

Lincoln Rogério Garcia

**Avaliação de conceitos de sistemas de
refrigeração para moldes de injeção com
uso de DOE e sistemas CAE**

Joinville, Brasil

2018

Lincoln Rogério Garcia

**AVALIAÇÃO DE CONCEITOS DE SISTEMAS DE
REFRIGERAÇÃO PARA MOLDES DE INJEÇÃO
COM USO DE DOE E SISTEMAS CAE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa-Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Maurício Sacchelli

Joinville, Brasil

2018

,
Avaliação de conceitos de sistemas de refrigeração para moldes de
injeção com uso de DOE e sistemas CAE : / Lincoln Rogério Garcia;
orientador, Prof. Dr. Carlos Maurício Sacchelli. - Joinville,
Brasil 2018.
188 p.

- Universidade Federal de Santa Catarina, . Programa de Pós-Graduação
em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Inclui Referências

I. , . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. II. Avaliação de
conceitos de sistemas de refrigeração para moldes de injeção com uso
de DOE e sistemas CAE.

Lincoln Rogério Garcia

**Avaliação de conceitos de sistemas de refrigeração
para moldes de injeção com uso de DOE e sistemas
CAE**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, Brasil, 04 de Setembro de 2018.

Prof. Dr. Régis Kovacs Scalice
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Maurício Sacchelli
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Wagner Maurício Pachekoski
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^a Dr^a. Janaina Lisi Leite Howarth
Sociedade Educacional de Santa Catarina

Prof. Maurício de Campos Porath
Universidade Federal de Santa Catarina

*À minha família, com muito orgulho e satisfação, que me apoiou,
compreendeu, incentivou e sempre esteve ao meu lado.*

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio e a contribuição, direta e indireta, de algumas pessoas, às quais quero transmitir os meus sinceros agradecimentos. Primeiramente gostaria de expressar minha gratidão à Deus e a minha família pela ajuda, disponibilidade e compreensão durante todo o meu percurso acadêmico, bem como à todos os amigos e colegas pelo compartilhamento e troca de ideias que em muito me ajudaram para a resolução de problemas e superação dos obstáculos no decorrer do projeto.

O meu agradecimento para o orientador desta dissertação, o professor Dr. Carlos Maurício Sacchelli, no qual me propôs este trabalho, e me orientou durante todo o processo de desenvolvimento da dissertação aqui apresentada.

Gostaria de agradecer aos colegas de trabalho que contribuíram de forma positiva para que este projeto fosse realizado.

*“O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas
sim pelas dificuldades que superou no caminho”
(Abraham Lincoln)*

RESUMO

As integrações entre as ferramentas computacionais CAD/CAE *Computer Aided Design/ Computer Aided Engineering*, têm contribuído significativamente para auxiliar no desenvolvimento de produtos. A otimização da geometria do produto durante a fase preliminar de desenvolvimento, tem produzido bons resultados e contribuído para evitar retrabalhos futuros. O processo de moldagem de injeção é atualmente o processo de maior uso na fabricação de produtos manufaturados. Neste processo, o tempo do ciclo de refrigeração corresponde a 2/3 do tempo de ciclo, e por este motivo é importante direcionar esforços para otimizar e minimizá-lo. Assim, o presente projeto tem como objetivo avaliar propostas de sistema de refrigeração convencionais com o auxílio de experimentos planejados (DOE) e ferramentas CAE para identificar quais os parâmetros de projeto e processo mais relevantes que impactam na redução do tempo de ciclo e no empenamento. Utilizou-se na metodologia, geometrias conceituais do tipo placa plana e estruturada, que foram modeladas e avaliadas no simulador, onde posteriormente foram coletados os resultados de tempo de ciclo e empenamento. As equações obtidas nos experimentos, bem como as superfícies de resposta, permitiram prever valores para o tempo de ciclo e empenamento em diferentes intervalos de parâmetros de processo. Dentre os parâmetros de projeto avaliados, os que mais influenciaram o tempo de ciclo e o empenamento estão relacionados ao diâmetro do canal de refrigeração, leiaute do sistema de refrigeração e o material polimérico.

Palavras-chave: Ferramentas Computacionais, Moldagem de Injeção, Tempo de Ciclo, Sistemas de Refrigeração, Experimentos Planejados, DOE, Empenamento.

ABSTRACT

The integrations between the Computer Aided Design and Engineering CAD / CAE computer tools have significantly contributed to the development of products. The optimization of product geometry during the preliminary development phase has produced good results and contributed to avoid future rework. The injection molding process is currently the process of greater use in the manufacture of manufactured products. In this process, the cooling cycle time corresponds to 2/3 of the cycle time, and for this reason it is important to direct efforts to optimize and minimize it. Thus, the present project aims to evaluate conventional cooling system proposals with the aid of design of experiments (DOE) and CAE tools to identify the most relevant design and process parameters that impact on cycle time reduction and warpage. Conceptual geometries of the flat and structured plate type were used in the methodology, which were modeled and evaluated in the simulator, where later the results of cycle time and warpage were collected. The equations obtained in the experiments, as well as the response surfaces, allowed to predict values for cycle time and warping in different intervals of process parameters. Among the evaluated design parameters, the ones that most influenced the cycle time and warpage are related to the cooling channel diameter, the cooling system layout and the polymer material.

Keywords: Computational Tools, Injection Molding, Cycle Time, Cooling Systems, Design of Experiments, DOE, Warpage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ciclo de Moldagem por Injeção	36
Figura 2 – Parâmetros de Processo Primários	39
Figura 3 – Tempo de Refrigeração Programado e Real	42
Figura 4 – Sistema de Refrigeração em Moldes de Injeção	45
Figura 5 – Sistema de Refrigeração em Moldes	46
Figura 6 – Canais de Refrigeração em Paralelo e Série	47
Figura 7 – Sistemas de Refrigeração Defletor e Borbulhador	48
Figura 8 – Fatores críticos no projeto de sistema de refrigeração	49
Figura 9 – Variação da temperatura da superfície do molde	50
Figura 10 – Medição da temperatura	50
Figura 11 – Tipos de Escoamento	51
Figura 12 – Relação entre o fluxo térmico e o fluxo de refrigeração	52
Figura 13 – Canais de Refrigeração em Série Não Convencionais	54
Figura 14 – Parâmetros de Projeto do Experimento	55
Figura 15 – Máquina Injetora para Termoplásticos	56
Figura 16 – Geometria da Placa Retangular	58
Figura 17 – Geometria da Colher	60
Figura 18 – Sistemas de injeção e refrigeração	60
Figura 19 – Geometria da Capa Portátil	62
Figura 20 – Canal de Refrigeração Próximo	64
Figura 21 – Canal de Refrigeração Afastado	64
Figura 22 – Exemplo de simulação de injeção	68
Figura 23 – Curvas de Viscosidade H503 vs CP442XP	69
Figura 24 – Curvas de Viscosidade H503 vs CP442XPP Ampliado	70
Figura 25 – Comparativo de Condutividade Térmica	71
Figura 26 – Comparativo do Calor Específico	72
Figura 27 – Comparativo Volume Específico	73
Figura 28 – Resumo da Revisão Bibliográfica - Parte 1	75
Figura 29 – Resumo da Revisão Bibliográfica - Parte 2	76
Figura 30 – Resumo da Revisão Bibliográfica - Parte 3	77
Figura 31 – Geometrias conceituais	80
Figura 32 – Resolução do Experimento	84

Figura 33 – Sistema de Refrigeração	85
Figura 34 – Diâmetro do Canal de Refrigeração	86
Figura 35 – Distância Entre Canais de Refrigeração	86
Figura 36 – Distância até a Geometria	87
Figura 37 – Defletor	87
Figura 38 – Plano de Execução Experimental	88
Figura 39 – Tipo de elemento e malha	89
Figura 40 – Malha da placa plana	90
Figura 41 – Malha da retangular reforçada	90
Figura 42 – Modelo estatístico para o tempo de ciclo	93
Figura 43 – Modelo estatístico do Empenamento	93
Figura 44 – Probabilidade normal para o tempo de ciclo	95
Figura 45 – Probabilidade normal para o empenamento	97
Figura 46 – Pareto dos significativos para tempo de ciclo	97
Figura 47 – pareto dos significativos para empenamento	98
Figura 48 – Perfil de Estimativa do Experimento	98
Figura 49 – Gráfico de probabilidade tempo de ciclo	101
Figura 50 – Gráfico de probabilidade empenamento	102
Figura 51 – Gráfico de Pareto para o Tempo de Ciclo	103
Figura 52 – Gráfico de Pareto para o Empenamento	103
Figura 53 – Perfil de Estimativa do Experimento	104
Figura 54 – Esquemático do modelo usado no simulador	106
Figura 55 – Representação do melhor modelo	107
Figura 56 – Número de Reynolds para o melhor caso	107
Figura 57 – Número de Reynolds para o pior caso	108
Figura 58 – Fluxo térmico do melhor caso	109
Figura 59 – Fluxo térmico melhor caso	109
Figura 60 – Gráfico de probabilidade normal do tempo de ciclo	111
Figura 61 – Gráfico de probabilidade normal do empenamento	112
Figura 62 – Gráfico de Pareto para o tempo de ciclo	112
Figura 63 – Gráfico de Pareto para o Empenamento	113
Figura 64 – Perfil de Estimativa final do Experimento	113
Figura 65 – Superfície de Resposta Interação AB	114
Figura 66 – Superfície de Resposta Interação AC	115

Figura 67 – Superfície de Resposta Interação BC	116
Figura 68 – Equação Polinomial - Tempo de Ciclo	117
Figura 69 – Superfície de Resposta Interação AB - Empenamento	119
Figura 70 – Superfície de Resposta Interação AC - Empenamento	120
Figura 71 – Superfície de Resposta Interação BC - Empenamento	121
Figura 72 – Equação Polinomial da Superfície de Resposta . . .	122
Figura 73 – Representação do modelo estatístico - Tempo de ciclo	125
Figura 74 – Representação do modelo estatístico - Empenamento	126
Figura 75 – Gráfico de probabilidade normal do Tempo de Ciclo	126
Figura 76 – Gráfico de probabilidade normal do Empenamento .	127
Figura 77 – Gráfico de Pareto - Tempo de Ciclo	128
Figura 78 – Gráfico de Pareto - Empenamento	128
Figura 79 – Perfil de Estimativa final do Experimento	129
Figura 80 – Esquemático do modelo usado no simulador	130
Figura 81 – Representação do modelo com melhor combinação .	130
Figura 82 – Número de Reynolds para o melhor caso	131
Figura 83 – Número de Reynolds para o pior caso	132
Figura 84 – Fluxo térmico para o melhor caso	133
Figura 85 – Fluxo térmico para o pior caso	133
Figura 86 – Gráfico de probabilidade normal - Tempo de Ciclo .	135
Figura 87 – Gráfico de probabilidade normal - Empenamento . .	136
Figura 88 – Gráfico de Pareto - Tempo de Ciclo	137
Figura 89 – Gráfico de Pareto - Empenamento	137
Figura 90 – Perfil de Estimativa final do Experimento	138
Figura 91 – Superfície de Resposta Interação AB	139
Figura 92 – Superfície de Resposta Interação AC	140
Figura 93 – Superfície de Resposta Interação BC	141
Figura 94 – Equação Polinomial da Superfície de Resposta . . .	142
Figura 95 – Superfície de Resposta Interação AB	144
Figura 96 – Superfície de Resposta Interação AC	145
Figura 97 – Superfície de Resposta Interação BC	146
Figura 98 – Equação Polinomial da Superfície de Resposta . . .	147
Figura 99 – Curva de Viscosidade Styron 688G	163
Figura 100 – Curva de Viscosidade do Polystyrene 804	163

Figura 101–Comparativo de Viscosidade	164
Figura 102–Comparativo de Condutividade	164
Figura 103–Comparativo de Calor Específico	165
Figura 104–Comparativo de Volume Específico	165
Figura 105–Representação do modelo estatístico - Tempo de Ciclo	167
Figura 106–Gráfico de Probabilidade Normal - Tempo de Ciclo .	167
Figura 107–Representação do modelo estatístico - Empenamento	168
Figura 108–Gráfico de Probabilidade Normal - Empenamento .	168
Figura 109–Gráfico de Pareto - Tempo de Ciclo	169
Figura 110–Gráfico de Pareto - Empenamento	169
Figura 111–Perfil de Estimativa do Experimento	170
Figura 112–Representação do modelo estatístico - Tempo de Ciclo	171
Figura 113–Gráfico de Probabilidade Normal - Tempo de Ciclo .	171
Figura 114–Representação do modelo estatístico - Empenamento	172
Figura 115–Gráfico de Probabilidade Normal - Empenamento .	172
Figura 116–Gráfico de Pareto - Tempo de Ciclo	173
Figura 117–Gráfico de Pareto - Empenamento	173
Figura 118–Perfil de Estimativa do Experimento	174
Figura 119–Representação do modelo estatístico - Tempo de Ciclo	175
Figura 120–Gráfico de Probabilidade Normal - Tempo de Ciclo .	175
Figura 121–Representação do modelo estatístico - Empenamento	176
Figura 122–Gráfico de Probabilidade Normal - Empenamento .	176
Figura 123–Gráfico de Pareto - Tempo de Ciclo	177
Figura 124–Gráfico de Pareto - Empenamento	178
Figura 125–Estimativa do Experimento	179
Figura 126–Representação do modelo estatístico - Tempo de Ciclo	181
Figura 127–Gráfico de Probabilidade Normal - Tempo de Ciclo .	181
Figura 128–Representação do modelo estatístico - Empenamento	182
Figura 129–Gráfico de Probabilidade Normal - Empenamento .	182
Figura 130–Gráfico de Pareto - Tempo de Ciclo	183
Figura 131–Gráfico de Pareto - Empenamento	183
Figura 132–Estimativa do Experimento	184
Figura 133–Representação do modelo estatístico - Tempo de Ciclo	185
Figura 134–Gráfico de Probabilidade Normal - Tempo de Ciclo .	185

Figura 135 – Representação do modelo estatístico - Empenamento	186
Figura 136 – Gráfico de Probabilidade Normal - Empenamento	186
Figura 137 – Gráfico de Pareto - Tempo de Ciclo	187
Figura 138 – Gráfico de Pareto - Empenamento	187
Figura 139 – Estimativa do Experimento	188

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de Processo	59
Tabela 2 – Propriedades dos Polipropilenos	81
Tabela 3 – Propriedades dos Poliestirenos	82
Tabela 4 – Propriedades dos Materiais usados em Moldes	83
Tabela 5 – Planejamento Experimental Fracionado	85
Tabela 6 – Planejamento Experimental Fracionado	91
Tabela 7 – Matriz Ortogonal do Experimento	92
Tabela 8 – Resultados em ordem crescente do Tempo de Ciclo	94
Tabela 9 – Resultados em ordem crescente	96
Tabela 10 – Planejamento Experimental Fracionado Placa Plana	100
Tabela 11 – Matriz do Segundo Experimento - Placa Plana	100
Tabela 12 – Planejamento Experimental Superfície de Resposta	110
Tabela 13 – Calculo do Tempo de Ciclo - Semi-cristalinos	117
Tabela 14 – Calculo do Tempo de Ciclo - Amorfos	118
Tabela 15 – Variações no tempo de ciclo calculado pela equaçã	118
Tabela 16 – Calculo do Empenamento - Semi-cristalinos	122
Tabela 17 – Calculo do Empenamento - Amorfos	123
Tabela 18 – Variações no empenamento calculado pela equação	123
Tabela 19 – Planejamento Experimental Fracionado	124
Tabela 20 – Matriz do Primeiro Experimento	125
Tabela 21 – Planejamento Experimental Superfície de Resposta	134
Tabela 22 – Cálculo do Tempo de Ciclo - Semi-cristalinos	142
Tabela 23 – Cálculo do Tempo de Ciclo - Amorfos	143
Tabela 24 – Variações no tempo de ciclo calculado pela equação	143
Tabela 25 – Cálculo do Empenamento - Semi-cristalinos	147
Tabela 26 – Cálculo do Empenamento - Amorfos	148
Tabela 27 – Variações no empenamento calculado pela equação	148

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
DOE	Design of Experiments
t_e	tempo de injeção
t_n	tempo de recalque
t_p	tempo de espera
W	Watt
m	metro
$^{\circ}\text{C}$	grau Celsius
m^2	metro quadrado
α	difusividade térmica
k	condutividade térmica
ρ	densidade
C_p	calor específico
t_c	tempo estimado de refrigeração
h	espessura da placa
T_{inj}	temperatura de injeção
T_{refri}	temperatura de refrigeração
T_{extr}	temperatura de extração
ln	logarítmo neperiano
PLA	poli(ácido láctico)

PLA-TPU	ácido poliuretano termoplástico
PLA-TPS	amido termoplástico de poli(ácido láctico)
ANOVA	Analysis of Variance
m^3	metro cúbico
kg	quilograma
Pa	Pascal
MPa	Megapascal
PVT	Pressão-Volume Específico-Temperatura
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
PP	Polipropileno
PDEs	Equações Diferenciais Parciais
FEM	Método dos Elementos Finitos
T_m	Temperatura de Fusão
T_g	Temperatura de Transição Vítrea
ASTM	American Society for Testing and Materials
g	grama
cm^3	centímetro cúbico
J	Joule
MPa	Megapascal
AIISI	American Iron and Steel Institute
R^2	RSquare
RO	Run Order

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Objetivo Geral	32
1.2	Objetivos Específicos	32
1.3	Estrutura da Dissertação	33
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1	Processo de Injeção	35
2.2	Parâmetros de Processo	38
2.2.1	Velocidade de Injeção	39
2.2.2	Pressão de Injeção	40
2.2.3	Temperatura de Injeção	40
2.2.4	Tempo e Pressão de Recalque	41
2.2.5	Temperatura do molde e tempo de refrigeração	41
2.2.6	Temperatura de Desmoldagem	43
2.3	Sistemas de Refrigeração em Moldes de Injeção	43
2.3.1	Métodos Numéricos para Simulação de Injeção	67
2.3.2	Materiais	69
3	METODOLOGIA	79
3.1	Contextualização	79
3.1.1	Materiais	81
3.1.2	Planejamento Experimental e Parâmetros de Processo	83
3.1.3	Metodologia da Simulação	88
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	91
4.1	Placa Plana - Semi-cristalinos - 1º DOE	91
4.2	Placa Plana - Semi-cristalinos - 2º DOE	99
4.3	Placa Plana - Semi-cristalinos - 3º DOE	110
4.4	Estruturada - Semi-cristalinos - 1º DOE	124
4.5	Estruturada - Semi-cristalinos - 2º DOE	124
4.6	Estruturada - Semi-cristalinos - 3º DOE	134

5	CONCLUSÃO	149
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	153
	REFERÊNCIAS	155
	ANEXOS	161
	ANEXO A – PROPRIEDADES DOS MATE- RIAS AMORFOS	163
	ANEXO B – PLACA PLANA - AMORFOS - 2º DOE	167
	ANEXO C – PLACA PLANA - AMORFOS - 3º DOE	171
	ANEXO D – RETANGULAR ESTRUTURADA - SEMI-CRISTALINOS - 1º DOE	175
	ANEXO E – RETANGULAR ESTRUTURADA - AMORFOS - 2º DOE	181
	ANEXO F – RETANGULAR ESTRUTURADA - AMORFOS - 3º DOE	185

1 INTRODUÇÃO

A moldagem por injeção é um dos processos de transformação mais popular para produzir peças complexas, uma vez que o molde é capaz de reproduzir diferentes formas e também devido às suas vantagens econômicas de produção em série. Para produzir peças plásticas do modo convencional, são necessários basicamente o material polimérico, o molde de injeção e uma máquina injetora que movimenta o material fundido para dentro do molde. (LÓPEZ et al., 2016)

A constituição de um molde segue o princípio típico de montagem de placas, normalmente de aço, em determinada ordem, a fim de obter a estrutura básica do molde de injeção, que podem ser divididos de acordo com a dinâmica de funcionamento, composto de uma parte estacionária e outra móvel. (HARADA, 2006)

Wang et al. (2011) e Kulkarni (2017) citam que uma grande parcela do tempo de ciclo dos moldes de injeção está associada ao tempo de resfriamento. Para moldes de alta produtividade, é imperativo que o tempo de resfriamento seja reduzido para o menor possível.

Mohamed, Masood e Saifullah (2013), Prashanth Reddy e Panitapu (2017), Venkatesh e Ravi Kumar (2017) relatam que um dos maiores problemas encontrados no processo de injeção está relacionado à necessidade de reduzir o tempo de ciclo. Normalmente, o tempo de resfriamento é o maior contribuidor para a formação do tempo de ciclo, sendo este o principal objetivo de estudo em diversos trabalhos científicos.

Durante o estágio de preenchimento da cavidade, o material mais quente encontra-se próximo ao ponto de injeção e o material mais frio na região mais distante do ponto de injeção. Devido a restrições de manufatura convencional, é frequentemente difícil posicionar os canais de refrigeração próximos da superfície da peça a fim de promover uma troca de calor eficiente. Contudo, a eficiência no processo de injeção de termoplásticos é afetada pelo projeto do sistema de refrigeração e a diferença na produtividade entre o correto e o incorreto projeto do sistema de refrigeração pode representar um aumento de 20 a 40% no

custo do processo de moldagem.(Alfredo Campo, 2006)

Para garantir a produtividade alguns parâmetros são essenciais para a remoção de calor que dependem da temperatura, pressão, viscosidade, difusividade térmica e condutividade térmica, desta maneira, o sistema de refrigeração tem grande importância e impacto significativo no tempo de ciclo e na produtividade, sendo este o principal motivo de investimento em pesquisas por novas tecnologias neste sentido. No entanto, para reduzir o tempo de resfriamento, controlar a uniformidade de temperatura e a contração volumétrica, a indústria espera obter canais de resfriamento mais eficientes.(Alfredo Campo, 2006)

É observado que o tempo de resfriamento entre a injeção e a extração da peça é responsável por pelo menos 60% do ciclo de moldagem por injeção. Portanto, o tempo de resfriamento desempenha um papel importante na eficiência, no controle de qualidade e na produtividade de qualquer combinação de componentes e ferramentas.(GOODSHIP; MIDDLETON; CHERRINGTON, 2016)

O maior contribuidor para o tempo de ciclo é o tempo de resfriamento, sendo assim ele representa no processo de injeção normalmente 2/3 do tempo total de ciclo. Portanto, qualquer redução terá um grande impacto no tempo final de produção.(MARQUES et al., 2015)

A temperatura de moldagem durante o processo de injeção, tem influência nas propriedades mecânicas, contração, erros de forma (empenamento), qualidade da superfície moldada, tempo de ciclo e comprimento de fluxo para peças de parede finas. Neste caso, a eficiência do sistema de refrigeração influencia a qualidade e o tempo de resfriamento da peça moldada, onde pelo menos 60% dos defeitos visíveis tais como erros de forma na peça injetada podem ser relacionados à ineficiência do sistema de refrigeração.

Segundo Malloy (2010) uma estimativa do tempo de resfriamento pode ser muito útil para o projeto de moldes de injeção, particularmente do ponto de vista econômico. Por exemplo, o projetista pode determinar como a mudança na espessura de parede da peça, ou a mudança no material, afetará o tempo de resfriamento da peça ou tempo de ciclo e assim sendo o custo final de produção da peça.

Outro fator importante nos processos de injeção está relacionado aos erros de forma ou imperfeições comumente conhecido por empenamento. Estudos realizados por Leães (2008), Kitayama et al. (2018) indicam que o empenamento de peças plásticas é um dos problemas mais comuns encontrados por aqueles que utilizam a moldagem por injeção, sendo que este é também um dos fenômenos mais difíceis de prever.

Uma estimativa de tempo de ciclo e empenamento pode ser obtida com o auxílio de um sistema integrado de simulação do processo de moldagem por injeção, aliado a um planejamento experimental que auxilia na identificação dos fatores mais relevantes. Este tipo de análise fornece informações sobre o tempo de resfriamento, e o mais importante, permite que o projeto do sistema seja otimizado de modo a alcançar o balanceamento e eficiência na refrigeração em peças injetadas. (LEÃES, 2008)

De acordo com Kamal, Isayev e Liu (2009), problemas típicos que resultam de distribuições de temperatura irregulares envolvem mau comportamento mecânico, empenamento e contração. A distribuição de temperatura, que influencia tanto o fluxo quanto o comportamento de solidificação / cristalização, afeta a massa do produto final e o tempo necessário para resfriar.

Kamal, Isayev e Liu (2009) cita que o empenamento é determinado principalmente pelas condições de refrigeração, que são novamente resultado de distribuições de espessura de parede e condições térmicas na cavidade. Devido à complexidade dos efeitos de interação e os valores de empenamento dependem fortemente da posição de medição e do material processado.

Rosato e Rosato (2012) relatam que o empenamento é o resultado do tensionamento desigual da parte moldada quando a tensão é forte o suficiente para esticar ou distorcer a peça. A deformação pode ser causada pela natureza do material, projeto da peça inadequado, projeto de molde deficiente e condições de moldagem incorretas.

Lim, Auras e Rubino (2008) citam que para garantir que a peça é dimensionalmente estável o suficiente para suportar o curso de abertura

dos moldes, deve ser dado tempo suficiente de resfriamento. No ciclo de moldagem, a remoção de calor ocorre predominantemente durante as fases de preenchimento, espera e refrigeração, embora a fase de abertura do molde também contribua para a refrigeração parcial, pois um lado da peça ainda está sendo resfriado antes da extração. Ainda relatam que o tempo de ciclo é um parâmetro importante do processo que é muitas vezes minimizado para maximizar o rendimento da produção.

Pelo exposto anteriormente, constata-se que o tempo de resfriamento é o principal fator contribuidor na composição do tempo de ciclo de injeção. Vários estudos do processo de moldagem por injeção pesquisaram sobre sua importância, contudo, estudos que relacionam parâmetros de processo e projeto de sistemas de refrigeração em geometrias diferentes não foram explorados, assim como a utilização de experimentos planejados fracionados, completos e superfície de resposta no auxílio da análise e direcionamento do estudo sequencial.

Desta maneira, este trabalho abordará a aplicação de simulações computacionais, para a otimização do desenvolvimento de sistemas de refrigeração em moldes de injeção com o uso de sistemas CAE e experimentos planejados. Como consequência direta, pretende-se identificar fatores de projeto e processo que melhorem a eficiência reduzindo o tempo de ciclo para aumentar a produtividade do molde e também obter uma redução no empenamento para atingir um nível aceitável de qualidade.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho será de avaliar conceitos de sistemas de refrigeração para moldes de injeção com uso de DOE e sistemas CAE.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho estão relacionados a identificar e quantificar os efeitos dos conceitos de sistemas de refrigeração

em moldes de injeção bem como:

- Avaliar o efeito da disposição do sistema de refrigeração, suas características geométricas e dimensionais com auxílio de experimentos virtuais fracionados e completos onde parâmetros de projeto e processo serão manipulados;
- Entender os efeitos destes sistemas de refrigeração e suas características aplicados em uma geometria do tipo placa plana simples e outra geometria estruturada de maior complexidade;
- Planejar, executar e analisar experimentos virtuais fracionados, completos e superfícies de resposta para identificar os parâmetros de projeto e processo que são significativos para a redução do tempo de ciclo e empenamento;
- Propor de um modelo com as melhores condições e resultados observadas nos estudos experimentais;
- Utilizar de materiais com estruturas diferentes para efeitos comparativos;

Com isto, espera-se identificar e compreender se existe a interação entre os parâmetros de processo e parâmetros de projeto e quais configurações destes parâmetros apresentam melhores resultados visando a redução do tempo de ciclo e a minimização do empenamento.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação apresenta a seguinte estrutura de organização:

Capítulo 1 - É apresentado uma introdução sobre a importância do processo de injeção bem como a importância do sistema de refrigeração e sua participação na composição do tempo de ciclo total, os objetivos e justificativas.

Capítulo 2 - Na revisão bibliográfica, onde são identificados as iniciativas que estão sendo pesquisadas atualmente em sistemas de

refrigeração em moldes de injeção, bem como as ferramentas de execução e análise de experimentos físicos e em ambiente virtuais.

Capítulo 3 - A metodologia que o projeto será conduzido. Neste caso o trabalho será baseado em modelagem experimental em ambiente virtual. A utilização de experimento planejados é amplamente aplicada para conduzir os estudos, bem como o auxílio de programa comercial de simulação de injeção para rodar os experimentos.

Capítulo 4 - Os resultados e discussões sobre os experimentos realizados, em que são elaborados os experimentos virtuais e uma abordagem de análise estatística é feito sobre os dados observados. Gráficos de probabilidade normal, Pareto e estimativa de direção são apresentados e por fim um resumo dos principais resultados atingidos e elaboração do modelo otimizado.

Capítulo 5 - Conclusão e considerações finais.

Capítulo 6 - Sugestão para trabalhos futuros.

As referências bibliográficas e os anexos completam o trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas as principais características do processo de injeção, parâmetros de processo, sistemas de refrigeração, métodos de simulação computacional e materiais.

2.1 PROCESSO DE INJEÇÃO

De acordo com Manrich (2005), um dos processos mais versáteis e modernos no campo da transformação e processamento dos polímeros é, sem dúvida, o da moldagem por injeção.

A utilização de peças injetadas de material plástico na década de 1940 restringia-se a produtos de no máximo alguns poucos gramas. Com o crescimento do mercado devido à alta aplicabilidade desses produtos, os pedidos aos transformadores passaram a se concentrar em peças maiores e mais complexas. (HARADA, 2006)

Os fatores responsáveis pelo crescimento mundial do consumo de plástico são de aceitação por parte do mercado consumidor, os avanços da ciência no desenvolvimento de novos plásticos, possibilitando substituir outros materiais e a possibilidade de produção de peça com formas geométricas complexas.(AHRENS, 1994)

O processo de injeção não é um processo contínuo, mas sim intermitente, seguindo um ciclo conhecido como ciclo de injeção. Esse ciclo pode possuir eventos que interceptam e eventos que só ocorrem após terminar o antecedente. Pode-se dizer que existe um ciclo com ocorrências sequenciais da rosca recíproca e um ciclo com eventos sequenciais do molde. No entanto os ciclos da rosca e do molde são independentes. Podemos dividir estes eventos em três estágios primários: preenchimento, recalque e resfriamento.(AHRENS, 1994)

Diversos fatores estão envolvidos no processo de moldagem por injeção e têm uma grande influência na peça injetada, como a formabilidade do material, características da máquina de moldagem, projeto do molde e condições do processo.(SPINA, 2004)

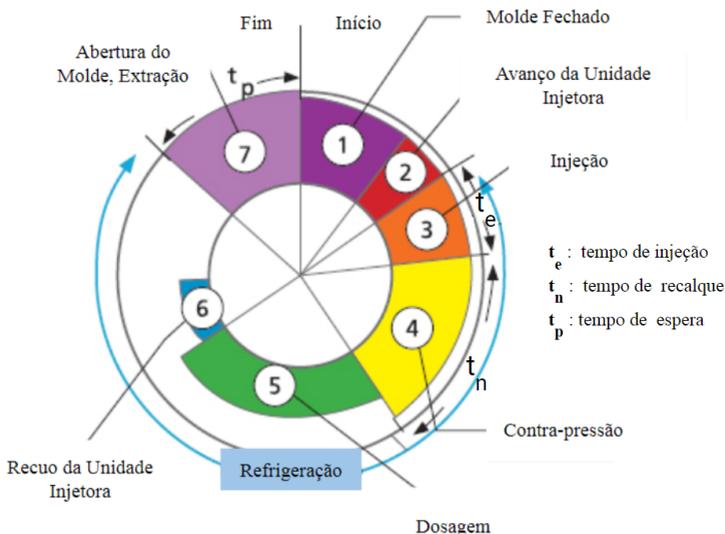
Kulkarni (2017) relata que a peça final moldada é um resultado

de cinco fatores críticos, que precisam ser cuidadosamente selecionados, por saber: Projeto da peça, seleção do material, projeto e construção do molde, máquina de moldagem e o processo de moldagem.

Zheng, Tanner e Fan (2011) citam que em moldagem por injeção, o molde tem duas funções: (1) dar forma à peça que será fabricada e (2) extrair calor do material para solidificar a peça o mais rápido possível. O sistema básico de refrigeração consiste nas linhas de resfriamento na forma de furos circulares, de modo que o líquido refrigerante que flui através das linhas de resfriamento extrairá o calor do polímero quente que derrete.

Sabogal (2013) cita que cada peça é produzida por meio de um ciclo de injeção, que é composto por estágios primários: injeção, recalque e refrigeração conforme Figura 1 e estágios secundários: abertura e fechamento do molde, extração, avanço e recuo da unidade injetora e dosagem.

Figura 1 – Ciclo de Moldagem por Injeção



Fonte: Adaptado (SABOGAL, 2013)

Em simulações de moldagem por injeção, a análise da refrigeração de molde é essencial para dois propósitos segundo Zheng, Tanner e Fan (2011), o primeiro é ser usado como uma ferramenta numérica para o projeto de sistemas de refrigeração, e o segundo é fornecer condições de contorno térmico para análises de preenchimento e recalque.

Goodship, Middleton e Cherrington (2016) relatam que o principal objetivo do sistema de refrigeração em moldes é minimizar o tempo de ciclo e as diferenças térmicas na refrigeração das peças moldadas. A refrigeração do molde é, portanto, essencial para a economia de custos e o controle de qualidade. A refrigeração uniforme melhora a qualidade do produto, evitando o encolhimento diferencial, alto estresse residual e problemas de extração do molde. Portanto, ao projetar uma ferramenta de molde de injeção, o tamanho e a distribuição dos canais de refrigeração são de extrema importância.

De acordo com Leães (2008) a primeira fase do processo de moldagem por injeção é o preenchimento, que vai do primeiro momento em que o material entra no molde fechado até a fase de recalque. A fase seguinte é o recalque, nesta fase é adicionado uma quantidade extra de polímero na cavidade já preenchida com intuito de compensar os efeitos de contração do material que ocorre durante seu resfriamento. Esse fluxo influencia a distribuição de tensões de cisalhamento, principalmente próximo à *interface* sólido/fundido, devido à menor temperatura e como consequência uma maior viscosidade do fundido.

Se o tempo em que é aplicada pressão no empacotamento for curto demais, o fluxo pode retornar para os canais de injeção e para o cilindro, o que pode gerar uma orientação adicional. A fase de refrigeração se inicia após a injeção do material, passa pelo empacotamento e resfriamento. O fundido se solidifica assim que entra em contato com as paredes do molde, formando uma camada solidificada. Esta camada age como isolante térmico, permitindo um resfriamento lento do centro do moldado.

O processo de transferência de calor dentro do molde continua até que a peça tenha rigidez suficiente para ser ejetada, enquanto a peça se encontra na cavidade do molde, a ocorrência de encolhimento e empenamento é impedida mecanicamente pelas paredes do molde.

A grande maioria dos processos de manufatura requerem cuidados no controle da temperatura da superfície, e na taxa de transferência de calor, visando aumentar a produção e melhorar a qualidade. Para peças moldadas, a transferência de calor é usualmente obtida usando canais de refrigeração usinados no molde através do processo de furação manual.(BROOKS; BRIGDEN, 2016)

2.2 PARÂMETROS DE PROCESSO

Fischer (2003), Kitayama et al. (2018), Singh, Pradhan e Verma (2018) relatam que os parâmetros de processo têm um papel significativo na contração e no empenamento da peça. Os efeitos causados pela manipulação desses fatores também se manifestam sob formas de interações, sejam uns com os outros ou com o material e condições do molde.

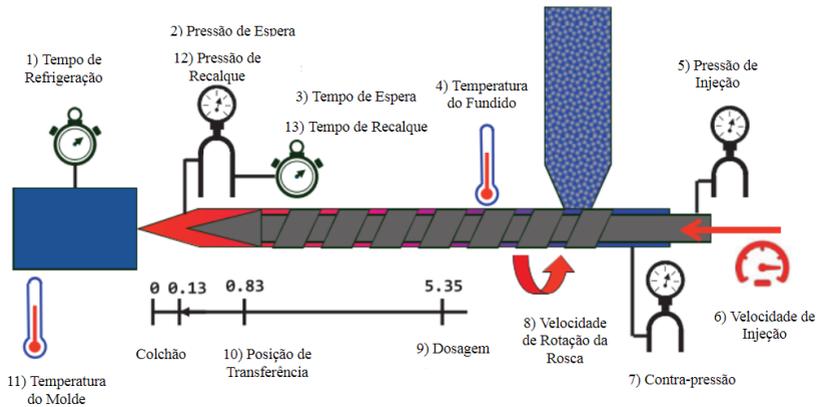
Kulkarni (2017) acrescenta que existem 11 parâmetros primários de processo na máquina de moldagem que influenciam diretamente a qualidade do produto.

Ainda relata que vários parâmetros determinam um processo de moldagem bem sucedido, como velocidades, pressões, tempos e temperaturas a serem considerados. Dentre eles podemos destacar: a temperatura do material fundido (4), a temperatura do molde (11), a velocidade (5) e a pressão de injeção (6), a pressão (12) e o tempo de recalque (13), o tempo de refrigeração (1) entre outros que são ilustrados na Figura 2.

Estes não incluem parâmetros como velocidades de abertura ou fechamento do molde. Ainda relata que na maioria dos processos de moldagem, a fase de contrapressão, consiste em apenas uma sub-fase conhecida como fase de retenção.

Em alguns casos, os moldadores diferenciam a fase de compensação em duas fases conhecidas como a recalque e a fase de espera. Em tais casos, mais 2 parâmetros são adicionados aos 11 parâmetros primários, então o número total de parâmetros é 13. Na sequência serão apresentados alguns parâmetros de processo que podem influenciar a

Figura 2 – Parâmetros de Processo Primários



Fonte: Adaptado de (KULKARNI, 2017)

qualidade da peça moldada.

2.2.1 Velocidade de Injeção

Martins e Silva (2015) descrevem a velocidade de injeção dada geralmente em $[cm/s]$, como sendo a velocidade de avanço do fuso durante a fase de preenchimento da cavidade do molde.

A velocidade de injeção tem uma influência de aquecimento secundário do plástico a medida que este entra na cavidade é gerado calor por fricção na restrição do canal de injeção e entre o material fluído contra o material que já se solidificou junto à parede da peça. Se a velocidade é muito baixa o material começa a resfriar antes do preenchimento completo da cavidade e a pressão requerida para esse preenchimento aumenta. (FISCHER, 2003)

O preenchimento é uma fase crítica durante o processo de moldagem por injeção devendo por isso ser controlado convenientemente. Geralmente o tempo de injeção resulta da definição de um perfil de velocidades do fuso, o qual vai originar diferentes níveis de pressão durante a injeção. (JORGE; PINTO, 2012)

As velocidades de injeção devem ser ajustadas com rapidez sufici-

ente para que o plástico ainda esteja no estado fundido até que o molde completo seja preenchido até o requisito ideal.(KULKARNI, 2017)

2.2.2 Pressão de Injeção

Designa-se por pressão de injeção a pressão máxima que se desenvolve durante a fase de preenchimento. Esta pressão é o resultado do esforço necessário para garantir o enchimento de um determinado material, numa impressão com uma geometria específica, e à velocidade ajustada pelo operador.(MARTINS; SILVA, 2015)

A pressão de injeção deve ser suficientemente alta para preencher a cavidade. Altas pressões tendem a minimizar a contração. Normalmente, existe variação de pressão na cavidade, desde o canal de injeção até o último ponto a preencher. Se a diferença de pressão for muito grande, pode ocorrer o encolhimento não -uniforme gerando empenamento ou tensões residuais.(FISCHER, 2003)

Kulkarni (2017) comenta que se a viscosidade do plástico aumentar, o esforço ou a pressão necessária para manter a velocidade definida também aumentará, então é importante que a velocidade seja mantida constante durante a injeção.

2.2.3 Temperatura de Injeção

Jorge e Pinto (2012) descrevem como sendo a temperatura de injeção aquela à qual o material sai do bico da máquina injetora e entra no canal da bucha do molde de injeção para os casos em que a injeção é direta.

Ainda relatam que avaliando os produtos finais, constata-se que a variação de temperatura do fundido deve ser tanto menor quanto possível, visto que a uniformidade de temperatura da peça durante a refrigeração é um fator essencial para a obtenção de peças que satisfaçam os requisitos de qualidade exigidos.

Para Fischer (2003) tanto valores muito baixos quanto altos podem ocasionar empenamento. Quando a temperatura de injeção é

muito baixa, o polímero mal preenche a cavidade antes que o canal de injeção se solidifique.

O plástico precisa estar em um estado fundido para ser injetado no molde. Os aquecedores em volta do canhão de injeção aquecem, o que conduz o calor para o plástico no interior para ajudar no derretimento. Dependendo do comprimento do canhão, pode haver várias faixas de aquecedor, e a temperatura para cada uma delas terá que ser ajustada individualmente, dependendo do material que precisa ser processado.(KULKARNI, 2017)

2.2.4 Tempo e Pressão de Recalque

Esta variável corresponde à pressão aplicada sobre a peça moldada após o final do preenchimento, com o intuito de compensar a contração volumétrica que o material sofre durante a refrigeração.(MARTINS; SILVA, 2015)

A pressão de recalque aparece frequentemente como um dos fatores mais importantes tanto para o empenamento quanto para a contração, entretanto, nem sempre esses problemas podem ser resolvidos simultaneamente considerando somente esta variável.(FISCHER, 2003)

A fase de compactação inicia-se imediatamente após a fase de preenchimento e deverá ser prolongada até que o ponto de injeção ou o ataque solidifique para que o material que está dentro da cavidade do molde não retorne.(JORGE; PINTO, 2012)

Kulkarni (2017) comenta que a pressão da recalque é um dos parâmetros mais importantes que determina a contração e, portanto, as dimensões da peça. E ainda comenta que o tempo de recalque é tempo para o qual a pressão da recalque é aplicada.

2.2.5 Temperatura do molde e tempo de refrigeração

A refrigeração inicia-se a partir do momento em que o polímero entra em contato com as paredes da cavidade. No entanto, designa-se por tempo de refrigeração o período após a fase de pressurização, necessário para permitir a adequada extração da peça. E ainda relatam que a

temperatura das superfícies moldantes é uma variável crítica do processo, que deve ser criteriosamente controlada por questões de produtividade e de qualidade do produto final.(MARTINS; SILVA, 2015)

A temperatura do molde afeta a taxa de refrigeração. Quanto mais rápido uma peça é resfriada, menor o tempo que as moléculas individuais têm para se reorganizarem e a contração é maior.(FISCHER, 2003)

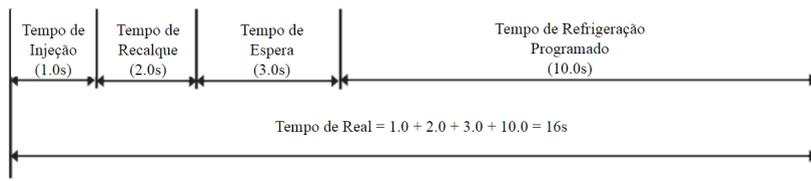
Para cada material termoplástico existe uma gama recomendada para a temperatura de superfície do molde a utilizar que normalmente é especificada pelos fabricantes do material.(JORGE; PINTO, 2012)

Para Kulkarni (2017) a temperatura do molde é ajustada usando controladores onde circula um fluido para transferência de calor, como a água do óleo. Normalmente, a água é usada para atingir temperaturas abaixo de 100°C, e o óleo é usado para atingir temperaturas mais altas.

Ainda descreve que o tempo de refrigeração é o momento em que o molde é mantido fechado para resfriar o plástico até a temperatura de extração. Uma vez decorrido o tempo de refrigeração, o molde abre e a peça é extraída. É importante entender que este é o tempo de refrigeração programado e não o tempo real de refrigeração.

O plástico começa a esfriar assim que o plástico toca o molde, portanto, o tempo real de refrigeração é igual ao acréscimo do tempo de injeção (tempo de preenchimento), tempo de recalque, tempo de espera e tempo de refrigeração programado conforme a Figura 3.

Figura 3 – Tempo de Refrigeração Programado e Real



Fonte: Adaptado de (KULKARNI, 2017)

Neste trabalho os valores de tempo de ciclo que serão medidos serão baseados no tempo real, ou seja, o tempo de ciclo medido é o somatório do tempo de injeção, tempo de recalque, tempo de espera e tempo de refrigeração programado.

2.2.6 Temperatura de Desmoldagem

A temperatura de desmoldagem ou temperatura de extração é a temperatura que deve ser atingida na região mais quente da peça (usualmente o centro da parede mais espessa) antes da peça se extraída do molde sem riscos de distorção devido a falta de rigidez.(FISCHER, 2003)

O controle da temperatura do molde deve dar origem a uma refrigeração uniforme e que a peça ao ser desmoldada apresente uma temperatura superficial tanto mais constante quanto possível.(JORGE; PINTO, 2012)

2.3 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO EM MOLDES DE INJEÇÃO

Kulkarni (2017), Park e Dang (2017), Kitayama et al. (2018) argumentam que o molde é basicamente uma unidade de transferência de calor, no qual o plástico quente fundido é injetado na cavidade do molde, onde é resfriado até ser extraído para fora do molde. O molde é mantido a uma temperatura mais baixa em comparação com o fundido, o que é suficiente para resfriá-lo até atingir a temperatura de extração.

Em moldagem por injeção, o molde tem duas funções: (1) dar forma à peça que será fabricada e (2) extrair calor do material para solidificar a peça o mais rápido possível. O sistema básico de refrigeração consiste nas linhas de resfriamento na forma de furos circulares, de modo que o líquido refrigerante que flui através das linhas de resfriamento extrairá o calor do polímero quente que derrete.(ZHENG; TANNER; FAN, 2011)

O principal objetivo do sistema de refrigeração em moldes é minimizar o tempo de ciclo e as diferenças térmicas na refrigeração das peças moldadas. A refrigeração do molde é, portanto, essencial para a

economia de custos e o controle de qualidade. A refrigeração uniforme melhora a qualidade do produto, evitando a contração diferencial, alto estresse residual e problemas de extração do molde. Portanto, ao projetar um molde de injeção, o tamanho e a distribuição dos canais de refrigeração são de extrema importância. (GOODSHIP; MIDDLETON; CHERRINGTON, 2016)

Para auxiliar no projeto de sistemas de refrigeração são amplamente aplicadas simulações de injeção como ferramenta para auxiliar o projeto. Zheng, Tanner e Fan (2011) destaca que a análise da refrigeração do molde é essencial para dois propósitos, o primeiro é ser usado como uma ferramenta numérica para o projeto de sistemas de refrigeração, e o segundo é fornecer condições de contorno térmico para análises de preenchimento e recalque.

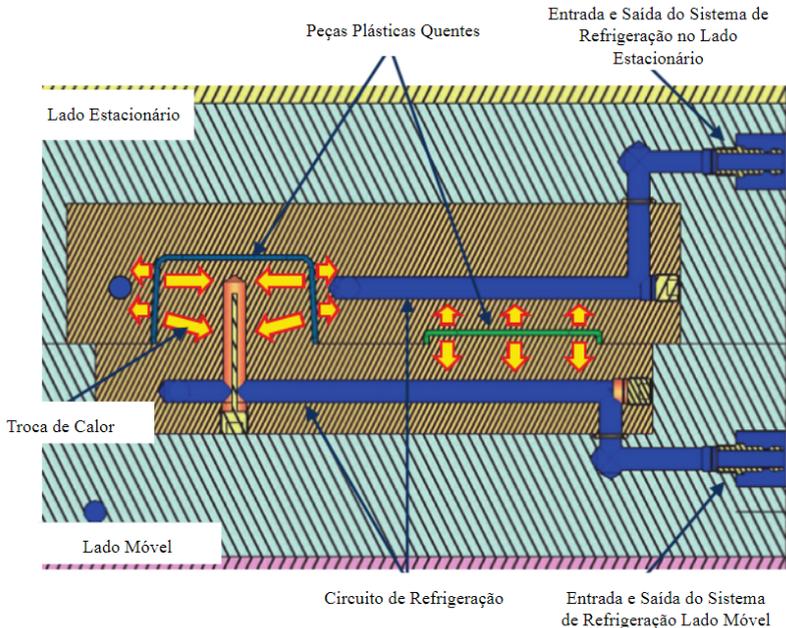
Dangel (2016), Park e Dang (2017) citam que a tarefa básica do sistema de refrigeração é manter constante o equilíbrio da temperatura do molde de injeção durante todo o tempo de produção. Acontece frequentemente que, devido a refrigeração insuficiente, a temperatura de um molde de injeção sobe lentamente, total ou parcialmente. Mesmo que seja apenas $0,5^{\circ}\text{C}$ de aumento de temperatura durante um dia de trabalho, mais cedo ou mais tarde a qualidade da peça irá mudar e, como consequência, o tempo de ciclo se estenderá.

Ainda relata que o sistema de refrigeração deve receber atenção especial durante o projeto e a construção do molde de injeção. A troca de calor entre o material fundido na cavidade e o molde de injeção é decisivo tanto para a qualidade da peça plástica quanto para o sucesso econômico do transformador final. Ambos podem depender do tipo, projeto e capacidade do sistema de refrigeração.

Dangel (2016), Venkatesh e Ravi Kumar (2017) comentam que o sucesso em moldagem por injeção é atingido quanto o menor o tempo de ciclo é alcançado, mais peças plástica podem ser feitas em um tempo predeterminado. Quanto mais rápido a peça plástica no molde solidificar o suficiente para ser extraída, mais cedo o molde pode abrir e extrair a peça. O transformador final está interessado em uma refrigeração de alta capacidade no molde de injeção.

A Figura 4 apresenta como ocorre a transferência de calor em moldes de injeção. O calor das peças plásticas é conduzido até os canais de refrigeração mais próximos que tem função de transportá-lo até a saída do sistema de refrigeração.

Figura 4 – Sistema de Refrigeração em Moldes de Injeção



Fonte: Adaptado de (DANGEL, 2016)

A velocidade de transmissão de calor pode determinar o tempo de refrigeração necessário, tempo este que aumenta proporcionalmente ao quadrado da espessura da parede no molde. De acordo com Harada (2006), Park e Dang (2017) se o calor transferido da peça para o molde for maior do que a quantidade que este pode normalmente dissipar, devem-se utilizar outros meios para remoção desse excesso de calor, reduzindo este tempo de refrigeração, para obter peças de boa qualidade.

Yang et al. (2016), Prashanth Reddy e Panitapu (2017) relatam que o tempo de refrigeração, que ocupa a maior parte do tempo do ciclo

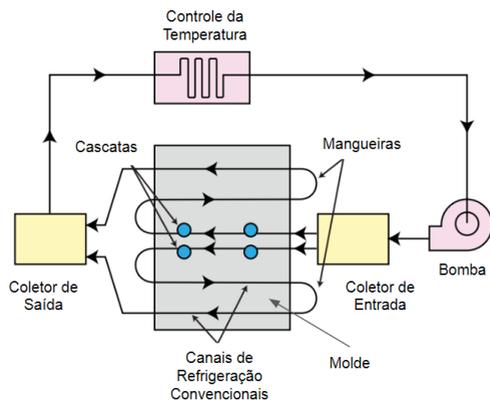
de injeção, tem efeitos críticos na qualidade e produtividade das peças. Tempo de refrigeração insuficiente leva a inconsistência nas molduras, enquanto um excesso aumenta o custo do processo de moldagem por injeção.

Os canais de refrigeração devem ser organizados para remover o calor de maneira que toda a peça moldada e canais de alimentação sejam resfriados na mesma taxa. Onde existem ambas seções de peças grossas e finas, a capacidade do sistema de refrigeração nas áreas espessas deve ser maior de modo que as seções grossas se resfriem na mesma taxa como as seções finas.(FISCHER, 2003)

Para Shoemaker (2006) o molde de injeção pode ser considerado como um trocador de calor, onde o calor do material aquecido é transportado pelo fluido refrigerante. Normalmente consistem de um sistema de bombeamento até o coletor de entrada que posteriormente distribui nos canais de refrigeração atravessando o molde chegando até ao coletor de saída, então a partir deste ponto segue para um trocador de calor e depois retorna para um novo ciclo.

A Figura 5 ilustra este esquemático em um sistema de refrigeração em série para moldes de injeção.

Figura 5 – Sistema de Refrigeração em Moldes



Fonte: Adaptado de (SHOEMAKER, 2006)

A velocidade de refrigeração depende da temperatura do molde que, por sua vez, influencia o fluxo do material, sua contração e a aparência do produto moldado.

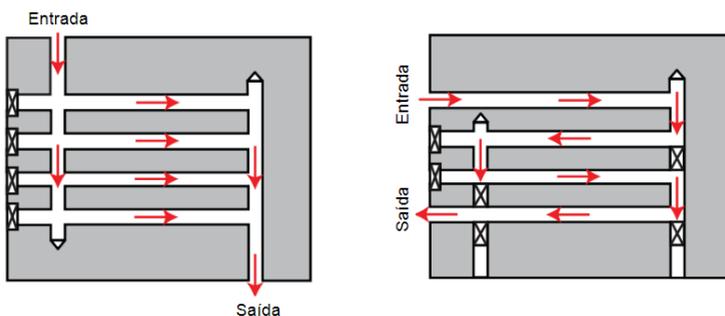
Os canais de refrigeração paralelos são perfurados diretamente do coletor de entrada até o coletor de saída. Devido às características de escoamento, nos canais em paralelo a vazão ao longo de vários canais de refrigeração será diferente devido às diferenças de resistência individual de cada canal.

Como descrito por Shoemaker (2006), os canais de refrigeração podem apresentar configuração de circulação do tipo em paralelo ou em série. Os canais em série são canais de refrigeração conectados a um circuito único desde a entrada até a saída, por este motivo são ditos canais em série.

Este tipo de configuração é mais comumente recomendado pois se forem uniformes em tamanho, o refrigerante pode manter a sua vazão turbulenta em todo o seu comprimento. (SHOEMAKER, 2006)

A Figura 6a apresenta um exemplo de canal de refrigeração em paralelo onde o escoamento é ramificado em diferentes canais e a Figura 6b um exemplo de canal de refrigeração em série no qual o fluido tem um caminho único a seguir desde a entrada até a saída.

Figura 6 – Canais de Refrigeração em (a) Paralelo, (b) Série



(a) Paralelo

(b) Série

Fonte: Adaptado de (SHOEMAKER, 2006)

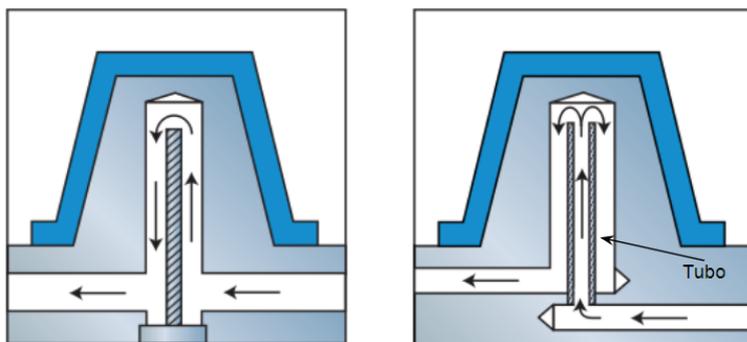
Outros sistemas de refrigeração comumente usados são os *Baffles* e *Bubbler*, ou também chamados de defletores e borbulhadores que são seções de linhas de refrigeração que desviam o fluxo refrigerante para áreas que normalmente não teriam refrigeração.

Os defletores são na verdade canais de refrigeração perfurados perpendicularmente a uma linha de refrigeração principal com uma lâmina separando uma passagem de refrigeração em dois canais semi-circulares. O refrigerante flui em um lado da lâmina a partir da linha de refrigeração principal, gira em torno da ponta para o outro lado do defletor e, em seguida, volta para a linha de refrigeração principal.

De acordo com Shoemaker (2006) os borbulhadores são semelhantes aos defletores, exceto que a lâmina é substituída por um pequeno tubo. O refrigerante flui para o fundo do tubo e borbulha para fora do topo, como uma fonte. O refrigerante então flui em torno do exterior do tubo para continuar seu fluxo através dos canais de refrigeração.

A Figura 7a ilustra um exemplo de um sistema de refrigeração do tipo defletor em que o fluido sobe e desce retornando a linha principal e a Figura 7b ilustra um exemplo de um borbulhador em que o fluido borbulha e retorna por fora do tubo.

Figura 7 – Sistemas de Refrigeração do tipo (a) Defletor, (b) Borbulhador



(a) Defletor / *Baffles*

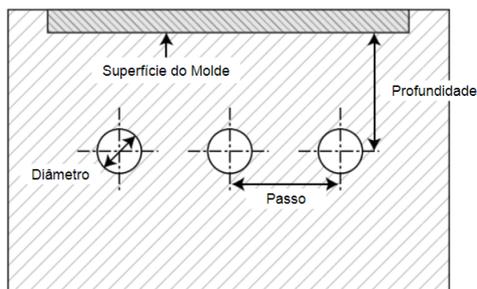
(b) Borbulhador / *Bubbler*

Fonte: Adaptado de (SHOEMAKER, 2006)

Com relação a localização e dimensões dos canais de refrigeração, Shoemaker (2006) relata que a melhor localização é nos blocos que contém a cavidade e o núcleo do molde, comumente chamados de fêmea e macho.

A superfície do molde é a fronteira entre a peça e os canais de refrigeração. A profundidade, no caso a distância do centro do canal até a superfície do molde, o passo ou espaçamento dos canais de refrigeração, o diâmetro dos canais e a condutividade térmica do material do molde têm grande impacto e são configurações que requer atenção para entender a distribuição da temperatura. A Figura 8 identifica os principais fatores críticos que devem ser considerados em um projeto de refrigeração.

Figura 8 – Fatores críticos no projeto de sistema de refrigeração

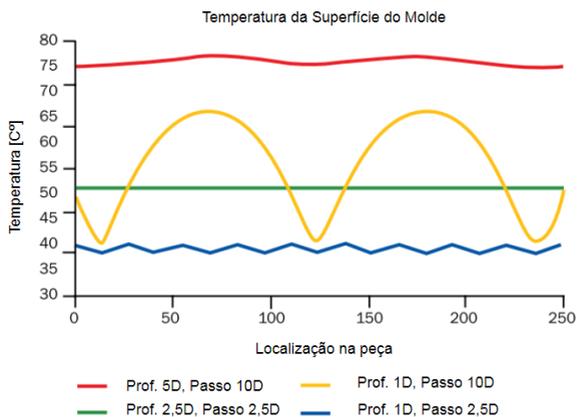


Fonte: Adaptado de (SHOEMAKER, 2006)

Na Figura 9 são ilustrados quatro exemplos de combinações entre a profundidade e o passo em função do diâmetro (D) para um projeto de refrigeração, onde nota-se que a melhor combinação é a que apresenta menor variação e menores valores conforme é observado na curva em azul (Prof.1D, Passo 2,5D).

O material do molde é o aço P20 de condutividade térmica variando de 10 a 40 $[W/m.^{\circ}C]$. Para cada combinação são plotadas as curvas da temperatura na superfície do molde em função da localização dos canais de refrigeração abaixo da peça. De maneira geral, segundo Shoemaker (2006) a diferença de temperatura na peça em ambos os

Figura 9 – Variação da temperatura da superfície do molde para diferentes combinações de passo e profundidade (Prof.)

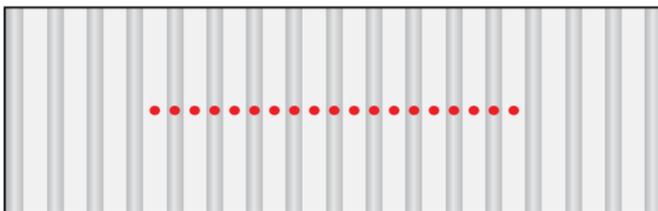


Fonte: Adaptado de (SHOEMAKER, 2006)

lados deve ser a menor possível, e a temperatura da superfície do molde não deve exceder 10°C para peças que requerem tolerâncias apertadas.

A Figura 10 ilustra a localização onde a temperatura foi medida e os pontos vermelhos indicam a localização da medição da temperatura, na qual está posicionada diretamente acima do circuito de refrigeração e na metade do comprimento dos canais.

Figura 10 – Medição da temperatura



Fonte: Adaptado de (SHOEMAKER, 2006)

Shoemaker (2006) afirma que, a diferença de temperatura da refrigeração entre a entrada e a saída deve estar entre 5°C para a grande maioria dos moldes e 3°C para moldes de alta precisão, valores maiores podem acarretar em má eficiência do sistema e perdas na troca de calor.

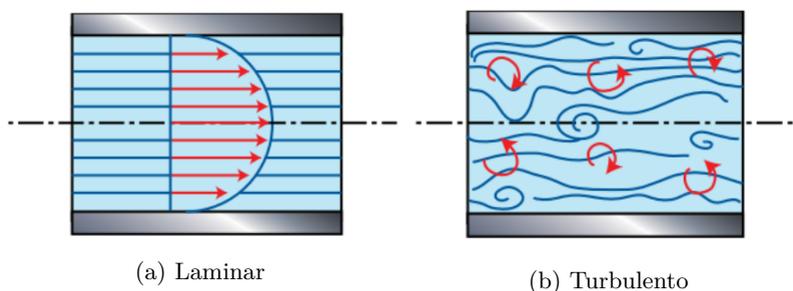
Para moldes de grande porte, é recomendado mais de um canal de refrigeração em série para garantir uniformidade das temperaturas e obter um resfriamento uniforme do molde.

Segundo Shoemaker (2006), o efeito da transferência de calor aumenta à medida que o fluxo de refrigeração muda de escoamento laminar para turbulento.

Para o escoamento laminar, o calor pode ser transferido apenas por meio de condução de calor de camada para camada, no entanto para o escoamento turbulento, a transferência de massa ocorre na direção radial e permite que o calor seja transferido por condução e convecção.

A Figura 11a ilustra o comportamento de um escoamento do tipo laminar, nota-se uma regularidade nas linhas de corrente para este tipo de escoamento e na Figura 11b é ilustrado o escoamento do tipo turbulento, onde é observado maior desorientação do fluxo.

Figura 11 – Escoamento (a) Laminar, (b) Turbulento



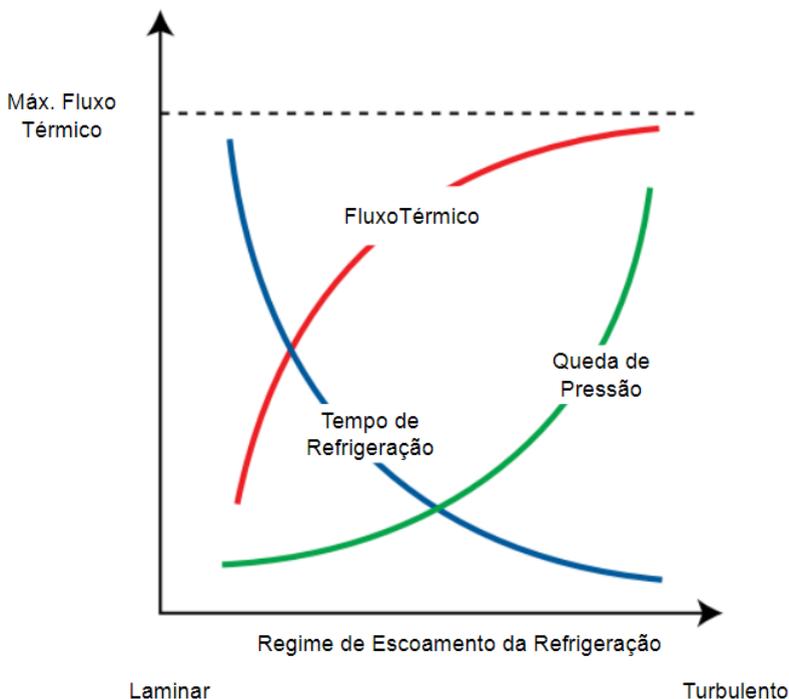
Fonte: Adaptado de (SHOEMAKER, 2006)

Ainda afirma que uma vez atingida a turbulência, o aumento da transferência de calor diminuirá à medida que o fluxo de refrigerante se tornar maior, portanto, não há necessidade de aumentar a vazão quando

o *Número de Reynolds* estiver entre 10000 e 20000. Caso contrário, a pequena melhoria marginal na transferência de calor será compensada pela maior queda de pressão nos canais de refrigeração juntamente com mais gastos com bombeamento.

A Figura 12 ilustra que uma vez que o escoamento se torna turbulento, ou seja, da esquerda para a direita no eixo horizontal, este traz retornos decrescentes no tempo de refrigeração e estabiliza o fluxo térmico, enquanto a queda de pressão aumenta.

Figura 12 – Relação entre o fluxo térmico e o fluxo de refrigeração



Fonte: Adaptado de (SHOEMAKER, 2006)

De acordo como Shoemaker (2006) o tempo de solidificação da peça em [s] é proporcional ao quadrado do espessura mais grossa da peça em [m] dividido pela difusividade térmica do polímero fundido

dada em $[m^2/s]$ e pode ser simplificado utilizando a Equação 2.1:

$$\text{Tempo de solidificação} = \frac{(\text{espessura mais grossa da peça})^2}{(\text{difusividade térmica})} \quad (2.1)$$

A difusividade térmica mede a taxa de transferência de calor de um material do lado quente para o lado frio e é dada pela Equação 2.2:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.2)$$

Onde:

k é a condutividade térmica do material $[W/m.K]$

ρ é a densidade $[kg/m^3]$

C_p é o calor específico $[J/kg.K]$

Segundo Kazmer (2016) outra equação para o tempo de refrigeração em função das temperaturas de injeção, refrigeração e extração pode ser aplicada. Para placas, o tempo mínimo de refrigeração teórico pode ser estimado pela equação 2.3:

$$t_c = \frac{h^2}{\pi^2 \cdot \alpha} \ln \left(\frac{4}{\pi} \frac{T_{inj} - T_{refri}}{T_{extr} - T_{refri}} \right) \quad (2.3)$$

Onde:

t_c é o tempo de solidificação da placa $[s]$

h é a espessura da placa $[mm]$

T_{inj} é a temperatura de injeção $[^\circ C]$

T_{refri} é a temperatura da refrigeração $[^\circ C]$

T_{extr} é a temperatura da extração $[^\circ C]$

α é a difusividade térmica do polímero $[m^2/2]$

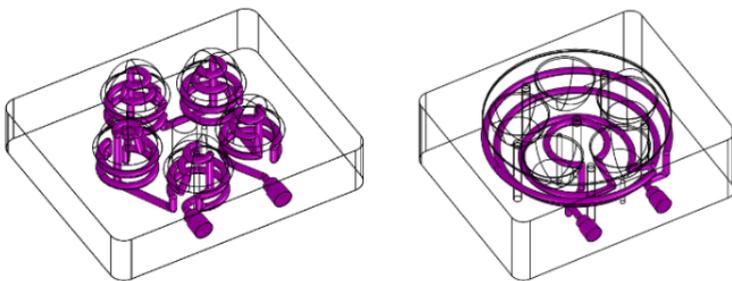
Wang, Yu e Wang (2015) relatam que o projeto do sistema de refrigeração é uma das mais importantes etapas na construção de moldes de injeção. A metodologia de utilização de sistema de refrigeração otimizado pode melhorar significativamente a eficiência e a qualidade da produção em peças plásticas injetadas.

Além dos canais de refrigeração convencionais apresentados, outros tipos de sistemas de refrigeração têm sido avaliados por Eiamsa-Ard e Wannissorn (2015), onde a utilização de moldes com canais de refrigeração conformados tem sido desenvolvido de maneira a reduzir o tempo de ciclo do processo de injeção de plástico, que por sua vez aumentou a produção.

Marques et al. (2015) relata que os canais de refrigeração dos moldes de injeção de plástico, devem estar o mais perto possível da geometria da peça de maneira a garantir rápida e homogênea refrigeração. Entretanto, os métodos convencionais de usinagem dos canais de refrigeração somente podem produzir canais lineares.

A Figura 13 ilustra exemplos de canais de refrigeração em série não convencionais do tipo conformados, fabricados por manufatura aditiva, onde pode-se observar que este tipo de canal contorna a geometria da peça, aumentando a eficiência na troca de calor e por consequência espera-se uma melhoria no tempo de ciclo.

Figura 13 – Canais de Refrigeração em Série Não Convencionais



Fonte: Adaptado de (MARQUES et al., 2015)

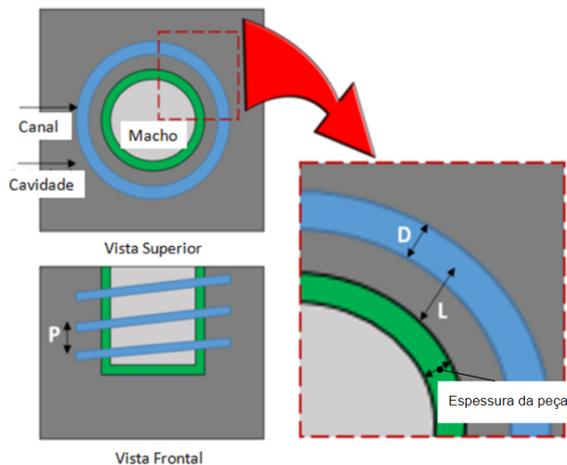
De maneira análoga, canais de refrigeração convencionais paralelos são usinados para o fluido refrigerante escoar de uma fonte distribuição até uma fonte coletora. A fonte coletora é projetada com diâmetros maiores do que os canais da cavidade.

Devido à característica de escoamento dos canais paralelos, a vazão ao longo dos canais de refrigeração pode sofrer mudanças, dependendo da resistência ao escoamento de cada canal individualmente. Esta variação na vazão causa uma eficiência na troca de calor que varia de um canal para o outro.

Estudos propostos por Jahan et al. (2016) em reduções no tempo de ciclo na moldagem de peças plásticas tem um significado importante para a indústria, onde experimentos planejados foram realizados, no qual três parâmetros de projeto foram selecionados e nomeados da seguinte maneira: diâmetro do canal (D), distância do passo (P), distância do centro do canal até a parede da peça (L).

Os parâmetros de projeto dos canais de refrigeração que foram manipulados no experimento são ilustrados na Figura 14.

Figura 14 – Parâmetros de Projeto do Experimento



Fonte: Adaptado de (JAHAN et al., 2016)

Uma abordagem sistemática é proposta para substituir os tradicionais canais de refrigeração alinhados em matrizes por um projeto otimizado não convencional. Diferentes seções dos canais de refrigeração também foram avaliadas e nos resultados nota-se que canais com seção

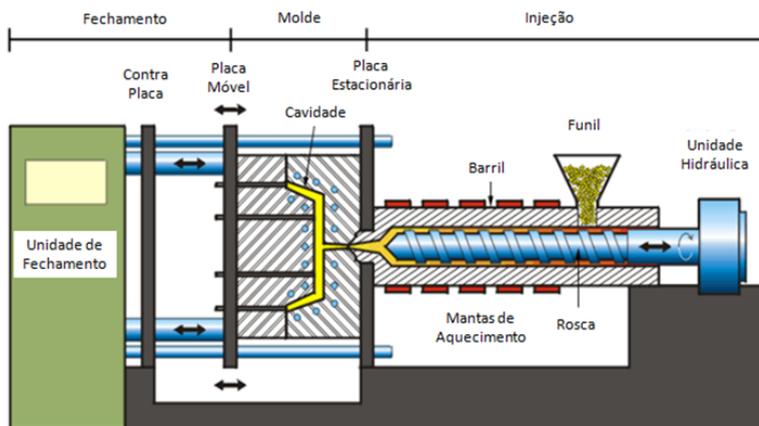
retangular tendem por melhor eficiência na remoção do calor, no entanto devido à limitação construtivas este tipo de geometria não é ideal para projetos de canais de refrigeração.

Jahan et al. (2016) afirma que o motivo no qual os canais de refrigeração retangulares são mais eficientes é devido ao fato de que a seção retangular possui maior região de contato beneficiando a troca térmica.

Vojnová (2016) aborda algumas vantagens na execução de canais de refrigeração otimizados, onde são comparados os impactos dos canais de refrigeração convencionais e os não convencionais, bem como a qualidade de peças plásticas e a tecnologia de fabricação. Ainda relata que a forma na qual ocorre a refrigeração e o aquecimento afetam a contração e mudanças de forma, e também a qualidade da superfície e componentes mecânicos do molde, bem como o preenchimento da cavidade, e o tempo de ciclo.

A Figura 15 ilustra um esquemático de uma máquina injetora de termoplásticos, onde são identificados as principais unidades e sistemas.

Figura 15 – Máquina Injetora para Termoplásticos



Fonte: Adaptado de (GOSSELIN, 2005)

Gosselin (2005) destaca que o aquecimento, e eventualmente

refrigeração das cavidades por uma temperatura prescrita, depende do balanço de energia das cavidades e do campo de temperaturas ao redor.

O lado fixo e lado móvel do molde podem ser resfriados independentemente nos moldes de injeção. Para atingir uma maior efetividade de remoção de calor, os canais de refrigeração precisam ser localizados tão perto quanto possível da geometria da cavidade (GOSSELIN, 2005).

De acordo com Vojnová (2016) a temperatura das peças moldadas e em especial as suas cavidades não é constante durante o processo de injeção. A flutuação da temperatura deve ser a menor possível e assim sendo, é necessário otimizar o processo de refrigeração, isto significa escolher o correto tamanho e distribuição dos canais, velocidade/vazão e uma correta temperatura do sistema de refrigeração.

Ainda argumenta que muitos fatores afetam o sistema de refrigeração tais como o tipo de material a ser injetado, devida as suas diferentes propriedades reológicas, o tamanho e a forma do molde também afetam pois requerem refrigerações mais elaboradas, e eventualmente o caminho de fluxo e as espessuras de parede da peça, por saber, peças mais espessas demoram mais para resfriar. Relata também que alguns cuidados para obter precisão nos moldes são necessários como por exemplo:

- Posicionar os canais de refrigeração o mais próximo possível da peça;
- Posicionar e dimensionar os canais de refrigeração de modo que o calor seja reduzido intensivamente das regiões onde o molde está em contato com o fluxo do material fundido;
- Ajustar o fluxo do material fundido de modo que o escoamento da refrigeração seja da região mais quente para a região mais fria;

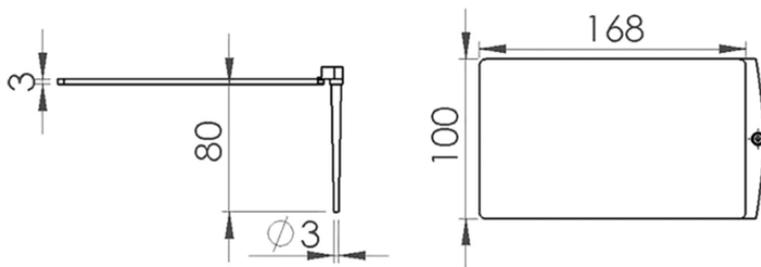
Na opinião de Vojnová (2016) escolher seções circulares para os canais de refrigeração é mais comumente observado por questões de manufacturabilidade, no entanto diferentes seções são possíveis, tais como retangulares, quadradas ou ovais, porém de difícil produção e alto custo. O mesmo afirma que os diâmetros dos canais de refrigeração

não podem ser menores que 6 mm de diâmetro, caso contrário existe o risco de entupimento por sujeira, neste caso, o uso de água tratada é necessário.

Huszar et al. (2015) ressalta que as propriedades térmicas dos materiais termoplásticos têm grande relevância na moldagem por injeção, assim como na análise dos sistemas de refrigeração. Dentre as propriedades mais relevantes o autor destaca a viscosidade do fundido, o calor específico e a condutividade térmica como sendo as mais críticas de todas.

Ainda ressalta que a melhor estimativa para pressão de injeção e tempo de refrigeração pode ser alcançada quando o calor específico do estado fundido foi adotado conforme o estudo computacional. Os estudos foram feitos usando uma geometria conforme ilustrado na Figura 16, na qual foi utilizada para determinar a região factível de injeção, ou janela de processo. Huszar et al. (2015) argumenta que a escolha de uma geometria simples foi feita para eliminar efeitos de complexidades geométricas e concentrar o estudo nas propriedades do material.

Figura 16 – Geometria da Placa Retangular



Fonte: Adaptado de (HUSZAR et al., 2015)

Ainda esclarece que com relação à melhoria no processo, o objetivo do estudo é duplo. O primeiro é evidenciar a importância da correção na tensão e taxa de cisalhamento aplicado na viscosidade aparente. O segundo é explorar os efeitos dos valores nos estados sólidos e fundido do calor específico e da condutividade térmica.

A Tabela 1 ilustra quais parâmetros de processo foram manipulados em seu experimento, em todos os casos o tempo de refrigeração foi ajustado para 30s.

Tabela 1 – Parâmetros de Processo

Tempo de Injeção [s]	Temperaturas do Molde [°C] para uma dada Temperatura de Injeção [°C]			
	Temperatura de Injeção	220	240	260
1	Temperatura do Molde	52	54	57
2		48	56	60
3		52	56	61

Fonte: Adaptado de (HUSZAR et al., 2015)

De acordo com o experimento realizado, o efeito das propriedades térmicas na estimativa do tempo de refrigeração indica que boa parte do calor é removida durante o estágio de refrigeração. É observado que existe uma relação complexa entre peça e projeto do molde e variáveis de processo, uma vez que a determinação do tempo de refrigeração real no qual a peça solidificará tem tido grandes mudanças.

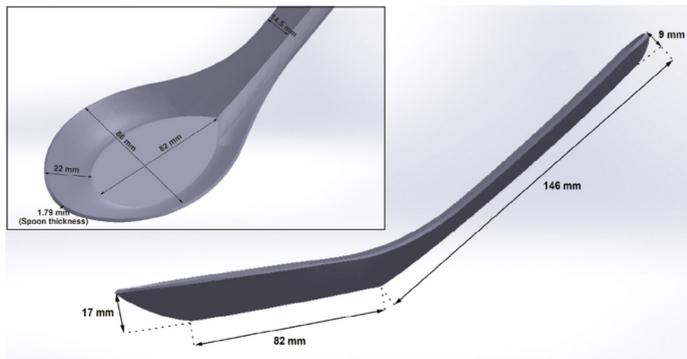
Oliaei et al. (2016) fornece um entendimento aprofundado sobre o processamento de três diferentes polímeros, onde são feitas uma análise sistemática dos materiais, simulações de injeção, aplicação de experimentos planejados considerando todos os efeitos das interações possíveis e também controlando cuidadosamente os parâmetros para polímeros biodegradáveis, incluindo o poli(ácido láctico) (PLA), o poliuretano termoplástico de poli(ácido láctico) (PLA-TPU) e o amido termoplástico de poli(ácido láctico) (PLA-TPS).

O experimento foi realizado utilizando a geometria de uma colher e suas dimensões principais são ilustradas na Figura 17.

Os experimentos foram conduzidos através do simulador de moldes de injeção *Autodesk Moldflow Insight* com objetivo de minimizar o empenamento e contração volumétrica para cada material mencionado.

A análise feita por Oliaei et al. (2016) considerou cinco (5) parâmetros de processo significativos sendo: temperatura da refrigeração, o tempo de recalque, a pressão de recalque, a temperatura do molde e a

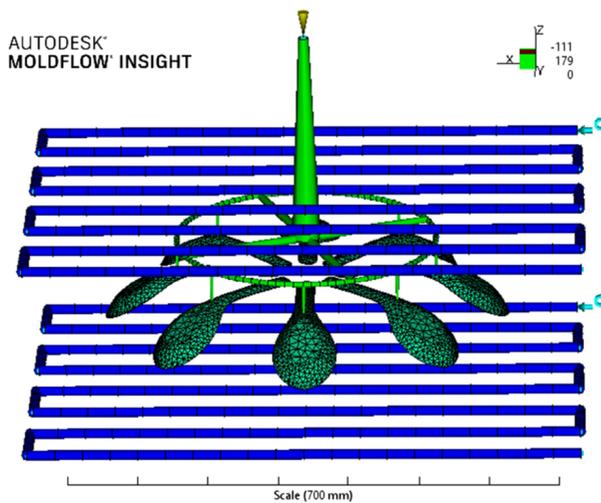
Figura 17 – Geometria da Colher



Fonte: Adaptado de (OLIAEI et al., 2016)

temperatura do material fundido. A geometria da colher, os canais de injeção e os canais de refrigeração foram modelados de acordo com a Figura 18.

Figura 18 – Sistema de injeção e refrigeração e geometria de estudo



Fonte: Adaptado de (OLIAEI et al., 2016)

Para o experimento foi adotado a metodologia *Taguchi* ortogonal como sendo um eficiente método para projetos que envolvem simulação de modo a considerar os efeitos de interação dos parâmetros e reduzir erros de simulação.

Foi observado por Oliaei et al. (2016) que os parâmetros de processo mais significativos e que afetam o empenamento e a contração de acordo com a literatura são:

- Temperatura da refrigeração;
- Tempo de recalque;
- Pressão de recalque;
- Temperatura do molde;

Após realizar o experimento, o autor pôde observar através dos estudos e simulações realizadas com o polímero PLA, e as misturas PLA-TPU e PLA-TPS que apesar da contração e o empenamento estarem interconectados, neste experimento eles foram considerados como objetivos separados para cuidadosamente não afetarem os estudos.

Os métodos *Taguchi* e *ANOVA* foram utilizados para estimar os níveis ótimos das condições de processo e mostrar os efeitos da temperatura da refrigeração, do tempo de recalque, da pressão de recalque, da temperatura do molde e da temperatura do fundido no empenamento e na contração dos polímeros.

Oliaei et al. (2016) relata que os resultados indicaram que alta pressão de recalque causa baixa contração e empenamento da colher. Quando o material PLA-TPU é usado, outra observação é de que a colher apresenta alta resistência ao empenamento e contração devido à baixa cristalinidade comparada com as outras duas amostras de outros materiais.

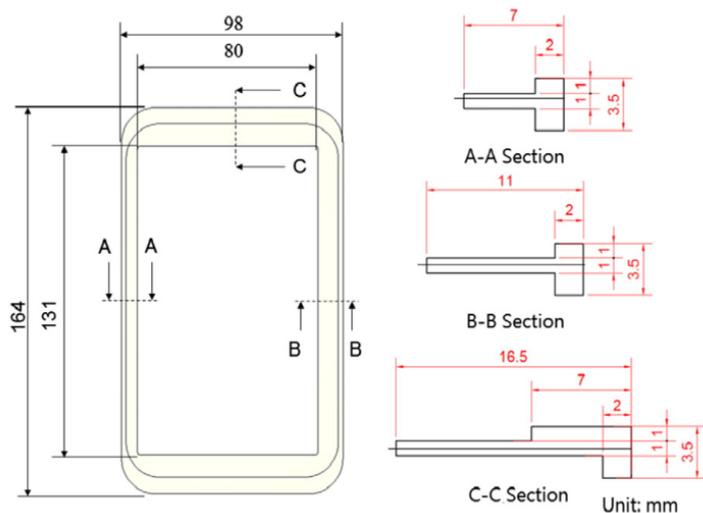
Ainda comenta que outro resultado importante observado é que a temperatura do fundido, a temperatura da refrigeração e o tempo de recalque são os fatores mais significativos para o empenamento e contração.

Alguns pontos observados e que não foram abordados nos estudos realizados por Oliaei et al. (2016) são o fato de considerar uma única geometria e variação no sistema de refrigeração nos diâmetros dos canais, direção longitudinal ou transversal.

Nian, Li e Huang (2015) argumenta que existem três condições importantes à serem levadas em consideração atualmente em projeto de produtos que são: serem leves, portáteis e convenientes. Entretanto, produzir peças finas que não empenem ainda é desafiador. Peças finas, na ordem de 1,5mm de espessura, e com alto comprimento de fluxo apresentam rápida solidificação nas camadas quando o polímero está escoamento pela cavidade do molde.

A Figura 19 ilustra a geometria de estudo, neste caso, uma capa protetora de um aparelho portátil fabricada em plástico injetado. Nota-se nas seções indicadas A-A, B-B e C-C uma variação na largura da borda de 7mm para 11mm e depois para 16,5mm.

Figura 19 – Geometria da Capa Portátil



Fonte: Adaptado de (NIAN; LI; HUANG, 2015)

De acordo com Nian, Li e Huang (2015) espessuras inconsistente, mau dimensionamento da bucha de injeção, canais de injeção e canais de ataque ou projeto do sistema de refrigeração ineficiente e condições impróprias configuradas podem causar empenamento excessivo em peças plásticas.

Embora a refrigeração do molde alcance através de ajustes de temperatura melhorar o empenamento, a convencional configuração de temperaturas do molde para as placas cavidade e macho tem capacidade de refrigeração limitada.

Nian, Li e Huang (2015) argumentam que o efeito da contração volumétrica desigual pode ser induzido por efeitos térmicos, pressão, geometria da peça e efeitos de orientação de fluxo. A temperatura causa principalmente mudanças no volume específico dos polímeros processados por moldagem de injeção.

Na moldagem de peças finas, o polímero fundido que entra na cavidade é rapidamente resfriado com a energia dissipada das superfícies da cavidade do molde. Consequentemente, a temperatura do polímero próximo superfície do molde são menores que as temperaturas no centro de injeção do polímero, gerando uma relativa baixa taxa de contração.

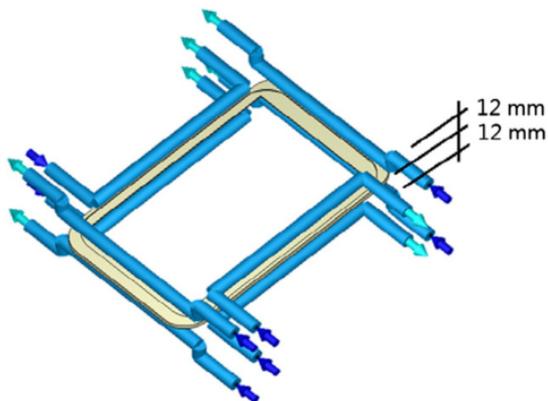
Além disso, porções mais espessas contraem mais do que porções finas. Então, peças que contenham espessuras desiguais terão contração não uniforme e consequentemente empenamento. Ainda comenta que a refrigeração diferencial resulta variação na contração da seção. A diferença entre a superfície superior e a inferior causa contração diferenciada entre a cavidade e o macho, produzindo um momento fletor após a peça ser extraída do molde.

De acordo com Nian, Li e Huang (2015) a distribuição dos canais de refrigeração e as propriedades dos materiais da cavidade e do macho também afetam a uniformidade da taxa de refrigeração. Ainda relata que os efeitos térmicos contribuem para geração de tensões internas em peças injetadas durante o processo de refrigeração, a camada externa ao longo da direção da espessura solidifica primeiramente e limita a direção da contração da camada interna, que solidifica depois.

Canais de refrigeração são favoráveis quando posicionados mais

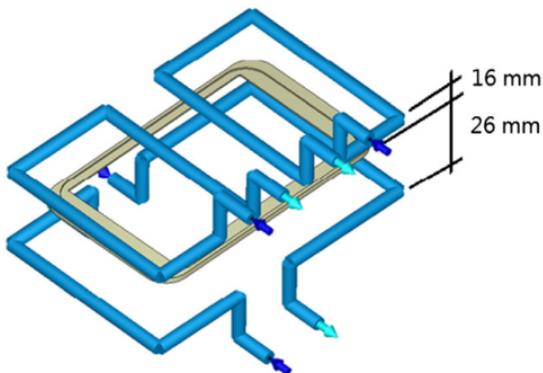
próximos possíveis da peça conforme Figura 20. Neste caso ambos estão afastados da geometria em 12mm.

Figura 20 – Canal de Refrigeração Próximo



Fonte: Adaptado de (NIAN; LI; HUANG, 2015)

Figura 21 – Canal de Refrigeração Afastado



Fonte: Adaptado de (NIAN; LI; HUANG, 2015)

Por outro lado, destaca que canais muito afastados conforme Figura 21 podem não promover uma boa transferência de calor, neste

caso, 16mm e 26mm respectivamente de afastamento da geometria, entretanto, variações na distância entre os canais de refrigeração e a peça podem facilitar o controle dos efeitos de refrigeração diferenciada.

Segundo Nian, Li e Huang (2015) a pressão de injeção e recalque são fatores cruciais que são afetados pelo volume específico do polímero.

De acordo com Berner (2016) os sistemas de refrigeração construídos pelo processo de furação são feitos em um circuito fechado no qual o fluido refrigerante é alimentado por uma entrada localizada ligeiramente ao lado da saída do circuito que está posicionado no mesmo nível e dependendo da altura da cavidade o circuito pode ter um único nível ou mais.

Estudos propostos por Berner (2016) apresentam uma tabela com as possíveis arquiteturas de sistemas de refrigeração combinados e de acordo com os testes realizados, sendo que foi observado que para ambos os materiais utilizados, no caso, ABS e PP, os canais em série se mostram mais eficientes que em paralelo. Berner (2016) observou que o tempo de ciclo é menor quando os canais estão mais próximos da superfície da peça.

Nian, Li e Huang (2015) afirma que em peças de espessura fina, o polímero é rapidamente solidificado. Perfis de recalque podem ser usados para estabelecer uma distribuição uniforme de contração volumétrica ao longo do produto moldado. No geral, pressões baixas causam aumento na contração volumétrica, e pressões altas reduzem a contração volumétrica.

Perfis de recalque escalonados geram uma contração volumétrica aproximadamente uniforme fazendo com que partes do material resfriado próximo da entrada de injeção resfriem tão efetivamente como se ele estivesse sob a mesma pressão que regiões afastadas da entrada de injeção.

A geometria da peça e as propriedades mecânicas têm papel crucial no empenamento, onde este depende da rigidez mecânica, na qual é função da configuração geométrica e das propriedades do material, ainda comenta que se a peça possui grande rigidez mecânica, empenará menos devido a variações na contração, a peça com rigidez mecânica menor empenará muito mais.

Ainda relata que a contração é também afetada pela direção de orientação do material. Sob tensão no escoamento, as moléculas do polímero se alinham com a direção do mesmo. A extensão da orientação depende da taxa de cisalhamento no qual o material está submetido. Conforme o material cessa o escoamento, a orientação molecular induzida começa a relaxar a uma taxa específica para cada material. Se o material congelar antes da relaxação estar completa, a orientação molecular é congelada.

Nian, Li e Huang (2015) notou na estimativa da direção do empenamento de peças de espessuras finas, que a velocidade de injeção e a pressão utilizada durante a moldagem, o incorreto projeto da bucha de injeção, o canal de distribuição, o ponto de injeção e canais de refrigeração contribuem significativamente para o empenamento. Um sistema de refrigeração que permita estabelecer controle individual das temperaturas também contribui significativamente para minimizar o empenamento.

Em síntese, podemos concluir que existem muitos fatores que oneram o tempo de ciclo e o empenamento em moldes de injeção, sendo que o maior contribuidor para o tempo total do ciclo é o tempo de refrigeração.

Em boa parte dos estudos revisados anteriormente foi observado que existem fatores que influenciam diretamente o tempo de ciclo e o empenamento, nos quais os principais são:

- Material da peça que será injetado;
- Sistema de refrigeração adotado, série ou paralelo, convencional ou não convencional;
- Temperaturas do sistema de refrigeração;
- Propriedades reológicas do material à injetar;
- Propriedades térmicas do material das matrizes do molde;

Outro ponto importante é a utilização de experimentos planejados no qual foi observado em alguns estudos da revisão bibliográfica, estes

experimentos contribuem no entendimento dos parâmetros que influenciam o tempo de ciclo e o empenamento. Desta maneira, experimentos planejados são aconselháveis para o entendimento da contribuição de cada parâmetro, bem como entendimento dos efeitos de sua manipulação em níveis controlados.

Os sistemas CAD/CAE associados aos experimentos planejados permitem testar vários parâmetros simultaneamente em um ambiente virtual. Esta iniciativa, proporciona o entendimento dos efeitos causados ao manipular determinado parâmetro, assim como avaliar as interações entre eles permitindo um estudo direcional e quantitativo, sem custo de protótipos físicos.

2.3.1 Métodos Numéricos para Simulação de Injeção

Huamin Zhou (2013) comenta que a simulação de injeção envolve principalmente aplicações de Dinâmica dos Fluidos Computacional e Transferência de Calor.

Normalmente, um modelo que represente o processo de polimerização em forma de equações algébricas, um conjunto não linear de equações diferenciais parciais (PDEs) ou equações integrais, nas quais não possuem soluções analíticas.

A análise numérica fornece métodos para obter soluções úteis para estes problemas matemáticos. Tais métodos fornecerão uma aproximação satisfatória da solução do problema.

Ainda ressalta que nas últimas décadas, é notável a evolução em computadores de alto desempenho, simulações numéricas evoluíram junto com a ciência da mecânica dos fluidos, transferência de calor, fenômenos de transporte e é claro reologia dos polímeros e processamento.

O *Moldflow Plastic Insight* é um programa comercial desenvolvido pela *Moldflow Corporation* no qual utiliza o método dos elementos finitos (FEM) para análise de escoamento, compactação, refrigeração, empenamento, orientação de fibras e análise estrutural do termoplástico injetado.

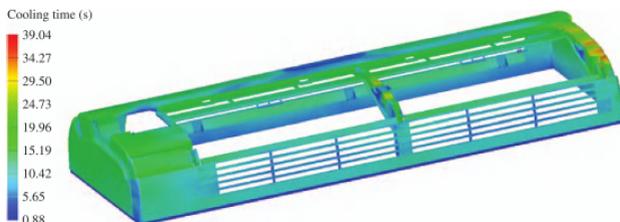
Chagas (2013) comenta sobre os principais benefícios do uso de

simulação, por saber:

- Determinação das condições ótimas de processo, tais como o tempo de injeção, temperatura do polímero e do molde, tempo de recalque e de refrigeração, pressão e perfil de velocidade de avanço da rosca;
- Minimização da espessura de parede das peças, analisada em relação à injetabilidade da mesma;
- Previsão de problemas de processo como linhas de solda, aprisionamento de ar, degradação da matéria-prima, rechupe e empenamentos;
- Determinação da força de fechamento necessária da máquina injetora;
- Determinação das melhores configurações do molde, isto é, sistemas de refrigeração, posição dos pontos de injeção, balanceamento de canais de injeção e refrigeração.

A Figura 22 ilustra um exemplo de aplicação de simulação de injeção para avaliar o tempo de ciclo de um painel de ar condicionado.

Figura 22 – Exemplo de simulação de injeção



Fonte: Adaptado de (Huamin Zhou, 2013)

2.3.2 Materiais

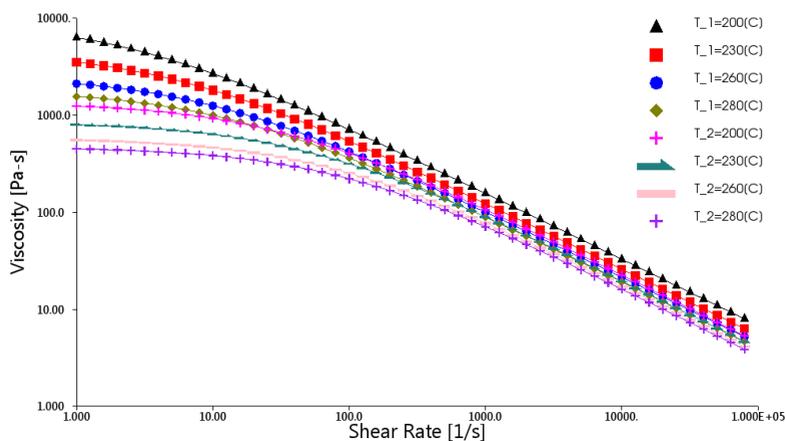
Para este projeto de dissertação, serão utilizados dois materiais do tipo polipropileno copolímero de estrutura semi-cristalina e dois materiais do tipo poliestireno de estrutura amorfa. A escolha destes materiais está relacionada a sua grande produção e aplicação no mercado que vai desde embalagens até peças automotivas.

Uma das maiores produtoras de polipropileno é a Braskem. Segunda resina mais utilizada em todo o mundo, o polipropileno é empregado em inúmeras aplicações, desde embalagens de produtos comestíveis a peças automotivas. (IBÁ, 2017)

As curvas de viscosidade para ambos os materiais que serão utilizados neste projeto foram obtidas de acordo com a norma ASTM D3835, que refere-se aos testes para determinação das propriedades dos materiais poliméricos por reometria capilar.

A Figura 23 ilustra a sobreposição das curvas de viscosidade do H503 com o CP442XP.

Figura 23 – Curvas de Viscosidade H503 (T_1) vs CP442XP (T_2)

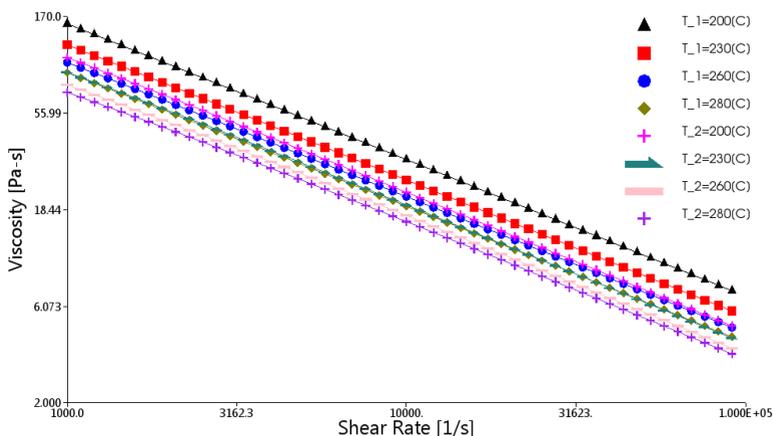


Fonte : Biblioteca do *Autodesk Moldflow Insight*

Em ambos os casos, será utilizado modelo *Cross/WLF*. Este modelo está acoplado ao simulador no qual será utilizado para conduzir os estudos.

A Figura 24 ilustra as curvas de viscosidade ampliada na região de operação. Para cada material, são ilustradas quatro curvas em quatro diferentes temperaturas (200°C, 230°C, 260°C e 280°C). Na legenda lateral, o índice T1 diz respeito as curvas do H503 e o índice T2 diz respeito ao CP442XP.

Figura 24 – Curvas de Viscosidade H503 (T_1) vs CP442XPP (T_2) Ampliado



Fonte : Biblioteca do *Autodesk Moldflow Insight*

Outras propriedades importantes na transferência de calor são a condutividade térmica, densidade e calor específico, estas três propriedades relacionadas entre si caracterizam a difusividade térmica, na qual é importante em problemas envolvendo estado não-estacionário, o que ocorre durante o aquecimento e resfriamento de um polímero.

Em processamento a difusividade térmica é uma propriedade fundamental no processo de moldagem por injeção, para a determinação do tempo de ciclo de moldagem. Esta propriedade será abordada mais

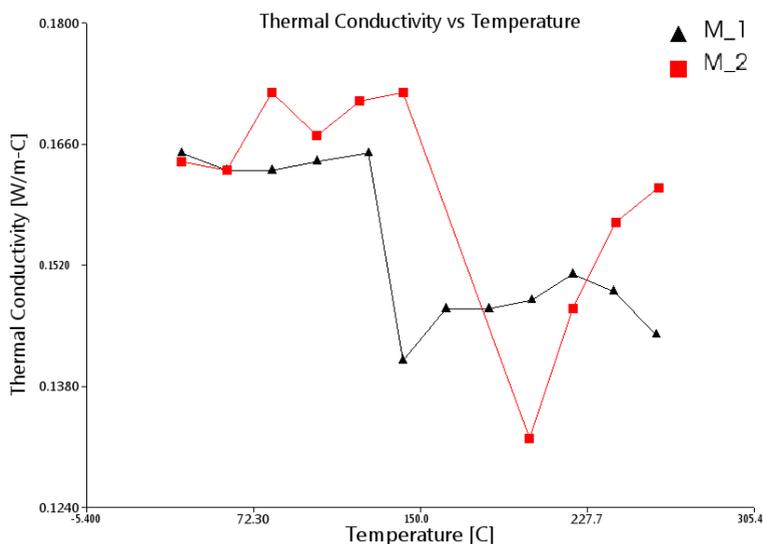
adiante.

As curvas para ambos os materiais que serão estudados serão ilustradas para melhor entendimento do comportamento da condutividade térmica em função da temperatura e posteriormente será apresentado o calor específico em função da temperatura.

Os valores de condutividade e calor específico nos quais serão utilizados estão entre 220 e 260°C que são as temperaturas que serão manipuladas no experimento virtual. Estas curvas foram obtidas também da biblioteca de materiais do simulador.

Na Figura 25 são observadas as curvas de condutividade térmica em função da temperatura para o H503 e para o CP442XP.

Figura 25 – Comparativo de Condutividade Térmica entre o H503 (M_1) vs CP442XP (M_2)



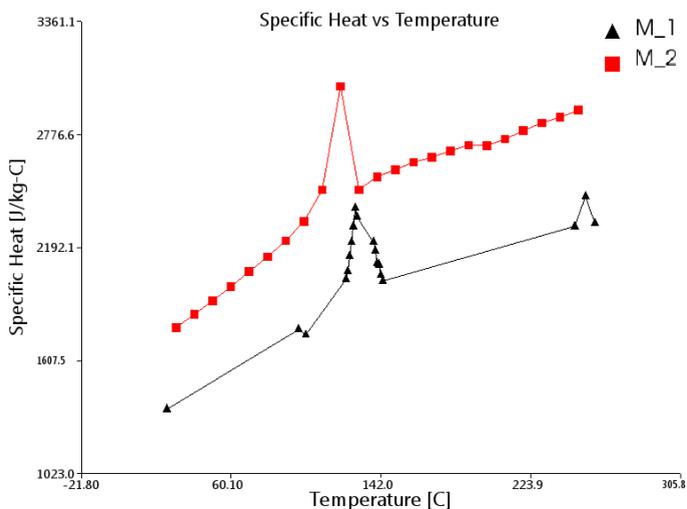
Fonte : Biblioteca do *Autodesk Moldflow Insight*

É observado que a condutividade térmica é menor a baixas temperaturas e conforme a temperatura aumenta a condutividade vai diminuindo. O índice M1 é referente ao material H503, e o índice M2

ao CP442XP, nota-se que em temperaturas de processo o H503 é mais estável que o CP442XP que no caso, aumenta a condutividade conforme a temperatura aumenta.

Na Figura 26 são observadas as curvas de calor específico em função da temperatura para ambos os materiais. O índice M1 diz respeito ao material H503, e o índice M2 ao CP442XP.

Figura 26 – Comparativo do Calor Específico entre o H503 (M_1) vs CP442XP (M_2)



Fonte : Biblioteca do *Autodesk Moldflow Insight*

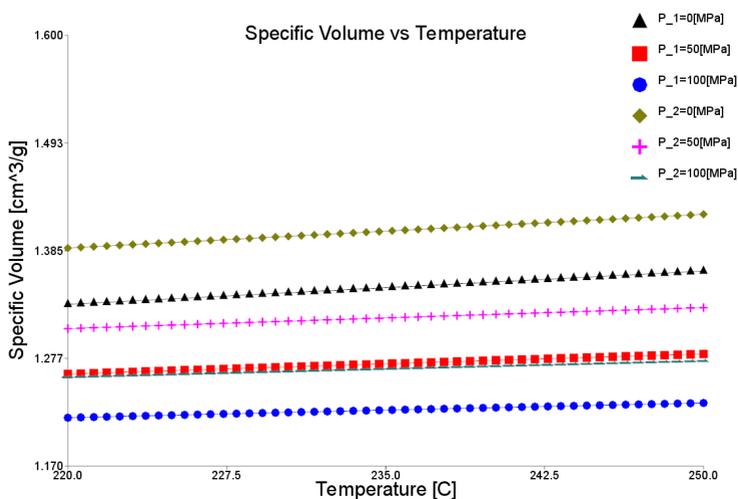
Nota-se que a curva de calor específico do CP442XP apresenta valores superiores aos observados na curva do H503. O calor específico é uma grandeza física intensiva que define a variação térmica de determinada substância ao receber determinada quantidade de calor, ou de maneira mais simplificada, também é definido como a quantidade de energia necessária para que 1g de uma substância sofra aumento ou diminuição de temperatura de 1°C.

O volume específico também é afetado pela mudança de temperatura durante o processo de injeção. De acordo como Canevarolo Jr.

(2006), aumentando-se ainda mais a temperatura, se estiverem presentes cristallitos na massa polimérica, isto é, como no caso de polímeros semi-cristalinos, a um dado momento, será atingido um nível energético alto o suficiente para começar a fundir os cristais. A fusão de cada pequeno cristal provoca um pequeno aumento localizado e instantâneo de volume.

É observado por meio da Figura 27 a variação no volume específico em função da temperatura. As curvas para ambos os materiais foram ampliadas na região de temperatura de operação, ou seja, entre 220 e 250°C e no caso, foram plotadas três (3) curvas para cada material considerando três (3) níveis de pressão.

Figura 27 – Comparativo Volume Específico entre o H503 (P_1) vs CP442XP (P_2)



Fonte : Biblioteca do *Autodesk Moldflow Insight*

As três primeiras curvas da legenda à direita, dizem respeito ao H503, e as três seguintes dizem respeito ao CP442XP, estas curvas estão apresentadas em três diferentes níveis de pressão, no caso, iniciando em 0 MPa posteriormente 50 MPa e por fim 100 MPa na qual é normalmente

atingida em moldagem na maioria das peças. É notado que para o CP442XP os valores de volume específico em função da temperatura são ligeiramente maiores que os encontrados no H503.

A revisão bibliográfica permitiu identificar segundo alguns autores, os principais e mais comuns fatores que impactam o aumento ou redução do tempo de ciclo em um processo de injeção polimérica, bem como, os impactos estéticos no componente moldado.

As Figuras 28, 29 e 30 ilustram os principais estudos e algumas observações e lacunas nas quais ajudarão a delinear o projeto desta dissertação.

Figura 28 – Resumo da Revisão Bibliográfica - Parte 1

Autor	Ano	Observações	Lacunas
BROOKS, H.; BRIGDEN, K.	2016	<ol style="list-style-type: none"> 1. Canais convencionais não são capazes de alcançar detalhes de geometrias complexas; 2. Aplicação de manufatura aditiva para canais não convencionais; 3. Testes incrementais foram feitos para testar ambos conceitos; 	<p>Utilização de geometrias diferentes; Otimização do projeto de canais de refrigeração convencionais;</p>
EIAMSA-ARD, K.; WANNISSORN, K.	2015	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aplicação de Bubblers para refrigeração em moldes; 2. Deposição de metal via solda convencional; 	<p>Sinergia entre sistema CAE e estatística para tomada de decisão;</p>
HUSZAR, M.	2015	<ol style="list-style-type: none"> 1. O uso de diferentes materiais e localização do sistema de injeção tem efeito na redução do empenamento e pressão de injeção; 2. Aumento da produção e ganhos em energia são minimizados quando a escolha do material e ponto de injeção são bem escolhidos e corretamente posicionados; 	<p>Aplicação de experimentos lineares de dois níveis fracionados e completos; Aplicação de experimentos quadráticos com fatores em três níveis;</p>
JAHAN, S. A. et al.	2016	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aplicação de Conformal Cooling em moldes tradicionais; 2. Otimização dos parâmetros dos canais de refrigeração; 3. Avaliação o efeito da seção transversal dos canais de refrigeração; 4. Seções retangulares são melhores que cilíndricas, porém necessitam de manufatura aditiva; 5. Não houve aplicação de experimentos planejados, apenas testes escalonados; 	<p>Utilização de Superfície de Resposta para otimização</p>
KITAYAMA, S. et al.	2018	<ol style="list-style-type: none"> 1. Variação nos parâmetros de processo para minimizar defeitos em peças plásticas; 2. Otimização dos parâmetros de processo; 3. Canais convencionais apresentam claramente limitações ; 	<p>Equação característica para otimização do tempo de ciclo para cada geometria proposta;</p>
LEÃES, V. S.	2008	<ol style="list-style-type: none"> 1. Defeito relacionado ao empenamento em peças plásticas; 2. Identificação que a diferença de temperatura entre os lados do molde é o fator mais significativo; 3. Ausência de rescalque amplia o empenamento; 4. Localização do sistema de refrigeração pode afetar a magnitude do empenamento; 5. Utilizou ferramentas estatísticas; 	<p>Otimização do projeto de canais de refrigeração convencionais;</p>

Figura 29 – Resumo da Revisão Bibliográfica - Parte 2

Autor	Ano	Observações	Lacunas
LÓPEZ, A. et al.	2016	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificação dos parâmetros de processo que são críticos; 2. Aplicação em geometria de parede mais fina; 3. Aplicação de experimentos para os estudos; 	<p>Utilização de matérias com estruturas moleculares diferentes (amorfas e semi-cristalinas);</p>
MARQUES, S. et al.	2015	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alto custo de manufacturabilidade dos Conformal Coolings, no caso utilizando manufatura aditiva; 2. Ainda é desconhecido o real benefício desta aplicação; 3. A utilização de canais de refrigeração em série mostrou ser a melhor opção; 4. Ideal para produtos com detalhes profundos, onde canais convencionais não alcançam; 5. Canais de refrigeração em paralelo apresentaram baixa vazão e não atingiram regime turbulento ao longo do circuito; 6. Geometria única ceste porta ovos; 7. Não houve aplicação de experimentos planeados; 	<p>Equação característica para otimização do tempo de ciclo para cada geometria proposta;</p> <p>Utilização de geometrias diferentes;</p>
MARTINS, A.; SILVA, S. S	2015	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aplicação de simulação para resolução de problemas de moldagem; 2. Definição da melhor posição dos canais de refrigeração e canais de alimentação; 	<p>Otimização do projeto de canais de refrigeração convencionais;</p>
MOHAMED, O. A.; MASOOD, S. H.; SAIIFULLAH, A.	2013	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aplicação de canais não convencionais e comparativo com os convencionais; 2. Melhoria no sistema de refrigeração e tempo de ciclo; 3. Otimização dos parâmetros de processo para redução do empenamento; 4. Aplicação de simulação na solução do problema; 	<p>Aplicação de experimentos planeados para aprendizado escalonado;</p>
NIAN, S. C.; LI, M. H.; HUANG, M. S.	2015	<ol style="list-style-type: none"> 1. Atualizado a influência dos parâmetros de processo e parâmetros geométricos; 2. Utilização de gás para compactação e redução do empenamento; 3. Reduções no tempo de ciclo através da otimização dos canais de refrigeração; 4. Perfis de compactação ajudam a melhorar o empenamento; 5. Parâmetros de processo como temperatura de injeção e do molde; 6. Longos tempos de compactação reduzem o empenamento; 7. Não houve aplicação de experimentos planeados, apenas testes escalonados; 8. A geometria é única, uma lanterna de farol automotivo. 	<p>Aplicação de experimentos lineares de dois níveis fracionados e completos;</p> <p>Aplicação de experimentos quadráticos com fatores em três níveis ;</p> <p>Utilização de Superfície de Resposta para otimização</p>
OLIAEI, E. et al.	2016	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aplicação de simulação para testar diferentes materiais; 2. Uso de estatística para análise dos dados; 3. Entendimento das causas e efeitos do empenamento e contração volumétrica; 4. Manipulação dos parâmetros de processo 5. Identificação dos parâmetros de processo críticos para o empenamento e contração volumétrica; 	<p>Aplicação de experimentos planeados para aprendizado escalonado;</p>
PARK, H. S.; DANG, X. P.	2017	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aplicação de canais convencionais e não convencionais na injeção de peças de tamanho médio; 2. Melhorias no processo para redução do tempo de ciclo; 3. Utilização de insertos de materiais diferentes para melhorar a troca de calor; 4. Monitoramento das temperaturas durante o processo; 	<p>Diferentes resinas poderiam ser testadas para entender o efeito ;</p>

Figura 30 – Resumo da Revisão Bibliográfica - Parte 3

Autor	Ano	Observações	Lacunas
Prashanth Reddy, K.; PANITAPU, B.	2017	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aplicação de insertos de materiais mais condutores, para melhoria da refrigeração; 2. Utilização do cobre e berílio como materiais alternativos; 3. Melhoria na contração volumétrica e no empenamento; 4. Reduções no tempo de ciclo foram observadas; 	<p>Diferentes resinas poderiam ser testadas para entender o efeito ;</p>
SINGH, G.; PRADHAN, M. K.; VERMA, A. M SPINA, R.	2018 2004	<ol style="list-style-type: none"> 1. Utilização de variáveis de multi objetivos para auxiliar no estudo; 2. Utilização de Tagushi para experimentação; 	<p>Aplicação de experimentos planejados para aprendizado escalonado;</p> <p>Aplicação de experimentos DOE;</p> <p>Superfície de Resposta;</p>
VENKATESH, G.; Ravi Kumar, Y. T	2017	<ol style="list-style-type: none"> 1. Variações na seção dos canais de refrigeração; 2. Identificação da melhor seção que reduz o tempo de ciclo; 	<p>Otimização do projeto de canais de refrigeração convencionais;</p>
VOJNOVÁ, E.	2016	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aplicação de Conformal Coolings na redução do tempo de ciclo; 2. O uso de Conformal Cooling afirma que é viável quando aplicado a geometrias complexas; 3. Identificado fatores que afetam o tempo de ciclo; 4. Distância dos canais de refrigeração até a geometria da peça deve ser otimizada; 5. Utilizar menores e em maior quantidade de canais de refrigeração é melhor; 6. Atíngir o regime turbulento é melhor para dissipação de calor; 	<p>Equação característica para otimização do tempo de ciclo para cada geometria proposta;</p> <p>Utilização de geometrias diferentes;</p>
WANG, Y.; YU, K. M.; WANG, C. C. L.	2015	<ol style="list-style-type: none"> 1. Proposta de um algoritmo para construção dos canais de refrigeração; 2. Os canais estudados são do tipo Conformal Cooling e estão conformados com o mesmo shape da geometria analisada; 3. Geometria analisada é um capacete , uma capa de celular; 4. Não houve aplicação de experimentos planejados, apenas testes escalonados; 	<p>Aplicação de experimentos lineares de dois níveis fracionados e completos;</p> <p>Aplicação de experimentos quadráticos com fatores em três níveis ;</p> <p>Utilização de Superfície de Resposta para otimização</p>
WANG, Y. et al. A	2011	<ol style="list-style-type: none"> 1. Automação do método de projetar canais de refrigeração não convencionais; 2. Aplicação de simulação nos estudos; 	<p>Otimização do projeto de canais de refrigeração convencionais;</p>

3 METODOLOGIA

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O trabalho utilizará modelagem experimental, onde serão utilizadas técnicas e métodos, nas quais são elaboradas condições adequadas para o tratamento dos experimentos por meio de amostragem.

Com auxílio de metodologia experimental, serão manipulados parâmetros relacionados ao objeto de estudo. A manipulação destes parâmetros proporciona o estudo da relação entre causa e efeito de determinado fenômeno.

A etapa experimental utilizará o programa comercial *Autodesk Moldflow Insight* como ferramenta de simulação do processo de moldagem por injeção. Este programa dispõe de ferramentas que permitem prever e eliminar potenciais problemas de produção e de otimização do projeto da peça e do molde. Ao mesmo tempo que possibilita realizar experiências de forma a observar-se o comportamento dos diversos parâmetros do processo.

Para elaborar e analisar os experimentos virtuais será utilizado o programa *Jump*, que é um programa que combina análises estatísticas úteis com gráficos interativos. Este programa analisa dados, gerando representações visuais que proporcionam visões e discernimento em contextos que não podem ser obtidos apenas observando a tabela de dados.

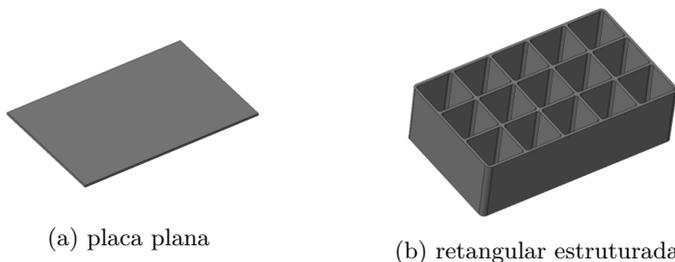
O objetivo principal do experimento virtual está em avaliar o efeito da manipulação dos parâmetros de projeto e processo para entender o efeito principalmente no tempo de ciclo e no empenamento.

Conforme citado na revisão bibliográfica, experimentos planejados são ferramentas importantes na construção do conhecimento escalonado através de experimentos fracionados primeiramente e completos após adquirir determinado nível de conhecimento e por fim superfícies de resposta.

Para atingir estes objetivos, serão utilizadas duas (02) geometrias conceituais, sendo elas na forma: placa plana conforme a Figura 31a

e a outra retangular estruturada conforme a Figura 31b. Estas duas geometrias foram escolhidas, pois apresentam conceitos básicos de formas geométricas.

Figura 31 – Geometrias conceituais (a) placa plana (160x100x2,5mm), (b) retangular estruturada (160x100x30mm; esp,2,5mm)



Fonte: Autoria própria.

A geometria placa plana quando comparada com a geometria retangular estruturada por possuir nervuras transversais e longitudinais, apresenta baixo grau de complexidade. A complexidade da geometria retangular estruturada também está relacionada ao fato de apresentar detalhes profundos, onde ocorre geralmente concentração de calor. Estas regiões são difíceis de refrigerar com sistemas de refrigeração lineares, neste caso é recomendado o uso de defletores ou borbulhadores.

Cada geometria será avaliada frente aos diferentes parâmetros de processo tais como: o material, temperatura de injeção, temperatura do sistema de refrigeração, tempo de injeção, pressão e tempo de recalque e parâmetros geométricos tais como: sistema de refrigeração longitudinal ou transversal, diâmetro do canal de refrigeração, distância dos canais até a geometria, espaçamento entre canais de refrigeração.

Estes parâmetros serão detalhados mais adiante no planejamento experimental, bem como os níveis nos quais serão testados. Os níveis são regiões factíveis que os parâmetros podem atingir dentro de um espaço de inferência aceitável.

3.1.1 Materiais

Dois polímeros de estrutura semi-cristalina serão utilizados nos estudos, PP CP442XP e PP H503, ambos são polipropilenos. Estes materiais foram escolhidos por apresentarem propriedades reológicas diferentes. Na revisão bibliográfica serão apresentadas em detalhes as curvas destes materiais, bem como suas propriedades reológicas.

O CP 442XP fornecido pela Braskem, é um copolímero heterofásico de propeno e eteno com médio índice de fluidez indicado para o processo de injeção. Possui excelente balanço de propriedades de rigidez e impacto. Este produto apresenta excelente acabamento superficial e boa processabilidade.

O H503, também fornecido pela Braskem, é uma resina de Polipropileno de baixo índice de fluidez, aditivada para uso geral. Indicada para moldagem por injeção, rafia, filmes bi-orientados e extrusão geral. O H503 apresenta excelente processabilidade com boa estabilidade do fundido, bom balanço rigidez e impacto e baixa transferência de odor e sabor.

As principais propriedades reológicas dos polipropilenos que serão usados nos estudos são apresentadas pela Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades dos Polipropilenos

Tipo de Estrutura Molecular	Semi-cristalinos	Semi-cristalinos
Nomenclatura	CP 442XP	H503
Densidade do fundido [g/cm^3]	0.70917	0.74485
Densidade do sólido [g/cm^3]	0.88010	0.92964
Temperatura de Extração [$^{\circ}C$]	108.4	111.0
Condutividade Térmica [$W/m.^{\circ}C$]	0.147 (220 $^{\circ}C$)	0.151 (220 $^{\circ}C$)
	0.157 (240 $^{\circ}C$)	0.149 (240 $^{\circ}C$)
Temperatura de Fusão [$^{\circ}C$]	200 - 280	190 - 270
Temperatura do Molde Recomendada [$^{\circ}C$]	20 - 40	20 - 40
Calor Específico [$J/kg.^{\circ}C$]	2798 (220 $^{\circ}C$)	2227 (220 $^{\circ}C$)
	2867 (240 $^{\circ}C$)	2281 (240 $^{\circ}C$)
Taxa de Cisalhamento [1/s]	100000	100000
Tensão de Cisalhamento [MPa]	0.25	0.25
Índice de Fluidez [$g/10min$] (230 $^{\circ}C$, 2.16kg)	6.00	3.50

Fonte : Biblioteca do *Autodesk Moldflow Insight*

Além dos materiais semi-cristalinos, serão testados materiais de estrutura amorfa. Os materiais são o Poliestireno 804 (*TOTAL Petrochemicals* e o Styron688G (*Americas Styrenics*) ambos poliestirenos também com propriedades reológicas diferentes. As propriedades reológicas destes dois materiais amorfos são ilustradas no anexo A.

As principais propriedades reológicas dos poliestirenos que serão usados nos estudos são apresentadas pela Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades dos Poliestirenos

Tipo de Estrutura Molecular	Amorfo	Amorfo
Nomenclatura	Polystyrene 804	Styron 688G
Densidade do fundido [g/cm^3]	1.04640	0.94171
Densidade do sólido [g/cm^3]	1.16610	1.03800
Temperatura de Extração [$^{\circ}C$]	80.0	82.0
Condutividade Térmica [$W/m.^{\circ}C$]	0.214 (223 $^{\circ}C$)	0.183 (218 $^{\circ}C$) 0.186 (238 $^{\circ}C$)
Temperatura de Fusão [$^{\circ}C$]	180 - 280	180 - 260
Temperatura do Molde Recomendada [$^{\circ}C$]	20 - 70	10 - 60
Calor Específico [$J/kg.^{\circ}C$]	1872 (200 $^{\circ}C$) 1909 (230 $^{\circ}C$)	2260 (210 $^{\circ}C$) 2238 (240 $^{\circ}C$)
Taxa de Cisalhamento [1/s]	40000	60000
Tensão de Cisalhamento [MPa]	0.24	0.5
Índice de Fluidiez [$g/10min$] (230 $^{\circ}C$, 2.16kg)	10	20

Fonte : Biblioteca do *Autodesk Moldflow Insight*

É observado que os materiais mais comuns usados na fabricação de moldes de acordo com Harada (2006), são o AISI-H13 e o AISI-P20, e apresentam propriedades bem parecidas. Os aços utilizados na fabricação de moldes devem ser resistentes às tensões e fáceis de usar. O material do molde também tem grande importância no tempo de ciclo, pois quanto mais rápido ocorrer a transferência de calor melhor.

O material do molde será utilizado o aço AISI-H13, que tem grande importância no tempo de ciclo, pois quanto mais rápido ocorrer a transferência de calor melhor. (HARADA, 2006)

O aço AISI-H13 está ligado ao cromo-molibdênio-vanádio, temperável em óleo ou ar, de excelente tenacidade, alta resistência mecânica e boa resistência ao desgaste em temperaturas elevadas principalmente ao seu médio teor de vanádio em combinação com seus outros elementos.

Além dos aços mais comumente usados, a Tabela 4 apresenta as principais propriedades e em caráter comparativo, as propriedades do aço AISI-420 e do alumínio, este último amplamente usado em moldes protótipos. Ambos apresentam alta condutividade térmica quando comparado com o AISI H-13 e AISI-P20, o diferencial é o custo deste material de alto desempenho.

Tabela 4 – Propriedades dos Materiais usados em Moldes

Descrição	Aço		Aço	Alumínio
	AISI-H13	AISI-P20	AISI-420	
Densidade [g/cm^3]	7.76	7.80	7.83	2.80
Condutividade Térmica [$W/m.^{\circ}C$]	29.50	29	43.3	190
Calor Específico [$J/kg.^{\circ}C$]	462.0	460	389	880

Fonte : Adaptado de (HARADA, 2006)

3.1.2 Planejamento Experimental e Parâmetros de Processo

Planejamentos experimentais auxiliam no entendimento de fatores que são significativos para uma determinada variável de resposta. Vários são os parâmetros de processo que afetam a injetabilidade de peças moldadas por injeção bem como a qualidade final.

Baseado em conhecimento profissional e nas revisões de literatura, foram selecionados ao todo dez fatores. Estes fatores serão testados em níveis numéricos e contínuos para entender seu efeito nas variáveis de resposta. Para este projeto, foram selecionados fatores geométricos e fatores de parâmetros de processo.

No entanto antes de rodar o experimento, a resolução precisa ser definida. A resolução do experimento descreve até que ponto os efeitos do experimento fatorial fracionado são confundidos com outros efeitos.

A Figura 32 apresenta uma matriz que tem na primeira linha a quantidades de fatores do experimento e na primeira coluna o número de rodadas correspondentes. Ao combinar linha e coluna tem-se a resolução do experimento.

Para um experimento com dez fatores, são necessárias 32 casos ou modelos, para obter uma resolução IV, ou seja, nenhum fator principal

Figura 32 – Resolução do Experimento

Runs	Quantidade de Fatores														
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
4	FuII	III													
8		FuII	IV	III	III	III									
16			FuII	V	IV	IV	IV	III							
32				FuII	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
64					FuII	VII	V	IV							
128						FuII	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV	

Fonte: Autoria própria.

é confundido com qualquer outro fator principal ou interação com 2 fatores, mas algumas interações com 2 fatores são confundidas com outras interações de 2 fatores e efeitos principais é confundido com interações de 3 fatores.

Quando se executa um experimento fatorial fracionado, um ou mais efeitos são confundidos, o que significa que não podem ser estimados separadamente. Um experimento fracionado é aquele que realiza apenas um subconjunto selecionado ou uma "fração" dos ensaios no experimento fatorial completo. Os experimentos fatoriais fracionados são uma boa opção quando os recursos são limitados ou o número de fatores no experimento é grande porque eles usam menos ensaios do que os experimentos fatoriais completos.

Os resultados obtidos neste primeiro experimento fracionado serão avaliados e os fatores mais significativos serão selecionados e inseridos em um segundo experimento, neste caso completo, com menos fatores e com melhor resolução tendo como objetivo otimizá-los. Em todo experimento planejado existem objetivos à serem atingidos e neste projeto, os objetivos são entender o efeito dos fatores de projeto e parâmetros de processo nas variáveis de resposta que serão monitoradas, neste caso, o tempo de ciclo e o empenamento.

Os fatores de processo, fatores de projeto e os níveis nos quais serão testados no experimento fracionado são ilustrados pela Tabela 5 onde a escolha dos fatores de processo e projeto tem como base os parâmetros primários e fatores críticos para sistemas de refrigeração identificados na revisão bibliográfica. Normalmente quando inicia-se os

estudos experimentais, é recomendado aplicar experimentos fracionados, pois são utilizados na fase exploratória do estudo, onde há dúvidas sobre quais fatores são realmente relevantes, portanto, quanto mais fatores forem testados melhor será.

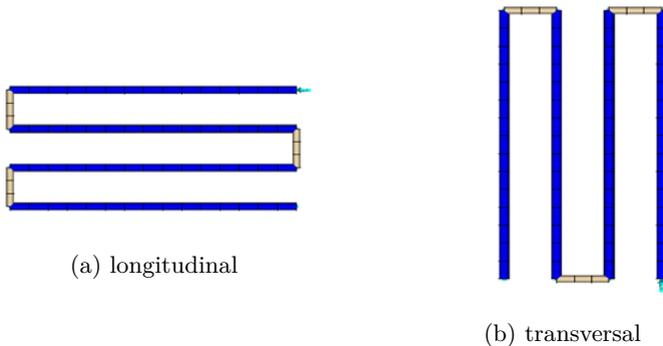
Tabela 5 – Planejamento Experimental Fracionado 2⁽¹⁰⁻⁵⁾, Resolução IV, 32 rodadas

ID	Descrição dos Fatores do Experimento	Unidades	[-1]	[+1]
A	Material	[-]	H503	CP442XP
B	Sistema de Refrigeração	[-]	Longitudinal	Transversal
C	Diâmetro do Canal de Refrigeração	[mm]	6	10
D	Distância Entre Canais de Refrigeração	[mm]	2D	4D
E	Distância dos Canais de Refrigeração até a Geometria	[mm]	2D	4D
F	Temperatura de Injeção	[°C]	220	240
G	Tempo de Injeção	[s]	1	4
H	Perfil de Recalque	[-]	baixo	alto
I	Temperatura do Fluido Refrigerante Lado Fixo	[°C]	20	30
J	Temperatura do Fluido Refrigerante Lado Móvel	[°C]	20	30

Fonte: Autoria própria.

A Figura 33 ilustra os dois tipos de variações geométricas que os canais de refrigeração serão submetidos neste experimento e dizem respeito ao fator B. Uma opção apresenta os canais de refrigeração no sentido longitudinal em (a) e a outra opção canais na transversal (b).

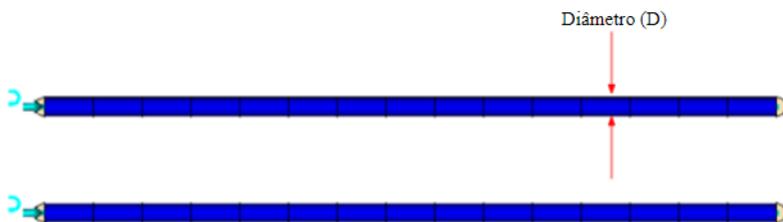
Figura 33 – Sistema de Refrigeração - Fator B: (a) canais longitudinais (b) canais transversais



Fonte: Autoria própria.

A Figura 34 está relacionada ao fator C, que neste caso diz respeito ao diâmetro do canal de refrigeração e este fator pode variar numericamente de 6 a 10mm conforme relatado na tabela do experimento.

Figura 34 – Diâmetro do Canal de Refrigeração - Fator C



Fonte: Autoria própria.

A Figura 35 ilustra o fator D, referente ao espaçamento/passo entre os canais de refrigeração, este fator varia conforme o diâmetro do canal de refrigeração também varia.

Figura 35 – Distância Entre Canais de Refrigeração - Fator D

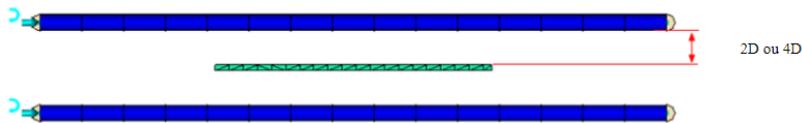


Fonte: Autoria própria.

A Figura 36 ilustra o fator E, referente ao afastamento dos canais de refrigeração até geometria, sendo este fator função do diâmetro do

canal de refrigeração.

Figura 36 – Distância dos Canais de Refrigeração até a Geometria - Fator E

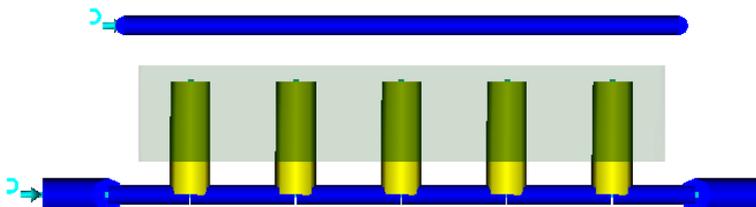


Fonte: Autoria própria.

Através deste experimento planejado uma das variáveis de resposta mais importantes será o tempo de ciclo, que está relacionado diretamente com a eficiência do sistema de refrigeração, e o empenamento, que está relacionado a qualidade da peça, ambas serão objeto de estudo desta dissertação. Este experimento será replicado para as duas geometrias propostas inicialmente.

Eventualmente alguns ajustes serão feitos, pois a geometria retangular estruturada contemplará um sistema de refrigeração do tipo defletor ou mais conhecido por *Baffle* para refrigerar as regiões mais profundas da geometria, conforme apresentado pela Figura 37.

Figura 37 – Defletor (*Baffle*)



Fonte: Autoria própria.

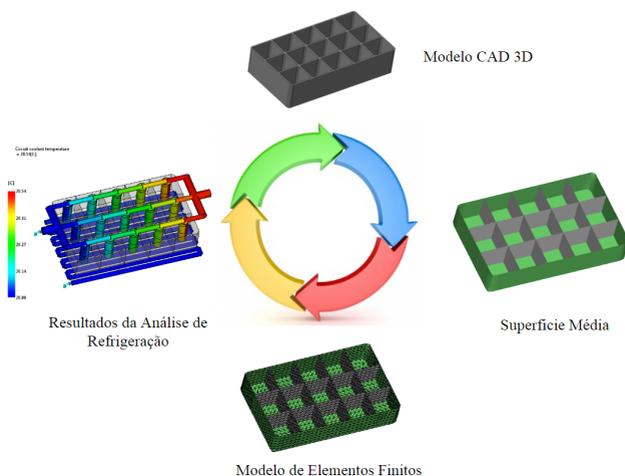
Este tipo de sistema de refrigeração é aplicado quando temos uma região profunda que necessita ser resfriada que não é possível de ser atingida com canais lineares.

Por fim, serão avaliados os experimentos para todas as geometrias e elaborado um modelo teórico otimizado para cada uma delas, onde serão identificados quais as melhores configurações de parâmetros geométricos e parâmetros de processo devem ser utilizados para minimizar as variáveis de resposta.

3.1.3 Metodologia da Simulação

A reprodução computacional do processo de injeção, realizou-se com recurso às ferramentas do programa de simulação numérica *Autodesk Moldflow Insight*, (2017). Após gerar a malha de elementos finitos, a modelagem dos canais de alimentação e refrigeração são inseridos e por fim as condições de contorno são selecionadas. A Figura 38 ilustra as etapas do processo de preparação, execução e resultado que será aplicado para ambas geometrias.

Figura 38 – Plano de Execução Experimental

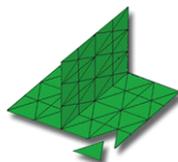


Fonte: Autoria própria.

A malha de elementos finitos é a conexão entre o modelo sólido 3D e o ambiente de simulação. Funciona como uma espécie de conversor matemático, onde é extraído, de um modelo CAD sólido, a superfície média que receberá os elementos triangulares que cobrirão todas as superfícies previamente extraídas.

Os elementos dividem a geometria da peça em um determinado número de pequenos domínios. O tipo de elemento na análise é constituído por três nós formando um elemento triangular conforme ilustrado pela Figura 39.

Figura 39 – Elemento triangular com 03 nós e malha tipo superfície média



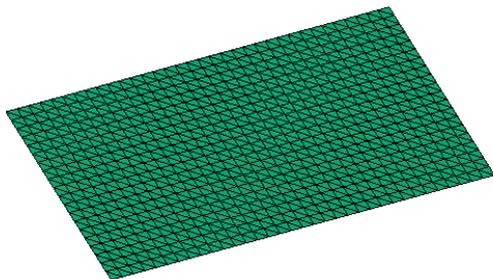
Fonte : Biblioteca do *Autodesk Moldflow Insight*

Após definição do tipo de elemento, atribuições das espessuras do modelo sólido são feitas a cada elemento, no caso, para este estudo será utilizado a malha do tipo superfície média para ambas geometrias, pois em termos de velocidade de processamento são superiores as demais aqui citadas.

A Figura 40 representa a malha de elementos finitos da placa plana na qual contém 1400 elementos e 735 nós. A qualidade da malha é medida pela razão de aspecto, que é um parâmetro que indica a qualidade dos elementos e de acordo com os critérios de aprovação não devem possuir elementos com razão de aspecto superior a 6. A razão de aspecto é calculada baseado na área composta pela largura e altura de cada elemento, e no caso da placa plana, a razão de aspecto máxima observada é 2, o que indica uma boa razão de aspecto.

A Figura 41 ilustra a malha de elementos finitos da geometria retangular reforçada na qual apresenta 3846 elementos do tipo R-Trias

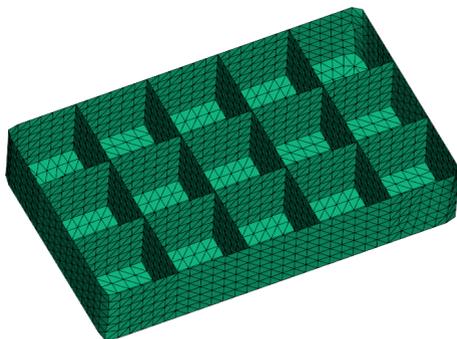
Figura 40 – Representação da Malha de Elementos Finitos - Placa Plana



Fonte: Autoria própria.

e 1889 nós e a razão de aspecto máxima observada é de 2,72.

Figura 41 – Representação da Malha de Elementos Finitos



Fonte: Autoria própria.

O algoritmo utilizado para rodar as análises no simulador é do tipo *Fill+Pack+Warp+Cool* que indica a ordem em que o simulador rodará o caso. Iniciando pelo preenchimento, compactação, empenamento e finalizando com a análise da refrigeração.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PLACA PLANA - SEMI-CRISTALINOS - 1º DOE

A revisão bibliográfica, permitiu identificar quais os parâmetros de processo e de projeto de sistemas de refrigeração que são mais relevantes para o tempo de ciclo e empenamento, de acordo com alguns autores, o que permitiu delinear os experimentos planejados que serão apresentados na sequencia.

O primeiro experimento foi conduzido utilizando o simulador onde dez (10) fatores foram manipulados em dois níveis totalizando trinta e duas (32) experimentos.

A descrição dos fatores, níveis e os graus de liberdade estão ilustrados na Tabela 6. Existem fatores geométricos e fatores associados a parâmetros de processo nesta etapa exploratória.

Tabela 6 – Planejamento Experimental Fracionado Placa Plana 2⁽¹⁰⁻⁵⁾, Resolução IV, 32 experimentos

ID	Descrição dos Fatores do Experimento	Unidades	[-1]	[+1]
A	Material	[-]	H503	CP442XP
B	Sistema de Refrigeração	[-]	Longitudinal	Transversal
C	Diâmetro do Canal de Refrigeração	[mm]	6	10
D	Distância Entre Canais de Refrigeração	[mm]	2D	4D
E	Distância dos Canais de Refrigeração até a Geometria	[mm]	2D	4D
F	Temperatura de Injeção	[°C]	220	240
G	Tempo de Injeção	[s]	1	4
H	Perfil de Recalque	[-]	baixo	alto
I	Temperatura do Fluido Refrigerante Lado Fixo	[°C]	20	30
J	Temperatura do Fluido Refrigerante Lado Móvel	[°C]	20	30

Fonte: Autoria própria.

Alguns fatores relacionados a refrigeração são função do diâmetro do canal de refrigeração. Esta escolha é essencial para que exista relação entre estes fatores, então foi adotado a simbologia do tipo 2D ou 4D, que significa que este fator é duas ou quatro vezes o valor do diâmetro do canal de refrigeração.

A matriz do experimento foi gerada utilizando o programa *Jump*, onde os dez (10) fatores foram distribuídos em uma matriz ortogonal. Os graus de liberdade que representam como o experimento está estatís-

Tabela 7 – DOE01 - Matriz Ortogonal do Experimento - Placa Plana

RO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
2	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	
3	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	
4	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	
5	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	
6	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	
7	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
8	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	
9	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	
10	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	
11	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	
12	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	
13	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	
14	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	
15	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	
16	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	
17	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	
18	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	
19	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	
20	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	
21	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	
22	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	
23	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	
24	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	
25	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	
26	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	
27	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	
28	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	
29	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	
30	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	
31	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	
32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
RO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	

Fatores do Experimento:
 A - Material
 B - Sistema de Refrigeração
 C - Diâmetro do Canal de Refrigeração
 D - Distância Entre Canais de Refrigeração
 E - Distância dos Canais de Refrigeração até a Geometria
 F - Temperatura de Injeção
 G - Tempo de Injeção
 H - Perfil de Recalque
 I - Temperatura do Fluido Refrigerante Lado Fixo
 J - Temperatura do Fluido Refrigerante Lado Móvel

Fonte: Autoria própria.

ticamente distribuído são definidos pelos fatores principais A, B, C, D, E, F, G, H, I, e J e pelas interações AB, AC, AD, AE, AF, AG, AH, AI, AJ, CE, CF, CG, CH, EG e EH. Para melhor entendimento, a matriz ortogonal do experimento é preenchida com a simbologia matricial, ou seja, (-1) e (1), conforme ilustrado na Tabela 7.

A nomenclatura usada para os fatores está em ordem alfabética, onde cada letra representa um fator do experimento. A matriz elaborada é então utilizada para gerar os casos que serão rodados no simulador, neste caso exploratório, serão trinta e dois (32) experimentos.

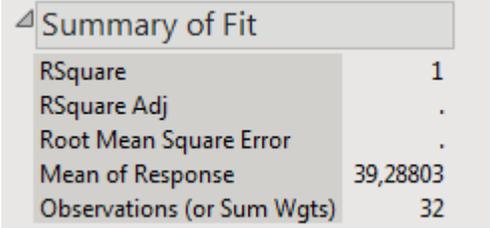
Os resultados do primeiro experimento exploratório são ilustrados na sequencia. Inicialmente antes de analisar os resultados, é recomendado verificar se os graus de liberdade escolhidos para o experimento realmente

são capazes de representar o modelo por completo.

A aderência do modelo é avaliada de acordo com o valor de R^2 (*RSquare*), que é uma medida de ajuste de um modelo estatístico linear generalizado, como a regressão linear, em relação aos valores observados.

A Figura 42 ilustra que o $R^2 = 1$, ou seja, indica um modelo estatisticamente perfeito. Para a variável de resposta tempo de ciclo, o valor médio observado é de 39.29s. Para esta variável de resposta idealmente deseja-se valores menores pois estamos interessados em minimizar o tempo de ciclo.

Figura 42 – Representação do modelo estatístico para o Tempo de Ciclo

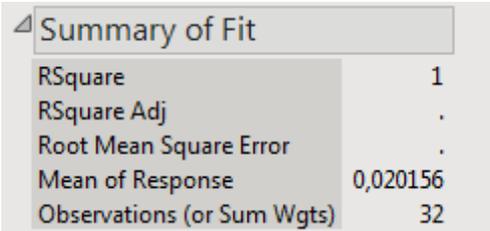


Summary of Fit	
RSquare	1
RSquare Adj	.
Root Mean Square Error	.
Mean of Response	39,28803
Observations (or Sum Wgts)	32

Fonte: Autoria própria.

Por outro lado, a variável de resposta empenamento, apresenta um valor médio de 0.020mm, conforme é ilustrado na Figura 43, para o empenamento quanto menor este valor melhor do ponto de vista de qualidade aparente.

Figura 43 – Representação do modelo estatístico para o Empenamento



Summary of Fit	
RSquare	1
RSquare Adj	.
Root Mean Square Error	.
Mean of Response	0,020156
Observations (or Sum Wgts)	32

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Resultados em ordem crescente do Tempo de Ciclo

RO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Tempo de Ciclo [s]
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	9.47
28	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	10.18
27	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	10.97
2	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	13.58
9	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	13.94
29	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	15.14
7	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	15.98
30	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	16.74
11	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	17.49
12	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	20.27
10	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	22.79
8	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	23.45
17	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	24.05
15	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	30.15
19	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	32.68
20	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	32.85
13	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	33.06
14	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	34.26
18	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	35.94
16	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	37.85
23	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	38.78
21	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	40.71
22	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	41.46
25	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	47.22
24	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	51.96
3	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	72.69
4	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	76.69
31	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	76.95
26	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	77.59
5	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	90.21
6	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	94.12
32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	116.73
RO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	

Fonte: Autoria própria.

Ordenar os dados da matriz do menor para o maior valor é uma boa prática para entender se existem tendências. Algumas tendências são observadas e podem ser relevantes como por exemplo:

É observado nas colunas dos fatores I e J, que representa a temperatura do fluido refrigerante no lado fixo e móvel respectivamente, nota-se que após ordenar a variável de resposta do menor valor para o

maior, observa-se que existe uma tendência por valores menores quando os fatores I e J estão no nível (-1).

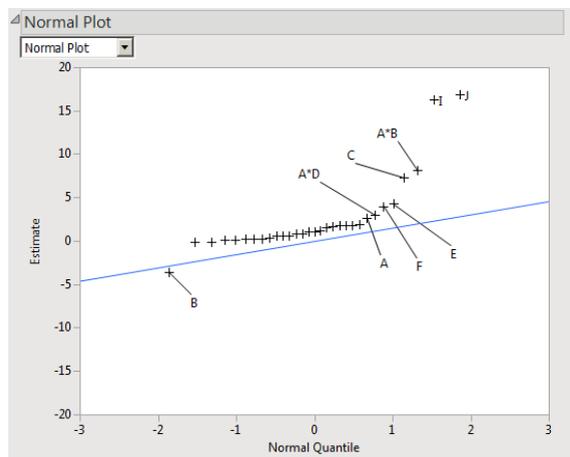
Neste caso, os casos rodados com numeração 1, 28, 27, 2, 9, 29, 7 e 30 da coluna RO, são os que apresentam menores valores de tempo de ciclo conforme ilustrado na Tabela 8.

Da maneira análoga a matriz contendo a variável de resposta empenamento foi ordenada do menor para o maior valor. Algumas tendências são observadas como por exemplo:

É verificável através das colunas dos fatores I e J, que representa a temperatura do fluido refrigerante no lado fixo e móvel respectivamente, que após ordenar a variável de resposta do menor valor para o maior, existe uma tendência por valores de empenamento próximos de zero, quando os fatores I e J estão no nível (+1). Neste caso, os modelos rodados com numeração 4, 5, 25, 3, 26, 31 e 32 da coluna RO, são os que apresentam menores valores de empenamento conforme Tabela 9.

A Figura 44 ilustra os fatores significativos para o tempo de ciclo, neste caso, os fatores que mais se afastam de linha azul são os mais significativos que são: J, I, AB, C, E, F, B, AD e A.

Figura 44 – Gráfico de probabilidade normal para o tempo de ciclo



Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 – Resultados em ordem crescente para a variável de resposta Empenamento

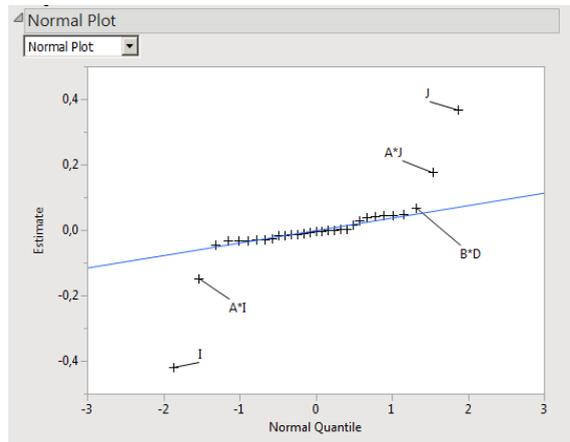
RO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Empenamento [mm]
20	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1.32
11	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1.29
19	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1.22
21	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1.17
14	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1.09
22	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1.00
10	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-0.92
16	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-0.78
15	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-0.71
4	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	0.02
5	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	0.02
25	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	0.02
3	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	0.02
26	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	0.02
31	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0.03
32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.03
29	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	0.03
6	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0.04
28	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0.05
8	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.05
27	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0.05
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	0.06
2	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	0.06
7	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.06
30	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	0.07
9	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	0.25
24	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1.00
13	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1.01
23	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1.11
12	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1.15
18	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1.25
17	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1.38
RO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	

Fonte: Autoria própria.

A Figura 45 ilustra os fatores significativos para o empenamento, onde os fatores que mais se afastam da linha azul são os mais significativos que são: I, J, AJ, AI, BD.

Para entender a magnitude dos fatores a análise pode ser feita

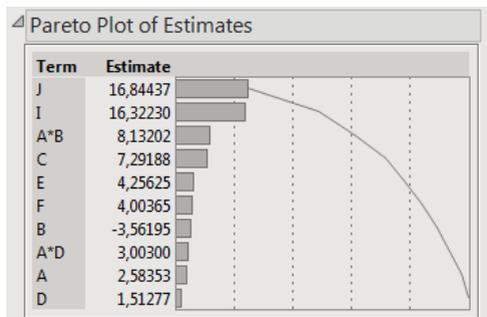
Figura 45 – Gráfico de probabilidade normal para o empenamento



Fonte: Autoria própria.

através do gráfico de Pareto. A Figura 46 ilustra em ordem de significância estatística os fatores significativos do experimento. Nota-se que os fatores principais J e I relacionados a temperatura do fluido refrigerante lado fixo e móvel respectivamente são os mais significativos para o tempo de ciclo, seguidos por AB, C, E, F, B, AD, A e D.

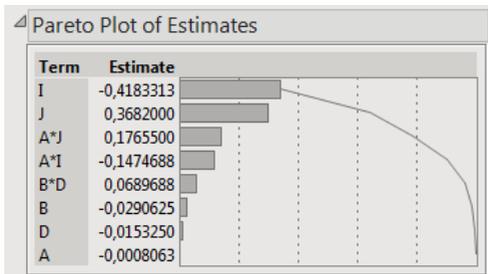
Figura 46 – Pareto dos fatores significativos do primeiro experimento para a variável de resposta Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

De igual maneira, estes mesmos fatores I e J são observados como significativos para o empenamento, seguidos por interações de segunda ordem AJ, AI, BD, B, D e A ilustrado na Figura 47.

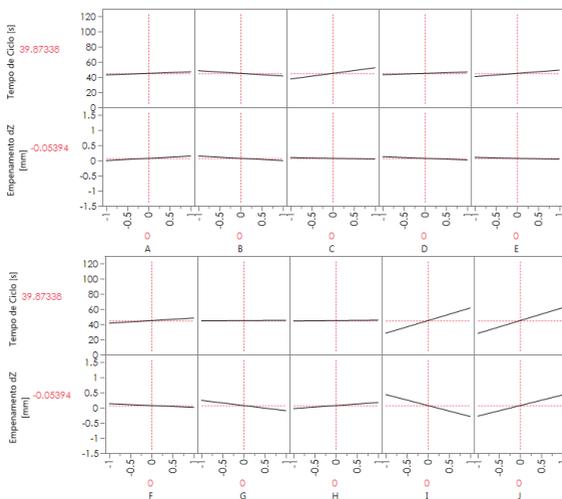
Figura 47 – Pareto dos fatores significativos do primeiro experimento para a variável de resposta Empenamento



Fonte: Autoria própria.

O efeito destes fatores no tempo de ciclo e no empenamento podem ser avaliados no gráfico de perfil de estimativa da Figura 48.

Figura 48 – Perfil de Estimativa do Experimento



Fonte: Autoria própria.

Este gráfico permite avaliar o efeito de cada fator através da análise do coeficiente angular da reta formada com o eixo horizontal. Quanto maior a inclinação da reta, mais significativo é o fator.

Algumas conclusões podem ser feitas baseado nesta análise, para ambas as variáveis de resposta no caso, para a variável de resposta tempo de ciclo, os fatores mais significativos, ou seja, os que possuem maior inclinação da reta, são os fatores I e J, nota-se que valores menores de tempo de ciclo são obtidos no lado esquerdo da reta. Para o empenamento a posição central, ou seja, o ponto médio da reta, é que mais se aproxima de zero empenamento para os fatores I e J conforme ilustrado na Figura 48.

Este tipo de gráfico é útil pois pode-se escolher maximizar ou minimizar as variáveis de resposta. Maximizar em direção a posição (+1), minimizar em direção da posição (-1) e valor médio tem-se em (0).

4.2 PLACA PLANA - SEMI-CRISTALINOS - 2º DOE

Baseado na análise de significância estatística do primeiro experimento, onde foram observados quais fatores são significativos, um novo experimento mais refinado é elaborado. No entanto, como o objetivo deste projeto está em avaliar o efeito dos sistemas de refrigeração no tempo de ciclo e no empenamento, alguns fatores relacionados ao processo, serão mantidos constantes e fatores de projeto do sistema de refrigeração serão manipulados. Esta abordagem permite aprender mais sobre os fatores relacionados ao sistema de refrigeração.

Os fatores que serão manipulados em um novo experimento são ilustrados na Tabela 10. Neste caso, serão mantidos constantes os fatores F referente a temperatura de injeção em 240 °C, que representa o valor médio do experimento anterior, o fator G , referente ao tempo de injeção em 2,5s ,que também é o valor médio do tempo, o fator H referente ao perfil de recalque em baixo, e os fatores I e J referente a temperatura do fluido refrigerante do lado fixo e móvel em 25°C, que também representa o valor médio.

Os fatores A, B, C, D e E serão manipulados em um novo experimento, neste caso um experimento de cinco (5) fatores, dois (2) níveis correspondendo a (16) dezesseis experimentos e resolução V.

Tabela 10 – Planejamento Experimental Fracionado Placa Plana 2⁽⁵⁻¹⁾, Resolução V, 16 experimentos

ID	Descrição dos Fatores do Experimento	Unidades	[-1]	[+1]
A	Material	[-]	H503	CP442XP
B	Sistema de Refrigeração	[-]	Longitudinal	Transversal
C	Diâmetro do Canal de Refrigeração	[mm]	6	10
D	Distância Entre Canais de Refrigeração	[mm]	2D	4D
E	Distância dos Canais de Refrigeração até a Geometria	[mm]	2D	4D

Fonte: Autoria própria.

De maneira análoga ao primeiro experimento, a matriz ortogonal do segundo experimento para a placa plana é gerada no programa *Jump*.

Esta matriz é ilustrada na Tabela 11. Os graus de liberdade do experimento neste caso são os fatores principais A, B, C, D, E e as interações AB, AC, AD, AE, BC, BD, BE, CD, CE e DE.

Tabela 11 – Matriz do Segundo Experimento - Placa Plana

RO	A	B	C	D	E	
1	-1	-1	-1	-1	1	Fatores do Experimento: A - Material B - Sistema de Refrigeração C - Diâmetro do Canal de Refrigeração D - Distância Entre os Canais de Refrigeração E - Distância dos Canais de Refrigeração até a Geometria
2	-1	-1	-1	1	-1	
3	-1	-1	1	-1	-1	
4	-1	-1	1	1	1	
5	-1	1	-1	-1	-1	
6	-1	1	-1	1	1	
7	-1	1	1	-1	1	
8	-1	1	1	1	-1	
9	1	-1	-1	-1	-1	
10	1	-1	-1	1	1	
11	1	-1	1	-1	1	
12	1	-1	1	1	-1	
13	1	1	-1	-1	1	
14	1	1	-1	1	-1	
15	1	1	1	-1	-1	
16	1	1	1	1	1	
RO	A	B	C	D	E	

Fonte: Autoria própria.

Este experimento é mais refinado do que o anterior e permitirá decidir quais as direções para cada um dos fatores que impactam na

redução do tempo de ciclo e no empenamento.

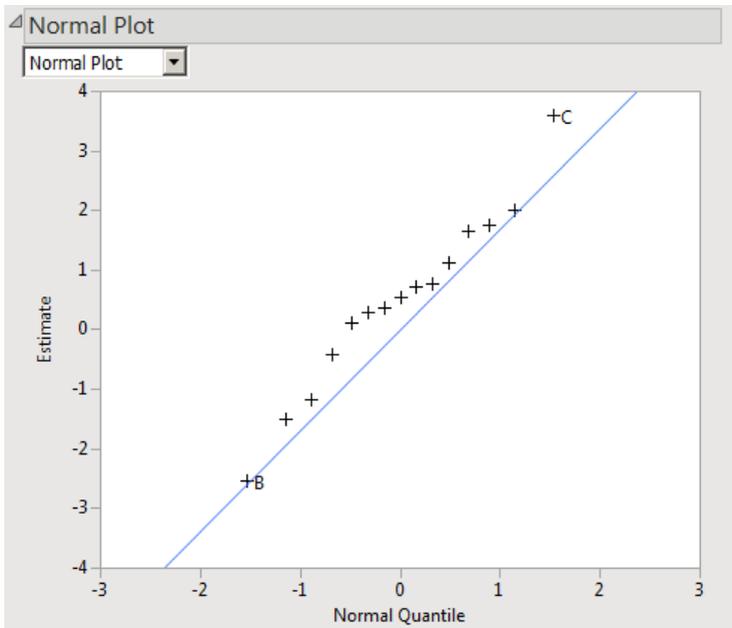
De maneira análoga ao primeiro experimento, a aderência do modelo é avaliada de acordo com o valor de $R^2(RSquare)$, que é uma medida de ajuste de um modelo estatístico linear generalizado, como a regressão linear, em relação aos valores observados.

Para o tempo de ciclo é observado um $R^2 = 1$, ou seja, indica um modelo estatisticamente perfeito e apresenta um valor médio de 32.86s.

E para o empenamento é observado um $R^2 = 1$, ou seja, indica um modelo estatisticamente perfeito e apresenta um valor médio de 0.034mm.

O gráfico de probabilidade normal do segundo experimento é ilustrado pela Figura 49, é observado que os fatores mais significativos afastam-se mais da curva azul de distribuição normal.

Figura 49 – Gráfico de probabilidade normal para o Tempo de Ciclo



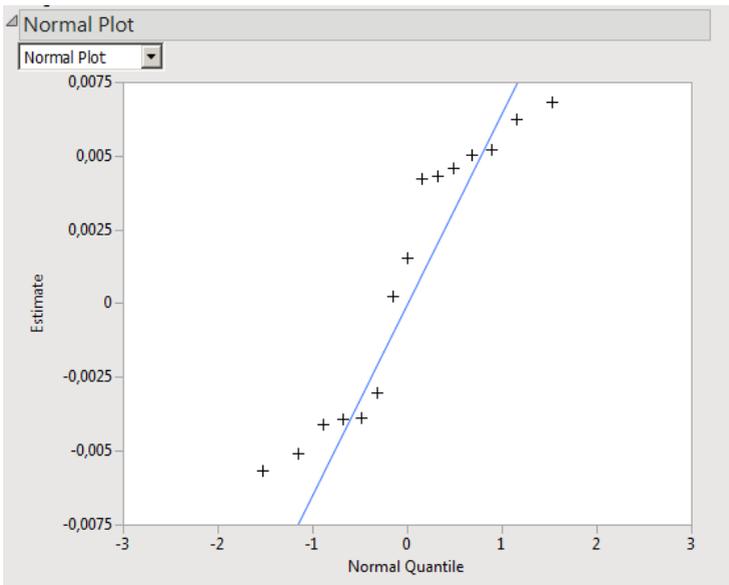
Fonte: Autoria própria.

Neste caso temos que o fator C , referente ao diâmetro do canal de refrigeração, e o fator B referente ao sistema de refrigeração são os mais significativos para o tempo de ciclo.

A mesma análise do gráfico de probabilidade normal é utilizada para a variável de resposta do empenamento, é observado que dentre os fatores manipulados no experimento nenhum aparece como sendo significativo para o empenamento baseado no teste de significância estatística.

O gráfico de probabilidade normal para o empenamento é ilustrado pela Figura 50, onde é observado que não há fatores significativos.

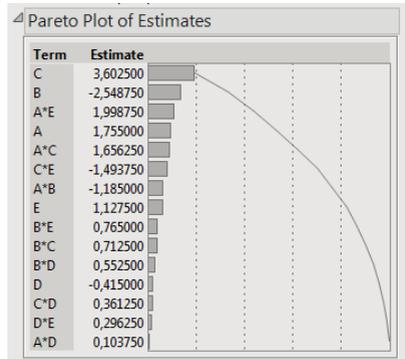
Figura 50 – Gráfico de probabilidade normal para o Empenamento



Fonte: Autoria própria.

A Figura 51 ilustra os fatores mais significativos para o tempo de ciclo, neste caso apenas o fator (C), diâmetro do canal de refrigeração, seguido pelo fator (B), sistema de refrigeração conforme observado anteriormente no gráfico de probabilidade normal.

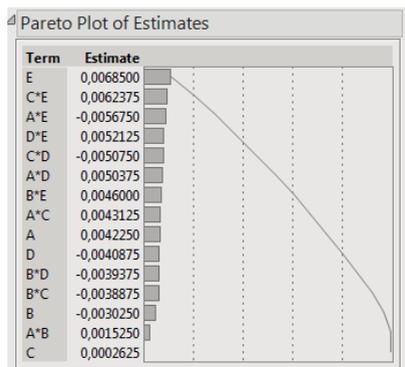
Figura 51 – Gráfico de Pareto para o Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

Analisando o gráfico de Pareto para o empenamento na Figura 52, temos que o fator (E), relacionado a distância dos canais de refrigeração até a geometria, aparece como primeiro item da lista, porém como visto anteriormente no gráfico de probabilidade normal, este fator não mostrou-se como significativo. Como trata-se de um fator principal, faz sentido analisá-lo mesmo não aparecendo no gráfico como significativo.

Figura 52 – Gráfico de Pareto para o Empenamento



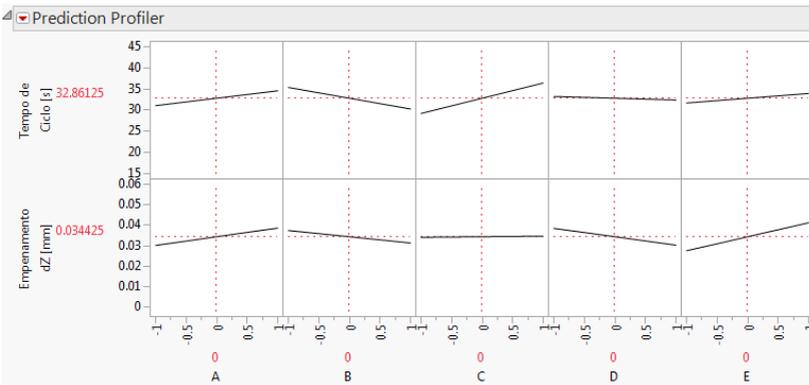
Fonte: Autoria própria.

Sabendo quais são os fatores significativos, uma maneira gráfica de avaliar o efeito destes fatores no tempo de ciclo e no empenamento pode ser feito usando o gráfico de estimativa

Este tipo de análise gráfica permite entender o nível de significância do fator através do coeficiente angular da reta, quanto mais inclinado este for, maior será a significância do fator. Este tipo de gráfico permite entender qual direção seguir no experimento para minimizar ou maximizar a variável de resposta. Existe a possibilidade de escolher os níveis dos fatores movendo o cursor para (-1) ou (+1) ou até mesmo mantendo-o centrado em (0).

A análise completa dos resultados observados no gráfico de perfil de estimativa ilustrado pela Figura 53 para os fatores significativos primeiramente e não significativos na sequencia é apresentada e algumas conclusões são listadas para a variável tempo de ciclo.

Figura 53 – Perfil de Estimativa do Experimento



Fonte: Autoria própria.

- Fator (C) Diâmetro do Canal de Refrigeração: Com relação ao diâmetro do canal de refrigeração, valores menores, tendem por

apresentar menor tempo de ciclo. De fato, modificando o diâmetro muda a área da seção e conseqüentemente a vazão;

- Fator (B) Sistema de Refrigeração: O sistema de refrigeração transversal, tende por valores menores de tempo de ciclo. De fato, pois esta configuração permite maior número de passadas ao longo da extensão da geometria, favorecendo a troca de calor;
- Fator (A) Material: Para esta geometria o material apresentou baixa significância estatística comparado aos demais fatores, ambos H503 e CP442XP podem ser utilizados pois a variação é pequena no tempo de ciclo;
- Fator (D) Distância Entre os Canais de Refrigeração: O fator D, baixa significância, relacionado a distância entre canais de refrigeração, quando no nível (+1) ou (-1), tende por valores menores de tempo de ciclo. Este espaçamento deve ser função do diâmetro;
- Fator (E) Distância dos Canais de Refrigeração até a Geometria: Por fim, o fator E, baixa significância, que diz respeito a distância dos canais de refrigeração até a geometria, quando no nível (-1) tende por valores menores de tempo de ciclo. De fato, quanto mais próximo da geometria melhor será a troca de calor.

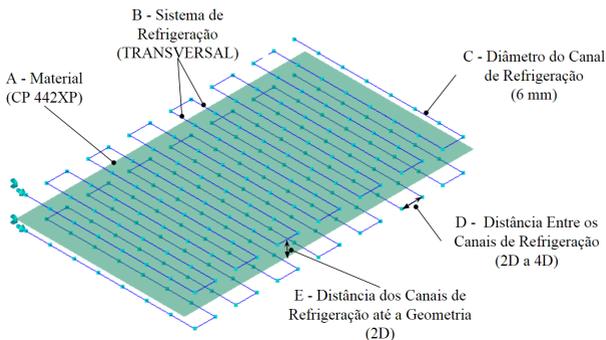
A análise completa de todos os fatores que são significativos e não significativos para a variável de resposta empenamento e algumas conclusões são listadas abaixo:

- Fator (E) Distância dos Canais de Refrigeração até a Geometria: A distância dos canais de refrigeração até a geometria, baixa significância, para o empenamento, indica que quanto mais próximo da peça melhor para obter valores próximos de zero;
- Fator (A) Material: Para esta geometria o material apresentou baixa significância estatística comparado aos demais fatores, ambos H503 e CP442XP podem ser utilizados pois a variação é pequena no empenamento;

- Fator (B) Sistema de Refrigeração: O sistema de refrigeração transversal, baixa significância, tende por valores próximos de zero para o empenamento;
- Fator (C) Diâmetro do Canal de Refrigeração: O diâmetro do canal de refrigeração, baixa significância, quanto maior este diâmetro melhor para minimizar o empenamento, o que vai em direção oposta ao tempo de ciclo;
- Fator (D) Distância Entre os Canais de Refrigeração: A distância maior entre canais de refrigeração, baixa significância, para o empenamento, tende por valores próximos de zero.

A Figura 54 apresenta em representação esquemática do modelo com melhor configuração para o tempo de ciclo e empenamento observado no experimento e também baseado no perfil de estimativa.

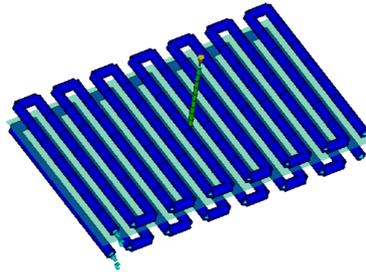
Figura 54 – Esquemático do modelo usado no simulador com a melhor configuração de acordo com a análise do DOE



Fonte: Autoria própria.

Uma representação tridimensional da melhor combinação obtida de parâmetros de projeto para o sistema de refrigeração é apresentada na Figura 55, esta combinação será validada posteriormente em um experimento de parâmetros de processo para avaliar o conceito mediante as variações de parâmetros de processo.

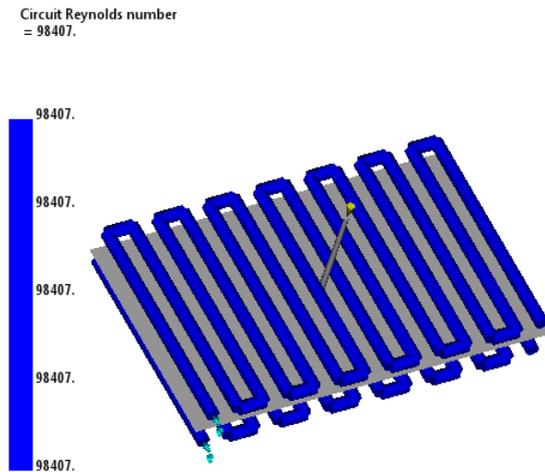
Figura 55 – Representação 3D do modelo usado no simulador da melhor configuração com a refrigeração obtido do DOE



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 56 é ilustrado o resultado do Número de Reynolds obtido por simulação, onde é observado um valor de 98407 para o modelo com melhor combinação de parâmetros de projeto, ou seja, regime turbulento pois $Re > 10000$ indica escoamento turbulento, o que normalmente é melhor para a eficiência da transferência de calor.

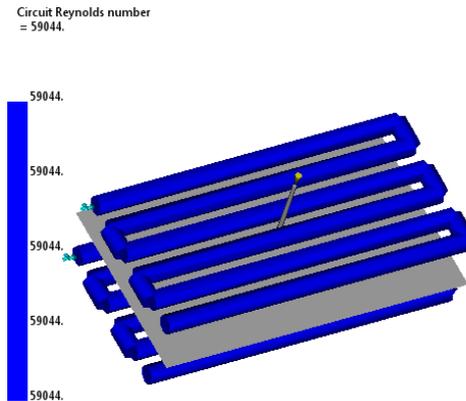
Figura 56 – Número de Reynolds para o melhor caso observado no DOE



Fonte: Autoria própria.

O modelo com resultados inferiores, ou seja, pior combinação de parâmetros de projeto de sistema de refrigeração é ilustrado pela Figura 57, onde é observado um valor de 59044 para o Número de Reynolds, de fato, este valor também representa um escoamento turbulento, porém o apresentado anteriormente é 40% melhor.

Figura 57 – Número de Reynolds para o pior caso observado no DOE



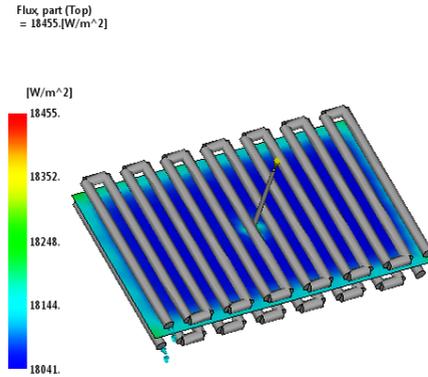
Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados observados, há uma diferença de 40% entre o melhor e o pior caso. Ambos sistemas de refrigeração estão em regime turbulento, porém a melhor combinação de parâmetros de projeto ocorre quando os canais de refrigeração encontram-se mais próximos da geometria da peça e também quando os diâmetros dos canais de refrigeração são menores.

Outro gráfico relevante obtido do simulador para o estudo de tempo de ciclo diz respeito ao fluxo térmico, que mostra a taxa média de fluxo de calor através da fronteira entre o molde e a peça durante o ciclo de injeção.

É observado um valor maior de fluxo térmico para a melhor combinação de parâmetros de projeto conforme ilustrado na Figura 58, neste caso, o maior fluxo de calor observado é de 18455 W/m^2 , atravessando a fronteira entre molde e peça.

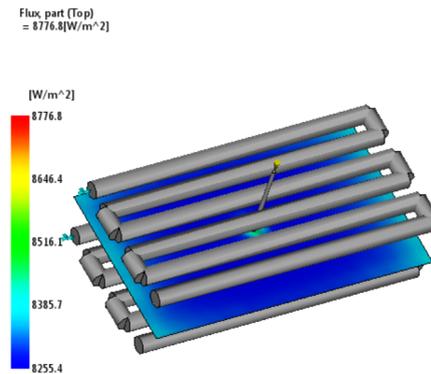
Figura 58 – Fluxo térmico do melhor caso observado no DOE



Fonte: Autoria própria.

Valores menores de fluxo térmico, no caso 8776.8 W/m^2 , são observados para o pior caso conforme ilustrado pela Figura 59. Estes valores são bem inferiores ao melhor caso evidenciando uma baixa taxa de fluxo de calor para esta configuração de parâmetros de projeto de sistema de refrigeração.

Figura 59 – Fluxo térmico do pior caso observado no DOE



Fonte: Autoria própria.

A diferença de fluxo térmico observado, entre o melhor e pior caso de combinação de parâmetros de projeto é de 52.44% . A escolha do melhor e pior caso é baseada nos resultados obtidos para o tempo de ciclo e empenamento. Para o tempo de ciclo foi observado 14.11s para o melhor caso e 43.97s para o pior caso. Para o empenamento, 0.0338mm e 0.0464mm para o melhor e pior caso respectivamente. Estes resultados são verificados no experimento de identificação de parâmetros de projeto significativos.

4.3 PLACA PLANA - SEMI-CRISTALINOS - 3º DOE

Os resultados obtidos no 2º DOE, permitiram entender qual a melhor combinação de parâmetros de projeto para o sistema de refrigeração.

Na sequencia, o 3º DOE terá como objetivo avaliar se o sistema de refrigeração escolhido no experimento anterior é robusto aos parâmetros de processo. Os parâmetros de processo escolhidos para este experimento são apenas três (03) conforme ilustrado na Tabela 12. O material usado é o CP442XP pois foi o que apresentou menores valores de tempo de ciclo.

Tabela 12 – Planejamento Experimental Superfície de Resposta 3⁽²⁾, Resolução Infinita, 16 experimentos

ID	Descrição dos Fatores do Experimento	Unidades	[-1]	[+1]
A	Temperatura de Injeção	[°C]	220	240
B	Temperatura da Refrigeração Lado Móvel	[°C]	20	30
C	Temperatura da Refrigeração Lado Fixo	[°C]	20	30

Fonte: Autoria própria.

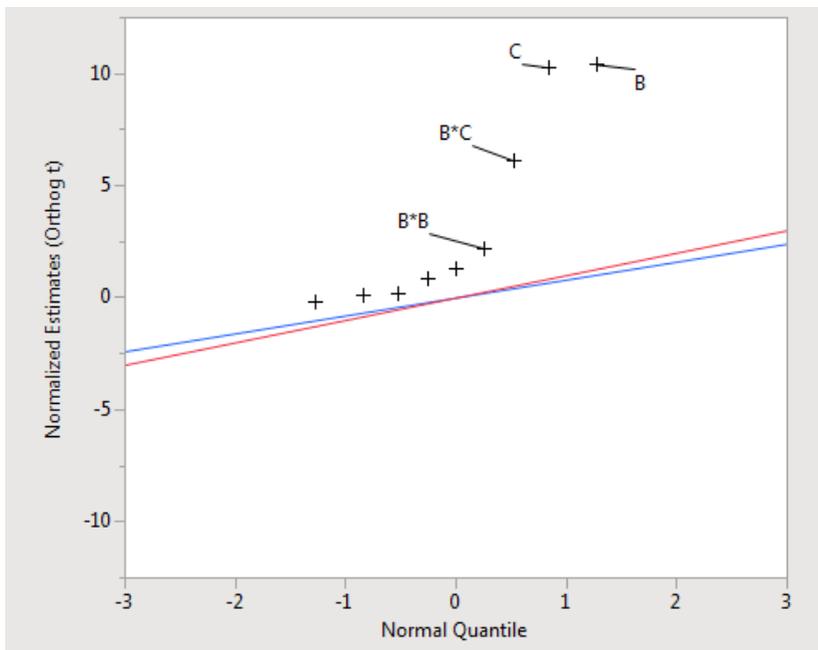
Para este experimento será utilizado superfície de resposta para a análise, na qual o efeito dos fatores será descrito por uma função quadrática ao invés de linear. A superfície de resposta permite avaliar em três dimensões as tendências dos fatores manipulados por meio de funções de múltiplos objetivos.

Para o tempo de ciclo é observado um $R^2 = 0.977$, indicando que os 97.7% dos fatores representam estatisticamente o modelo. O tempo médio de ciclo observado neste experimento é de 21,79s.

Para o empenamento é observado que o $R^2 = 0.999$, indicando que os 99.9% dos fatores representam estatisticamente o modelo. O empenamento médio observado neste experimento é de 0.034 mm.

O gráfico de probabilidade normal do experimento é ilustrado pela Figura 60 identificando os fatores mais significativos para o tempo de ciclo em ordem de significância estatística que são B, C, BC e BB.

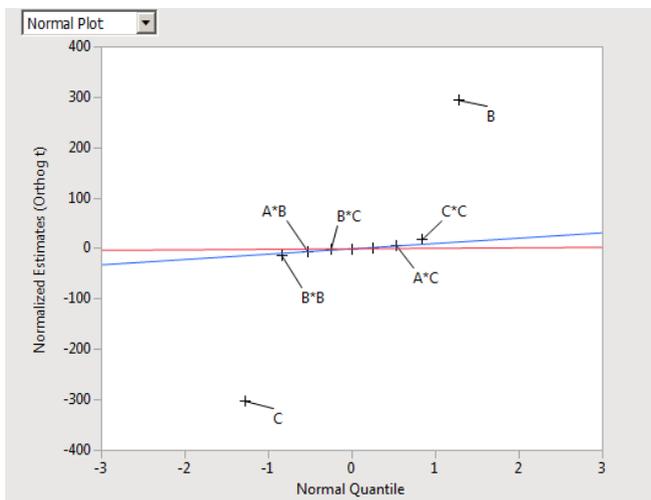
Figura 60 – Gráfico de probabilidade normal do tempo de ciclo



Fonte: Autoria própria.

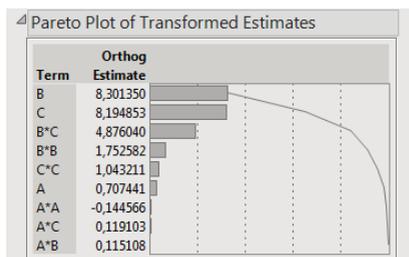
De maneira similar, os fatores mais significativos para o empenamento, são ilustrados pelo gráfico de probabilidade normal, sendo observado que os fatores C, B, CC, BB, AC, AB e BC são os mais significativos de acordo com a Figura 61.

Figura 61 – Gráfico de probabilidade normal do empenamento



Fonte: Autoria própria.

Figura 62 – Gráfico de Pareto para o tempo de ciclo

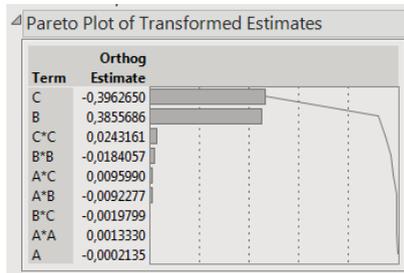


Fonte: Autoria própria.

Por meio da análise de Pareto da Figura 62, os fatores são ordenados por significância estatística e podemos notar que B, C, BC, BB, CC, A, AA, AC, AB são os mais significativos para o tempo de ciclo. Os fatores B e C referem-se a temperatura da refrigeração do lado móvel e fixo respectivamente.

Para o empenamento é observado que os fatores C, B, CC, BB, AC, AB, BC, AA, A são os mais significativos de acordo com a Figura 63.

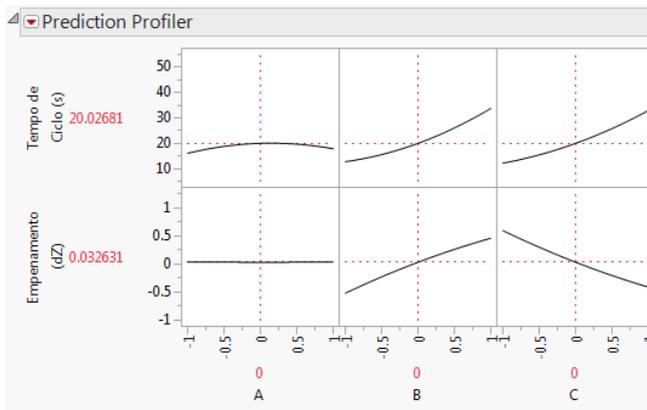
Figura 63 – Gráfico de Pareto para o Empenamento



Fonte: Autoria própria.

A Figura 64 ilustra o gráfico de estimativas e são avaliados os fatores significativos para o tempo de ciclo e empenamento. Neste caso, diferente dos experimentos anteriores, não temos mais uma reta mas sim uma função quadrática.

Figura 64 – Perfil de Estimativa final do Experimento



Fonte: Autoria própria.

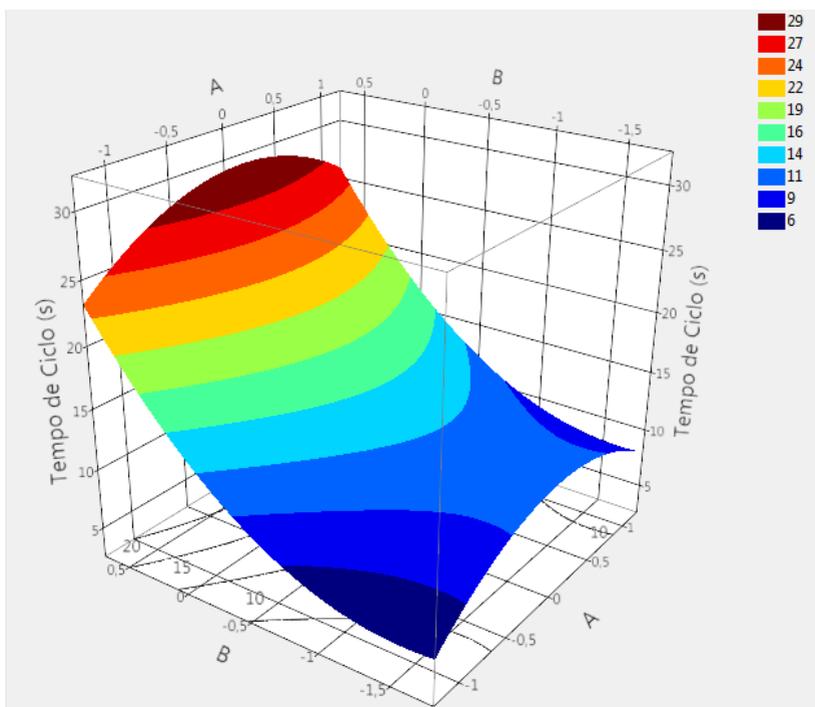
O fator (A), referente temperatura de injeção quando configurado para o nível (-1), o valor do tempo de ciclo e empenamento é menor.

O fator (B), neste caso referente a temperatura da refrigeração do lado móvel no nível (-1), tende por reduzir o tempo de ciclo e também o empenamento.

O fator (C) referente temperatura da refrigeração do lado fixo no nível (-1), indica que quanto menor é melhor para reduzir o tempo de ciclo e o empenamento.

A Figura 65 ilustra o comportamento tridimensional da interação entre os fatores AB na variável de resposta tempo de ciclo em [s].

Figura 65 – Superfície de Resposta Interação AB - Tempo de Ciclo

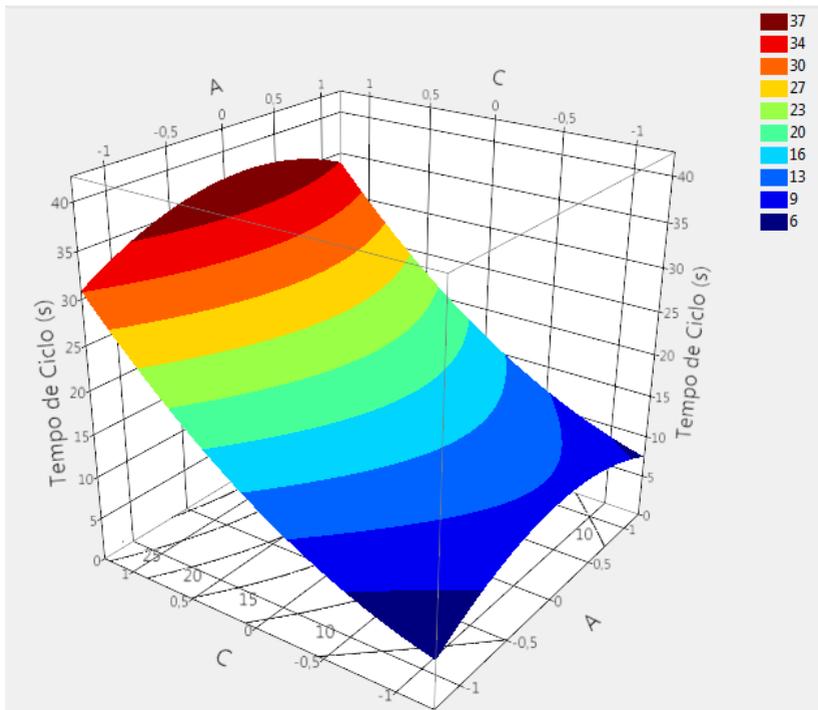


Fonte: Autoria própria.

Através deste gráfico de superfície observa-se que o fator B no nível (-1), no caso, temperatura da água do lado móvel considerando valores menores, próximo de 20° C, permite que o fator A referente a temperatura de injeção possa variar de de 220 °C a 240 °C para produzir tempos de ciclo menores. De fato, se escolher a menor temperatura de injeção, fator A, o tempo de ciclo será menor.

A Figura 66 ilustra o comportamento tridimensional da interação entre os fatores AC na variável de resposta tempo de ciclo em [s]. É observado que, desde que o fator C esteja no nível (-1), no caso, temperatura da água do lado fixo considerando valores menores próximo dos 20 °C, valores de tempo de ciclo menores são obtidos.

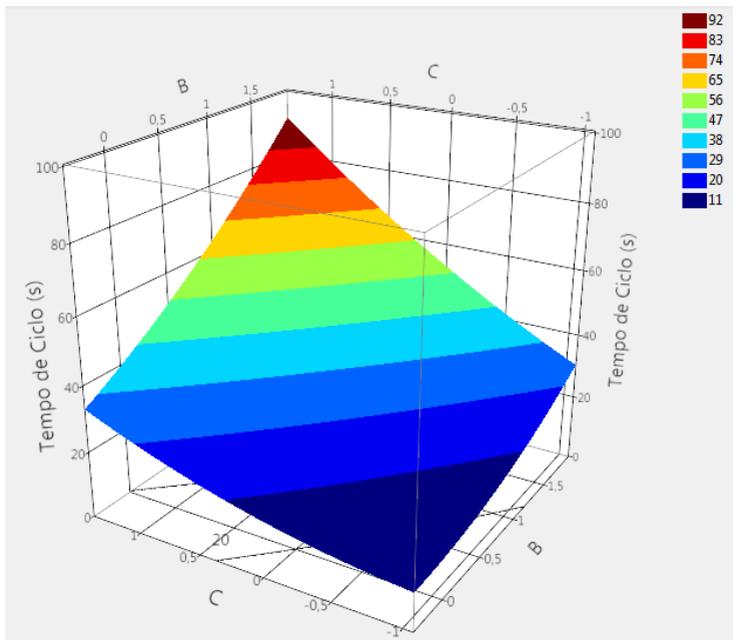
Figura 66 – Superfície de Resposta Interação AC - Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

A Figura 67 ilustra o comportamento tridimensional da interação entre os fatores BC na variável de resposta tempo de ciclo em [s]. Para obter tempo de ciclo menor é recomendado que a temperatura da água do lado fixo e móvel sejam as menores possíveis e tenham valores iguais.

Figura 67 – Superfície de Resposta Interação BC - Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

Baseado nas superfícies de resposta ilustradas anteriormente, é possível obter a equação deste polinômio que permite prever os valores do tempo de ciclo para qualquer parâmetro selecionado. Esta equação foi elaborada baseada nos resultados obtidos do experimento mediante a manipulação dos fatores de processo sendo esta ilustrada na sequência pela Figura 68.

Observa-se que o primeiro termo representa a média, e os termos subsequentes representam o efeito de cada fator na contribuição do

tempo de ciclo. Os termos quadráticos são observados nas combinações entre AA, AB, BB, AC, BC e CC. A equação para o tempo de ciclo em [s] é ilustrada na Figura 68.

Figura 68 – Equação Polinomial - Tempo de Ciclo

$$\begin{aligned}
 &20.0268137931034 \\
 &+ 0.89485 * A \\
 &+ 10.50047 * B \\
 &+ 10.36576 * C \\
 &+ A * \{ A * -3.0264706896552 \} \\
 &+ A * \{ B * 0.1627875 \} \\
 &+ B * \{ B * 3.27542931034483 \} \\
 &+ A * \{ C * 0.1684375 \} \\
 &+ B * \{ C * 6.8957625 \} \\
 &+ C * \{ C * 2.56997931034483 \}
 \end{aligned}$$

Fonte: Autoria própria.

Valores de tempo de ciclo podem ser estimados através da substituição dos valores de A, B e C. A Tabela 13 apresenta os resultados calculados. Por saber, o nível (-1) para os fatores A, B e C é de 220°C, 20°C e 20°C respectivamente e (+1) é 240°C, 30°C e 30°C. Os níveis intermediários também foram calculados e ilustrados.

Tabela 13 – Calculo do Tempo de Ciclo - Semi-cristalinos

A	B	C	Tempo de Ciclo [s]	Tempo de solidificação da peça Equação 2.2 [s]
-1	-1	-1	8.312	5.93
-0.5	-0.5	-0.5	11.658	6.16
0	0	0	20.027	6.39
0.5	0.5	0.5	33.419	6.63
1	1	1	51.834	6.44

Fonte: Autoria própria.

Para efeitos comparativos, a equação do tempo de ciclo para materiais amorfos foi obtida e os resultados são ilustrados na Tabela 14.

Tabela 14 – Calculo do Tempo de Ciclo - Amorfos

A	B	C	Tempo de Ciclo $\{s\}$	Tempo de solidificação da peça Equação 2.2 [s]
-1	-1	-1	9.486	10.22
-0.5	-0.5	-0.5	9.925	10.61
0	0	0	10.284	11.01
0.5	0.5	0.5	10.561	11.43
1	1	1	10.757	7.43

Fonte: Autoria própria.

É observado que existe variação nos valores do tempo de ciclo quando a estrutura do material muda de semi-cristalino para amorfo, isso se deve ao fato de que as principais propriedades térmicas e parâmetros de processos são diferentes.

A Tabela 15 ilustra os valores calculados, a diferença percentual entre as estruturas, a melhoria no tempo de ciclo para os semi-cristalino e a melhoria no tempo de ciclo nos amorfos.

Tabela 15 – Variações no tempo de ciclo calculado pela equação polinomial obtido no experimento

Semi-cristalinos [s]	Amorfos [s]	Diferença entre estruturas [%]	Melhoria no Semi-cristalino [%]	Melhoria no Amorfo [%]
51.83	10.76	79.25%	0	0
33.41	10.56	68.40%	35.53%	1.82%
20.02	10.28	48.65%	61.36%	4.40%
11.65	9.93	14.86%	77.51%	7.73%
8.31	9.49	-14.13%	83.96%	11.81%

Fonte: Autoria própria.

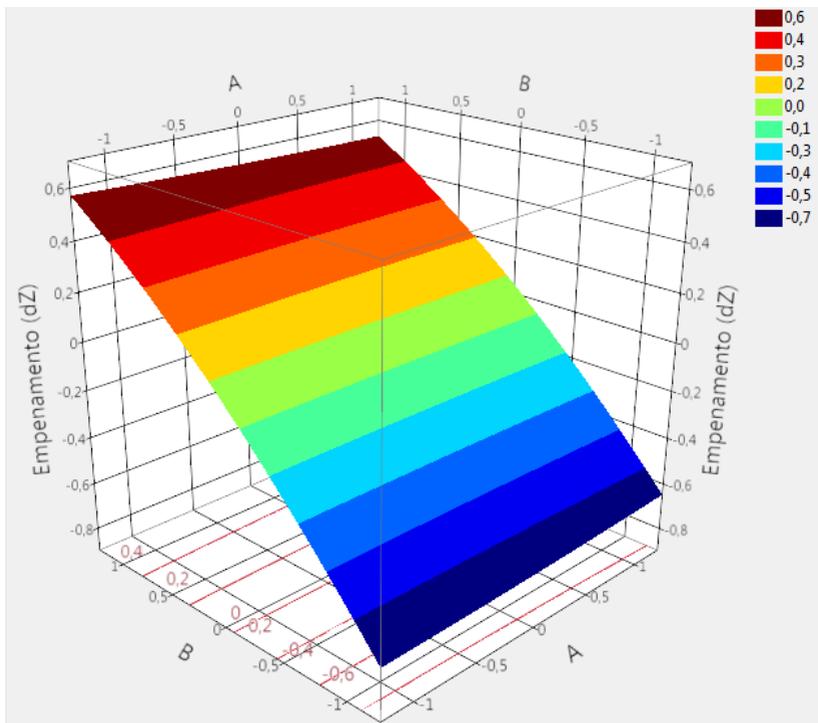
De acordo com os resultados calculados manipulando os fatores em diferentes níveis e substituindo na equação do tempo de ciclo, é possível obter valores que variam desde 8.31s a 51.83s o que representa uma melhoria de 83.96% quando em 8.31s para materiais semi-cristalino.

Para os materiais amorfos, é observado tempos de ciclo de 9.49s a 10.76s, o que representa uma pequena melhoria de 11.81%.

A mesma análise que foi apresentada para o tempo de ciclo será repetida para o empenamento na sequencia.

A Figura 69 ilustra o comportamento tridimensional da interação entre os fatores AB na variável de resposta empenamento. Nota-se que para qualquer valor de A, temperatura de injeção, desde que B esteja no nível (0), leia-se no valor médio da temperatura da refrigeração no lado móvel , os valores de empenamento se aproximam de zero.

Figura 69 – Superfície de Resposta Interação AB - Empenamento

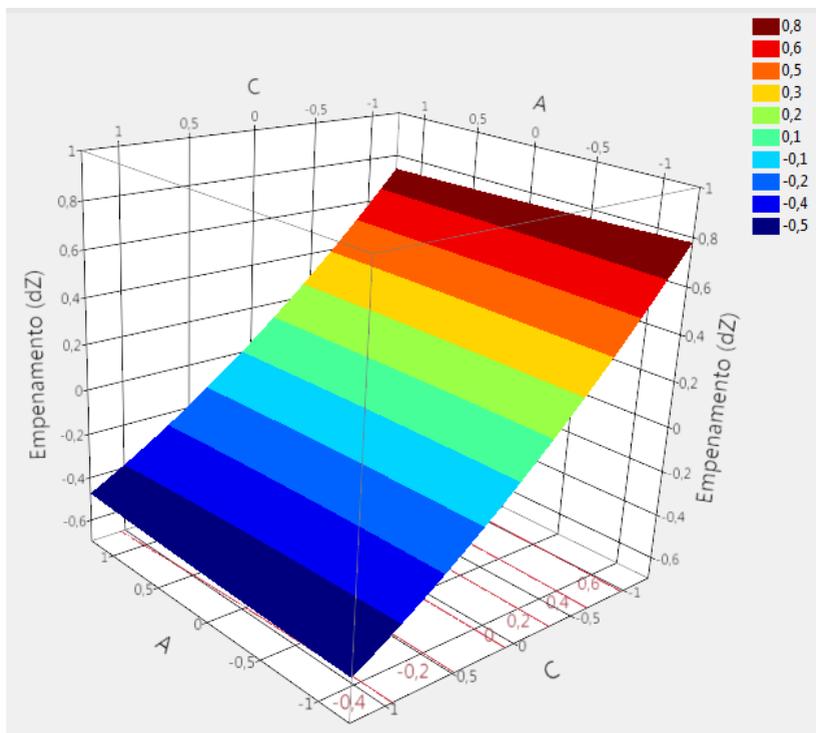


Fonte: Autoria própria.

A Figura 70 ilustra a superfície de resposta para a interação AC da variável de resposta empenamento. Nota-se que para qualquer valor

de A, temperatura do injeção, desde que C esteja no nível (0), leia-se no valor médio da temperatura da refrigeração no lado fixo, os valores de empenamento se aproximam de zero.

Figura 70 – Superfície de Resposta Interação AC - Empenamento

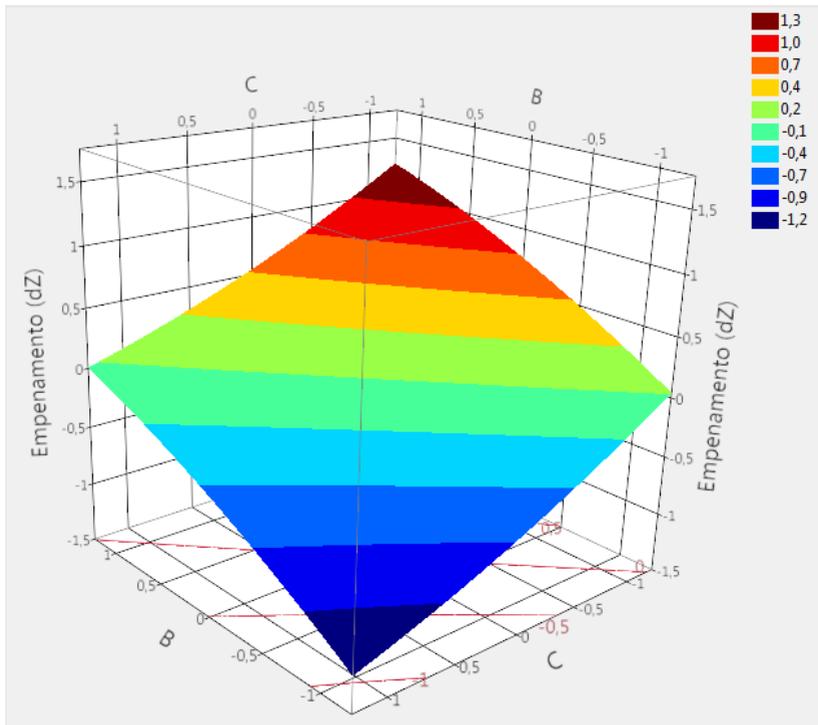


Fonte: Autoria própria.

A próxima superfície de resposta diz respeito a interação BC conforme ilustrado pela Figura 71 para a variável de resposta empenamento. É observado que o empenamento tende a zero quando ambos os fatores estão no nível (0), ou seja, o valor médio para a temperatura da refrigeração do lado móvel e fixo, neste caso 25 °C.

Baseado nas superfícies de resposta ilustradas anteriormente, é possível obter a equação deste polinômio que permite prever os valores do empenamento para qualquer parâmetro selecionado. Esta equação

Figura 71 – Superfície de Resposta Interação BC - Empenamento



Fonte: Autoria própria.

foi elaborada baseada nos resultados obtidos do experimento mediante a manipulação dos fatores de processo.

O primeiro termo representa a média, e os termos subsequentes representam o efeito de cada fator na contribuição do empenamento. Os termos quadráticos são observados nas combinações entre AA, AB, BB, AC, BC e CC. A equação para o empenamento em [mm] é ilustrada na Figura 72.

De maneira similar ao tempo de ciclo, os valores de empenamento podem ser estimados através da substituição dos valores de A, B e C na equação ilustrada na Figura 72 obtendo os dados da Tabela 16. Por saber, o nível (-1) para os fatores - A, B e C é de 220°C, 20°C e 20°C

Figura 72 – Equação Polinomial da Superfície de Resposta - Empenamento

$$\begin{aligned}
 &0.03263103448276 \\
 &+ -0.00027 * A \\
 &+ 0.48771 * B \\
 &+ -0.50124 * C \\
 &+ A * \{ A * 0.00375344827586 \} \\
 &+ A * \{ B * -0.01305 \} \\
 &+ B * \{ B * -0.0620465517241 \} \\
 &+ A * \{ C * 0.013575 \} \\
 &+ B * \{ C * -0.0028 \} \\
 &+ C * \{ C * 0.05990344827586 \}
 \end{aligned}$$

Fonte: Autoria própria.

respectivamente e (+1) é 240°C, 30°C e 30°C. Os níveis intermediários também foram calculados e ilustrados.

Tabela 16 – Calculo do Empenamento - Semi-cristalinos

A	B	C	Empenamento dZ [mm]
-1	-1	-1	0.046
-0.5	-0.5	-0.5	0.039
0	0	0	0.033
0.5	0.5	0.5	0.026
1	1	1	0.018

Fonte: Autoria própria.

Para efeitos comparativos, a equação do empenamento para materiais amorfos foi obtida e os resultados são ilustrados na Tabela 17. É observado que existe pouca variação nos valores do empenamento quando a estrutura do material muda de semi-cristalino para amorfo.

Tabela 17 – Calculo do Empenamento - Amorfos

A	B	C	Empenamento dZ [mm]
-1	-1	-1	0.035
-0.5	-0.5	-0.5	0.034
0	0	0	0.034
0.5	0.5	0.5	0.035
1	1	1	0.036

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 18 ilustra os valores obtidos e a diferença percentual entre os tempos calculados pela equação dos experimentos.

Tabela 18 – Variações no empenamento calculado pela equação

Semi-cristalinos [mm]	Amorfos [mm]	Diferença entre estruturas[%]	Melhoria no Semi-cristalino [%]	Melhoria no Amorfo [%]
0.046	0.035	23.19%	0	0
0.039	0.034	13.89%	13.99%	3.57%
0.033	0.034	-3.27%	28.70%	4.14%
0.026	0.035	-35.17%	44.14%	1.70%
0.018	0.036	-100.77%	60.31%	-3.76%

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados calculados manipulando os fatores em diferentes níveis e substituindo na equação do empenamento, é possível obter valores que variam desde 0.018 mm a 0.046mm o que representa uma melhoria de 60.31% para materiais semi-cristalino. Para os materiais amorfos, é observado empenamento de 0.034mm a 0.036mm, o que representa uma pequena melhoria de 4.14%.

Contudo, após avaliar os três experimentos para a placa plana, pode-se concluir que a aplicação de experimentos planejados para encontrar os melhores parâmetros de projeto do sistema de refrigeração e posteriormente validar este projeto em um experimento de processo apresentou bons resultados, gerou variação e o objetivo de minimizar o tempo de ciclo e o empenamento foi alcançado.

4.4 ESTRUTURADA - SEMI-CRISTALINOS - 1º DOE

Tendo com base o aprendizado dos experimentos anteriores, onde foi observado que durante a fase exploratória com trinta e dois experimentos (32) notou-se que alguns fatores podem ser mantidos constantes e os demais manipulados, esta mesma analogia e aprendizado será aplicada neste experimento. Os resultados deste primeiro experimento foram inseridos no anexo D, onde os fatores mais significativos são I e J, que dizem respeito as temperaturas do fluido refrigerante lado fixo e móvel respectivamente.

Como a intenção é determinar a melhor configuração dos parâmetros de projeto da refrigeração, estes valores serão mantidos constantes e neste momento apenas manipulados os demais fatores que serão descritos a seguir no 2º DOE.

4.5 ESTRUTURADA - SEMI-CRISTALINOS - 2º DOE

Os fatores que serão mantidos constantes e os que serão manipulados são ilustrados através da Tabela 19 .

Tabela 19 – Planejamento Experimental Fracionado Geometria Retangular Estruturada 2⁽⁵⁻¹⁾ , Resolução V , 16 experimentos

ID	Descrição dos Fatores do Experimento	Unidades	[-1]	[+1]
A	Material	[-]	H503	CP442XP
B	Sistema de Refrigeração com Defletores	[-]	Longitudinal	Transversal
C	Diâmetro do Canal de Refrigeração	[mm]	6	10
D	Distância Entre Canais de Refrigeração	[mm]	2D	4D
E	Distância dos Canais de Refrigeração até a Geometria	[mm]	2D	4D

Fonte: Autoria própria.

De maneira análoga aos experimentos anteriores, a matriz ortogonal do experimento é gerada no programa *Jump*. Esta matriz é ilustrada por meio da Tabela 20. Os graus de liberdade do experimento neste caso são os fatores principais A, B, C, D, E e as interações AB, AC, AD, AE, BC, BD, BE, CD, CE e DE. Este experimento tem maior resolução do que o anterior permitindo decidir quais as direções para cada um dos fatores que impactam na redução do tempo de ciclo e no empenamento.

Tabela 20 – Matriz do Primeiro Experimento - Geometria Retangular Estruturada

RO	A	B	C	D	E	
1	-1	-1	-1	-1	1	
2	-1	-1	-1	1	-1	
3	-1	-1	1	-1	-1	
4	-1	-1	1	1	1	
5	-1	1	-1	-1	-1	E - Distância dos Canais de Refrigeração até a Geometria
6	-1	1	-1	1	1	
7	-1	1	1	-1	1	
8	-1	1	1	1	-1	
9	1	-1	-1	-1	-1	
10	1	-1	-1	1	1	
11	1	-1	1	-1	1	
12	1	-1	1	1	-1	
13	1	1	-1	-1	1	
14	1	1	-1	1	-1	
15	1	1	1	-1	-1	
16	1	1	1	1	1	
RO	A	B	C	D	E	

Fatores do Experimento:

A - Material

B - Sistema de Refrigeração

C - Diâmetro do Canal de Refrigeração

D - Distância Entre Canais de Refrigeração

E - Distância dos Canais de Refrigeração até a Geometria

Fonte: Autoria própria.

Assim como foi feito nos experimentos anteriores, a aderência do modelo é avaliada de acordo com o valor de R^2 , que é uma medida de ajuste de um modelo estatístico linear generalizado, como a regressão linear, em relação aos valores observados.

Para o tempo de ciclo é observado um $R^2 = 1$, ou seja, que indica um modelo estatisticamente perfeito. O tempo médio de ciclo observado neste experimento é de 72.60s conforme ilustrado pela Figura 73.

Figura 73 – Representação do modelo estatístico - Tempo de ciclo

Summary of Fit	
RSquare	1
RSquare Adj	.
Root Mean Square Error	.
Mean of Response	72.59875
Observations (or Sum Wgts)	16

Fonte: Autoria própria.

Para o empenamento é observado um $R^2 = 1$, ou seja, o que

indica um modelo estatisticamente perfeito. O empenamento médio observado neste experimento é de $-0,337\text{mm}$ conforme ilustrado pela Figura 74.

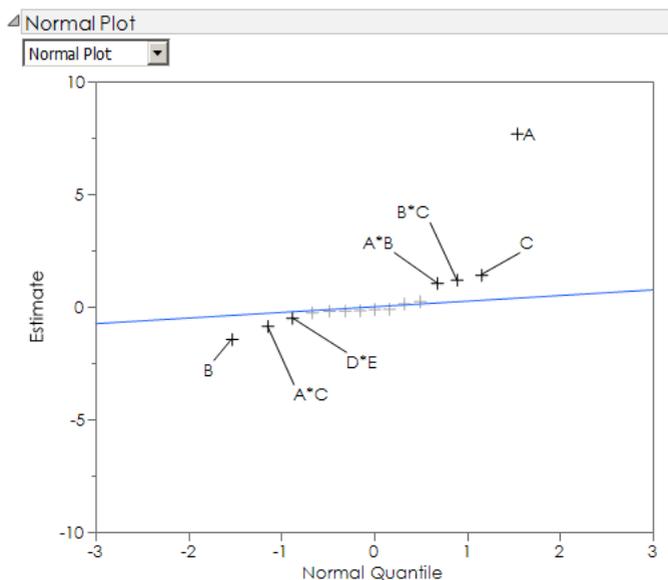
Figura 74 – Representação do modelo estatístico - Empenamento

Summary of Fit	
RSquare	1
RSquare Adj	.
Root Mean Square Error	.
Mean of Response	-0.33641
Observations (or Sum Wgts)	16

Fonte: Autoria própria.

O gráfico de probabilidade normal do experimento é ilustrado pela Figura 75, onde é observado que os fatores mais significativos afastam-se mais da curva azul de distribuição normal.

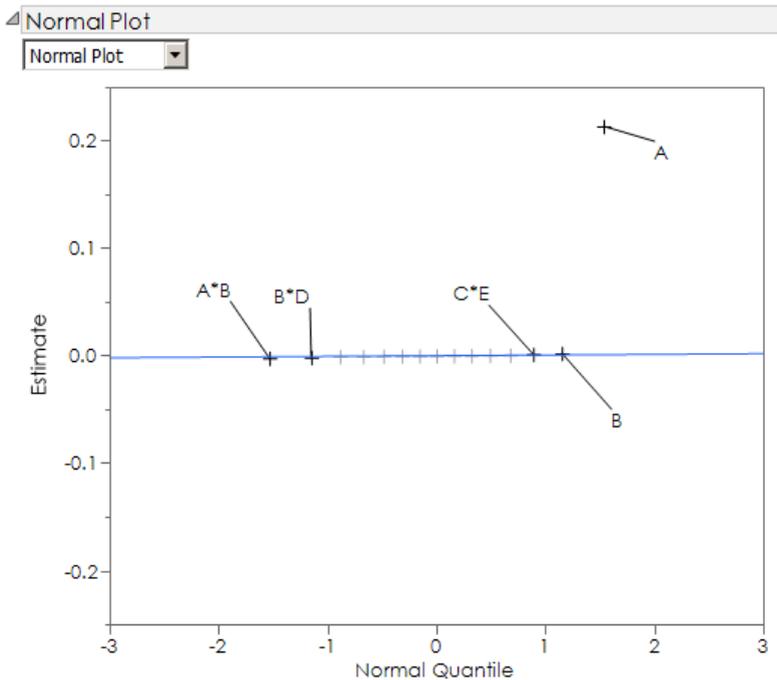
Figura 75 – Gráfico de probabilidade normal do Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

O fator A , referente ao material é o mais significativo, seguido pelo fator B, referente ao tipo de sistema de refrigeração, depois temos o fator C , referente ao diâmetro do canal de refrigeração, a interação BC e a interação AB, AC e por fim DE, como sendo os fatores mais significativos para o tempo de ciclo.

Figura 76 – Gráfico de probabilidade normal do Empenamento



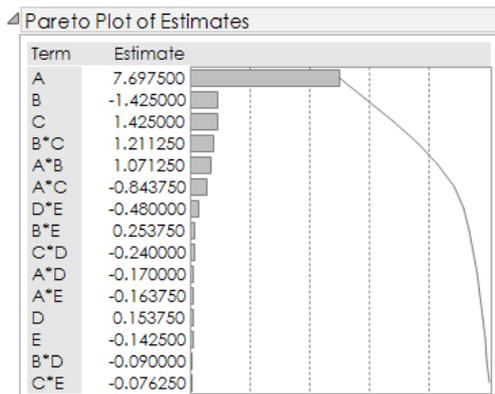
Fonte: Autoria própria.

Para o empenamento, é observado que o fator A, referente ao material, possui maior significância estatística seguido por B, AB, BD e CE conforme ilustrado pela Figura 76.

Através da análise de Pareto os fatores mais significativos são ordenados e podemos notar que os mais significativos são os fatores principais A, B, C seguidos pelas interações BC, AB, AC e DE para o tempo de ciclo.

A Figura 77 ilustra estes fatores confirmando o que foi observado no gráfico de probabilidade normal.

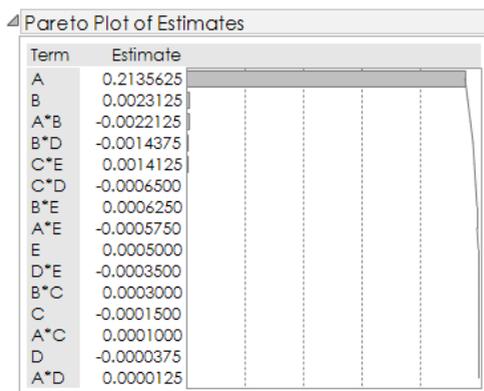
Figura 77 – Gráfico de Pareto - Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

Para o empenamento é observado que o fator A, referente ao material, apresenta maior efeito que os demais conforme ilustrado na Figura 78.

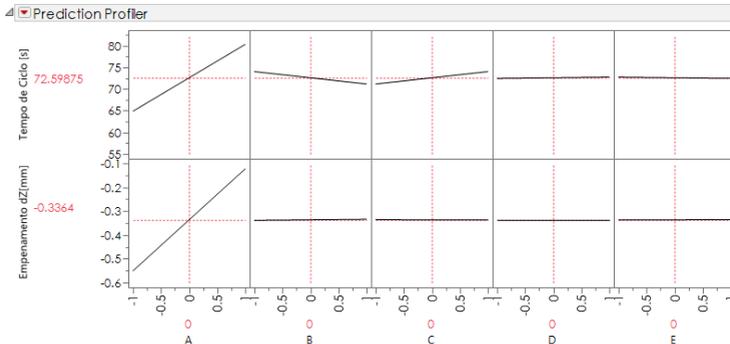
Figura 78 – Gráfico de Pareto - Empenamento



Fonte: Autoria própria.

A análise deste gráfico de estimativa apresentado pela Figura 79 é feita observando a inclinação da reta para cada fator, e quanto mais inclinada for a reta, mais significativo será o fator. A escala na parte inferior são os níveis dos fatores.

Figura 79 – Perfil de Estimativa final do Experimento



Fonte: Autoria própria.

O fator A, referente ao material, é o fator mais significativo, e quando configurado para o nível (-1), neste caso para o material H503, o valor do tempo de ciclo é minimizado, porém para o empenamento ocorre o oposto. De fato, quanto menor o calor específico mais facilidade ocorre a transferência de calor.

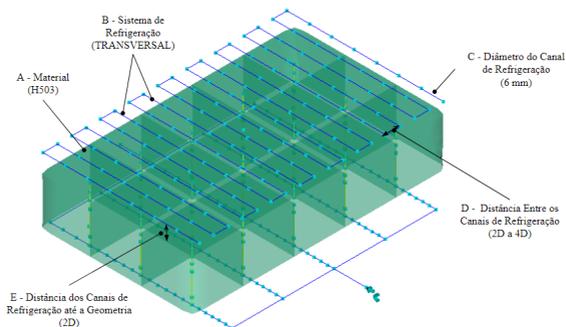
O fator B, referente ao sistema de refrigeração transversal, configurado no nível (+1), tende por contribuir na redução do tempo de ciclo. O fator C, referente ao diâmetro dos canais de refrigeração, indica que quanto menor é melhor, no caso configurado no nível (-1), para reduzir o tempo de ciclo.

O fator D, referente a distância entre os canais de refrigeração tende por valores menores de tempo de ciclo quanto maior for esta distância. E por fim, o fator E, referente a distância dos canais de refrigeração até a geometria, quanto menor este valor melhor.

A Figura 80 ilustra em representação esquemática, o modelo com melhor combinação de parâmetros de projeto baseado nos resultados

do experimento.

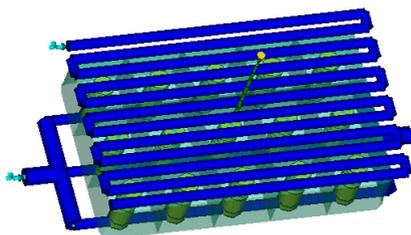
Figura 80 – Esquemático do modelo usado no simulador com melhor combinação



Fonte: Autoria própria.

A Figura 81 ilustra uma representação tridimensional da melhor combinação na qual será validada posteriormente em um experimento de parâmetros de processo para avaliar o conceito mediante as variações de parâmetros de processo.

Figura 81 – Representação do modelo 3D com melhor combinação e sistema de refrigeração

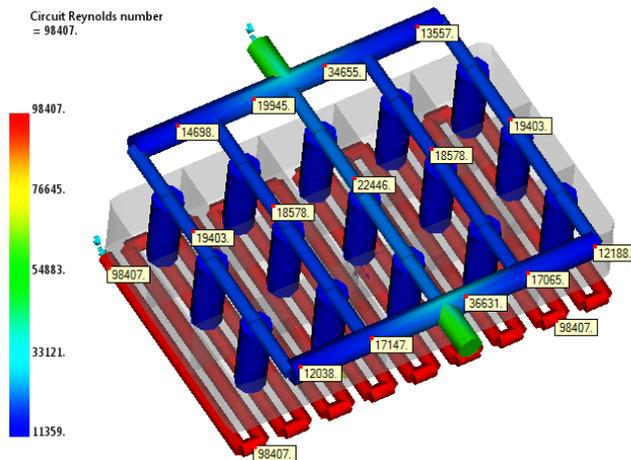


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 82 é ilustrado o Número de Reynolds obtido através da simulação, onde é observado um valor de máximo de 98407 para

os canais transversais e valores inferiores nos defletores variando entre 14000 a 22000, para o modelo com melhor combinação de parâmetros de projeto, neste caso, tem-se regime turbulento pois $Re > 10000$ indica escoamento turbulento, o que é melhor para a eficiência da transferência de calor.

Figura 82 – Número de Reynolds para o melhor caso observado no DOE



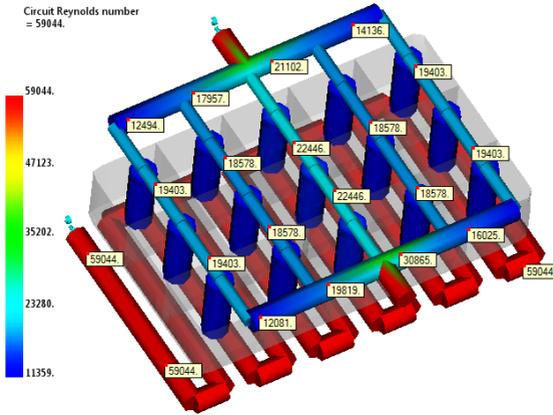
Fonte: Autoria própria.

O modelo com resultados inferiores, ou seja, pior combinação de parâmetros de projeto de sistema de refrigeração é ilustrado pela Figura 83, onde é observado um valor de máximo de 59044 para os canais transversais e valores inferiores nos defletores variando entre 12000 a 22000, para o modelo com pior combinação de parâmetros de projeto.

Neste caso, ainda tem-se regime turbulento pois $Re > 10000$ indicando escoamento turbulento, porém o modelo apresentado anteriormente é melhor em 60%.

De acordo com os resultados observados, há uma diferença de 60% entre o melhor e o pior caso. Ambos sistemas de refrigeração estão em regime turbulento, porém a melhor combinação de parâmetros de projeto ocorre quando os canais de refrigeração encontram-se próximos

Figura 83 – Número de Reynolds para o pior caso observado no DOE



Fonte: Autoria própria.

da geometria da peça e quando os diâmetros dos canais de refrigeração são menores.

Outro gráfico relevante obtido do simulador para o estudo de tempo de ciclo diz respeito ao fluxo térmico, que mostra a taxa média de fluxo de calor através da fronteira entre o molde e a peça durante o ciclo de injeção.

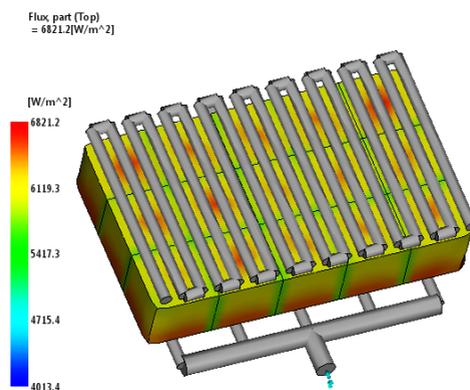
É observado um valor maior de fluxo térmico para a melhor combinação de parâmetros de projeto conforme ilustrado na Figura 84, neste caso, o maior fluxo de calor observado é de 6821 W/m^2 , atravessando a fronteira entre molde e peça.

É observado um valor menor de fluxo térmico para a pior combinação de parâmetros de projeto conforme ilustrado na Figura 85, neste caso, o maior fluxo de calor observado é de 5768 W/m^2 , atravessando a fronteira entre molde e peça.

É observado uma diferença de fluxo térmico da ordem de 15% entre o melhor e pior caso.

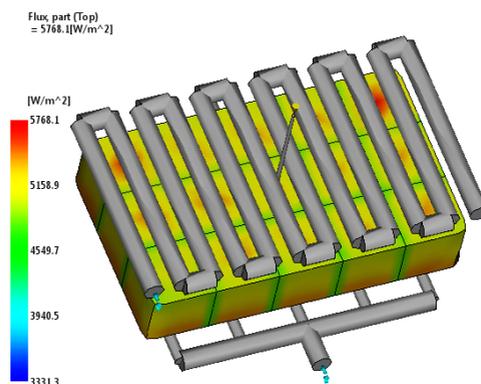
A escolha do melhor e pior caso é baseada nos resultados obtidos para o tempo de ciclo e empenamento. Para o tempo de ciclo é observado 57.62s para o melhor caso e 81.73s para o pior caso. Para o empenamento,

Figura 84 – Fluxo térmico para o melhor caso observado no DOE



Fonte: Autoria própria.

Figura 85 – Fluxo térmico para o pior caso observado no DOE



Fonte: Autoria própria.

-0.1227mm e -0.5453mm para o melhor e pior caso respectivamente. Estes resultados são verificados no experimento de identificação de parâmetros de projeto significativos.

4.6 ESTRUTURADA - SEMI-CRISTALINOS - 3º DOE

Os resultados obtidos no 2º DOE, permitiram entender qual a melhor combinação de parâmetros de projeto para o sistema de refrigeração.

Na sequência, o 3º DOE terá como objetivo avaliar se o sistema de refrigeração escolhido no experimento anterior é robusto aos parâmetros de processo. Os parâmetros de processo escolhidos para este experimento são apenas três (03) conforme ilustrado na Tabela 21 abaixo.

Tabela 21 – Planejamento Experimental Superfície de Resposta 3⁽²⁾, Resolução Infinita, 16 experimentos

ID	Descrição dos Fatores do Experimento	Unidades	[-1]	[+1]
A	Temperatura de Injeção	[°C]	220	240
B	Temperatura da Refrigeração Lado Móvel	[°C]	20	30
C	Temperatura da Refrigeração Lado Fixo	[°C]	20	30

Fonte: Autoria própria.

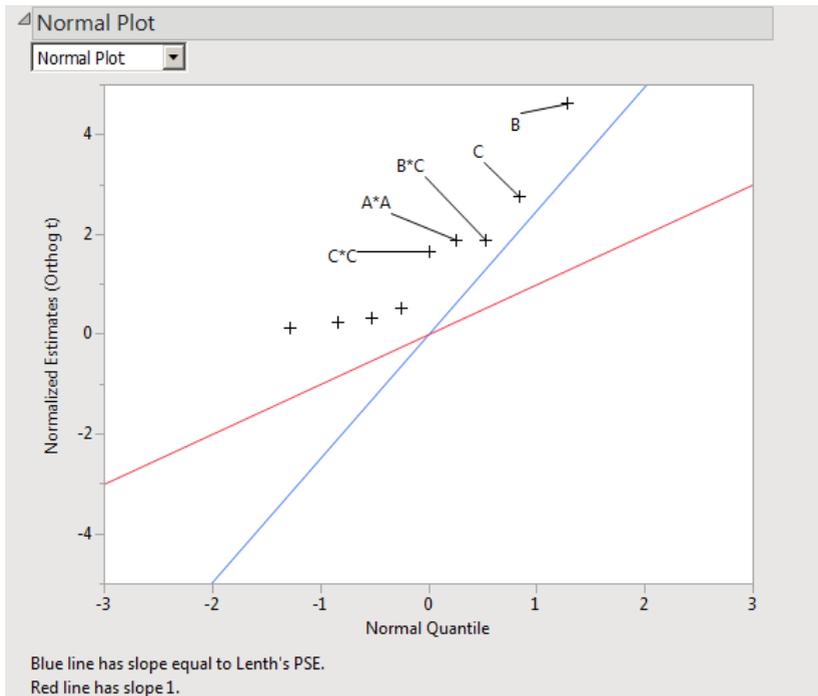
O tempo de ciclo e o empenamento serão medidos e avaliados mediante a plotagem de suas superfícies de resposta.

Para o tempo de ciclo é observado um $R^2 = 0,867$, ou seja, indica que apenas 86,7% dos graus de liberdade estão sendo considerados para representar o modelo estatisticamente, sendo que o restante diz respeito ao erro estatístico. O tempo médio de ciclo observado neste experimento é de 67.10s. Para o empenamento é observado um $R^2 = 0,867$, ou seja, indica que apenas 86,7% dos graus de liberdade estão sendo considerados para representar o modelo estatisticamente, novamente o restante diz respeito ao erro estatístico. O empenamento médio observado neste experimento é de -0,64mm.

O gráfico de probabilidade normal para o tempo de ciclo é ilustrado pela Figura 86, onde é observado que os fatores mais significativos afastam-se mais da curva azul de distribuição normal.

Como o modelo está com apenas 86,7% dos graus de liberdade, aparece uma curva em vermelho indicando os graus de liberdade para o

Figura 86 – Gráfico de probabilidade normal - Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

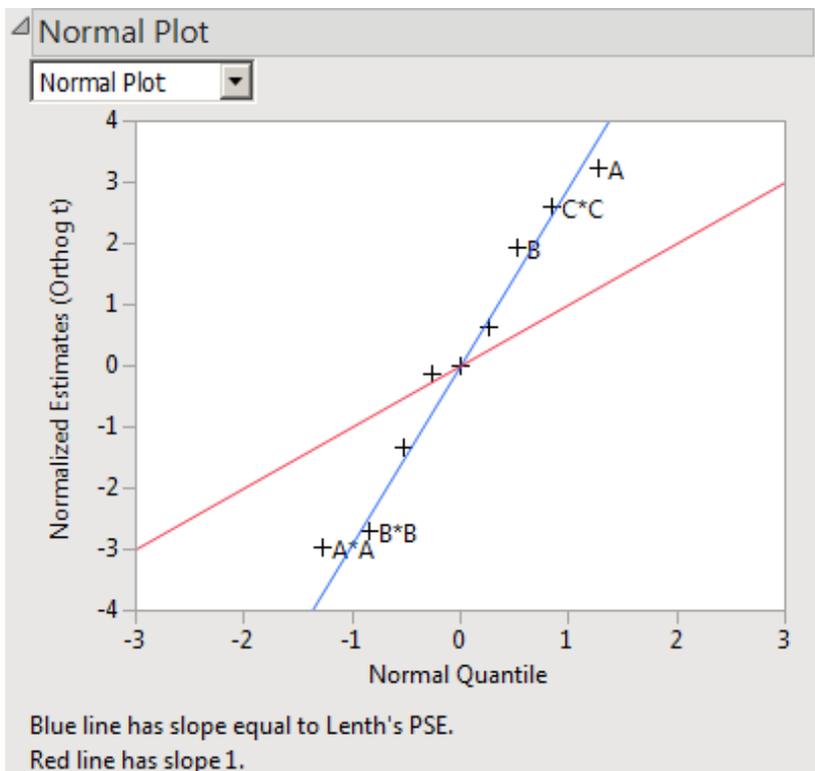
erro estatístico.

Neste caso temos que o fator B, referente a temperatura da água no lado móvel é o mais significativo, na sequencia temos o fator C, referente a temperatura da água no lado, e depois temos a interação entre os fatores BC seguidos pelas superfícies de resposta AA e CC.

Para o empenamento, é observado que o fator A, referente a temperatura de injeção possui maior significância estatística que os demais. Na sequencia temos as interações AA, BB e CC e por fim o fator B, referente a temperatura da água no lado móvel com sendo o menos significativo conforme ilustrado pela Figura 87.

Com auxílio da análise de Pareto da Figura 88, os fatores mais significativos são ordenados e podemos notar que os mais significativos são

Figura 87 – Gráfico de probabilidade normal - Empenamento



Fonte: Autoria própria.

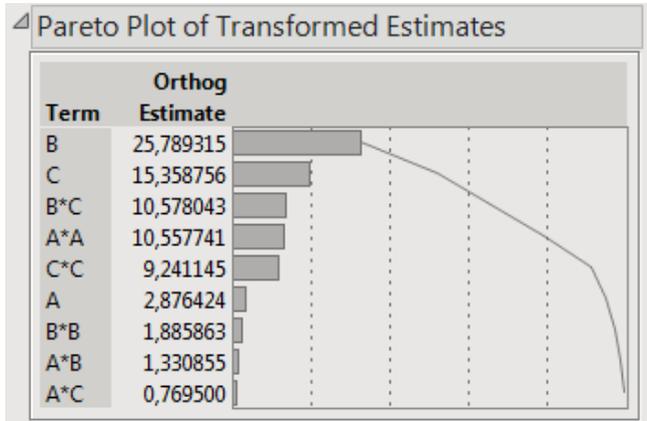
os fatores principais B e C seguidos pela interação BC e posteriormente pelas superfícies AA e CC.

Para o empenamento é observado que o fator A, referente a temperatura de injeção, apresenta maior efeito que os demais conforme ilustrado na Figura 89, seguidos pela interação AA, BB e CC, e por fim pelo fator B.

Sabendo quais são os fatores significativos, uma maneira gráfica de avaliar o efeito destes fatores no tempo de ciclo e no empenamento, pode ser feito no gráfico do perfil de estimativa.

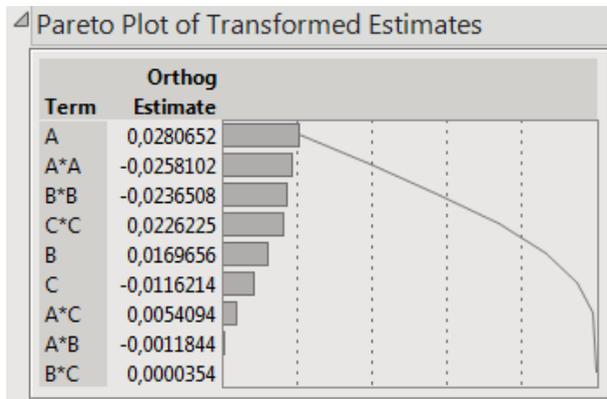
Neste caso, diferente dos experimentos anteriores, não temos mais

Figura 88 – Gráfico de Pareto - Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

Figura 89 – Gráfico de Pareto - Empenamento

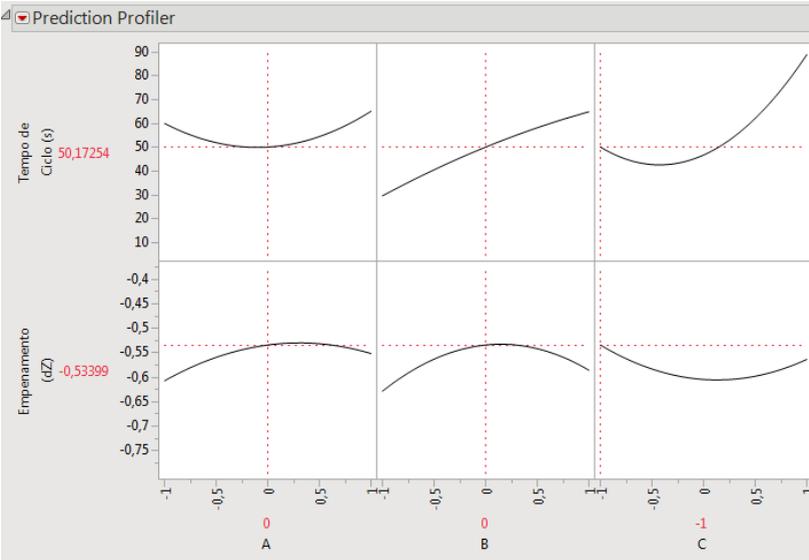


Fonte: Autoria própria.

uma reta devido ao fato de termos mais um termo para definir uma curva para avaliar os efeitos dos fatores manipulados no experimento.

Este tipo de gráfico apresenta as curvas para cada um dos fatores, e algumas conclusões podem ser feitas acerca das mesmas observando as curvas ilustradas na Figura 90.

Figura 90 – Perfil de Estimativa final do Experimento



Fonte: Autoria própria.

Nota-se que o fator A, temperatura de injeção quando no nível (0), o fator B, temperatura da refrigeração lado móvel no nível (-1), e o por fim o fator C, temperatura da refrigeração lado fixo no nível (-1) tendem por fornecer valores menores de tempo de ciclo e menor empenamento.

As curvas apresentam um ponto de inflexão, ou seja, um ponto onde o modelo apresenta uma mudança no comportamento da curva, que representa o ponto de ótimo.

Podemos observar que cada um dos fatores apresenta um ponto de inflexão característico para suas variáveis de resposta tempo de ciclo e empenamento.

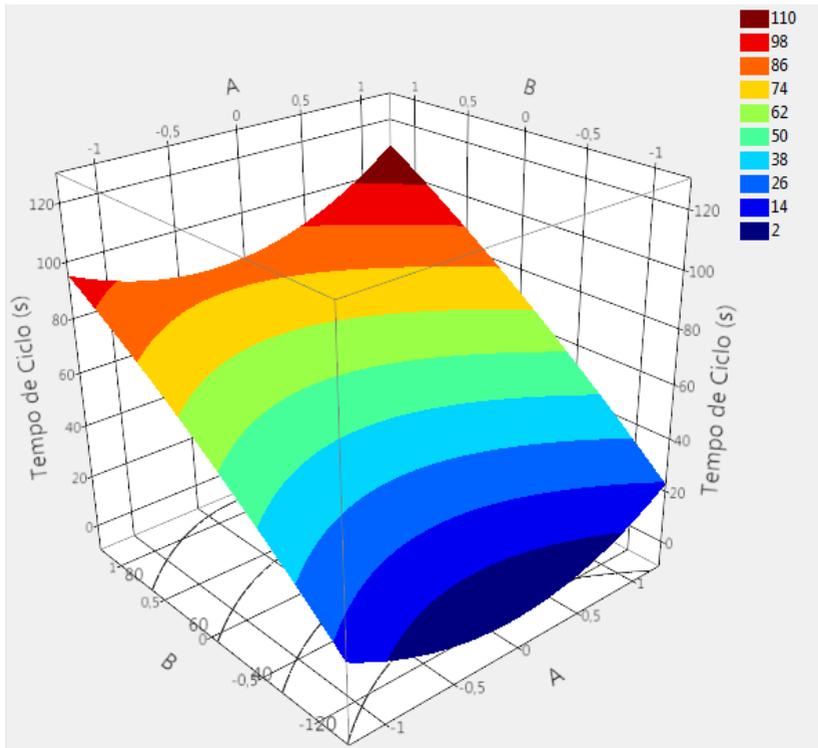
Após realizar a análise do experimento, será analisado as superfícies de resposta para o tempo de ciclo e para o empenamento.

A Figura 91 ilustra a superfície de resposta referente a interação entre os fatores AB, ou seja, entre a temperatura de injeção e a

temperatura da refrigeração do lado móvel.

Nota-se que os valores de tempo de ciclo são menores, a medida que o fator B, temperatura da refrigeração do lado móvel diminui, ou seja, aproxima-se do nível (-1) e a temperatura de injeção, fator A, permanece no valor central nível (0), que representa o valor médio deste fator.

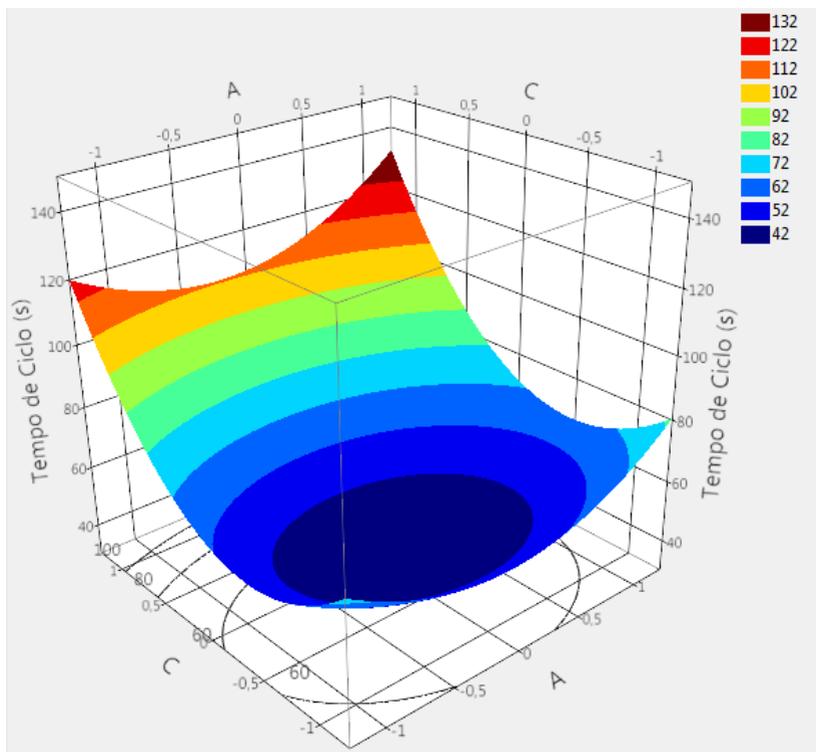
Figura 91 – Superfície de Resposta Interação AB



Fonte: Autoria própria.

A superfície de resposta característica para a interação AC, é ilustrada pela Figura 92 onde pode-se notar na geometria da superfície que existe uma região mais côncava, onde são observados valores menores para o tempo de ciclo.

Figura 92 – Superfície de Resposta Interação AC



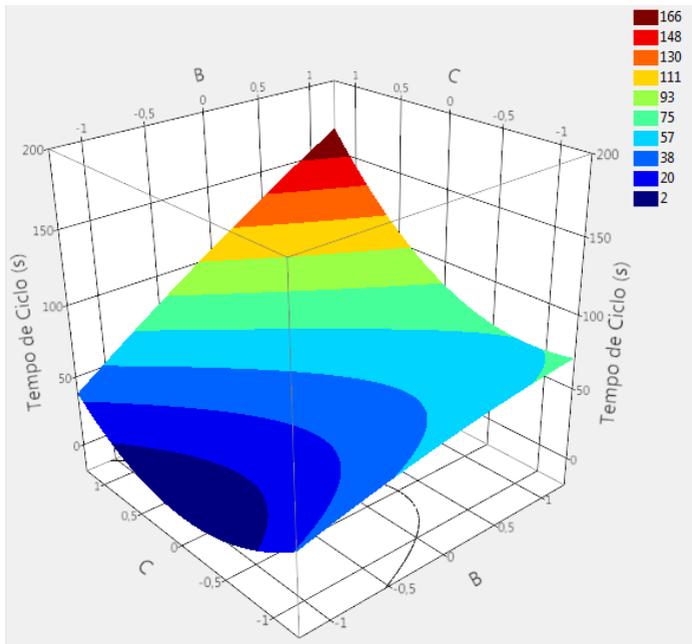
Fonte: Autoria própria.

Interação entre a temperatura de injeção, fator A, e a temperatura da refrigeração lado fixo, fator C combinados, resultam em menor tempo de ciclo quando a temperatura da refrigeração lado fixo está no nível (0), ou seja, no valor médio de temperatura, e a temperatura de injeção também no nível (0), no valor médio de temperatura de injeção.

A superfície de resposta característica para a interação BC, ou seja, interação entre a temperatura da refrigeração do lado móvel e a temperatura da refrigeração do lado fixo é ilustrada na Figura 93.

É observado pela curvatura da superfície que existe uma região onde os valores de tempo de ciclo são menores.

Figura 93 – Superfície de Resposta Interação BC



Fonte: Autoria própria.

A temperatura da refrigeração do lado móvel, fator B, no nível (-1), e a temperatura da refrigeração do lado fixo, fator C, no nível médio (0) é a combinação que reduz mais o tempo de ciclo.

Tendo como base as superfícies de resposta ilustradas anteriormente, é possível obter a equação deste polinômio na qual permite prever os valores do tempo de ciclo para qualquer parâmetro selecionado.

A equação polinomial para o tempo de ciclo é ilustrada na Figura 94. Por meio da equação apresentada, é possível prever o tempo de ciclo substituindo os fatores A, B, e C na equação por valores numéricos no intervalo de (-1) até (+1), obtendo o tempo de ciclo resultante para tal configuração.

Valores de tempo de ciclo podem ser estimados através da substituição dos valores de A, B e C. A Tabela 22 apresenta os resultados

Figura 94 – Equação Polinomial da Superfície de Resposta - Tempo de Ciclo

$$\begin{aligned}
 &46.8341931034483 \\
 &+ 3.63842 * A \\
 &+ 32.62119 * B \\
 &+ 19.42746 * C \\
 &+ A * [A * 12.5089103448276] \\
 &+ A * [B * 1.88211249999999] \\
 &+ B * [B * -2.8392396551724] \\
 &+ A * [C * 1.0882375] \\
 &+ B * [C * 14.9596125] \\
 &+ C * [C * 22.7658103448276]
 \end{aligned}$$

Fonte: Autoria própria.

Tabela 22 – Cálculo do Tempo de Ciclo - Semi-cristalinos

A	B	C	Tempo de Ciclo [s]
-1	-1	-1	41.513
-0.5	-0.5	-0.5	31.582
0	0	0	46.834
0.5	0.5	0.5	87.269
1	1	1	152.887

Fonte: Autoria própria.

calculados. O nível (-1) para os fatores A, B e C é de 220°C, 20°C e 20°C respectivamente e (+1) é 240°C, 30°C e 30°C. Os níveis intermediários também foram calculados e ilustrados.

Para efeitos comparativos, a equação do tempo de ciclo para materiais amorfos foi obtida e os resultados calculados são ilustrados na Tabela 23.

É observado que existe variação nos valores do tempo de ciclo

Tabela 23 – Cálculo do Tempo de Ciclo - Amorfos

A	B	C	Tempo de Ciclo [s]
-1	-1	-1	16.463
-0.5	-0.5	-0.5	17.010
0	0	0	17.453
0.5	0.5	0.5	17.791
1	1	1	18.024

Fonte: Autoria própria.

quando a estrutura do material muda de semi-cristalino para amorfo, isso se deve ao fato de que as principais propriedades térmicas e parâmetros de processos são diferentes. A Tabela 24 ilustra os valores obtidos e a diferença percentual entre os tempos calculados pela equação dos experimentos.

Tabela 24 – Variações no tempo de ciclo calculado pela equação

Semi-cristalinos [s]	Amorfos [s]	Diferença entre estruturas [%]	Melhoria no Semi-cristalino [%]	Melhoria no Amorfo [%]
152.88	18.02	88.21%	0	0
87.26	17.79	79.61%	42.92%	1.29%
46.83	17.45	62.74%	69.37%	3.17%
31.58	17.01	46.14%	79.34%	5.63%
41.51	16.46	60.34%	72.85%	8.66%

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados calculados manipulando os fatores em diferentes níveis e substituindo na equação do tempo de ciclo, é possível obter valores que variam desde 41.51s a 152.88s o que representa uma melhoria de 72.85% para materiais semi-cristalino.

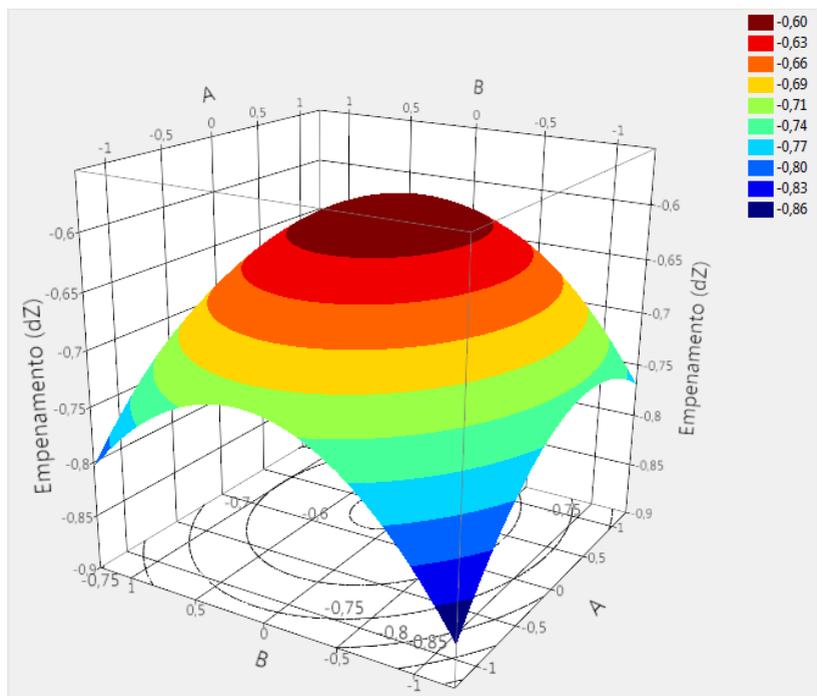
Para os materiais amorfos, é observado tempos de ciclo de 16.49s a 18.02s, o que representa uma pequena melhoria de 8.66%.

A mesma abordagem de análise realizada para o tempo de ciclo com superfícies de resposta é aplicada para o empenamento e são ilustradas na sequência, bem como a equação polinomial do empenamento e a análise comparativa.

A Figura 95 apresenta a superfície de resposta relacionada a

interação AB, ou seja, interação entre a temperatura de injeção, fator A, e a temperatura da refrigeração do lado móvel, fator B respectivamente.

Figura 95 – Superfície de Resposta Interação AB



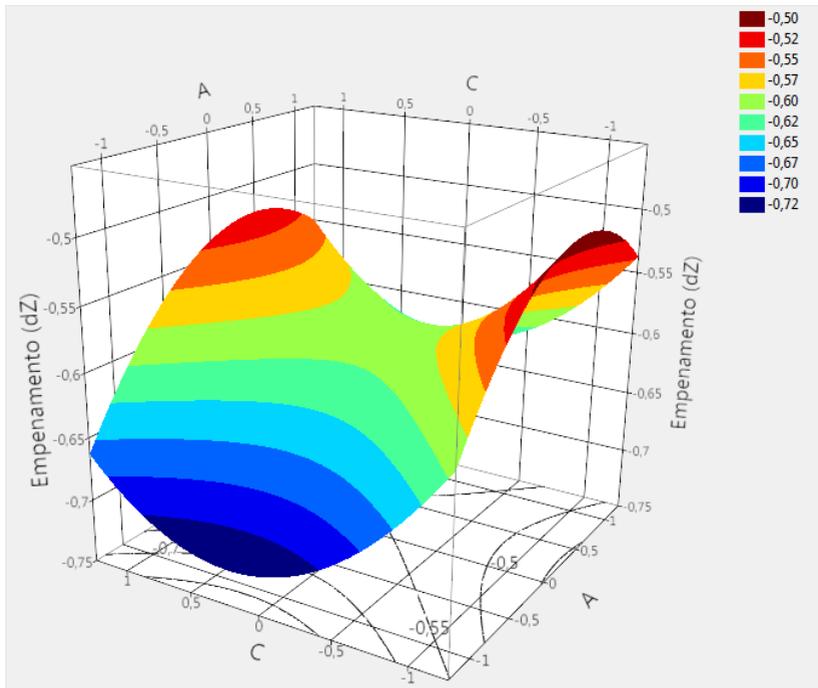
Fonte: Autoria própria.

É observado que existe um ponto de máximo na curvatura da superfície ilustrado que indica a região onde os valores de empenamento são menores.

A Figura 96 apresenta a superfície de resposta para a interação AC, ou seja, entre a temperatura de injeção, fator A, e a temperatura da refrigeração do lado fixo, fator C.

Valores menores de empenamento em $[mm]$ são encontrados quando o fator A, relacionado a temperatura de injeção, encontra-se em (0), e o fator C, referente a temperatura de refrigeração do lado fixo, pode estar em ambos os extremos (-1) e (+1), onde são obtidos valores

Figura 96 – Superfície de Resposta Interação AC



Fonte: Autoria própria.

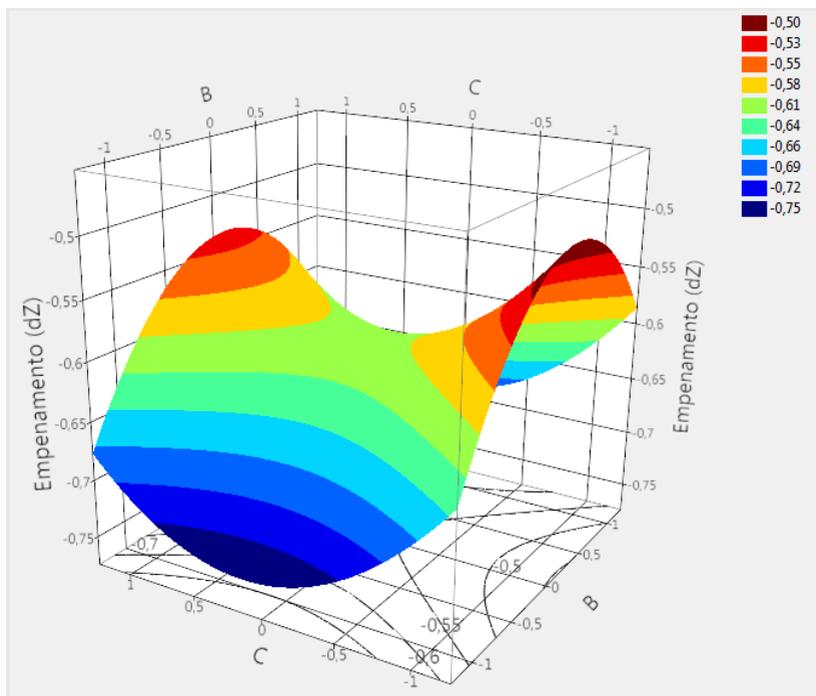
próximos de 0.5mm de empenamento.

A Figura 97 apresenta a superfície de resposta para a interação BC, ou seja, entre a temperatura da refrigeração do lado móvel, fator B, e a temperatura da refrigeração do lado fixo, fator C.

É observado que a superfície de resposta é similar a uma cela, e que os valores menores de empenamento em $[mm]$ são obtidos quando o fator B, temperatura da refrigeração do lado móvel, encontra-se no nível intermediário (0), e o fator C, temperatura da refrigeração do lado fixo em ambas as extremidades da superfície, no caso, no nível (-1) ou (+1).

Tendo como base as superfícies de resposta ilustradas anteriormente, é possível obter a equação deste polinômio que permite prever

Figura 97 – Superfície de Resposta Interação BC



Fonte: Autoria própria.

os valores do empenamento para qualquer parâmetro selecionado.

A equação para o empenamento tem o primeiro termo que é a média do experimento, seguido pelo segundo termo associado a um fator principal A, B e C e os demais são os termos quadráticos AA, AB, BB, AC, BC e CC conforme ilustrada na Figura 98.

Através da equação polinomial obtida, valores de tempo de ciclo podem ser estimados através da substituição dos valores de A, B e C apresentados na Tabela 25. O nível (-1) para os fatores A, B e C é de 220°C, 20°C e 20°C respectivamente e o nível (+1) é 240°C, 30°C e 30°C. Os níveis intermediários também foram calculados e ilustrados.

Para efeitos comparativos, a equação do empenamento para materiais amorfos foi obtida e os resultados são ilustrados na Tabela 26.

Figura 98 – Equação Polinomial da Superfície de Resposta - Empenamento

$$\begin{aligned}
 & -0.6044206896552 \\
 & + 0.0355 * A \\
 & + 0.02146 * B \\
 & + -0.0147 * C \\
 & + A * [A * -0.0452689655172] \\
 & + A * [B * -0.001675] \\
 & + B * [B * -0.0729689655172] \\
 & + A * [C * 0.00765] \\
 & + B * [C * 0.00005] \\
 & + C * [C * 0.05573103448276]
 \end{aligned}$$

Fonte: Autoria própria.

Tabela 25 – Cálculo do Empenamento - Semi-cristalinos

A	B	C	Empenamento dZ [mm]
-1	-1	-1	-0.703
-0.5	-0.5	-0.5	-0.640
0	0	0	-0.604
0.5	0.5	0.5	-0.597
1	1	1	-0.619

Fonte: Autoria própria.

Há pouca variação nos valores do empenamento quando a estrutura do material muda de semi-cristalino para amorfo. A Tabela 27 apresenta os valores obtidos para ambas estruturas, a diferença percentual e a melhoria obtida nos valores de empenamento.

De acordo com os resultados calculados manipulando os fatores em diferentes níveis e substituindo na equação do empenamento, é possível obter valores que variam desde -0.703mm a -0.619mm o que representa uma melhoria de 13.66% para materiais semi-cristalino.

Tabela 26 – Cálculo do Empenamento - Amorfos

A	B	C	Empenamento dZ [mm]
-1	-1	-1	-0.596
-0.5	-0.5	-0.5	-0.598
0	0	0	-0.601
0.5	0.5	0.5	-0.603
1	1	1	-0.604

Fonte: Autoria própria.

Tabela 27 – Variações no empenamento calculado pela equação

Semi-cristalinos [mm]	Amorfos [mm]	Diferença entre estruturas[%]	Melhoria no Semi-cristalino [%]	Melhoria no Amorfo [%]
-0.619	-0.604	2.34%	0	0
-0.597	-0.603	-0.87%	3.43%	0.26%
-0.604	-0.601	0.63%	2.30%	0.59%
-0.640	-0.598	6.47%	-3.40%	0.97%
-0.703	-0.596	15.29%	-13.66%	1.42%

Fonte: Autoria própria.

Para os materiais amorfos, é observado valores de empenamento que variam desde -0.604mm a -0.596mm , o que representa uma pequena melhoria de 1.42%.

Os resultados dos experimentos com materiais amorfos para a placa plana e para a geometria estruturada, foram inseridos nos anexos B, C, D, E e F para consulta e comparação.

5 CONCLUSÃO

De maneira geral, para o estudo de parâmetros de projeto envolvendo a geometria da placa plana considerando material de estrutura semi-cristalina, foi identificado que o fator associado ao material apresentou baixa significância estatística, neste caso ambos podem ser utilizados, e que o sistema de refrigeração transversal é o ideal, diâmetros menores de canais de refrigeração, maior distância entre os canais de refrigeração e a menor distância dos canais de refrigeração até a geometria da peça são as configurações de parâmetros de projeto de sistema de refrigeração que apresentou menores valores de tempo de ciclo e empenamento. Esta melhor configuração de parâmetros de projeto se aplica apenas nesta geometria.

Através dos resultados do estudo de parâmetros de processo para a placa plana considerando o material de estrutura semi-cristalina, foi identificado que os valores de tempo de ciclo e empenamento variam significativamente de acordo com a combinação de fatores escolhidas no experimento. Foram obtidos valores de tempo de ciclo da ordem de 51.83s à 8.31s, o que representa uma melhoria de 83.96%. Para o empenamento, os valores obtidos são da ordem de 0.046mm à 0.018mm o que representa uma melhoria de 60.31%. Estes valores representam os extremos do experimento, ou seja, o valor máximo e mínimo testados.

Para o mesmo estudo da placa plana considerando material de estrutura amorfa, os valores obtidos de tempo de ciclo variam de 9.49s à 10.76s, o que representa uma melhoria pequena de 11.81%. Para o empenamento, os valores obtidos são da ordem de 0.036mm à 0.034mm, o que representa uma pequena melhoria de 3.76%. Estes valores também representam os extremos do experimento, ou seja, o valor máximo e mínimo testados.

Conclui-se que para o experimento da placa plana em materiais semi-cristalinos, o tempo de ciclo e o empenamento são muito sensíveis as variações de temperaturas de injeção e refrigeração, o que não foi observado no mesmo estudo considerando materiais amorfos, neste caso, houve pouca variação no tempo de ciclo e empenamento quando

submetido a variações de temperaturas de injeção e refrigeração.

Para o estudo da geometria estruturada, considerando material de estrutura semi-cristalina, foi identificado que o melhor material é H503, de fato, devido ao baixo calor específico quando comparado com o CP442XP este material proporciona melhor transferência de calor, para o sistema de refrigeração o conceito transversal é o ideal, diâmetros menores de canais de refrigeração, maior distância entre os canais de refrigeração e a menor distância dos canais de refrigeração até a geometria da peça são as configurações de parâmetros de projeto de sistema de refrigeração que apresentou menores valores de tempo de ciclo e empenamento.

Definida a melhor configuração de parâmetros de projeto para o sistema de refrigeração da geometria estruturada, este projeto foi submetido ao experimento de validação mediante a variação de parâmetros de processo, para entender a robustez da melhor configuração.

Através dos resultados do estudo de parâmetros de processo para a geometria Estruturada considerando o material de estrutura semi-cristalina, foi identificado que os valores de tempo de ciclo e empenamento também variam significativamente de acordo com a combinação de fatores escolhidos no experimento. Foram obtidos valores de tempo de ciclo da ordem de 152.88s à 41.51s, o que representa uma melhoria de 72.85%. Para o empenamento, os valores obtidos são da ordem de -0.703mm à -0.619mm o que representa uma melhoria de 13.66%. Estes valores representam os extremos do experimento, ou seja, o valor máximo e mínimo testados.

Para o mesmo estudo da geometria estruturada considerando material de estrutura amorfa, os valores obtidos de tempo de ciclo variam de 18.02s à 16.46s, o que representa uma melhoria pequena de 8.66%. Para o empenamento, os valores obtidos são da ordem de -0.604mm à -0.596mm, o que representa uma pequena melhoria no empenamento de 1.42%. Estes valores também representam os extremos do experimento, ou seja, o valor máximo e mínimo testados.

Conclui-se que para o experimento da geometria estruturada em materiais semi-cristalinos, o tempo de ciclo e o empenamento são muito

sensíveis as variações de temperaturas de injeção e refrigeração, o que não foi observado no mesmo estudo considerando materiais amorfos, neste caso, houve pouca variação no tempo de ciclo e empenamento quando submetido a variações de temperaturas de injeção e refrigeração.

Em ambas geometrias testadas, placa plana e estruturada, o tempo de ciclo e o empenamento são afetados diretamente quando há mudança na estrutura do material semi-cristalino para amorfo.

Em resumo, para a placa plana, os fatores que mais significativos que oneram o tempo de ciclo e empenamento são o diâmetro dos canais de refrigeração e o sistema de refrigeração do tipo transversal, e para a geometria estruturada temos que o material, o sistema de refrigeração transversal, e o diâmetro do canal de refrigeração menor são os mais significativos.

As equações obtidas através dos experimentos de superfície de resposta para o tempo de ciclo e empenamento permitem obter de forma rápida e direta os valores para cada combinação de parâmetros de processo, podendo ser extrapolada para valores além do espaço de abrangência do experimento. A equação fornecida pela literatura restringe-se a estimativa de tempo de solidificação da peça, o que é um bom parâmetro para estimar o tempo de ciclo quando na fase de projeto.

Conclui-se que a utilização de experimentos planejados sequenciais auxiliados pelas ferramentas CAE de simulação de injeção contribuem significativamente para o entendimento e direcionamento do projeto de sistemas de refrigeração em moldes de injeção.

De fato, o benefício em testar diferentes conceitos de projeto e posteriormente sua robustez aos parâmetros de processo sem a necessidade de fazer protótipos físicos tem grande valia no projeto de moldes do ponto de vista econômico, da agilidade e da melhoria da qualidade da peça moldada.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, validar na prática os resultados obtidos por simulação, através da construção de moldes protótipos da geometria placa plana e da geometria estruturada, testar outros materiais e variar as espessuras das geometrias seria de grande valia para agregar conhecimento aos estudos apresentados e validar os cálculos obtidos pelas equações de tempo de ciclo e empenamento nesta dissertação.

REFERÊNCIAS

- AHRENS, C. H. *Características desejáveis para a implantação e o emprego de sistemas CAE/CAD/CAM no setor de molde de injeção de plásticos*. 204 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.
- Alfredo Campo, E. *The Complete Part Design Handbook: for Injection Molding of Thermoplastics*. Munich: Hanser Gardner Publications, Inc., 2006. 539 p. ISBN 9781569903759.
- BERNER, J. A. *Análise e melhoria do sistema de refrigeração em moldes de injeção de termoplásticos*. 65 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- BROOKS, H.; BRIGDEN, K. Design of conformal cooling layers with self-supporting lattices for additively manufactured tooling. *Additive Manufacturing*, Elsevier B.V., v. 11, p. 22, 2016. ISSN 2214-8604. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2016.03.004>>.
- Canevarolo Jr., S. V. *Ciência dos Polímeros - Um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. 2^a. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2006. 280 p.
- CHAGAS, B. D. E. O. *Métodos de Elementos Finitos e Diferenças Finitas para a equação de Helmholtz*. 107 p. Tese (Dissertação) — Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2013.
- DANGEL, R. *Injection Moulds for Beginners*. Munich: Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2016. 326 p. ISBN 9781569906316.
- EIAMSA-ARD, K.; WANNISSORN, K. Conformal bubbler cooling for molds by metal deposition process. *CAD Computer Aided Design*, Elsevier Ltd, v. 69, p. 126–133, 2015. ISSN 00104485. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.004>>.
- FISCHER, J. M. *Handbook of molded part shrinkage and warpage*. United States of America, Norwich, NY 13815: Plastics Design Library, 2003. 252 p. ISBN 1884207723.
- GOODSHIP, V.; MIDDLETON, B.; CHERRINGTON, R. *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality*. [s.n.], 2016. 103–170 p. ISBN 9780323340618. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323340618000041>>.

GOSSELIN, R. *INJECTION DE MOUSSES COMPOSITES BOIS/PLASTIQUES D'ORIGINE POST-CONSUMMATION*. 130 p. Tese (Mestrado) — FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, 2005.

HARADA, J. Importância Do Projeto De Moldes. p. 27–31, 2006.

Huamin Zhou. *COMPUTER MODELING FOR INJECTION MOLDING :Simulation, Optimization, and Control*. [S.l.: s.n.], 2013. 11, 294–300 p. ISBN 9780470602997.

HUSZAR, M. et al. Sustainable injection moulding: The impact of materials selection and gate location on part warpage and injection pressure. *Sustainable Materials and Technologies*, Elsevier B.V., v. 5, p. 1–8, 2015. ISSN 22149937. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2015.07.001>>.

IBÁ. Relatório 2017. *Indústria Brasileira de Árvores*, p. 80, 2017. ISSN 1098-6596. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA{_}RelatorioAnual2017.>

JAHAN, S. A. et al. Implementation of Conformal Cooling & Topology Optimization in 3D Printed Stainless Steel Porous Structure Injection Molds. *Procedia Manufacturing*, The Author(s), v. 5, p. 901–915, 2016. ISSN 23519789. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.077>>.

JORGE, R.; PINTO, F. *Injeção e Caracterização do Comportamento Mecânico de Polímeros Termoplásticos*. 84 p. Tese (Mestrado) — Instituto Politécnico de Coimbra, 2012.

KAMAL, M.; ISAYEV, A.; LIU, S. *Injection Molding: Technology and Fundamentals*. Hanser, 2009. (Polymer Processing Society, Progress in Polymer Processing). ISBN 9783446416857. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=tKItoAQAAMAAJ>>.

KAZMER, D. *Injection Mold Design Engineering*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2016. ISBN 9781569906651. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=dvBCDAAAQBAJ>>.

KITAYAMA, S. et al. Numerical and experimental investigation of process parameters optimization in plastic injection molding using multi-criteria decision making. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Elsevier B.V., v. 85, p. 95–105, 2018. ISSN 1569190X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.04.004>>.

- KULKARNI, S. *Robust Process Development and Scientific Molding: Theory and Practice*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2017. ISBN 9781569906910. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=qOUIDwAAQBAJ>>.
- LEÃES, V. S. *Avaliação Da Influência Da Diferença De Temperatura Entre As Placas De Um Molde De Injeção No Empenamento De Peças Injetadas*. 171 p. Tese (Mestrado) — UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC, 2008.
- LIM, L.; AURAS, R.; RUBINO, M. Progress in Polymer Science Processing technologies for poly (lactic acid). v. 33, p. 820–852, 2008.
- LÓPEZ, A. et al. Injection moulding parameters influence on weight quality of complex parts by means of DOE application: Case study. *Measurement*, Elsevier, v. 90, p. 349–356, aug 2016. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224116301397>>.
- MALLOY, R. A. Manufacturing considerations for injection molded parts. In: MALLOY, R. A. (Ed.). *Plastic Part Design (Second Edition)*. Second edition. Hanser, 2010. p. 15 – 129. ISBN 978-3-446-40468-7. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9783446404687500038>>.
- MANRICH, S. *Processamento de termoplásticos*. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2005. 429 p. ISBN 978-85-88098-72-5.
- MARQUES, S. et al. Design of conformal cooling for plastic injection moulding by heat transfer simulation. *Polimeros*, scielo, v. 25, p. 564 – 574, 12 2015. ISSN 0104-1428. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282015000600564&nrm=iso>.
- MARTINS, A.; SILVA, S. *Sistematização de Metodologias de Projeto e Fabrico de Moldes de Injeção de Peças para a Indústria Aeronáutica*. 119 p. Tese (Mestrado) — Catedrático, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2015.
- MOHAMED, O. A.; MASOOD, S. H.; SAIFULLAH, A. A Simulation Study of Conformal Cooling Channels in Plastic Injection Molding. v. 348, n. 2, p. 344–348, 2013.
- NIAN, S. C.; LI, M. H.; HUANG, M. S. Warpage control of headlight lampshades fabricated using external gas-assisted injection

molding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier Ltd, v. 86, p. 358–368, 2015. ISSN 00179310. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.027>>.

OLIAEI, E. et al. Warpage and Shrinkage Optimization of Injection-Molded Plastic Spoon Parts for Biodegradable Polymers Using Taguchi, ANOVA and Artificial Neural Network Methods. *Journal of Materials Science & Technology*, 2016. ISSN 10050302.

PARK, H. S.; DANG, X. P. Development of a Smart Plastic Injection Mold with Conformal Cooling Channels. *Procedia Manufacturing*, The Author(s), v. 10, p. 48–59, 2017. ISSN 23519789. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.020>>.

Prashanth Reddy, K.; PANITAPU, B. High thermal conductivity mould insert materials for cooling time reduction in thermoplastic injection moulds. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, v. 4, n. 2, p. 519–526, 2017. ISSN 22147853. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.052>>.

ROSATO, D.; ROSATO, M. *Injection Molding Handbook*. Springer US, 2012. ISBN 9781461545972. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=4VHxBwAAQBAJ>>.

SABOGAL, J. C. *Diseño de la Refrigeración en Moldes de Inyección*. 2013. 34–41 p. Disponível em: <http://www.metalactual.com/revista/27/procesos{_}moldes.>

SHOEMAKER, J. *Moldflow Design Guide: A Resource for Plastics Engineers*. Hanser, 2006. (Moldflow design guide: a resource for plastics engineers, v. 10). ISBN 9783446406407. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=WvJyPwAACAAJ>>.

SINGH, G.; PRADHAN, M. K.; VERMA, A. Multi Response optimization of injection moulding Process parameters to reduce cycle time and warpage. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, v. 5, n. 2, p. 8398–8405, 2018. ISSN 22147853. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.534>>.

SPINA, R. Injection moulding of automotive components: comparison between hot runner systems for a case study. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 155-156, p. 1497 – 1504, 2004. ISSN 0924-0136. Proceedings of the International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies: Part 2. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604006144>>.

VENKATESH, G.; Ravi Kumar, Y. Thermal Analysis for Conformal Cooling Channel. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, v. 4, n. 2, p. 2592–2598, 2017. ISSN 22147853. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.113>>.

VOJNOVÁ, E. The benefits of a conforming cooling systems the molds in injection moulding process. *Procedia Engineering*, Elsevier B.V., v. 149, n. June, p. 535–543, 2016. ISSN 18777058. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.702>>.

WANG, Y.; YU, K. M.; WANG, C. C. L. Spiral and conformal cooling in plastic injection molding. *CAD Computer Aided Design*, Elsevier Ltd, v. 63, p. 1–11, 2015. ISSN 00104485. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2014.11.012>>.

WANG, Y. et al. Automatic design of conformal cooling circuits for rapid tooling. *CAD Computer Aided Design*, Elsevier Ltd, v. 43, n. 8, p. 1001–1010, 2011. ISSN 00104485. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2011.04.011>>.

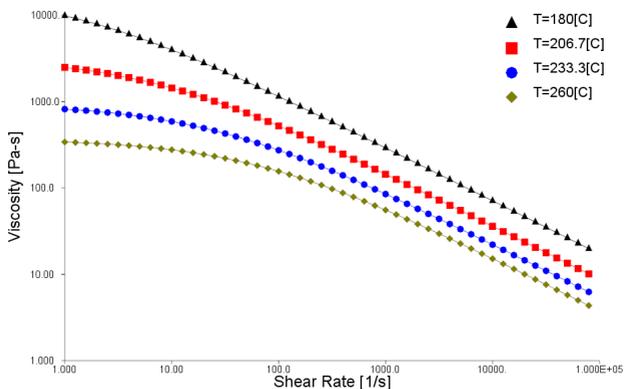
YANG, Y. et al. *Injection Molding Process Control, Monitoring, and Optimization*. Hanser Publications, 2016. (Progress in Polymer Processing). ISBN 9781569905920. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=S0EOjwEACAAJ>>.

ZHENG, R.; TANNER, R.; FAN, X. *Injection Molding: Integration of Theory and Modeling Methods*. Springer Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 9783642212635. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=DnWhL7D0I2MC>>.

Anexos

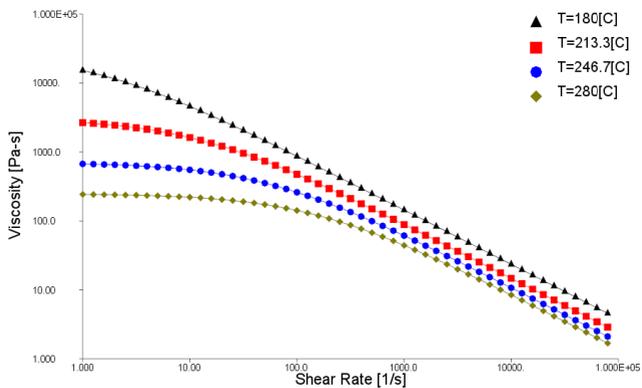
ANEXO A – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS AMORFOS

Figura 99 – Curva de Viscosidade Styron 688G



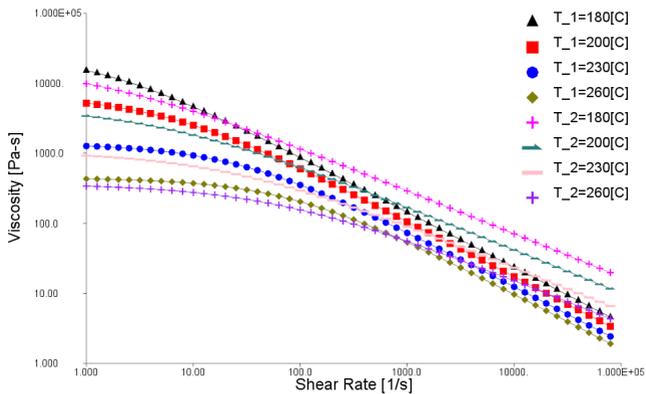
Fonte : Biblioteca do *Autodesk Moldflow Insight*

Figura 100 – Curva de Viscosidade do Polystyrene 804



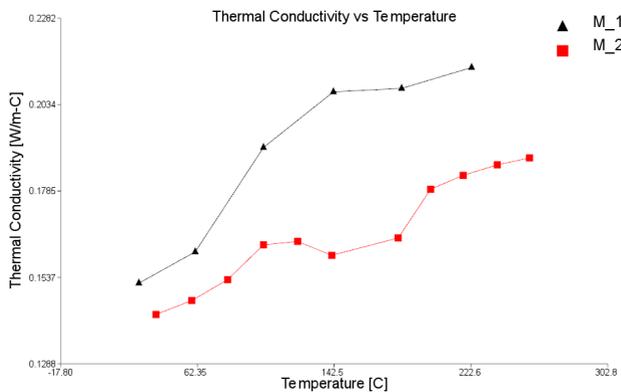
Fonte : Biblioteca do *Autodesk Moldflow Insight*

Figura 101 – Viscosidade - Comparativo entre Polystyrene 804 (T_1) vs Styron688G (T_2)



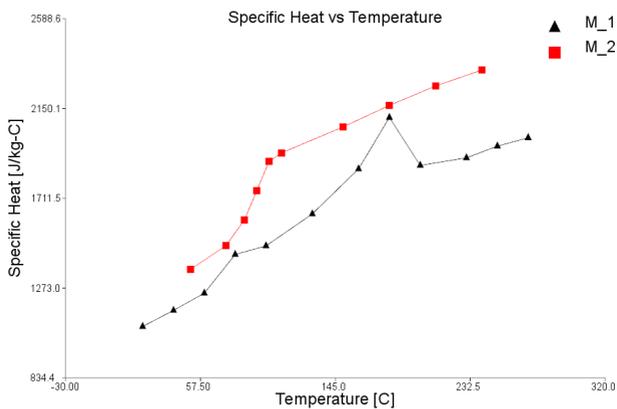
Fonte : Biblioteca do Autodesk Moldflow Insight

Figura 102 – Condutividade - Comparativo entre Polystyrene 804 (M_1) vs Styron688 (M_2)



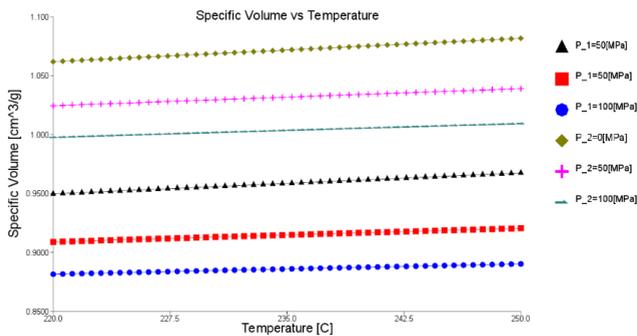
Fonte : Biblioteca do Autodesk Moldflow Insight

Figura 103 – Calor Específico - Comparativo entre Polystyrene 804 (M_1) vs Styron688 (M_2)



Fonte : Biblioteca do *Autodesk Moldflow Insight*

Figura 104 – Volume Específico - Comparativo entre Polystyrene 804 (P_1) vs Styron688 (P_2)



Fonte : Biblioteca do *Autodesk Moldflow Insight*

ANEXO B – PLACA PLANA - AMORFOS - 2º DOE

A Figura 105 ilustra o tempo de ciclo médio de 13.26s e um $R^2 = 1$ o que indica que o modelo estatisticamente representativo.

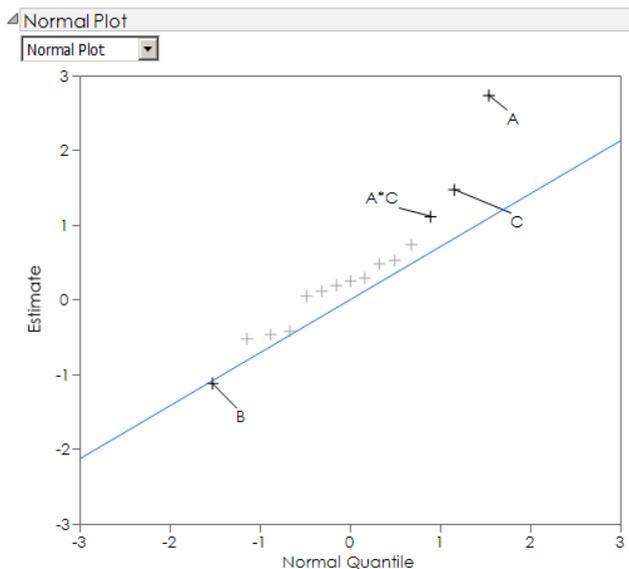
Figura 105 – Representação do modelo estatístico - Tempo de Ciclo

Summary of Fit	
RSquare	1
RSquare Adj	.
Root Mean Square Error	.
Mean of Response	13.26826
Observations (or Sum Wgts)	16

Fonte: Autoria própria.

A Figura 106 ilustra os fatores mais significativos para o tempo de ciclo, no caso, A, C, AC e B.

Figura 106 – Gráfico de Probabilidade Normal - Tempo de Ciclo



Blue line has slope equal to Lenth's PSE.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 107 ilustra o empenamento médio de 0.037mm e um $R^2 = 1$ o que indica que o modelo estatisticamente representativo.

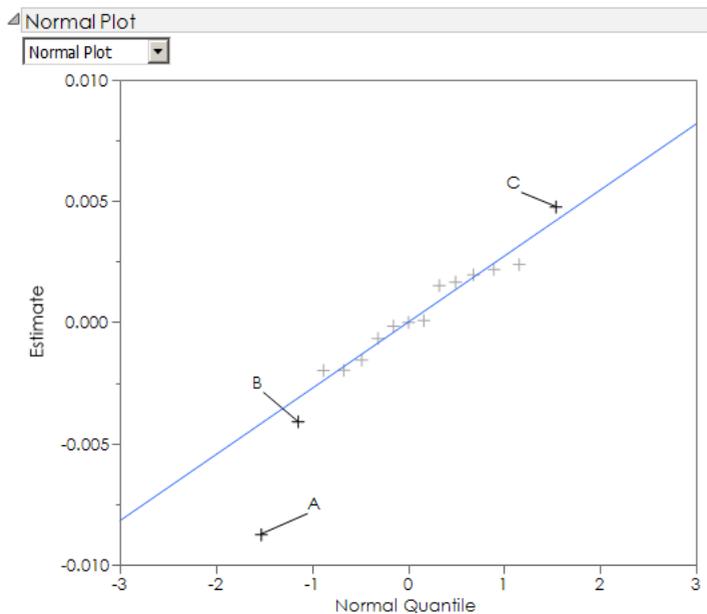
Figura 107 – Representação do modelo estatístico - Empenamento

Summary of Fit	
RSquare	1
RSquare Adj	.
Root Mean Square Error	.
Mean of Response	0.03685
Observations (or Sum Wgts)	16

Fonte: Autoria própria.

A Figura 108 ilustra os fatores mais significativos para o empenamento, no caso, A, C e B.

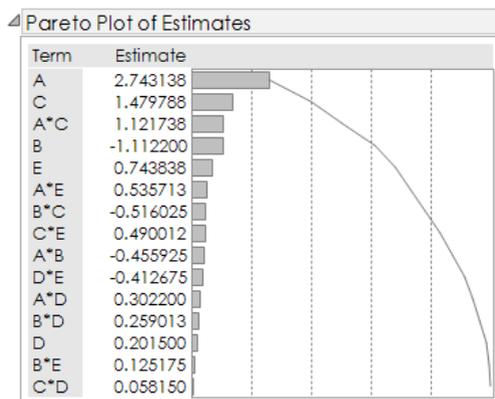
Figura 108 – Gráfico de Probabilidade Normal - Empenamento



Fonte: Autoria própria.

A Figura 109 ilustra o gráfico de Pareto dos fatores mais significativos para o tempo de ciclo.

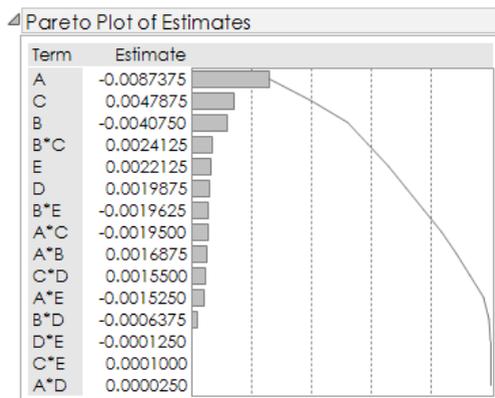
Figura 109 – Gráfico de Pareto - Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

A Figura 110 ilustra o gráfico de Pareto dos fatores mais significativos para o empenamento.

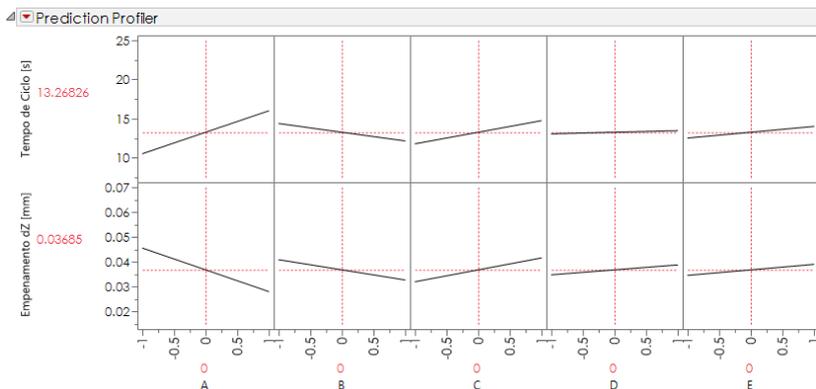
Figura 110 – Gráfico de Pareto - Empenamento



Fonte: Autoria própria.

A Figura 111 ilustra o perfil de estimativa do experimento da placa plana.

Figura 111 – Perfil de Estimativa do Experimento



Fonte: Autoria própria.

- Fator (A), referente ao material, no nível (-1), Polystyrene 804, é o que minimiza o tempo de ciclo;
- Fator (C), referente ao diâmetro do canal de refrigeração, no nível (+1), contribui para minimizar o tempo de ciclo;
- Fator (B), referente ao sistema de refrigeração, no nível (+1), no caso transversal, contribui para minimizar o tempo de ciclo;

Os demais fatores não foram observados como significativos.

ANEXO C – PLACA PLANA - AMORFOS - 3º DOE

A Figura 112 ilustra o tempo de ciclo médio de 10.066s e um $R^2 = 0.77$ o que indica que o 77.2% do modelo está estatisticamente representativo.

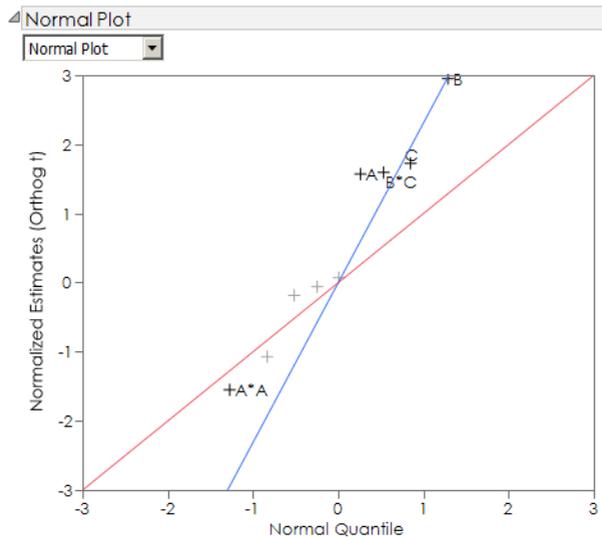
Figura 112 – Representação do modelo estatístico - Tempo de Ciclo

Summary of Fit	
RSquare	0.772654
RSquare Adj	0.431635
Root Mean Square Error	0.319938
Mean of Response	10.06648
Observations (or Sum Wgts)	16

Fonte: Autoria própria.

A Figura 113 ilustra os fatores mais significativos para o tempo de ciclo, no caso, B, C, BC, AA e A.

Figura 113 – Gráfico de Probabilidade Normal - Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

A Figura 114 ilustra o empenamento médio de 0.0343mm e um $R^2 = 0.99$ o que indica que o 99.9% do modelo está estatisticamente representativo.

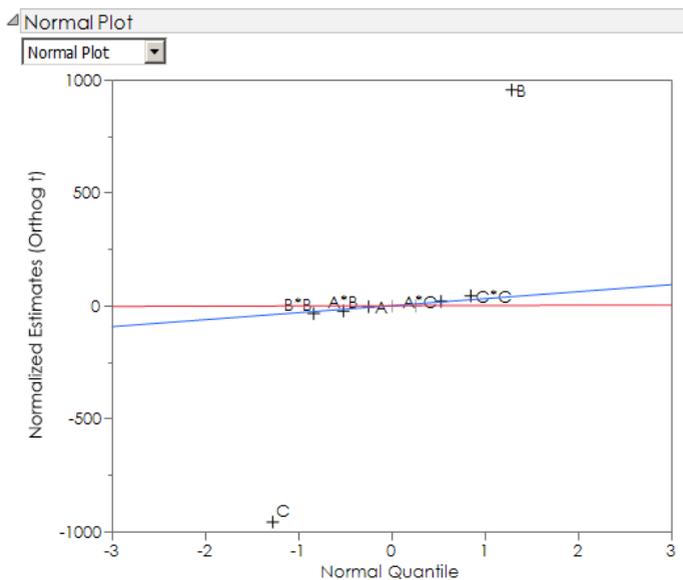
Figura 114 – Representação do modelo estatístico - Empenamento

Summary of Fit	
RSquare	0.999997
RSquare Adj	0.999992
Root Mean Square Error	0.001183
Mean of Response	0.034363
Observations (or Sum Wgts)	16

Fonte: Autoria própria.

A Figura 115 ilustra os fatores mais significativos para o empenamento, no caso, B, C, CC, BB, AC, AB e A.

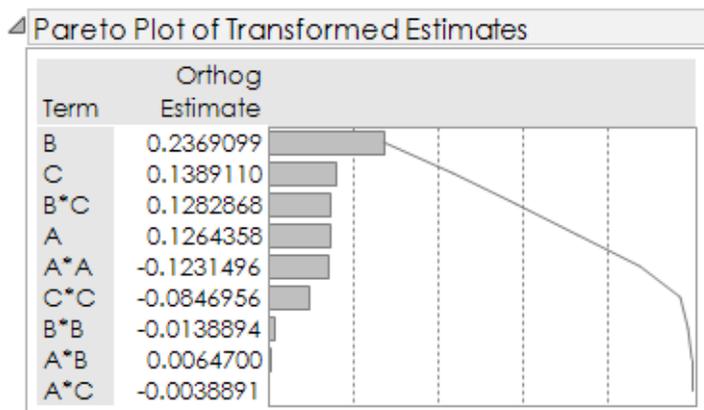
Figura 115 – Gráfico de Probabilidade Normal - Empenamento



Fonte: Autoria própria.

A Figura 116 ilustra o gráfico de Pareto dos fatores mais significativos para o tempo de ciclo.

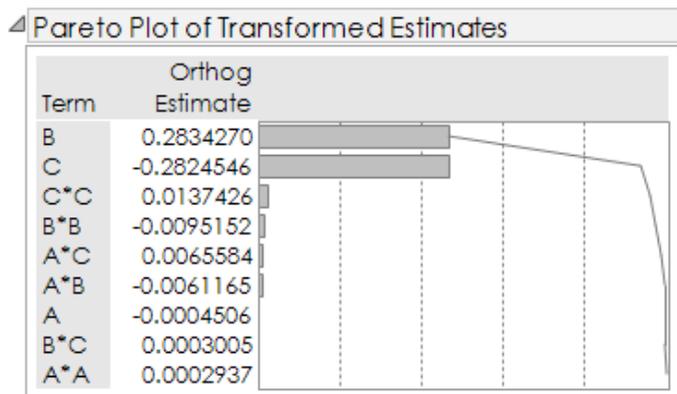
Figura 116 – Gráfico de Pareto - Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

A Figura 117 ilustra o gráfico de Pareto dos fatores mais significativos para o empenamento.

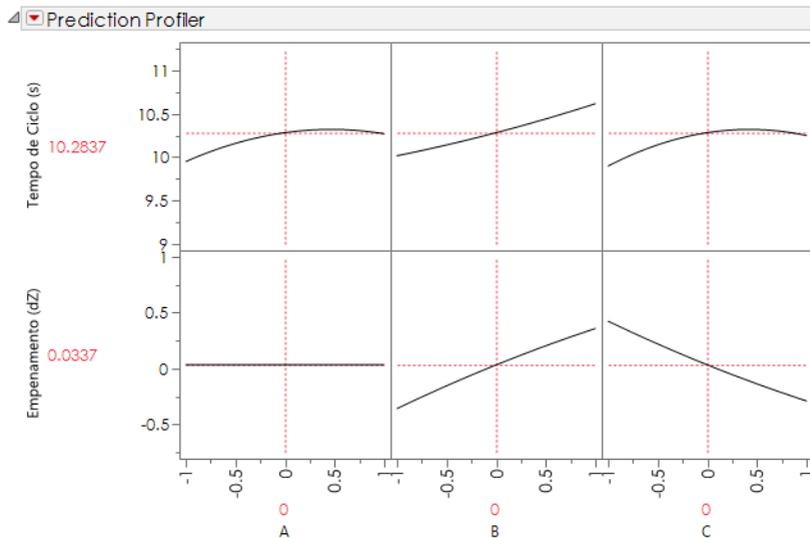
Figura 117 – Gráfico de Pareto - Empenamento



Fonte: Autoria própria.

A Figura 118 ilustra o perfil de estimativa do experimento da placa plana.

Figura 118 – Perfil de Estimativa do Experimento



Fonte: Autoria própria.

- Fator (A) e (B) referente as temperaturas de refrigeração lado móvel e fixo respectivamente mostraram-se significativos e quando no nível (-1) e tendem por valores menores de tempo de ciclo;

ANEXO D – RETANGULAR ESTRUTURADA - SEMI-CRISTALINOS - 1º DOE

A Figura 119 ilustra o tempo de ciclo médio de 95.91s e um $R^2 = 1$ o que indica que o 100% do modelo está estatisticamente representativo.

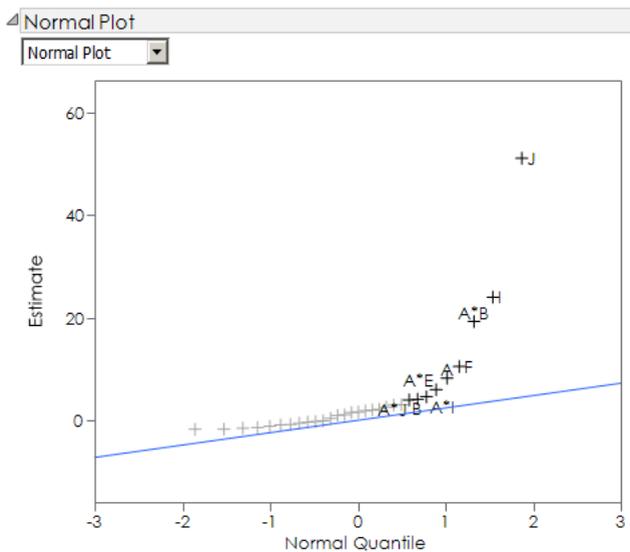
Figura 119 – Representação do modelo estatístico - Tempo de Ciclo

Summary of Fit	
RSquare	1
RSquare Adj	.
Root Mean Square Error	.
Mean of Response	95.90688
Observations (or Sum Wgts)	32

Fonte: Autoria própria.

A Figura 120 ilustra os fatores mais significativos para o tempo de ciclo, no caso, J e I são os mais significativos.

Figura 120 – Gráfico de Probabilidade Normal - Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

A Figura 121 ilustra o empenamento médio de -0.2819mm e um $R^2 = 1$ o que indica que o 100% do modelo está estatisticamente representativo.

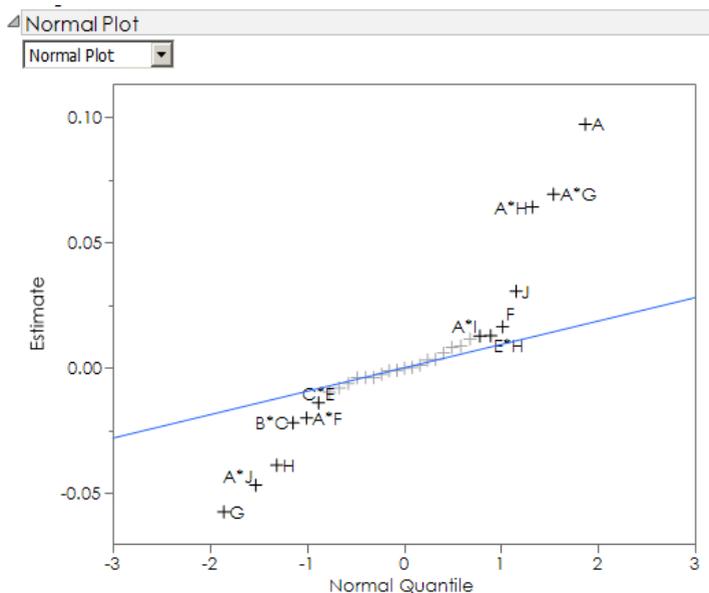
Figura 121 – Representação do modelo estatístico - Empenamento

Summary of Fit	
RSquare	1
RSquare Adj	.
Root Mean Square Error	.
Mean of Response	-0.2819
Observations (or Sum Wgts)	32

Fonte: Autoria própria.

A Figura 122 ilustra os fatores mais significativos para o empenamento, no caso, A, AG, AH, G, AJ, H, J, BC, AF, F e CE.

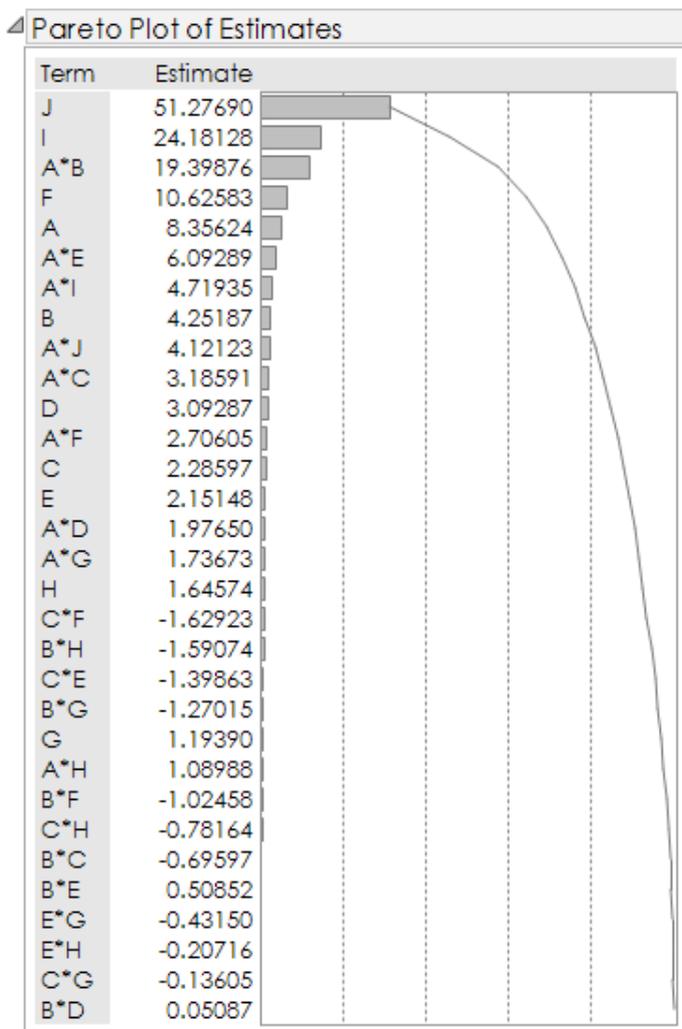
Figura 122 – Gráfico de Probabilidade Normal - Empenamento



Fonte: Autoria própria.

A Figura 123 ilustra o gráfico de Pareto dos fatores mais significativos para o tempo de ciclo.

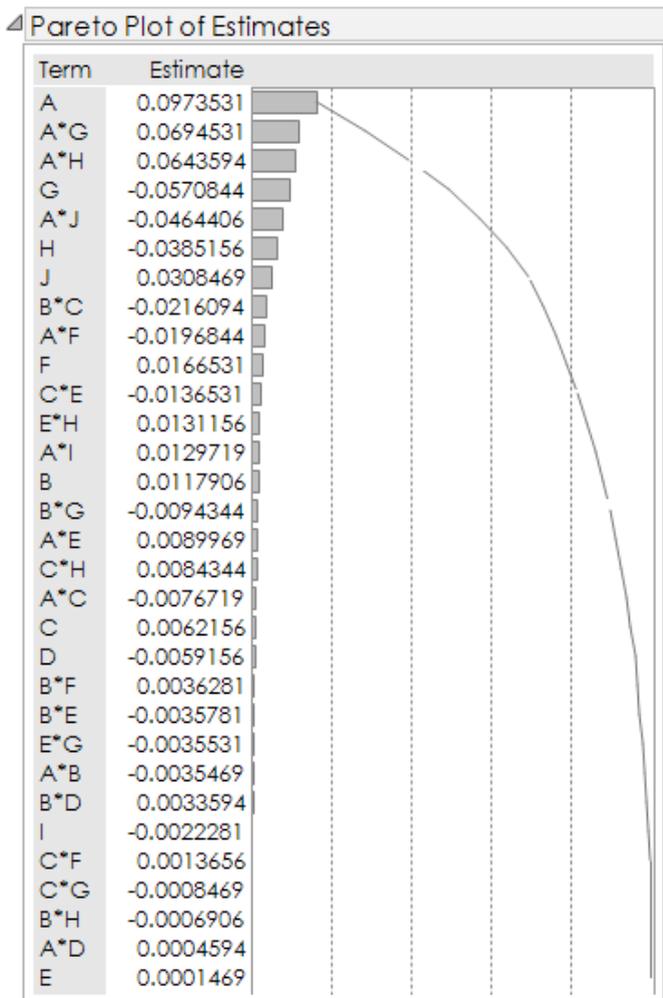
Figura 123 – Gráfico de Pareto - Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

A Figura 124 ilustra o gráfico de Pareto dos fatores mais significativos para o empenamento.

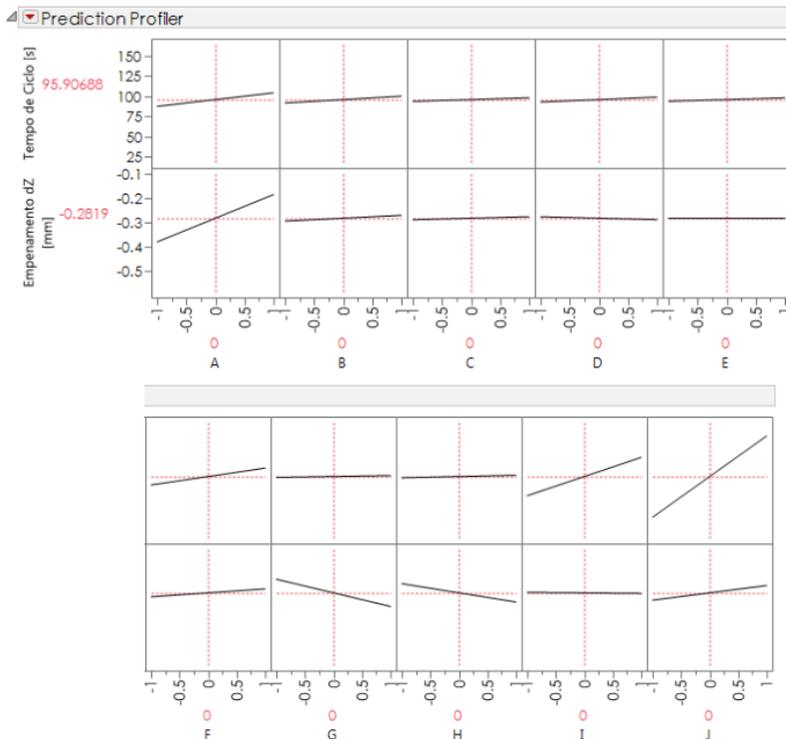
Figura 124 – Gráfico de Pareto - Empenamento



Fonte: Autoria própria.

A Figura 125 ilustra o perfil de estimativa do experimento da geometria estruturada.

Figura 125 – Estimativa do Experimento



Fonte: Autoria própria.

- Fator (I) e (J), referente a temperatura do fluido refrigerante no lado fixo e móvel respectivamente são os mais significativos para o tempo de ciclo e empenamento;

ANEXO E – RETANGULAR ESTRUTURADA - AMORFOS - 2º DOE

A Figura 126 ilustra o tempo de ciclo médio de 29.24s e um $R^2 = 1$ o que indica que o 100% do modelo está estatisticamente representativo.

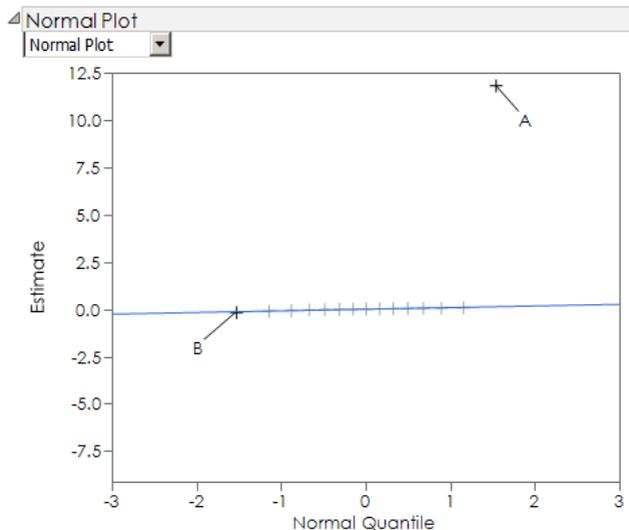
Figura 126 – Representação do modelo estatístico - Tempo de Ciclo

Summary of Fit	
RSquare	1
RSquare Adj	.
Root Mean Square Error	.
Mean of Response	29.24016
Observations (or Sum Wgts)	16

Fonte: Autoria própria.

A Figura 127 ilustra os fatores mais significativos para o tempo de ciclo, no caso, A e B.

Figura 127 – Gráfico de Probabilidade Normal - Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

A Figura 128 ilustra o empenamento médio de -0.3246mm e um $R^2 = 1$ o que indica que o 100% do modelo está estatisticamente representativo.

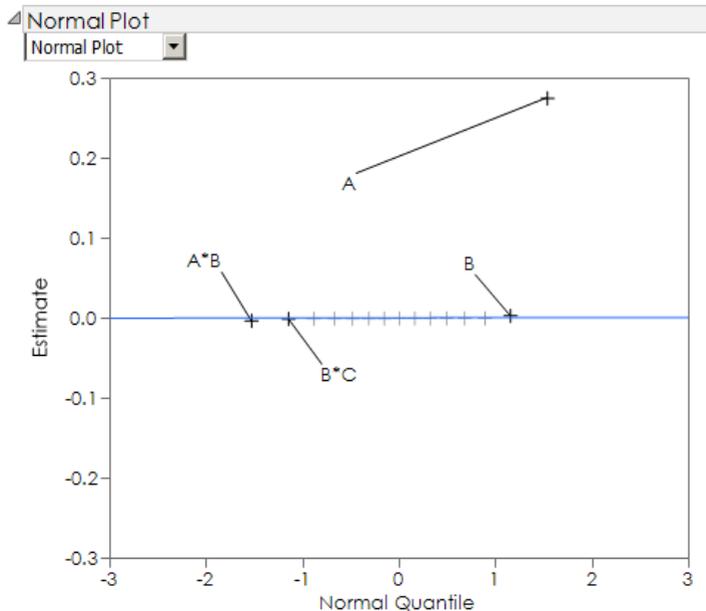
Figura 128 – Representação do modelo estatístico - Empenamento

Summary of Fit	
RSquare	1
RSquare Adj	.
Root Mean Square Error	.
Mean of Response	-0.32465
Observations (or Sum Wgts)	16

Fonte: Autoria própria.

A Figura 129 ilustra os fatores mais significativos para o empenamento, no caso, A, B, AB e BC.

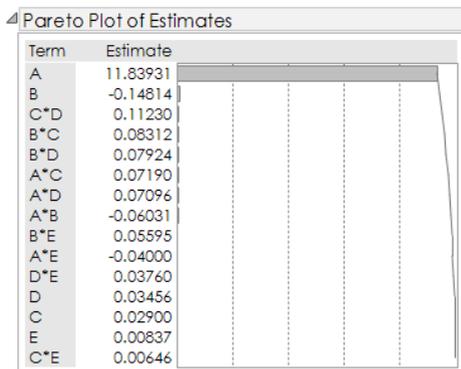
Figura 129 – Gráfico de Probabilidade Normal - Empenamento



Fonte: Autoria própria.

A Figura 130 ilustra o gráfico de Pareto dos fatores mais significativos para o tempo de ciclo.

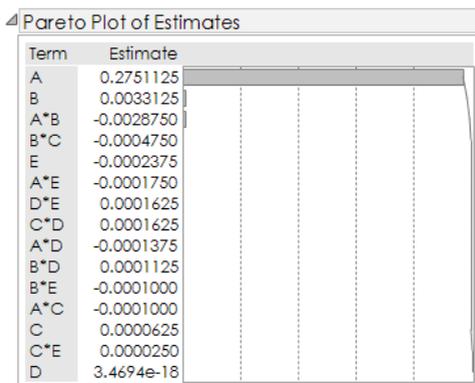
Figura 130 – Gráfico de Pareto - Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

A Figura 131 ilustra o gráfico de Pareto dos fatores mais significativos para o empenamento.

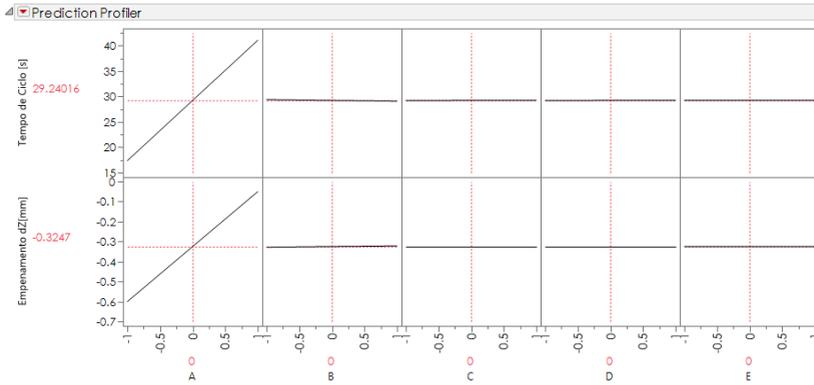
Figura 131 – Gráfico de Pareto - Empenamento



Fonte: Autoria própria.

A Figura 132 ilustra o perfil de estimativa do experimento da geometria estruturada.

Figura 132 – Estimativa do Experimento



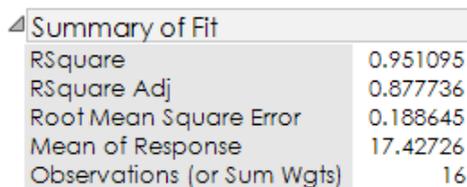
Fonte: Autoria própria.

- Fator (A), referente ao material, no nível (-1), Polystyrene 804 , é o fator mais significativo e tende por valores menores de tempo de ciclo.

ANEXO F – RETANGULAR ESTRUTURADA - AMORFOS - 3º DOE

A Figura 133 ilustra o tempo de ciclo médio de 17.42s e um $R^2 = 0.95$ o que indica que o 95.1% do modelo está estatisticamente representativo.

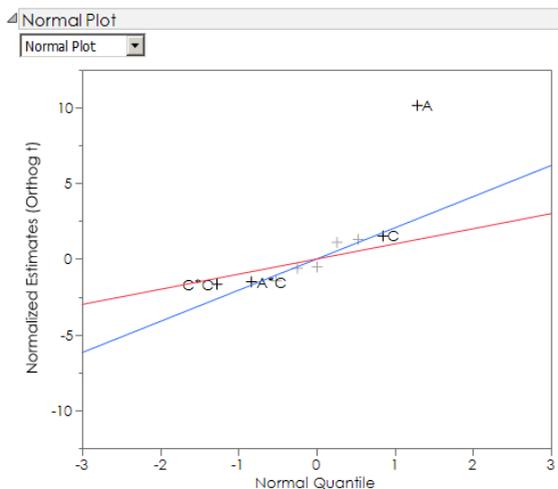
Figura 133 – Representação do modelo estatístico - Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

A Figura 134 ilustra os fatores mais significativos para o tempo de ciclo, no caso, A, CC, C, AC.

Figura 134 – Gráfico de Probabilidade Normal - Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

A Figura 135 ilustra o empenamento médio de 0.600mm e um $R^2 = 0.69$ o que indica que o 69% do modelo está estatisticamente representativo.

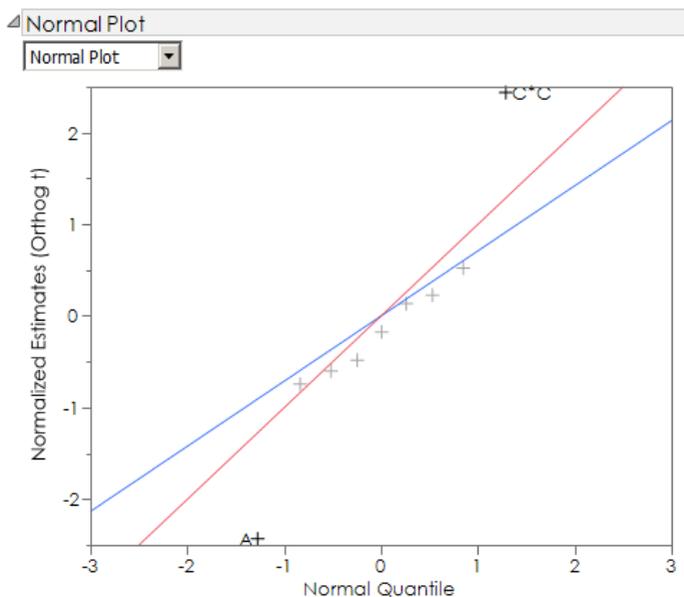
Figura 135 – Representação do modelo estatístico - Empenamento

Summary of Fit	
RSquare	0.690062
RSquare Adj	0.225154
Root Mean Square Error	0.005532
Mean of Response	-0.60021
Observations (or Sum Wgts)	16

Fonte: Autoria própria.

A Figura 136 ilustra os fatores mais significativos para o empenamento, no caso, A e CC.

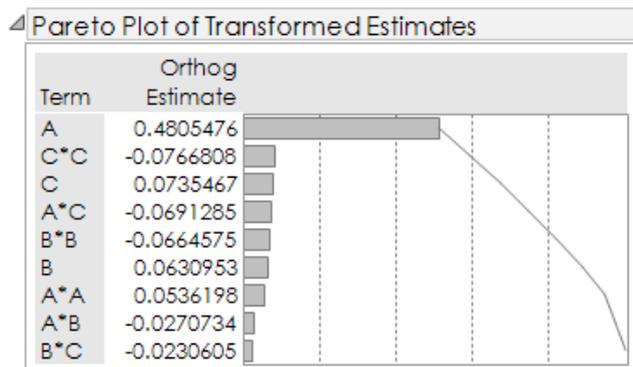
Figura 136 – Gráfico de Probabilidade Normal - Empenamento



Fonte: Autoria própria.

A Figura 137 ilustra o gráfico de Pareto dos fatores mais significativos para o tempo de ciclo.

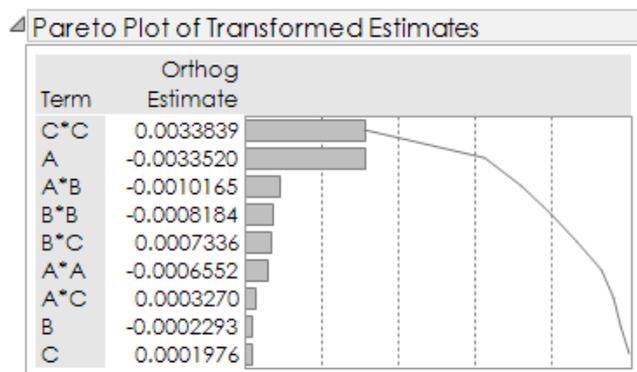
Figura 137 – Gráfico de Pareto - Tempo de Ciclo



Fonte: Autoria própria.

A Figura 138 ilustra o gráfico de Pareto dos fatores mais significativos para o empenamento.

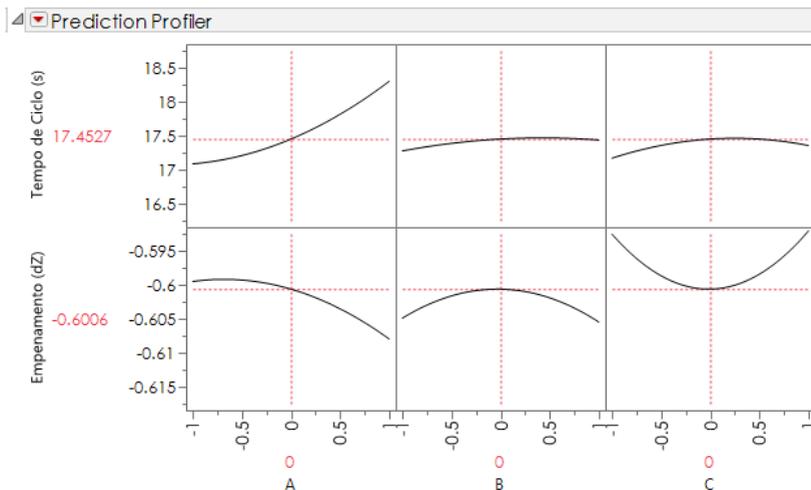
Figura 138 – Gráfico de Pareto - Empenamento



Fonte: Autoria própria.

A Figura 139 ilustra o perfil de estimativa do experimento da geometria estruturada.

Figura 139 – Estimativa do Experimento



Fonte: Autoria própria.

- Fator (A), referente a temperatura de injeção , no nível (-1), tendem por valores menores de tempo de ciclo.
- Fator (B) e (C), não foram significativos para este experimento.