscosa (BRETAS e D'AVILA, 2000). Porém, se ele for processado em temperaturas muito elevadas, o polímero sofre tensões residuais excessivas, o que pode dificultar o escoamento do mesmo pelos canais das cavidades. Se o polímero possuir elementos de pigmentação, esses elementos podem ser liberados na forma de gases que atrapalham o escoamento do polímero e, conseqüentemente, o preenchimento das cavidades do molde (BRITO *et al.*, 2004).

3.2.3.2 Temperatura do molde

De acordo com Carneiro (2006), a temperatura do molde no momento de preenchimento das cavidades está diretamente ligada aos canais de refrigeração. Portanto, no projeto de um molde de injeção, o sistema de refrigeração deve ser considerado para que haja uniformidade na temperatura do molde (CATIC *et*

al., 2006). Para minimizar os efeitos de contração do polímero, é recomendável que a diferença de temperatura entre o lado macho e a cavidade do molde não ultrapassem 10 °C (SACCHELLI, 2002).

3.2.3.3 Pressão de injeção

Segundo Pötsch e Michaeli (2008), durante o preenchimento do molde, a pressão exercida pelo pistão sobre o material injetado é conhecida como pressão de injeção. Esta pressão é dependente da viscosidade do material e da geometria da peça. Ela é também a pressão necessária para preencher o molde. Desta forma, a pressão de injeção é a mínima pressão exercida para que o polímero preencha totalmente as cavidades do molde (CUNHA, 2004)

Com temperaturas baixas de processamento, a pressão de injeção pode originar tensões internas na área de entrada das peças injetadas, dificultando o restante do caminho percorrido pelo polímero entre as cavidades. Com pressões de injeção muito altas, o excesso de pressão pode produzir rebarbas na peça ou bloquear o molde, de modo que o mesmo não possa ser aberto pela força hidráulica exercida no lado móvel do molde (BRETAS e D'AVILA, 2000).

3.2.3.4 Pressão de recalque

É a pressão aplicada após a pressão de injeção para que o material não retorne para o bico injetor. Utiliza-se na pressão de recalque pressões menores que a pressão de injeção, evitando, desta forma, tensões internas no polímero e, conseqüentemente, possíveis falhas de injeção (FERNANDES *et al.*, 2011).

3.2.3.5 Velocidade de injeção

A velocidade de injeção é dada pela quantidade em volume que entra nas cavidades do molde por meio do bico de injeção na fase de preenchimento (cm^3/s). Mesmo se tratando da vazão volumétrica do material que entra nas cavidades do molde, esta é conhecida como velocidade de injeção. Esta velocidade está baseada no movimento do pistão da injetora (MALLOY, 2000).

3.3 Molde de injeção

O molde é o principal componente de um processo de injeção, e suas características influenciam de forma significativa o processo como um todo. Contudo, para o bom desempenho deste processo, devem ser estabelecidas as condições operacionais que melhor se adéquem às demandas e características do produto injetado, assim como deve ser feita uma avaliação de todos os benefícios futuros que serão obtidos com a construção do molde (CORAZZA, 2012).

O molde de injeção deve ser fixado na injetora conforme as especificações e geometrias do equipamento. Estes fatores geométricos devem ser cuidadosamente analisados antes que o molde seja confeccionado, pois a empresa que fabrica o molde geralmente não é a mesma que efetuará a injeção do polímero para a obtenção da peça plástica moldada (FERREIRA, 2002).

3.3.1 Projeto de um molde de injeção de termoplásticos

Um molde de injeção de termoplásticos é uma ferramenta muito complexa e cara de ser fabricada, pois conforme a exigência do produto a ser injetado, o mesmo necessitará de diversas informações de engenharia que devem ser levadas em consideração (CRUZ, 2002). Existe certa complexidade na execução do projeto de um molde de injeção, pois as informações da engenharia do molde são fragmentadas em diversas áreas, como por exemplo, o tipo da máquina injetora, suas capacidades e dimensionamento, o tipo de produto e suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, além do ciclo de injeção envolvido (SACCHELLI, 2007).

Um projeto bem dimensionado do molde de injeção e do produto a ser injetado resulta na eficiência do processo de transformação. Sendo assim, parâmetros como tempo de ciclo, velocidade de injeção e pressão de recalque, proporcionam a qualidade dos produtos associados ao termoplástico a ser injetado (STEINKO, 2004).

3.3.2 Cavidades do molde

Um molde de injeção possui duas ou mais cavidades com o formato da peça desejada. Para chegar até essas cavidades, o polímero deve percorrer os canais de injeção, chegando até o ponto de injeção por onde ele será alimentado nas

cavidades. Estas cavidades geralmente são construídas de aço-ferramenta, mais endurecido que os demais aços utilizados nas outras peças do molde de injeção. Em certas ocasiões, estes aços ferramenta recebem um tratamento térmico específico para que melhorem suas propriedades mecânicas, pois um molde de injeção é submetido a altas pressões, e ciclicamente isto pode desgastar as áreas de fechamento do molde (DIMLA, 2005). Para produzir estas cavidades, é preciso um estudo de engenharia detalhado, pois uma única cavidade envolve vários processos como: preenchimento, injeção, refrigeração, extração, fechamento e fixação (SACCHELLI, 2007).

3.3.3 Ponto de injeção

O ponto de injeção influencia vários fatores. Primeiramente, quanto mais estreita for à área de entrada, menor deve ser a marca deixada na peça acabada. Porém, a massa polimérica tende a cisalhar muito quando flui dos canais até o ponto de injeção (SMITH *et. al*, 2008). A dimensão do ponto de injeção deve ser proporcional ao tamanho da peça, a espessura das paredes e também é função direta do polímero injetado. Porém, materiais com tendência à degradação térmica devem ter pontos de injeção mais amplos, como é o caso do PVC e de outros polímeros de engenharia (MANRICH, 2013).

3.3.4 Materiais (aço P20)

Cada tipo de molde de injeção é fabricado de acordo com o material selecionado (aço ferramenta), conforme a necessidade do produto. O aço P20 é um aço ferramenta usado em grande escala na construção de cavidades de moldes de injeção (SANT'ANNA, 2011).

A *American Iron and Steel Institute* (AISI) classifica os aços ferramenta para moldes com o símbolo "P". Sua composição principal é cromo-níquel-molibidênio (Cr-Ni-Mo), fabricado por degaseificação a vácuo, temperável e com dureza na faixa de 30-34 HRC. A Tabela 1 reúne as principais propriedades do aço P20.

Tabela 1 - Propriedades do aço P20.

Propriedade	Valor
Densidade (mg/m ³)	7,80
Calor específico (J/kg.K)	460
Condutividade térmica (W/m.K)	29
Coefficiente de expansão térmica (K ⁻¹)	12 x 10 ⁻⁶
Módulo de elasticidade (GPa)	200

Fonte: BARETA *et al.*, 2007.

O aço P20 é muito utilizado por sua eficaz usinabilidade e soldabilidade, além de ter uma boa uniformidade e dureza tanto no estado recozido quanto beneficiado. Por isso, ele alcançou o patamar de aço mais vendido para fabricação de moldes no Brasil, chegando a mais de 80% dos casos, tendo ainda qualidade e melhor relação custo/benefício no projeto de moldes de injeção (MACHADO, 2006).

3.3.5 Avanço da frente de enchimento

O avanço da frente é o caminho que o polímero percorre durante o preenchimento da cavidade do molde. Existem pontos nos quais o polímero escoava mais rapidamente e outros que ele leva certo tempo para percorrer. Desta forma, o avanço da frente de enchimento é influenciado pela espessura da parede das cavidades, temperatura de injeção e pela velocidade de injeção (KOVACS & BERCSEY, 2005).

3.3.6 Camada congelada

A camada congelada é a espessura do polímero congelado em contato com a parede do molde. Este fenômeno ocorre pela perda de calor através do sistema de refrigeração do molde (CHEN *et. al*, 2009). Durante o escoamento do polímero, não podem ocorrer altos valores de temperatura na camada congelada, pois isto indica que existe uma alta resistência do fluxo, podendo afetar o tempo de injeção, aumentar a pressão de injeção e modificar as propriedades da peça (CATIC, 2006).

3.4 Falhas de injeção

Segundo Blasio (2007), existem três principais causas que provocam falhas

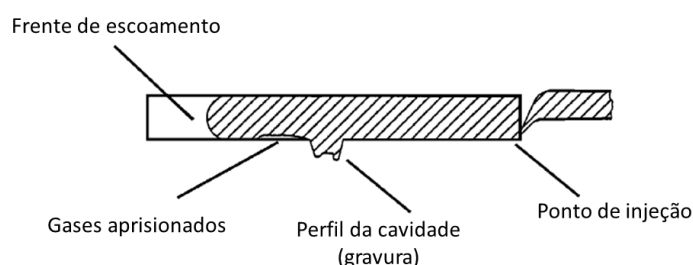
de injeção: máquina, molde ou material injetado. Cada fator pode ter até dezenas de causas associadas, ou ainda pode ter uma soma de fatores diferentes. Essas falhas podem ocorrer devido a um preenchimento incompleto das cavidades, rechupe, linhas de solda, tensões residuais, ponto de alimentação ou canais de injeção mal localizados, bolhas de ar, defeitos causados por refrigeração inadequada das cavidades ou degradação do material injetado (MOAYYEDIAN; ABHARY e MARIAN, 2015).

3.4.1 Aprisionamento de gases

O aprisionamento do ar ocorre quando a cavidade do molde tem paredes finas e espessas em várias áreas do produto, favorecendo o preenchimento das paredes espessas e dificultando a passagem do polímero nas regiões mais finas (SACCHELLI, 2002).

Como o ar se encontra comprimido dentro das cavidades do molde, dependendo da pressão e da velocidade de injeção, pode ocorrer a queima ou a degradação do material (carbonização). Quando as cavidades do molde contêm alguma gravura ou canal em sua geometria, mesmo sendo no início do caminho do escoamento percorrido pelo polímero, estes perfis rebaixados (gravuras) podem desencadear o aprisionamento de gases, dificultando o processo de injeção e ocasionando bolhas como falhas de injeção (GOODSHIP, 2010). Na Figura 7 é demonstrado como estas bolhas se formam com o avanço da frente de fluxo em regiões com gravuras, e atrapalham a eficiência processo de injeção.

Figura 7 – Esquema da formação de uma bolha de ar devido à presença de um obstáculo (gravura) no percurso do polímero.



Fonte: GOODSHIP, 2010.

A ineficiência de injeção e a formação de bolhas também são a consequência de situações nas quais o polímero é injetado em altas temperaturas,

pois o ar quente se mistura com o polímero homogeneizado. Nestes casos, após a peça estar totalmente solidificada, as bolhas aprisionadas só serão perceptíveis em peças confeccionadas com polímeros transparentes (MANRICH, 2013).

3.4.2 Tensões residuais

Quando o polímero é submetido a altas pressões e temperaturas de injeção, estas condições geram elevadas tensões resultantes da fricção entre as camadas de material que escoam, conhecidas como tensões residuais (STRONG, 2005). As tensões residuais são decorrentes de acomodamento inapropriado das macromoléculas em um espaço determinado, o que reduz as propriedades físico-mecânicas, térmicas e químicas. Tendendo a atrapalhar inicialmente o escoamento, fazendo uma força contrária à frente de fluxo, estas tensões também ocorrem quando as paredes internas da cavidade do molde estão com temperaturas próximas as da massa polimérica. Além disso, este fenômeno também pode ser decorrente de baixas temperaturas de processamento, ou pelo uso de baixas temperaturas da parede do molde (XIAO; HUANG e YANG, 2016). Nestes casos, a camada do material que entra em contato com estas paredes resfria e se solidifica muito rapidamente, não dando tempo para que as macromoléculas se acomodem adequadamente.

3.4.3 Refugo

Refugo é considerado como sendo todo o material inutilizável resultante de um processo de produção. Uma vez que este material esteja fora das especificações e das características de produto, impossibilitando assim a continuidade do processo ou comercialização, ele é considerado refugo. A vantagem dos materiais termoplásticos, é que quando uma peça é considerada refugo, esta pode ser incorporada ao processo e reprocessada (JARM, 2012).

3.5 Propriedades e características dos polímeros fundidos

Sabe-se que todos os materiais fluem, uns mais facilmente do que os outros, necessitando de pouco tempo e energia para isto, enquanto outros podem

necessitar de grandes quantidades de energia e um longo período para se deformarem e fluírem (LAKKANA, KUMAR e KADOLI, 2016). Na deformação de cada tipo de material, comportamentos específicos se manifestam, podendo estes serem elásticos, viscosos, viscoelásticos e viscoinelásticos. No caso dos polímeros fundidos, por exemplo, a maioria destes se comporta como fluidos viscoelásticos (tanto no estado sólido como líquido), podendo ainda apresentar comportamentos de fluidos pseudoplásticos (MANRICH, 2013).

3.5.1 Reologia

De acordo com Bom e Leães (2008), a reologia estuda o fluxo e a deformação da matéria, analisando respostas para possíveis tensões e deformações de materiais indiferentes de seu estado físico. A massa molar, assim como a distribuição da massa molar são propriedades que afetam diretamente o comportamento reológico do polímero durante seu processamento, assim como suas propriedades mecânicas finais (FARIAS, 2014). Os materiais poliméricos podem ser considerados um tipo especial de material, pois apresentam ao mesmo tempo características de materiais sólidos e líquidos (BRETAS e D'AVILA, 2000).

3.5.2 Viscoelasticidade

A viscoelasticidade é um comportamento correspondente à deformação ocasionada pelas tensões exercidas durante o escoamento de fluidos. No caso dos polímeros fundidos, no momento do escoamento, o material deformado se torna menos viscoso com o aumento das tensões, ou seja, o corpo deforma e não recupera a deformação sofrida depois de retiradas as tensões (GOODSHIP, 2010). Em contrapartida, seu comportamento elástico retorna normalmente depois de removidas as tensões. Estes dois tipos de comportamento dos polímeros ocorrem simultaneamente (MANRICH, 2013).

3.5.3 Viscosidade

Segundo Strong (2005), a viscosidade é a resistência ao fluxo ou à deformação exercida pelo material quando submetido a um escoamento. Um fluido Newtoniano tem viscosidade constante em temperaturas e pressões constantes.

Entretanto, a viscosidade não é constante se as estruturas intermoleculares do sistema forem alteradas pela ocorrência de fluxo, ou pela dimensão da energia geradora do fluxo ou deformação (FOX *et al.*, 2014).

Quando a viscosidade diminui com o aumento da tensão ou da taxa de cisalhamento, este fluido é denominado pseudoplástico, amolecendo com o aumento do cisalhamento devido a novos rearranjos moleculares (XIAO; HUANG e YANG, 2016). Quando polímeros são submetidos a um processo de injeção, a reestruturação das cadeias poliméricas ocorre devido à orientação das mesmas no sentido do fluxo, o que diminui as barreiras oriundas dos perfis das cavidades nas interações entre elas, facilitando o escoamento (MANRICH, 2013).

3.5.4 Índice de fluidez

O índice de fluidez (IF) é uma medida que controla a qualidade da matéria prima dos polímeros, servindo também como padrão para classificar as resinas de polímeros termoplásticos quanto ao seu processamento (TELLES, 2001). Para medir o IF dos polímeros, estes são colocados em um barril aquecido com um pistão acionado com um peso padrão, no qual o polímero escoar por um capilar padronizado. O valor de IF é a massa que flui pelo capilar durante 10 minutos (MANRICH, 2013). O índice de fluidez é inversamente proporcional à viscosidade do polímero, ou seja, valores baixos de IF estão relacionados a valores altos de viscosidade do polímero naquela temperatura e taxa de cisalhamento (SALVADOR e COSTA, 2007).

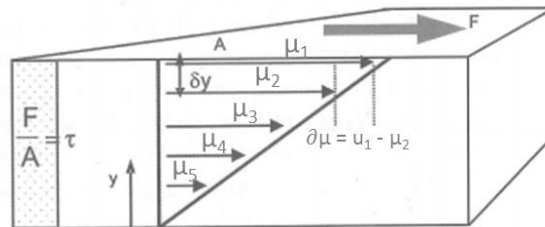
3.5.5 Tensão de cisalhamento

Segundo Calister e Rethwish (2012), quando o polímero é forçado a passar entre as paredes de um duto (cavidade), a velocidade do escoamento junto da parede é pequena, e aumenta à medida que o polímero se aproxima do centro. O polímero, quando escoar, se comporta como um composto de camadas, e estas camadas deslizam umas sobre as outras. Para que ocorra o deslizamento de uma camada sobre a outra, estas devem vencer uma tensão que é conhecida como tensão de cisalhamento (BARETA *et al.*, 2007).

3.5.6 Taxa de cisalhamento

A taxa de cisalhamento é definida como a variação de velocidade das camadas em relação à distância entre essas camadas, ou seja, reflete o quanto o polímero se deforma durante um determinado tempo (MANRICH, 2013). Esta propriedade está relacionada à tensão de cisalhamento a partir da viscosidade. Em líquidos em que a viscosidade não varia com a temperatura (fluido Newtoniano), a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento (CARNEIRO, 2006). Na Figura 8 é mostrada uma representação da força da rosca da injetora atuando sobre um polímero, resultando na taxa de cisalhamento.

Figura 8 - Força de cisalhamento resultante do escoamento de um polímero.



Fonte: Adaptada de MANRICH, 2013.

No processo de injeção, o polímero sofre uma variação de taxa de cisalhamento (γ), e esse comportamento pode ser representado pela lei das potências. Resumidamente, os polímeros fundidos somente apresentam comportamento Newtoniano quando estão escoando em taxas de cisalhamento muito baixas (baixas pressões de processamento, $\gamma \rightarrow 0$), ou quando as taxas de cisalhamento são extremamente elevadas (altas pressões de processamento, $\gamma \rightarrow \infty$). As taxas de cisalhamento dos polímeros no momento da injeção não são constantes e, por isso, o escoamento ocorre com comportamento não-Newtoniano (BRETAS e D'AVILA, 2000).

3.6 Simulação numérica aplicada a processos de injeção

A simulação numérica tem como principal objetivo avaliar o comportamento de determinado processo e a influência das variáveis deste de forma virtual. Com base nos resultados de simulação, é possível antecipar quaisquer problemas de processos e produtos ainda em suas fases iniciais de desenvolvimento. Isso permite

que alterações de projeto possam ser realizadas com baixo custo e, desta forma, evitam-se futuros problemas de ajustes do projeto acabado mediante técnicas empíricas de tentativa e erro (NISHIMOTO, 2001).

Para que seja possível simular um processo, é necessário modelar matematicamente todos os fenômenos envolvidos no sistema, o que usualmente resulta num conjunto de equações diferenciais. A solução numérica destas equações diferenciais gera um conjunto de dados numéricos que deverão ser posteriormente confrontados com dados reais/experimentais para que o modelo desenvolvido possa ser validado (FRANKFURT, 2008).

Os pacotes de simulação comercialmente disponíveis discretizam o domínio do problema em uma infinidade de elementos volumétricos, nos quais as equações diferenciais deverão ser numericamente integradas e resolvidas de forma a produzir resultados condizentes com a realidade (ROCCA, 2000). Atualmente, a simulação da injeção de termoplásticos, por auxiliar de maneira significativa no desenvolvimento de projetos de moldes, tem sido uma ferramenta muito utilizada por várias indústrias fabricantes de moldes para otimizar o processo de fabricação ainda na fase inicial (OLIAEI *et al.*, 2016).

Algumas empresas do segmento de transformação de plásticos que produzem peças para as indústrias automotivas e eletroeletrônicas exigem que as empresas contratadas do setor metal-mecânico que fabricam os moldes de injeção, utilizem a simulação numérica da injeção dos termoplásticos, pois entende-se que a simulação é ferramenta fundamental para reduzir custos e prazos de fabricação do molde (NISHIMOTO, 2001).

3.6.1 Pacotes comerciais - Simuladores de processos de injeção de termoplásticos

Existem diversos pacotes comerciais que contém ferramentas tipo *CAE* capazes de realizar a simulação numérica do processo de injeção de termoplásticos. Os *softwares C-mold, Moldex* e o *Moldflow* figuram entre os mais conhecidos e utilizados destes pacotes. O *software Solid Works* sempre se destacou por ser uma excelente ferramenta *CAD* para a execução de desenhos e projetos detalhados de máquinas e equipamentos. Desde 2013, o *Solid Works* apresenta um pacote de simulação do tipo *CAE* embutida dentro do próprio *software CAD*, capaz de simular a injeção de termoplásticos em moldes de injeção, conhecido como *Solid Works*

Plastics (MOAYYEDIAN; ABHARY e MARIAN, 2015). O acoplamento de ferramentas CAD e CAE num mesmo *software* favorece o usuário, pois não existe a necessidade de elaborar em um *software* específico a geometria do domínio a ser simulado e, posteriormente, transferi-la para outro *software* para executar a simulação. Além disso, quando houver a necessidade de alteração do projeto, o usuário não depende de outro *software* para executar as mudanças e as simulações.

As alterações previstas podem simplesmente ser realizadas diretamente na mesma janela de CAD. Outra característica importante é a facilidade para realizar simulações, pois com apenas poucos comandos é possível executar a simulação de um processo de injeção. Um ponto chave para esta praticidade é o grande banco de dados de materiais inseridos na ferramenta, o que facilita significativamente a rapidez e a precisão das simulações.

3.6.2 Modelo matemático utilizado pelo *Solid Works Plastics*

O *Solid Works Plastics* realiza a simulação da injeção de termoplásticos nas cavidades dos moldes calculando simultaneamente as equações da conservação de massa, energia e de movimento. Para executar estes cálculos na fase de preenchimento das cavidades, é preciso assumir um fluxo não-isotérmico de um fluido não-Newtoniano, tendo como base as equações de conservação. Estas equações, nas suas formas gerais, são apresentadas a seguir (SOLIDWORKS, 2016).

- Equação da conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

- Equação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{u} = -[\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{u}^2] - \vec{\nabla} P + [\vec{\nabla} \cdot \tau] + \rho \vec{g} \quad (2)$$

- Equação da quantidade de energia:

$$\rho C_v \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} T \right] = -(\vec{\nabla} \cdot \vec{q}) - T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + \left(\frac{\tau}{\vec{\nabla} \cdot \vec{u}} \right) \quad (3)$$

Em que:

- ρ - densidade (kg/m³)
- u - velocidade (m/s)

- t - tempo (s)
- P - pressão (Pa)
- τ - tensão de cisalhamento (Pa)
- g - aceleração da gravidade (m/s^2)
- C_v - calor específico em volume constante (J/kg.K)
- T - temperatura (K)
- q - fluxo de calor (W)

Usualmente, as seguintes hipóteses são assumidas para se conduzir simulações de processos de injeção de termoplásticos:

- escoamento laminar;
- forças gravitacionais desprezíveis;
- fluxo de calor expresso pela lei de Fourier:

$$\vec{q} = -k\vec{\nabla}T \quad (4)$$

onde o fluxo de calor é proporcional ao gradiente de temperatura, e k é a condutividade térmica (W/m.K);

- densidade, calor específico e condutividade térmica podem ser considerados constantes;
- escoamento *quasi*-estacionário: devido ao número de *Reynolds* característico do processo de injeção ser muito baixo, os efeitos convectivos provenientes da equação de quantidade de movimento podem ser desprezados.

Baseando-se nessas hipóteses, pode-se fazer as seguintes ponderações para cada equação:

- Equação da conservação de massa;

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (5)$$

- Equação da quantidade de movimento;

$$-\vec{\nabla}P + [\vec{\nabla} \cdot \tau] = 0 \quad (6)$$

- Equação da quantidade de energia;

$$\rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -k\nabla^2 T + \frac{\tau}{\vec{\nabla} \cdot \vec{u}} \quad (7)$$

Na equação da quantidade de energia (Equação 7), o calor específico à pressão constante (C_p) substitui o calor específico a volume constante (C_v) pelo fato destes valores serem iguais em casos de fluidos incompressíveis. Consideram-se também as equações de estado reológico, que relacionem a tensão de cisalhamento

(τ) com a taxa de deformação. Como o escoamento no processo de injeção é cisalhante, a propriedade reológica relevante é a viscosidade em regime permanente de cisalhamento (η), desprezando as tensões normais e os efeitos elásticos.

A taxa de cisalhamento inicial ($\dot{\gamma}$) pode ser calculada de acordo com o índice de fluidez do polímero, sendo:

$$\dot{\gamma} = 1,83 \left(\frac{IF}{\rho} \right) \quad (8)$$

Contudo, como base de simulação, é utilizada a equação da lei das potências na equação da conservação da quantidade de energia:

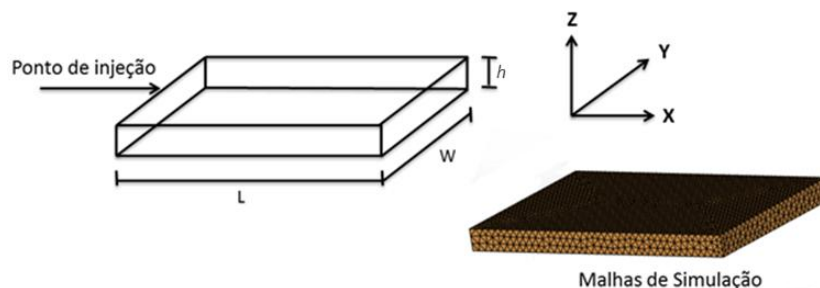
$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (9)$$

Onde:

- η é a viscosidade do polímero (Pa.s)
- $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento exercida pela tensão de cisalhamento (s^{-1})

Considerando que o escoamento *quasi*-estacionário ocorre por paredes estreitas, a Figura 9 demonstra a representação dimensional base dos modelos matemáticos inseridos no *software Solid Works Plastics*.

Figura 9 - Representação de uma cavidade retangular e seu domínio, como base das simulações exercidas pelo *software Solid Works Plastics*.



Fonte: Adaptada de SOLIDWORKS, 2016.

Desta forma, as equações simplificadas, inseridas no modelo usado para retratar o comportamento do preenchimento das cavidades de um molde são:

- Equação da conservação da massa;

$$Q = \rho w \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} u_x dz + \rho L \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} u_y dz \quad (10)$$

- Equação da conservação da quantidade de movimento;

$$\frac{\partial}{\partial z} \eta \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (11)$$

- Equação da conservação de energia;

$$\rho \cdot Cp \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \eta \cdot \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (12)$$

- Equação da fluidez;

$$S = \int_0^h \frac{z^2}{\eta} dz \quad (13)$$

- Equação do gradiente de pressão;

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \cdot \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (14)$$

- Equação das velocidades no eixo x;

$$\bar{u}_x = \frac{-2 \cdot S}{(h^+ - h^-)} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \quad (15)$$

- Equação das velocidades no eixo y;

$$\bar{u}_y = \frac{-2 \cdot S}{(h^+ - h^-)} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} \quad (16)$$

- Equação da taxa de cisalhamento;

$$\dot{\gamma}^2 = \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} \right)^2 \quad (17)$$

Em que:

- S é a fluidez do polímero (m³.s/kg);
- Q é a vazão mássica (kg/s).

As condições iniciais e de contorno usadas pelo modelo matemático implementado no *software* são dadas por:

- a) no ponto de injeção (x = 0) a pressão inicial é dada pela pressão de injeção, e a temperatura é uniforme e igual à temperatura de injeção, no qual o escoamento é dado por:

$$u_x(0, z, t) = u_o(z) \quad (18)$$

$$T(0, z, t) = T_0 \quad (19)$$

- b) nas paredes do molde, a velocidade e a pressão são nulas na chamada camada congelada, portanto:

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = 0 \quad (20)$$

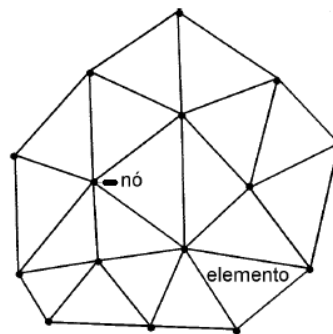
$$u_x(x, h, t) = 0 \quad (21)$$

$$T(x, h, t) = T_w \quad (22)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(x, 0, t) = 0 \quad (23)$$

Para resolver as equações das pressões no processo de preenchimento do polímero, o *Solid Works Plastics* resolve as equações pelo método dos elementos finitos por meio de elementos triangulares. A Figura 10 demonstra um exemplo de elementos criados a partir de nós.

Figura 10 - Malha de elementos finitos.



Fonte: MALISKA, 2004.

Neste método dos elementos finitos, as derivadas são aproximadas para cada elemento, criando equações algébricas aproximadas. As equações são geradas em um domínio e um sistema de equações que é criado para resolução dos valores (MALISKA, 2004).

Na equação da energia utiliza-se o método das diferenças finitas, onde é utilizada a expansão de série de Taylor para as aproximações das derivadas. A convecção e a viscosidade são tratadas de forma explícita, ou seja, os resultados calculados no termo anterior são tratados como termo fonte (SOLIDWORKS, 2016).

O avanço da frente de fluxo é determinado utilizando o método de volume de controle, onde para cada nó um volume é associado (SOLIDWORKS, 2016). Estes volumes são formados por polígonos obtidos pela união de pontos médios dos lados de cada elemento triangular com seu centroide (MALISKA, 2004). Quando a equação de pressão é calculada, é estimada a vazão em cada nó, de forma que a frente de avanço pode ser calculada. Como o incremento no tempo é conhecido, testa-se se o nó está cheio de fluido viscoso para a frente avançar. Quando a temperatura do polímero for menor que a temperatura de solidificação, então a frente de fluxo termina de avançar (SOLIDWORKS, 2016).

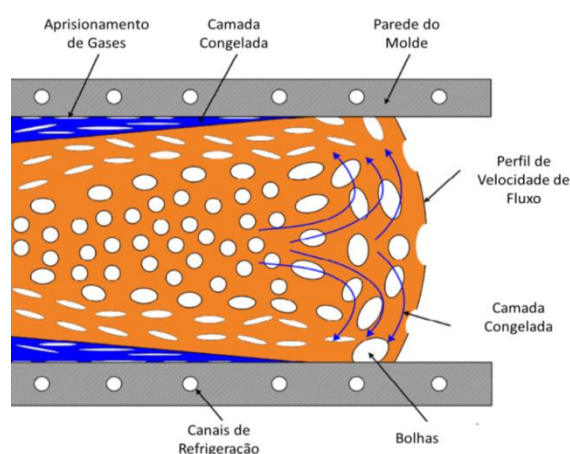
3.7 Estado da arte

O principal objetivo de qualquer da simulação de processos de injeção, é antecipar possíveis problemas na fase inicial da elaboração de uma peça, no qual a modificação do projeto ainda representa pouco investimento e nenhum atraso na data de lançamento do produto. Dentro deste contexto, foram desenvolvidos diversos estudos científicos que utilizaram a simulação numérica com o objetivo de estudar e compreender processos de injeção, e resolver problemas relacionados a estes processos.

Kim e Turnig (2004), através de estudos e simulações realizadas, comprovaram que a temperatura do molde tem grande influência na eficiência de injeção. Com um sistema de aquecimento do molde contendo resistências elétricas e canais de refrigeração para passagem de água, obtiveram o controle da temperatura do molde para controlar o fluxo de calor gerado entre as cavidades e o polímero, mapeando faixas de valores em que a temperatura da parede facilitava o escoamento do polímero.

Estudos realizados por Xiao *et al.* (2016), demonstram que em altas temperaturas de processamento, os elementos de pigmentação adicionados para conferir coloração aos polímeros são liberados na forma de gases. Estes gases acabam aprisionados nas cavidades, interferindo diretamente no fluxo de escoamento do molde. A Figura 11 ilustra como os gases interferem na frente de escoamento, se misturando com o polímero homogêneo.

Figura 11 - Aprisionamento de gases oriundos dos compostos usados para pigmentação.



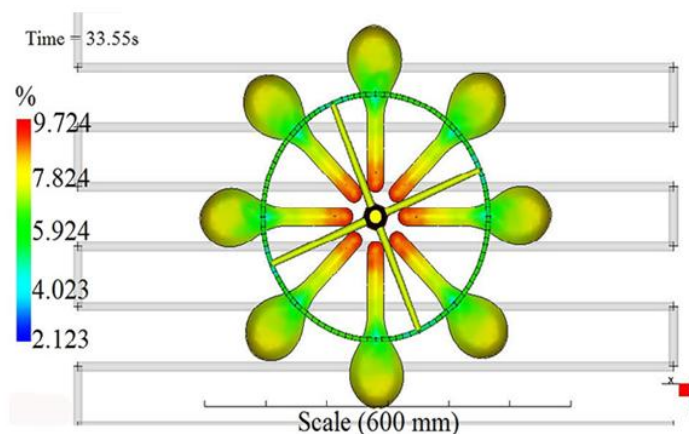
Fonte: Adaptada de KIM e TURNING, 2004.

De acordo o esquema apresentado na Figura 11, em altas temperaturas de processamento, os polímeros tendem a liberar mais gases que os já existentes, e quando não possuem uma liberação adequada, acarretam em falhas de ineficiência de injeção.

López *et al.* (2016) executaram um estudo de caso em um molde com geometrias complexas. Eles aplicaram um método no qual alteravam os parâmetros de injeção e mensuravam as massas das peças injetadas do produto para obtenção de uma média ponderada. Foram mensuradas as massas injetadas do produto variando-se a temperatura e a pressão de injeção. Com base nestes experimentos, tabelas com as médias das massas injetadas em função de cada parâmetro de injeção foram elaboradas. A partir dos resultados coletados, mapeou-se a faixa de valores dos parâmetros de processo estudados nas quais a maior média mássica do produto foi obtida e, com isso, melhoraram a eficiência do processo.

Oliaei *et al.* (2016) realizaram simulações no *software Moldflow* com objetivo de minimizar as exageradas contrações em um molde de injeção de colheres injetadas com polímeros biodegradáveis. Nas simulações, buscou-se alterar os parâmetros de injeção (temperatura do molde, pressão e temperatura de injeção) com objetivo de minimizar as contrações dos materiais. Outro parâmetro estudado pelos autores foram os canais de refrigeração, sendo executadas simulações avaliando-se a distância entre os canais de refrigeração em relação às paredes das cavidades das colheres. A Figura 12 ilustra o comportamento da contração do material poli(ácido láctico) (PLA), com os canais de refrigeração agindo sobre as cavidades do molde de injeção.

Figura 12 – Contração do PLA, com atuação dos canais de refrigeração.



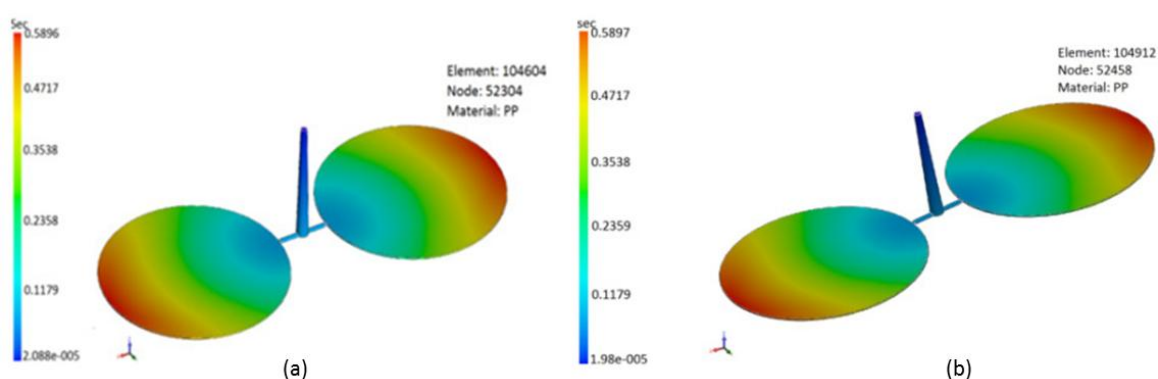
Fonte: Adaptada de OLIAEI *et al.*, 2016.

De acordo com a Figura 12, ao término do ciclo de injeção, que durou 33,55 segundos, o PLA teve pontos (base dos cabos das colheres) onde as contrações atingiram o pico máximo de 9,724%. Com mudanças de parâmetros de injeção, somadas a mudanças dos canais de refrigeração, Oliaei *et al.* (2016) reduziram as contrações para 5,071%, demonstrando a importância de um estudo de simulação previamente à elaboração do molde de injeção.

Moayyedean *et al.* (2015) utilizaram o CAD *Solid Works* para realizar uma melhoria de projeto moldes de injeção que utilizam canais de injeção sem câmara quente com o objetivo de reduzir as sucatas geradas por estes tipos de moldes. Eles simularam o escoamento dos dois canais projetados, utilizando o módulo CAE do *Solid works Plastics* para calcular a velocidade de escoamento e o tempo de preenchimento das cavidades antes e depois das alterações realizadas.

Inicialmente, foram projetadas duas cavidades circulares planas de espessura de 1,0 mm, com o canal de injeção padrão (seção transversal circular). Como estes canais são quebrados depois da injeção, virando sucata (moídos e reprocessados), os autores projetaram e desenvolveram um canal de injeção com o volume reduzido, utilizando uma seção transversal elíptica para os canais. A Figura 13 demonstra o resultado das simulações executadas pelo *software Solid Works Plastics*.

Figura 13 - Tempo de preenchimento: a) canal de injeção com seção transversal redonda, b) canal de injeção com seção transversal elíptica.



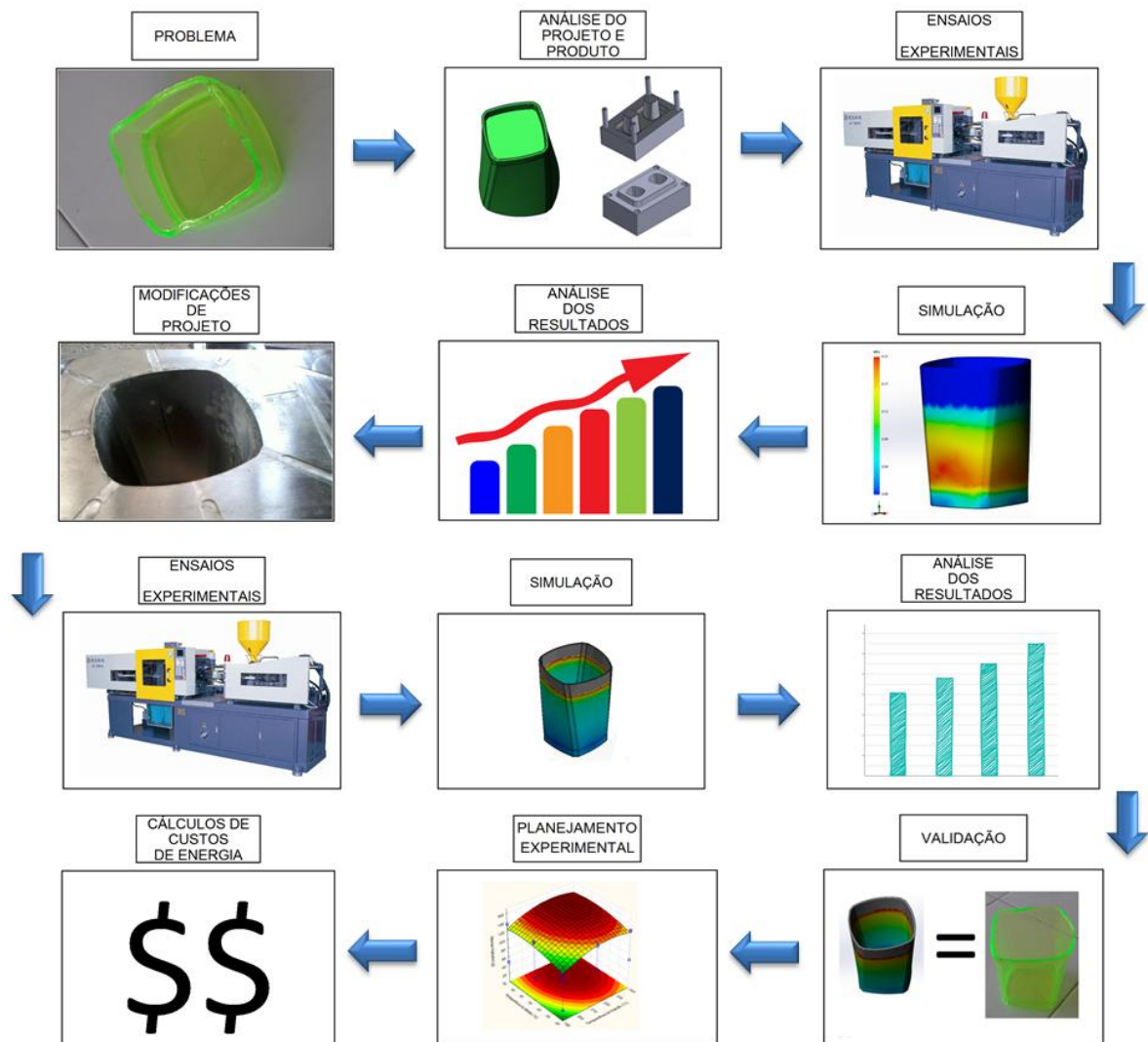
Fonte: MOAYYEDIAN *et al.*, 2015.

De acordo com as simulações executadas (Figura 13), o tempo de preenchimento nas duas ocasiões foi semelhante. Porém, devido à geometria elíptica, a alteração realizada pelos autores reduziu em 25% a quantidade de refugo gerada com uma simples alteração de projeto.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho foi dividida em etapas, que estão demonstradas na Figura 14 na forma de um fluxograma contendo as atividades desenvolvidas.

Figura 14 – Fluxograma das etapas executadas no presente trabalho.



Fonte: Primária, 2017.

Na primeira etapa será apresentada a problemática do estudo e uma análise do projeto e da engenharia do produto, delineando as principais falhas de injeção e os tópicos que envolvem a fase inicial de projeto de um produto a ser produzido por injeção. Em seguida serão apresentados os procedimentos adotados nos ensaios experimentais de injeção, nos quais as massas injetadas em distintas condições operacionais foram tomadas como parâmetro de qualidade do processo. Os

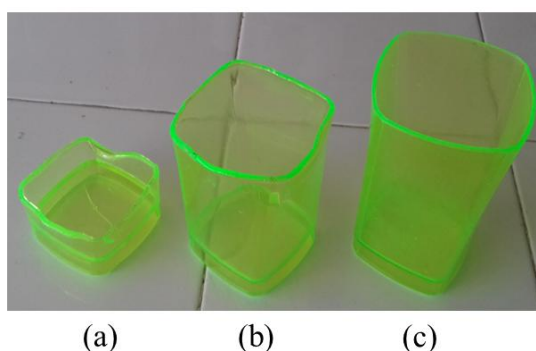
procedimentos de simulação do processo de injeção do copo também serão apresentados juntamente com a estratégia de validação do modelo matemático.

Com base nos resultados obtidos pelos processos experimentais de injeção e das simulações, uma proposta de melhoria de projeto foi imposta com o objetivo de melhorar a eficiência de injeção. Após as execuções destas melhorias, novos ensaios experimentais e simulações foram realizadas, para comparar os resultados de eficiência de injeção e desvios de simulação. Por fim, apresentados os resultados do planejamento experimental utilizado para quantificar os efeitos dos parâmetros de processo na eficiência de injeção, bem como os cálculos referentes aos gastos energéticos do processo.

4.1 Problemática

O presente trabalho foi realizado com base nos problemas de eficiência no processo de injeção de uma empresa transformadora de plástico da região de Joinville, que não executou um estudo de engenharia de simulação na fabricação de um molde de um copo, injetado em poliestireno cristal (GPPS). Esta falta de estudo prévio de desempenho do molde resultou em um molde de injeção que apresentava falhas de preenchimento dos copos conforme demonstra a Figura 15.

Figura 15 – Amostras retiradas do processo de injeção do molde do copo. a) amostra injetada em baixas pressões e temperaturas de injeção, b) amostra retirada em altas pressões e temperaturas de injeção, c) peça considerada boa para comercialização.



Fonte: Primária, 2017.

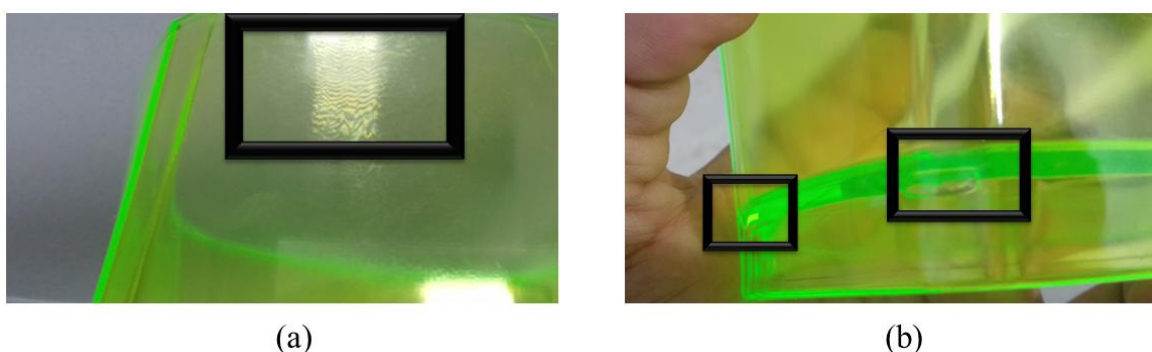
Considerando as duas primeiras peças da Figura 15, pode-se comparar a quantidade de massa necessária completar a cavidade do molde e retirar uma peça perfeita (Figura 15.c).

Utilizando as melhores condições de processamento segundo a empresa

(pressão de injeção 40 MPa, pressão de recalque de 45%, velocidade de injeção de 80 cm³/s, temperatura de injeção 220 °C e temperatura do molde de 40 °C), e considerando o molde com duas cavidades, a cada 10 ciclos de injeção (20 peças) apenas 7 peças eram retiradas do molde com qualidade suficiente para comercialização. Isso significa que somente 35% das peças injetadas eram efetivamente destinadas à comercialização, gerando aproximadamente 35 kg de refugo por hora de produção. Algumas peças que no processo de injeção preencheram totalmente as cavidades do molde, ainda apresentavam algumas falhas de injeção, como o aprisionamento de bolhas de ar e frisos oriundos da dificuldade da passagem do polímero. Estas falhas só eram possíveis de serem identificadas pelo fato do copo injetado em GPPS ter aparência translúcida.

Na Figura 16 são apresentadas imagens que demonstram estas falhas observadas em peças totalmente preenchidas.

Figura 16 – Falhas de injeção de peças que preencheram totalmente as cavidades. a) frisos internos, b) bolhas de ar.

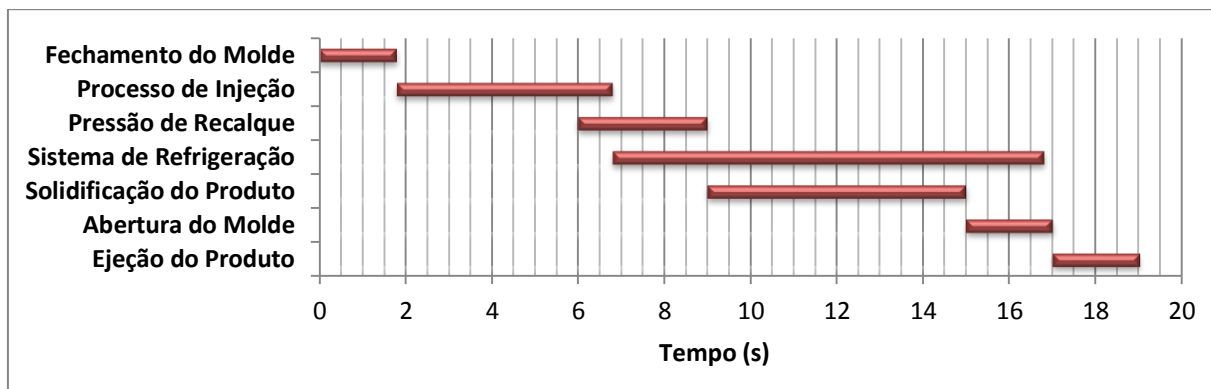


Fonte: Primária, 2017

Outro fator importante deste processo improdutivo é o tempo de ciclo de injeção, que mesmo em melhores condições de processamento, não garantem a eficiência total do processo produtivo. Isto porque em uma hora de produção do molde do copo eram retirados cerca de 35 kg de refugo.

A Figura 17 mostra o tempo das etapas que compõem o ciclo de injeção do molde do copo de GPPS.

Figura 17 – Período das etapas de injeção do molde do copo injetado em GPPS nas melhores condições de processamento.



Fonte: Primária, 2017

Nas melhores condições de processamento, cada ciclo levava 19 segundos para que as cavidades do molde fossem preenchidas, mas nem sempre estas cavidades eram totalmente preenchidas. Visando reaproveitar as peças produzidas com defeitos, que representam 65% da produção, as mesmas eram moídas e novamente injetadas.

4.2 Análise do projeto inicial do produto

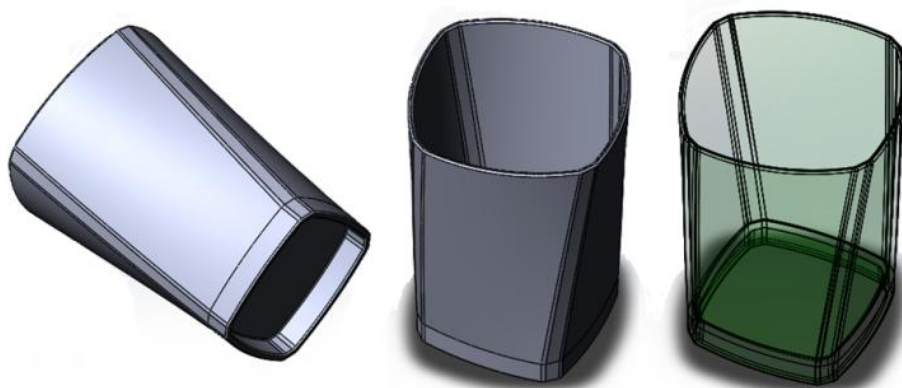
O projeto virtual do molde de injeção foi realizado no *CAD Solid Works*. Antes de executar o projeto do molde de injeção, foi criado um modelo tridimensional do produto. Além do produto, existem alguns fatores que devem ser levados em conta quando se inicia o projeto de um novo molde de injeção: geometria e complexidade do produto, material do produto a ser injetado, contração do material a ser injetado, número de cavidades do molde e máquina injetora que o molde irá produzir. Com base nesses cinco fatores, pode-se então ter uma ideia de como será a estrutura inicial de um molde de injeção.

4.2.1 Geometria e complexidade do produto

O produto utilizado como caso de estudo neste trabalho foi um copo de geometria retorcida, conforme apresentado na Figura 16. Este produto pertence a uma empresa de bebidas da região de Joinville (101 do Brasil), sendo introduzido no mercado anexado a garrafas de bebidas, na forma de um conjunto. O projeto

completo deste copo foi executado no *software Solid Works*, no qual foi possível detalhar tecnicamente todos os cantos, raios e ângulos do produto. Usualmente, o projeto do produto é feito primeiro e, a partir deste é que se executa o molde de injeção. Na Figura 18 é ilustrado o desenho em 3D do produto, que é conhecido como "modelo".

Figura 18 - Modelo do produto "copo".



Fonte: Primária, 2017.

Este copo é um produto considerado simples, sem geometrias complexas que influenciam diretamente na necessidade de estruturas mais detalhadas do molde de injeção, como por exemplo, insertos, postigos ou gavetas. Este modelo, de acordo com as geometrias do *CAD Solid Works*, tem o volume interno de $66,56 \text{ cm}^3$.

4.2.2 Material do produto a ser injetado

O GPPS (Poliestireno Cristal) foi o material selecionado para confeccionar os copos, pois tem como principais características sua excelente processabilidade e transparência, além de boa fluidez mesmo quando submetido a ciclos rápidos. Quando pigmentações ou outros polímeros são adicionados ao polímero, as características físicas, térmicas e mecânicas se alteram. Este tipo de mudança deve ser levada em consideração, uma vez que o produto a ser injetado deverá ter cores e pigmentações diversificadas para sua comercialização. Na Tabela 2 são apresentados alguns parâmetros físicos e de processamento do GPPS com a adição de pigmentação.

Tabela 2 - Ficha técnica do GPPS.

Parâmetros de Processo	Valores	Unidade	Método
Temperatura de Injeção	190 - 240	°C	ASTM D 638
Pressão de Injeção	5 – 60	MPa	ASTM D 256
Pressão de Recalque	30 - 60	%	ASTM D 638
Temperatura do Molde	20 - 50	°C	ASTM D 359
Contração do Material	0,3 - 0,6	%	ASTM D 792
Propriedades Físicas	Valores	Unidade	Método
Densidade	1,078	g/cm ³	ASTM D 792

Fonte: Adaptado Braskem, 2016.

Com base nas informações contidas na Tabela 2, foram selecionados os valores dos parâmetros de processamento necessários para execução dos ensaios experimentais e de simulação da injeção do copo. De acordo com a Tabela 2, o polímero injetado possui a densidade de 1,078 g/cm³. Como o modelo do produto tem o volume de 66,56 cm³, a massa do modelo projetado e estudado neste trabalho é de 71,75 g.

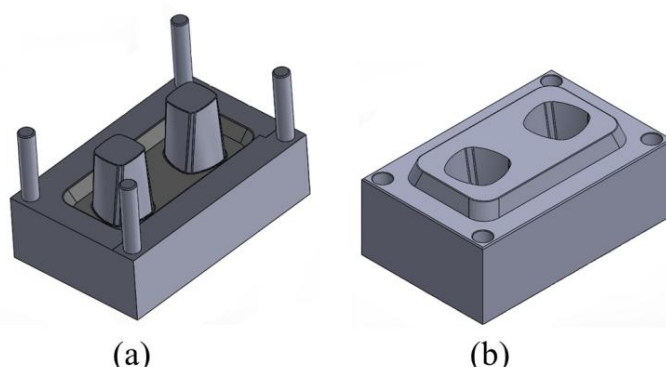
4.2.3 Contração do material a ser injetado

Todo material polimérico, quando processado termicamente, sofre contrações durante o resfriamento. De acordo com o fabricante do GPPS utilizado no presente estudo (BRASKEM), em processos de injeção nos quais as temperaturas variam de 190 °C a 240 °C (Tabela 2), este material sofre contrações de 0,3% a 0,6% em toda sua superfície volumétrica quando resfriado. Para a execução do projeto, considerou-se uma contração média de 0,45%, o que significa que, mesmo depois de o material preencher as cavidades do molde, resfriar e contrair, as dimensões volumétricas do produto atenderão as especificações dimensionais do projeto.

4.2.4 Número de cavidades do molde

Outro ponto que deve ser levado em conta na fabricação de um molde de injeção é o número de cavidades que o molde possuirá, ou seja, quantas unidades do produto serão produzidas a cada ciclo de injeção. Na Figura 19 é mostrado um esquema com as partes que compõem as cavidades do molde usado neste trabalho para a injeção do copo.

Figura 19 – Detalhes das cavidades do projeto do molde, a) extração da cavidade inferior, b) extração da cavidade superior.



Fonte: Primária, 2017.

A peça ou cavidade que possui o modelo de superfície externa (Figura 19.a) é denominada fêmea, e a cavidade de superfície interna (Figura 19.b) é conhecida como macho. Todavia, o molde projetado possui duas cavidades, o que significa que a cada ciclo de injeção dois copos são produzidos.

4.2.5 Máquina injetora para produzir o produto

O último e não menos importante fator que deve ser levado em conta na fase inicial do projeto do molde de injeção é a máquina injetora que irá produzir o copo. A máquina injetora utilizada neste trabalho é do modelo HAITIAN – PL 860/270 C. As características principais desta máquina podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características da máquina injetora HAITIAN – PL 860/270 C.

PL 860/270				
Item	Unidade	A	B	C
Diâmetro do parafuso	mm	34	36	40
Comprimento do parafuso	L/D	21,2	20	18
Volume de injeção	cm ³	131	147	181
Peso de injeção	g	119	134	165
Pressão máxima de injeção	MPa	206	183	149

Fonte: DANYPLAST, 2016.

Conforme mencionado anteriormente, a peça injetada tem 66,56 cm³. Como o molde possui duas cavidades, o volume total de injeção é de 133,12 cm³.

Considerando que a máquina tem capacidade para um volume de injeção de 181 cm³, ela deve ser capaz de suportar a injeção deste molde com duas cavidades. Outro parâmetro que deve ser levado em conta é a massa de injeção. Como já foi calculada anteriormente, a massa de uma unidade de copo é de aproximadamente 71,75 g e, portanto, duas unidades terão uma massa em torno de 143,50 g. Como o peso de injeção máximo da máquina é de 165 g, a mesma deverá suportar a injeção do molde com duas cavidades de copos.

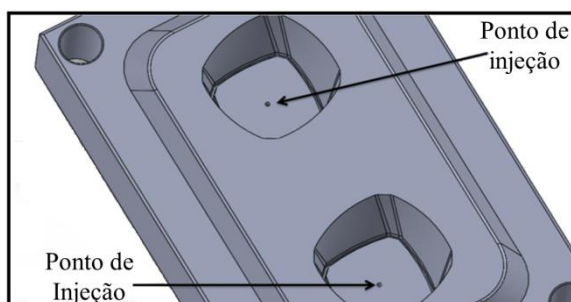
4.3 Análise do molde

Com o modelo do produto pronto e os parâmetros iniciais estabelecidos, pode-se começar o projeto inicial do molde de injeção. Existem alguns cuidados fundamentais que devem ser levados em consideração quando se executa o projeto de um molde, sendo eles: ponto de injeção das cavidades, necessidade de canal de injeção, necessidade de câmara quente, partes/peças/componentes, sistema de refrigeração das cavidades, materiais das cavidades e necessidade de tratamento térmico das cavidades.

4.3.1 Ponto de injeção

O ponto de injeção foi localizado na cavidade superior da parte interna das cavidades do produto (Figura 20). O canal de alimentação ou *gate*, responsável pela entrada do material (polímero) para preenchimento das cavidades do molde, foi projetado com diâmetro de 1,0 mm.

Figura 20 – Localização do ponto de injeção.



Fonte: Primária, 2017.

De acordo com a Figura 20, o molde do copo terá o início de escoamento

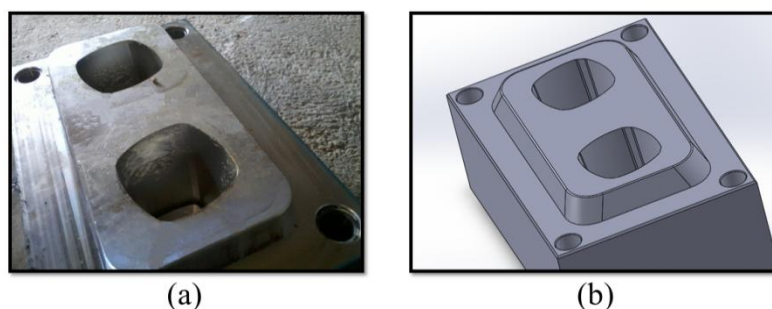
(entrada do polímero) na parte inferior do copo, ou seja, o fundo do copo propriamente dito.

4.3.2 Materiais das cavidades e tratamento térmico

As cavidades do molde do copo (macho e fêmea) foram executadas em aço P20 submetido a um tratamento térmico de têmpera e revenido. Isto foi feito para conferir uma dureza entre 28 à 32 HRC. A composição do aço P20 é de 0,36% de carbono, 1,6% de manganês, 1,8% de cromo, 0,2% de molibdênio e 0,7% de níquel. A têmpera melhora as propriedades mecânicas do aço, principalmente a resistência ao impacto, uma vez que a cada ciclo de injeção a máquina injetora irá submeter o molde a várias pressões cíclicas, podendo ocorrer desgaste excessivo de material. A têmpera também deixa o material com mais resistência ao desgaste.

A Figura 21.a ilustra a cavidade inferior (fêmea) já com o bloco em aço P20 usinado, temperado e com as cavidades polidas. Na Figura 21.b é apresentado o detalhe em 3D do projeto da cavidade do molde de injeção do copo.

Figura 21 – Cavidade Inferior (fêmea). a) Cavidade Usinada, b) Cavidade Projetada.



Fonte: Primária, 2017.

Este molde, depois de fabricadas todas as suas peças e componentes, apresentava problemas de eficiência de injeção, mesmo utilizando os parâmetros de processamento recomendados pela literatura.

4.4 Ensaios experimentais de injeção dos copos de GPPS

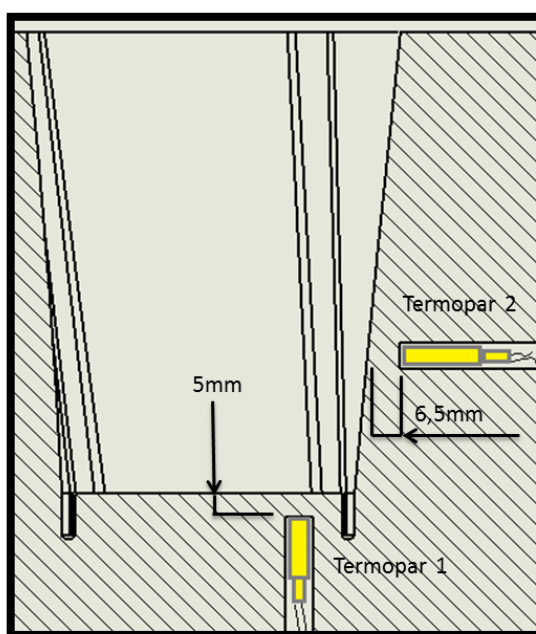
Os experimentos de injeção executados na máquina injetora foram realizados variando-se os seguintes parâmetros de injeção com base nos dados apresentados na Tabela 2: pressão de injeção, temperatura de injeção e temperatura do molde.

Como a pressão de recalque não teve influência direta na ineficiência de injeção, não optou-se por mantê-la como uma variável significativa. Portanto, por ela não ter influência neste processo específico, e como o fabricante do material termoplástico recomenda a utilização de uma pressão entre 30 e 60% (Tabela 2), foi utilizado um valor médio correspondente de 45% para cada uma das condições de injeção, mantendo assim, esta variável fixa no processo de injeção.

Para controlar a temperatura do molde, foram instalados quatro sensores de temperatura. Os termopares do tipo J foram inseridos em lugares diferentes da cavidade, sendo dois deles na cavidade superior (Termopar 1 e 2) e os outros dois na cavidade inferior (Termopar 3 e 4).

Para um melhor entendimento do funcionamento deste sistema, a Figura 22 demonstra o posicionamento dos termopares tipo J somente nas cavidades superiores do molde do copo.

Figura 22 – Vista em corte do posicionamento dos termopares na cavidade do molde.



Fonte: Primária, 2017.

Conforme demonstrado na Figura 22, o primeiro sensor (Termopar 1) é posicionado a uma distância de 5 mm do fundo da cavidade do molde, enquanto o segundo sensor (Termopar 2), é posicionado a uma distancia de 6,5 mm da parede lateral do copo. Com ajuda destes sensores, pode-se controlar a temperatura do molde ajustando a temperatura do fluido de refrigeração.

Outra variável mantida fixa no processo de injeção foi a velocidade e injeção de $80 \text{ cm}^3/\text{s}$. Este parâmetro foi mantido constante neste estudo pois não apresentou diferenças significativas de alteração na qualidade do produto durante os testes iniciais de injeção.

Os valores das outras variáveis de processo utilizadas pelo modelo foram estipulados com base nos dados contidos na Tabela 2. Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros do processo injeção, assim como os valores de cada um que foram testados experimentalmente e nas simulações.

Tabela 4 – Parâmetros de injeção utilizados nos testes experimentais e nas simulações.

$T_{wall} (\text{°C})$	$T_{inject} (\text{°C})$	$P_{inject} (\text{MPa})$	$P_{holding} (\%)$	$\dot{V} (\text{cm}^3/\text{s})$
20, 30, 40 e 50	190, 200, 210, 220, 230 e 240	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 e 60	45	80

Fonte: Primária, 2017.

Os resultados obtidos experimentalmente e, através das simulações usando as condições operacionais apresentadas na Tabela 4, foram utilizados para identificar as melhores faixas de valores para os parâmetros operacionais nas quais era possível obter produtos com a maior massa injetada. No total, foram realizadas 288 simulações numéricas do processo considerando todas as combinações dos parâmetros operacionais apresentados na Tabela 4, antes e depois de proceder com as alterações do molde de injeção, como será apresentado mais adiante no capítulo de resultados. Com relação aos ensaios experimentais, cada condição operacional foi utilizada em 10 ciclos de injeção, o que totalizou 5760 amostras de copos de GPPS, considerando o molde antes e depois das alterações. Como para cada condição de processamento foram executadas 10 ciclos de injeção, foram consideradas as médias das massas de 10 amostras, para incluir nos cálculos de eficiência de injeção e desvio de simulação.

Sendo então a massa injetada dos copos, a principal grandeza física utilizada na validação do modelo matemático usado nas simulações. Desta forma, a eficiência do processo de injeção foi calculada como sendo a razão entre a média de massas injetadas e a massa total prevista para o produto, conforme mostrado na Equação 24.

- Eficiência de Injeção (n_i):

$$n_i = 100 \cdot \frac{\bar{M}_{inj}}{M_t} = \% \quad (24)$$

Onde:

- \bar{M}_{inj} é a média das massas injetadas em 10 ciclos (g);
- M_t é a massa total prevista para o produto (g).

Esta equação demonstra o quão eficiente é o processo no sentido de preencher totalmente as cavidades do molde, podendo ainda ser utilizada para identificar problemas de injeção, especificamente de preenchimento de molde, comparando-se as eficiências obtidas em cada condição operacional de injeção.

4.5 Simulação do processo de injeção

Para evitar problemas de injeção ainda na fase inicial de fabricação do molde (fase de projeto), é recomendável simular a injeção do termoplástico nas cavidades do mesmo. Contudo, o molde utilizado no presente estudo foi originalmente projetado sem uma análise prévia de seu comportamento mediante a realização de simulações computacionais. Conforme mencionado, o molde projetado vinha apresentando sérios problemas operacionais, o que causava excessiva geração de refugo de peças quando em operação.

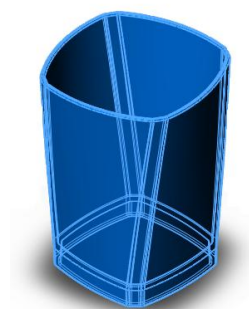
Desta forma, para auxiliar na compreensão das razões pelas quais o molde não operava como desejado, um estudo de simulação numérica do processo de injeção do molde foi realizado utilizando o módulo *Solid Works Plastics* contido no *software Solid Works*. As simulações realizadas neste *software* utilizaram como ferramentas básicas para os cálculos, as principais leis físicas, dinâmicas, térmicas e de escoamento dos fluidos, conforme apresentado no item 3.6.2.

4.5.1 Geração do domínio (casca escalonada)

Para simular o modelo do produto injetado nas cavidades, devolveu-se um domínio (casca) por onde o termoplástico iria fluir durante o processo de injeção. O primeiro fator que levado em conta para a criação da casca das cavidades foi a contração volumétrica do material, uma vez que o volume final da peça injetada diminui com relação ao volume do molde, e deve ser igual ao volume inicial do

modelo de produto projetado. A Figura 23 demonstra a formação da casca do produto mediante as simulações.

Figura 23 - Casca do produto escalonado (domínio das simulações).



Fonte: Primária, 2017.

O produto escalonado foi criado para que houvesse o conhecimento do domínio da simulação por parte do *software* durante a execução dos cálculos matemáticos. Desta forma, foi necessário fornecer as informações corretas para que o *software* entendesse que a casca das cavidades tivesse uma escala volumétrica maior que a do modelo padrão. Para as simulações realizadas neste trabalho, utilizou-se a contração fornecida pelo fabricante do GPPS (0,45 %). Desta forma, depois de percorrer e preencher as duas cascas, o polímero GPPS resfria e contrai 0,45%, resultando em um volume de 133,12 cm³ para preencher as cavidades dos dois copos.

4.5.2 Geração da malha

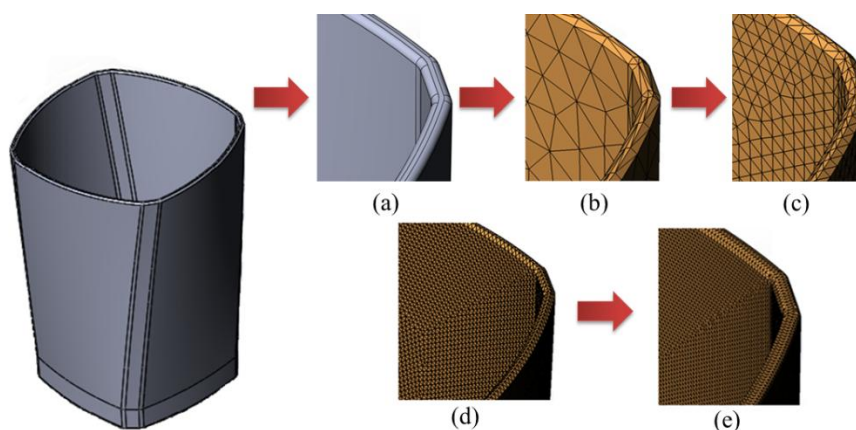
Com a casca da cavidade já escalonada, o domínio da simulação foi discretizado em pequenos subdomínios, chamados de elementos, o que levou à geração da malha de simulação do processo da injeção do termoplástico. Existem dois tipos de malhas que podem ser geradas no *software*: as malhas sólidas e as malhas triangulares com casca. De acordo com Maliska (2004), a malha mais recomendada para ser aplicada é a malha triangular. Desta forma, uma malha triangular foi utilizada no presente trabalho para simular o processo de injeção dos copos.

Com base na geometria da peça, o *software* geralmente indica um valor contendo um número de elementos estabelecidos para uma malha triangular ideal

para o cálculo. Porém, quanto maior for o tamanho dos elementos triangulares da malha, menor deverá ser a precisão dos cálculos, o que compromete a confiabilidade dos resultados simulados. Por outro lado, quanto mais refinada for a malha triangular, ou seja, quanto menores forem os triângulos de malha, mais precisa tende a ser a simulação.

As malhas possuem dois fatores: os elementos (*element*) e os nós (*node*). Cada triângulo da malha formada é conhecido como elemento, e cada ponto de ligação entre os triângulos, localizado nos vértices dos mesmos, é conhecido como nó. Na Figura 24 é ilustrado como o refinamento de malha melhora a definição da geometria da peça simulada.

Figura 24 – Refinamento de malha triangular: a) vista ampliada da borda do copo, b) tamanho de vértice 5,0 mm, c) tamanho de vértice 2,0 mm, d) tamanho de vértice 1,0 mm, e) tamanho de vértice de 0,05 mm.



Fonte: Primária, 2017.

A partir das imagens contidas na Figura 24, percebe-se que os cantos do modelo do produto, que possuem o perfil arredondado, ficam com a geometria prismática, como se fossem vários cantos e pontas, quando poucos elementos são usados na malha. Com o refinamento de malha, ou seja, diminuindo-se o tamanho dos elementos triangulares, os perfis arredondados da peça tomam forma, e isso contribui com o aumento da precisão dos resultados simulados. O tamanho dos elementos utilizados nas simulações deste estudo foi de 0,5 mm, o que gerou 1.174.846 elementos e 9.055.256 nós. A explicação para o uso deste tamanho de malha triangular será apresentada no capítulo de resultados.

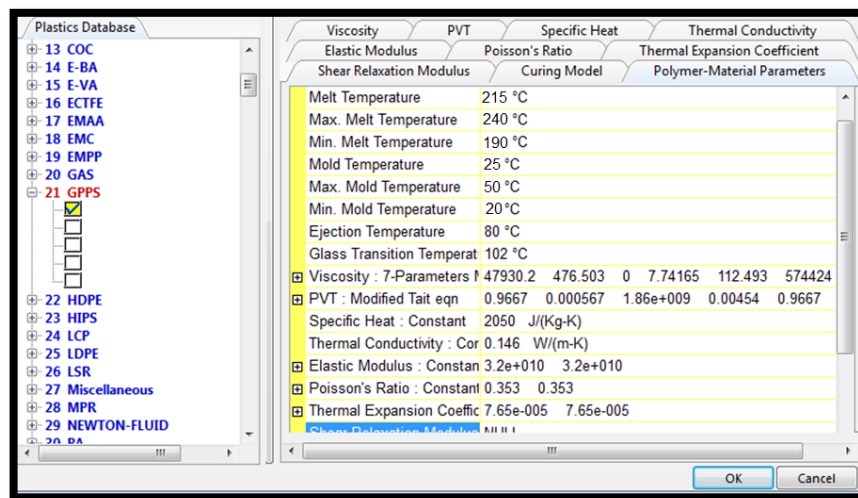
Outras informações que devem ser inseridas nas simulações são a fase de preenchimento (*fill*), empacotamento (*pack*) e eficiência de refrigeração (*cool*). Estes

algoritmos podem ser simulados individualmente e combinados. O algoritmo utilizado neste trabalho foi determinado somente na fase de preenchimento.

4.5.3 Definição de polímero

Depois da definição da malha de simulação, o tipo de material que irá ser injetado deve ser definido. O material injetado no molde do copo é o poliestireno cristal (GPPS). A Figura 25 demonstra como a seleção do material, juntamente com suas propriedades, pode ser realizada no *software SolidWorksPlastics*.

Figura 25 – Definição do material injetado.



Fonte: Primária, 2017.

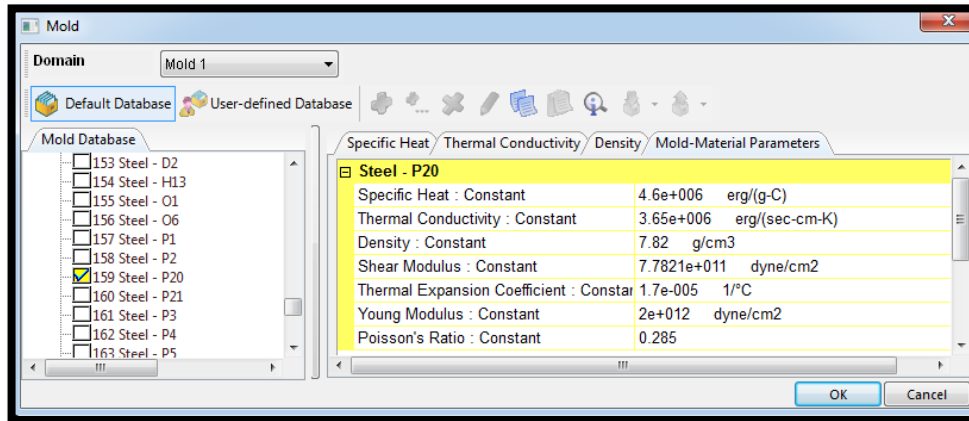
Observando a Figura 25 é possível notar que as propriedades estabelecidas pelo *software* são semelhantes as estabelecidas pelo fabricante do material, apresentadas na Tabela 2.

4.5.4 Definição do material das cavidades

O *software* permite ainda que seja selecionado o material das cavidades do molde de injeção. Uma vez selecionado um material, todas as suas propriedades químicas, físicas e mecânicas serão utilizadas nos cálculos de simulação. A biblioteca do *software* dispõe de uma lista de aços ferramenta para que o mais adequado seja selecionado e considerado nas simulações conforme demonstra a

Figura 26.

Figura 26 – Definição do material das cavidades.



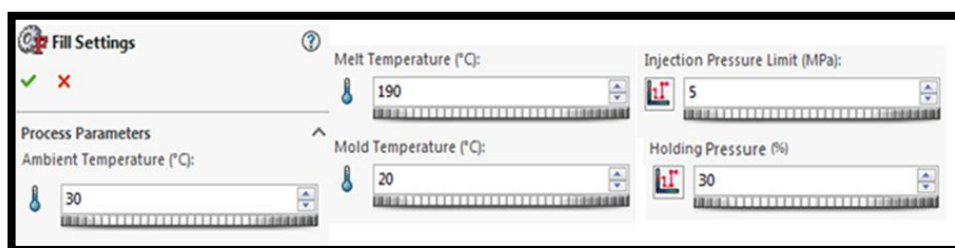
Fonte: Primária, 2017.

Como no molde do copo foi utilizado o aço P20, que é um dos aços mais utilizados na fabricação de cavidades de moldes de injeção de termoplásticos, o mesmo aço foi selecionado para realizar as simulações de injeção.

4.5.5 Introdução dos parâmetros de injeção no software

De acordo com o fabricante do material, os parâmetros de injeção são definidos para auxiliar os operadores a encontrar o melhor ciclo de injeção da máquina (Tabela 2). Assim como nos ensaios experimentais, os parâmetros de processamentos foram introduzidos nas simulações com os valores da Tabela 4. A Figura 27 ilustra como os parâmetros são introduzidos no *software* para que se proceda com a simulação como a pressão de injeção, pressão de recalque, temperatura de injeção e temperatura do molde.

Figura 27 – Definição dos parâmetros de processamento.



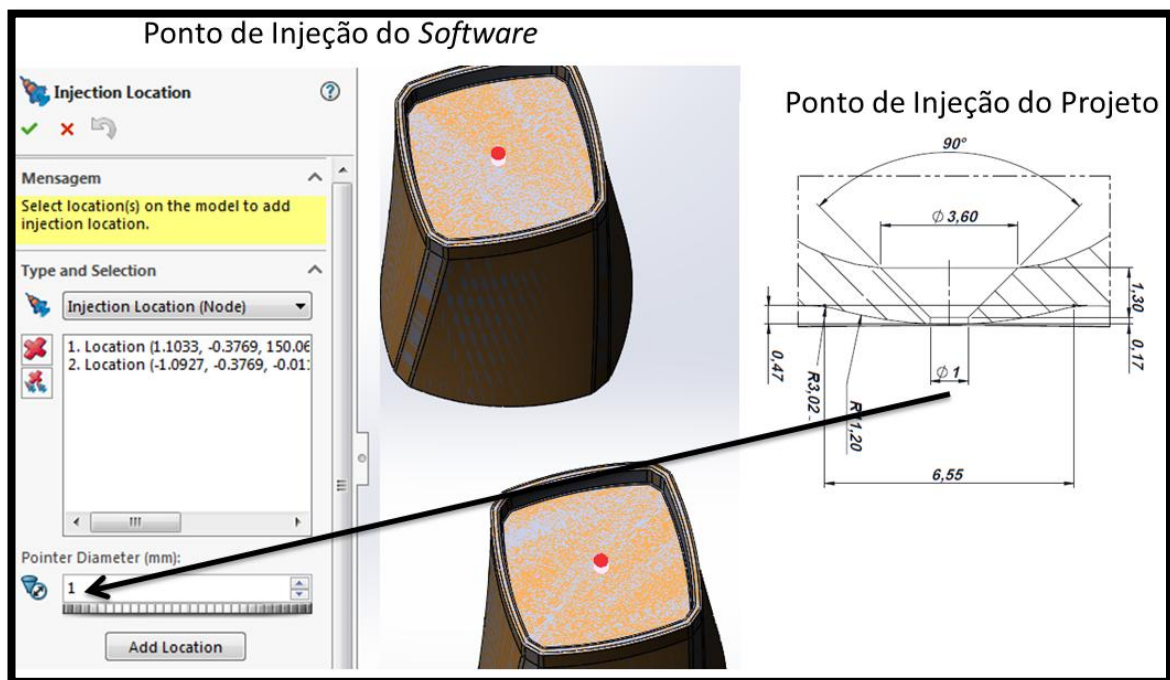
Fonte: Primária, 2017.

Desta forma, podem-se realizar simulações nas mesmas condições que serão realizadas as amostras de injeção.

4.5.6 Definição do Ponto de injeção

O ponto de injeção de injeção ficou definido na parte inferior da cavidade fêmea, exatamente no centro do produto, para que não houvesse um desbalanceamento de massa. Porém, é necessário que o *software* reconheça o local no qual o ponto de injeção foi posicionado, e qual o diâmetro de entrada ou alimentação (*gate*) por onde o termoplástico irá entrar nas cavidades. Estas informações são apresentadas na Figura 28.

Figura 28 – Definição da localização e diâmetro do ponto de injeção.



Fonte: Primária, 2017.

De acordo com a Figura 28, o diâmetro do furo da passagem de polímero nas cavidades é de 1 mm, esta informação também deve ser inserida no *software*. A definição do local e do diâmetro do ponto de injeção é a última etapa a ser executada antes de se iniciar a simulação.

4.6 Metodologia de validação do modelo matemático usado nas simulações

Para validar o modelo matemático utilizado para simular o processo de injeção dos copos com o termoplástico GPPS, os resultados simulados na ferramenta *CAE Solid Works Platics* foram confrontados com os resultados experimentais da injeção deste produto (copos em GPPS), obtidos com os mesmos parâmetros e condições utilizadas nas simulações. Neste caso, os dados experimentais das médias das massas injetadas foram comparados com os valores das massas encontradas nas simulações realizadas por meio do chamado “desvio da simulação”, calculado conforme a Equação 25:

- Desvio da simulação (δ_{sim}):

$$\delta_{sim} = \left[\left(\frac{M_{sim}}{\bar{M}_{inj}} \right) - 1 \right] \cdot 100 = \% \quad (25)$$

Onde:

- M_{sim} é a massa simulada pelo *software* (g),
- \bar{M}_{inj} é a média das massas injetadas em 10 ciclos (g).

Estes cálculos foram utilizados para validar as simulações das amostras produzidas antes e depois das melhorias do molde de injeção dos copos de GPPS.

4.7 Planejamento experimental

O planejamento experimental é uma boa ferramenta utilizada para estudar os efeitos de vários fatores sobre uma variável de resposta de interesse (NETO, SCARMINIO & BRUNS, 2003). Uma das técnicas mais conhecidas é o planejamento fatorial, no qual estão envolvidos k fatores (ou variáveis), cada um deles presente em diferentes níveis. O conjunto mais simplificado é aquele no qual o fator k está presente em apenas dois níveis; logo são feitas $2 \times \dots \times 2$ (k vezes) = 2^k observações da variável resposta, denominando assim o planejamento fatorial 2^k (PATERAKIS *et. al*, 2002).

4.7.1 Planejamento fatorial 3^3

Em experimentos fatoriais com mais de dois níveis, para a formação de blocos incompletos, utilizam-se as equações de geometria finita, baseadas no sistema de numeração ternário ou de base 3, nas quais utilizam-se, apenas, 3 algarismos: -1 (baixo), 0 (intermediário) e 1 (alto) (RODRIGUES & LEMMA, 2014). Em um experimento fatorial completo 3^3 , existem 27 combinações possíveis entre os níveis dos diferentes fatores. Considerando a necessidade de realização de um experimento em blocos completos, pode ser difícil constituir blocos homogêneos. De modo geral, em um experimento fatorial 3^k são possíveis 3^p blocos incompletos com $p < k$ (PATERAKIS *et al.*, 2002).

O planejamento experimental foi utilizado neste trabalho com o propósito de saber o nível de significância de cada uma das variáveis de processamento usadas nos experimentos. Uma vez sabendo qual destas variáveis tem mais influencia no preenchimento mássico de injeção, é possível minimizar os riscos de falhas de processamento.

Os dados das médias das massas das amostras injetadas com o molde modificado, em função dos parâmetros de processamento (pressão de injeção, temperatura de injeção e temperatura do molde), foram submetidos à análise de variância através do Teste de Tukey com nível de significância de 5% (ANOVA). A análise dos resultados obtidos para a pressão de injeção (A), temperatura de injeção (B) e temperatura do molde (C), tendo como resposta a massa injetada (Y), foi realizada através de métodos estatísticos, utilizando-se o programa “*Statistica*” versão 7.0, empregando um planejamento fatorial completo 3^3 . Os níveis do planejamento experimental utilizado neste estudo são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Níveis para os fatores e seus valores codificados para planejamento fatorial 3^3 .

Frequência	Variáveis	Níveis		
		-1	0	1
A Independente	Pressão de Injeção (MPa)	5	32,5	60
B Independente	Temperatura de Injeção (°C)	190	215	240
C Independente	Temperatura do Molde (°C)	20	35	50
Y Dependente	Média das Massas Injetadas (g)	?	?	?

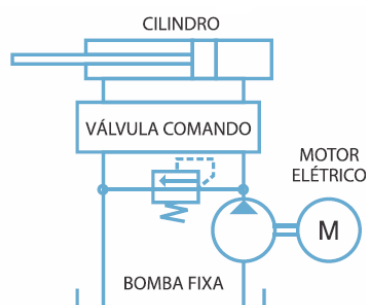
Fonte: Primária, 2017.

Os níveis da Tabela 5 são classificados como sendo baixo (-1), intermediário (0) e alto (1). A análise estatística de Pareto também foi realizada para avaliar os efeitos das variáveis “independentes” individualmente e conjugados sobre a massa injetada no molde.

4.8 Energia consumida por ciclo de injeção

A abordagem do modelo para estimativa de energia consumida na injeção prevê a identificação das características determinantes do produto e molde, de modo a utilizá-las como indutores para cálculo dos custos de manufatura por cada injeção do molde (JOHANNABER, 2008). Os parâmetros de processamento da máquina injetora são responsáveis por estes cálculos, que tem como fonte alimentadora o motor elétrico e a bomba fixa representados na Figura 29.

Figura 29 – Representação do motor elétrico e a bomba fixa de uma máquina injetora convencional.



Fonte: Adaptada de OSSWALD; LIH-SHENG & GRAMANN, 2008.

Conforme demonstrado na Figura 29, a partir da determinação dos indutores que geram trabalho para os parâmetros de processamento, é possível calcular a energia consumida em cada ciclo de injeção produzida pela máquina injetora (OSSWALD; LIH-SHENG & GRAMANN, 2008).

4.8.1 Cálculo do custo por ciclo de injeção

Para comparar a quantidade de energia consumida em cada ciclo de injeção antes e após as modificações executadas no molde, foram realizados cálculos de consumo de energia com base nos parâmetros de processamento. A bomba fixa da

máquina injetora é responsável pela movimentação da rosca recíproca que empurra o polímero fundido até as cavidades do molde. De acordo com Sapene (2010), a equação 26 pode ser usada para calcular a energia utilizada pela bomba fixa:

$$E_{bf} = P_{inject} \cdot \dot{V} = (W) \quad (26)$$

Em que:

- P_{inject} é a pressão de injeção exercida pela máquina injetora (Pa)
- \dot{V} é a velocidade de injeção da máquina (cm^3/s).

O motor elétrico é responsável pelo aquecimento das resistências térmicas, que aquecem o polímero para homogeneização. Como são distinguidas cinco zonas térmicas de aquecimento nas resistências da máquina injetora, a equação da energia requerida pelo motor é dada como o somatório de energia requerida por cada zona térmica (SAPENE, 2010):

$$E_{me} = \sum ZT = (W) \quad (27)$$

$$ZT = \dot{m} \cdot cp \cdot (T - T_0) = (W) \quad (28)$$

Onde:

- E_{me} é a energia gasta pelo motor elétrico,
- ZT é a energia gasta por cada zona térmica (W)
- cp é o calor específico do material (J/kg.K)
- T é a temperatura da resistência (K)
- T_0 é a temperatura da resistência anterior
- \dot{m} é a vazão mássica ($\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho$) de polímero (kg/s),

A equação 29 fornece estimativas da energia requerida por ciclo de injeção.

$$E_{inject} = \frac{E_{bf} + E_{me}}{1000} = (KW) \quad (29)$$

O custo operacional da máquina injetora por hora é proporcional ao preço da energia fornecida pela estatal alimentadora de rede elétrica ($\$E$), o que geralmente é vendido como kWh (SAPENE, 2010). Segundo Back (2011) custo do material utilizado para fabricar um único produto, leva em conta os valores de custo da matéria prima e a massa do produto, como demonstra a Equação 30:

$$\text{\$}MP = mP \cdot \text{\$}M = (\text{R}\$) \quad (30)$$

Em que:

- mP - massa do produto injetado (kg)
- $\text{\$}M$ - custo dos *pellets* de matéria prima (R\$/kg).

Back (2011) ainda relata que o custo por injeção é dado pela soma do custo da energia gasta pela máquina injetora com o custo da matéria prima, conforme a equação 31:

$$\text{\$}I = \left(\frac{E_{inject} \cdot \text{\$}E \cdot Ci \cdot Nc}{3600} \right) + \text{\$}MP = (\text{R}\$) \quad (31)$$

Sendo que:

- Ci é o tempo do ciclo de injeção (s)
- Nc é o número de cavidades do molde
- $\text{\$}E$ é o custo da energia fornecida pela estatal (R\$/KWh).

Com estas equações é possível determinar o custo necessário para produzir cada peça injetada, não levando em consideração a mão de obra e outras taxas oriundas de impostos. Estes cálculos foram realizados antes e depois das modificações realizadas no molde com intuito de comparar os gastos obtidos no processo de injeção do copo. Para realização destes cálculos, levou-se em consideração os valores de custo da matéria prima ($\text{\$}M$ do GPPS) de 15 R\$ por kg, e o preço da energia ($\text{\$}E$) de 0,520142 kilo watt por hora (kWh).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, primeiramente, são apresentados os resultados experimentais e, em seguida, os resultados das simulações utilizando a configuração original do molde de injeção. Com base nas análises dos resultados experimentais e principalmente das simulações, modificações no molde foram propostas e executadas para reduzir as possíveis causas de ineficiência de injeção. Em seguida serão mostrados os resultados obtidos com o molde modificado, que foi testado tanto experimentalmente como por meio de simulações numéricas. Os dados obtidos nesta etapa foram utilizados para validar o modelo matemático do *software Solid Works Plastics*. Posteriormente será apresentado um estudo estatístico, baseado em um planejamento fatorial, para se quantificar a influência dos parâmetros de processo na eficiência da injeção. Por fim, será apresentada uma estimativa da redução do custo do processo em virtude das modificações do molde.

5.1 Ensaios experimentais da injeção dos copos

As injeções dos copos em GPPS foram realizadas em uma máquina injetora da marca HAITIAN, modelo PL 860/270 C. Para obter uma melhor precisão dos resultados experimentais e garantir uma maior confiabilidade no processo de validação do modelo matemático, foram realizados 10 ciclos de injeção para cada condição operacional simulada. A cada ciclo, dois copos foram produzidos e pesados. Para controlar as temperaturas das paredes do molde no processo de injeção, foram instalados termopares do tipo J para o melhor controle do processo. Os primeiros sensores (Termopar 1 e 2) foram posicionados a uma distância de 5 mm da parede da cavidade superior do molde, enquanto os outros sensores (Termopar 3 e 4), foram posicionados a uma distância de 5,5 mm da parede da cavidade inferior. Na Tabela 6 são mostradas as leituras das temperaturas realizadas pelos termopares no processo de injeção, considerando as quatro temperaturas de parede do molde utilizadas no trabalho.

Tabela 6 – Leitura das temperaturas da parede do molde em diferentes pontos das cavidades.

Posição do Termopar	Temperaturas das Paredes do Molde			
	Para 20 °C	Para 30 °C	Para 40 °C	Para 50 °C
1	20,46 °C	30,51 °C	40,53 °C	50,62 °C
2	20,32 °C	30,38 °C	40,41 °C	50,46 °C
3	19,87 °C	29,95 °C	40,01 °C	49,98 °C
4	20,06 °C	30,08 °C	40,09 °C	50,07 °C

Fonte: Primária, 2017.

Com ajuda destes sensores, pôde-se controlar a temperatura do molde ajustando a temperatura do fluido de refrigeração. Os ensaios experimentais foram subdivididos em conjuntos de experimentos, nos quais cada um foi conduzido com uma temperatura específica de molde. As tabelas apresentadas a seguir contêm os valores das massas injetadas com seus respectivos desvios padrão, obtidos para cada uma das condições experimentais testadas na injetora.

Tabela 7 – Valores médios das massas injetadas com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma **temperatura de molde de 20 °C**.

P_{inject} (MPa)	T_{inject} 190 °C		T_{inject} 200 °C		T_{inject} 210 °C		T_{inject} 220 °C		T_{inject} 230 °C		T_{inject} 240 °C	
	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)
5	14,79	± 3,0734	44,13	± 2,6586	63,11	± 1,2056	75,66	± 1,0910	72,30	± 1,2586	55,35	± 1,9260
10	34,18	± 2,2983	62,53	± 1,6826	83,62	± 0,6022	96,20	± 0,9329	93,45	± 0,8820	77,91	± 0,7978
15	52,79	± 1,8853	79,83	± 0,6545	102,96	± 0,7730	116,80	± 1,1045	114,55	± 0,5741	98,57	± 0,9553
20	70,61	± 1,4981	93,29	± 1,0239	115,10	± 0,4065	126,74	± 0,8317	125,25	± 0,4930	113,17	± 1,0058
25	82,80	± 1,9325	105,44	± 0,6377	123,29	± 0,4276	130,92	± 0,3349	130,27	± 0,1077	121,91	± 0,3770
30	92,67	± 1,4478	113,26	± 0,8302	128,57	± 0,5419	132,01	± 0,4666	131,60	± 0,1287	126,69	± 0,0970
35	100,20	± 1,3051	121,25	± 0,8016	131,15	± 0,7103	133,11	± 0,2774	132,31	± 0,9772	129,14	± 0,3496
40	105,96	± 0,8604	124,74	± 0,6918	134,19	± 0,4862	134,86	± 0,3535	134,61	± 0,1717	130,91	± 0,3397
45	108,11	± 0,7800	126,98	± 0,5728	134,24	± 0,6385	134,79	± 0,1108	134,54	± 0,1599	131,84	± 0,5015
50	104,22	± 0,9082	122,92	± 0,7338	132,35	± 0,7616	134,23	± 0,0696	133,98	± 0,3221	131,17	± 0,2361
55	93,95	± 0,7074	113,04	± 0,5872	127,77	± 0,9824	131,56	± 0,1358	130,89	± 0,0874	127,09	± 0,2411
60	81,67	± 0,9370	102,11	± 0,7062	119,63	± 0,6788	127,27	± 0,1306	125,82	± 0,0424	122,68	± 0,1674

Fonte: Primária, 2017.

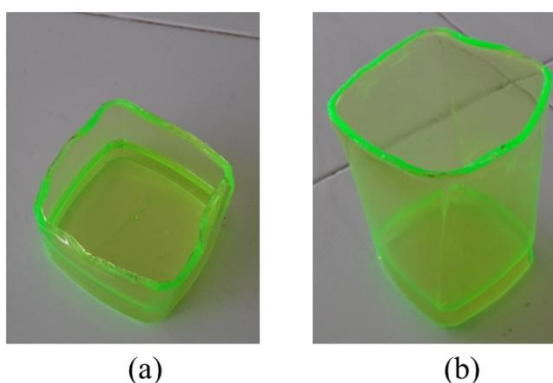
Nestas tabelas também estão destacadas em verde as condições de menor média de massa injetada, e em vermelho, as condições nas quais o molde obteve a maior média de preenchimento mássico das cavidades. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 7, é possível notar que as massas injetadas com o molde operando a 20 °C foram baixas, independentemente das condições de

pressão e temperatura de injeção testadas. Mesmo na melhor condição testada (destacada em vermelho), a massa injetada foi cerca de 10 g menor que o desejado. Além disso, observa-se que o desvio padrão tende a aumentar à medida que se diminui a pressão de processamento, o que denota um aumento de instabilidade do processo.

Quando o molde é operado com baixas temperaturas, o escoamento da massa polimérica é dificultado devido à sua maior viscosidade, principalmente nas regiões próximas às paredes do molde. Este comportamento leva a um aumento da espessura da camada congelada e prejudica o preenchimento do molde, resultando em um processo de baixa eficiência de injeção.

A Figura 30 ilustra amostras do copo que não preencheram totalmente as cavidades do molde.

Figura 30 – Amostras ineficientes (refugo) do processo de injeção do copo. a) amostra com baixíssima eficiência, b) amostra com baixa eficiência.



Fonte: Primária, 2017.

Os copos ineficientes do processo de injeção dos copos são separados no processo produtivo e destinados para serem reprocessados novamente. Isto implica que a empresa reutiliza o material considerado impróprio para a comercialização, no qual é moído e misturado com matéria prima virgem.

Na Tabela 8 são apresentados os valores médios das massas injetadas com seus respectivos desvios padrões com o molde operando com temperatura de 30 °C.

Tabela 8 – Valores médios das massas injetadas com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma **temperatura de molde de 30 °C**.

P_{inject} (MPa)	T_{inject} 190 °C		T_{inject} 200 °C		T_{inject} 210 °C		T_{inject} 220 °C		T_{inject} 230 °C		T_{inject} 240 °C	
	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)
5	31,48 ± 3,7687		47,72 ± 1,3484		63,94 ± 3,0064		77,99 ± 1,5294		76,87 ± 2,2473		71,04 ± 1,5354	
10	53,61 ± 2,1064		66,87 ± 0,9526		81,36 ± 2,3628		93,64 ± 1,0440		92,88 ± 0,9989		87,64 ± 1,1255	
15	74,61 ± 1,8678		86,64 ± 0,6023		98,24 ± 1,3689		111,55 ± 1,0190		109,73 ± 1,3969		102,95 ± 0,8356	
20	92,94 ± 1,2175		103,04 ± 0,5735		112,39 ± 0,7492		123,15 ± 0,6866		121,71 ± 0,3103		115,71 ± 0,2460	
25	109,63 ± 1,1078		116,80 ± 0,7032		124,96 ± 0,3063		131,45 ± 0,4154		131,04 ± 0,2547		126,67 ± 0,2593	
30	122,15 ± 1,5403		127,79 ± 0,4670		132,94 ± 0,3238		136,35 ± 0,3004		134,65 ± 0,2678		132,06 ± 0,2452	
35	129,89 ± 1,3816		133,27 ± 1,0361		136,08 ± 0,4822		136,61 ± 0,2709		136,36 ± 0,1754		134,68 ± 0,2583	
40	132,06 ± 0,7232		135,39 ± 0,6880		136,29 ± 0,5355		136,96 ± 0,2618		136,71 ± 0,1057		136,41 ± 0,2203	
45	133,22 ± 0,7464		135,38 ± 0,4053		136,33 ± 0,3233		136,88 ± 0,1927		136,63 ± 0,0337		136,45 ± 0,0997	
50	130,82 ± 0,8338		133,07 ± 0,4217		135,84 ± 0,5723		136,43 ± 0,1690		136,18 ± 0,1471		134,72 ± 0,0662	
55	127,15 ± 0,8226		129,42 ± 0,3734		133,20 ± 0,4385		135,51 ± 0,3796		133,56 ± 0,0565		132,09 ± 0,0568	
60	121,31 ± 0,8759		123,38 ± 0,4146		127,84 ± 0,7003		131,60 ± 0,4562		129,42 ± 0,0363		126,01 ± 0,0214	

Fonte: Primária, 2017.

De acordo com os resultados apresentados nesta tabela, e comparando-os com os resultados contidos na Tabela 7, nota-se um aumento da massa injetada em virtude do aumento da temperatura do molde de 20 para 30 °C. Desta forma, pode-se afirmar que o aumento da temperatura do molde favoreceu o escoamento da massa polimérica fundida para o interior das cavidades. Neste caso, segundo Chen *et al.* (2009), o menor fluxo de calor da massa polimérica fundida para a parede do molde, quando comparado à situação de temperatura de molde de 20 °C (Tabela 6), contribuiu para manter o GPPS fundido mais quente e menos viscoso nas regiões mais próximas às paredes do molde, facilitando o escoamento da massa polimérica.

Outra consequência da massa polimérica mais quente e menos viscosa nas regiões próximas à parede é a redução da espessura da cada congelada, o que contribui para um escoamento mais livre da massa polimérica fundida para o interior das cavidades do molde. Consequentemente, o preenchimento das cavidades do molde com este operando a 30 °C foi mais eficiente do que no caso no qual o molde foi operado a 20 °C. Contudo, essa melhora ainda ficou aquém do esperado.

Visando melhorar o preenchimento do molde, testes foram realizados com o mesmo operando à 40 °C. Na Tabela 9 são apresentadas as médias e seus respectivos desvios padrões das massas injetadas com diferentes pressões e temperaturas de injeção, mantendo a temperatura do molde constante a 40 °C.

Tabela 9 – Valores médios das massas de injeção com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma **temperatura de molde de 40 °C**.

P_{inject} (MPa)	T_{inject} 190 °C		T_{inject} 200 °C		T_{inject} 210 °C		T_{inject} 220 °C		T_{inject} 230 °C		T_{inject} 240 °C	
	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)
5	58,37 ± 1,8215		80,78 ± 1,2379		107,48 ± 1,2938		119,88 ± 1,2126		116,53 ± 1,6128		94,83 ± 1,3925	
10	84,60 ± 1,4850		99,86 ± 1,0856		123,30 ± 0,8180		131,38 ± 0,6074		128,53 ± 1,4172		112,69 ± 0,6610	
15	101,91 ± 1,0840		113,78 ± 0,8591		134,28 ± 0,4622		139,69 ± 0,4572		138,23 ± 0,8254		124,94 ± 0,9312	
20	115,71 ± 1,1164		124,12 ± 0,9186		139,22 ± 0,5256		139,88 ± 0,3652		139,63 ± 0,6173		134,83 ± 0,2037	
25	126,53 ± 0,7353		133,29 ± 0,7156		139,53 ± 0,4696		140,06 ± 0,2048		139,81 ± 0,5260		139,65 ± 0,2046	
30	135,66 ± 0,9713		139,12 ± 0,5520		139,62 ± 0,6310		140,12 ± 0,0638		139,87 ± 0,2485		139,74 ± 0,2140	
35	138,82 ± 0,7495		139,07 ± 0,4097		139,77 ± 0,3824		140,30 ± 0,1039		140,05 ± 0,6221		139,89 ± 0,0996	
40	138,85 ± 1,3940		139,05 ± 0,5141		139,95 ± 0,3774		140,62 ± 0,0577		140,37 ± 0,2193		140,07 ± 0,0563	
45	138,88 ± 1,1216		139,03 ± 0,3931		139,98 ± 0,1528		140,53 ± 0,1161		140,28 ± 0,1993		140,10 ± 0,5822	
50	138,62 ± 0,7697		138,87 ± 1,1992		139,70 ± 0,1008		140,29 ± 0,0418		140,04 ± 0,0830		139,82 ± 0,0324	
55	135,90 ± 1,0626		138,43 ± 0,4136		139,09 ± 0,0950		139,75 ± 0,0554		139,50 ± 0,1917		138,01 ± 0,0572	
60	132,11 ± 0,9654		135,21 ± 0,6609		138,31 ± 0,1379		139,03 ± 0,1026		138,78 ± 0,3398		134,08 ± 0,0182	

Fonte: Primária, 2017.

Os resultados mostrados da Tabela 9 também apresentaram massas injetadas maiores em comparação às condições anteriores (temperatura de molde de 30 e 20 °C), mas ainda foram abaixo do esperado. Assim como no caso anterior (temperatura de operação do molde de 30 °C), o aumento da temperatura na parede do molde de 30 para 40 °C diminuiu a troca térmica no sistema, mantendo o polímero fundido mais aquecido e com menor viscosidade por mais tempo nas regiões próximas às paredes do molde, diminuindo ainda mais a espessura da camada congelada e, conseqüentemente, contribuindo para um melhor preenchimento do molde.

Vale ressaltar que a condição operacional que resultou a maior média de massa injetada e um dos menores desvios padrões (destaque em vermelho na Tabela 9), é a mesma que a utilizada pelo processo industrial na qual o estudo está pautado. Embora sua média das massas injetadas esteja abaixo do esperado, como já foi mencionado, a cada 10 ciclos (20 peças) pelo menos sete peças eram retiradas com qualidade comercial, mesmo apresentando pequenos defeitos como frisos e bolhas. De acordo com a análise de qualidade realizada pela empresa, esses defeitos apenas eram visíveis mediante uma minuciosa verificação visual do copo.

No último conjunto de experimentos realizados com o molde do copo, a temperatura do molde foi mantida em 50 °C, enquanto a pressão e temperatura de injeção foram variadas. De acordo com a Tabela 10, percebe-se que, em relação às

médias das massas injetadas com a temperatura do molde em 40 °C, houve uma redução da quantidade de polímero injetado nas cavidades do molde.

Tabela 10 – Valores médios das massas de injeção com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma **temperatura de molde de 50 °C**.

P_{inject} (MPa)	T_{inject} 190 °C		T_{inject} 200 °C		T_{inject} 210 °C		T_{inject} 220 °C		T_{inject} 230 °C		T_{inject} 240 °C	
	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)
5	38,61 ± 2,1562		60,69 ± 1,7524		82,40 ± 1,5632		95,42 ± 1,0641		87,94 ± 1,0451		80,12 ± 1,5066	
10	59,34 ± 1,4586		81,55 ± 2,0228		99,71 ± 1,2303		111,90 ± 1,0449		106,38 ± 1,0569		102,45 ± 0,6956	
15	80,21 ± 0,8084		100,05 ± 1,2803		114,05 ± 0,8324		123,60 ± 0,5992		118,72 ± 1,2168		117,06 ± 0,7303	
20	98,22 ± 0,7137		114,84 ± 0,9325		126,38 ± 1,0596		131,37 ± 0,2932		128,40 ± 0,7185		127,59 ± 0,1548	
25	114,80 ± 0,8495		127,46 ± 0,4595		134,94 ± 0,5984		136,97 ± 0,2331		132,89 ± 0,2625		132,24 ± 0,1556	
30	126,26 ± 0,8133		133,73 ± 0,4653		137,15 ± 0,7235		137,65 ± 0,3830		136,21 ± 0,2171		135,05 ± 0,5810	
35	132,39 ± 0,9962		136,65 ± 0,5662		137,35 ± 0,7321		137,88 ± 0,0625		137,63 ± 0,4590		136,88 ± 0,0851	
40	136,44 ± 0,5844		136,64 ± 0,5472		137,54 ± 0,4318		138,21 ± 0,2156		137,96 ± 0,0882		137,66 ± 0,0856	
45	136,48 ± 0,8219		136,63 ± 0,3479		137,58 ± 0,3343		138,13 ± 0,1372		137,88 ± 0,1442		137,70 ± 0,6521	
50	135,39 ± 0,6451		136,33 ± 0,4457		137,16 ± 0,2445		137,75 ± 0,0487		137,50 ± 0,2750		137,28 ± 0,0517	
55	132,97 ± 0,6236		134,32 ± 0,7873		136,30 ± 0,2449		136,96 ± 0,2370		136,71 ± 0,2174		134,78 ± 0,0306	
60	127,37 ± 0,6607		130,11 ± 0,3675		134,19 ± 0,1629		135,89 ± 0,2410		135,35 ± 0,2522		129,77 ± 0,0215	

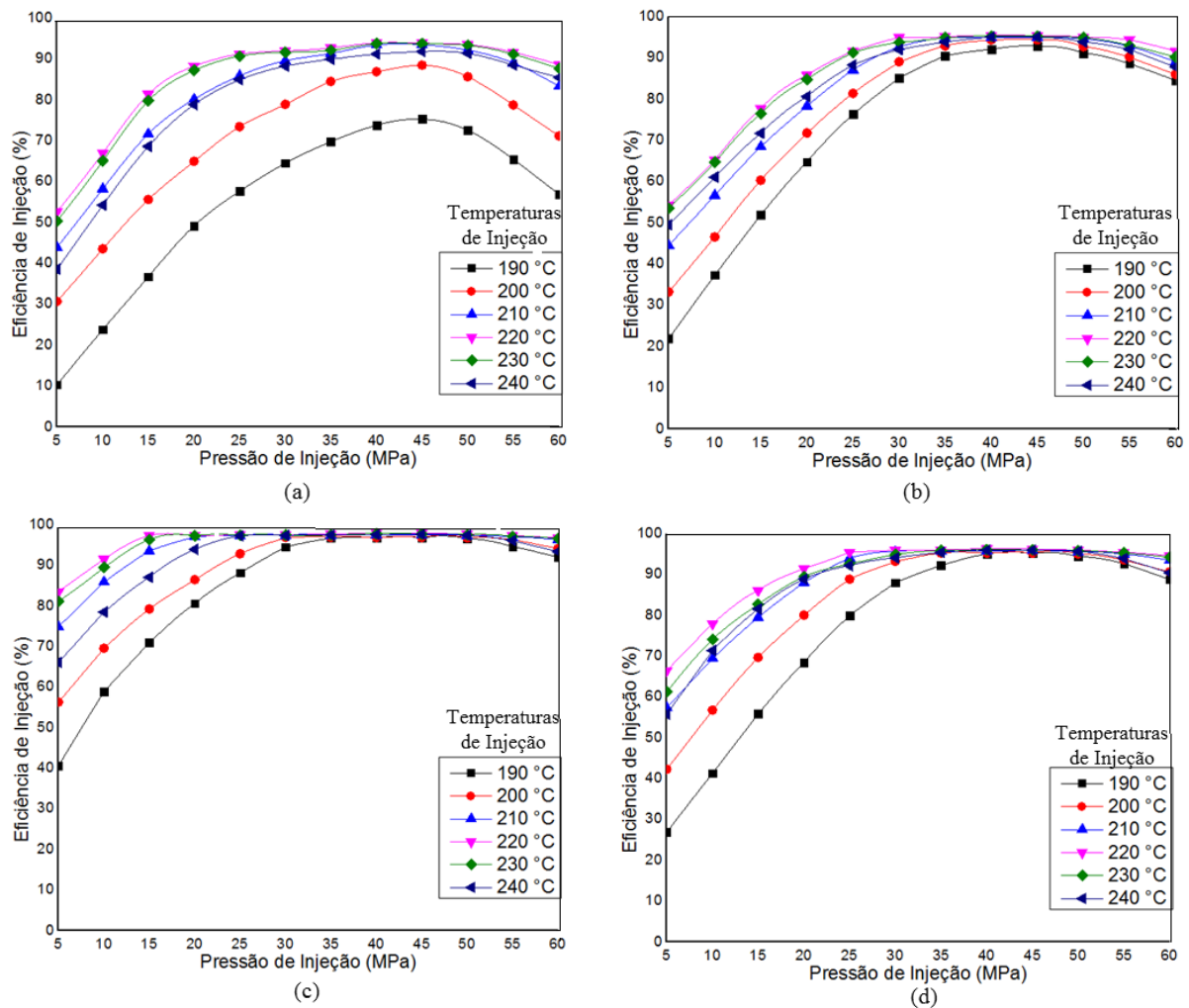
Fonte: Primária, 2017.

De uma forma geral, pode-se dizer que quanto menor foi a temperatura do molde testada, menores foram as massas injetadas. Como a viscosidade é inversamente proporcional à temperatura, o aumento da temperatura de injeção resultou em uma tendência de aumento da massa injetada, pois uma massa polimérica fundida menos viscosa escoava com mais facilidade através das cavidades do molde, o que contribuiu para um preenchimento mais adequado do mesmo. Contudo, temperaturas de injeção muito altas levaram a uma pequena redução da massa injetada, possivelmente pelo surgimento de tensões residuais no escoamento.

A partir dos ensaios experimentais, foi possível identificar a melhor condição de processamento para o GPPS no molde estudado (condições destacadas em vermelho nas tabelas 7, 8, 9 e 10). Com base nas informações adquiridas, verificou-se que não foi possível obter uma massa média injetada dentro das especificações de qualidade do produto, mesmo que as condições experimentais tenham sido exploradas dentro de uma faixa de valores relativamente ampla para os parâmetros de processo. De acordo com o projeto do produto, a massa total para as duas peças injetadas deve ser de 143,50 gramas (massa injetada por ciclo de injeção). Os resultados apresentados nas tabelas 7, 8, 9 e 10 foram inseridos na

Equação 24 e utilizados para gerar os gráficos de eficiência de injeção em função das condições operacionais, mostrados na Figura 31. Nesta figura, é demonstrado como as eficiências de injeção variaram com a temperatura e a pressão de injeção, considerando as quatro temperaturas de molde (20, 30, 40 e 50 °C).

Figura 31 - Eficiências de injeção variando as pressões e temperaturas de injeção. a) temperatura do molde de 20 °C, b) temperatura do molde de 30 °C, c) temperatura do molde de 40 °C, d) temperatura do molde de 50 °C.



Fonte: Primária, 2017.

De acordo com os resultados contidos na Figura 31.a, b, c e d, nota-se que à medida que as pressões de injeção aumentam, a eficiência de injeção melhora. Nas situações de baixas pressões de injeção, as tensões exercidas pela rosca da injetora não foram suficientes para vencer as tensões exercidas pela parede do molde (MANRICH, 2013). De acordo com Bretas e D'avila (2000), em pressões de injeção elevadas, o molde tende a recuar e abrir, de modo que vaza material ocasionando

rebarbas e prejudicando o processo e as eficiências de injeção.

A relativa boa eficiência da injeção na condição de temperatura de molde de 40 °C é resultado de um escoamento mais fácil do polímero fundido através das cavidades do molde, pelo fato deste material estar adequadamente aquecido ao longo de toda a seção transversal da cavidade do molde. Isto ocorre por que a medida que se aumenta a temperatura do molde junto ao aumento da temperatura de injeção (temperatura de entrada do polímero), diminui-se a troca térmica e, conseqüentemente, o valor de temperatura da camada congelada, o que possibilita uma melhor velocidade de escoamento do polímero (CHEN, 2009; CATIC, 2006).

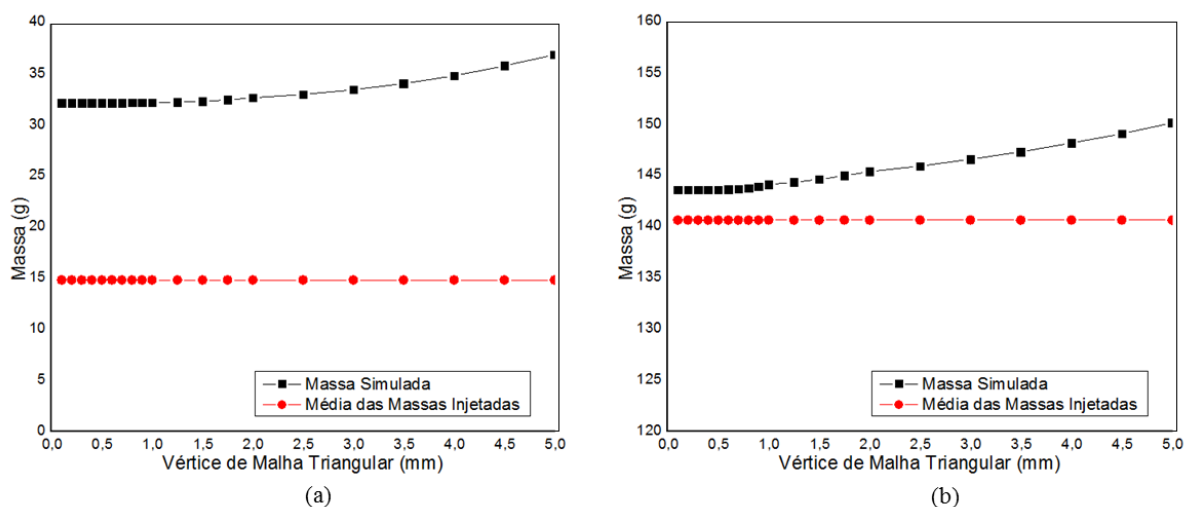
Outro fator complementar que facilita o escoamento é que a massa polimérica fundida se submete a altas tensões de cisalhamento para vencer as tensões da frente de fluxo. Contudo, o resultado destes altos valores de tensões (BARETA et al., 2007), é que as peças injetadas apresentaram marcas, como frisos e bolhas de ar aprisionadas (Figura 16).

5.2 Resultados das simulações

Simulações computacionais do processo de injeção no molde dos copos com o polímero GPPS foram realizadas com o objetivo de compreender mais a fundo o processo e identificar as razões para a ineficiência de preenchimento das cavidades do molde. Para uma maior confiabilidade das simulações, alguns testes preliminares de refinamento de malha foram executados para avaliar o tamanho de vértice de malha de casca triangular ideal para ser utilizado nesta etapa computacional.

Foram comparados dois casos distintos de simulação: em um deles usou-se a condição operacional na qual o molde obteve experimentalmente a menor eficiência de preenchimento (condição em verde da Tabela 7 – pressão de injeção de 5 MPa, temperatura de injeção de 190 °C e temperatura de molde de 20 °C); e no outro usou-se a condição operacional na qual o molde obteve experimentalmente a maior eficiência de preenchimento das cavidades (condição em vermelho da Tabela 9 – pressão de injeção de 40 MPa, temperatura de injeção de 220 °C e temperatura de molde de 40 °C). Na Figura 32 são apresentados os resultados do estudo de refinamento de malha nestas duas condições.

Figura 32 - Influência do tamanho de malha nos resultados das simulações, nas condições, a) condição de menor eficiência de injeção, b) condição com a maior eficiência de injeção.



Fonte: Primária, 2017.

O resultado das simulações em função do refinamento de malha na situação de menor eficiência de injeção (Figura 32.a) mostrou que o modelo matemático superestimou as massas injetadas mesmo tendo o modelo convergido a partir de um tamanho do elemento da malha menor que 0,5 mm. As massas simuladas foram aproximadamente 117% maiores que as massas reais dos copos injetados. Estes desvios foram calculados com a Equação 25.

No segundo caso (maior eficiência de injeção, Figura 32.b), os resultados das simulações mostraram que o modelo matemático também convergiu com um tamanho de elemento de malha de 0,5 mm, porém ainda gerando resultados superestimados quando comparados com os dados experimentais. Contudo, neste caso, o desvio da simulação foi de apenas aproximadamente 2% (calculado pela Equação 25). Estes resultados demonstram que quanto maior for a eficiência de preenchimento do molde nas situações reais, mais precisos tendem a ser os resultados simulados com o modelo matemático do processo utilizado pelo *Solid Works Plastics*.

Semelhantemente às condições operacionais utilizadas no primeiro teste, este segundo teste também demonstrou que quanto menor o tamanho do elemento da malha, mais os resultados se aproximam da realidade dos experimentos, ou seja, maior a precisão e confiabilidade do modelo. Outro fator muito importante a ser observado a partir dos resultados mostrados nas Figuras 32.a e b, é que o tamanho

ideal do vértice do elemento triangular da malha deve ser de 0,5 mm para garantir a melhor precisão dos resultados. Se diminuir este tamanho para executar as simulações, a mesma precisão dos resultados será alcançada, porém maior será o esforço e o tempo computacional necessário para se executar os cálculos das simulações.

Da mesma forma como nos procedimentos experimentais, as simulações numéricas foram executadas conforme os parâmetros de injeção apresentados na Tabela 2. Como mencionado anteriormente, pelo fato do principal problema de processo a ser estudado no molde original estar relacionado à ineficiência no preenchimento do molde, selecionou-se a massa de polímero injetada como parâmetro de qualidade do processo. A avaliação da influência dos parâmetros de processo por meio das simulações foi realizada conforme a metodologia experimental: para cada temperatura do molde, tanto a pressão de injeção quanto a temperatura de injeção foram alteradas, e as massas injetadas foram registradas.

As Tabelas 11, 12, 13 e 14 apresentam os resultados das massas simuladas nas distintas condições operacionais (pressão e temperatura de injeção) para as temperaturas de molde de 20, 30, 40 e 50 °C, respectivamente, considerando o projeto original do molde de injeção. As tabelas ainda demonstram destacadas em destaque verde, as condições operacionais nas quais obteve-se a menor massa injetada simulada, e em vermelho as condições nas quais o polímero fundido preencheu totalmente as cavidades do molde.

Tabela 11 – Resultados das simulações da injeção do copo no *Solid works Plastics*, variando a pressão e temperatura de injeção, considerando a **temperatura do molde de 20 °C**.

P_{inject} (MPa)	T_{melt} 190 °C	T_{melt} 200 °C	T_{melt} 210 °C	T_{melt} 220 °C	T_{melt} 230 °C	T_{melt} 240 °C
	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)
5	32,09	60,23	78,01	89,36	86,25	70,13
10	49,88	77,23	97,32	108,9	106,4	91,49
15	67,09	93,28	115,56	128,55	126,55	111,05
20	83,21	105,23	126,38	137,36	136,12	124,33
25	94,13	116,24	133,56	140,66	140,26	132,06
30	103,44	123,63	138,44	141,38	141,22	136,44
35	110,75	131,55	140,75	142,18	141,63	138,62
40	116,44	135,02	143,57	143,57	143,57	140,17
45	118,54	137,26	143,57	143,57	143,57	141,05
50	115,23	133,68	142,28	143,57	143,57	140,98
55	106,08	124,85	138,92	142,05	141,63	138,12
60	95,33	115,36	132,4	139,32	138,12	135,33

Fonte: Primária, 2017.

De acordo com os resultados da Tabela 11, quando a simulação foi realizada considerando a temperatura do molde de 20 °C, percebeu-se que em baixas pressões o molde não conseguiu preencher adequadamente as cavidades, o que resultou em massas injetadas menores que as definidas para o produto. Ao se aumentar a temperatura de injeção para 210 °C, na pressão de 40 MPa já foi possível preencher totalmente o molde com polímero fundido. Contudo, mesmo para esta temperatura, as simulações também indicaram que o preenchimento total das cavidades não ocorre em pressões menores que 40 MPa, pois elas são insuficientes para vencer as tensões necessárias para empurrar o polímero entre as cavidades.

Outro fator relevante é que conforme a temperatura de injeção aumenta, a pressão necessária para o preenchimento total do molde diminui. Porém, de acordo com as simulações, o mínimo valor necessário para este parâmetro deve ser de 40 MPa para temperaturas de injeção de 210, 220 e 230 °C.

Para a situação com maior temperatura de injeção (240 °C), nota-se que em nenhuma das pressões simuladas foi possível preencher totalmente as cavidades do molde. A explicação para este fenômeno está relacionada ao aumento das tensões residuais, que acarretam na carbonização do polímero na frente de preenchimento (XIAO; HUANG e YANG, 2016).

Tabela 12 – Resultados das simulações da injeção do copo no *Solid works Plastics*, variando a pressão e temperatura de injeção, considerando a **temperatura do molde de 30 °C**.

P_{inject} (MPa)	T_{melt} 190 °C	T_{melt} 200 °C	T_{melt} 210 °C	T_{melt} 220 °C	T_{melt} 230 °C	T_{melt} 240 °C
	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)
5	45,32	60,36	75,38	88,23	87,36	82,36
10	66,17	78,43	91,92	103,2	102,69	98,08
15	86,05	97,23	107,98	120,44	118,87	112,57
20	103,02	112,46	121,15	131,25	130,06	124,35
25	118,69	125,33	132,96	138,9	138,76	134,55
30	130,77	136,01	140,66	143,57	142,12	139,66
35	138,33	141,46	143,57	143,57	143,57	142,05
40	140,44	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57
45	141,56	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57
50	139,63	141,63	143,57	143,57	143,57	142,33
55	136,85	138,8	141,92	143,57	141,87	140,69
60	132,24	133,9	137,88	140,92	138,99	135,93

Fonte: Primária, 2017.

Como se pode observar a partir dos dados simulados para a massa injetada no molde a 30 °C, apresentados na Tabela 12, o aumento da temperatura do molde de 20 para 30 °C resultou em uma melhoria de preenchimento do molde, ampliando as faixas de valores dos parâmetros operacionais nas quais as cavidades do molde foram totalmente preenchidas (destaque vermelho na Tabela 12). Entretanto, na condição de temperatura de injeção de 190 °C, ainda não foi possível preencher totalmente as cavidades do molde nem mesmo na situação de maior pressão de injeção, mostrando que o valor de 60 MPa ainda foi insuficiente para vencer a resistência ao escoamento do polímero fundido devido a uma maior viscosidade deste na temperatura de 190 °C.

De acordo com os resultados simulados para o molde operando com uma temperatura de 40 °C, nota-se um significativo aumento das faixas de valores dos parâmetros operacionais nas quais as cavidades do molde foram totalmente preenchidas (destaque vermelho na Tabela 13).

Tabela 13 – Resultados das simulações da injeção do copo no *Solid Works Plastics*, variando a pressão e temperatura de injeção, considerando a **temperatura do molde de 40 °C**.

P_{inject} (MPa)	T_{melt} 190 °C	T_{melt} 200 °C	T_{melt} 210 °C	T_{melt} 220 °C	T_{melt} 230 °C	T_{melt} 240 °C
	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)
5	66,15	87,36	112,86	124,06	120,96	100,09
10	91,66	105,92	128,36	135,44	132,66	117,63
15	108,34	119,36	139,01	143,57	142,36	129,55
20	121,38	129,13	143,57	143,57	143,57	139,06
25	131,63	137,86	143,57	143,57	143,57	143,57
30	140,51	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57
35	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57
40	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57
45	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57
50	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57
55	141,36	143,57	143,57	143,57	143,57	142,37
60	138,26	140,95	143,57	143,57	143,57	139,22

Fonte: Primária, 2017.

Isso demonstra que a troca térmica do polímero fundido com a parede do molde influencia positiva e significativamente o comportamento fluidodinâmico do escoamento do polímero no interior das cavidades.

No último conjunto de simulações considerou-se a temperatura do molde de 50 °C. Os resultados para as simulações realizadas com esta temperatura de molde

são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados das simulações da injeção do copo no *Solid Works Plastics*, variando a pressão e temperatura de injeção, considerando a **temperatura do molde de 50 °C**.

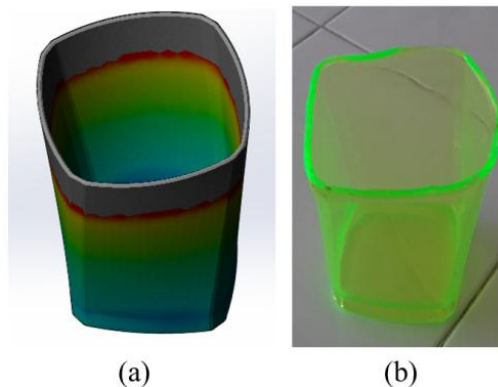
P_{inject} (MPa)	T_{melt} 190 °C	T_{melt} 200 °C	T_{melt} 210 °C	T_{melt} 220 °C	T_{melt} 230 °C	T_{melt} 240 °C
	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)	M_{sim} (g)
5	50,37	71,25	91,76	103,58	96,35	89,36
10	70,02	91,23	108,39	119,58	114,31	111,01
15	89,93	108,92	122,07	130,77	126,14	124,96
20	106,79	122,75	133,63	137,96	135,24	134,72
25	122,5	134,63	141,58	143,08	139,25	138,76
30	133,58	140,65	143,57	143,57	142,38	141,35
35	139,56	143,57	143,57	143,57	143,57	142,98
40	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57
45	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57
50	142,88	143,57	143,57	143,57	143,57	143,57
55	141,22	142,25	143,57	143,57	143,57	141,93
60	136,66	138,99	142,59	143,57	143,28	138,05

Fonte: Primária, 2017.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 14, verifica-se que houve uma queda de eficiência no preenchimento das cavidades do molde com relação à condição simulada com a temperatura do molde de 40 °C. Isso implica que o aumento excessivo da temperatura de molde, tanto nos experimentos quanto nas simulações, levaram a uma pequena redução da massa injetada, possivelmente pelo surgimento de tensões residuais no escoamento.

A Figura 33 demonstra uma comparação qualitativa das simulações do processo de injeção do copo com as amostras reais.

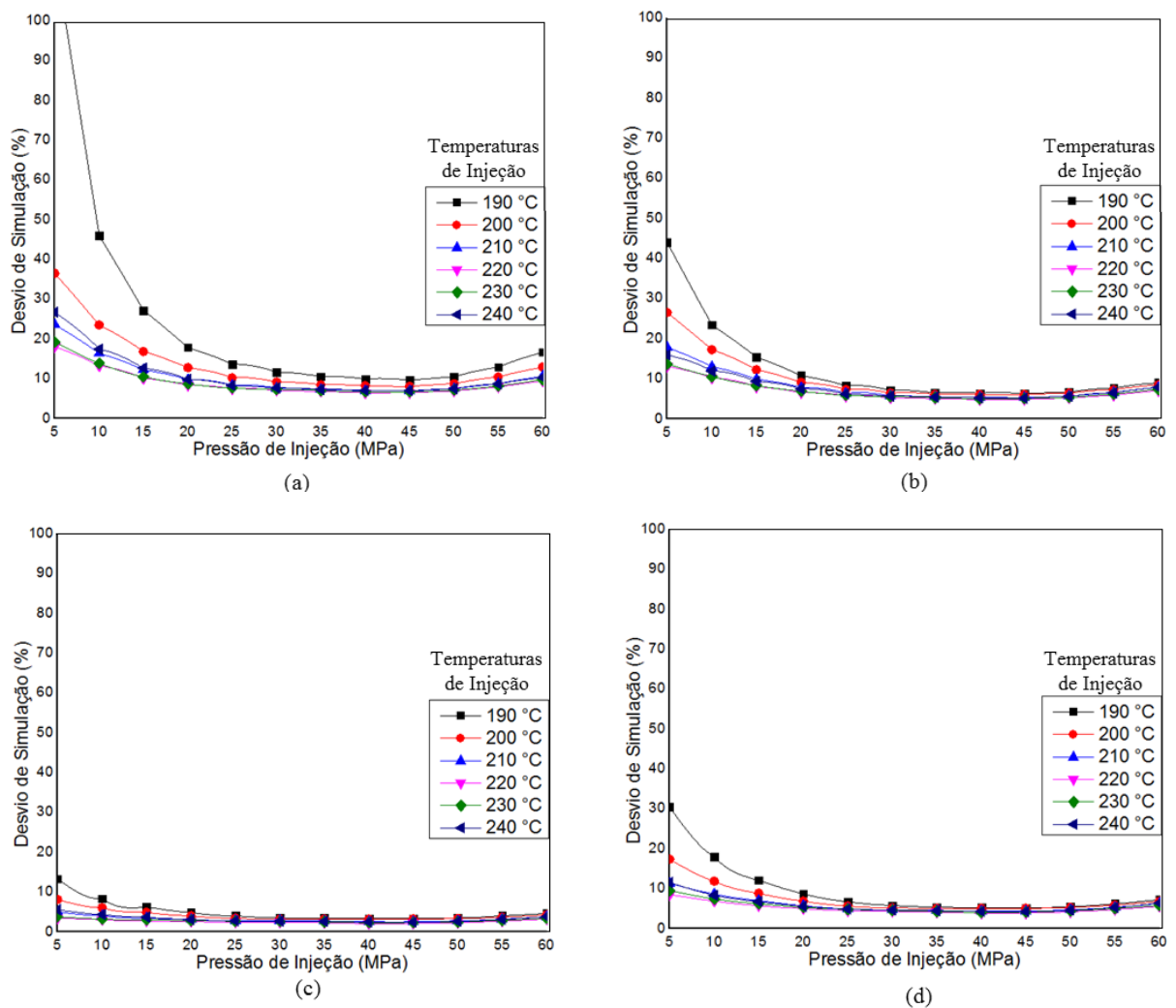
Figura 33 – Comparação qualitativa da simulação com o processo real em condições de iguais. a) massa simulada de 122,75 g, b) massa injetada 114,90 g.



Fonte: Primária, 2017.

Para se avaliar a capacidade de predição do modelo gerado e simulado no *software*, os resultados simulados (Tabelas 11, 12, 13 e 14) foram comparados com aqueles obtidos experimentalmente (Tabelas 7, 8, 9 e 10). Para isso, foram calculados os desvios de simulação introduzindo os valores das simulações e dos resultados experimentais na Equação 25. Desta forma, foi possível avaliar se o modelo simulado estava superestimando ou subestimando as massas injetadas, e mensurar o desvio de predição do modelo para as distintas condições operacionais testadas. Na Figura 34 são apresentados os comportamentos dos desvios das simulações, em função dos parâmetros de processamento (temperatura e pressão de injeção), considerando as temperaturas do molde de 20, 30, 40 e 50 °C.

Figura 34 - Desvios das simulações variando as pressões e temperaturas de injeção. a) temperatura do molde de 20 °C, b) temperatura do molde de 30 °C, c) temperatura do molde de 40 °C, d) temperatura do molde de 50 °C.



Apesar dos comportamentos observados na Figura 34.a apresentarem certa semelhança com os resultados da Figura 34.b, nota-se que o modelo matemático continua gerando resultados para a massa injetada maiores do que as obtidas nos ensaios experimentais. A justificativa para esta superestimativa das massas injetadas possivelmente recai na incapacidade do modelo matemático em lidar com o fenômeno do aprisionamento dos gases.

Comparando-se os resultados simulados, apresentados na Figura 34.c, com as Figuras 34.a e 34.b, percebe-se que o desvio da simulação diminuiu, porém o modelo também superestimou as massas injetadas devido a sua deficiência em tratar adequadamente o fenômeno de aprisionamento de gases no interior das cavidades do molde. Apesar disso o modelo foi capaz de reproduzir com gerar resultados com uma precisão razoável para o comportamento do processo de injeção variando-se a pressão e temperatura de injeção, e mantendo a temperatura do molde em 40 °C. Os resultados mostrados na Figura 34.d mostraram que o modelo demonstrou piora na sua capacidade de predizer as massas injetadas em na situação na qual a temperatura do molde foi mantida a 50 °C.

De uma forma geral, os resultados demonstraram que os desvios de simulação aumentaram de forma significativa com a redução das pressões de processamento para valores inferiores a aproximadamente 20 MPa. Nestas condições, as baixas tensões de cisalhamento são pouco atuantes no processo de preenchimento das cavidades, e afetam o comportamento reológico do material polimérico fundido durante seu escoamento. Apesar do modelo matemático ter apresentado um desempenho razoável em uma série de condições operacionais, ele não foi capaz de lidar adequadamente com os fenômenos viscoelásticos que se manifestam nas situações de baixas pressões de injeção.

A partir dos estudos de simulação do processo de injeção do GPPS para a produção dos copos no *Solid Works Plastics*, foi possível constatar que uma das principais razões para a ineficiência de preenchimento do molde estava relacionada ao aprisionamento de gases, e não devido ao uso de condições operacionais inadequadas. Os resultados de simulação também mostraram em quais superfícies de fechamento do molde o ar encontrava-se preso, dificultando o preenchimento do termoplástico. A Figura 35 mostra como os cantos da borda do copo aprisionam o ar no momento da injeção, dificultando o escoamento do termoplástico.

Figura 35 – Aprisionamento de gases.



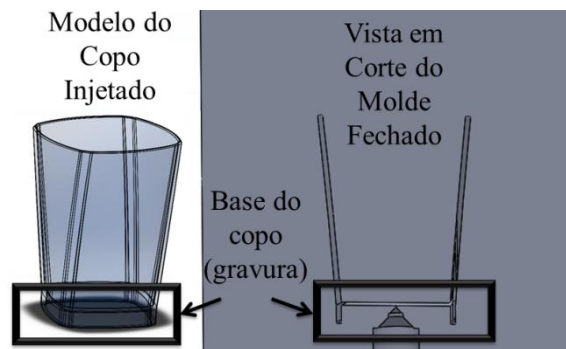
Fonte: Primária, 2017.

De acordo com a Figura 35, os gases aprisionados (representado pelas esferas de cor roxa) ocupam um determinado volume dentro do molde, eles acabam causando uma pressão contrária ao escoamento do polímero fundido até o final do molde, impedindo que o polímero alcance as regiões do molde mais distantes do ponto de injeção (SACCHELLI, 2002). Como consequência, tem-se uma ineficiência de preenchimento do molde. Desta forma, cada vez que as cavidades do molde se fecham para que o termoplástico quente seja injetado, o ar aquecido que se encontra dentro do molde fica preso na borda do copo, sem ter por onde escapar.

Apesar do *software* ser capaz de identificar a ocorrência deste problema (aprisionamento de gases), conforme mostrado na Figura 35, ele não foi capaz de tratá-lo adequadamente do ponto de vista matemático.

Segundo Goodship (2010), quando se tem uma gravura no molde, esta acumula gases que atrapalham o escoamento do polímero (Figura 7). A Figura 36 demonstra que a cavidade do molde do copo também possui uma gravura (perfil da base do copo) que também poderia estar acumulando gases de injeção ainda na fase inicial de preenchimento.

Figura 36 - Representação da gravura acumuladora de gases.



Fonte: Primária, 2017.

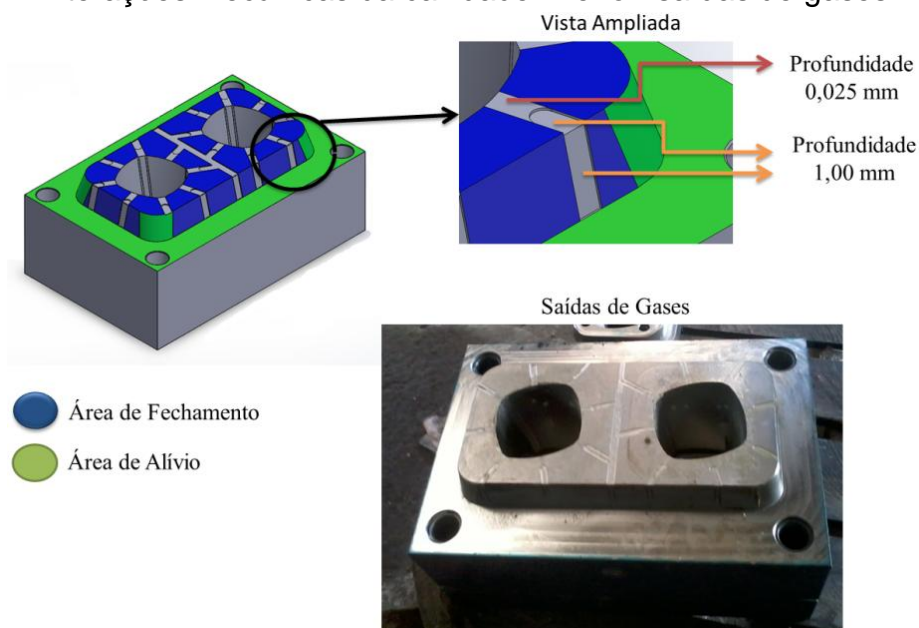
Cada vez que as cavidades se fecham para ser injetado o termoplástico quente, o ar também é aquecido e fica preso na borda do copo, sem ter por onde escapar. Como a borda do copo é a superfície final de preenchimento de injeção, os gases acabam ficando presos nesta região específica, aumentando as tensões de cisalhamento e impedindo o escoamento do termoplástico até o seu ciclo final.

5.3 Melhorias de projeto

Visando eliminar os problemas de aprisionamento de gases identificados nos estudos de simulação, saídas de gases no molde foram projetadas e inicialmente simuladas para se avaliar o comportamento do processo, e posteriormente executadas no molde real. As saídas de gases podem ser executadas em qualquer uma das duas cavidades (macho ou fêmea), desde que o limite de profundidade de 0,025 mm seja respeitado. Se a profundidade da saída for maior que 0,025 mm, rebarbas poderão ser geradas e ainda poderá ocorrer vazamento de material para fora do molde. As saídas dos gases (rebaixos) foram executadas na cavidade inferior (fêmea). Quanto à modificação no molde real, caso a usinagem das saídas de gases fosse executada na cavidade superior (macho), a ferramenta de usinagem necessitaria ser prolongada pelo fato da superfície de fechamento ser mais baixa que a cavidade. Desta forma, além do prolongamento da ferramenta sofrer riscos de colisões com a cavidade, este poderia causar erros de usinagem devido à vibração da ferramenta de corte no momento do contato com a cavidade.

Na Figura 37 é ilustrado como as saídas de gases foram usinadas na cavidade fêmea do molde para que o problema de aprisionamento de gases durante a injeção das peças fosse eliminado.

Figura 37 – Alterações mecânicas da cavidade inferior: saídas de gases.



Fonte: Primária, 2017.

As saídas de gases foram projetadas com canais de 0,025 mm de profundidade, comprimento de 20 mm e largura de 10 mm. A partir destes 20 mm foi feito um rebaixo (alívio), também de 20 mm de comprimento, porém com profundidade de 1 mm. Este alívio ajuda o gás a sair com mais velocidade impedindo que retorne às cavidades.

Com as saídas de gases usinadas no molde, esperava-se que o termoplástico escoasse com mais facilidade pelas cavidades até a borda do copo. Sendo assim, conforme a frente de fluxo escoasse cavidade adentro, esperava-se que os gases contidos na cavidade aquecida fossem expulsos para fora do molde sem maiores dificuldades, deixando a cavidade livre para o termoplástico fluir livremente até o completo preenchimento do molde.

5.4 Injeção das amostras com o molde modificado

De acordo com os resultados experimentais obtidos antes da modificação do molde, e com base nas informações fornecidas através dos resultados simulados, havia uma ineficiência de injeção devido ao aprisionamento de gases nas bordas do molde do copo. Os resultados apresentados a seguir buscam demonstrar o efeito das modificações do molde no desempenho e eficiência do processo de injeção para as distintas condições de temperatura do molde, temperatura de injeção e pressão

de injeção.

Da mesma forma como feito nas etapas anteriores (condições iniciais do molde), os parâmetros de injeção (temperatura e pressão) foram variados conforme temperaturas do molde (20, 30, 40 e 50 °C). Nas tabelas a seguir, menor massa média injetada foi destacada em verde, e a maior massa média injetada foi destacada em vermelho. Com o molde modificado operando a 20 °C, o processo de injeção apresentou uma melhora significativa quando comparado ao desempenho do molde sem as saídas de gases (Tabela 7). A Tabela 15 contém as médias com seus respectivos desvios padrão das massas injetadas com temperatura do molde em 20 °C em distintas condições de pressão e temperatura de injeção.

Tabela 15 – Valores médios das massas injetadas com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma **temperatura de molde de 20 °C**.

P_{inject} (MPa)	T_{inject} 190 °C		T_{inject} 200 °C		T_{inject} 210 °C		T_{inject} 220 °C		T_{inject} 230 °C		T_{inject} 240 °C	
	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)
5	24,79 ± 0,0226		53,95 ± 0,0117		71,56 ± 0,0124		83,73 ± 0,0253		83,05 ± 0,0321		67,23 ± 0,0186	
10	43,78 ± 0,0105		71,57 ± 0,0084		92,44 ± 0,0122		104,04 ± 0,0114		103,70 ± 0,0280		89,06 ± 0,0123	
15	61,74 ± 0,0057		89,02 ± 0,0097		112,33 ± 0,0082		125,20 ± 0,0106		124,35 ± 0,0123		108,95 ± 0,0082	
20	78,79 ± 0,0067		101,60 ± 0,0048		123,53 ± 0,0075		134,41 ± 0,0092		134,02 ± 0,0082		122,33 ± 0,0097	
25	90,53 ± 0,0062		113,54 ± 0,0067		131,36 ± 0,0056		138,21 ± 0,0082		138,26 ± 0,0069		130,16 ± 0,0066	
30	100,58 ± 0,0107		121,30 ± 0,0070		136,34 ± 0,0049		139,38 ± 0,0071		139,32 ± 0,0072		134,59 ± 0,0075	
35	108,55 ± 0,0108		129,45 ± 0,0071		138,75 ± 0,0067		140,28 ± 0,0067		139,93 ± 0,0058		136,90 ± 0,0071	
40	114,34 ± 0,0107		133,02 ± 0,0042		141,77 ± 0,0032		141,87 ± 0,0062		141,92 ± 0,0047		138,51 ± 0,0066	
45	116,54 ± 0,0063		135,46 ± 0,0035		141,95 ± 0,0058		141,77 ± 0,0071		141,97 ± 0,0038		139,43 ± 0,0058	
50	113,08 ± 0,0071		131,75 ± 0,0025		140,43 ± 0,0047		141,72 ± 0,0085		141,80 ± 0,0049		139,15 ± 0,0042	
55	103,50 ± 0,0082		122,52 ± 0,0018		136,97 ± 0,0063		140,12 ± 0,0058		139,78 ± 0,0062		136,16 ± 0,0038	
60	92,33 ± 0,0088		112,51 ± 0,0630		129,84 ± 0,0038		136,99 ± 0,0024		135,84 ± 0,0055		132,74 ± 0,0070	

Fonte: Primária, 2017.

Comparando os resultados das médias das massas injetadas no molde modificado, apresentadas na Tabela 16 (temperatura de molde de 30 °C), com a mesma situação apresentado na Tabela 8 (molde sem modificação), é possível perceber que ocorreu uma melhora significativa no aumento das massas injetadas.

Tabela 16 – Valores médios das massas injetadas com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma **temperatura de molde de 30 °C**.

P_{inject} (MPa)	T_{inject} 190 °C		T_{inject} 200 °C		T_{inject} 210 °C		T_{inject} 220 °C		T_{inject} 230 °C		T_{inject} 240 °C	
	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)
5	39,69 ± 0,0283		55,70 ± 0,0223		72,18 ± 0,0183		85,33 ± 0,0173		84,54 ± 0,0182		79,35 ± 0,0193	
10	61,31 ± 0,0182		74,31 ± 0,0192		89,22 ± 0,0153		100,77 ± 0,0148		100,34 ± 0,0213		95,65 ± 0,0202	
15	82,70 ± 0,0132		94,38 ± 0,0155		105,78 ± 0,0128		118,34 ± 0,0118		116,80 ± 0,0082		110,39 ± 0,0145	
20	100,07 ± 0,0112		109,71 ± 0,0182		119,05 ± 0,0082		129,25 ± 0,0093		128,07 ± 0,0063		122,26 ± 0,0123	
25	116,24 ± 0,0082		123,01 ± 0,0123		130,96 ± 0,0089		137,01 ± 0,0074		136,91 ± 0,0027		132,60 ± 0,0105	
30	128,77 ± 0,0067		134,06 ± 0,0105		138,76 ± 0,0078		141,72 ± 0,0068		140,35 ± 0,0018		137,78 ± 0,0088	
35	136,43 ± 0,0028		139,64 ± 0,0093		141,87 ± 0,0072		141,85 ± 0,0048		141,92 ± 0,0009		140,31 ± 0,0075	
40	138,74 ± 0,0012		141,90 ± 0,0082		141,92 ± 0,0063		141,99 ± 0,0038		141,99 ± 0,0012		141,95 ± 0,0074	
45	139,76 ± 0,0023		141,86 ± 0,0088		141,99 ± 0,0048		141,99 ± 0,0027		141,99 ± 0,0007		141,99 ± 0,0024	
50	137,78 ± 0,0032		139,73 ± 0,0073		141,80 ± 0,0032		141,99 ± 0,0042		141,94 ± 0,0002		140,61 ± 0,0056	
55	134,92 ± 0,0027		136,88 ± 0,0048		140,07 ± 0,0026		141,61 ± 0,0022		139,98 ± 0,0001		138,71 ± 0,0038	
60	129,91 ± 0,0014		131,59 ± 0,0046		135,60 ± 0,0027		138,78 ± 0,0018		136,96 ± 0,0012		133,76 ± 0,0065	

Fonte: Primária, 2017.

Estas melhoras foram percebidas inclusive na situação com menor eficiência de injeção (menor massa injetada destacada em verde).

Outras observações importantes que foram feitas com base nos resultados apresentados na Tabela 16, são as quedas nos desvios padrão com relação aos resultados apresentados na Tabela 8. Estes dados indicam que a presença das saídas de gases tornou o processo mais confiável e reproduzível. Apesar da melhora do processo, a operação do molde a uma temperatura de 30 °C não resultou no preenchimento total das cavidades do molde.

Elevando a temperatura do molde de 30 para 40 °C (Tabela 17), percebe-se que o processo foi capaz de preencher quase que totalmente as cavidades do molde em várias das condições operacionais testadas. Os valores destacados em vermelho na Tabela 17 mostram que foi possível injetar massas de polímeros com mais de 99,90% do valor estipulado no projeto da peça. Isto significa que de fato o aprisionamento de gases era o principal fator responsável pela ineficiência do processo.

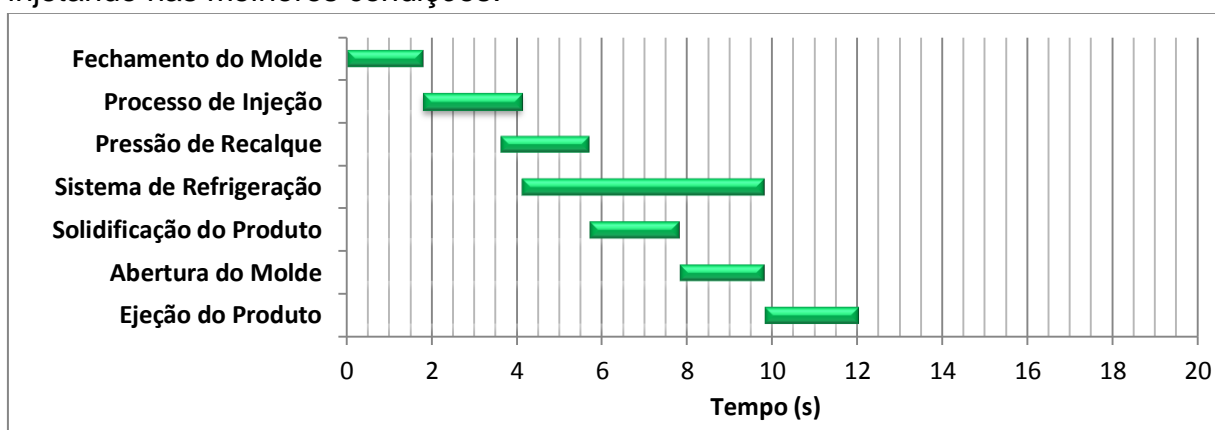
Tabela 17 – Valores médios das massas injetadas com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma **temperatura de molde de 40 °C**.

P_{inject} (MPa)	T_{inject} 190 °C		T_{inject} 200 °C		T_{inject} 210 °C		T_{inject} 220 °C		T_{inject} 230 °C		T_{inject} 240 °C	
	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)
5	64,84 ± 0,0112		86,24 ± 0,0098		111,94 ± 0,0113		123,62 ± 0,0125		120,64 ± 0,0092		99,60 ± 0,0134	
10	90,74 ± 0,0102		105,09 ± 0,0082		127,84 ± 0,0075		135,18 ± 0,0075		132,52 ± 0,0066		117,39 ± 0,0110	
15	107,59 ± 0,0093		118,67 ± 0,0063		138,73 ± 0,0045		143,43 ± 0,0058		142,22 ± 0,0024		129,41 ± 0,0102	
20	120,82 ± 0,0085		128,67 ± 0,0027		143,39 ± 0,0038		143,43 ± 0,0047		143,43 ± 0,0056		138,92 ± 0,0093	
25	131,21 ± 0,0072		137,61 ± 0,0036		143,43 ± 0,0022		143,43 ± 0,0029		143,43 ± 0,0048		143,43 ± 0,0071	
30	140,22 ± 0,0068		143,40 ± 0,0012		143,43 ± 0,0014		143,43 ± 0,0036		143,43 ± 0,0036		143,43 ± 0,0063	
35	143,38 ± 0,0042		143,43 ± 0,0009		143,43 ± 0,0009		143,43 ± 0,0010		143,43 ± 0,0024		143,43 ± 0,0058	
40	143,43 ± 0,0038		143,43 ± 0,0006		143,43 ± 0,0009		143,43 ± 0,0004		143,43 ± 0,0016		143,43 ± 0,0047	
45	143,43 ± 0,0022		143,43 ± 0,0002		143,43 ± 0,0007		143,43 ± 0,0003		143,43 ± 0,0014		143,43 ± 0,0033	
50	143,35 ± 0,0045		143,43 ± 0,0019		143,43 ± 0,0006		143,43 ± 0,0004		143,43 ± 0,0009		143,43 ± 0,0012	
55	141,05 ± 0,0016		143,41 ± 0,0008		143,43 ± 0,0009		143,43 ± 0,0004		143,43 ± 0,0010		142,19 ± 0,0009	
60	137,87 ± 0,0028		140,77 ± 0,0009		143,43 ± 0,0010		143,43 ± 0,0008		143,41 ± 0,0008		138,97 ± 0,0007	

Fonte: Primária, 2017.

Com a presença das saídas de gases, à medida que a frente de fluxo de polímero fundido avança molde adentro, os gases são expelidos pelos rebaixos usinados, o que reduz a pressão interna do molde e contribui para que o material preencha totalmente o molde. Outro fator relevante dos parâmetros sublinhados em vermelho da Tabela 17, é que o tempo do ciclo de injeção reduziu para aproximadamente 12 segundos, conforme demonstra a Figura 38.

Figura 38 – Período das etapas de injeção do molde do copo com saídas de gases, injetando nas melhores condições.



Fonte: Primária, 2017.

Embora o tempo de injeção tenha diminuído bastante por não ter mais os gases aprisionados atrapalhando o escoamento do polímero quente, a redução mais

significativa de tempo por etapa foi no sistema de refrigeração, demonstrando que o molde solidifica mais rapidamente que anteriormente sem as saídas de gases. O resultado deste ciclo reduzido e desta alta eficiência de injeção é uma peça acaba sem marcas de bolhas e frisos e boa para ser comercializada, como demonstra a Figura 39.

Figura 39 – Produto de boa qualidade para comercialização.



Fonte: Primária, 2017

Por fim, na Tabela 18 são apresentadas as médias com seus respectivos desvios padrão das massas das amostras injetadas em diferentes pressões e temperaturas de injeção, com o molde operando a 50 °C.

Tabela 18 – Valores médios das massas injetadas com seus respectivos desvios padrão, injetadas variando a pressão e temperatura de injeção, e utilizando uma **temperatura de molde de 50 °C**.

P_{inject} (MPa)	T_{inject} 190 °C		T_{inject} 200 °C		T_{inject} 210 °C		T_{inject} 220 °C		T_{inject} 230 °C		T_{inject} 240 °C	
	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)	M (g)	σ (g)
5	47,51 ± 0,0263		68,87 ± 0,0275		89,93 ± 0,0396		102,10 ± 0,0220		94,95 ± 0,0125		87,80 ± 0,0263	
10	67,66 ± 0,0182		89,16 ± 0,0302		106,85 ± 0,0255		118,46 ± 0,0187		113,24 ± 0,0098		109,89 ± 0,0170	
15	87,81 ± 0,0152		107,12 ± 0,0202		120,82 ± 0,0182		129,92 ± 0,0112		125,25 ± 0,0076		124,01 ± 0,0124	
20	104,94 ± 0,0142		121,22 ± 0,0182		132,60 ± 0,0122		137,14 ± 0,0082		134,46 ± 0,0048		133,86 ± 0,0099	
25	121,08 ± 0,0166		133,41 ± 0,0093		140,67 ± 0,0094		142,39 ± 0,0066		138,59 ± 0,0030		138,03 ± 0,0103	
30	132,46 ± 0,0104		139,60 ± 0,0048		142,84 ± 0,0075		142,94 ± 0,0028		141,75 ± 0,0016		140,49 ± 0,0074	
35	138,64 ± 0,0093		142,69 ± 0,0065		142,94 ± 0,0075		142,94 ± 0,0012		142,94 ± 0,0011		142,35 ± 0,0052	
40	142,88 ± 0,0082		142,94 ± 0,0035		142,94 ± 0,0048		142,94 ± 0,0011		142,94 ± 0,0007		142,94 ± 0,0048	
45	142,94 ± 0,0045		142,94 ± 0,0033		142,94 ± 0,0036		142,94 ± 0,0006		142,94 ± 0,0004		142,94 ± 0,0019	
50	142,00 ± 0,0065		142,94 ± 0,0062		142,94 ± 0,0044		142,94 ± 0,0002		142,94 ± 0,0001		142,94 ± 0,0009	
55	140,23 ± 0,0066		141,53 ± 0,0072		142,94 ± 0,0026		142,94 ± 0,0004		142,94 ± 0,0002		141,24 ± 0,0010	
60	135,41 ± 0,0038		138,05 ± 0,0028		141,91 ± 0,0018		142,85 ± 0,0005		142,62 ± 0,0007		137,23 ± 0,0007	

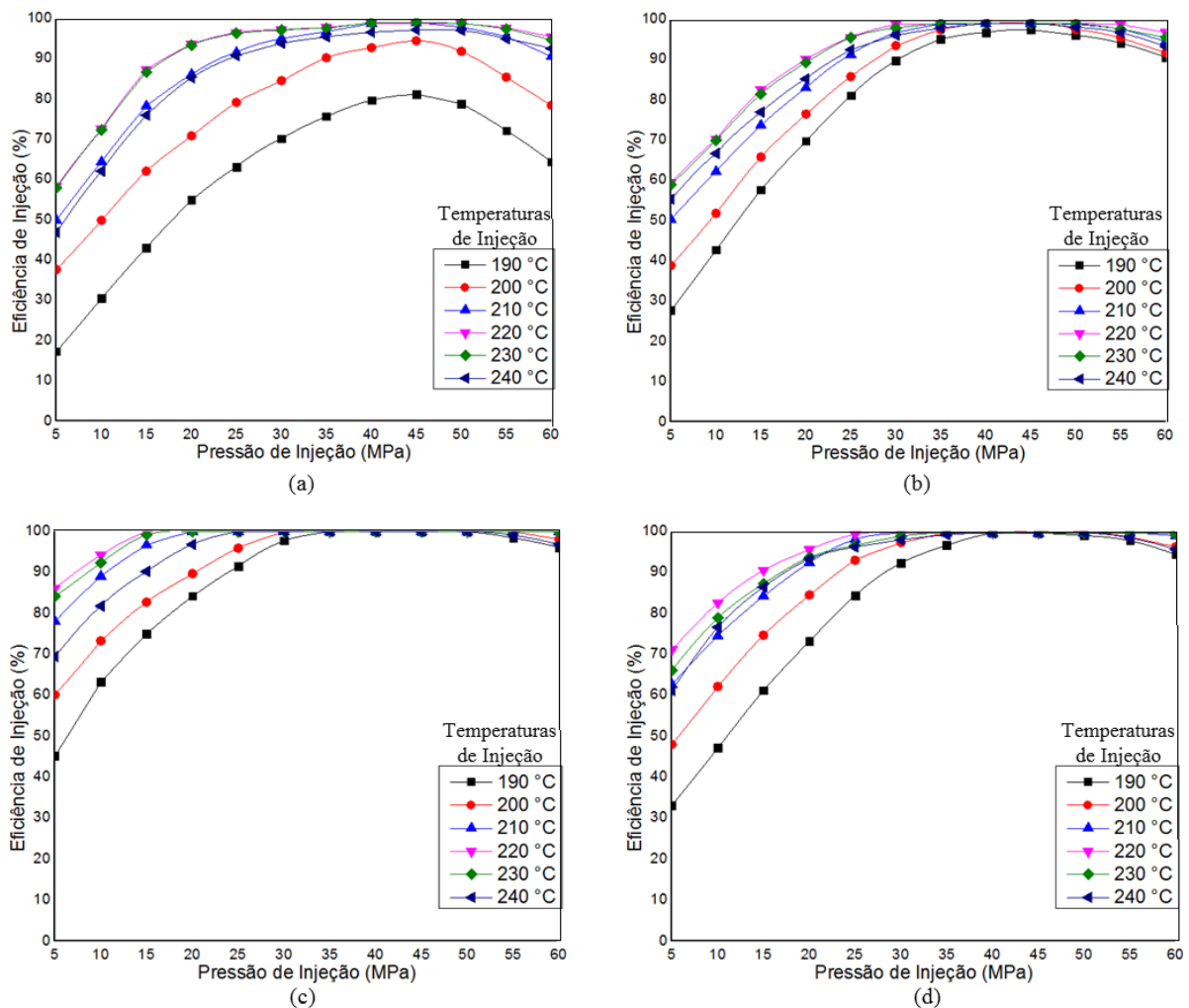
Fonte: Primária, 2017.

Neste último conjunto de experimentos, nota-se que mesmo sofrendo uma

queda de rendimento, comparando-se estes valores com os da Tabela 17, foi possível injetar quantidades de polímero muito próximas às determinadas em projeto em várias condições operacionais. Mesmo não sendo esta a melhor temperatura de molde para processamento, é possível valorizar a ferramenta de simulação, que revelou que gases estavam sendo aprisionados nas extremidades do copo, e impedindo o adequado escoamento do GPPS para o interior do molde.

Na Figura 40 são apresentados os gráficos que mostram a variação da eficiência da injeção em função da temperatura e pressão de injeção para as distintas temperaturas de molde testadas (20, 30, 40 e 50 °C).

Figura 40 - Eficiências de injeção variando as pressões e temperaturas de injeção, considerando o molde modificado. a) temperatura do molde de 20 °C, b) temperatura do molde de 30 °C, c) temperatura do molde de 40 °C, d) temperatura do molde de 50 °C.



Fonte: Primária, 2017.

A partir dos resultados apresentados na Figura 40.a, percebe-se que nas

situações nas quais a temperatura de injeção foi de 190 e 220 °C, as eficiências da injeção foram baixas, mesmo quando pressões de injeção mais elevadas foram usadas. Entretanto, o aumento da temperatura de injeção para 220 e 230 °C melhorou significativamente o preenchimento do molde, principalmente na faixa de pressão entre 40 e 50 MPa.

Mesmo com uma melhora de eficiência, comparando os resultados do molde com saídas de gases com os resultados do molde sem saídas de gases (Figura 31.a), percebe-se que ainda não foi possível preencher totalmente as cavidades do molde (eficiência menor que 100%) quando este foi operado com temperatura de 20 °C. Como as alterações do molde visaram proporcionar o escape dos gases que antes ficavam aprisionados no molde, a ineficiência de injeção verificada nas condições em que a temperatura do molde foi mantida a 20 °C, deve estar relacionada a formação de uma camada congelada mais espessa em regiões mais próximas à região do bico de injeção.

A formação desta camada precocemente no interior da cavidade do molde estreita a passagem pela qual o polímero deve fluir, dificultando o preenchimento do molde no tempo ciclo estipulado (~ 12 segundos). Nestas situações de operação, a geração de tensões residuais na massa polimérica dificulta ainda mais o preenchimento do molde, principalmente em altas pressões de injeção.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 40.b é possível notar que em baixas pressões de processamento (abaixo de 30 MPa), as eficiências de injeção ficam abaixo do esperado, mesmo com o aumento das eficiências de injeção em relação ao molde sem as saídas de gases (Figura 31.b). Isso ratifica que baixas pressões não são capazes de fornecer as tensões necessárias para o preenchimento total das cavidades.

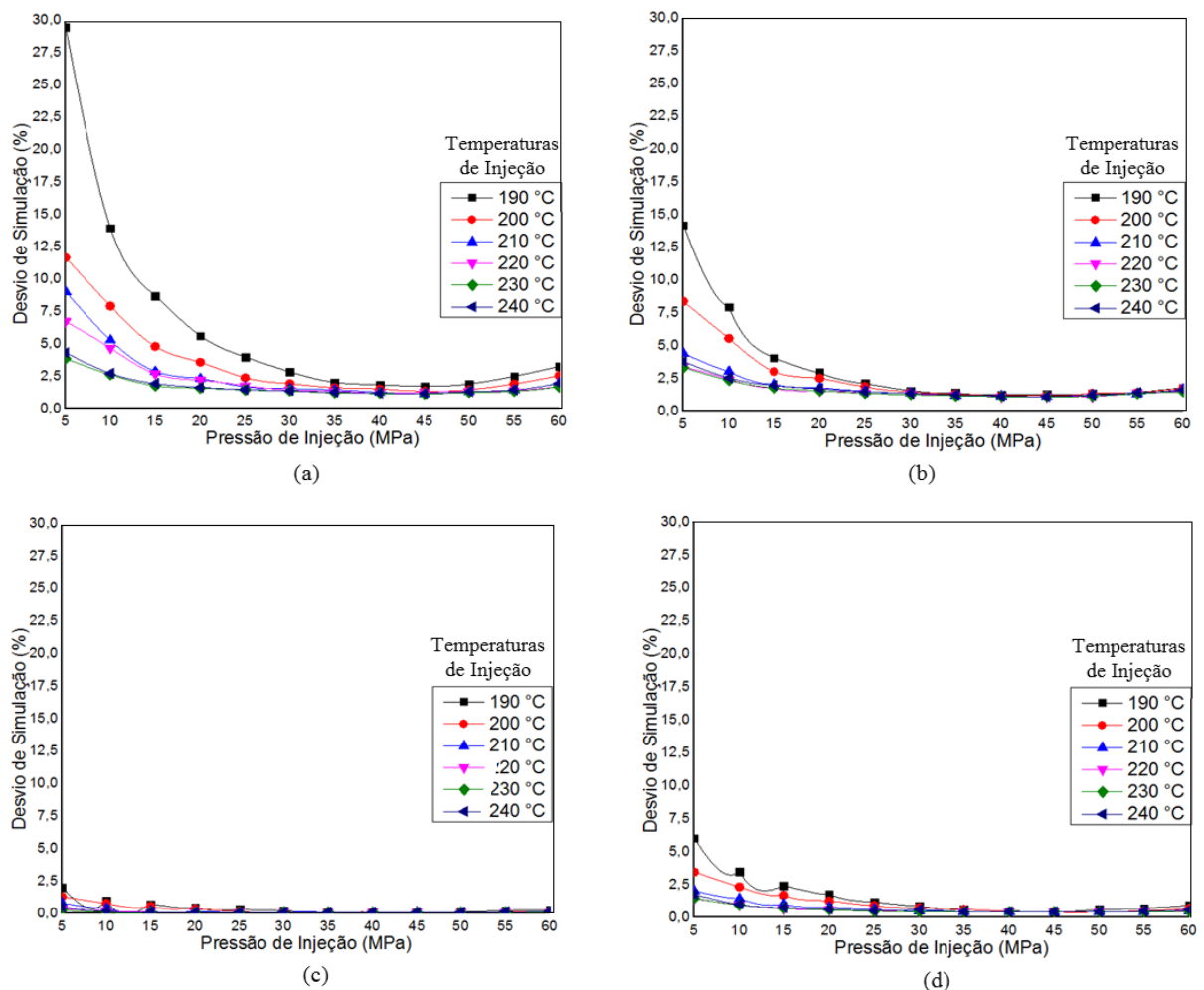
A partir desta Figura 40.c, percebe-se claramente que na faixa de pressões de injeção de 30 a 50 MPa foi possível preencher totalmente o molde com polímero fundido, independentemente da temperatura de injeção. Como resultado, peças injetadas com boa qualidade foram produzidas nestas condições operacionais.

A Figura 40.d demonstra que novamente houve uma queda de rendimento das eficiências mássicas de injeção. Isso demonstra que com o aumento da temperatura da parede do molde em contato com o polímero acarreta em tensões residuais capazes de atrapalhar a frente de fluxo na fase inicial de preenchimento, o

que prejudica a passagem do polímero entre as cavidades.

Da mesma forma como feito nas etapas anteriores (condições iniciais do molde), os parâmetros de injeção (temperatura e pressão) foram variados mantendo-se constante a temperatura do molde em 20, 30, 40 e 50 °C para avaliar os desvios das simulações. Na Figura 41 são apresentados os comportamentos dos desvios das simulações em função dos parâmetros de processamento (temperatura e pressão de injeção). Entretanto, devido a queda brusca dos desvios de simulação com o molde modificado em relação aos desvios de simulação nas situações sem as saídas de gases, a escala percentual dos desvios de simulação foram reduzidas de 0 – 100% para 0 – 30% com o intuito de melhorar a visualização dos resultados.

Figura 41 - Desvios das simulações variando as pressões e temperaturas de injeção considerando o molde modificado. a) temperatura do molde de 20 °C, b) temperatura do molde de 30 °C, c) temperatura do molde de 40 °C, d) temperatura do molde de 50 °C.



Fonte: Primária, 2017.

Como se pode observar na Figura 41.a, o modelo apresentou uma capacidade limitada em prever o comportamento do processo quando baixas pressões de injeção foram usadas (abaixo de 25 MPa), principalmente na condição cuja temperatura de injeção foi de 190 °C. Para pressões de injeção entre 25 e 55 MPa o modelo apresentou uma boa capacidade de previsão do comportamento do processo, porém ainda superestimando as massas injetadas com um erro de aproximadamente 2%. Nota-se que quando a temperatura de injeção foi de 220 e 230 °C, o modelo gerou resultados para a massa injetada com maior precisão em todas as condições de pressão de injeção testadas.

Na Figura 41.b, o modelo matemático simulado no *Solid Works Plastics* apresentou boa capacidade de previsão para as temperaturas de injeção entre 210 e 240 °C, porém apenas acima da pressão de 15 MPa. Assim como no caso da temperatura de molde de 20 °C, o modelo não conseguiu reproduzir com confiabilidade as massas injetadas a baixas pressões e temperaturas de injeção. Nas condições operacionais testadas com pressão de injeção acima de 25 MPa, o modelo, apesar de superestimar as massas injetadas, apresentou um erro de previsão de aproximadamente 2%.

De acordo com a Figura 41.c, nota-se claramente que o modelo matemático gerou resultados para as massas injetadas com boa precisão, apresentados erros de previsão inferiores a 1% para todas as condições operacionais testadas acima de 10 MPa. Mesmo nas situações de pressões de injeção inferiores a 10 MPa e temperaturas de injeção de 190 e 200 °C, o modelo ainda apresentou uma capacidade relativamente boa de simular o processo de injeção dos copos no molde contendo as saídas de gases.

Como se pode observar na Figura 41.d, nas condições operacionais que utilizaram uma temperatura de molde de 50 °C, o modelo perdeu um pouco a capacidade de previsão das massas injetadas com relação aos dados simulados na condição de temperatura de molde de 40 °C. Além disso, nas temperaturas de injeção de 190 e 200 °C, o modelo não conseguiu reproduzir com precisão o comportamento do processo de injeção em pressões inferiores a 25 MPa. Contudo, para temperaturas de injeção a partir de 210 °C, o modelo reproduziu o processo real com boa precisão, independentemente da pressão de injeção, apresentando erros de previsão inferiores a 1% para pressões de injeção de 20 MPa.

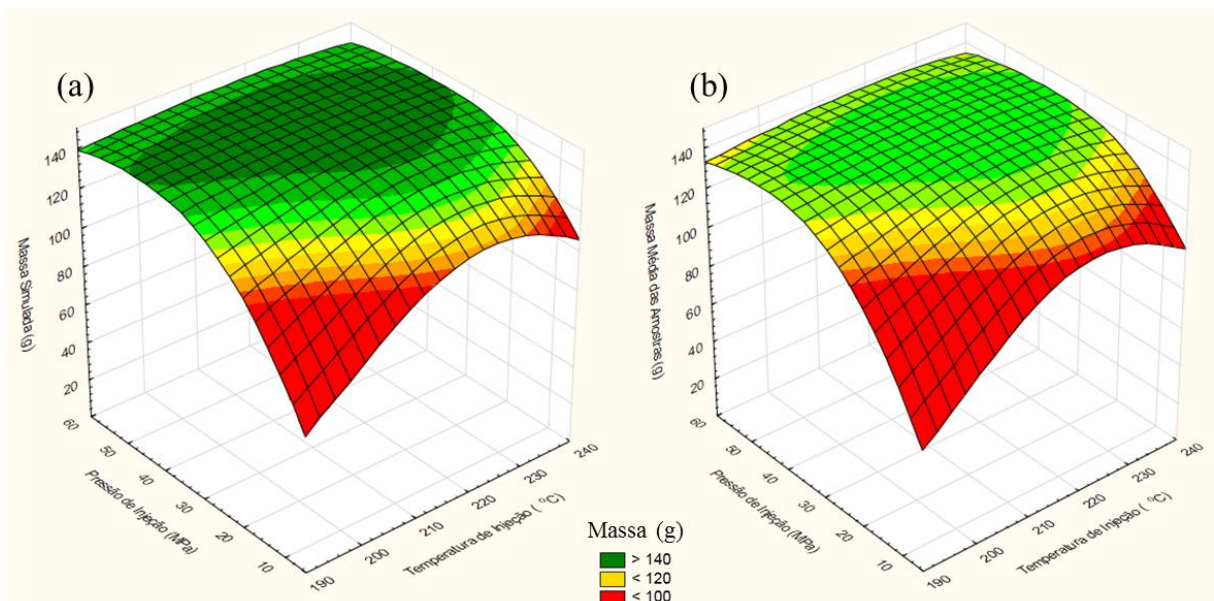
5.5 Considerações finais sobre o modelo matemático usado nas simulações

Neste item, serão realizadas as considerações finais dos resultados e sobre a capacidade de predição do modelo matemático simulado no *Solid works Plastics* e, conseqüentemente, a confiabilidade dos resultados gerados nas simulações. Para isso, dois conjuntos de experimentos foram selecionados, sendo um deles o que apresentou a melhor eficiência de injeção na situação **sem** as saídas de gases, e o que apresentou a melhor eficiência de injeção **com** as saídas de gases, ambos obtidos com a temperatura do molde de 40 °C.

De forma a incrementar a análise de validação do modelo matemático usado, os resultados das massas simuladas foram comparados com aquelas referentes às médias das massas injetadas utilizando-se superfícies de resposta em 2 e 3 dimensões.

Na Figura 42 é apresentado, na forma de um gráfico em três dimensões (3D), o comportamento das massas simuladas e o comportamento das médias das massas das amostras de injeção, em função das pressões de injeção e temperatura de injeção, na situação em que o molde não continha as saídas de gases e sua temperatura de operação foi de 40 °C.

Figura 42 - Gráficos 3D dos perfis de preenchimento mássico das cavidades do molde em função da pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 40 °C e com o molde sem as alterações realizadas: a) Massas simuladas, b) médias das massas de amostras de injeção.

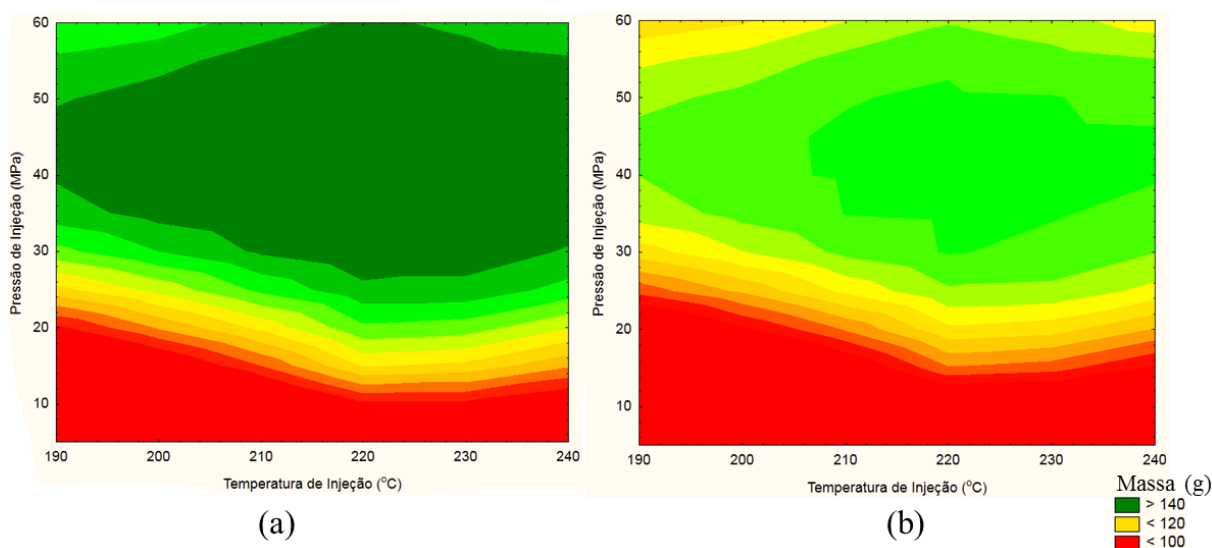


Fonte: Primária, 2017.

Este modelo de gráfico em 3D permite avaliar, de forma qualitativa, o comportamento do preenchimento mássico nas cavidades do molde do copo em função dos parâmetros de injeção.

Embora os perfis mássicos obtidos experimentalmente e por simulação sejam semelhantes, nota-se que a superfície de resposta gerada com os dados simulados encontra-se deslocada para cima, quando comparada com os resultados experimentais. Esta divergência entre os resultados pode ser consequência da incapacidade do modelo em simular com precisão o comportamento do molde sem as saídas de gases, em condições operacionais de ineficiência do processo. Nestes casos, verificou-se que o modelo superestima as massas injetadas. No caso específico mostrado na Figura 42, percebe-se que o modelo indica uma região na cor verde escura que representa uma situação preenchimento quase total do molde, mas na prática isso não foi verificado. Os mesmos resultados apresentados na Figura 42, são mostrados na Figura 43 na forma de um gráfico em duas dimensões (2D) que permitem realizar uma análise quantitativa do processo, na qual se pode identificar com certa facilidade a faixa de valores da pressão e temperatura de injeção ideais para se obter a máxima eficiência de injeção para temperaturas específicas de operação do molde.

Figura 43 - Gráficos 2D dos perfis de preenchimento mássico das cavidades do molde em função da pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 40 °C e com o molde sem as alterações realizadas: a) Massas simuladas, b) médias das massas de amostras de injeção.

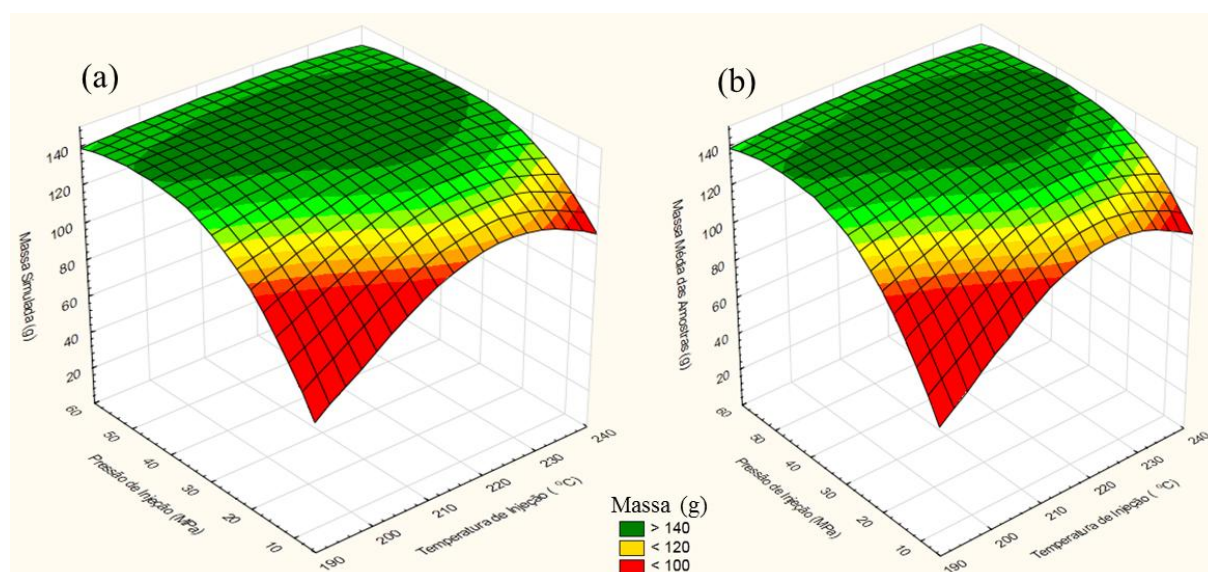


Fonte: Primária, 2017.

A partir dos resultados contidos na Figura 43, percebe-se claramente o problema de superestimativa das massas injetadas que o modelo apresentou ao simular o molde sem as saídas de gases, operando a 40 °C. Apesar dos resultados com o molde sem as saídas de gases operando a 20, 30 e 50 °C não serem apresentados nesta seção, foi mostrado anteriormente que o modelo apresentou o mesmo tipo de problema ao superestimar as massas injetadas nestas condições. Este comportamento do modelo revelou que a ferramenta *Solid Works Plastics*, apesar de indicar a ocorrência de problemas de aprisionamento de gases nas situações de baixa eficiência de injeção é limitada, e o modelo não conseguiu gerar resultados com confiabilidade quando situações de baixa eficiência do processo foram simuladas.

O segundo caso utilizado para se avaliar a capacidade de predição do modelo, bem como a confiabilidade dos resultados gerados, foi aquele que apresentou a melhor eficiência de injeção considerando o molde modificado (com as saídas de gases). Nesta situação, o molde foi operado com temperatura do molde em 40 °C. Na Figura 44 é apresentado o comportamento das massas simuladas e das médias das massas das amostras injetadas em função da pressão e temperatura de injeção.

Figura 44 - Gráficos 3D dos perfis de preenchimento mássico das cavidades do molde em função da pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 40 °C e com o molde com as alterações realizadas: a) Massas simuladas, b) médias das massas de amostras de injeção.

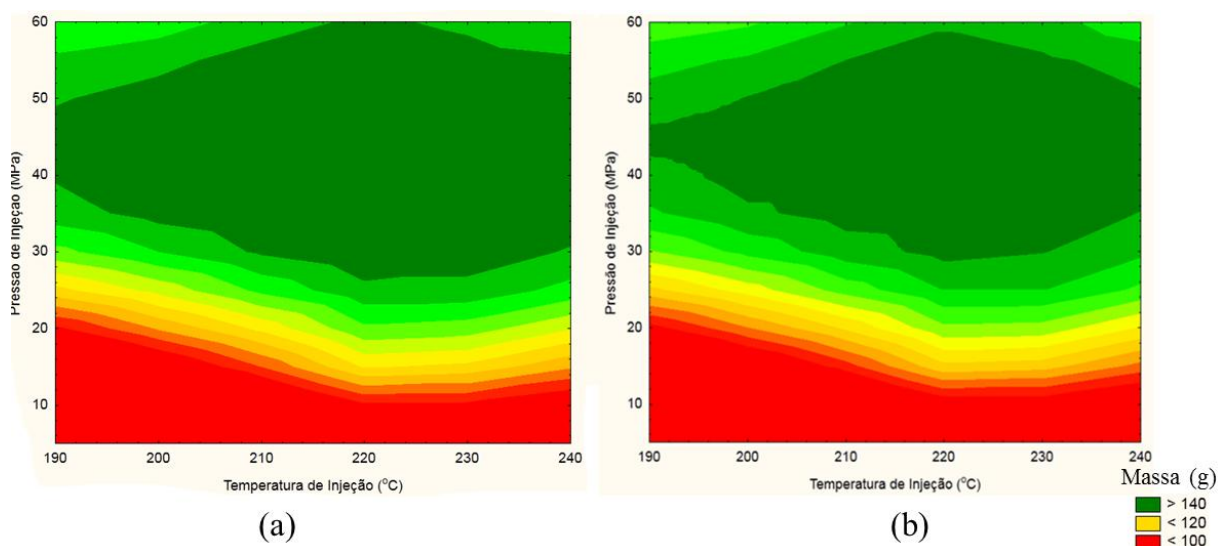


Fonte: Primária, 2017.

A partir dos resultados mostrados na Figura 44, nota-se que os gráficos apresentaram um comportamento bem semelhante, indicando, do ponto de vista qualitativo, que o modelo matemático do *Solid Works Plastics* apresentou boa capacidade de prever a massa injetada em diversas situações de pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 40°C.

Estes mesmos resultados foram plotados em duas dimensões (2D), e a partir dos dados apresentados na Figura 45, percebe-se, agora do ponto de vista quantitativo, a boa capacidade de predição do modelo, inclusive no sentido de fornecer com certa precisão a faixa de valores de pressão e temperatura de injeção na qual o molde com as saídas de gases deve ser operado para que se obtenha a melhor eficiência de injeção. Conforme os resultados já apresentados, o modelo matemático utilizado pelo *Solid Works Plastics* demonstrou ter a capacidade de simular com boa precisão o processo de injeção dos copos de GPPS no molde modificado (contendo as saídas de gases), salvo nas situações específicas de pressões e temperaturas de injeção muito baixas e muito altas nas condições de baixas temperaturas do molde.

Figura 45 - Gráficos 2D dos perfis de preenchimento mássico das cavidades do molde em função da pressão e temperatura de injeção, considerando a temperatura do molde de 40 °C e com o molde com as alterações realizadas: a) Massas simuladas, b) médias das massas de amostras de injeção.



Fonte: Primária, 2017.

Apesar dos resultados apresentados na Figura 45 revelarem que o modelo continua superestimando as massas injetadas, os erros são bem menores do que

nas situações com o molde sem as saídas de gases. Desta forma, pode-se afirmar que o modelo usado pelo *software* é confiável no sentido de predizer o comportamento do processo de injeção estudado no presente trabalho, podendo ser utilizado como uma ferramenta para análise virtual de desempenho do processo em distintas condições de operação, e também em outras situações de modificações de molde que se fizerem necessárias.

Além disso, os resultados simulados auxiliaram na identificação e comprovação de que o problema de ineficiência de injeção era causado pelo aprisionamento de gases, que foi solucionado ao se executarem as modificações do molde, usinando canais para a saída destes gases concomitantemente ao avanço da frente de fluxo polimérico.

Com a execução do gráfico 2D das melhores condições de processamento depois das modificações realizadas (Figura 45), é possível mapear todas as condições em que pode-se obter produtos com boa eficiência. Este tipo de gráfico irá servir para auxiliar o processamento do copo, podendo ainda dar informações necessárias para os cálculos de consumo de energia da máquina injetora.

5.6 Planejamento experimental

Para se conhecer a influência dos parâmetros de processamento utilizados no trabalho foi realizado um planejamento fatorial 3^3 de acordo com a Tabela 4. A representação destas variáveis foram organizadas da seguinte forma:

- A → pressão de injeção – Variável independente;
- B → temperatura de injeção – Variável independente;
- C → temperatura do molde – Variável independente;
- Y → Média de massa injetada – Variável dependente.

A matriz de experimentos do planejamento fatorial pode ser observada na Tabela 19.

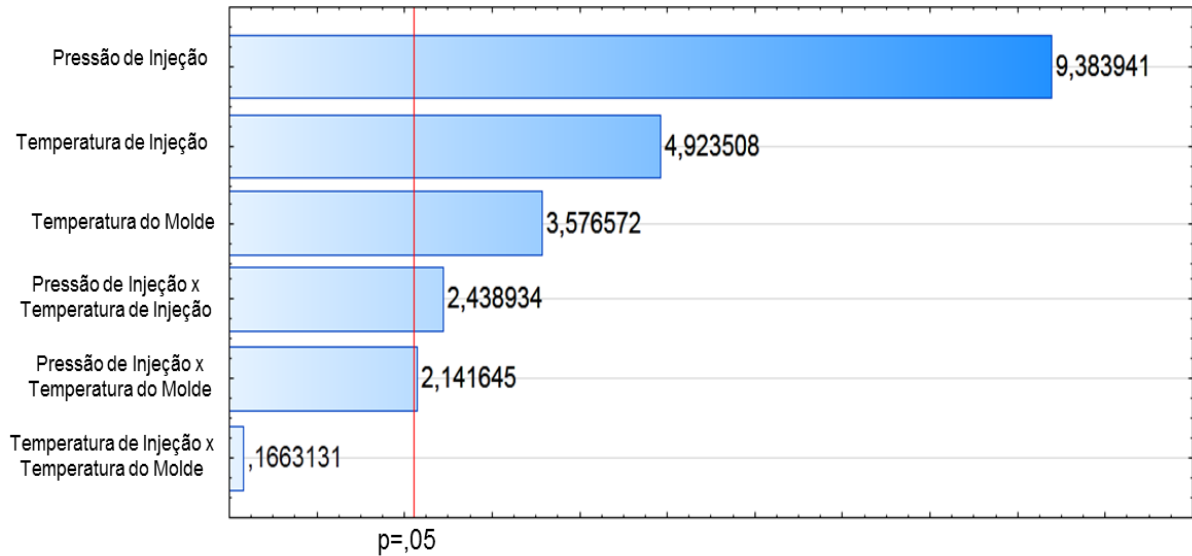
Tabela 19 – Resultados das médias das amostras de injeção e seus desvios padrões no planejamento fatorial 3^3 , com as variáveis independentes codificadas e reais.

Experimento	Variáveis						Dependente	
	Independentes							
Nº	A (cod)	A (MPa)	B (cod)	B (°C)	C (cod)	C (°C)	Y (g)	σ
1	-1	5	-1	190	-1	20	24,79	± 0,0026
2	0	32,5	-1	190	-1	20	104,56	± 0,0107
3	1	60	-1	190	-1	20	92,33	± 0,0088
4	-1	5	0	215	-1	20	77,65	± 0,0189
5	0	32,5	0	215	-1	20	138,69	± 0,0067
6	1	60	0	215	-1	20	133,42	± 0,0038
7	-1	5	1	240	-1	20	67,23	± 0,0186
8	0	32,5	1	240	-1	20	135,75	± 0,0075
9	1	60	1	240	-1	20	132,74	± 0,0069
10	-1	5	-1	190	0	35	52,27	± 0,0112
11	0	32,5	-1	190	0	35	137,2	± 0,0068
12	1	60	-1	190	0	35	133,89	± 0,0028
13	-1	5	0	215	0	35	98,27	± 0,0123
14	0	32,5	0	215	0	35	142,24	± 0,0009
15	1	60	0	215	0	35	140,31	± 0,0011
16	-1	5	1	240	0	35	89,48	± 0,0134
17	0	32,5	1	240	0	35	141,23	± 0,0062
18	1	60	1	240	0	35	136,37	± 0,0007
19	-1	5	-1	190	1	50	47,51	± 0,0263
20	0	32,5	-1	190	1	50	135,55	± 0,0104
21	1	60	-1	190	1	50	135,41	± 0,0038
22	-1	5	0	215	1	50	96,02	± 0,0396
23	0	32,5	0	215	1	50	142,92	± 0,0075
24	1	60	0	215	1	50	142,38	± 0,0018
25	-1	5	1	240	1	50	87,8	± 0,0263
26	0	32,5	1	240	1	50	141,42	± 0,0053
27	1	60	1	240	1	50	137,23	± 0,0007

Fonte: Primária, 2017.

Plotando estes dados no *software Statistica*, foi extraído um diagrama de Pareto (Figura 46) para conhecer os efeitos principais e de interação das variáveis independentes, tendo como resposta à média das massas de injeção para um modelo quadrático, considerando as interações entre as variáveis com um limite de confiança de 95%.

Figura 46 – Diagrama de Pareto do planejamento fatorial 3^3 com um nível mínimo de 95% de confiança.

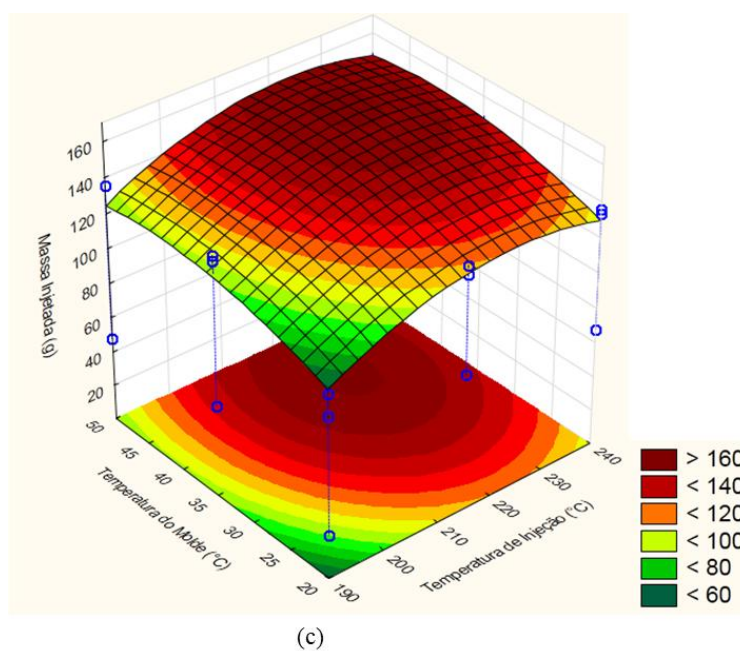
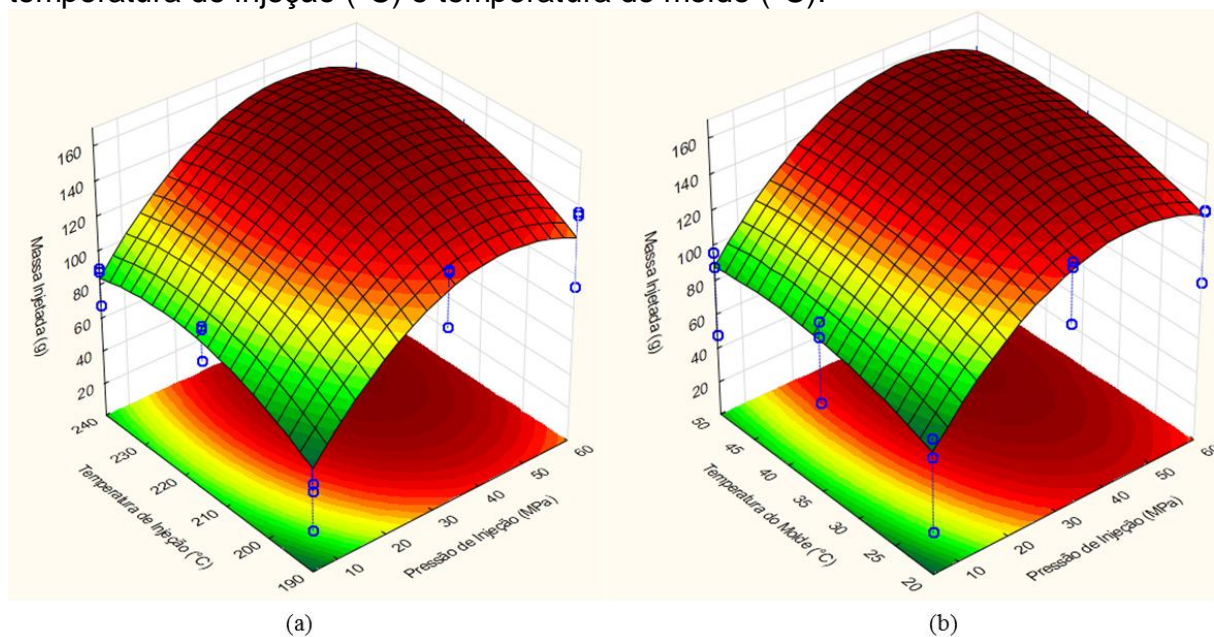


Fonte: Primária, 2017.

Conforme mostra o gráfico de Pareto, os efeitos foram estatisticamente significativos sobre a variável resposta, média das massas injetadas. Porém, a variável que apresentou maior significância no processo de injeção foi a pressão de injeção, seguida da temperatura de injeção e por último a temperatura do molde.

Outros dois fatores que tiveram efeitos significativos foram às interações entre a pressão de injeção e a temperatura de injeção, e pressão de injeção com a temperatura do molde. A temperatura de injeção com a temperatura do molde foi à interação que obteve menos significância. Para exemplificar melhor estes efeitos, as interações podem ser melhor observadas na Figura 47.

Figura 47 - Superfície de resposta da interação das variáveis independentes na eficiência mássica de injeção. a) pressão de injeção (MPa) e temperatura de injeção ($^{\circ}\text{C}$), b) pressão de injeção (MPa) e temperatura do molde ($^{\circ}\text{C}$), temperatura de injeção ($^{\circ}\text{C}$) e temperatura do molde ($^{\circ}\text{C}$).



Fonte: Primária, 2017.

Analisando a Figura 47, é possível notar as combinações entre pressão de injeção x temperatura (Figura 47.a) de injeção possui maior significância. Isto se deve ao fato que em valores menores de pressão e temperatura, o rendimento mássico sofre brusca queda obtendo massas menores que 60 g. O mesmo acontece quando é combinada pressão de injeção com temperatura do molde (Figura 47.b),

em baixas pressões de injeção e baixa temperatura de molde, as massas de injeção encontram-se baixas, demonstrando certa instabilidade do processo e extrema dependência da pressão de injeção. Contudo, quando são combinadas temperatura de molde com temperatura de injeção (Figura 47.c) existe uma certa estabilidade das massas tendendo a ficar próximas de 100% de eficiência. Isto demonstra que a combinação entre temperatura de injeção e de molde não altera significativamente as eficiências de injeção do GPPS.

5.7 Otimização energética de processamento

Para realizar os cálculos do consumo de energia antes das saídas de gases, consideram-se os parâmetros que foram abordados no capítulo de problemática do trabalho. Estes valores específicos podem ser observados na Tabela 20.

Tabela 20 – Valores utilizados nos cálculos de custo de injeção para o molde sem alterações.

Parâmetros de Processamento	Valores	Unidades
Pressão de Injeção	40	MPa
Temperatura de Injeção	220	°C
Temperatura do Molde	40	°C
Pressão de Recalque	45	%
Velocidade de Injeção	80	cm ³ /s
Densidade	1,078	kg/m ³
Calor Específico	2100	J/kg.K
Custo da Energia	0,520142	kWh
Ciclo de Injeção	19	s
Custo da matéria Prima (GPPS)	15	R\$/kg

Fonte: Primária, 2017.

Aplicando os dados da Tabela 20 na Equação 26 obteve-se o consumo exigido pela bomba fixa:

$$E_{bf} = 40.000.000 \cdot 0,00008 = \mathbf{3200 \text{ W}}$$

O motor elétrico é responsável pelo aquecimento das resistências térmicas. As diferenças de temperatura ($T - T_0 = \Delta T$) foram calculadas de acordo com os

valores de temperatura retiradas das resistências elétricas e aplicadas na equação 26 para calcular o consumo de energia de cada zona térmica:

$$ZT = \dot{V} \cdot \rho \cdot cp \cdot \Delta T$$

$$ZT_1 = 0,00008 \cdot 1078 \cdot 2100 \cdot (240 - 238) = 362,208 \text{ W}$$

$$ZT_2 = 0,00008 \cdot 1078 \cdot 2100 \cdot (240 - 235) = 905,52 \text{ W}$$

$$ZT_3 = 0,00008 \cdot 1078 \cdot 2100 \cdot (235 - 229) = 1.086,62 \text{ W}$$

$$ZT_4 = 0,00008 \cdot 1078 \cdot 2100 \cdot (229 - 225) = 724,42 \text{ W}$$

$$ZT_5 = 0,00008 \cdot 1078 \cdot 2100 \cdot (225 - 220) = 905,52 \text{ W}$$

$$E_{me} = \sum ZT = 92.933,51 + 905,52 + 1.086,62 + 724,42 + 905,52 = \mathbf{3.984,288 \text{ W}}$$

Logo o consumo de energia por injeção é dado como:

$$E_{inject} = \frac{3200 + 3.984,288}{1000} = \mathbf{7,184 \text{ KW}}$$

Para calcular custo da matéria prima, aplicou-se o valor do GPPS da Tabela 19 na Equação 28:

$$\$MP = 0,07175 \cdot 15 = \mathbf{1,07625 \text{ R\$}}$$

De acordo com Back (2011), obtendo estes valores é possível então calcular o custo de cada ciclo de injeção:

$$\$I = \left(\frac{7,184 \cdot 0,520142 \cdot 19 \cdot 2}{3600} \right) + 1,07625 = \mathbf{1,1157 \text{ R\$}}$$

Isso implica que a cada ciclo de injeção, a empresa gasta R\$ 1,1157, sem levar em consideração a mão de obra e outras taxas oriundas de impostos.

Após a realização das saídas de gases no molde de injeção, percebeu-se por meio dos cálculos que os parâmetros de processo de injeção que consomem menos energia possível eram a pressão de injeção 40 MPa, temperatura de injeção de 190 °C, e temperatura do molde de 40 °C. Estes parâmetros não só resultam em menor consumo de energia para produzir peças boas, como também levam a um menor ciclo de injeção (12 segundos).

Para calcular novamente o consumo de energia, devem-se considerar os parâmetros que foram abordados estes parâmetros novamente:

$$E_{bf} = 40.000.000 \cdot 0,00008 = \mathbf{3200 \text{ W}}$$

Já o motor elétrico é obtive valores modificados de temperatura, logo tem-se:

$$E_{me} = \sum ZT = 181,104 + 362,208 + 362,208 + 362,208 + 362,208 = \mathbf{905,52 W}$$

Logo o consumo de energia por injeção é dado como:

$$E_{inject} = \frac{3200 + 905,52}{1000} = \mathbf{4,105 KW}$$

$$\$I = \left(\frac{4,105 \cdot 0,520142 \cdot 12 \cdot 2}{3600} \right) + 1,07625 = \mathbf{1,0904 R\$}$$

O que significa que as saídas de gases proporcionaram uma redução de R\$ 0,020 em cada ciclo de injeção. Considerando que com o molde modificado o ciclo de injeção diminuiu para 12 segundos, e que o valor de comercial de cada copo é vendido por R\$ 2,50. Nas Tabelas 21 e 22 podem ser comparadas as diferentes perdas e ganhos do molde do copo antes e após as alterações realizadas.

Tabela 21 – Comparação dos indicadores de processo antes e após as alterações realizadas.

Período	Refugo (kg)		Produto Comercializável (nº de peças)	
	Antes	Atualmente	Antes	Atualmente
1 Ciclo	2	0	0,35	2
1 hora	35,363	0,574	133	600
1 dia	565,816	9,188	2.122	9.600
1 mês	12.447,97	202,146	46.687	211.200
1 Ano	149.375,67	2.425,758	560.236	2.534.400

Fonte: Primária, 2017.

Tabela 22 – Comparação dos custos de processamento e receita gerada antes e após as alterações realizadas.

Período	Custo de Processamento (R\$)		Receita Gerada (R\$)	
	Antes	Atualmente	Antes	Atualmente
1 Ciclo	1,1157	1,0904	-0,2407	3,9096
1 hora	3,73	2,13	328,77	1.497,87
1 dia	59,78	34,16	5.245,22	23.965,84
1 mês	1.315,32	751,58	8.411,92	527.248,42
1 Ano	15.783,82	9.019,02	100.923,02	6.245.880,98

Fonte: Primária, 2017.

Para a formação dos períodos indicados das Tabelas 21 e 22, a empresa trabalha 24 horas por dia (três turnos), porém considerou-se um rendimento de aproximadamente 65% da máquina injetora em funcionamento, levando em consideração as paradas para troca de turno, troca de molde, e preparação.

Portanto, de acordo com dados estimados pela própria empresa, para cada dia consideraram-se 16 horas trabalhadas, para cada mês 22 dias e para cada ano foram considerados 12 meses.

Desta forma, as saídas de gases não somente reduziram a energia gasta para a produção do copo, como também melhoraram de forma muito expressiva a eficiência do processo de injeção, a ponto de produzir peças de boa qualidade para comercialização e sem nenhuma falha de injeção como eram apresentadas anteriormente.

CONCLUSÕES

Analisando as simulações realizadas com o molde original (sem as saídas de gases), apesar de quantitativamente terem gerados resultados das massas injetadas superestimados e com um erro razoável, do ponto de vista qualitativo permitiram identificar problemas de aprisionamento de gases. Nestes casos, os resultados simulados indicaram os pontos nos quais a cavidade do molde estava aprisionando gases, inclusive pelo fato de existir uma gravura na geometria do molde (base de apoio para o copo moldado).

Com relação às simulações com o molde modificado, ou seja, com as saídas de gases, o modelo apresentou boa capacidade de predição do comportamento do processo de injeção tanto do ponto de vista qualitativo, quanto do ponto de vista quantitativo, fornecendo informações com certa precisão das faixas ótimas para os valores de pressão e temperatura de injeção em distintas condições de temperatura do molde. Apesar do bom desempenho do modelo na condição do molde modificado, os resultados das massas injetadas ainda se encontraram um pouco superiores às massas obtidas experimentalmente. Este comportamento pode ser considerado uma limitação do modelo, mas não inviabiliza seu uso como ferramenta de tomada de decisões.

Como se pôde observar a partir dos resultados simulados e experimentais, as saídas de gases melhoraram de forma significativa o desempenho do processo, aumentando a eficiência de injeção pelo fato dos gases contidos no molde terem um escape apropriado durante o escoamento polímero fundido através das cavidades do molde.

Os resultados obtidos pelo planejamento fatorial permitiram observar como os parâmetros de injeção afetam a eficiência do processo de injeção de termoplástico. As pressões de injeção obtiveram maior influência e significância no processo, por serem responsáveis por empurrar o polímero dentre as cavidades. Em baixas temperaturas de injeção, o polímero perde suas características de líquido viscoso e começa a escoar como um semi-sólido, precisando de maiores pressões para vencer as tensões cisalhantes de movimento. Em altas temperaturas de injeção, o aquecimento acarreta na liberação de gases quentes que atrapalham o escoamento do GPPS, impedindo que ele escoe livremente através das cavidades do molde.

Com base nos resultados experimentais e simulados obtidos, foi possível identificar as faixas de valores dos parâmetros de processo que devem resultar na maior eficiência de processo. Além deste mapeamento das condições operacionais ideais de operação do molde modificado (com as saídas de gases), cálculos para estimar a energia consumida pelo processo foram realizados e revelaram que as modificações executadas no molde dos copos reduziu o consumo energético do processo em 57,14 % com relação à condição original de operação (molde sem as saídas de gases). Por fim, as modificações propostas para o molde de injeção estudado reduziram drasticamente a geração de refugos mensal de 12.447,97 kg com o molde sem as saídas de gases, para 12,634 kg do processo atual.

Outros fatores relevantes que devem ser destacados é a redução da quantidade de refugo, que atualmente representa cerca de 1,60% da quantidade de gerada antes das modificações, além de diminuir o ciclo de injeção de 19 para 12 segundos. Conforme os resultados obtidos, verificou-se que a aplicação da engenharia de simulação proporcionou benefícios significativos ao processo. Portanto, o presente trabalho demonstrou que o uso de ferramentas de simulação é indicado para otimizar processos de fabricação de produtos termoplásticos obtidos por injeção.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST. Relatório Anual. Perfil da Indústria Brasileira de Transformação de Plásticos. 2016.

ARAÚJO, J. F. **Estudo de Propriedades Mecânicas do Polipropileno Moldado por Injeção em Insertos de Resinas**. 88 f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR. Curitiba P.R. 2010.

BACK, E. Modelo para Estimativa de Custos nas Etapas Iniciais do Projeto de Peças Injetadas em Plástico, 148 f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná., UTFPR. Curitiba P.R. 2011.

BARETA, D. R.; COSTA, C. A.; ZATTERA, A. J.; POUZADA, A. S. A influência de diferentes materiais aplicados em cavidades de ferramental rápido: efeito nas propriedades mecânicas de peças tubulares injetadas. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8., 2007, Cusco. **Anais do Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica**. Cusco, 2007.

BEAUMONT, J. P. **Design Handbook**. Munchen: Hanser, 2004.

BLASIO, C. A. **Solução de defeitos na moldagem por injeção de termoplásticos**. 2007. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual de Campinas. 2007.

BOM, P. R.; LEÃES, V. S. Avaliação do empenamento de peças plásticas injetadas em um molde com diferença de temperatura entre as placas. **Estudos tecnológicos**, São Leopoldo, v.4, n. 2, p.135-145, mai./ago. 2008.

BRASKEM. Ficha Técnica do Poliestireno Cristal (GPPS – 500), 2015.

BRITO, A. M.; ARAÚJO, B.; SOUSA, R.; PONTES, A. J. **Manual do Projectista para Moldes de Injeção de Plásticos**. Sistemas de Alimentação e Escape de Gases. Vol. 6. Marina Grande: Centimfe, 2004.

BRETAS, R. E. S.; D'AVILA, M. A. Reologia de Polímeros Fundidos. EdUFSCAR. São Carlos, SP. 2000.

CALISTER Jr, W. D.; RETHWISH, D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8a Ed. LCT, 2012.

CARNEIRO, M. S. Transferência térmica determina o bom desempenho de moldes de injeção. **Plástico Industrial**, ano VIII, p. 108-119, mar. 2006.

CATIC, I.; SOKELE, M. R.; SERCER, M. Qual é a relação entre o material da cavidade e o tempo de resfriamento de peças injetadas. **Plástico Industrial**, 8, 91,

p.34-41, 2006.

CHEN, S. C.; CHIEN, R. D.; LIN, S. H.; LIN, M. C.; CHANG, J. A. Feasibility evaluation of gas-assisted heating for mold surface temperature control during injection molding process. **Journal International Communications in Heat and Mass Transfer**, 36, p. 806-812. Elsevier, 2009.

CORAZZA, E. J. **Influência do Tratamento de Nitretação em Cavidades de Aço P20 de Moldes de Injeção de Termoplásticos**. 100 f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade da Região de Joinville, UNIVILLE. Joinville S.C. 2012.

CRUZ, S. **Moldes de Injeção**. Curitiba, P.R. Hemus, 2002.

CUNHA, A. M. **Manual do Projectista para Moldes de Injeção de Plásticos**. Moldação por Injeção e Materiais Plásticos. Vol. 2. Marina Grande: Centimfe, 2004.

DARÉ, G. **Proposta de um Modelo de Referência para o Desenvolvimento Integrado de Componentes de Plásticos**. 219 f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis S.C. 2001.

DIMLA, D. E.; CAMILOTTO, M.; MIANI, F. Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools. **Journal of Materials Processing Technology**. n. 165, p. 1294-1300. Elsevier, 2005.

ELIAS, H. G. **Introduction to Plastics**. Wiley-VHC. Weinheim, 2003.

FARIAS, T. M.; SECCHI, A.R.; CARDOZO, N.S.M. Utilização da Técnica de Birrefringência em Reômetro Multipasse para a Diferenciação de Grades de Poliestireno Cristal. **Polímeros**. v. 24, n. 5, p. 596-603, abril de 2014.

FERNANDES, A. C.; FERREIRA, A. M.; JUNKES, R.; MOLINARI, E. LEITE, J. L.; BECKERT, S.F. influência da “velocidade de injeção” e “tempo de recalque” nas características de peças injetadas em polipropileno. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6., 2011, Caxias do Sul. Anais do Congresso de engenharia de Fabricação. Caxias do Sul, 2011.

FERREIRA, C. V. **Metodologia para as Fases de Projeto Informacional e Conceitual de Componentes de Plástico Injetado Integrando os Processos de Projeto e Estimativa de Custos**. 228 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, S.C. 2002.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução a mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

FRANKFURT, R. **Simulação de Transporte de Massa de um Sóluto em Meio Poroso com Auxílio do CFD (Computer Fluid Dynamics)**. 169 f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, USP. São Paulo S.P. 2008.

GOMEZ-LÓPEZ, L. M.; MIGUEL, V.; MARTINEZ, A.; COELHO, J.; CALATAYUD, A. Simulation and Modeling of Single Point Incremental Forming Processes within a Solidworks Environment. **Procedia Engineering**, n. 63 p632-641. Elsevier. Spain, 2013.

GOODSHIP, V. *Troubleshooting Injection Moulding*. Shawbury: Smithers Rapra Press, 2010.

GUILONG, W.; GUOQUN, Z.; HUIPING, L.; YANJIN, G. Analysis of thermal cycling efficiency and optimal design of heating/cooling systems for rapid heat cycle injection molding process. **Journal Materials and Design**, 31, 2010.

HARADA, J. **Moldes para Injeção de Termoplásticos: Projetos e Princípios Básicos**. São Paulo: Artliber, 2004.

HARPER, C. A. **Modern Plastics Handbook**. McGraw-Hill, p. 1298. New York 2000.

HASSAN, H.; REGNIER, N.; LE BOT, C.; DEFAYE, G. 3D study of cooling system effect on the heat transfer during polymer injection molding. **International Journal of Thermal Sciences**, 49, p.161-169. Elsevier, 2010.

JARM, V. Glossary of class names of polymers based on the chemical structure and molecular architecture, **Kem**. n. 61 v. 3 p145-176. Zagreb, 2012.

JOHANNABER, F. **Injection molding machines: A user's guide**. 4.ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 2008.

KAZMER, D.O. *Injection Mold Design Engineering*, Hanse. Massachusetts, 2007.

KERZNER, H. **Gestão de Projetos: As Melhores Práticas**. Porto Alegre, R.S. Bookman, 2002.

KIM, S. W.; TURNG, L. S. Developments of three-dimensional computer-aided engineering simulation for injection moulding. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**, n. 12, p151-173. IOPSCIENCE, 2004.

KOVACS, J. G.; BERCSEY, T. Influence of mold properties on the quality of injection molded parts. Periódica. **Polytechnica - Mechanical Engineering Series**, n.2, vol. 49, p.115-122, 2005.

LAKKANA, M.; KUMAR, G. C. M.; KADOLI, R. Computational design of mould sprue for injection moulding thermoplastics. **Journal of Computation Design and Engineering**, n. 3, p37-52. Elsevier, 2016.

LESKO, J. **Design Industrial: Materiais e processo de fabricação**. São Paulo, SP: Edgar Blucher, 2004.

LÓPEZ, A.; AISA, J.; MARTINEZ, A.; MERCADO, D. Injection moulding parameters

influence on weight quality of complex parts by means of DOE application: Case study. **Measurement**, n. 90, p349-356. Elsevier, 2016.

MACHADO, I. F. **Tratamentos térmicos e de superfície**. Introdução à manufatura mecânica. Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MALLOY, R. A. **Plastic Part Design for Injection Molding: an Introduction**. New York: Hanser, 2000.

MANRICH, Sílvio. **Processamento de termoplásticos**: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes. São Paulo, SP: Artliber, 2013.

Máquina injetora disponível em :

http://www.danyplast.com.br/maquinas_novas.php?linha=plutao&id_maq=127
(características da máquina injetora HAITIAN 860/270 C).

MOAYYEDIAN, M.; ABHARY, K.; MARIAN, R. New Design Feature of Mold in Injection Molding For Scrap Reduction. **Procedia manufacturing**. n. 2 p241-245. Elsevier. Austrália, 2015.

NESTLE, K.; HCKMANN, W.; STEININGER, H. KNOLL, K. Towards quantification of butadiene content in styrene-butadiene block copolymers and their blends with general purpose polystyrene (GPPS) and the relation between mechanical properties and NMR relaxation times. **Analytica Chimica Acta**. n. 604, p 54-61. Elsevier. Ludwigshafen, 2007.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. Campinas. UNICAMP, 2003.

NISHIMOTO, A. R. **Simulação Numérica da Injeção de Termoplásticos em Moldes**: Estudo Comparativo de Alguns Modelos Computacionais. 92 f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis S.C. 2001.

OLIAEI, E.; HEIDARI, B. S.; DAVACHI, S. M.; BAHRAMI, M.; DAVOODI, S.; HEJAZI, I.; SEYTI, J. Warpage and Shrinkage Optimization of Injection-Molded Plastic Spoon Parts for Biodegradable Polymers Using Tagushi, ANOVA and Artificial Neural Network Methods. **Journal of Materials Science & Technology**. Elsevier Limited, 2016.

OSSWALD, T. A.; BAUR, E.; BRINKMANN, S.; OBERBACH, K.; SCHMACHTENBERG, E. **International Plastics Handbook**: The resource for plastics engineers. Hanser. Munich, 2006.

OSSWALD, T. A.; LIH-SHENG, T.; GRAMANN, P. **Injection molding handbook**.

2.ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 2008.

PATERAKIS, P.G.; KORAKIANITI, E.S.; DALLAS, P.P.; REKKAS, D.M. **Evaluation and Simultaneous Optimization of Some Pellets Characteristics Using a 3³ factorial Design and the Desirability Function.** International Journal of Pharmaceutics. v. 248, p. 51-/60, 2002.

PÖTSCH, G; MICHAELI, W. **Injection molding: An introduction.** 2.ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 2008.

ROCCA, A. C. C. **Simulação Matemática do Escoamento e Transporte de Massa no Aquífero Freático em uma Área Industrial Contaminada.** 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, S.P. 2000.

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. F. **Experimental Design and Process Optimization.** CRC Press, 2014.

SACCHELLI, C. M. Análise do processo de injeção de termoplásticos através de sistemas CAE. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2., 2002, João Pessoa. Anais do Congresso de Engenharia Mecânica. João Pessoa, 2002.

SACCHELLI, C. M. **Sistematização do Processo de Desenvolvimento Integrado de Moldes de Injeção de Termoplásticos.** 284 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, S.C. 2007.

SALVADOR, V. L.; COSTA, C. A. **Quais são as etapas mais importantes no desenvolvimento de Ferramentas de Injeção.** Plástico Industrial, ano IX p82-94, Fevereiro, 2007.

SANT'ANNA, J. P. Ligas metálicas especiais proporcionam melhor relação custo/benefício. **Revista Plástico Moderno.** São Paulo, n. 437, mar. 2011.

SAPENE, C. **Cost analysis of plastic injection molds: A step by step guide to estimate the final cost of plastic injection molds.** Lexington: Lulu, 2010.

SMITH, A. G.; WROBEL, L. C.; MCCALLA, B. A.; ALLAN, P. S.; HORNSBY, P. R. A computational model for the cooling phase of injection moulding. **Journal of Materials Processing Technology**, 195, p. 305-313, 2008.

SOLIDWORKS Instructor Guide. Solidworks plastics Handbook: **Introduction to Solidworksplastics using simulation.** 2016.

SOUZA, A. F. **Contribuição ao Fresamento de Geometrias Complexas Aplicando a Tecnologia de Usinagem com Altas Velocidades.** 171 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP. São Carlos, S.P. 2004.

STEINKO, W. **Avaliação do projeto térmico do molde garante qualidade e redução de custos.** Plástico Industrial, ano VI, p. 64-71, Novembro, 2004.

STRONG, A. B. **Plastics: Materials and Processing.** Prentice Hall. New Jersey, 2005.

TELLES, I. C. F. S. **Fundamentos da injeção e etapas de moldagem.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

THOMAZI, E. **Introdução ao projeto de ferramentas.** Farroupilha - RS, ETFAR 2009.

TONOLLI, E. J. Jr. **Ambiente Colaborativo para o Apoio ao Desenvolvimento de Moldes para Injeção de Plásticos.** 135 f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis S.C. 2003.

WIEBECK, H. & HARADA, J. **Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações.** Artliber. São Paulo, 2004.

XIAO, C. L.; HUANG, H. X.; YANG, X. Development and application of rapid thermal cycling molding with electric heating for improving surface quality of microcellular injection molded parts. **Applied Thermal Engineering.** n. 100, p478-489. Elsevier. China, 2016.

ZHUANG, X.; OUYANG, J.; JIANG, C.; LIU, Q. New approach to develop a 3D non-isothermal computational framework for injection molding process based on level set method. **Chinese Journal of Chemical Engineering.** n. 30. Elsevier. China, 2016.