UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EVAIR JOSÉ BASSO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE MOLDES DE INJEÇÃO

CAXIAS DO SUL
2013

EVAIR JOSÉ BASSO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE MOLDES DE INJEÇÃO

Relatório de Estágio II, apresentado como requisito parcial à Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica.

Supervisor: Prof. M.Sc. Deives Roberto Bareta

CAXIAS DO SUL

2013

EVAIR JOSÉ BASSO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE MOLDES DE INJEÇÃO

Relatório de Estágio II, apresentado como requisito parcial à Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica.

Aprovado em Julho de 2013

Banca Examinadora:

Prof. M.Sc. Deives Roberto Bareta
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. M.Sc. Juliano Marcon de Oliveira
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. M.Sc. Glaucio de Almeida Carvalho
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Sr. Cleito Dall'Alba Técg. Polímeros
Sulbras Moldes e Plásticos

RESUMO

Este trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica tem como intuito o estudo comparativo entre dois sistemas de refrigeração de moldes de injeção de polimeros. Nele, foi comparado o sistema de refrigeração convencional por dutos com a nova tecnologia de refrigeração BFmold. Para isso, foi dimensionado, fabricado e testado um molde protótipo a fim de gerar dados para realizar um comparativo que reflita a realidade e possa justificar ou não o investimento na aquisição de tal tecnologia. A parte de cálculos de dimensionamentos desenvolveu-se a partir das consultas bibliográficas realizadas na pesquisa para o desenvolvimento deste trabalho. A parte de fabricação, montagem e teste foi realizada pela empresa Sulbras Moldes e Plásticos, com as características e dimensões relacionadas neste trabalho. Após os testes foram analisadas as características das peças produzidas e mensurados os ganhos no processo de injeção, que resultaram em um ganho aproximado de 15% em ciclo assim como uma significativo ganho em qualidade geométrica, esses ganhos ajudaram a justificar o investimento em tal tecnologia.

Palavras-chaves: Moldes de injeção. Circuitos de refrigeração. BFmold. Tempo de ciclo.

ABSTRACT

This Mechanical Engineering's final essay has as intention the comparative study between two polymer injection mold cooling systems. It was compared the conventional duct cooling systems with the new BFmold technology. For this,A prototype mold was dimensioned, manufactured and tested in order to reproduce enough data to perform a comparative study to reflect the reality and justify or not the investment or acquisition of this technology. The calculations and sizing were developed thru bibliographic consultation performed on the research for the development of this essay. The manufacturing, assembly and testing was performed by the company Sulbras Moldes e Plasticos, with the characteristics and dimensions related on this essay. After the tests, the characteristics of the produced parts were analyzed, the gains on the injection molding process were measured and a decrease of 15% on cycle time was achieved. Those gains helped to justify the investment on this technology.

Keywords: Injection molds. Cooling systems. BFmold. Cycle time.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama do ciclo de moldagem **13**

Figura 2 – Sistemas que envolvem um molde de injeção **17**

Figura 3 – Conjuntos de um molde de injeção **18**

Figura 4 – Mecanismo de distorção causada por resfriamento desbalanceado: a) ciclo bom e b) ciclo ruim **20**

Figura 5 – Exemplo de refrigeração: a) paralelo e b) série **21**

Figura 6 – Exemplo de refrigeração em circuito U **22**

Figura 7 – Exemplo de refrigeração em circuito Z **23**

Figura 8 – Exemplo de refrigeração para cavidades retangulares **24**

Figura 9 – Exemplo de refrigeração para postiços circulares **24**

Figura 10 – Refrigeração em percurso contínuo e divergente: a) percurso contínuo b) percurso divergente **25**

Figura 11 – Exemplo de placas de refrigeração **25**

Figura 12 – Refrigeração com tubos de cobre **26**

Figura 13 – Refrigeração em ligas de alta condutibilidade **26**

Figura 14 – Refrigeração com circuitos abertos em espiral **27**

Figura 15 – Sistema *Baflles* com lâmina separadora **28**

Figura 16 – Sistema *Baflles* com fluxo em espiral **28**

Figura 17 – Sistema de refrigeração do tipo *Bubbler* **29**

Figura 18 – Sistema de refrigeração com pinos térmicos **29**

Figura 19 – Princípio de funcionamento do pino térmico **30**

Figura 20 – Refrigeração adaptada ao contorno da peça **30**

Figura 21 – Balanço térmico em um molde de injeção **32**

Figura 22 – Entalpia x temperatura de alguns polímeros **33**

Figura 23 – Dimensões referentes ao sistema de refrigeração **38**

Figura 24 – Adequação de canais de refrigeração em termos práticos **39**

Figura 25 – Erro de refrigeração **40**

Figura 26 – Coeficiente $\boldsymbol{\alpha TM}$ para água a 40°C **41**

Figura 27 – Sistema de refrigeração BFmold **42**

Figura 28 – Comparativo entre balanço térmico do molde **43**

Figura 29 – Custos envolvidos na alteração de um projeto **44**

Figura 30 – Análise de refrigeração utilizando *software moldflow* **45**

Figura 31 – Discretização de um objeto em uma malha de elementos finitos **46**

Figura 32 – Alguns tipos de elementos finitos **46**

Figura 33 – Esboço preliminar do produto **49**
Figura 34 – Percentual de consumo de polímeros na Sulbras **49**
Figura 35 – Esboço preliminar da refrigeração do molde protótipo **51**
Figura 36 – Esboço preliminar da refrigeração do molde protótipo **54**
Figura 37 – Esboço preliminar da refrigeração BFmold do molde protótipo **59**
Figura 38 – Malha gerada pelo *moldflow* **60**
Figura 39 – Peças usinadas do molde protótipo **61**
Figura 40 – Montagem das esferas na cavidade de refrigeração **61**
Figura 41 – Partes constituintes do molde protótipo **62**
Figura 42 – Montagem final do molde **62**
Figura 43 – Célula de injeção utilizada nos testes **63**
Figura 44 – Exemplo de medição com câmera termográfica **64**
Figura 45 – Fluxograma de proposta de estágio **65**
Figura 46 – Molde protótipo montado na máquina injetora **66**
Figura 47 – Termorregulador da água de refrigeração **67**
Figura 48 – Medição de vazão por rotâmetro **67**
Figura 49 – Peça protótipo na condição final de injeção **68**
Figura 50 – Curva de injeção do molde protótipo **68**
Figura 51 – Medição de temperatura da peça protótipo **69**
Figura 52 – Gráfico de comportamento de temperatura ao longo do teste **70**
Figura 53 – Aumento da temperatura próximo ao ponto de injeção **71**
Figura 54 – Relatório de medição planicidade a) convencional b) BFmold **72**
Figura 55 – Variação da temperatura de extração x tempo de resfriamento **74**
Figura 56 – Termograma DSC para amostra com refrigeração convencional **75**
Figura 57 – Termograma DSC para amostra com refrigeração BFmold **76**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Difusividade térmica efetiva para alguns termoplásticos **34**
Tabela 2 – Fator de proporcionalidade para aços usuais **35**
Tabela 3 – Diâmetro recomendado para vazões conhecidas **37**
Tabela 4 – Relação entre número de Reynolds e tipo de escoamento **37**
Tabela 5 – Dimensões aproximadas para A e B **39**
Tabela 6 – Exemplos de tempo de resfriamento para alguns produtos Sulbras. **50**
Tabela 7 – Temperatura de extração da peça protótipo **70**
Tabela 8 – Resultado de medição de planicidade (mm) **72**
Tabela 9 – Percentual de contração para o comprimento máximo do produto **73**
Tabela 10 – Tempo de resfriamento x temperatura **73**

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área (m²)
A	Distância entre os canais e a superfície da cavidade (m)
A_{fix}	Área de contato do molde com o sistema de fixação (m²)
A_{lat}	Área lateral total do molde (m²)
B	Distância entre os canais de alimentação
Bi	Número de Biot
C	Calor específico do fluido (kJ/kg ºC)
C_{rad}	Coeficiente de radiação do corpo negro (W/m²K^4)
D	Diâmetro dos canais (m)
D_p	Diâmetro de partícula (m)
h	Entalpia (J/kg)
j	Erro de refrigeração (%)
J_H	Fator de Chilton Colburn
k	Condutividade térmica (J/m s ºC)
K_{agua}	Condutividade térmica da água (Wm/K)
k_S	Coeficiente dependente de espessura
L_c	Comprimento característico (m)
m	Massa (kg)
$\dot{m}$	Fluxo de refrigerante (kg/s)
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Q	Vazão volumétrica (m³/seg)
q_{conv}	Fluxo de calor por convecção devido ao sistema de refrigeração (kW)
$\dot{Q}_{TM}$	Fluxo de calor transferido pelo sistema de refrigeração (kW)
$\dot{Q}_{PI}$	Fluxo de Calor transferido pela massa fundida (kW)
$\dot{Q}_{Amb}$	Fluxo de Calor transferido para o ambiente (kW)
$\dot{Q}_{cond}$	Fluxo de Calor transferido por condução (kW)
$\dot{Q}_{conv}$	Fluxo de Calor transferido por convecção (kW)
$\dot{Q}_I$	Fluxo de Calor transferido total do molde (kW)
Re	Número de Reynolds
S	Espessura (m)

T	Temperatura do fluido de refrigeração (°C)
T_{amb}	Temperatura ambiente (°C)
t_c	Tempo de residência do material no molde (s)
T_{ext}	Temperatura de extração (°C)
T_{int}	Temperatura interna (°C)
T_{inj}	Temperatura de injeção (°C)
T_{mol}	Temperatura do molde (°C)
T_P	Temperatura da parede do molde em contato com a refrigeração (°C)
V	Velocidade de escoamento (m/s)
v	Viscosidade cinemática do fluido (m²/s)
Y	Temperatura adimensional
α_{TM}	Coeficiente de transferência de calor (W/m² K)
α_a	Coeficiente de transmissão de calor por convecção natural com o ar (W/m² K)
α_{ef}	Difusividade térmica efetiva média do polímero (m/s)
β	Fator de proporcionalidade (W/m² °C)
ε	Fator de emissividade térmica
ϵ	Coeficiente de porosidade
θ_{amb}	Temperatura absoluta do ambiente (K)
θ_{mol}	Temperatura absoluta do molde (K)
ΔT_J	Erro de refrigeração (°C)
ψ	Fator de forma para partículas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA 12
1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO 14
1.3 OBJETIVOS 14

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 16
2.1 INTRODUÇÃO 16
2.2 MOLDAGEM POR INJEÇÃO 16
2.3 MOLDES DE INJEÇÃO 17
2.4 CIRCUITOS DE REFRIGERAÇÃO EM MOLDES 19
2.4.1 Circuito em U 22
2.4.2 Circuito em Z 22
2.4.3 Circuito para cavidades retangulares 23
2.4.4 Circuitos para cavidade circulares 24
2.4.5 Placas de refrigeração 25
2.4.6 Refrigeração com tubos de cobre 26
2.4.7 Placa de refrigeração em ligas de alta condutibilidade térmica 26
2.4.8 Circuitos de água abertos em espiral 27
2.4.9 Circuitos de água alternativos para machos 27
2.4.9.1 *Baflles* 27
2.4.9.2 *Bubbler* 28
2.4.9.3 Pinos térmicos 29
2.4.10 Resfriamento adaptados ao contorno das peças 30
2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO MOLDE 31
2.5.1 Balanço térmico em um molde de injeção 32
2.5.2 Condução 35
2.5.3 Convecção 35
2.5.4 Radiação 36
2.5.5 Dimensionamento do circuito de refrigeração 36
2.5.6 Erro de refrigeração 39
2.6 TECNOLOGIA DE REFRIGERAÇÃO BFMOLD 42
2.7 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE MOLDES 43
2.7.1 Método dos elementos finitos 45
2.8 MORFOLOGIA CRISTALINA DOS POLÍMEROS 47

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO 48
3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO 48
3.1.1 O produto 48
3.1.2 O molde 50
3.2 MÉTODO 51
3.2.1 Dimensionamento projeto e execução 51
3.2.2 Fabricação do molde 60
3.2.3 Teste experimental 63
3.2.4 Avaliação do teste 64
3.2.5 Fluxograma de trabalho 65

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 66
4.1 PREPARAÇÃO PARA COLETA DE AMOSTRAS 66
4.2 RESULTADOS 69
4.3 ANÁLISE DSC 74

5 CONCLUSÃO 77
5.1 SEQUÊNCIA DO TRABALHO 78

REFERÊNCIAS 80

ANEXO A – FOLHA DE DADOS DO POLIPROPILENO TC136 82
ANEXO B – ANÁLISE EM *MOLDFLOW* 85

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Cada vez mais, o uso de materiais poliméricos que são transformados pelo processo de moldagem, são conhecidos e difundidos no meio industrial. Hoje esses materiais são aplicados nos mais diversos setores e segmentos da indústria, como o automobilístico, eletroeletrônico, farmacêutico, alimentício, construção civil entre outros.

A realidade das indústrias que circundam o mercado de peças poliméricas fabricadas pelo processo de moldagem baseia-se, cada vez mais, na agressividade dos padrões requeridos, que traduz em maior competitividade diante de um mercado globalizado, onde produtos com qualidade e custos finais reduzidos encontram-se como pré-requisitos (SILVA, 2009a). Para esse nicho do mercado, o prazo de entrega, a qualidade dos ferramentais e moldes que permitam ciclos de injeção reduzidos são um grande diferencial para almejar o sucesso, pois eles determinam o rápido lançamento e aprovação de um novo produto, assim como o alto índice de produtividade da ferramenta, esta por sua vez poderá garantir a lucratividade do negócio a fim de reduzir o custo por peça injetada. Sabendo dessa importância, as indústrias e especialistas apresentam esforços constantes na busca de técnicas e processos que levem à produção eficiente dos componentes injetados.

Dentro desse ciclo de produção de componentes a base de polímeros, umas das partes mais importantes é o molde propriamente dito, este por sua vez é uma unidade completa a fim de produzir peças moldadas, suas cavidades possuem a geometria e dimensões do produto desejado, e é ele quem recebe o polímero fundido introduzido pela máquina injetora por meio de pressão. A qualidade do produto acabado é em grande parte definida pelo projeto e execução do molde.

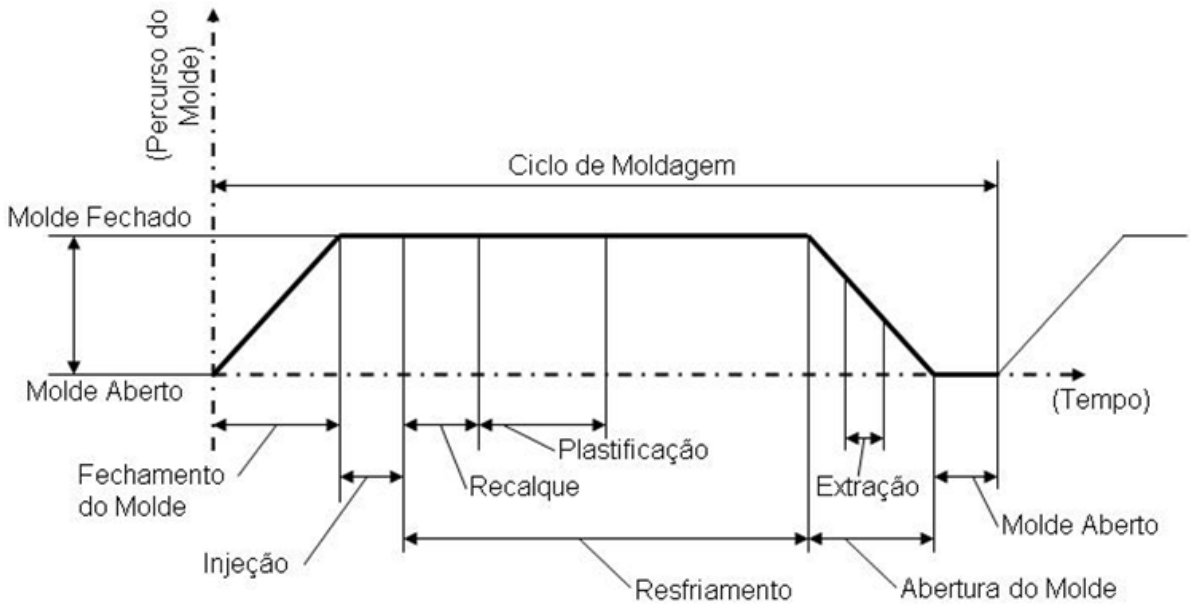
O molde de injeção constitui um tipo de produto com especificações e restrições definidas, o qual contempla uma grande carga tecnológica, devido às exigências de menores prazos de fornecimento (SALVADOR; COSTA, 2007).

Segundo Bareta (2007), o molde de injeção é uma ferramenta complexa, com vários componentes de uma funcionalidade distinta, capazes de dar forma ao polímero que está em fluxo livre e que é injetado em seu interior, resfriá-lo e extrair o produto montado. O sistema de refrigeração de moldes é um desses componentes, o qual será o objeto de estudo desse trabalho, pois é um fator determinante para o ciclo de injeção.

O ciclo de injeção e o conjunto de operações que envolvem o processo de injeção de termoplásticos, o qual compreende a soma de todos os tempos desse processo: desde o fechamento do molde, a injeção, o recalque, a plastificação, o resfriamento, a abertura do molde e a extração do produto, algumas etapas ocorrem em paralelo, como a dosagem e descompressão que ocorrem simultaneamente ao resfriamento, esse por sua vez tem um peso considerável dentro do ciclo de injeção.

O resfriamento é o tempo mais longo dentro do ciclo de injeção, este é o período em que a peça resfria dentro do molde aguardando a temperatura de desmoldagem, ele depende basicamente da espessura da peça injetada, temperatura do molde, características do polímero e tipo de refrigeração. Este tempo é diretamente proporcional à eficiência do sistema de refrigeração, a seguir observa-se o quanto o tempo de resfriamento é importante dentro do ciclo de injeção. A Figura 1 que segue ilustra o diagrama do ciclo de moldagem.

Figura 1 – Diagrama do ciclo de moldagem



Fonte: Adaptado de Rees (1995)

O resfriamento do molde proveniente do sistema de refrigeração tem o objetivo de reduzir a temperatura da massa polimérica injetada na cavidade, até uma temperatura que permita uma solidificação suficientemente rígida que permita a extração da peça. De acordo com Menges e Mohren (1993) a velocidade de extração do calor logo após a injeção do polímero e um fator importante para determinar o desempenho econômico do molde. Além disso, o efeito de refrigeração do molde tem influência direta na qualidade do produto acabado, sendo ela dimensional, visual ou mecânica.

A empresa Sulbras Moldes e Plásticos, situada em Caxias do Sul, onde será desenvolvido esse trabalho, é fabricante de moldes de injeção assim como também fabrica os produtos injetados, seus principais clientes estão na linha automotiva, linha branca e ar condicionado. A Sulbras é conhecida no sul do país pelo seu avançado parque de máquinas e busca constante por inovações tecnológicas, uma dessas tecnologias sobre refrigeração de moldes, será o objeto de nosso estudo.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A importância que a refrigeração do molde e o tempo de resfriamento têm dentro do processo de injeção, e os avanços de pesquisa nessa área, foram o que motivaram o desenvolvimento desse trabalho.

Este tem por finalidade comparar uma nova tecnologia de refrigeração BFmold que foi desenvolvida pela empresa Wittmann-Battenfeld, a qual possui os direitos sobre o tal, com o sistema de refrigeração convencional de canais perfurados na cavidade que atualmente são amplamente utilizados, avaliando assim a sua eficiência energética que justificaria o investimento em tal tecnologia que tem um custo considerável.

Busca-se a redução do ciclo de injeção que é um fator decisivo para a lucratividade do negócio, pois aumenta a produtividade do molde e diminui o custo de produção por peça injetada, assim como melhora a qualidade das peças.

1.3 OBJETIVOS

Foi determinado como objetivo geral desse trabalho: “comparar o sistema de refrigeração convencional (canais perfurados na cavidade) de moldes de injeção com a tecnologia de refrigeração BFmold, a fim de avaliar sua eficiência, influência e possíveis ganhos no ciclo de injeção”.

Para alcançar o objetivo geral, foram delimitados os objetivos específicos abaixo:

a) estudar os conceitos envolvidos em moldes de injeção, sistemas de refrigeração de moldes, e sistema de refrigeração BFmold;

b) estudar o efeito do sistema de refrigeração no produto acabado, e sua relação com as variáveis do processo;

c) desenvolver um produto e molde com sistema de refrigeração convencional e com a tecnologia BFmold para teste;

d) fabricar as duas situações de molde, adaptando o molde de testes disponível na empresa;

e) validar a tecnologia BFmold, avaliando a eficiência da refrigeração, tempo resfriamento e tempo de ciclo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo visa demonstrar os conceitos e fundamentações teóricas do assunto desenvolvidos na disciplina de estágio, juntamente com as atividades referentes ao tema e a teoria para o seu desenvolvimento. Para o desenvolvimento deste trabalho serão necessários conhecimentos de moldagem por injeção, de moldes de injeção, de refrigeração em moldes, de transferência de calor e da tecnologia BFmold.

2.2 MOLDAGEM POR INJEÇÃO

O processo de moldagem por injeção é um dos mais utilizados atualmente, devido ao avanço das propriedades mecânicas dos polímeros de engenharia, hoje itens antes feitos de metal estão sendo substituídos por peças injetadas. As grandes vantagens desse processo são a produção em grande escala e em alta velocidade, obtendo peças de precisão e qualidade, com uma infinidade de formas e geometrias como for necessário.

Segundo Reinert e Assunção (1999), fabricar peças poliméricas pelo processo de injeção é obter a forma desejada de uma peça por meio de pressão e calor, calor para fundir o plástico tornando-o fluido, e pressão para movimentar a massa fundida para as cavidades do molde, após esse calor é retirado para que a peça atinja um estado de solidificação suficiente que permita sua extração do molde.

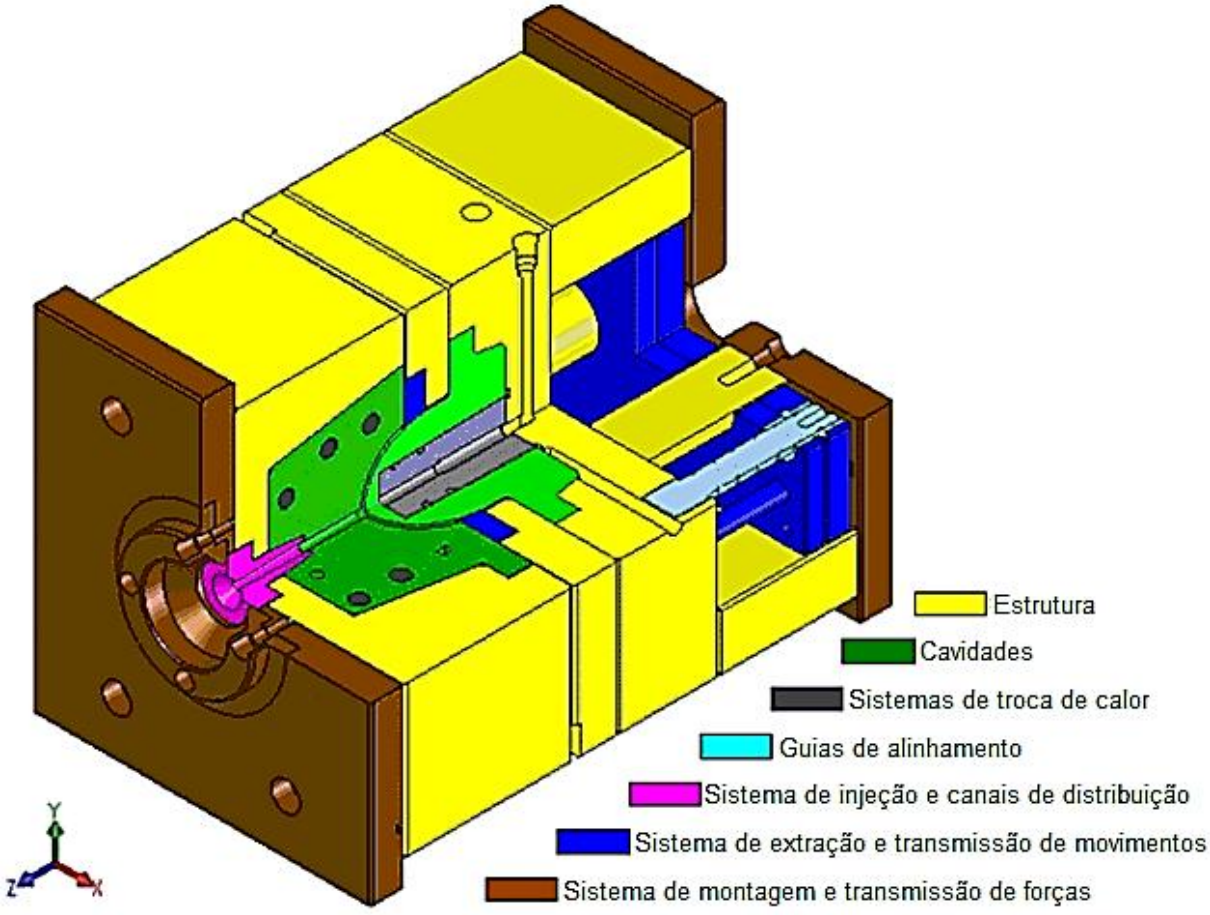
Outra parcela importante dentro do processo de injeção são as máquinas de injeção convencionais, mais conhecidas como injetoras, que aquecem o polímero em forma de grânulos para formar a massa fundida, e introduzem o polímero nas cavidades do molde, é ela que fornece a pressão e calor necessário para o processo. É muito importante antes de se projetar o molde conhecer os princípios básicos da máquina injetora, segundo Rees (1995), a máquina injetora é dividida em quatro elementos essenciais:

a) unidade de fechamento;
b) unidade de plastificação;
c) unidade de injeção;
d) controles necessários.

2.3 MOLDES DE INJEÇÃO

O molde de injeção é uma ferramenta completa com condições de produzir peças moldadas. Suas cavidades possuem dimensões e formas de acordo com a peça acabada (HARADA, 2004). Segundo Silva, S. (2009), o molde de injeção pode ser definido como uma ferramenta construída em partes individuais, que adaptadas a uma máquina injetora, que são capazes de produzir peças de formas e dimensões variadas, através de um ciclo produtivo, garantindo uma boa repetitividade em todos os aspectos do produto moldado. Essas partes individuais formam sistemas independentes como é mostrado na Figura 2, os quais têm suas particularidades formas e funções específicas, o que confere ao molde de injeção uma grande carga tecnológica.

Figura 2 – Sistemas que envolvem um molde de injeção



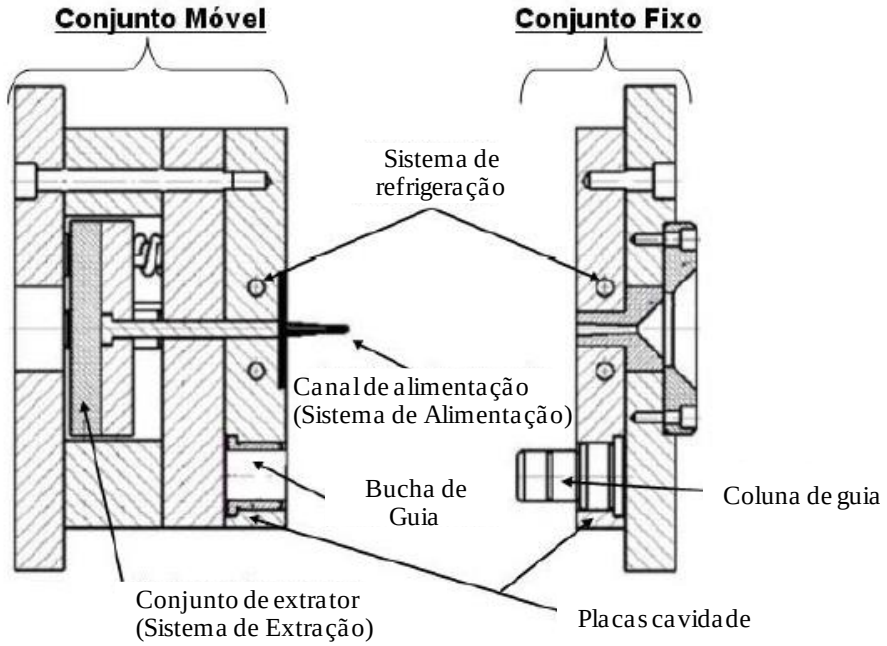
Fonte: Bareta (2007)

No projeto de um novo molde, devem ser analisadas algumas características do produto, tais como: o peso do material em cada injeção, o ciclo de moldagem, a força de fechamento, o número e a disposição das cavidades do molde, o material usado na sua

fabricação, o sistema de alimentação, o sistema de refrigeração, o sistema de extração, a linha de fechamento e o sistema de gavetas (PROVENZA, 1993).

De um modo geral o molde é dividido em um conjunto fixo e outro móvel como é apresentado na Figura 3, que podem ter uma ou mais cavidades que dão forma ao produto.

Figura 3 – Conjuntos de um molde de injeção



Fonte: Silva, S. (2009)

Esses sistemas compreendem:

a) sistema de alimentação: responsável por fazer a massa fundida chegar até todas as cavidades do molde, é na maioria dos casos composta de canais de alimentação que podem ser de várias formas e dimensões de acordo com a necessidade do produto;
b) colunas e buchas: são responsáveis pelo alinhamento e guiamento do molde no movimento de abrir e fechar dentro do ciclo de injeção, seu bom funcionamento garante um bom travamento do molde e possibilita aumentar a velocidade de abertura e fechamento, reduzindo assim o tempo de ciclo;
c) sistema de extração: permitem a remoção mecânica da peça injetada do molde, consistem na maioria das vezes em pinos extratores posicionados em locais estratégicos para não deformar a peça;
d) sistema de montagem: composto de placas base é responsável pela fixação do molde na máquina assim como a transmissão das forças, como a de injeção, e extração;

e) região moldante: também conhecida como cavidade, é a região que tem a forma da peça desejada, é considerada uma região crítica, pois é ela que interage diretamente com a massa fundida em alta temperatura, e deve transmitir esse calor para o sistema de refrigeração. Essa região sofre elevadas pressões, temperatura e atrito, por isso é muito importante fazer a escolha correta do material a utilizar na sua fabricação;
f) sistemas de refrigeração: tem com função diminuir de forma rápida e constante a temperatura da peça moldada até que atinja uma temperatura que permita a sua extração do molde. De acordo com Silva, S. (2009), esse processo de refrigeração depende da temperatura da superfície externa do molde, do ambiente que circunda o molde e do material a ser injetado. A eficiência desse sistema pode reduzir muito o tempo de ciclo, sendo o tempo de resfriamento o maior tempo dentro do ciclo de injeção. Esses sistemas são conhecidos como circuitos de refrigeração. Nesse trabalho o sistema de refrigeração de moldes será abordado com maior ênfase.

2.4 CIRCUITOS DE REFRIGERAÇÃO EM MOLDES

De acordo com Ferreira et al. (2009), circuitos de refrigeração funcionam como canais de resfriamento, através do qual um líquido refrigerante escoa. A sua função principal é remover o calor a partir do molde, de modo que, a peça esteja suficientemente rígida para ser desmoldada.

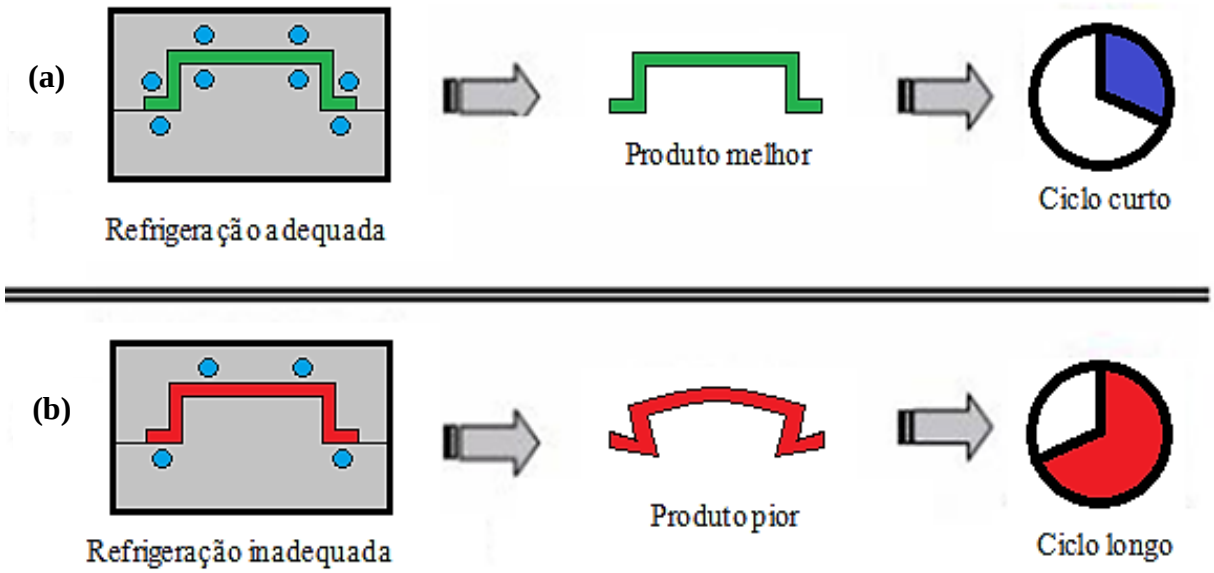
Tecnicamente, trata-se de dutos (na maioria das vezes cilíndricos) passantes que atravessam as cavidades do molde, onde por dentro deles circula um fluido refrigerante (tradicionalmente água), que pelo processo de transferência de calor por convecção absorve o calor do molde. De acordo com Saifullah et al. (2009), é importante compreender e aperfeiçoar o processo de transferência de calor dentro de um processo de moldagem típica. Sendo que taxa de troca de calor entre o polímero injetado e o molde é um fator decisivo para o desempenho econômico de um molde de injeção.

A etapa de dimensionar e definir a arquitetura dos circuitos de refrigeração deve fazer parte do projeto inicial do molde, sendo que segundo Stitz et al. (2002), os projetos dos sistemas de refrigeração dos moldes de injeção, normalmente costumam ser situados onde há espaço disponível, e não onde realmente são necessários.

Na maioria das vezes os sistemas de refrigeração são projetados de forma intuitiva, por tentativa e erro, similaridade de moldes ou pela experiência do projetista. Vale lembrar que cada produto tem uma geometria diferente o que implica em um sistema de refrigeração específico, além disso, vários conceitos de transferência de calor, mecânicas dos fluidos, resistividade térmica devem ser levados em conta para esse projeto.

Um projeto circuito de refrigeração equivocado pode trazer uma infinidade de consequências dentro do processo produtivo, um sistema desbalanceado faz com que diferentes regiões do molde estejam em diferentes temperaturas, de acordo Menges e Mohren (1993) e Harada (2004), a diferença de temperatura entre as superfícies das cavidades do molde deve encontrar-se entre 2 e 5°C, assim a refrigeração se torna mais eficiente, possibilitando a redução ou eliminação de possíveis tensões residuais termo-induzidas, conhecidas popularmente como empenamento, pode-se observar esse efeito na Figura 4, onde em 4a) pode-se observar um sistema de refrigeração adequado, que permite um escoamento uniforme da massa fundida pelas paredes do molde, ele também garante um resfriamento homogêneo o que diminui as tensões residuais que causam o empenamento. A Figura 4b), mostra um projeto equivocado de refrigeração com dutos mal distribuídos, causando um resfriamento não uniforme nas paredes do molde, isso implica em um preenchimento desbalanceado e tensões termo-induzidas que causam o empenamento do produto.

Figura 4 – Mecanismo de distorção causada por resfriamento desbalanceado: a) ciclo bom e b) ciclo ruim



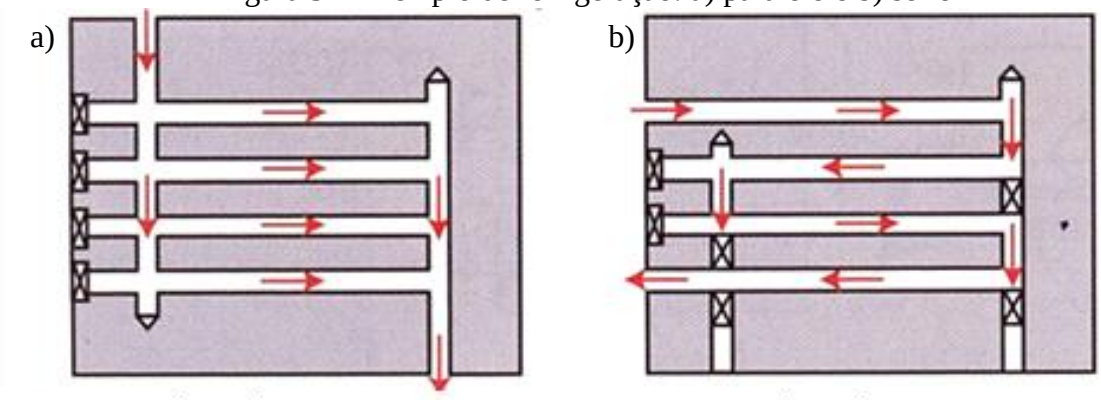
Fonte: Adaptado de C-Mold Design Guide (2000) apud Silva (2009a)

Segundo Menges e Mohren (1993), Rees (1995), Stitz et al. (2002), Harada (2004) e Brito et al. (2004), alguns aspectos devem ser levados em consideração para um correto dimensionamento, tendo em vista que esses aspectos tem influência direta no processo de refrigeração, tais como:

a) tipo de polímero e temperatura de processamento;
b) forma do produto (área, espessura);
c) espaço disponível no molde;
d) tipo de aço do molde e sua resistividade térmica;
e) critérios de qualidade que o produto precisa atender;
f) dimensão e localização adequada dos sistemas do molde;
g) parâmetros de processo e suas regulagens.

De acordo com Technik (2010), os canais de refrigeração em um molde de injeção podem ser em série ou em paralelo. No circuito paralelo a água é alimentada por vários circuitos paralelos de uma ou várias fontes. Um caso ideal é quando a água é distribuída uniformemente em todos os circuitos através mesma temperatura e taxa de fluxo. O circuito em série não contém qualquer subcircuito e tem somente uma entrada e uma saída como pode ser observado na Figura 5, este resulta em um canal de refrigeração relativamente longo.

Figura 5 – Exemplo de refrigeração: a) paralelo e b) série



Circuito em paralelo

Circuito em série

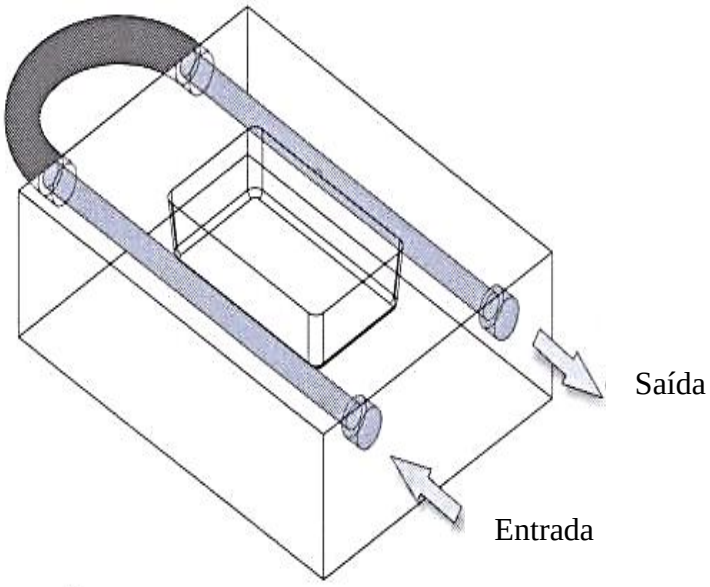
Fonte: Adaptado de Shoemacher (2006)

Segundo Brito et al. (2004), a arquitetura dos sistemas de controle de temperatura (sistema de refrigeração), dependem principalmente da forma e dimensão da peça, esta arquitetura deve acompanhá-la da melhor forma possível, essas formas e dimensões são quem condicionam o espaço existente para a refrigeração, para alguns dos sistemas de refrigeração mais convencionais serão mostrados a seguir.

2.4.1 Circuito em U

Esse tipo de circuito é comumente usado para refrigerar cavidades longas e estreitas, consiste em um par de furações passantes que são conectadas por uma mangueira ou por uma furação cruzada na sua extremidade, esse tipo de refrigeração é um dos mais simples e econômico, é muito utilizado em moldes de baixa complexidade, na Figura 6 pode ser observado um exemplo desse sistema o qual tem a conexão entre os dutos feita por meio de uma mangueira.

Figura 6 – Exemplo de refrigeração em circuito U



Fonte: Adaptado de Brito et al. (2004)

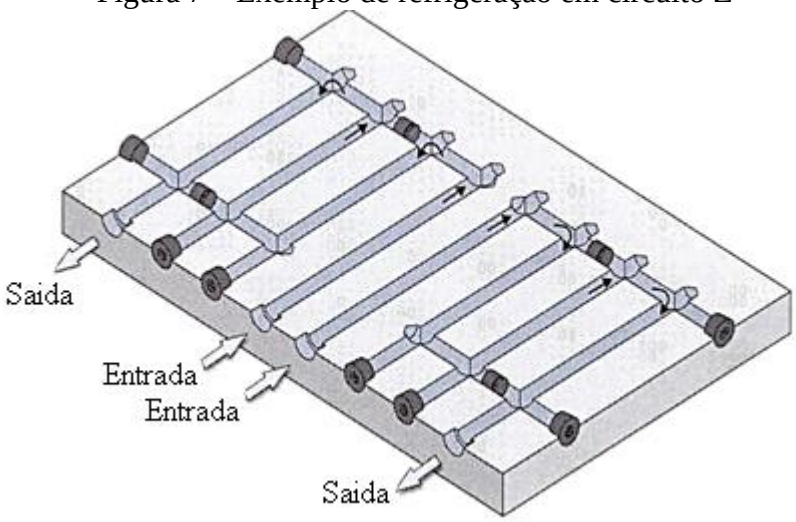
2.4.2 Circuito em Z

O circuito Z, por sua vez, é uma variação do circuito U com varias interligações, este é utilizado para refrigeração de grandes áreas e placas planas, sempre que for possível o número de canais de refrigeração deve ser par, do modo que a entrada e a saída da água estejam do mesmo lado do molde.

Segundo Brito et al. (2004) para evitar um aumento progressivo da temperatura do fluido de refrigeração ao longo do molde deve se evitar que o circuito tenha muitos canais (muito longo), caso isso aconteça, é possível fazer a divisão em dois circuitos em Z menores, sempre buscando a simetria entre os circuitos.

Na Figura 7 pode-se observar uma aplicação do circuito Z na refrigeração de uma placa plana, onde o mesmo foi dividido em dois circuitos menores para reduzir o efeito do aumento da temperatura do fluido ao longo do sistema de refrigeração.

Figura 7 – Exemplo de refrigeração em circuito Z



Fonte: Adaptado de Brito et al. (2004)

2.4.3 Circuito para cavidades retangulares

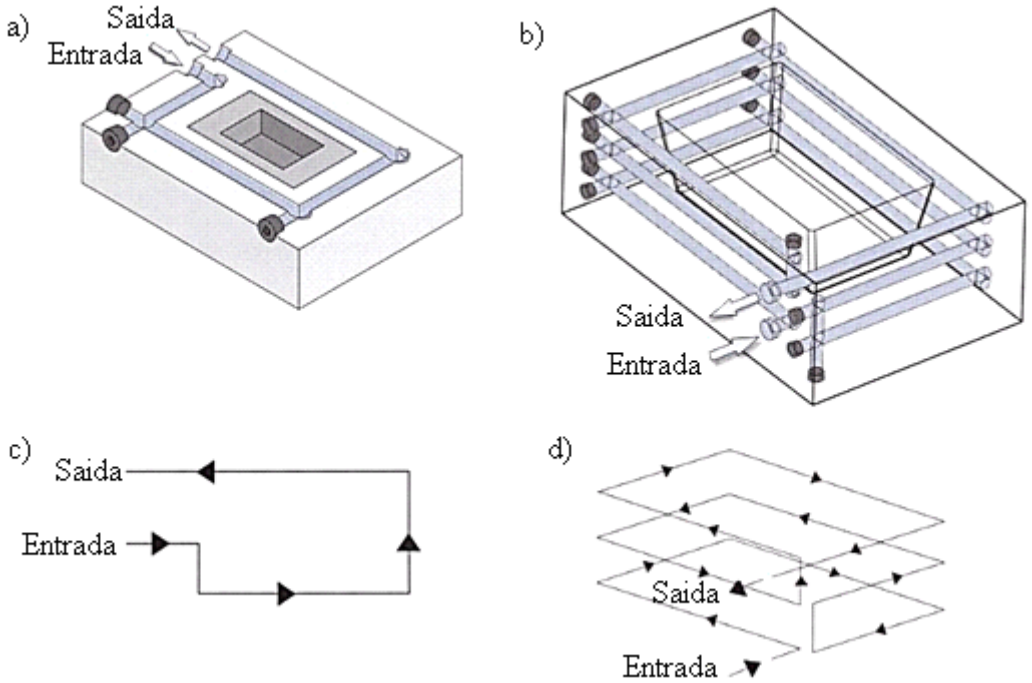
Utilizado para refrigeração de paredes laterais de peças retangulares, pois no circuito U de conexão por mangueira não seria possível refrigerar duas das faces.

De acordo com Brito et al. (2004) o retângulo formado pelo canal de refrigeração deve ser o mais fechado possível, mantendo uma distância entre o bocal de entrada e saída suficiente para que sejam feitas as ligações com os bocais de alimentação.

Segundo o mesmo autor, para cavidades profundas, há necessidade de dispor os canais em diferentes níveis, este poderia ser montado de maneira de circuitos retangulares independentes, com a desvantagem de existirem mais ligações no molde, mas com uma maior eficiência, pois o tempo de residência do fluido refrigerante dentro do molde é menor e com isso a diferença de temperatura na entrada e na saída também é menor.

Na Figura 8a) pode-se observar uma refrigeração retangular de apenas um nível, utilizada em cavidades de altura reduzida, já na Figura 8b) é mostrado uma refrigeração retangular de três níveis para cavidades profundas, com somente uma entrada e uma saída e ligações feitas entre os níveis, já as Figuras 8c) e 8d) mostram esquematicamente como ocorre o escoamento do fluido por meio dos canais de refrigeração retangulares.

Figura 8 – Exemplo de refrigeração para cavidades retangulares

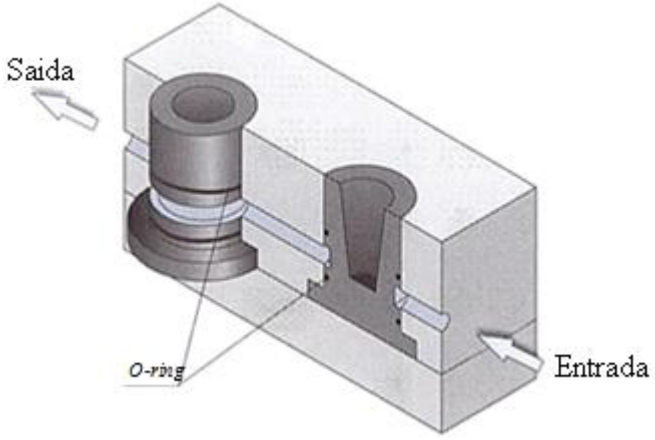


Fonte: adaptado de Brito et al. (2004)

2.4.4 Circuitos para cavidade circulares

Em cavidades circulares, a refrigeração com furações retas não é aconselhável, pois ela não consegue acompanhar a forma da peça, causando uma refrigeração não uniforme e peças possivelmente deformadas. Segundo Brito et al. (2004) para esse tipo de cavidades o correto é usinar as cavidades em postiços circulares com os canais de refrigeração usinados na sua superfície, permitindo assim que o fluxo do fluido refrigerante acompanhe a forma da peça como pode se observar na Figura 9, nessa situação se faz necessário o uso de anéis de vedação (*O-rings*).

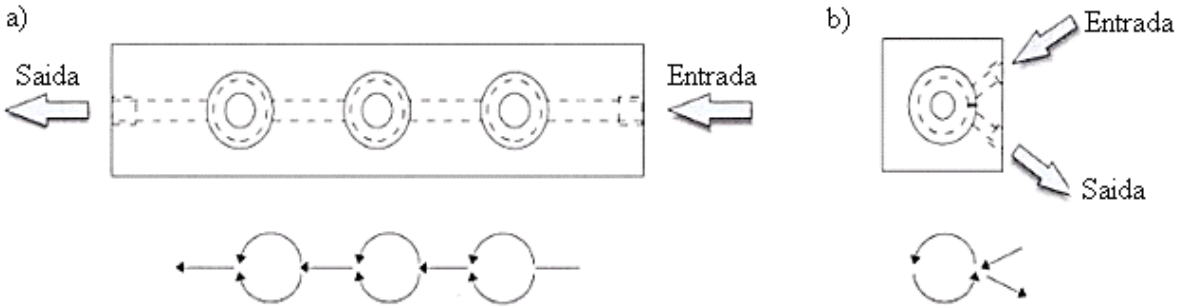
Figura 9 – Exemplo de refrigeração para postiços circulares



Fonte: Brito et al. (2004)

O percurso do refrigerante pode ser continuo ou divergente, sendo que para cavidades muito fundas deve se fazer a refrigeração em diferentes níveis (alturas), como na refrigeração retangular, ou ainda podem ser desenvolvidos circuitos alternativos, na Figura 10 pode-se observa a diferença entre percurso continuo e divergente.

Figura 10 – Refrigeração em percurso contínuo e divergente: a) percurso contínuo b) percurso divergente

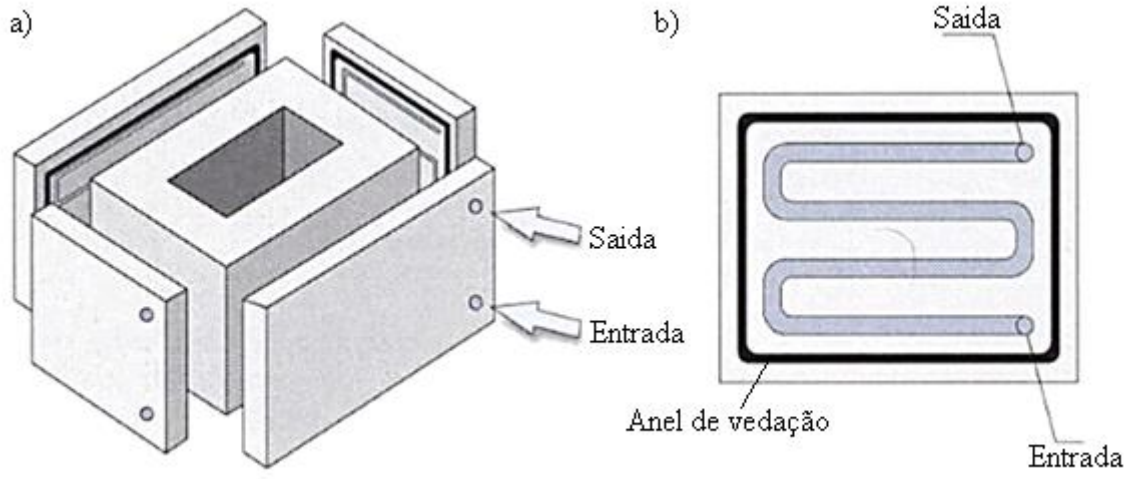


Fonte: Adaptado de Brito et al. (2004)

2.4.5 Placas de refrigeração

De acordo com Silva, S. (2009) este sistema é recomendado onde é necessário o controle individual de temperatura em cada face do molde, devido aos canais usinados em placas que são fixados por parafusos ou soldadas nas laterais do molde. Quando fixado com parafusos é necessário à colocação de uma junta de vedação. Na Figura 11a) pode-se observar uma cavidade com as quatro placas de refrigeração que a envolvem, já na Figura 11b) é mostrada somente uma placa com seus detalhes construtivos.

Figura 11 – Exemplo de placas de refrigeração

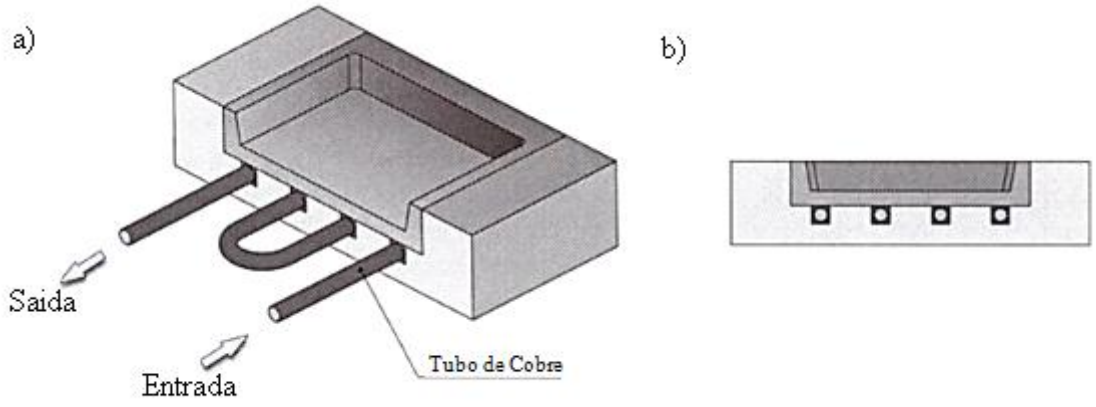


Fonte: Adaptado de Brito et al. (2004)

2.4.6 Refrigeração com tubos de cobre

Segundo Costa (2007), neste tipo de refrigeração de tubos conformados em cobre, são usinados os alojamentos nas placas, onde são instalados os tubos, então é preenchida a folga com um material de baixo ponto de fusão, para melhorar a transferência de calor entre o postiço e os tubos de cobre, na Figura 12a) é mostrado um exemplo desse tipo de refrigeração em vista isométrica e na Figura 12b) o mesmo sistema visto em corte.

Figura 12 – Refrigeração com tubos de cobre

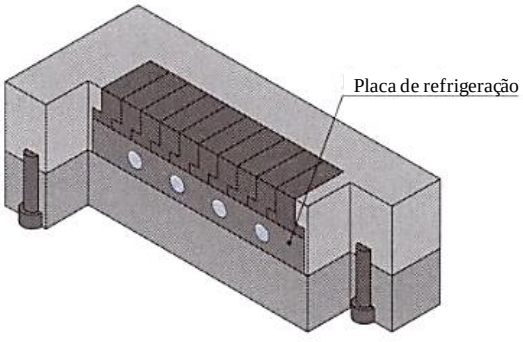


Fonte: Adaptado de Brito et al. (2004)

2.4.7 Placa de refrigeração em ligas de alta condutibilidade térmica

De acordo com Brito et al. (2004) quando uma cavidade ou bucha possui muitos postiços, extratores, parafusos, etc., não restando espaço para a circulação de refrigeração, pode utilizar-se uma placa de refrigeração que é fabricado com um material de alta condutibilidade térmica, esta placa, como pode se observar na Figura 13, esta fica logo abaixo da superfície moldante.

Figura 13 – Refrigeração em ligas de alta condutibilidade

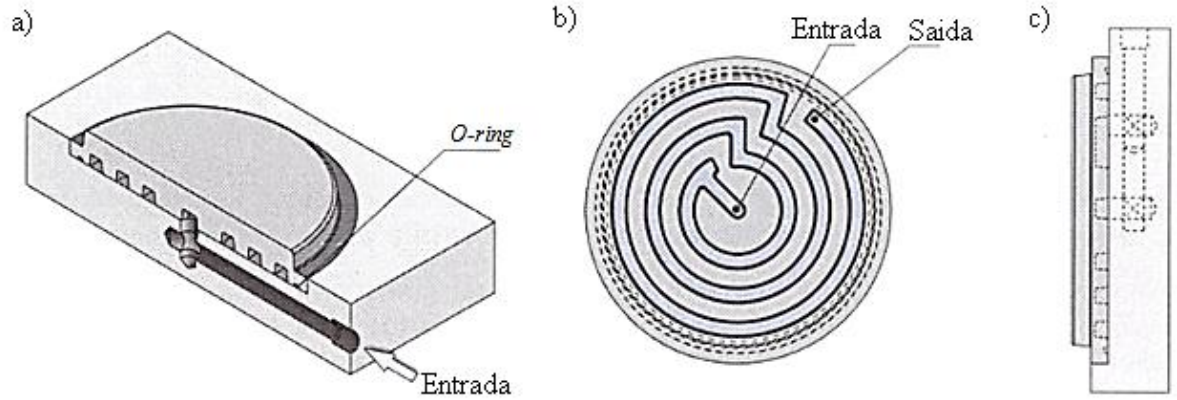


Fonte: Brito et al. (2004)

2.4.8 Circuitos de água abertos em espiral

Esse sistema de refrigeração é utilizado em grandes áreas de baixa altura, consiste em um canal usinado em espiral onde o fluido escoa, o número de espiras depende da dimensão da bucha, esse sistema apresenta distribuição de temperatura bastante uniforme, em contrapartida demanda maior tempo de usinagem o que eleva o custo de fabricação. Na Figura 14a) observa-se uma vista isométrica desse sistema de refrigeração, já na Figura 14b) e 14c) são mostradas as vistas inferior e lateral respectivamente.

Figura 14 – Refrigeração com circuitos abertos em espiral



Fonte: Adaptado de Brito et al. (2004)

2.4.9 Circuitos de água alternativos para machos

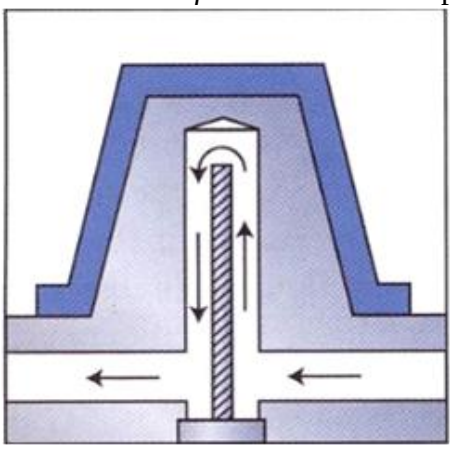
Para machos mais “altos”, onde a refrigeração que passa na base não é suficiente para refrigerar as paredes laterais da peça, é necessária a confecção de circuitos alternativos de refrigeração que são apresentados abaixo:

2.4.9.1 *Baflles*

Esse sistema também conhecido como refrigeração em cascata, de acordo com Shoemacher (2006), é um canal de refrigeração perfurado perpendicularmente a linha de arrefecimento principal, com uma lâmina de separação que divide uma passagem de arrefecimento em dois canais semicirculares.

O fluxo de refrigerante entra em um dos lados da lâmina a partir da linha de arrefecimento principal, gira em torno da ponta para o outro lado da lâmina como pode ser observado na Figura 15.

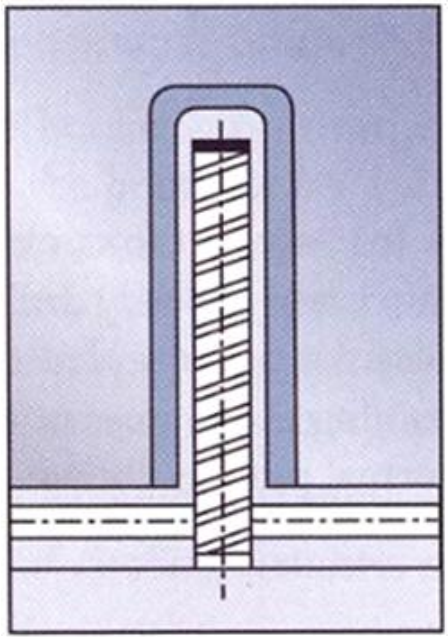
Figura 15 – Sistema *Baflles* com lâmina separadora



Fonte: Shoemacher (2006)

Para machos circulares de maior diâmetro (12 a 50 mm), são indicadas *Baflles* em forma de espiral, onde o refrigerante é conduzido até a ponta do macho e retorna por um circuito lateral em forma de hélice usinado na sua lateral. Essa forma construtiva é mostrada na Figura 16.

Figura 16 – Sistema *Baflles* com fluxo em espiral



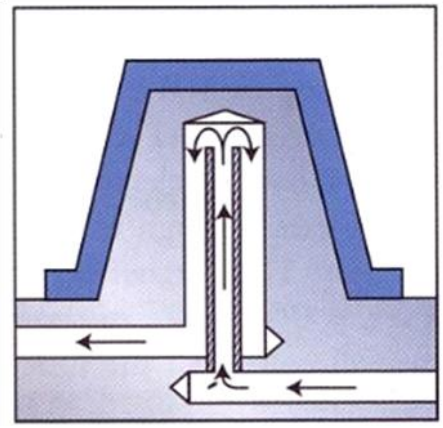
Fonte: Shoemacher (2006)

2.4.9.2 *Bubbler*

Esse sistema é muito similar ao anterior, é utilizado principalmente na refrigeração de pinos de diâmetro reduzido, de acordo com Shoemacher (2006) o fluido refrigerante no fundo do tubo borbulha para fora do topo, assim como uma fonte, então fluido de

arrefecimento escoa para baixo em torno do exterior do tubo para continuar seu fluxo através dos canais de refrigeração, na Figura 17 pode ser observado esse sistema de refrigeração.

Figura 17 – Sistema de refrigeração do tipo *Bubbler*

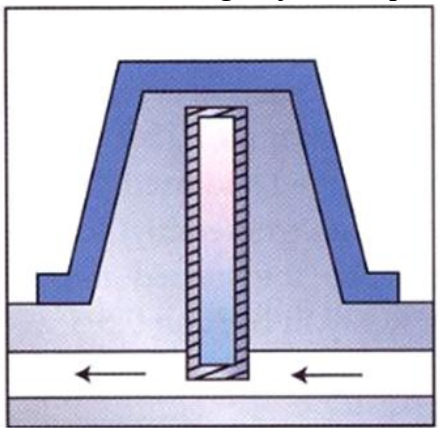


Fonte: Shoemacher (2006)

2.4.9.3 Pinos térmicos

Os pinos térmicos são uma alternativa para regiões de difícil acesso de canais de refrigeração e regiões muito pequenas, segundo Brito et al. (2004) no mercado encontram-se pinos térmicos com diâmetros de 2 a 12 mm e comprimentos de 25 a 250 mm, este então é alojado em um furo (que deve ter um bom acabamento) de modo que sua base esteja em contato com o canal de refrigeração como pode ser observado na Figura 18, para uma maior eficiência utiliza-se uma pasta térmica especial na montagem do pino, aumentando sua área de contato com o molde.

Figura 18 – Sistema de refrigeração com pinos térmicos

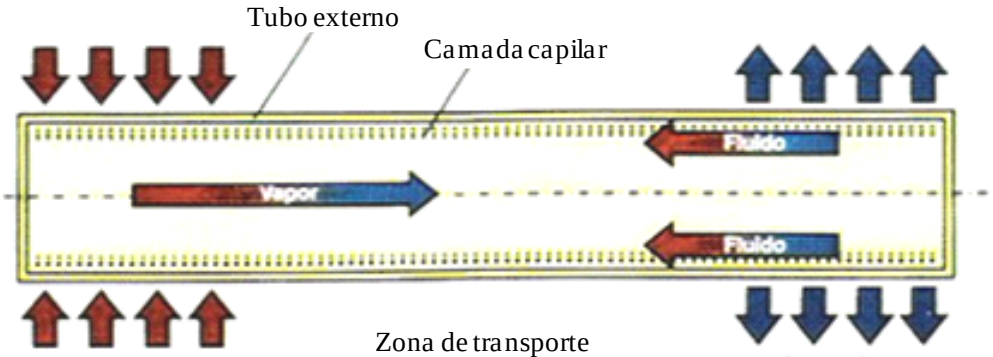


Fonte: Shoemacher (2006)

De acordo com Stitz et al. (2002), pinos térmicos tratam-se de cilindro ocos hermeticamente selados, preenchidos por um meio refrigerante tanto na sua forma líquida

como gasosa em que as duas fases estão em uma espécie de equilíbrio, a transmissão de calor ocorre pelo calor latente de transição de fase. Segundo o mesmo autor, quando o calor é adicionado ou removido do tubo o equilíbrio é então perturbado. Esse desequilíbrio promove a transição de fases no líquido presente no interior do tubo, que na zona aquecida passa para a forma gasosa, e na zona fria o gás se torna líquido novamente. Esse líquido é transportado para a zona quente novamente pela diferença de pressão e pela ação capilar da mecha, constituída geralmente por uma malha metálica no interior do tudo. Esse princípio de funcionamento pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 – Princípio de funcionamento do pino térmico

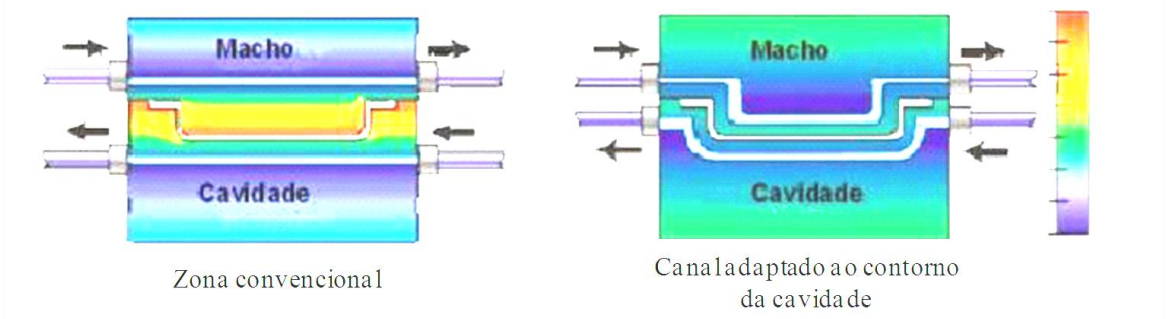


Fonte: Stitz et al. (2002)

2.4.10 Resfriamento adaptados ao contorno das peças

De acordo com Silva, S. (2009), são canais de refrigeração cujo sistema construtivo, permite que seja desenvolvido próximo ao contorno da cavidade, essa condição é muito favorável para a homogeneização da temperatura assim como aumenta a taxa de transferência de calor, como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – Refrigeração adaptada ao contorno da peça



Fonte: Cordom (2008) apud Silva (2009a)

2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO MOLDE

A refrigeração do molde deve retirar o calor que foi conduzido para dentro da cavidade pela massa fundida, essa remoção do calor ocorre por diferentes mecanismos de transferência de calor, sendo elas a condução a convecção e a radiação.

Segundo Silva, S. (2009), a condução ocorre na transmissão de calor do polímero fundido através dos componentes do molde chegando aos canais de refrigeração, a convecção pode se dar de duas formas, através da convecção natural da superfície externa do molde com o meio ambiente, e também pela convecção forçada quando se escoa fluido refrigerante para os canais de refrigeração, e a transferência de calor por radiação ocorre da superfície externa do molde para o ambiente que o circunda.

O dimensionamento de um sistema de refrigeração deve levar em conta esses mecanismos de transferência de calor, a seguir será mostrado o balanço térmico de um molde de injeção assim como as equações que envolvem esse sistema térmico.

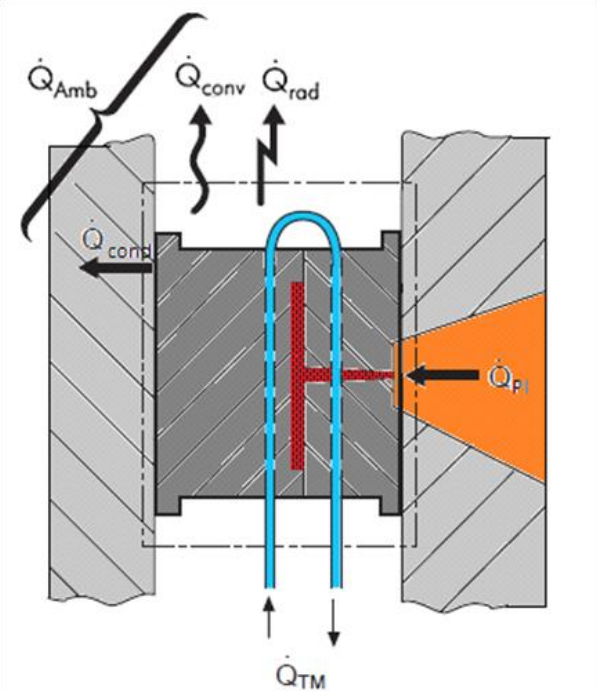
O dimensionamento correto de um sistema de refrigeração, como já foi dito, tem grande importância para o desempenho econômico do molde, mas o dimensionamento exato desse sistema envolve um desenvolvimento matemática mais complexo, e conhecimentos avançados de transferência de calor e mecânica dos fluidos que muitas vezes não são de conhecimento do projetista.

Sendo assim, Brito et al. (2004) propõem algumas considerações que devem ser tomadas, a fim de facilitar o desenvolvimento do cálculo, sendo que não afetam de maneira significativa os resultados em termos práticos, sendo elas:

a) o processo é quase estático;
b) as flutuações nas temperaturas e nos fluxos térmicos são desprezáveis;
c) consideram-se os valores médios das propriedades durante os períodos em questão.

Na Figura 21 é mostrado o balanço térmico de um molde de injeção onde estão representados os mecanismos de transferência de calor envolvidos no processo.

Figura 21 – Balanço térmico em um molde de injeção



Fonte: Adaptado de Zölner (1997)

Sendo:

$\dot{Q}_{TM}$ – Fluxo de calor transferido pelo sistema de refrigeração (kW)

$\dot{Q}_{PI}$ – Calor trazido pela massa fundida (kW)

$\dot{Q}_{Amb}$ – Calor transferido para o ambiente (kW)

$\dot{Q}_{cond}$ – Calor por condução (kW)

$\dot{Q}_{conv}$ – Calor por convecção (kW)

$\dot{Q}_{rad}$ – Calor por radiação (kW)

2.5.1 Balanço térmico em um molde de injeção

De acordo com Aisa et al. (2012) de uma maneira esquemática pode se considerar um molde como um trocador de calor onde condução e convecção dominam a transferência de calor nesse processo. Segundo o mesmo autor, pode se considerar qualitativamente a transferência por radiação como 2% da transferência de calor, isto para moldes convencionais, para moldes com sistema de alimentação de canal quente a este fenômeno aumenta sua importância.

A seguir, será apresentada uma série de equações que, de acordo com Menges e Mohren (1993) Zölner (1997) e Brito et al. (2004) são utilizadas no dimensionamento de um sistema de refrigeração.

Para efeitos de cálculo, considera-se positivo o calor recebido pelo molde e negativo o perdido, assim tem-se o balanço térmico do molde definido pela Equação 1:

$$\sum_{I} \dot{Q}_I = \dot{Q}_{TM} + \dot{Q}_{PI} + \dot{Q}_{Amb} = 0 \tag{1}$$

Onde obtem-se a Equação 2:

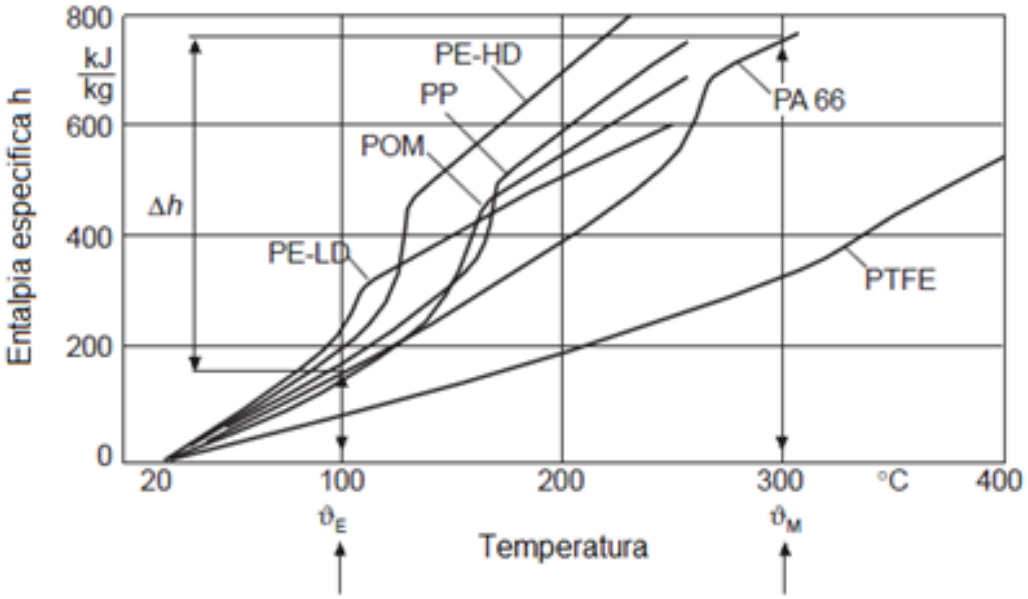
$$\dot{Q}_{Amb} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \tag{2}$$

O fluxo de calor cedido pela massa fundida durante o tempo em que a cavidade do molde permanece cheia é dada pela Equação 3:

$$\dot{Q}_{PI} = \frac{m \cdot (h_{inj} - h_{ext})}{t_c} \tag{3}$$

Sendo m a massa fundida injetada (kg), h é a entalpia de injeção e extração do polímero respectivamente (J/kg), e t_cé o tempo de residência do material no molde (s). Na Figura 22 pode ser observado o gráfico de entalpia x temperatura para alguns polímeros como o polipropileno (PP), Poliacetal (POM), Nylon (PA), Polietileno (PE) entre outros.

Figura 22 – Entalpia x temperatura de alguns polímeros



Fonte: Zölner (1997)

O tempo de residência do material pode ser considerado igual ao tempo de resfriamento, que pode ser calculado pela Equação de Wübken, 4:

$$\dot{t}_c = \frac{S^2 \cdot \ln(k_S \cdot Y)}{\pi^2 \cdot \alpha_{ef}} \tag{4}$$

Em que *S* é a espessura da parede (m), α_{ef}corresponde à difusividade térmica efetiva média do polímero (μm/s), k_S é um coeficiente dependente da espessura da peça ($4/\pi$ para S ≤ 3 mm e $8/\pi^2$ para S> 3) e *Y* é a temperatura adimensional dada pela Equação 5:

$$Y = \frac{T_{inj} - T_{mol}}{T_{ext} - T_{mol}} \tag{5}$$

Onde, *T* são as temperaturas de injeção de extração e do molde (°C). Na Tabela 1 é apresentada a difusividade térmica efetiva média para alguns polímeros.

Tabela 1 – Difusividade térmica efetiva para alguns termoplásticos

Material	$\boldsymbol{\alpha_{ef}}$**(nm²/s)**	$\boldsymbol{T_{cav}}$ **(°C)**
Poliestireno	80	20 a 70
ABS	80	40 a 80
PMMA	75	70
PVC	70	30 a 60
PELD	90	20
PELD	75	60
PEHD	95	20
Polipropileno	65	20 a 80
Poliacetal	65	60
Poliacetal	50	100
Nylon 6	70	80 a 100
Nylon 6.6	85	80 a 100

Fonte: Adaptado de Brito et al. (2004)

Já transferência de calor do molde para o ambiente se da de três processos habituais: condução, convecção e radiação, sendo calculadas individualmente.

2.5.2 Condução

Esta se dá pelas placas de fixação do molde, e é proporcional a diferença de temperatura entre as placa de fixação e a placa da injetora e pode ser calculada pela Expressão 6:

$$\dot{Q}_{cond} = A_{fix} \cdot \beta \cdot (T_{amb} - T_{mol}) \quad (6)$$

Sendo A_{fix} a área de contato do molde com o sistema de fixação (m²), e β é o fator de proporcionalidade (W/m² °C), que representa a condutividade térmica do material de construção da cavidade, que é mostrado na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Fator de proporcionalidade para aços usuais

Material	$\boldsymbol{\beta}$
Aços de baixa liga	100
Aços de alta liga	80
Ligas de cobre	20

Fonte: Brito et al. (2004)

Segundo Brito et al. (2004), a troca de calor por condução equivale a aproximadamente 70 a 80% das trocas com o ambiente, sendo assim para moldes que vão trabalhar com temperaturas elevadas (acima de 60°C) deverão usar placas isoladoras.

2.5.3 Convecção

Este se dá pelas paredes laterais do molde com o ambiente que o circunda, esse fluxo de transferência de calor se da pela Equação de Newton, 7:

$$\dot{Q}_{conv} = A_{lat} \cdot \alpha_a \cdot (T_{amb} - T_{mol}) \quad (7)$$

Sendo que A_{lat}é a área lateral total do molde, α_a é o coeficiente de transferência de calor por convecção natural com o ar (8 W/m² K) e T é a temperatura ambiente e temperatura do molde respectivamente.

2.5.4 Radiação

O fluxo de calor por radiação das paredes externas do molde para o ambiente pode ser calculado pela Equação de Stefan-Boltz, 8:

$$\dot{Q}_{rad} = A_{lat} \cdot \varepsilon \cdot C_{rad} \cdot \left[\left(\frac{\theta_{amb}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{mol}}{100} \right)^4 \right] \quad (8)$$

Sendo que A_{lat} é a área lateral total do molde, ε é o fator de emissividade térmica (0,25 para o aço), C_{rad} é coeficiente de radiação do corpo negro (5,77 W/m² K^4), e θ corresponde à temperatura absoluta do ambiente e do molde respectivamente, esse fluxo de acordo com Zölner (1997) no caso de temperaturas externas do molde de até 90°C, é inferior a 25% da componente de transferência por convecção.

Conhecidos os valores de calor absorvidos e cedidos pelo molde (positivos e negativos), pode-se então calcular a quantidade de calor que terá que se retirar com fluido de arrefecimento, pelo balanço térmico, com uma variação da Equação 1 tem-se a Equação 9:

$$\dot{Q}_{TM} = -\dot{Q}_{PI} - \dot{Q}_{Amb} \quad (9)$$

Dessa forma pode-se calcular todos os fluxos de calor envolvidos no molde durante o processo de injeção, partindo para o dimensionamento do circuito de refrigeração no que diz respeito a vazões, diâmetros, comprimentos, etc.

2.5.5 Dimensionamento do circuito de refrigeração

Com base no fluxo de calor que deve ser retirado calculado, parte-se então para o dimensionamento da vazão de fluído refrigerante necessária para "arrastar" esse calor, a qual pode ser definida pela Equação 10:

$$\dot{Q}_{TM} = \dot{m} \cdot C \cdot \Delta T \quad (10)$$

Isolando o fluxo de massa de refrigerante $\dot{m}$ na Equação 10 se tem o descrito na Equação 11:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{TM}}{C \cdot \Delta T} \tag{11}$$

Em que *C* corresponde ao calor específico do fluido (4,186 kJ/kg °C para a água) e ΔT a variação de temperatura do fluido na entrada e saída do sistema de refrigeração, a variação de temperatura deve ser em geral entre 2 e 5°C sendo a menor para moldes de maior precisão.

Com a vazão de refrigerante conhecida pela Equação 11, de acordo com Brito et al. (2004), o diâmetro da tubulação pode ser determinado pela Tabela 3.

Tabela 3 – Diâmetro recomendado para vazões conhecidas

Vazão (l/min)	**Diâmetro (mm)**
3,8	8
9,5	11
38	19
85	23,8

Fonte: Brito et al. (2004)

Para que a transferência de calor seja mais eficiente deve-se garantir que o escoamento seja turbulento, essa turbulência pode ser calculada pelo número de Reynolds (Re), na Tabela 4 pode ser observada a relação entre Re e o tipo de escoamento, segundo Technik (2010), número de Reynolds em um circuito de refrigeração deve ser em intervalos de 10.000 para 20.000.

Tabela 4 – Relação entre número de Reynolds e tipo de escoamento

Número de Reynolds (Re)	**Tipo de escoamento**
4000 < Re	Escoamento turbulento
2300 < Re < 4000	Escoamento transitório
100 < Re < 2300	Escoamento laminar
Re < 100	Escoamento estagnado

Fonte: Adaptado de Shoemaker (2006)

O número de Reynolds pode ser obtido pela Equação 12:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\upsilon} \tag{12}$$

Sendo que *V* é a velocidade do escoamento do fluido refrigerante, *D* é o diâmetro de tubulação escolhida e υ a viscosidade cinemática do fluido.

Conhecido o diâmetro da refrigeração e garantido o escoamento turbulento pelo Re, pode-se então determinar o comprimento dos canais.

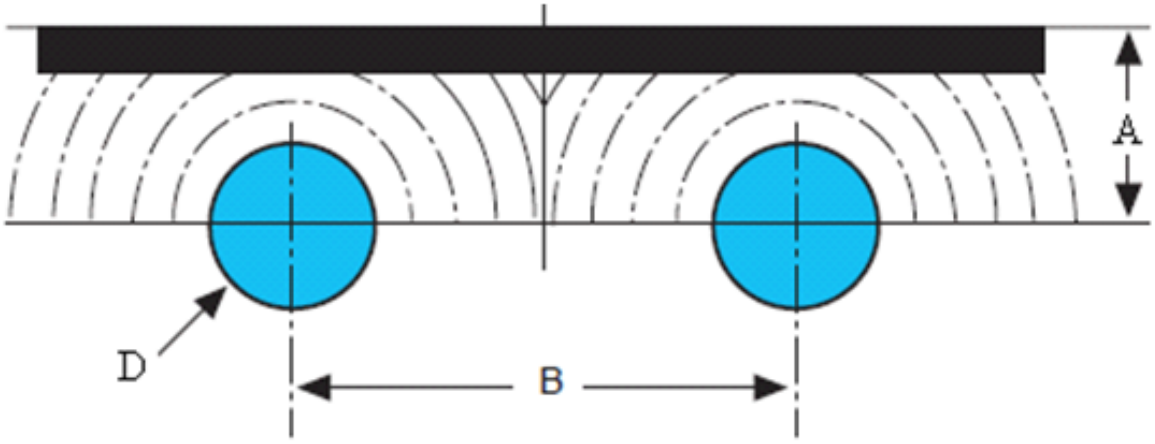
Estes, segundo Brito et al. (2004), devem ter o comprimento maior possível, garantindo que esse comprimento seja superior ao mínimo necessário para assegurar a transmissão de calor desejada. Segundo o mesmo autor o comprimento mínimo pode se calculado pela Equação 13:

$$L = \frac{2 \cdot \left|\dot{Q}_{TM}\right| \cdot A}{k \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta T} \tag{13}$$

Onde se tem que *A* é à distância dos canais e a superfície da cavidade, *k* é a condutividade térmica do material do molde (J/m s °C), *D* corresponde ao diâmetro dos canais (m), ΔT a diferença de temperatura entre a parede do molde e fluido de refrigeração e *L* o comprimento.

A distância entre os canais de refrigeração, e a distância entre os canais de refrigeração e a superfície do molde, tem a nomenclatura definida conforme a Figura 23, baseando-se no diâmetro de canal escolhido.

Figura 23 – Dimensões referentes ao sistema de refrigeração



Fonte: Adaptado de Zölner (1997)

De acordo com Rees (2002) e Brito et al. (2004), números práticos são definidos para decidir as dimensões acima. As distâncias recomendadas são de B≈2,5 a 3,5D (mm) e A≈0,8 a 1,5B(mm). Segundo Zölner (1997), essas dimensões são determinadas a partir da Tabela 5 que é mostrada a seguir.

Tabela 5 – Dimensões aproximadas para A e B

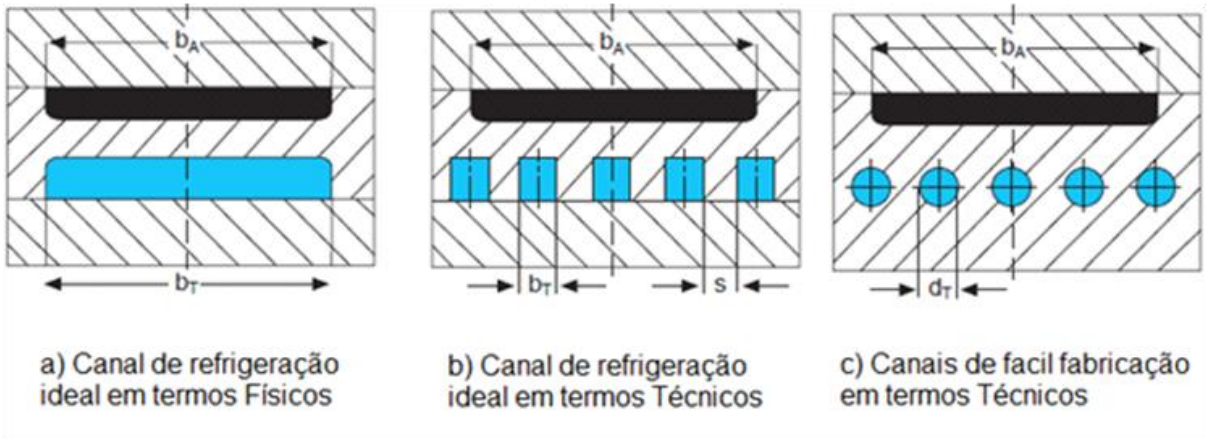
Espessura da peça moldada (mm)	Distância A (mm)	Distância B (mm)	Diâmetro dos canais D (mm)
De 0,0 a 1,0	De 11,3 a 15,0	De 10,0 a 13,0	De 4,5 a 6,0
De 1,0 a 2,0	De 15,0 a 21,0	De 13,0 a 19,0	De 6,0 a 8,5
De 2,0 a 4,0	De 21,0 a 27,0	De 19,0 a 23,0	De 8,5 a 11,0
De 4,0 a 6,0	De 27,0 a 35,0	De 23,0 a 30,5	De 11,0 a 14,0
De 6,0 a 8,0	De 35,0 a 50,0	De 30,5 a 40,0	De 14,0 a 18,0

Fonte: Zölner (1997)

2.5.6 Erro de refrigeração

A posição dos canais de refrigeração baseado na literatura, como foi mostrado acima, se trata de uma adequação de canais de refrigeração ótimos e a realidade de fabricação, sendo que essa adequação apresenta resultados bastante satisfatórios em termos de eficiência. Na Figura 24 são mostrados exemplos da adequação dos canais de refrigeração ideais com a realidade considerada pela literatura, onde na Figura 24a) pode-se observar um duto de refrigeração de toda a largura da cavidade, isto não é possível pois a pressão de injeção atuando sobre a cavidade do molde causaria a deflexão da mesma, a Figura 24b) mostra canais de refrigeração com perfil quadrado, onde a cavidade do molde já possui um suporte estrutural, mas esse tipo de canal é de difícil fabricação e custo elevado por fim a Figura 24c) mostra os canais de refrigeração utilizados na maioria dos casos, devido principalmente ao baixo custo e facilidade de implementação.

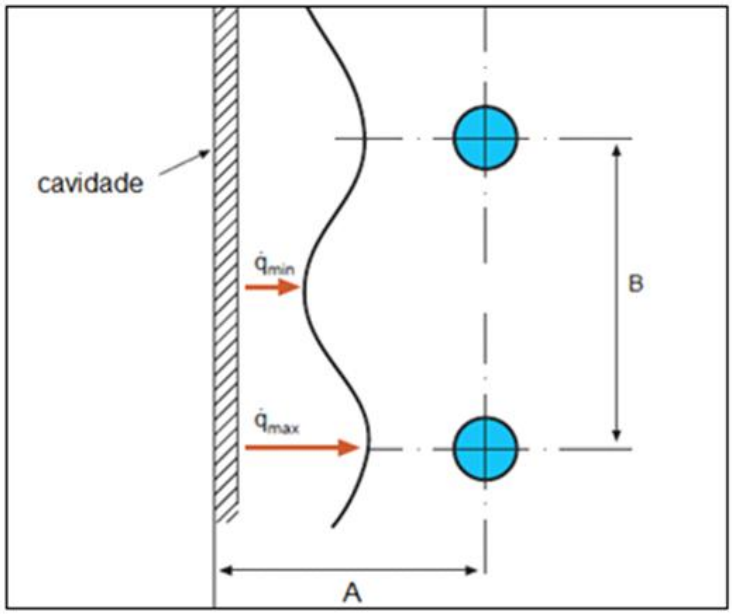
Figura 24 – Adequação de canais de refrigeração em termos práticos



Fonte: Adaptado de Zölner (1997)

A posição dos canais de refrigeração na maioria das vezes não segue as indicações da literatura, sendo que a determinação da posição desses canais é uma das últimas etapas do projeto do molde e estes são alocados dentro da disponibilidade de espaço no molde, causando um erro de refrigeração que é mostrado na Figura 25. Esse erro de refrigeração tem níveis aceitáveis, segundo Zölner (1997) de 5% para materiais semicristalinos e 10% para materiais amorfos.

Figura 25 – Erro de refrigeração



Fonte: Adaptado de Zölner (1997)

O erro de refrigeração percentual (j), em relação à temperatura média do molde, pode ser calculado pela Equação 14:

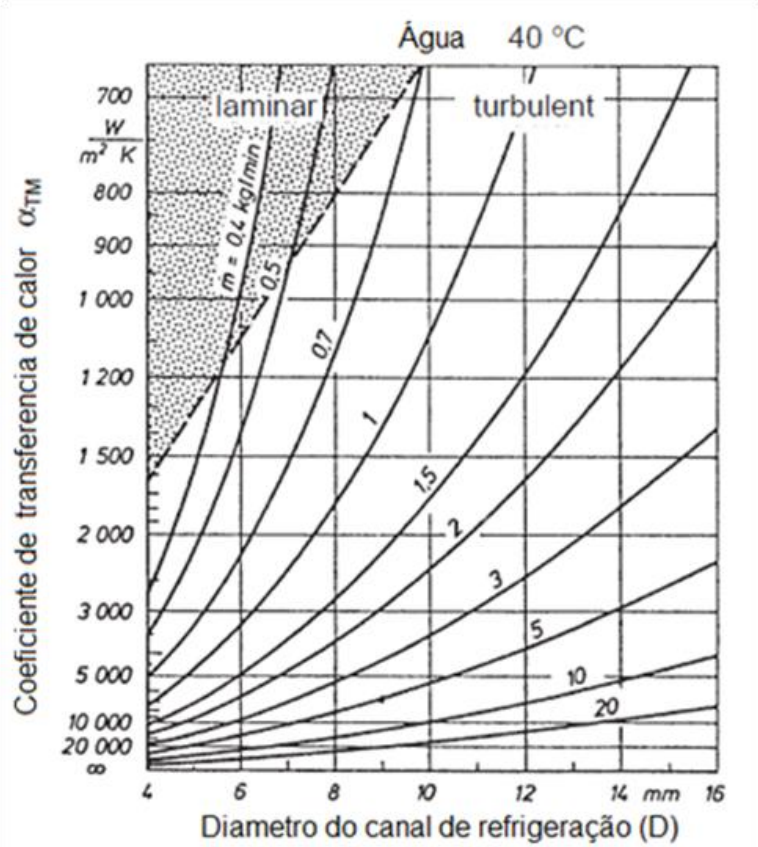
$$j = 2{,}4 \cdot Bi^{0{,}22} \cdot \left(\frac{B}{A}\right)^{2{,}8 \cdot \left|\ln\left(\frac{B}{A}\right)\right|} \tag{14}$$

Sendo que Bi é o número de Biot, calculado pela equação 15, e A e B são valores apresentados anteriormente segundo Tabela 5:

$$Bi = \frac{\alpha_{TM} \cdot D}{\lambda_W} \tag{15}$$

Sendo α_{TM}é o coeficiente de transferência de calor dado pela Figura 26, λ_W a condutividade térmica do aço (30 W/m² K aços para moldes) e D o diâmetro dos canais (m).

Figura 26 – Coeficiente α_{TM} para água a 40°C



Fonte: Adaptado de Zölner (1997)

Calculado o erro percentual de refrigeração (j) pela Equação 14, o erro real (ΔT_J) em °C é definido pela Equação 16:

$$\Delta T_J = \bar{T}_{mol} \cdot \frac{j}{100\%} \tag{16}$$

Sendo $\bar{T}_{mol}$ é a temperatura média do molde durante o ciclo de injeção, ou seja:

$$\bar{T}_{mol} = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \tag{17}$$

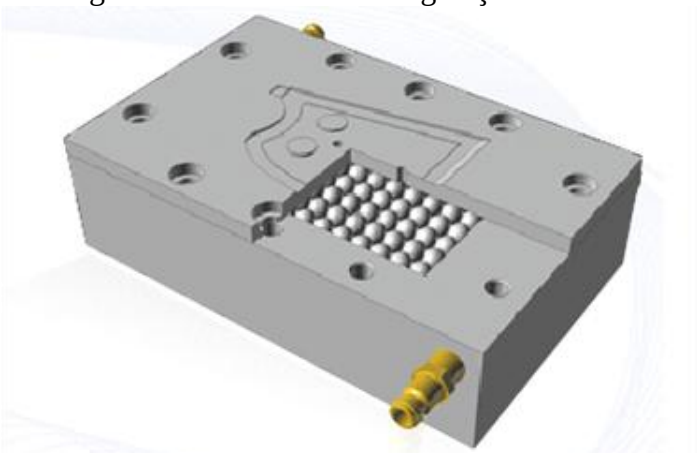
As dimensões e cálculos apresentados acima ajudarão na sequência do desenvolvimento desse trabalho, pois nos permitirão comparar a diferença entre os canais de refrigeração convencionais, dimensionados com base na literatura, com a nova tecnologia de refrigeração de moldes BFmold.

2.6 TECNOLOGIA DE REFRIGERAÇÃO BFMOLD

A tecnologia de refrigeração BFmold, foi desenvolvida em 2010 pelo instituto alemão Kunststoff, em parceria com a empresa Wittmann-Battenfeld fabricante mundial em máquinas e periféricos para injeção de plástico.

Essa tecnologia tem como um grande diferencial, o seu sistema construtivo que se baseia eu uma câmara de refrigeração usinada sob a cavidade do molde, a qual é preenchida por esferas de aço como é mostrado na Figura 27, estas esferas são inundadas por água, assim permitindo uma maior área de contato com a superfície traseira da cavidade do molde.

Figura 27 – Sistema de refrigeração BFmold



Fonte: Wittmann-Battenfeld [2012]

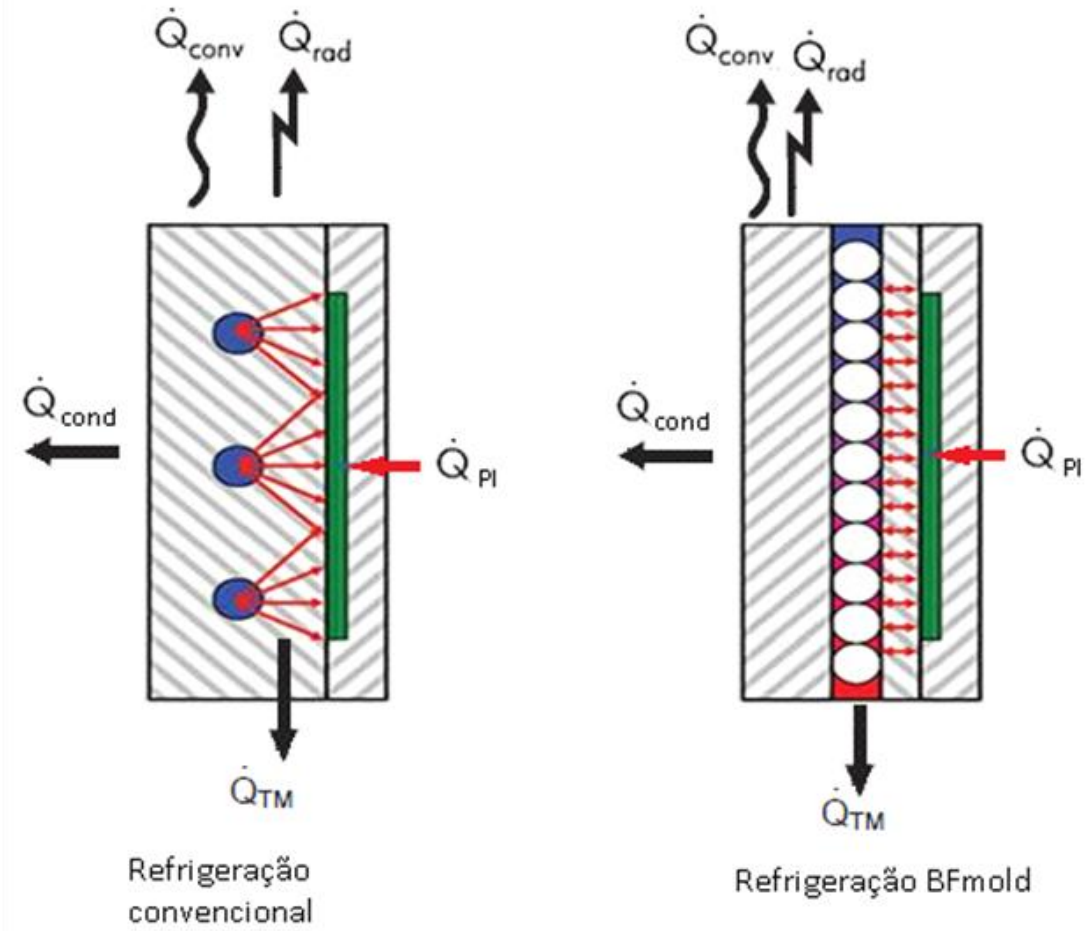
As esferas de aço dão suporte estrutural ao molde, evitando a flexão da placa que contem a cavidade do molde durante as fazes de injeção e recalque, assim a distância entre a câmara de resfriamento e a superfície do molde podem ser reduzidas, o que acarreta num resfriamento mais uniforme e eficaz. As esferas também provocam uma turbulência no escoamento e forçam que ele se distribua ao longo da câmara de refrigeração.

Segundo o fabricante as principais vantagens desse sistema são:

a) maior produtividade devido à redução de ciclo de injeção;
b) redução em marcas de fluxo e linhas de emenda;
c) reduz a distorção das peças injetadas (empenamento);
d) redução do tempo de resfriamento devido à facilidade de transferência
e) de calor;
f) aumento da qualidade superficial;
g) maior estabilidade mecânica do produto injetado.

O balanço térmico de um molde provido da tecnologia BFmold não difere muito do convencional, como pode ser observado na Figura 28, os tipos de troca de calor são idênticos com exceção do fluxo de calor removido pelo sistema de refrigeração ($\dot{Q}_{TM}$).

Figura 28 – Comparativo entre balanço térmico do molde



Fonte: Elaborado pelo autor (2012)

Esse fluxo de remoção do calor se difere do convencional, pois ele funciona segundo a teoria de escoamento entre placas paralelas, que é mais eficiente devido a sua maior área de contato do fluido com as placas e consequentemente maior área de troca de calor.

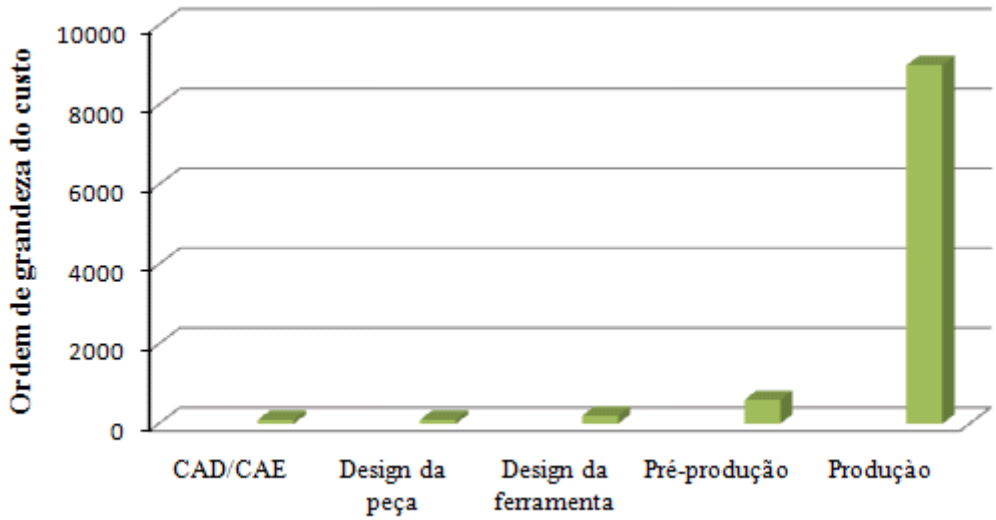
No capítulo três será feita uma analogia desse sistema de refrigeração e o sistema de refrigeração por placas paralelas, no que diz respeito ao equacionamento e eficiência.

2.7 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE MOLDES

De acordo com Kiam e Perreira (2007), as ferramentas *Computer Aided Engineering* – Engenharia Auxiliada por Computador (CAE) oferecem aos projetistas a possibilidade de realizar experimentos através de métodos computacionais, e as análises realizadas são cada

vez mais completas, abrangendo propriedades que antes não eram estudadas na execução de um projeto. Segundo os mesmos autores, se esses experimentos, em condições “reais”, resultariam em grandes gastos associados a alterações no molde, manufatura e custo de operação e parada de máquinas como pode se observar na Figura 29.

Figura 29 – Custos envolvidos na alteração de um projeto



Fonte: Adaptado de Kiam e Perreira (2007)

Segundo Peixoto (1999), a utilização das ferramentas CAE (*softwares*), aplicadas na simulação de injeção de materiais poliméricos vem sendo, ao passar dos anos, cada vez mais empregada no sentido de minimizar problemas no processo produtivo, desde a concepção da peça a ser moldada até o projeto do molde de injeção.

De acordo com os estudos de Carneiro (2006), o dimensionamento e a análise detalhada de um sistema de refrigeração (sistema térmico) através de uma simulação CAE são muito úteis, pois através dessa simulação, é possível a determinação de futuros problemas referentes: à construção do molde de injeção e seu sistema de resfriamento e ao processo de produção do componente moldado, o que possibilita uma melhoria e otimização no projeto do molde e nos parâmetros aplicados durante o processo de produção.

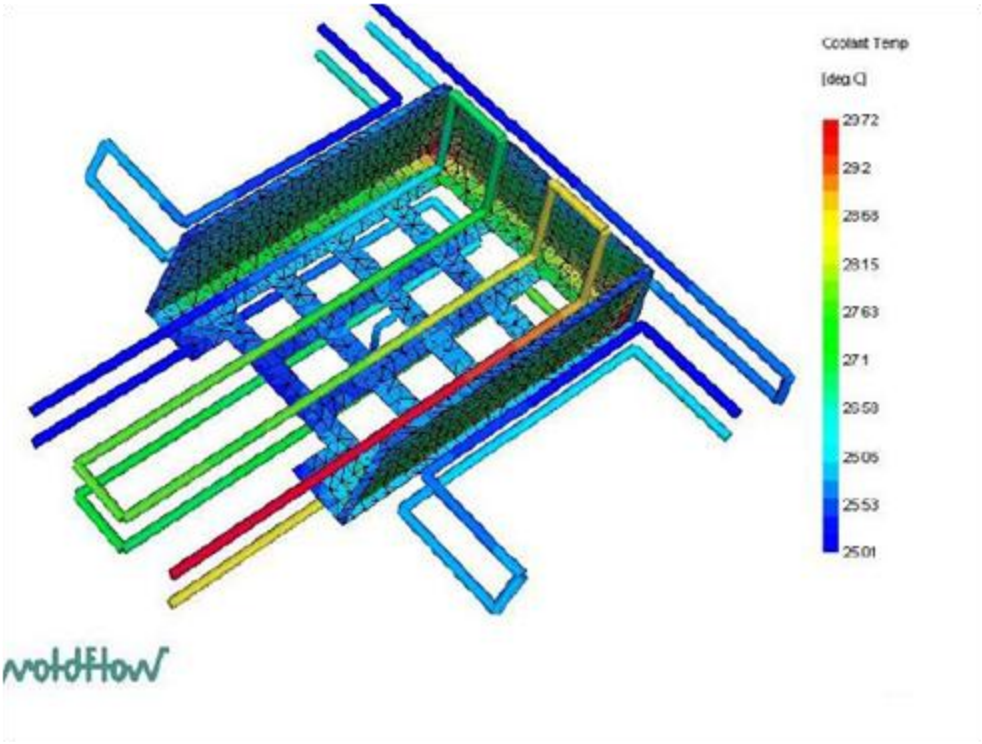
O *software* CAE mais conhecido pelos projetistas da região da serra Gaúcha é o *moldflow*, o qual permite uma grande variedade de simulações, como análises de tempos, velocidades, força de fechamento, linha de encontro da frente de fluxo do polímero, empenamento, contração, orientação do fluxo polimérico e perfil de temperaturas, utilizando para isso o método de elementos finitos que será apresentado a seguir.

De acordo com Silva, J. C. W. (2009), para a simulação do sistema de resfriamento o *software* dispõe do módulo *software Cool* permite a análise do resfriamento da peça em

função do sistema de refrigeração utilizado, levando em consideração: a temperatura do material a ser injetado; o tipo de fluido refrigerante; a distribuição, dimensões, tipos e arquiteturas de sistemas de refrigeração; espessuras das paredes do produto moldado e a condutividade térmica dos materiais empregados nas cavidades do molde.

Na Figura 30 pode se observar a interface uma análise de resfriamento da peça baseada no sistema de refrigeração proposto.

Figura 30 – Análise de refrigeração utilizando *software moldflow*



Fonte: Silva, S. (2009)

2.7.1 Método dos elementos finitos

Para este trabalho será utilizada a ferramenta *moldflow* descrita acima, para isso é necessário ter um conhecimento sobre a teoria do Método de Elementos Finitos (MEF), que é o método matemático utilizado pelo *software*.

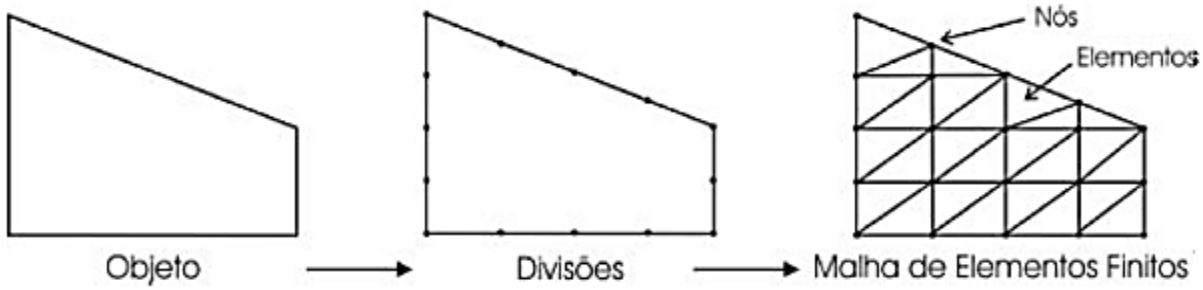
De acordo com Costa (2007), Ferreira (2007) e Silva, J. C. W. (2009) a teoria de métodos de elementos finitos surgiu na década de 50 com o objetivo de simplificar a resolução de problemas de engenharia e outras áreas matemáticas. O MEF baseia-se na transformação de equações diferenciais em equações algébricas, o que além de facilitar sua resolução, diminui o esforço computacional (ALVES FILHO, 2006).

Este método é utilizado por diversas áreas da engenharia como estruturas, hidráulica, termodinâmica, etc. Segundo Alves Filho (2006), para qualquer aplicação do MEF é

necessário que o problema geral seja regido por uma equação diferencial, tenha um campo fundamental (por exemplo, deslocamentos) e tenha condições de restrição.

Segundo Costa (2007), Ferreira (2007) e Silva, J. C. W. (2009) para a utilização desse método é necessário que o objeto em análise seja dividido em sub-regiões (transformação de contínuo em discreto) denominado elemento finito, obedecendo à regra de divisão de acordo com a forma geométrica escolhida (triangular ou quadrática, por exemplo) do elemento escolhido. Na Figura 31 é mostrado um processo de divisão do objeto em análise, o que é chamado de discretização.

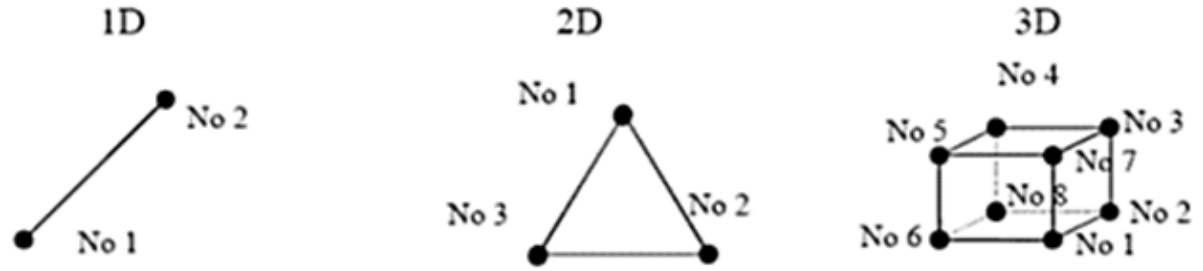
Figura 31 – Discretização de um objeto em uma malha de elementos finitos



Fonte: Freitas (2002)

Existem vários tipos de elementos finitos, como evidenciado na Figura 32, que se diferenciam de acordo com a geometria e com as funções polinomiais associadas a eles. A escolha do tipo de elemento está relacionada com a geometria do problema que se deseja solucionar (FREITAS, 2002).

Figura 32 – Alguns tipos de elementos finitos



Fonte: Freitas (2002)

O método dos elementos finitos é o utilizado pelo módulo *cool* do *software moldflow*® que será utilizado para verificar/avaliar os sistemas de refrigeração propostos, estes resultados serão então confrontados em um teste experimental.

2.8 MORFOLOGIA CRISTALINA DOS POLÍMEROS

De acordo com Bareta (2007), a estrutura no estado sólido em polímeros consiste no modo como as cadeias moleculares estão empacotadas, de maneira de formar a massa sólida. Este pode ser desordenado, formando a fase amorfa (sem forma), ou ordenado, regular e repetitivo, definindo a fase cristalina. Assim, define-se cristalinidade como o arranjo tridimensional perfeito das cadeias poliméricas.

Segundo Bareta (2007), o grau de cristalinidade dos polímeros é definido por o número total de átomos envolvidos em uma cadeia cristalina em oposição ao número de regiões amorfas e pode variar largamente. Ainda segundo Bareta (2007), em alguns polímeros nenhuma cristalinidade é formada, enquanto em outros, se as condições forem favoráveis a cristalinidade pode chegar próximo 100%, sendo mais comum que esteja entre os 20 e 70%.

Alguns materiais como o polipropileno (PP), são considerados semicristalinos, pois na sua matriz molecular estão presentes as fases amorfas e cristalinas, essa estrutura foi desenvolvida para alcançar propriedades físicas e químicas requeridas.

De acordo com Bareta (2007), um polipropileno hipoteticamente 100% cristalino apresenta calor de fusão (ΔHp) de 209 J/g, esse calor será usado na sequência do trabalho para determinação do grau de cristalinidade das peças obtidas nesse trabalho.

A cristalinidade dos polímeros tem influência direta nas propriedades mecânicas, físicas e termodinâmicas dos materiais semicristalinos, quanto maior o grau, mais elevada à resistência a tração, densidade, rigidez, estabilidade dimensional entre outros, o aspecto negativo está em diminuição da resistência ao impacto, resistência e alongamneto e ruptura, claridade ótica e contração. Essas definições são de grande importância nas conclusões finais desse trabalho.

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Atualmente o sistema de refrigeração de moldes de injeção por dutos em “U” e “Z” é amplamente utilizado na confecção dos moldes, devido à facilidade de sua aplicação e fabricação. Outros aspectos positivos desses sistemas são o baixo custo de construção, e a rapidez com que são fabricados, sendo que na Sulbras, aproximadamente 80% dos sistemas de refrigeração empregados são do tipo “U” e “Z”.

Em contrapartida, esse sistema de refrigeração tem uma eficiência menor, como já foi explicado anteriormente, pois ele tem uma reduzida área de troca térmica com o fluido refrigerante.

Essas áreas de trocas são localizadas em pontos específicos, o que ocasiona uma refrigeração não uniforme e com um tempo maior. Para peças de menor complexidade e de baixo volume de produção esses aspectos negativos não são impactantes para o processo, e por esse motivo esses sistemas “convencionais” ainda são os mais utilizados nos moldes de injeção.

No entanto, para moldes de maior complexidade, alto volume de produção, dentro de um mercado cada vez mais competitivo, onde uma redução de segundos no ciclo de injeção significa a lucratividade ou não do negócio, é necessário investir em tecnologias, que muitas vezes tem um custo elevado, sem a garantia do retorno desejado para a aplicação em um caso específico. Assim, surge a necessidade de se comprovar experimentalmente a eficiência ou não de uma dada tecnologia, para depois aplicá-la em maior escala dentro da necessidade da empresa.

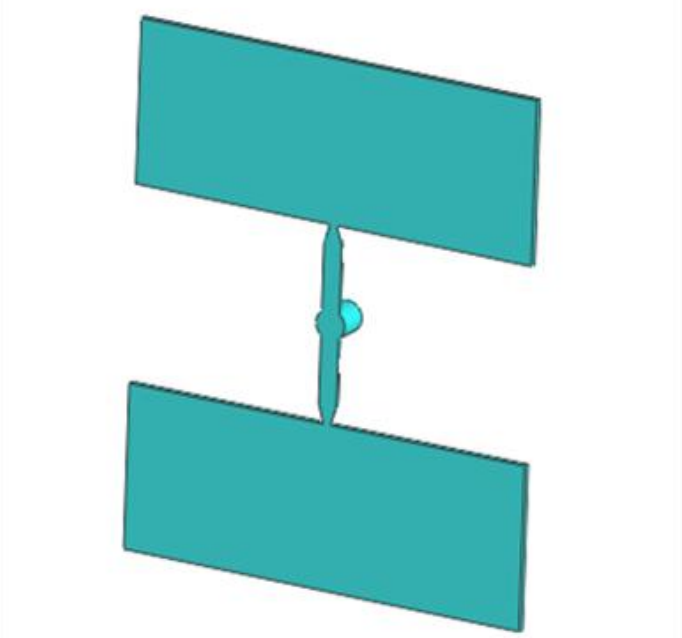
Baseado nisso, esse trabalho executou um teste experimental para comparar o sistema de refrigeração convencional com a tecnologia de refrigeração BFmold, e para isso foram definidos a seguir os parâmetros preliminares.

3.1.1 O produto

O produto protótipo para o desenvolvimento desse trabalho foi definido como uma placa plana com 140 x 60 mm de área e 2 mm de espessura. Foi adotado o conceito de placa plana devido à facilidade e o custo de fabricação do molde protótipo, além de ser o tipo de produto mais indicado para a aplicação da tecnologia BFmold.

O tamanho assim definido para se adequar ao molde de testes já existente, não sendo necessária a fabricação de todo o molde. A espessura de 2 mm foi escolhida, pois é a mais utilizada nos produtos com este material. A Figura 33 apresenta um esboço preliminar do produto objeto desse trabalho.

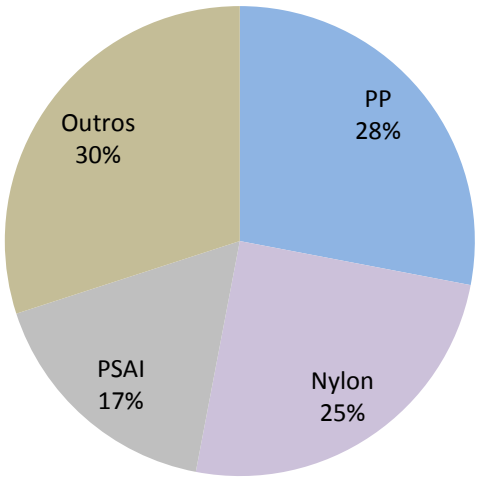
Figura 33 – Esboço preliminar do produto



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

O produto foi injetado em Polipropileno com 40% de talco (PPT40), pois como pode ser visto na Figura 34, é um dos polímeros mais consumidos pela Sulbras.

Figura 34 – Percentual de consumo de polímeros na Sulbras



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Além disso, os produtos injetados em polipropileno têm um tempo de resfriamento relativamente alto, devido aos “rechupes”, empenamentos e a baixa temperatura de desmoldagem provenientes desse tipo de material. A Tabela 6 mostra como o tempo de resfriamento é alto dentro dos moldes que injetam polipropileno dentro da Sulbras.

Tabela 6 – Exemplos de tempo de resfriamento para alguns produtos Sulbras.

Produto	Ciclo (seg)	Resf. (seg)	Resf. x Ciclo (%)	Espessura Média (mm)
Suporte motor	50	30	60	2,0
Base slim	74	50	67,6	2,5
Poltrona city	68	37	54,4	2,0
Caixa de ar	67	35	52,2	2,0
Carter Int.	55	23	41,8	2,3
Carter Ext.	54	23	42,6	2,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

3.1.2 O molde

O conceito molde foi desenvolvido sobre um molde já existente na empresa, a fim de se reduzir os custos e o tempo de fabricação, este é composto por duas cavidades geometricamente iguais nas dimensões de acordo com o produto definido anteriormente.

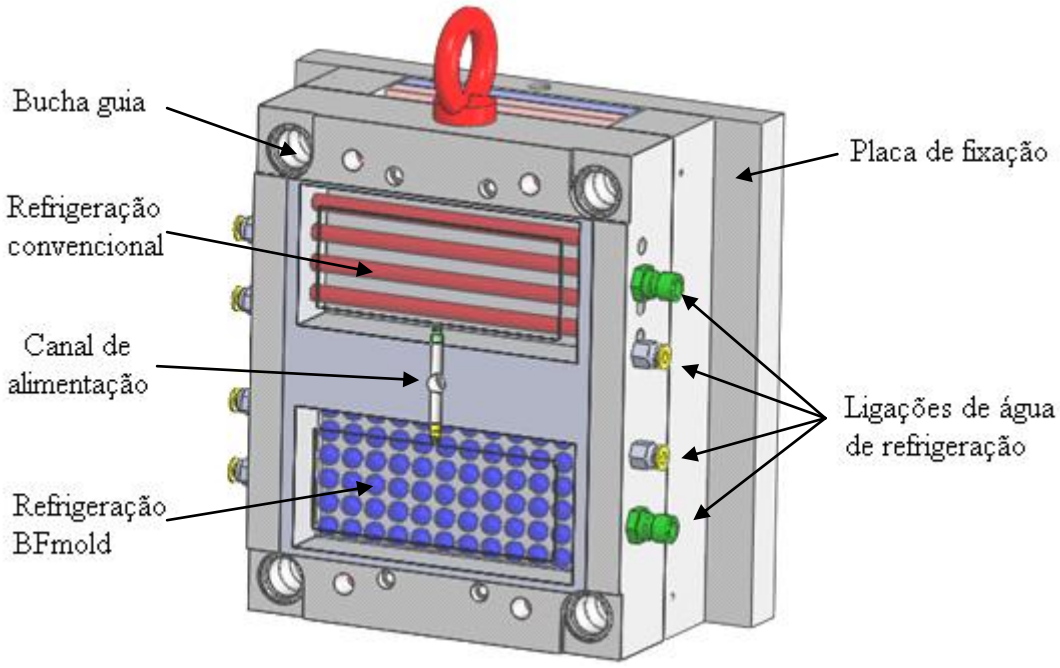
Umas das cavidades foi idealizada com os circuitos de refrigeração convencionais (em “U”) e a outra com a tecnologia de refrigeração BFmold.

O sistema de refrigeração convencional foi dimensionado de acordo com a metodologia mostrada no capítulo 2, já para o sistema BFmold, calculou-se pela teoria de trocador de placas paralelas, o qual se assemelha muito com o sistema construtivo e de troca de calor do BFmold.

O material para a construção do molde é o AISI 1045, devido a sua disponibilidade no mercado, custo baixo e de fácil usinagem, tendo em vista que o molde é protótipo de vida útil reduzida.

Preferiu-se utilizar os dois sistemas de refrigeração no molde a fim de eliminar variáveis do processo, como: temperatura da massa fundida, temperatura da água de refrigeração, temperatura da cavidade do molde, desgaste da máquina injetora, temperatura ambiente entre outras, assim pode-se avaliar somente a influência do sistema de refrigeração no processo de injeção. Na Figura 35 pode-se observar um esboço preliminar do molde protótipo.

Figura 35 – Esboço preliminar da refrigeração do molde protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

3.2 MÉTODO

Diante das considerações feitas, a proposta deste trabalho se resumiu ao dimensionamento, projeto, fabricação e teste de um molde experimental que contenha o sistema de refrigeração convencional assim como o sistema de refrigeração BFmold. O método de análise será um comparativo entre esses dois sistemas de refrigeração, para comprovar a eficiência desse sistema e justificar um possível investimento na aquisição dessa tecnologia. Esse comparativo será realizado qualitativamente e quantitativamente sobre amostras injetadas no molde com os dois sistemas de refrigeração.

3.2.1 Dimensionamento projeto e execução

Com o produto já definido nas características mostradas anteriormente, foi dimensionado o sistema de refrigeração convencional baseado na literatura apresentada no capítulo 2, onde $\dot{Q}_{PI}$ é o fluxo de calor cedido pela massa fundida durante o tempo em que a cavidade do molde permanece cheia e este é o ponto inicial para o desenvolvimento do balanço térmico. Para isso primeiramente é necessário calcular o tempo de residência do polímero no molde que é definido pela Equação 4.

$$\dot{t}_c = \frac{2^2 \cdot \ln((4/\pi) \cdot 9)}{\pi^2 \cdot 65} = 15{,}2\ s \tag{4}$$

Conhecido o tempo de residência do polímero no molde, pode-se estimar o $\dot{Q}_{PI}$ pela Equação (3), utilizando os valores de entalpia observados na curva específica do material (PP) no gráfico da Figura 22 de 620 kJ/kg para uma temperatura de injeção de 220ºC e 100 kJ/kg para uma temperatura de extração de 60º, foi utilizado os valores de entalpia para PP sem carga, o que representa a condição mais severa de processamento na questão térmica, pois com a adição da carga (talco), a energia por quilograma necessária para fundir o material diminui.

$$\dot{Q}_{PI} = \frac{0{,}0208 \cdot (620 - 100)}{15{,}2} = 712{,}337\ W \tag{3}$$

O fluxo de calor com o ambiente $\dot{Q}_{Amb}$ é a somatória das parcelas de transferência de calor por condução convecção e radiação que podem ser calculadas respectivamente pelas Equações 6, 7 e 8, sendo que as dimensões principais do molde foram definidas pelo molde protótipo já existente. Para temperatura ambiente foi definido 30ºC, por ser a temperatura média do pavilhão que contem as injetoras.

$$\dot{Q}_{cond} = (0{,}2 \cdot 0{,}25 \cdot 2) \cdot 100 \cdot\ (30 -\ 40) =\ -100\ W \tag{6}$$

$$\dot{Q}_{conv} = (0{,}2 \cdot 0{,}25 \cdot 4) \cdot 8 \cdot\ (30 -\ 40) =\ -16\ W \tag{7}$$

$$\dot{Q}_{rad} = (0{,}2 \cdot 0{,}25 \cdot 4) \cdot 0{,}25 \cdot 5{,}77 \cdot \left[\left(\frac{303{,}15}{100}\right)^4 - \left(\frac{313{,}15}{100}\right)^4\right] =\ -10{,}8\ W \tag{8}$$

Com esses valores de fluxo de calor conhecidos, o fluxo de calor para o ambiente $\dot{Q}_{Amb}$ pode ser definido pelo seu somatório como se pode observar na Equação 2:

$$\dot{Q}_{Amb} = -100\ + (-16) + (-10{,}8) =\ -126{,}8\ W \tag{2}$$

Com os valores de $\dot{Q}_{PI}$ e $\dot{Q}_{Amb}$ conhecidos pelo balanço térmico da Equação 9 é possível determinar o fluxo de calor removido pelo sistema de refrigeração $\dot{Q}_{TM}$, como cada cavidade será dimensionada separadamente, o fluxo de remoção de calor pelo ambiente será dividido igualmente entre elas.

$$\dot{Q}_{TM} = -712{,}337 - (-126{,}8 \div 2) = \ -648{,}98\ W \tag{9}$$

Isolando o fluxo de refrigerante $\dot{m}$ na Equação 10 se pode defini-lo em função do valor encontrado para $\dot{Q}_{TM}$ como pode ser observado na equação 11:

$$\dot{m} = \frac{(648{,}98/1000)}{4{,}186 \cdot 2} = 0{,}077\,\frac{kg}{s} = 4{,}61\ l/min \tag{11}$$

Pela Tabela 3 pode ser definido o diâmetro do duto de refrigeração com base no fluxo de refrigerante, para uma vazão de 4,61 l/min o diâmetro apropriado segundo a tabela é de 8,66 mm, onde foi utilizada uma broca comercial de 8,75 mm para furar os canais de refrigeração. Com os valores de vazão e diâmetro é possível calcular a velocidade de escoamento e consequentemente o número de Reynolds. Como pode se observar a seguir na Equação 12 o Re foi superior a 10000, valor citado no capítulo 2 como o mínimo ideal para sistemas de refrigeração de moldes de injeção.

$$Re = \frac{7{,}75 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}00875}{0{,}66 \cdot 10^{-6}} = 17090 \tag{12}$$

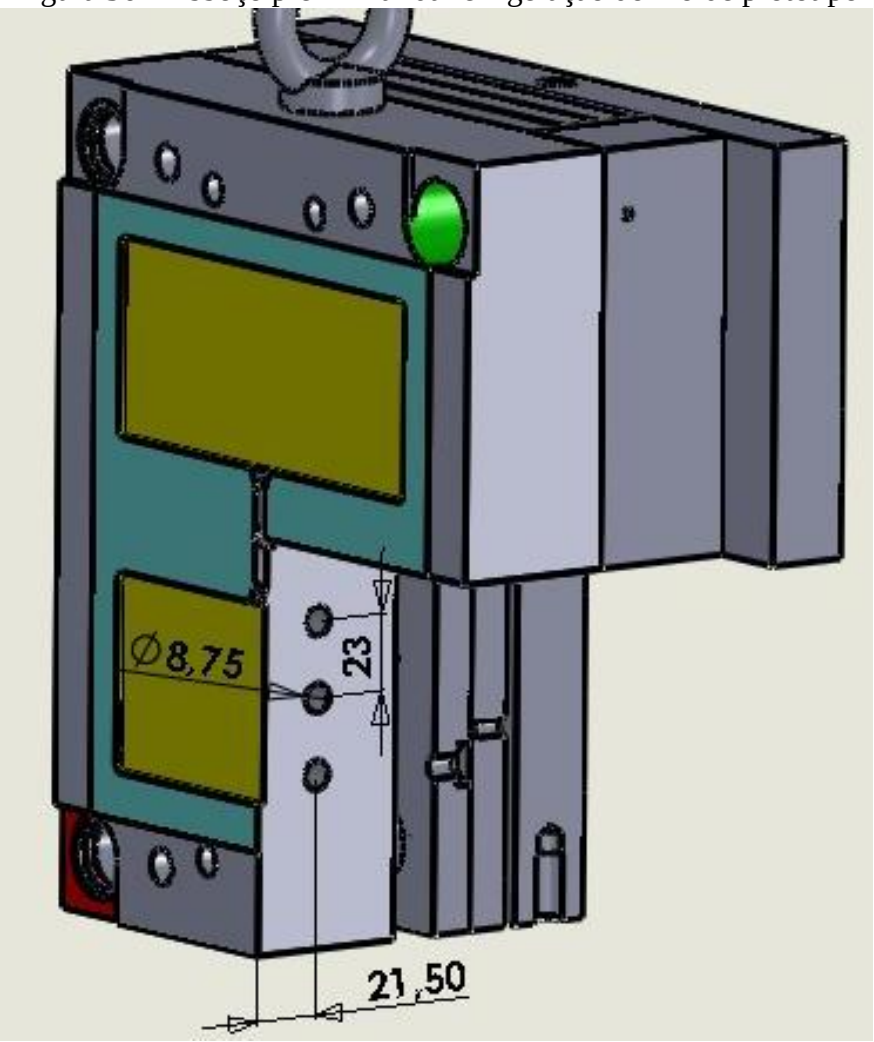
Verificado o número de Reynolds, determina-se a posição dos dutos de refrigeração a partir da Tabela 5, que para uma espessura a partir de 2 mm, tem uma distância A (entre os dutos e a superfície da cavidade) de 21 a 27 mm onde foi adotado o valor de 21,5 mm, e B (distância entre os dutos de refrigeração) a partir da mesma tabela pode ter um valor de 19 a 23 mm, onde foi adotado 23 mm por se adequar melhor a distribuição dos dutos no molde.

Conhecidos esses valores é possível determinar o comprimento mínimo dos dutos de refrigeração pela Equação 13.

$$L = \frac{2 \cdot |648{,}98| \cdot 0{,}0215}{49{,}8 \cdot \pi \cdot 0{,}00875 \cdot 20} = 1{,}02\ m \tag{13}$$

Com os valores acima calculados foi possível projetar a refrigeração para uma cavidade do molde do produto definido, onde foram projetados seis canais de refrigeração para a cavidade com sistema convencional, sendo três no lado fixo do molde e três no lado móvel, chegando a um comprimento total de 1,2 m de canais de refrigeração muito próximo dos 1,02 m calculados acima. Posteriormente esse sistema de refrigeração passou por uma análise *moldflow*® para verificar se foi corretamente dimensionado e atenderá a necessidade do produto protótipo.

Figura 36 – Esboço preliminar da refrigeração do molde protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Para o projeto do sistema de refrigeração BFmold utilizou-se o conceito de convecção forçada sobre uma placa plana, onde se tem uma grande área de contato entre o líquido refrigerante e o molde, assim promovendo uma melhor dissipação de calor. Após foi realizada uma verificação dos valores encontrados usando a teoria de escoamento em meios porosos, situação construtiva que se assemelha com a cavidade de refrigeração cheia de esferas proposta.

Para fins comparativos foi definido que o fluxo de refrigerante será o mesmo que o do sistema de refrigeração convencional (4,61 l/min) e a espessura entre a refrigeração e produto também será 21,5 mm para avaliar se com a mesma configuração de molde e disponibilidade de água o sistema BFmold é mais eficiente.

O tamanho da cavidade de refrigeração que contém as esferas é ligeiramente maior que a peça, tendo um tamanho de 152 x 72 mm e uma espessura de 8 mm; conforme foi verificado através das teorias de transferência de calor sobre placa plana e escoamento em meios porosos, além de ser um tamanho de esfera comercial de fácil acesso.

Na teoria de convecção forçada em um escoamento sobre placas planas, de acordo com Incropera et al. (2008), tem-se uma grande área de contato entre o líquido refrigerante e o molde, assim promovendo uma melhor dissipação de calor.

A equação de Newton determina o cálculo de transferência de calor por convecção. Essa Equação 18 pode ser observada a seguir:

$$q_{conv} = h_{conv} \cdot A \cdot (Tp - T) \tag{18}$$

Onde q_{conv} é o fluxo de calor por convecção (W), que é definido pelo $\dot{Q}_{TM}$ calculado anteriormente de 649 W, h_{conv} é o coeficiente convectivo (W/m² °C) que depende da geometria dos canais de refrigeração e do tipo de escoamento, *A* é a área de troca de calor (m²) que foi determinada acima de 0,0109 m², Tp é a temperatura da superfície em contato com o fluido (°C) e *T* a temperatura do fluido de refrigeração de 40°C.

A temperatura Tp pode ser definida por meio da transferência de calor por condução do polímero através da parede do molde através da Equação 19 a seguir:

$$q_{conv} = K_{aço} \cdot A \cdot \frac{(T_{inj} - T_p)}{L} \tag{19}$$

Definido a temperatura Tp é possível determinar o coeficiente de transferência de calor *h* deixando a Equação 18 em função de *h* como pode se ver na Equação 20:

$$h_{conv} = \frac{\dot{Q}_{TM}}{A \cdot (T_P - T)} = \frac{649}{0{,}0109 \cdot (207{,}15 - 40)} = 356\ Wm^2/K \tag{20}$$

Definido h_{conv} pode se ter uma estimativa da velocidade de escoamento mínima necessária para garantir a troca de calor desejada, essa correlação entre h_{conv} e a velocidade de escoamento se dá através do número de Reynolds, que por sua vez pode ser obtido a partir do número de Nusselt (Nu) que é uma grandeza bastante utilizada para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção, levando em conta a análise dimensional, a qual pode determinar parâmetros através de relações de similaridade.

Na Equação 21 pode se observar na equação que define o Nu em função de *h*:

$$Nu = \frac{h_{conv} \cdot L_c}{K_{agua}} \ (-) \tag{21}$$

Onde L_c é o comprimento característico que depende da geometria do duto e do tipo de escoamento, e K_{agua} é a condutividade térmica da água que de acordo com Incropera et al. (2008), é de 0,631 Wm/K (a 40°C).

Utilizando a teoria de escoamento sobre placa plana, tem-se como comprimento característico L_c o comprimento da mesma (152 mm), logo Nu é definido por:

$$Nu = \frac{356 \cdot 0{,}152 \cdot 2}{0{,}631} = 171{,}5 \tag{21}$$

Calculado Nusselt, pode-se definir Reynolds a partir da Equação 22 que define essa relação para escoamento turbulento sobre placa plana:

$$Nu = 0{,}0296 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3} \tag{22}$$

Onde Pr é o número de Prandtl, que controla a espessura da camada limite térmica, (De acordo com Incropera et al. (2008), é de 4,32 para água a 40°C). Assim, substituindo os valores na equação acima se tem:

$$171{,}5 = 0{,}0296 \cdot Re^{4/5} \cdot 4{,}32^{1/3} \ \therefore \ Re = 27500 \tag{22}$$

Com Re conhecido, foi identificado que o mesmo caracteriza um escoamento laminar para a placa plana, mas a turbulência do sistema é garantida justamente pela existência das esferas no interior da cavidade de refrigeração.

Parte-se do pressuposto em que o escoamento é naturalmente turbulento, assim pode-se conhecer a velocidade mínima necessária (V) para garantir a transferência de calor pela Equação 23 que relaciona o Re com a velocidade de escoamento:

$$Re = \frac{V \cdot Lc}{\upsilon} \tag{23}$$

Onde υ é a viscosidade cinemática do fluido (água a 40°C) que de acordo com Incropera et al. (2008), é de $6{,}58 \cdot 10^{-7}$m²/s e Lc o comprimento característico que já foi citado anteriormente. Substituindo esses valores na equação acima:

$$27500 = \frac{V \cdot 0{,}152 \cdot 2}{6{,}58 \cdot 10^{-7}} \therefore\ V = 0{,}06 m/s \tag{23}$$

Sabendo que a vazão disponível é de 4,6 l/min e a velocidade é 0,06 m/s foi possível determinar a área da seção transversal do duto de refrigeração, que deve ter no máximo 0,00128 m², como a largura já foi definida como 0,072 m a altura máxima do duto calculada foi de 0,017 m, ou seja, 17 mm.

Se esta altura for maior, a velocidade do fluido diminui e consequentemente o *h* é o coeficiente convectivo também e a transferência de calor pode não ser suficiente, já com dutos mais baixos (área menor) a velocidade aumenta o que melhora ainda mais a transferência de calor por convecção.

Com essas considerações foi então escolhido fabricar um duto de refrigeração com altura de 8 mm, pois assim foi possível garantir uma velocidade de escoamento maior e melhor transferência de calor.

Também foi escolhida essa altura pela facilidade de se obter comercialmente as esferas que vão preencher a cavidade, além do fato de que dutos muito altos tornam a fabricação mais demorada e tem maior custo.

Para avaliar a influência do uso de esferas no suporte mecânico no cálculo de refrigeração BFmold foi verificada a teoria de transferência de calor por convecção forçada em meios porosos, que segundo Bird, Stewart e Lightfoot (2002), tem um perfil de escoamento com velocidades mais altas próximo a parede e velocidades mais lentas no interior da corrente de fluido.

Ainda de acordo com os autores, o número de Reynolds para esse tipo de escoamento pode ser relacionado com o fator de Chilton Colburn (J_H), desenvolvido para relacionar diretamente coeficientes de transferência de calor, coeficientes de transferência de massa e fatores de atrito, como se pode observar na Equação 24:

$$J_H = 2{,}19 \cdot Re^{-2/3} + 0{,}78 \cdot Re^{-0{,}381} \tag{24}$$

Este por sua vez é relacionado com Nu e Re pela Equação 25:

$$J_H = \frac{Nu}{Re \cdot Pr^{1/3}} \tag{25}$$

O número de Nusselt, para escoamento em meios porosos, de acordo com o mesmo autor é definido pela Equação 26:

$$Nu = \frac{h_{conv} \cdot D_p}{k_{agua} \cdot (1-\epsilon) \cdot \psi} = \frac{356 \cdot 0{,}008}{0{,}631 \cdot (1-0{,}48) \cdot 1} = 8{,}68 \tag{26}$$

Sendo ϵ é o coeficiente de porosidade que corresponde ao volume de vazios sobre o volume total (0,48 para este caso), D_p o diâmetro da partícula (estimada em 8 mm) e ψ é o fator de forma para as partículas (1 para esferas).

Conhecido o Nu e igualando as Equações 24 e 25 se tem a Equação 27 onde se pode obter o número de Reynolds:

$$2{,}19 \cdot Re^{-\frac{2}{3}} + 0{,}78 \cdot Re^{-0{,}381} = \frac{Nu}{Re \cdot Pr^{\frac{1}{3}}} \therefore \ Re = 4{,}03 \tag{27}$$

Conhecido Re pode-se relacionar com a vazão mínima necessária (Q) para garantir a transferência de calor conforme a Equação 28 de Reynolds para escoamento em meios porosos:

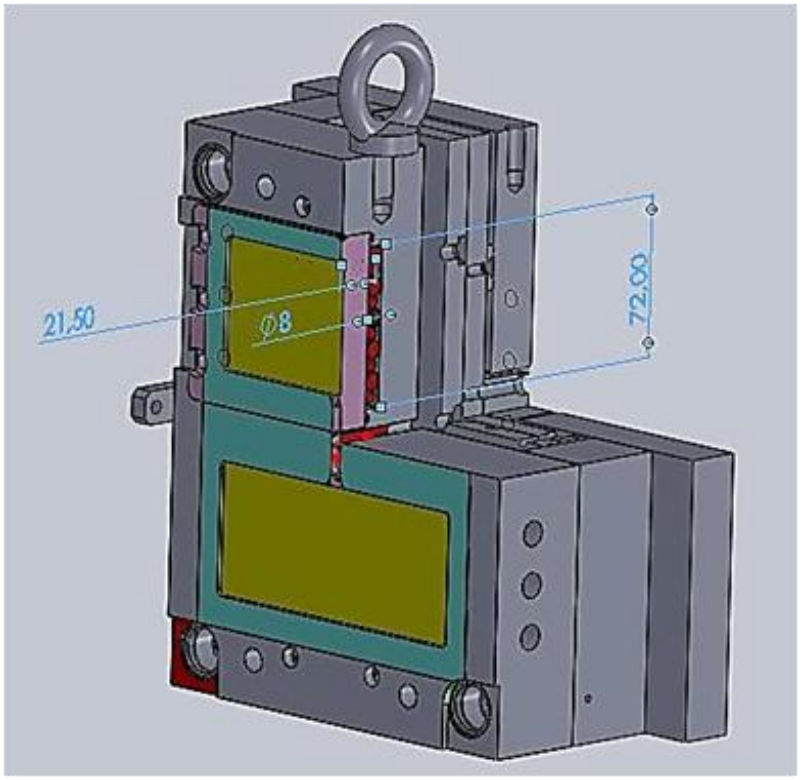
$$Re = \frac{6 \cdot Q}{a \cdot v \cdot \psi} \therefore 4{,}03 = \frac{6 \cdot Q}{0{,}78 \cdot 6{,}58 \cdot 10^{-7} \cdot 1} \therefore Q = 3{,}45 \cdot 10^{-7} m^3/seg \tag{28}$$

Assim pode-se verificar que a vazão mínima necessária foi de 0,02 litros por minuto, muito menor que a disponibilizada em máquina, logo está garantida e eficiência do sistema utilizando uma esfera de 8 mm.

Como não existe uma teoria para o escoamento e transferência de calor que represente fielmente o sistema de refrigeração proposto, o seu correto funcionamento foi garantido de acordo com as duas teorias que mais se aproximam do seu sistema construtivo.

Verificado que o diâmetro de esferas escolhido de 8 mm atende perfeitamente, e com certa folga, foi então projetado o sistema de refrigeração BFmold conforme segue a Figura 37.

Figura 37 – Esboço preliminar da refrigeração BFmold do molde protótipo



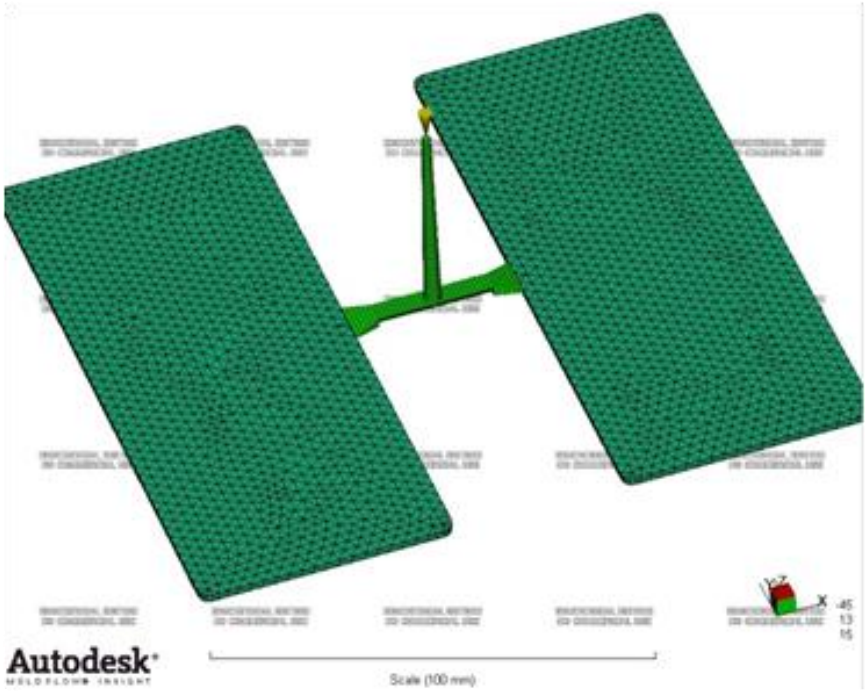
Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Dimensionado o sistema de refrigeração, foi então modelado o molde por completo, baseado em um molde de testes já existente na empresa e submetido esse modelamento a uma análise em *moldflow* para obter os parâmetros teóricos para o processo de injeção, assim como obter um resultado preliminar no que diz respeito ao sistema de refrigeração.

Essa análise completa pode ser observada no Anexo B.

Na Figura 38 pode-se observar a malha gerada pelo *moldflow* para análise do produto em questão.

Figura 38 – Malha gerada pelo *moldflow*



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Esses resultados demonstram que o sistema de refrigeração convencional se mostrou eficiente para o produto, comprovando a técnica de dimensionamento apresentada no capítulo 2 para o sistema de refrigeração convencional.

Com os resultados da simulação iniciou-se o processo de fabricação do molde, que foi feito internamente na Sulbras, com máquinas e recursos próprios, desde o dimensionamento, projeto, simulações, execução e teste.

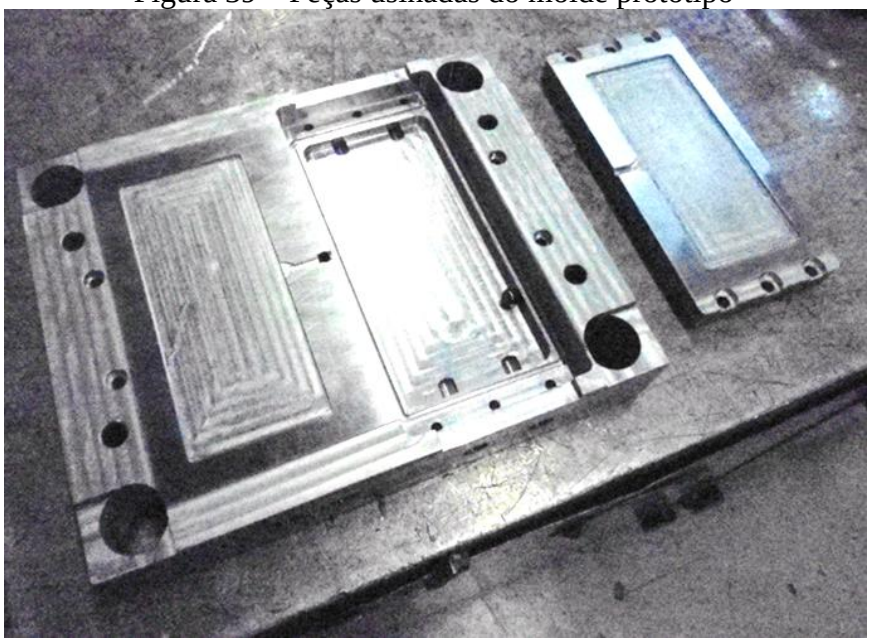
3.2.2 Fabricação do molde

A partir da finalização do projeto foi começado o processo construtivo do molde, que constituiu a usinagem dos componentes, montagem, ajustes e periféricos.

As peças usinadas foram feitas internamente na Sulbras, foi utilizado um centro de usinagem CNC para garantir a precisão dos componentes, onde foram necessárias aproximadamente 20 horas de usinagem com um custo de R$ 1.800,00.

Abaixo na Figura 39 pode-se observar o resultado final da usinagem da placa plana no lado móvel.

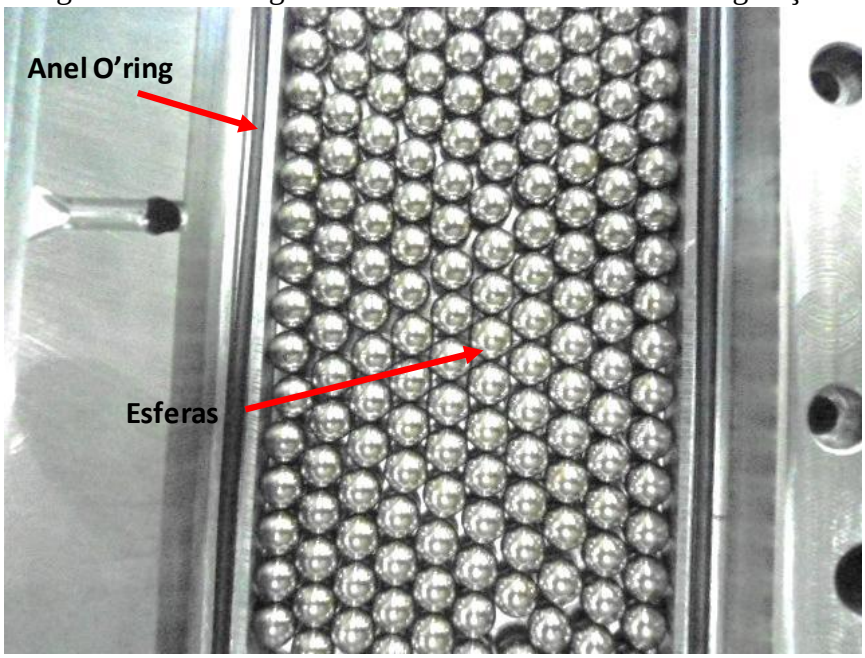
Figura 39 – Peças usinadas do molde protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

A partir disso foi iniciada a montagem do molde o que solicitou a aquisição de 350 esferas (de rolamento) no diâmetro de 8 mm as quais foram montadas dentro da cavidade de refrigeração, que por sua vez foi vedada com a ajuda de um *o'ring* como se pode ver na Figura 40.

Figura 40 – Montagem das esferas na cavidade de refrigeração



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Após foi feito o ajuste das placas do macho e cavidade que ficam acima do sistema BFmold, para melhor compreender essa montagem, visualiza-se a Figura 41.

Figura 41 – Partes constituintes do molde protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Com as placas ajustadas e montadas foi feita a montagem com o restante do molde protótipo já utilizado pela empresa o qual se observa na Figura 42.

Figura 42 – Montagem final do molde



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Com o molde montado foi repassado o fechamento com uma retífica, para garantir que o fechamento do molde seja igual nas duas cavidades.

Feito isso, foi iniciada a etapa de testes para obtenção de amostras para medição de temperatura e demais análises citadas anteriormente.

3.2.3 Teste experimental

O teste prático foi feito em uma injetora horizontal Milacron Fanuc 110 ton. provida de sistema de injeção elétrico, o qual garante alta repetitividade aos parâmetros do processo de injeção. O controle da temperatura da água de refrigeração foi feito pelo termorregulador Piovan pressurizado, o qual garantiu a vazão necessária calculada para os dois sistemas, e as peças retiradas em ciclo automático com ajuda de calha, tornando o ciclo automático e de maior estabilidade. Na Figura 43 pode-se observar a célula de injeção que foi utilizada durante os testes.

Figura 43 – Célula de injeção utilizada nos testes



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

O material polimérico utilizado foi o polipropileno TC136 com 40% de carga de talco, do fabricante Borealis, justificado pelo alto consumo desse material como foi comprovado anteriormente, tendo como características básicas:

a) densidade de 1240 kg/m³;
b) índice de fluidez de 7 g/10min;
c) temperatura da massa de 200 a 240°C;
d) temperatura do molde de 20 a 40 ºC.

No Anexo A pode-se observar a folha de dados completa do material.

3.2.4 Avaliação do teste

Na primeira etapa do teste, os parâmetros de injeção foram definidos de acordo com os dados obtidos por meio de simulação computacional, os demais parâmetros foram estabelecidos de acordo com a necessidade do processo e ajustes pertinentes no ato da injeção. Com a máquina já em "produção" após vários ciclos de injeção e com o processo estável, foram injetados 60 ciclos, onde foram retiradas cinco coletas sempre na injetada de final 0, ou seja, a cada 10 peças.

Nessas amostras foram feitas a medições da temperatura da peça de cada cavidade assim que foi extraída do molde. Dessa forma, foi possível estipular um valor médio de temperatura. Essa medição foi feita com o auxílio de câmera termográfica FLIR modelo E40. A diferença de temperatura entre as cavidades assim como a distribuição da temperatura na superfície das peças já são suficientes para uma avaliação inicial. Na Figura 44 pode-se observar um exemplo de medição de temperatura e a câmera termográfica utilizada.

Figura 44 – Exemplo de medição e câmera termográfica



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Após foi reduzido o tempo de resfriamento até que a temperatura da cavidade com o ciclo de refrigeração convencional fosse igual à temperatura de desmoldagem característica desse material (55°C para peças técnicas), o mesmo foi feito com a cavidade sistema de refrigeração BFmold e com esses valores de tempo de ciclo foi possível estimar o ganho percentual em produtividade desse tipo de tecnologia de refrigeração.

As peças provenientes desses testes passaram por avaliações posteriores, tanto dimensionais, que foi feita com paquímetro a fim de avaliar a influência no percentual de contração, como avaliações geométricas com a medição da planicidade das peças através de

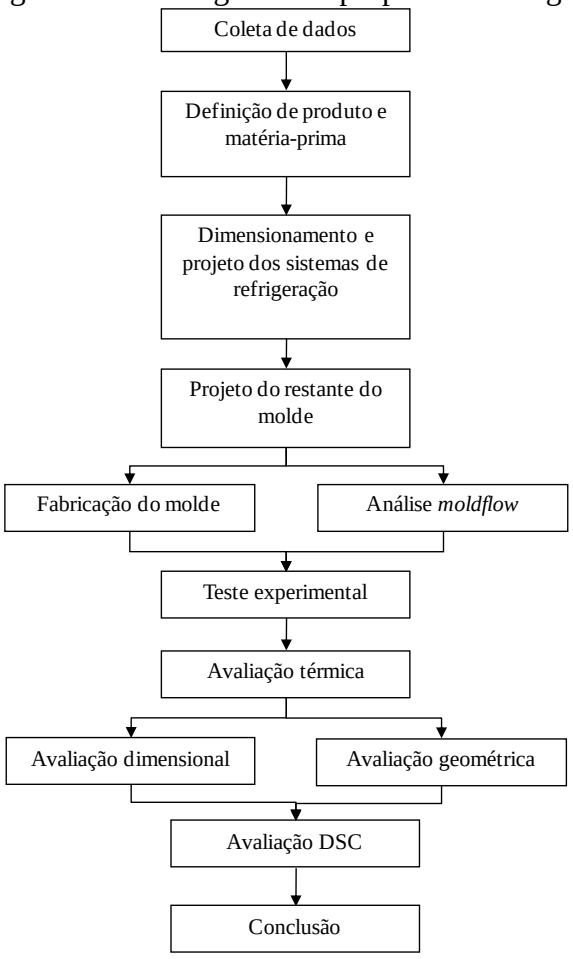
máquina de medição tridimensional Mitutoyo. Foi também avaliado o grau de cristalinidade das peças provenientes do teste através do ensaio DSC disponibilizado pela Universidade de Caxias do Sul.

Com base nesses dados e avaliações foi então possível concluir qual a eficiência da tecnologia de refrigeração BFmold quando comparada a refrigeração convencional por circuitos perfurados na cavidade. Foi possível também identificar a sua influência no produto final e os ganhos com esse processo.

3.2.5 Fluxograma de trabalho

Para entender melhor os passos que foram realizados, tem-se a Figura 45 que representa o fluxograma da proposta para esse trabalho.

Figura 45 – Fluxograma de proposta de estágio



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

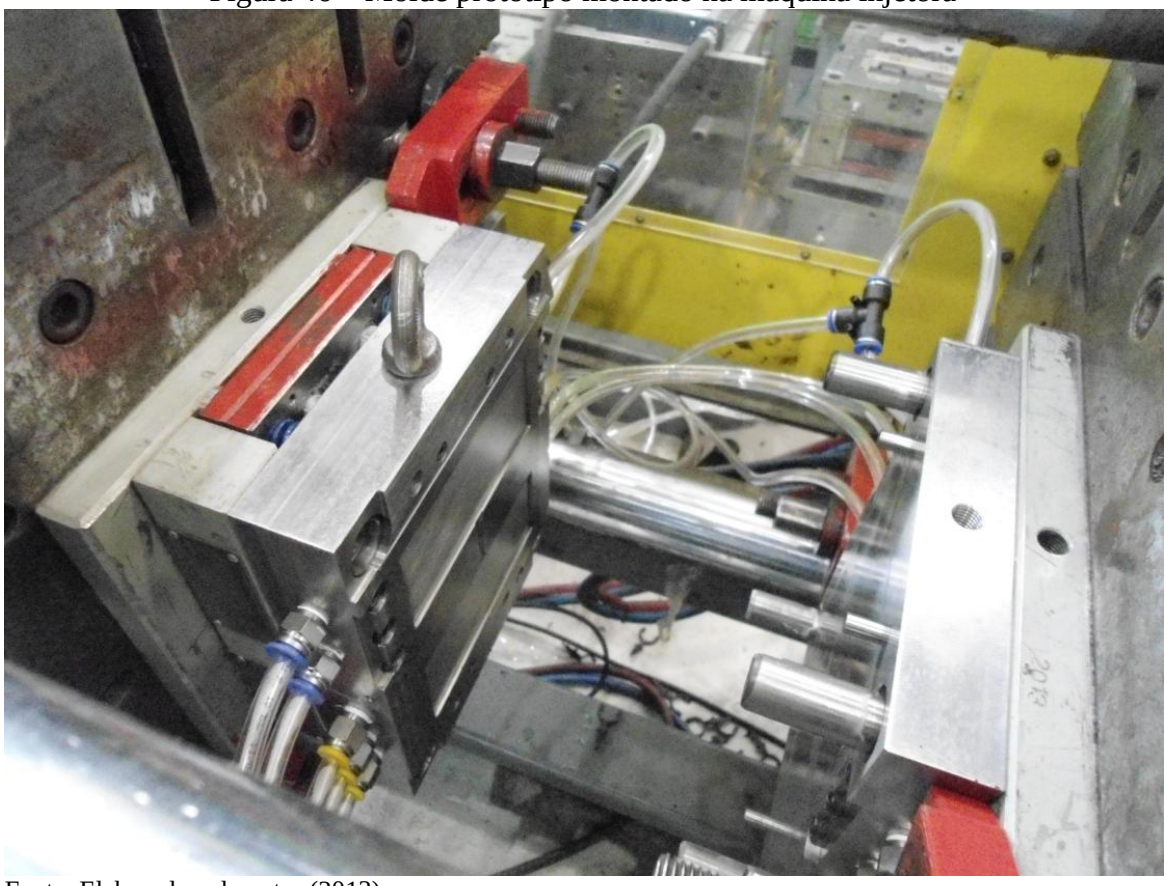
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os detalhes do teste dos equipamentos e recursos utilizados, o processo de obtenção de amostras, resultados obtidos, assim como sua análise e posterior conclusão.

4.1 PREPARAÇÃO PARA COLETA DE AMOSTRAS

Com base nos dados preliminares acima descritos, foi então realizado o teste prático a fim de se obter amostras que comprovem o que foi dimensionado anteriormente. O molde e seus periféricos foram instalados na injetora selecionada e apresentada anteriormente, e o ajuste dos parâmetros de injeção foi iniciado. Os parâmetros iniciais de processo foram determinados a partir da simulação *moldflow*® e replicados na máquina injetora. Na Figura 46 pode-se ver uma imagem do molde montado na máquina injetora.

Figura 46 – Molde protótipo montado na máquina injetora



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

A temperatura da água de refrigeração foi programada do termorregulador Piovan com a temperatura pré-estabelecida de 40°C conforme a Figura 47.

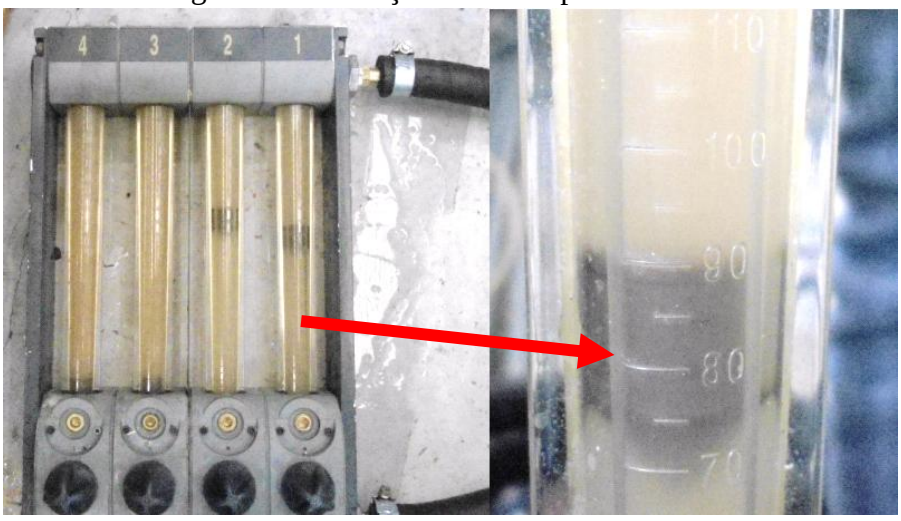
Figura 47 – Termorregulador da água de refrigeração



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

A vazão de líquido refrigerante de 4,61 l/min foi regulada e garantida a partir de rotâmetros instalados na própria injetora conforme demonstra a Figura 48, onde a escala máxima do rotâmetro é 200 e corresponde a 10 l/min. Sendo assim, com uma escala de 92 tem-se aproximadamente 4,6 l/min.

Figura 48 – Medição de vazão por rotâmetro



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Com esses parâmetros garantidos foram então ajustados os demais parâmetros de injeção a fim de se obter um processo estável onde seja possível obter peças perfeitas livres de falhas e imperfeições, possibilitando o processo de comparação entre elas. Na Figura 49 observa-se a peça na sua condição ideal de processo de injeção.

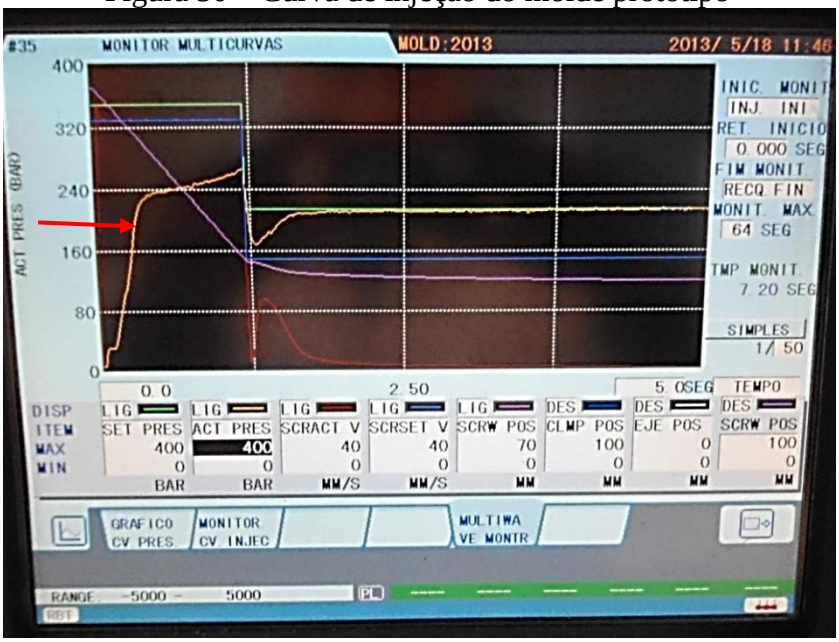
Figura 49 – Peça protótipo na condição final de injeção



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Este processo adequado ao produto pode ser observado através da curva de injeção (laranja) mostradas na Figura 50.

Figura 50 – Curva de injeção do molde protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

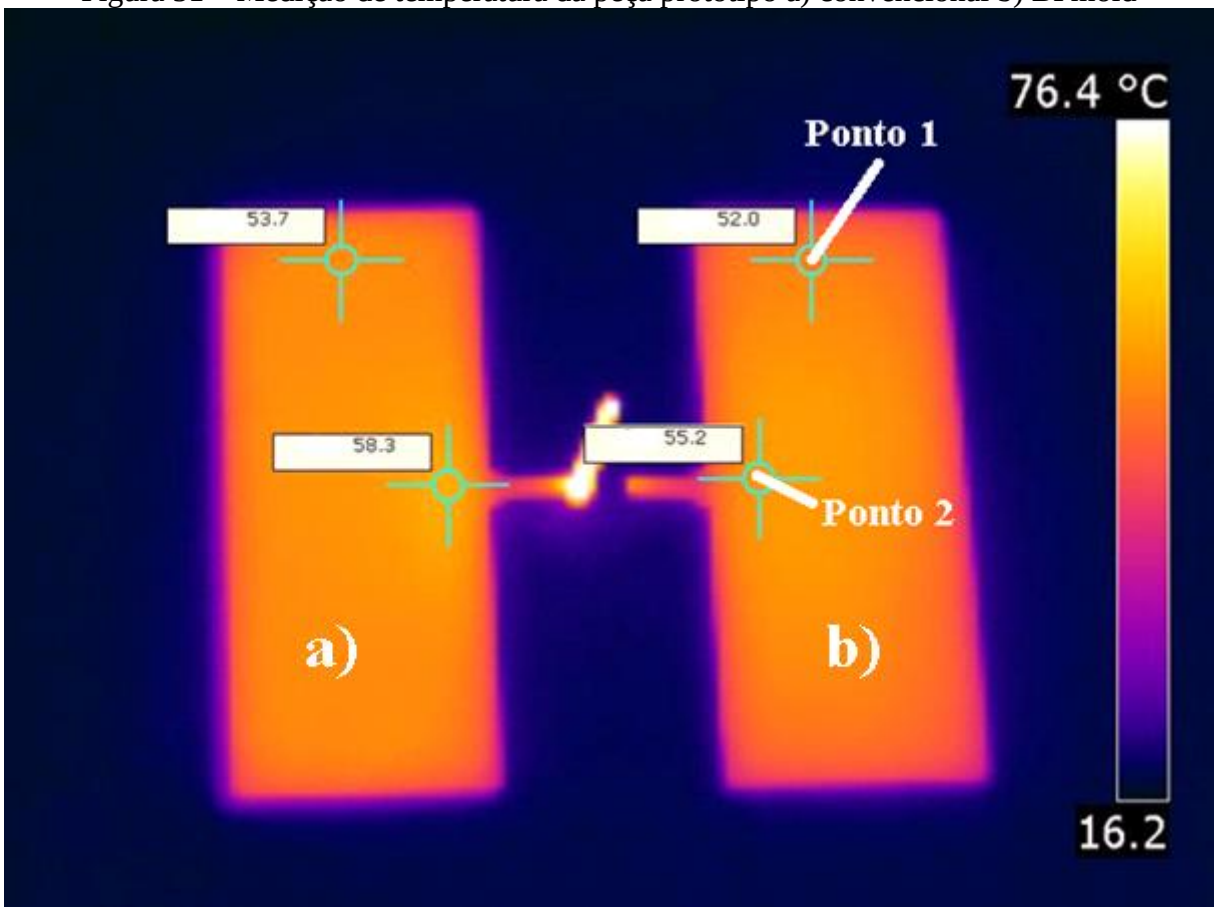
Assim, com peças na condição ideal foram coletados os demais dados de saída do processo o qual se pode observar a seguir:

a) pico de pressão de injeção 270 bar;
b) tempo de injeção 1,208 seg.;
c) pressão de recalque 215 bar;
d) tempo de recalque 6 seg.;
e) tempo de dosagem 5 seg.;
f) tempo de ciclo 19 seg.,

4.2 RESULTADOS

Feito isso, foi então iniciado a contagem para a coleta das amostras como foi explicado no capítulo três, e logo após a retirada da máquina, foram feitas as medições de temperatura das amostras com a câmera termográfica. Para tal, foram definidos dois pontos estratégicos para essa medição que pode ser observado na Figura 51.

Figura 51 – Medição de temperatura da peça protótipo a) convencional b) BFmold



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Feitas as medições com a câmera termográfica os dados foram montados na Tabela 7 abaixo, onde foi possível então verificar o comparativo entra as amostras.

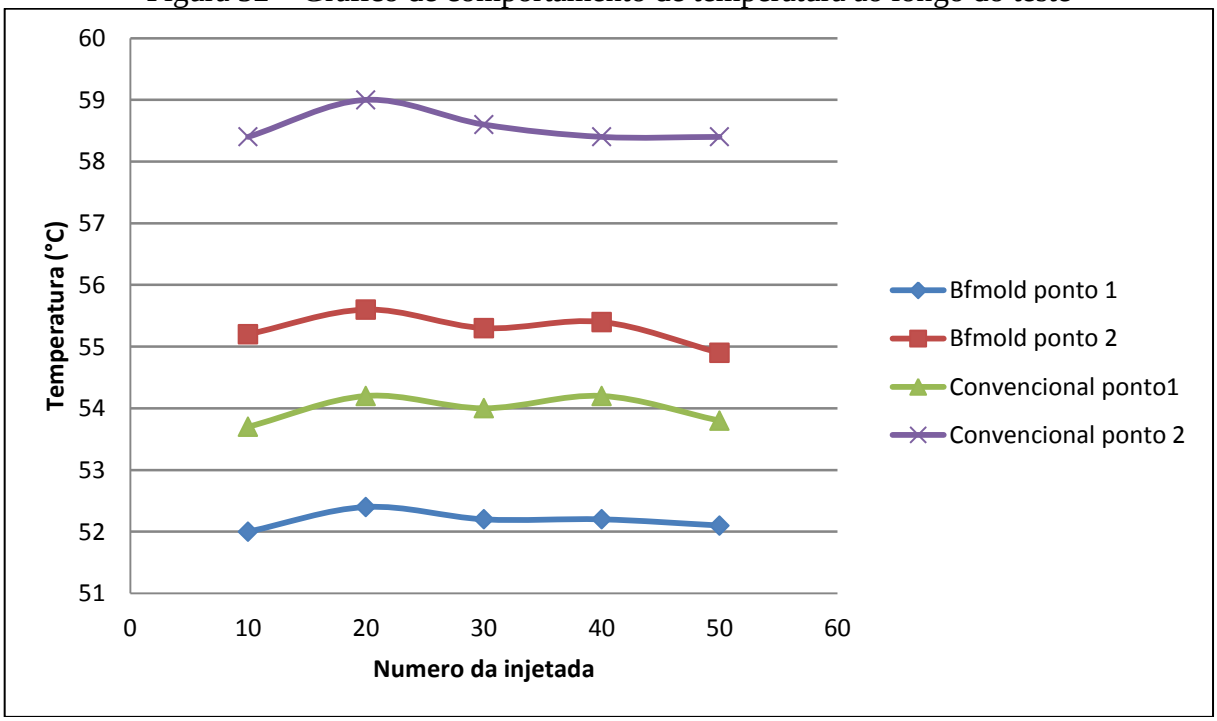
Tabela 7 – Temperatura de extração da peça protótipo

Amostra	Temp. (°C) BFmold ponto 1	Temp. (°C) BFmold ponto 2	Temp. (°C) Conv. ponto 1	Temp. (°C) Conv. ponto 2	Temp. (°C) Moldflow ponto 1	Temp. (°C) Moldflow Ponto 2
10	52	55,2	53,7	58,4	51,0	53,07
20	52,4	55,6	54,2	59	51,0	53,07
30	52,2	55,3	54	58,6	51,0	53,07
40	52,2	55,4	54,2	58,4	51,0	53,07
50	52,1	54,9	53,8	58,4	51,0	53,07
Média	52,36	55,28	53,98	58,56	51,0	53,07

Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Observou-se, preliminarmente, que o sistema BFmold propiciava um resfriamento maior (em média 2°C) em relação ao sistema convencional. A partir desses dados foi então montado o gráfico de temperaturas ao longo do tempo conforme Figura 52 a seguir.

Figura 52 – Gráfico de comportamento de temperatura ao longo do teste



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

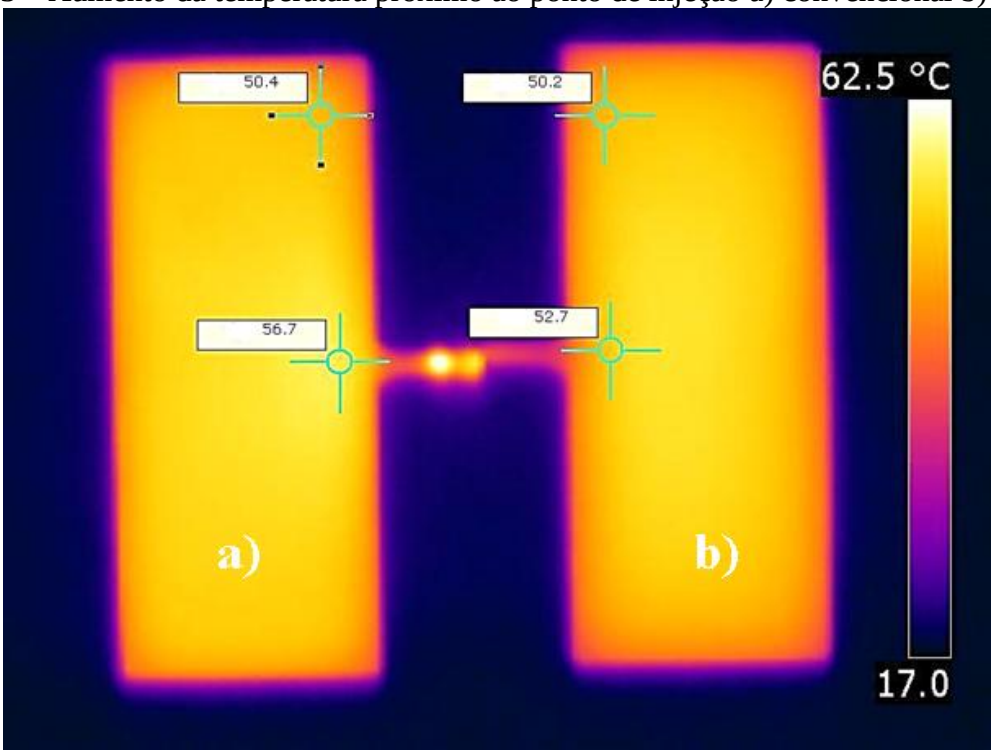
Pode-se concluir que os dois sistemas não apresentaram aumento de temperatura no produto ao longo do tempo, o que comprova que o sistema de refrigeração foi corretamente dimensionado.

O tempo entre a extração do produto e a medição da temperatura foi de aprox. 2 seg. sendo esse processo manual, pode ter causado uma pequena flutuação na curva na amostra 20 como pode ser observado na Figura 52.

Foi possível observar pela Tabela 7 que o sistema BFmold tem uma distribuição mais uniforme de temperatura onde a diferença de temperatura entre a região do canal de injeção e a extremidade do produto é menor se comparado ao sistema de refrigeração convencional, o que comprova a bibliografia.

Enquanto na refrigeração convencional existe uma dificuldade em remover o calor próximo ao ponto de injeção à peça com o sistema BFmold tem uma temperatura distribuída de forma mais uniforme ao longo da peça, isso pode ser comprovado pela Figura 53, onde é possível observar essa diferença de temperatura.

Figura 53 – Aumento da temperatura próximo ao ponto de injeção a) convencional b) BFmold



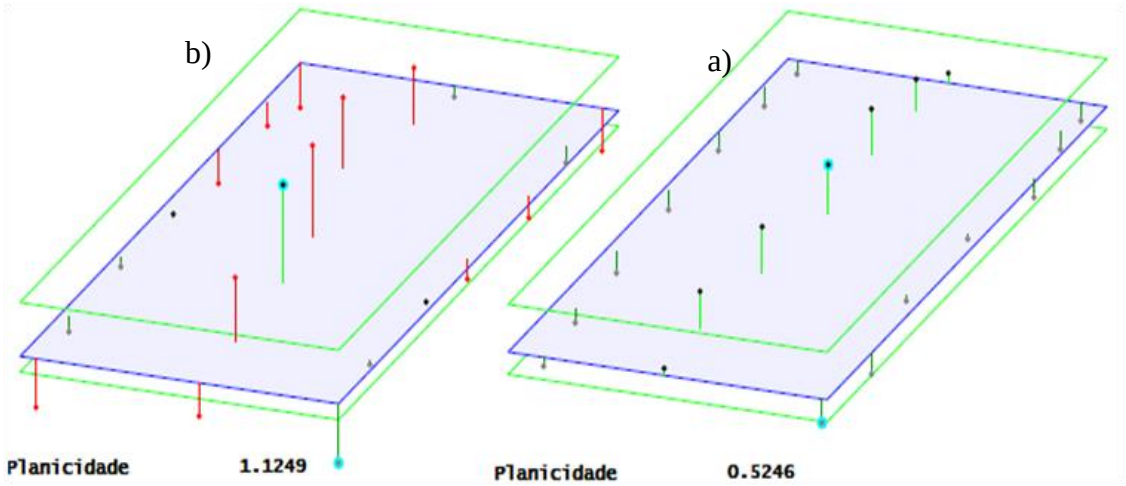
Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Essa diferença reflete diretamente no empenamento do produto, o que pode ser observado logo após a injeção, onde o sistema convencional teve um empenamento alto e o sistema por cavidade de esferas teve peças bem mais planas. A região próxima ao canal de injeção com maior temperatura tende a contrair de forma diferente que o restante do produto causando assim o empenamento do mesmo.

Para comprovar esse ganho em qualidade do produto, as peças foram encaminhadas para medição de planicidade em uma máquina tridimensional, que gerou um plano formado

por 21 pontos sobre a superfície da peça. Na Figura 54 pode-se observar o relatório de medição de uma das injetadas contendo os dois sistemas de refrigeração:

Figura 54 – Relatório de medição planicidade a) convencional b) BFmold



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

As demais amostras também foram dimensionadas usando a mesma metodologia, os resultados podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultado de medição de planicidade (mm)

Amostra	**Convencional**	**BFmold**	***Moldflow***
10	1,125	0,524	0,90
20	1,154	0,554	0,90
30	1,071	0,492	0,90
40	1,125	0,509	0,90
50	1,210	0,531	0,90
Média	1,137	0,522	0,90

Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Assim foi possível comprovar o ganho em qualidade do produto devido à tecnologia de refrigeração BFmold. Este parâmetro por si só já justifica um possível investimento em tal tecnologia, pois a característica de planicidade é difícil de se obter em peças moldadas por injeção. Posteriormente foi feita uma avaliação dimensional do percentual de contração, feita através de paquímetro convencional, tomando como medida base o comprimento máximo do produto de 140 mm.

Devido à peça sair mais fria do molde no sistema de refrigeração BFmold a contração posterior é reduzida, em termos de processo, este também é um resultado positivo, pois a contração posterior (que acontece fora do molde) ocorre de forma livre sendo passível

de deformações e tensões no produto enquanto a contração dentro do molde ocorre de forma mais controlada.

Isso pode ser comprovado observando a Tabela 9, que mostra a medida lida e o percentual de contração calculado.

Tabela 9 – Percentual de contração para o comprimento máximo do produto

Amostra	BFmold Dimensional (mm)	BFmold Contração (%)	Conv. Dimensional (mm)	Conv. Contração (%)
10	138,75	0,89	138,54	1,04
20	138,77	0,88	138,54	1,04
30	138,80	0,86	138,53	1,05
40	138,79	0,86	138,54	1,04
50	138,80	0,86	138,59	1,01
Média	138,78	0,87	138,54	1,04

Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Como forma de dimensionar o ganho em termos de ciclo, foi variado o tempo de resfriamento, partindo do ponto em que a cavidade convencional estivesse na temperatura de desmoldagem, enquanto a temperatura da cavidade com sistema de refrigeração BFmold estava mais fria. Assim foi reduzido o tempo de resfriamento para que esta cavidade chegasse à temperatura de extração, podendo dimensionar o ganho em segundos que é mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Tempo de resfriamento x temperatura

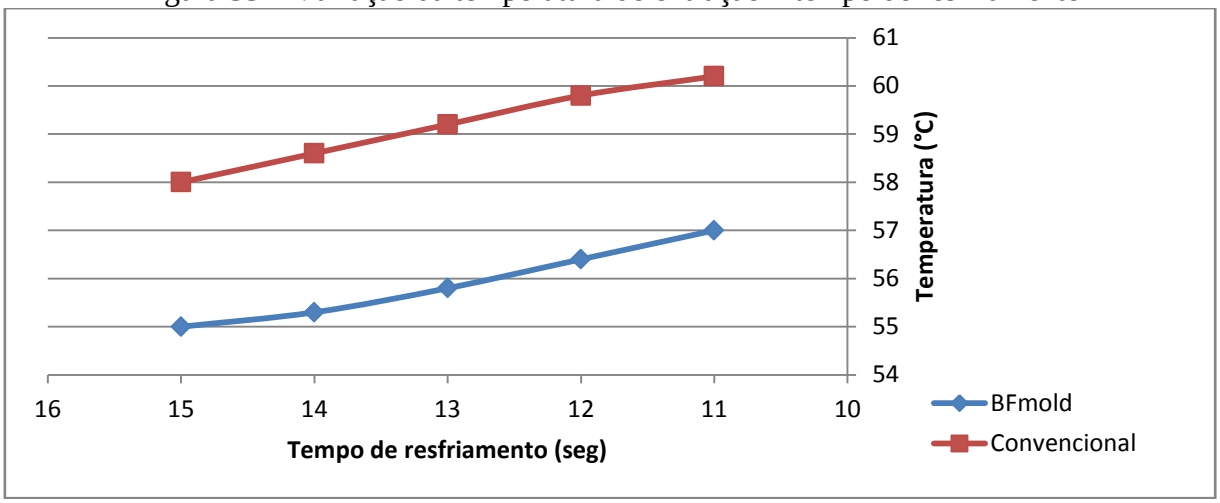
Tempo de Resfriamento (seg)	Temperatura BFmold (°C)	Temperatura Convencional (°C)
15	55	58
14,5	55,3	58,6
14	55,8	59,2
13,5	56,4	59,8
13	57	60,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Foi identificado um ganho no tempo de resfriamento de 3 segundos, que equivale a 20% do tempo de resfriamento total. No ciclo total esse ganho foi de 15,8% o que é um ganho considerável, pois em um dia de produção tem-se um ganho de aproximadamente 850 peças.

Na Figura 55 observa-se o comportamento da temperatura da peça com a variação do tempo de resfriamento.

Figura 55 – Variação da temperatura de extração x tempo de resfriamento



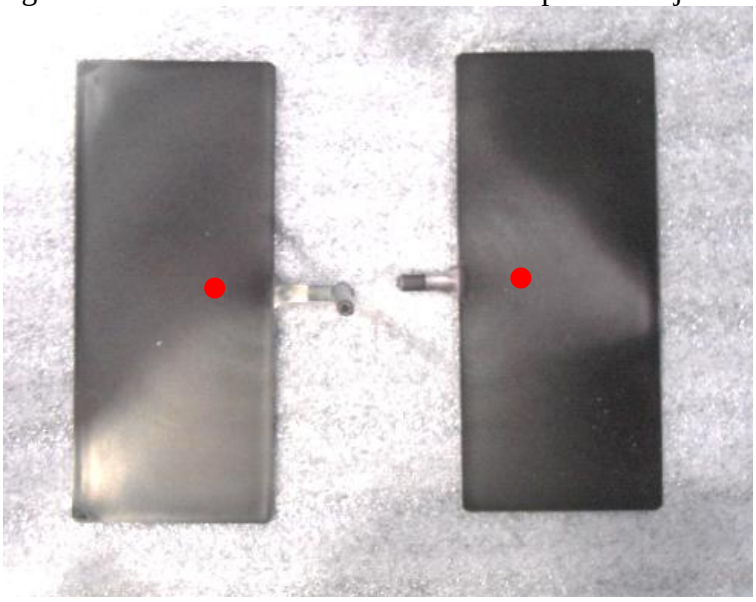
Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

4.3 ANÁLISE DSC

Foi selecionada a injetada de numero 30 para a análise DSC, a qual foi retirada uma amostra de 10 mg, na região próxima ao ponto de injeção, ponto em que houve maior diferença de temperatura conforme as medições realizadas.

A seguir na Figura 56 é apontado o local de retirada da amostra no produto injetado.

Figura 56 – Local de coleta da amostra no produto injetado.

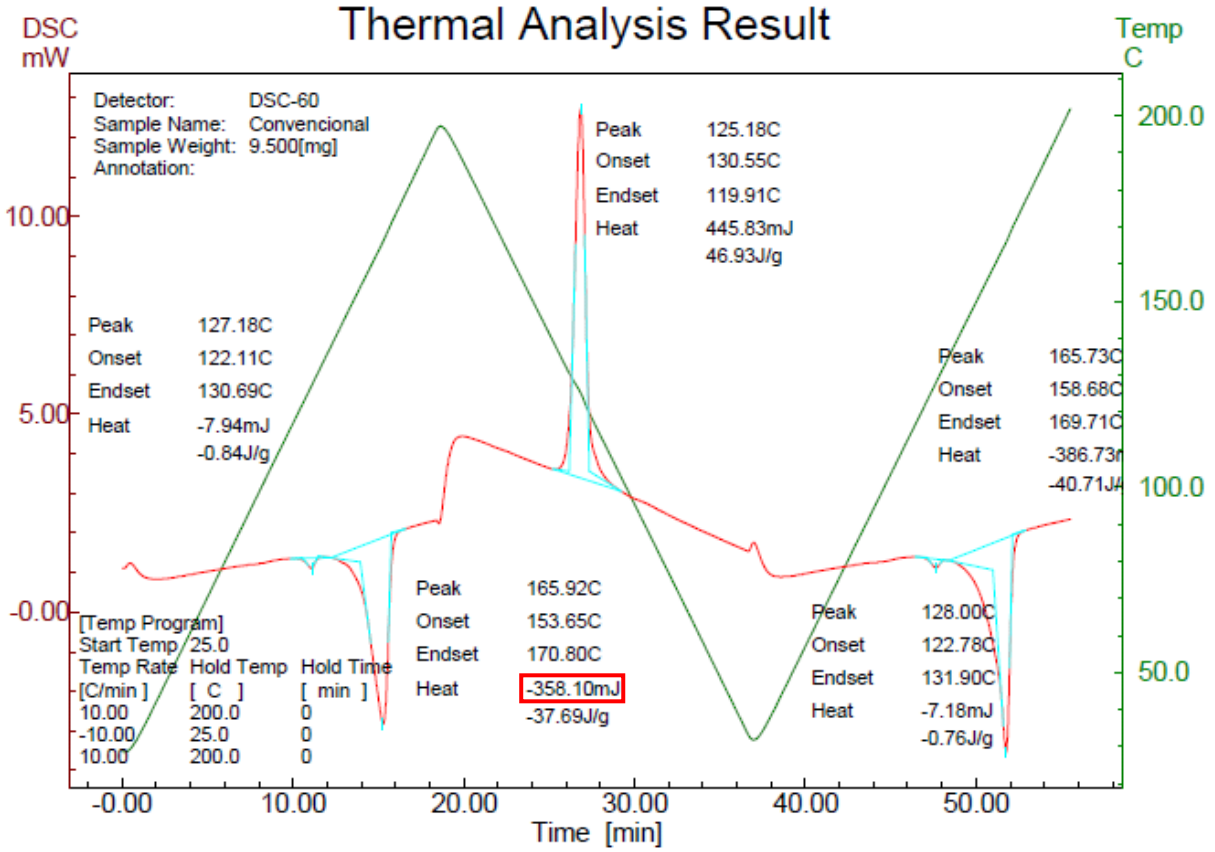


Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

A seguir serão apresentadas as imagens correspondentes aos termogramas DSC realizados com o material injetado nesse trabalho, para fim de comparação será considerada somente a primeira corrida térmica para determinação do grau de cristalinidade.

A seguir na Figura 57 pode-se observar o termograma da amostra injetada com sistema de refrigeração convencional.

Figura 57 – Termograma DSC para amostra com refrigeração convencional



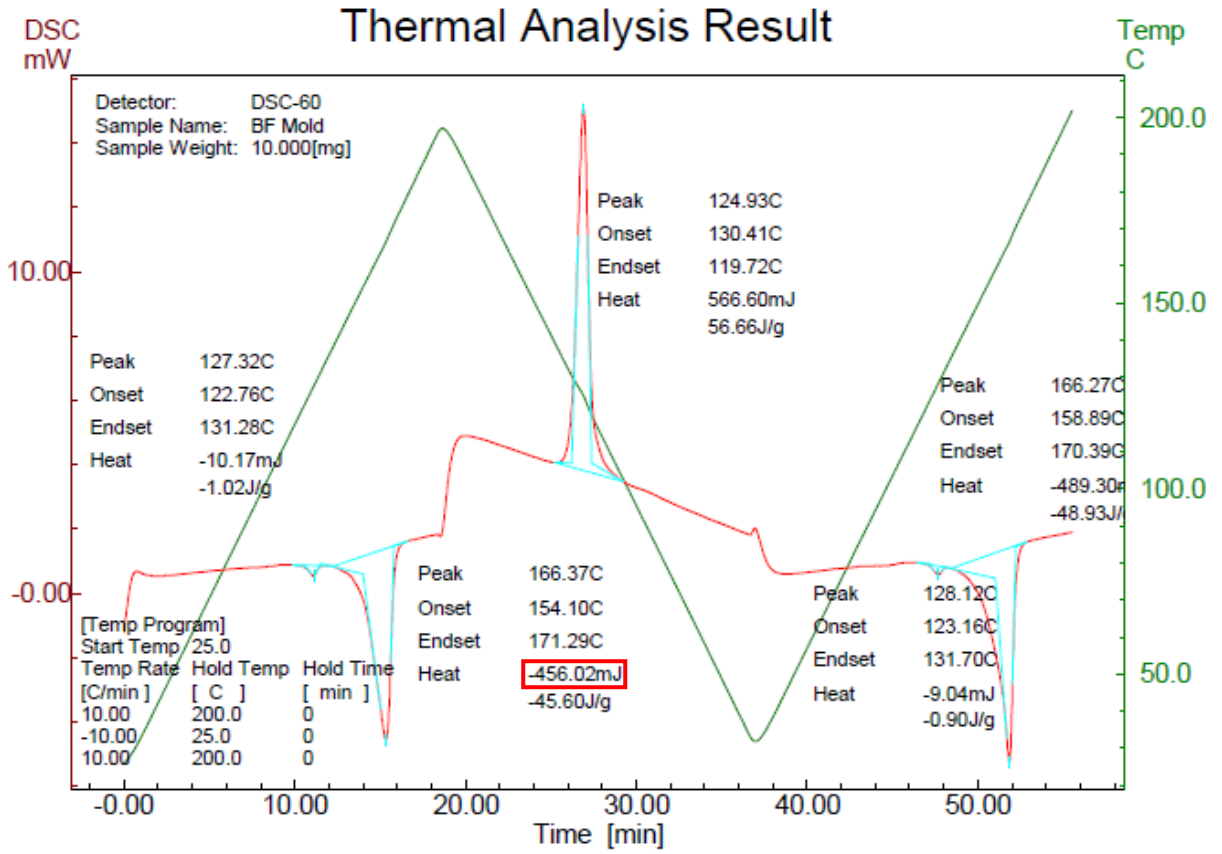
Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Observando a figura acima se observa um calor de fusão de 358,1 mJ para o pico referente a primeira corrida de fusão do amostra, dividindo este valor por 6 mg (quantidade de polipropileno puro em uma amostra de 10 mg de PPT40) temos um valor de calor de fusão corrigido de 59,68 J/g.

Quando comparado este valor aos 209 J/g de um polipropileno hipoteticamente 100% cristalino nos dá um grau de cristalinidade de 28,55%.

A mesma avaliação pode ser feita na Figura 58 que mostra o termograma DSC para a amostra injetada com o sistema de refrigeração BFmold.

Figura 58 – Termograma DSC para amostra com refrigeração BFmold



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Para essa amostra o calor de fusão foi 456,2 mJ, fazendo a mesma correlação utilizada para amostra com refrigeração convencional chegamos a um calor de fusão corrigido de 76,0 J/g que comparado ao valor padrão citado acima nos retorna um grau de cristalinidade de 36,4%, que é 7,85% maior do que as amostras injetadas com o sistema de refrigeração convencional.

Através desses dados apresentados pode-se observar que o sistema de refrigeração por cavidade de esferas promoveu um aumento na cristalinidade do polímero injetado. Esse aumento se deve ao resfriamento mais uniforme promovido por esse sistema de refrigeração, que reduz a diferença de temperatura entre diferentes regiões do produto.

Esse aumento da cristalinidade reflete diretamente sobre as propriedades mecânicas do polímero, assim como na geometria, pois o polímero com suas cadeias mais organizadas reduz a deformação pós processamento, isso pode ser verificado com a medição de planicidade apresentada anteriormente, onde as peças injetadas com o sistema de refrigeração BFmold apresentaram melhor planicidade.

5 CONCLUSÃO

Baseado nos resultados apresentados, conclui-se que o sistema de refrigeração de molde de injeção por cavidade de esferas traz muitos benefícios ao processo. O ganho em temperatura de extração foi considerável, e garantiu um tempo de ciclo de aproximadamente 15% menor, o que é um grande avanço levando em conta que para esse estudo foi feito correto dimensionamento do ciclo de refrigeração convencional, que se mostrou eficiente dentro dos parâmetros calculados.

Esse ganho por si só pode definir o desempenho econômico do molde de injeção, pois reduz o custo operacional por peça, podendo ser um fator decisivo em um mercado cada vez mais competitivo.

Outro ponto a ser observado é a diferença no percentual de contração, onde a peça que possuía o sistema de refrigeração posterior teve um percentual de contração menor (aproximadamente 0,9%) em relação à peça com refrigeração convencional (aproximadamente 1,05%), isso pode ser atribuído ao fato de a peça com refrigeração por cavidade de esferas sair mais fria do molde, reduzindo sua contração posterior.

Na avaliação DSC foi observado um aumento no grau de cristalinidade de 7,88% sendo de 28,55% para a amostra injetada com sistema de refrigeração convencional contra 36,4% para a amostra injetada com o sistema de refrigeração de cavidade de esferas, esse aumento na cristalinidade refletiu em um ganho na característica geométrica do produto.

E este foi o ganho mais importante encontrado nas análises feitas, a qualidade geométrica da peça. O sistema de refrigeração apresentado possui um sistema construtivo que propicia uma refrigeração mais homogênea, enquanto a peça com sistema de refrigeração convencional apresentava uma região mais quente próximo ao canal de injeção. Essa diferença de temperatura na peça causa uma contração diferente em determinadas regiões do produto causando uma deformação por empenamento.

Essa deformação foi determinada através da medição de planicidade da peça, onde os resultados encontrados foram de aproximadamente 0,52 mm para a peça com refrigeração BFmold contra aproximadamente 1,12 mm da peça com refrigeração convencional. Essa melhoria é de grande importância, pois é difícil reduzir empenamentos no processo de injeção.

Comparando os resultados obtidos com a simulação no *moldflow®,* foi observado que os valores encontrados no teste prático refletem com uma boa precisão o que o simulado, tendo em vista a comparação de deflexão máxima e temperatura de extração.

Com tudo isso se pode concluir que o sistema de refrigeração BFmold é uma ótima alternativa para produtos específicos de geometria plana, pois os investimentos nessa tecnologia podem trazer benefícios em ganho de produtividade e qualidade. Esse investimento inicial é de aproximadamente EUR 12.000,00 que em um molde comercial de grande volume de produção, justifica seu investimento pela série de benefícios apresentados anteriormente.

Mas é importante salientar que a utilização dessa tecnologia depende muito do sistema construtivo do molde, para cavidades com muitos detalhes e extratores talvez não seja possível utilizar tal tecnologia.

Outro ponto importante foi o da vazão de água utilizada, pois foi verificado que o sistema BFmold possui menos restrição ao escoamento, sendo possível escoar mais água por dentro da cavidade de refrigeração, essa vazão foi controlada via rotâmetro e mantida igual para os dois sistemas para garantir o comparativo.

O mesmo ocorre com a distância entre a cavidade de refrigeração e a peça, que foi mantida a mesma que para a refrigeração convencional, assim foi possível comparar somente o ganho em tipo de transferência de calor.

Os resultados obtidos refletem o que foi dito no capítulo 2, onde foi ressaltado que uma etapa muito importante no projeto de um molde de injeção é a arquitetura e dimensionamento dos dutos de refrigeração, é onde se pode apresentar o sistema de refrigeração BFmold como uma alternativa para ganhos em produtividade e qualidade comprovada para determinados produtos produzidos pelo processo de moldagem por injeção.

5.1 SEQUÊNCIA DO TRABALHO

Como sequência desse trabalho, para fim de aumentar o ganho em produtividade do sistema de refrigeração por cavidade de esferas, pode ser feita uma avaliação da distância da cavidade de refrigeração até a peça, reduzindo-a até uma condição ótima, visto que o suporte mecânico da placa que contém a cavidade está garantido pelas esferas; assim aumentando a taxa de transferência de calor neste sistema.

Outro ponto a ser melhorado é explorar a vazão máxima de água no sistema, que se mostrou maior do que a com dutos perfurados. Esse aumento de vazão aumenta a turbulência do sistema e consequentemente a taxa de transferência de calor por convecção do sistema de refrigeração.

Para tornar o estudo mais aprofundado também sugere-se a medição da temperatura da cavidade do molde com auxílio de termopares.

REFERÊNCIAS

AISA, J. et al. Mejoras em eldiseño y controldel sistema de atemperación de moldes de inyección. **Revista Plásticos Modernos**, Valência, v. 104, n. 670, p. 12 - 20, Júlio-Agosto 2012.

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos**: a base da tecnologia CAE. São Paulo: Erica, 2006.

BARETA, D. **Estudo comparativo e experimental de materiais aplicados a incerto macho de moldes de injeção dentro do conceito de molde hibrido**. 2007. 148 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007.

BIRD, R.B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. **Transport phenomena**. Nova York: John Wiley, 2002.

BRITO, A. M.; MATOS, A.; MENDES, S. S. **Manual do projetista para moldes de injeção de plásticos**. v. 7: sistemas de controle de temperatura. Marinha Grande: Centimfe, 2004.

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

COSTA, M. G.M.**Otimização de um modelo de geometria complexa para simulação computacional de sistemas de refrigeração em moldes de injeção**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Polímeros) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007.

FERREIRA, E. **A influência da temperatura superficial das cavidades de um molde de injeção e sua influência no empenamento de peças**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Polímeros) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007.

FERREIRA, I. et al. Multidisciplinary optimization of injection molding systems. **Journal of the International Society of Structural and Multidisciplinary**, v. 41, ed. 4, p. 621-635, April, 2009. Disponível em: <http://rd.springer.com/article/10.1007/s00158-009-0435-8#>. Acesso em: 17 set. 2012.

FREITAS, F. **Modelagem da formação e propagação de trincas em misturas betuminosas através do método dos elementos finitos**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2002. 1 CD-ROM.

HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos**: projetos e princípios básicos. São Paulo: Artiber, 2004.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

KIAM, T. M.; PEREIRA, N. C. Estudo de caso de peça moldada pelo processo de injeção e compressão para termoplásticos utilizando análise computacional. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 16-22, 2007.

MENGES, G., MOHREN, P. **How to make injection molds**. 2. ed. Munich: Hanser, 1993.

PEIXOTO, F. L. **Considerações quanto ao uso de técnicas para análise de fluxo em cavidades de moldes de injeção**. 1999. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

PROVENZA, F. **Moldes para plásticos**. São Paulo: Atlas, 1993.

REES, H. **Mold engineering**. Munique: Hanser, 1995.

REINERT, A.; ASSUNÇÃO, V. **Apostila de processamento de materiais termoplásticos**. Centro de tecnologia em materiais, jan. 1999.

SAIFULLAH, A. B. M.; MASOOD, S. H.; SBARSKI, I. New cooling channel design for injection moulding. In: **Proceedings of the World Congress on Engineering**, 2009. 1-3 July, London. Disponível em: <www.iaeng.org/publication/WCE2009/>. Acesso em: 15 set. 2012.

SALVADOR, V. L.; COSTA, C. A. Quais são as etapas mais importantes no desenvolvimento de ferramentas de injeção. **Plástico Industrial**, ano IX, p. 82-94, fev. 2007.

SHOEMAKER, J. **Mold flow desing guide**: a resource for plastic engineers. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 2006.

SILVA, S. **Sistemática para o projeto de refrigeração de molde para injeção de polímeros**. 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009a.

SILVA, J. C. W. **Metodologia para aplicar recursos computacionais de engenharia no desenvolvimento de uma ferramenta de injeção de termoplásticos visando a engenharia simultânea**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2009b.

STITZ, S; SCHILCK, K.; POOP, M. Estudo identifica modos mais eficientes de resfriamento do ferramental de injeção. **Plástico Industrial**, Ano IV, n. 48, ago. 2002.

TECHNIK, J. Injection mold cooling configuration. **International Journal of Engineering**, fascicule 1, Jan./March, 2010.Disponível em: <acta.fih.upt.ro/pdf/2010-1/ACTA-2010-1-12.pdf >. Acesso em: 15 set. 2012.

WITTMANN BATENFELD. **Vario therm technology BFmold**. [2012]. Disponívelem:<http://www.battenfeld-imt.com/en/anwendungstechnik/variothermtechnologie-bfmold.html>. Acesso em: 17 set. 2012.

ZÖLNER, O. Optimised mould temperature control. **Application Technology Information**, 30 nov. 1997. Disponível em: <http://plastics.bayer.com/plastics/emea/de/bibliothek/suche/docId-1113/A1104.pdf>. Acesso em: 17 set. 2012.

ANEXO A – FOLHA DE DADOS DO POLIPROPILENO TC136

BREA 0028 30.11.2006 Ed.1

Polypropylene
TC 136
Polypropylene Compound 40% Mineral Filled

Description
TC 136 is a 40% mineral filled grade intended for injection moulding.

TC 136 has been developed especially for injection moulding of appliance parts.

Applications

Appliances
Tub

Physical Properties**

		Typical Value*	Unit	Test Method
Density		1240	kg/m^3	ISO 1183
Melt Flow Rate	(230°C/2.16 kg)	7	g/10 min	ISO 1133
Flexural Modulus	(2mm/min)	1900	MPa	ISO 178
Flexural Strength	(2mm/min)	33	MPa	ISO 178
Tensile Stress at Yield	(50 mm/min)	22	MPa	ISO 527-2
Tensile Strain at Yield	(50 mm/min)	3	%	ISO 527-2
Izod Impact Strength, notched	(+ 23 °C)	3	kJ/m^2	ISO 180/1eA
Heat Defletion Temperature	(0,45 MPa)	105	°C	ISO 75-2
Heat Defletion Temperature	(1,82 MPa)	59	°C	ISO 75-2
Hardness Shore D		77		ISO 868

* Data should not be used for specification work
** Values determined on standard injection moulded specimens, conditioned at 23°C and 50% relative humidity

Application Related Tests

		Typical Value*	Unit	Test Method
Flammability	(1mm thickness)	Max. 100	mm/min	ISO 3795
Flammability	(3,2 mm thickness)	HB	-	UL 94

* Data should not be used for specification work

Borealis Brasil S.A.
Av. Osvaldo Berto, 700
Bairro Pinhal – Distr. Ind. "Alfredo Rela"
Cep: 13255-840 – Itatiba,SP - Brasil
Telephone: +55 (11) 4524-9100
Fax : +55 (11) 4524-9101
www.borealisgroup.com

BOREALIS

Polypropylene

TC 136

Polypropylene Compound 40% Mineral Filled

Processing Guidelines

TC 136 is recommended to pre-dry before processing. A guideline is to dry the material 2 hours within 95 and 105°C.

TC 136 is easy to process with standard injection moulding machines. Following moulding parameters should be used as guidelines:

Melt Temperature	200 - 240°C
Injection Speed	Low to Medium
Holding Pressure	60 - 80% of the injection pressure
Mould Temperature	20 - 40°C

Storage and handling

TC 136 should be stored in dry conditions at temperatures below 50ºC and protected from UV-light.

Improper storage can initiate degradation, which results in odour generation and colour changes and can have negative effects on the physical properties of the product.

Safety

TC 136 is not classified as a dangerous preparation.

Dust and fines from the product carry a risk of dust explosion. All equipment should be properly earthed. Inhalation of dust should be avoided as it may cause irritation of the respiratory system. Small amounts of fumes are generated during processing of the product. Proper ventilation is therefore required.

Recycling

The product is suitable for recycling using modern methods of shredding and cleaning. In-house production waste should be kept clean to facilitate direct recycling.
A Safety Data Sheet is available on request. Please contact your Borealis representative for more details on various aspects of safety, recovery and disposal of the product.

Borealis Brasil S.A.
Av. Osvaldo Berto, 700
Bairro Pinhal – Distr. Ind. "Alfredo Rela"
Cep: 13255-840 – Itatiba,SP - Brasil
Telephone: +55 (11) 4524-9100
Fax : +55 (11) 4524-9101
www.borealisgroup.com

BOREALIS

Polypropylene

TC 136

Polypropylene Compound 40% Mineral Filled

Disclaimer

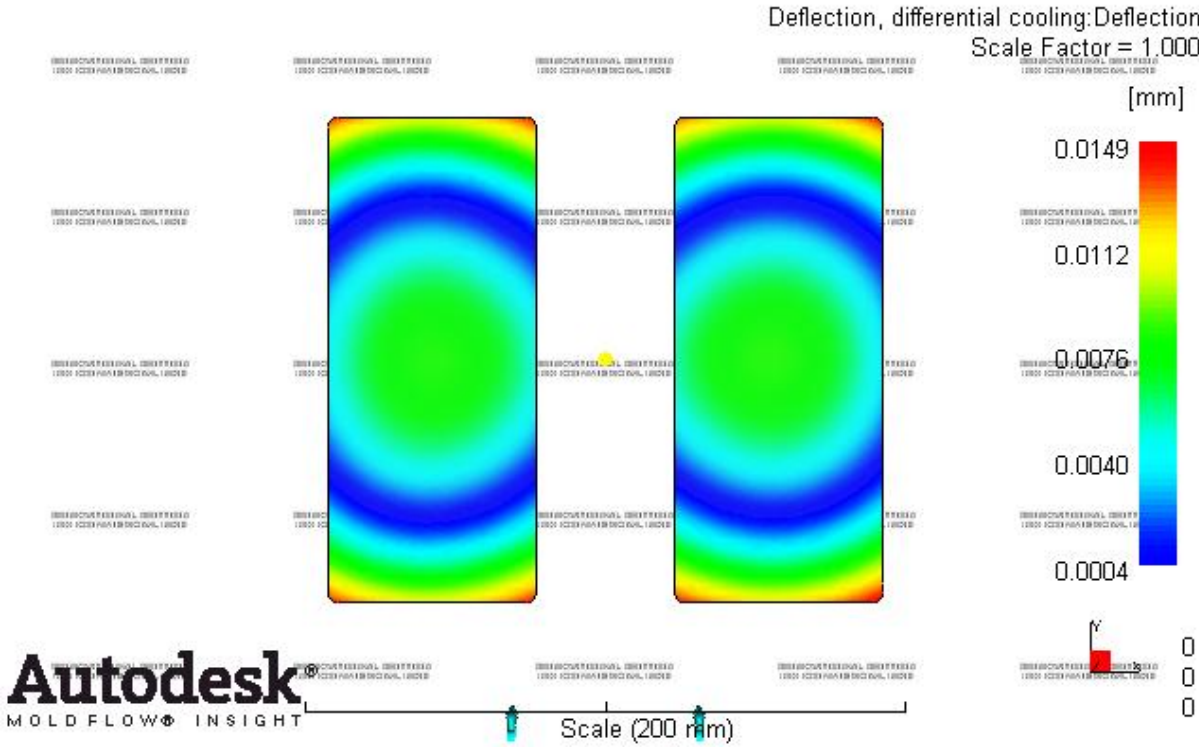
The information contained herein is to our knowledge accurate and reliable as of the date of publication. Borealis extends no warranties and makes no representations as to the accuracy or completeness of the information contained herein, and assumes no responsibility regarding the consequences of its use or for any printing errors.
Our products are intended for sale to industrial and commercial customers. It is the customer's responsibility to inspect and test our products in order to satisfy himself as to the suitability of the products for the customer's particular purpose. The customer is also responsible for the appropriate, safe and legal use, processing and handling of our products. Nothing herein shall constitute any warranty (express or implied, of merchantability, fitness for a particular purpose, compliance with performance indicators, conformity to samples or models, non-infringement or otherwise), nor is protection from any law or patent to be inferred. No statement herein shall be construed as an endorsement of any product or process.
Insofar as products supplied by Borealis or its subsidiary companies are used in conjunction with third party materials, it is the responsibility of the customer to obtain all necessary information relating to the third party materials and ensure that Borealis' or its subsidiary companies' products when used together with these materials are suitable for the customer's activities and particular purpose. No liability can be accepted in respect of the use of Borealis' products in disregard of its technical specification or in conjunction with other third parties materials. The information contained herein relates exclusively to our products when not used in conjunction with any third party materials.

Borealis A/S
Lyngby Hovedgade 96,
DK-2800 Kongens Lyngby (Denmark)
Telephone: +45 45 96 60 00
Fax : +45 45 96 61 23
www.borealisgroup.com

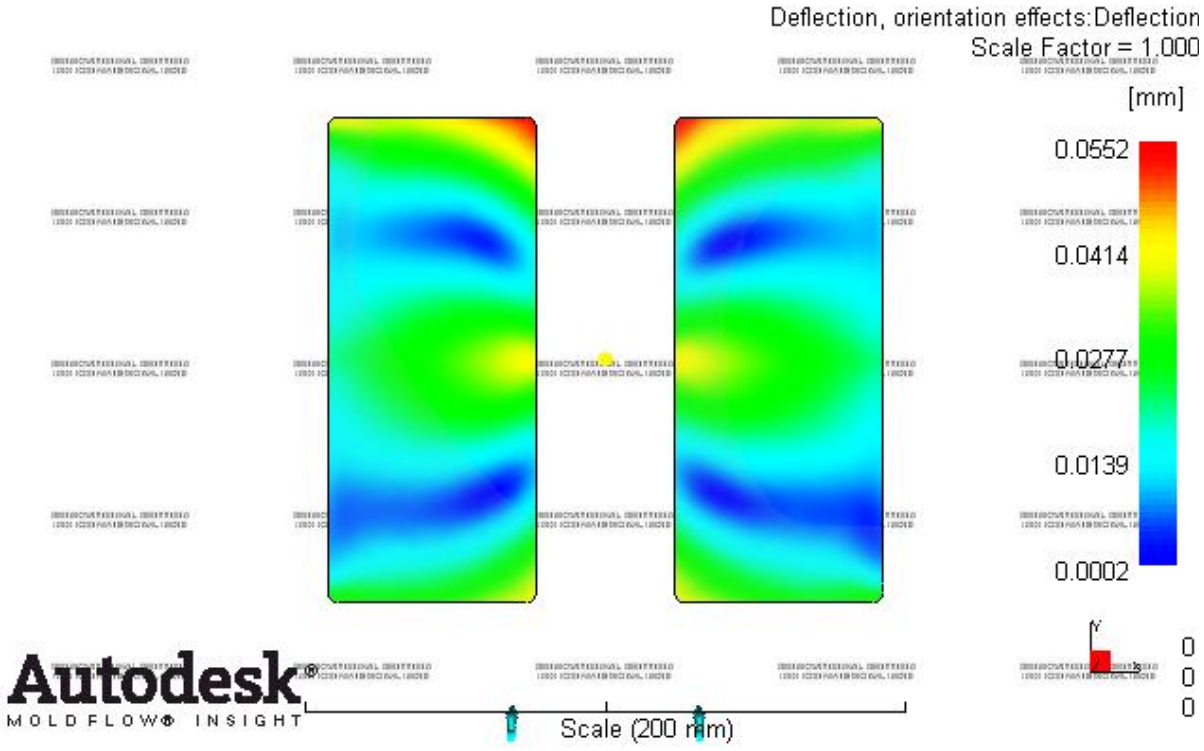
BOREALIS

ANEXO B – ANÁLISE EM *MOLDFLOW*

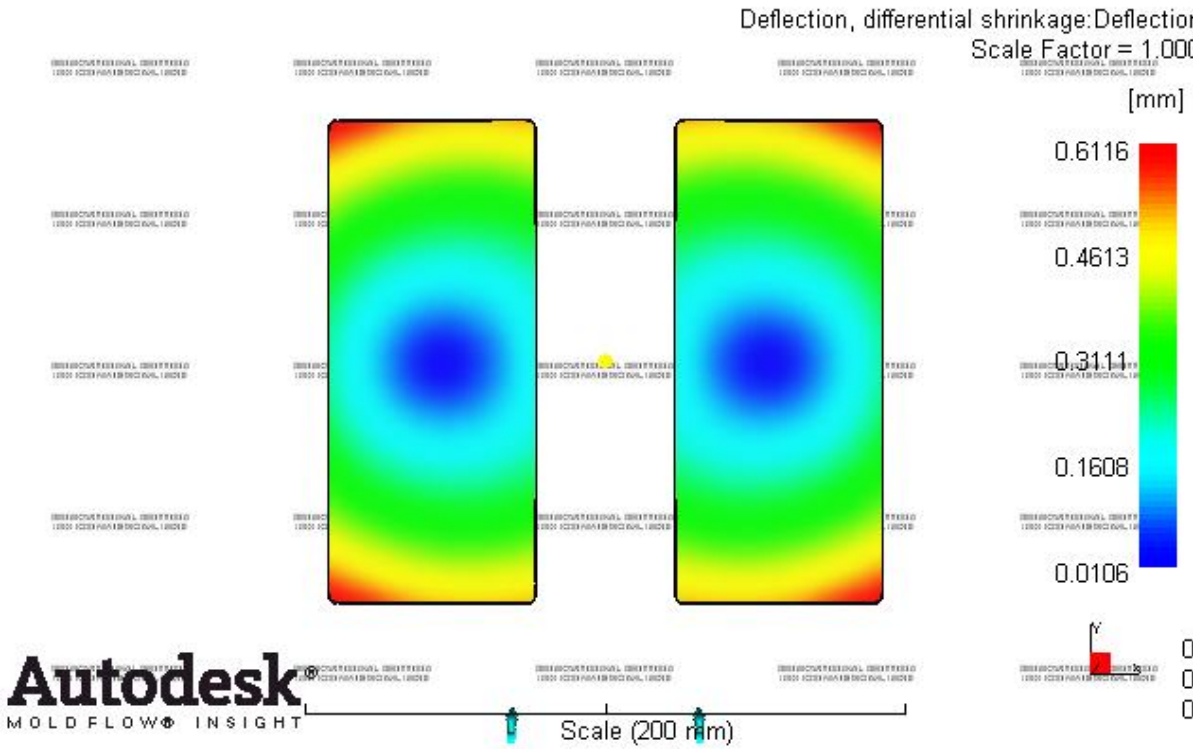
FUSION: Deflexão por Refrigeração



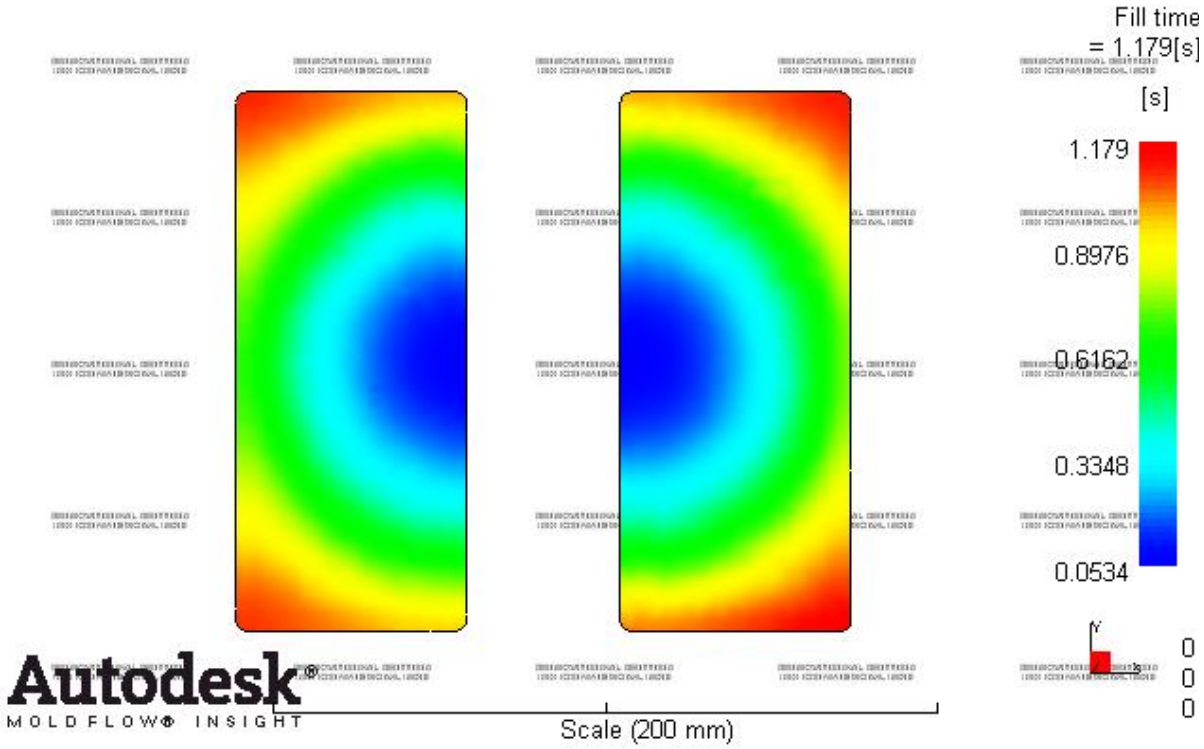
FUSION: Deflexão por Cargas



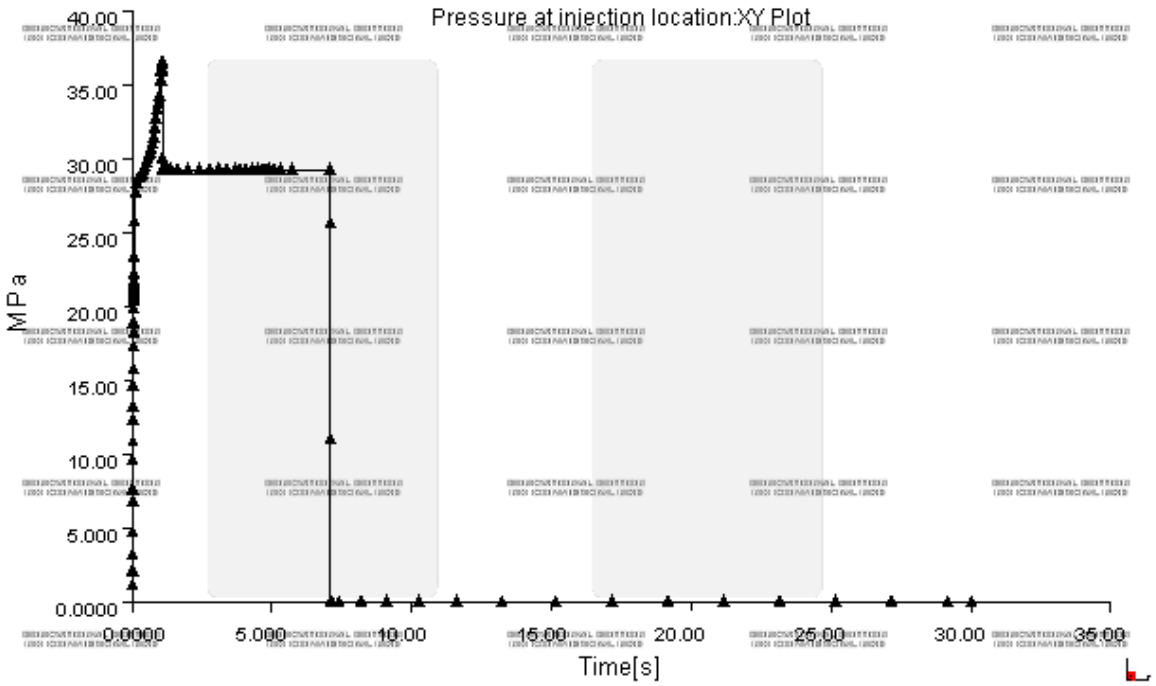
FUSION: Deflexão por contração do PP



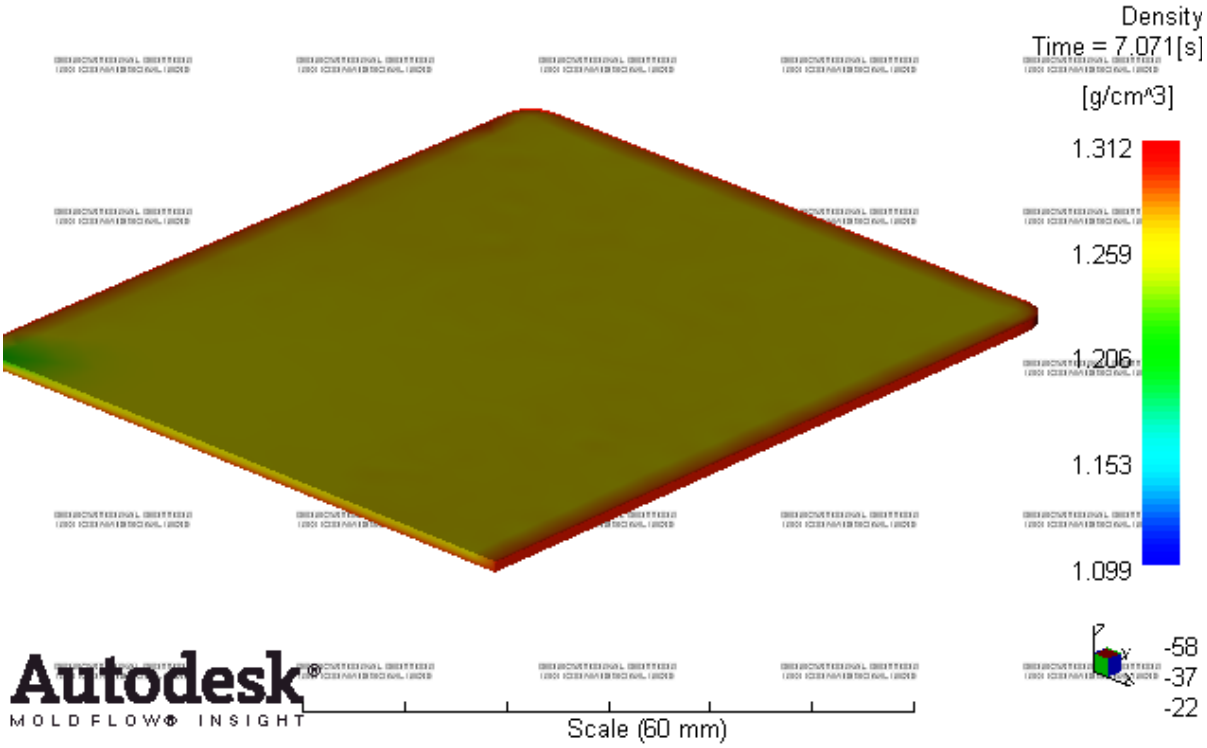
3D: Tempo de Preenchimento



3D: Pressão de injeção por tempo de injeção



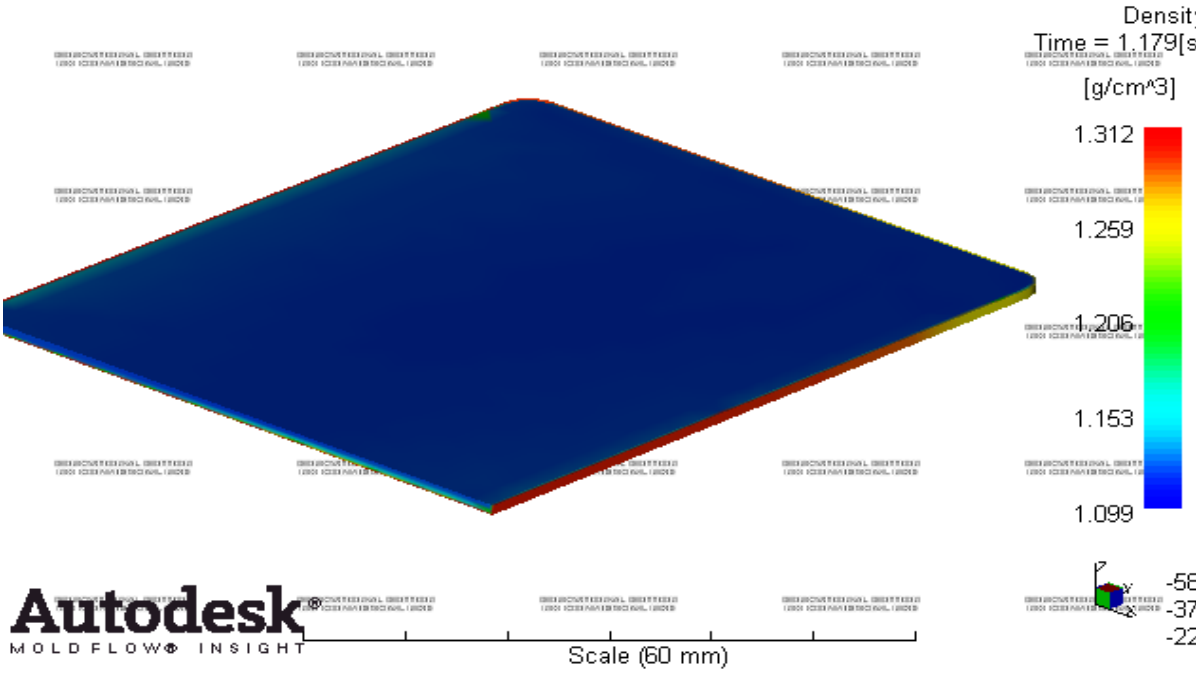
3D: Densidade



3D: Densidade
Após o final do recalque (7.071s)

Observação: modelo em 1/4 para visualização.

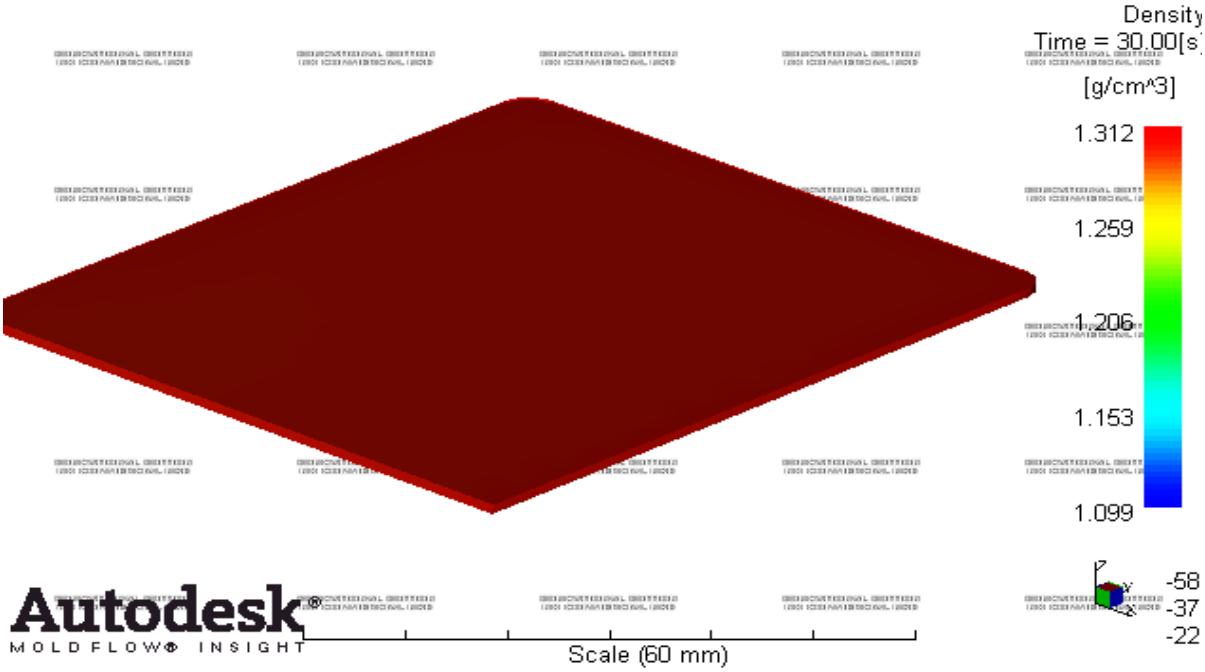
3D: Densidade



3D: Densidade
Após o final do preenchimento (1.179s)

Observação: modelo em 1/4 para visualização.

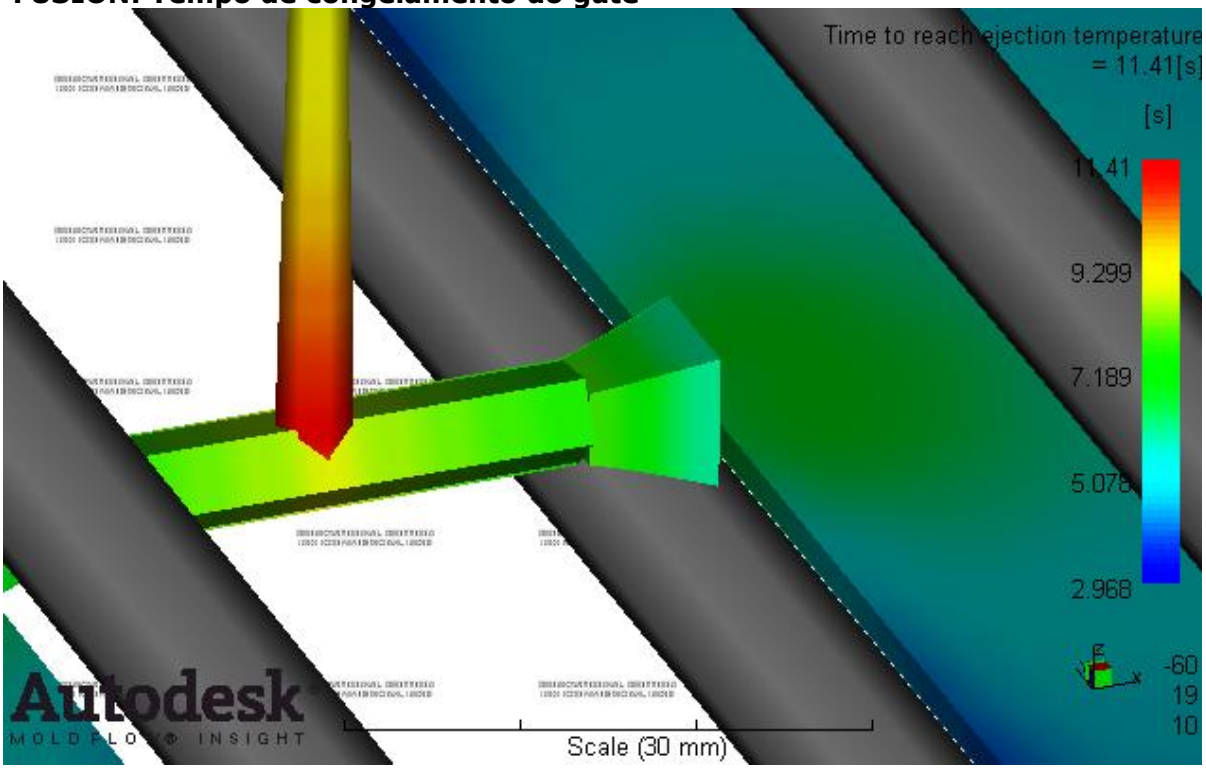
3D: Densidade



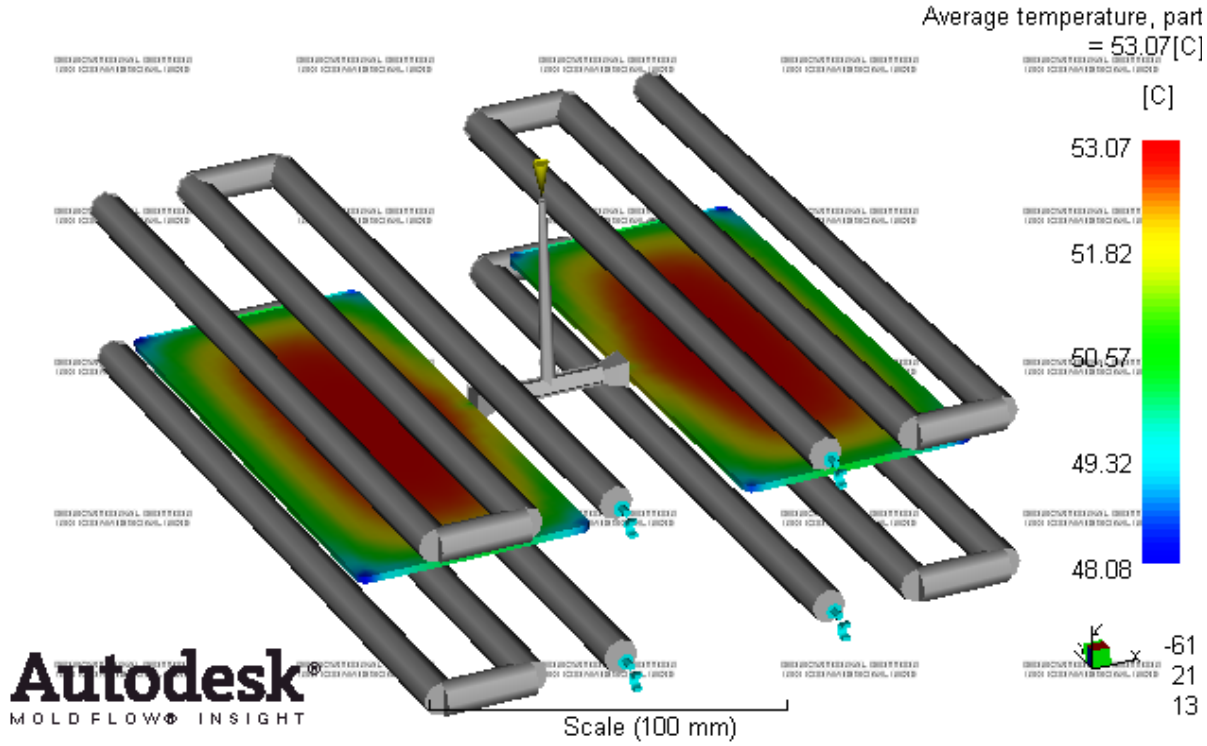
3D: Densidade
Após o final do ciclo (30s)

Observação: modelo em 1/4 para visualização.

FUSION: Tempo de congelamento do gate



FUSION: Temperatura média da peça



3D: Deflexão todos os defeitos

