

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

**MAIKO SCHULZE**

**ESTUDO COMPARATIVO DE CIRCUITOS DE REFRIGERAÇÃO EM  
MOLDES DE INJEÇÃO TERMOPLÁSTICOS**

**Caxias do Sul**

**2014**

**MAIKO SCHULZE**

**ESTUDO COMPARATIVO DE CIRCUITOS DE REFRIGERAÇÃO EM  
MOLDES DE INJEÇÃO TERMOPLÁSTICOS**

Relatório de Estágio II, apresentado como requisito parcial para a conclusão do Curso de Engenharia Mecânica na Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Carlos Alberto Costa, Ph.D.

**Caxias do Sul**

**2014**

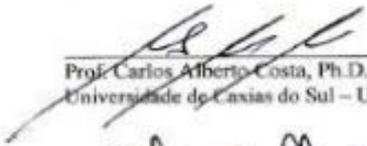
**MAIKO SCHULZE**

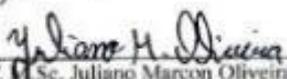
**ESTUDO COMPARATIVO DE CIRCUITOS DE REFRIGERAÇÃO EM  
MOLDES DE INJEÇÃO TERMOPLÁSTICOS**

Relatório de Estágio II, apresentado como requisito parcial para a conclusão do Curso de Engenharia Mecânica na Universidade de Caxias do Sul.

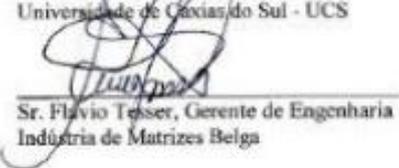
Aprovado em 18 de junho de 2014

**Banca Examinadora:**

  
Prof. Carlos Alberto Costa, Ph.D.  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

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

  
Prof. M.Sc. Deives Roberto Baretta  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

  
Sr. Flavio Tesser, Gerente de Engenharia  
Indústria de Matrizes Beiga

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter-me concedido as oportunidades possíveis para que eu pudesse alcançar os meus objetivos.

Aos meus pais, Carlos e Fátima, pelo amor e apoio dado e principalmente a educação que foi muito importante para meu crescimento pessoal e profissional.

Ao meu irmão, Magnus e sobrinhos pela compreensão de minha ausência em muitos momentos.

A minha esposa e companheira Marcieli que nos momentos mais difíceis sempre esteve ao meu lado apoiando e incentivando.

Ao professor Carlos Aberto Costa, pela excelente orientação no trabalho de estágio.

Ao professor Deives Roberto Baretta, pelo apoio prestado.

Ao funcionário Jorge do LPOL da UCS, pelo apoio prestado.

Ao colega Felipe Pasquali, pelo auxílio nos dois testes feitos no LPOL da UCS.

A Indústria de Matrizes Belga Ltda., em especial ao Sr. Flávio Luiz Tesser, que possibilitaram a realização do estágio. E juntamente, ao Sr. Jose Vitor Tasca que foi fundamental para a realização deste estágio.

Aos colegas de empresa José Rech, Geovani Bortoloto, Paulo Lorandi, Fernando Palavro, Rodrigo Boff e aos demais colegas que de alguma forma colaboraram para a realização do estágio.

A comissão examinadora, pelas observações e sugestões, que serviram para melhorar o relatório apresentado.

Aos meus colegas de engenharia, amigos, colegas de trabalho, pelo apoio e incentivo durante todo o curso.

## RESUMO

Este trabalho tem como foco o estudo comparativo entre dois circuitos de refrigeração de moldes de injeção termoplásticos. Nele, foi comparado o sistema de refrigeração com circuito em série e paralelo. Para fazer esta comparação foi projetado um corpo de prova para injetar num molde experimental que foi fabricado e testado a fim de gerar dados para realizar um comparativo entre os circuitos que possa identificar qual se mostra mais eficiente no processo de arrefecimento. O uso do software Moldflow® auxiliou nos parâmetros de injeção e comparativos com os resultados coletados das amostras injetadas. Após os testes as amostras foram submetidas a ensaios dimensionais. Os resultados obtidos através dos testes práticos e das simulações feitas mostraram que as peças injetadas com o circuito em série obteve maior eficiência na refrigeração.

**PALAVRAS-CHAVES:** Moldes de injeção de polímeros, circuitos de refrigeração.

## **ABSTRACT**

This work focuses on the comparative study between two cooling circuits of thermoplastic injection molds. In it, was compared with the cooling system in series and parallel circuit. To make this comparison we designed a test body to inject an experimental mold was fabricated and tested in order to generate data to make a comparison between the circuits that can identify which is more efficient in the cooling process. Use of Moldflow ® software helped us injection parameters and their comparison with the results collected from samples injected. After testing the samples were subjected to dimensional testing. The results obtained from practical tests and simulations have shown that the parts injected with the series circuit obtained a higher cooling efficiency.

**KEYWORDS:** Injection polymer molds, cooling circuits.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vendas por cliente.....	15
Figura 2 – Configuração básica do molde de injeção.....	17
Figura 3 – Rotina de transformação de polímeros.....	18
Figura 4 – Refrigeração adequada e pobre .....	19
Figura 5 – Circuitos de águas com pino térmico .....	24
Figura 6 – Sistemas com tubos transferidores de calor .....	24
Figura 7 – Funcionamento dos pinos térmicos.....	25
Figura 8 – Circuitos em série e paralelo .....	25
Figura 9 – Circuitos em furos retos e circuito com lâminas defletoras .....	26
Figura 10 – Comparação entre a eficiência dos tipos de canais .....	27
Figura 11 – Transferência de calor em um molde .....	28
Figura 12 – Variação da entalpia para alguns polímeros.....	29
Figura 13 – Distâncias dos furos .....	33
Figura 14 – Corpo de prova.....	34
Figura 15 – Desenho Molde Protótipo .....	35
Figura 16 – Forma de injeção .....	35
Figura 17 – Circuito em paralelo (a) e série (b) .....	36
Figura 18 – Machos e cavidades projetados.....	36
Figura 19 – Modelo simulado no Moldflow.....	37
Figura 20 – Simulação de temperatura na frente de fluxo.....	38
Figura 21 – Posição termopar.....	38
Figura 22 – Machos e cavidades fabricados.....	39
Figura 23 – Molde experimental pronto para teste.....	39
Figura 24 – Termopar tipo K.....	40
Figura 25 – Cabo de compensação tipo K.....	40
Figura 26 – Posicionamento dos termopares.....	41
Figura 27 – Injetora Himaco LH 150-80 e Refrigerador de água .....	42
Figura 28 – Medição de deformação na tridimensional .....	43
Figura 29 – Indicação de deformação das amostras .....	43
Figura 30 – Molde montado na injetora .....	45
Figura 31 – Peça protótipo injetada.....	46
Figura 32 – Gráfico do circuito em série T1 .....	47

Figura 33 – Gráfico do sistema em paralelo T1 .....	47
Figura 34 – Temperatura na superfície de contato com o produto – série T1 .....	48
Figura 35 – Temperatura na superfície de contato com o produto – paralelo T1.....	48
Figura 36 – Resultado da simulação para deformação série T1 .....	50
Figura 37 – Resultado da simulação para deformação paralelo T1.....	51
Figura 38 – Queima de gás na peça injetada .....	52
Figura 39 – Gráfico do circuito em série T2 .....	53
Figura 40 – Gráfico do circuito em paralelo T2 .....	54
Figura 41 – Temperatura na superfície de contato com o produto – série T2.....	54
Figura 42 – Temperatura na superfície de contato com o produto – paralelo T2.....	55
Figura 43 – Resultados da simulação de deformação série T2.....	57
Figura 44 – Resultados da simulação de deformação paralelo T2 .....	58
Figura 45 – Temperaturas dos insertos no processo de injeção .....	58
Figura 46 – Número de Reynolds através da simulação .....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de circuitos de refrigeração (continua) .....	21
Tabela 2 – Difusividade térmica efetiva para alguns polímeros .....	30
Tabela 3 – Fator de proporcionalidade .....	31
Tabela 4 – Relação entre número de Reynolds e tipo de escoamento.....	32
Tabela 5 – Resultado dimensional com o circuito série T1.....	49
Tabela 6 – Resultado dimensional com o circuito paralelo T1 .....	49
Tabela 7 – Resultado de medição de deformação máxima T1 .....	50
Tabela 8 – Percentual de contração para o comprimento T1 .....	51
Tabela 9 – Parâmetros alterados .....	53
Tabela 10 – Resultado dimensional com o circuito série T2.....	55
Tabela 11 – Resultado dimensional com o circuito paralelo T2 .....	56
Tabela 12 – Percentual de contração para o comprimento T2 .....	56
Tabela 13 – Resultado de medição de deformação máxima T2 .....	57

## LISTA DE SÍMBOLOS

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
CAE	Computer Aided Engineering
PMMA	Polimetil-metacrilato
PVC	Cloreto de polivinila
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PABD	Polietileno de Alta Densidade
Q <sub>Pi</sub>	Quantidade de calor trazido pelo fundido
Q <sub>Amb</sub>	Quantidade de calor transferido para o ambiente
Q <sub>conv</sub>	Quantidade de calor transferido por Convecção
Q <sub>cond</sub>	Quantidade de calor transferido por Condução
Q <sub>rad</sub>	Quantidade de calor transferido por Radiação
Q <sub>TM</sub>	Quantidade de calor transferido pelo meio refrigerante

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	LOCAL DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	15
1.3	OBJETIVO GERAL.....	16
1.4	OBJETIVOs ESPECÍFICOs .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
2.1	INTRODUÇÃO.....	17
2.2	MOLDE PARA INJEÇÃO DE POLÍMEROS .....	17
2.3	CIRCUITOS DE REFRIGERAÇÃO EM MOLDES DE INJEÇÃO .....	18
2.4	CIRCUITOS DE REFRIGERAÇÃO .....	20
<b>2.4.1</b>	<b>Circuito de águas com pino térmico</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Circuito em paralelos e série</b> .....	<b>25</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Canais para resfriamento adaptados ao contorno das peças.</b> .....	<b>26</b>
2.5	TRANSFERENCIA DE CALOR .....	27
<b>2.5.1</b>	<b>Condução</b> .....	<b>30</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Convecção</b> .....	<b>31</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Radiação</b> .....	<b>31</b>
2.6	CÁLCULO DA VAZÃO DO FLUIDO REFRIGERANTE.....	32
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO</b> .....	<b>34</b>
3.1	MATERIAL E FERRAMENTAs utilizadas .....	34
<b>3.1.1</b>	<b>Protótipo</b> .....	<b>34</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Molde de injeção experimental</b> .....	<b>34</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Análise computacional</b> .....	<b>36</b>
3.2	FABRICAÇÃO DO MOLDE .....	39
<b>3.2.1</b>	<b>Instrumentação do molde</b> .....	<b>40</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Termômetro infravermelho</b> .....	<b>41</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Termômetro digital</b> .....	<b>41</b>

3.3	TESTE EXPERIMENTAL .....	41
3.4	VALIDAÇÃO .....	42
<b>3.4.1</b>	<b>Dimensional, Forma e Aparência.....</b>	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>45</b>
4.1	TESTE PRÁTICO 1 .....	45
4.2	RESULTADOS DO TESTE 1 .....	46
<b>4.2.1</b>	<b>Dados coletados pelos termopares .....</b>	<b>46</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Análises Dimensionais.....</b>	<b>49</b>
4.3	TESTE PRÁTICO 2 .....	52
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>64</b>
	<b>ANEXO A – ANÁLISE NO MOLDFLOW DO TESTE 1 .....</b>	<b>66</b>
	<b>ANEXO B - ANÁLISE NO MOLDFLOW DO TESTE 2 .....</b>	<b>71</b>
	<b>ANEXO C – FOLHA DE DADOS DO POLIPROPILENO CP 241 .....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente o processo de moldagem por injeção revela-se como um dos principais processos de transformação de polímeros devido a sua grande versatilidade e conseqüentemente, grande aplicabilidade, em peças plásticas nos ramos: automobilísticos, eletroeletrônico, brinquedos, linha branca entre outros.

Em 2012, a indústria de transformação de polímeros produziu cerca de R\$53,83 bilhões, transformando 6,66 mil toneladas de material polimérico, o que resultou em um faturamento de R\$ 56,49 bilhões, aproximadamente 7% superior ao de 2011 (Róriz, 2013).

Ainda Róriz (2013) diz que dentro os setores brasileiros que mais consomem produtos plásticos esta o setor automobilístico que absorve dessa camada 15% do total consumido. Só para o polipropileno (PP), é usado em média 35kg a 45kg num carro, material que será utilizado para os teste neste trabalho.

Desta forma, a indústria Brasileira, como um todo, é impulsionada ao desenvolvimento e aprimoramento dos processos produtivos, buscando melhores tecnologias, redução de custos, acréscimo e ou manutenção da qualidade.

Na construção de moldes de injeção, muitos são os casos onde o produto apresenta grande responsabilidade, como geometria, dimensão (sob pena de não ser possível sua montagem nos demais componentes), custo (ciclos rápidos de produção), resistência mecânica entre outros. Diante desta exigência, a refrigeração do molde é um dos mecanismos utilizados para conferir tais características.

O sistema de refrigeração tem como principal função o controle de temperatura do molde. Essa diferença de temperatura entre a temperatura da água que entra e que sai deve estar no intervalo de 2 a 5 °C. Nestes parâmetros, a refrigeração do molde torna-se eficiente, possibilitando a redução ou eliminação de possíveis tensões residuais termo-induzidas, provenientes do resfriamento desbalanceado (Harada, 2004)

Segundo Sacchelli (2007), esses sistemas são projetados, baseados em experiências anteriores, ou seja, com estimativas feitas pelo projetista, o que pode, ao final da atividade, desencadear menor eficiência no ciclo de injeção ou mesmo gerar retrabalhos em função do projeto inadequado do sistema de refrigeração.

Com base nisso as empresas estão procurando melhorar cada vez mais seus processos tornando seu produto competitivo tanto no preço quanto na qualidade e prazo. Para que esse conjunto de melhorias seja acolhido, uma das principais importâncias na moldagem por

injeção é o sistema de arrefecimento dos moldes, sendo essa uma das etapas gargalos no processo de injeção.

Azeredo e Silva (2000), também afirmam que um dos principais parâmetros de injeção é a temperatura do molde. Normalmente, um valor ideal para esse parâmetro é recomendado tanto pelos fornecedores de moldes como pelos de matéria-prima de polímeros.

Deste modo, neste trabalho serão abordados os diferentes parâmetros para o processo de arrefecimento de moldes de injeção, variando os circuitos entre série e paralelo, com a finalidade de compreender suas diferenças e com isso poder utilizar os resultados para garantir uma melhor qualidade do produto injetado, um menor ciclo e conseqüentemente um aumento da produção.

### 1.1 LOCAL DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

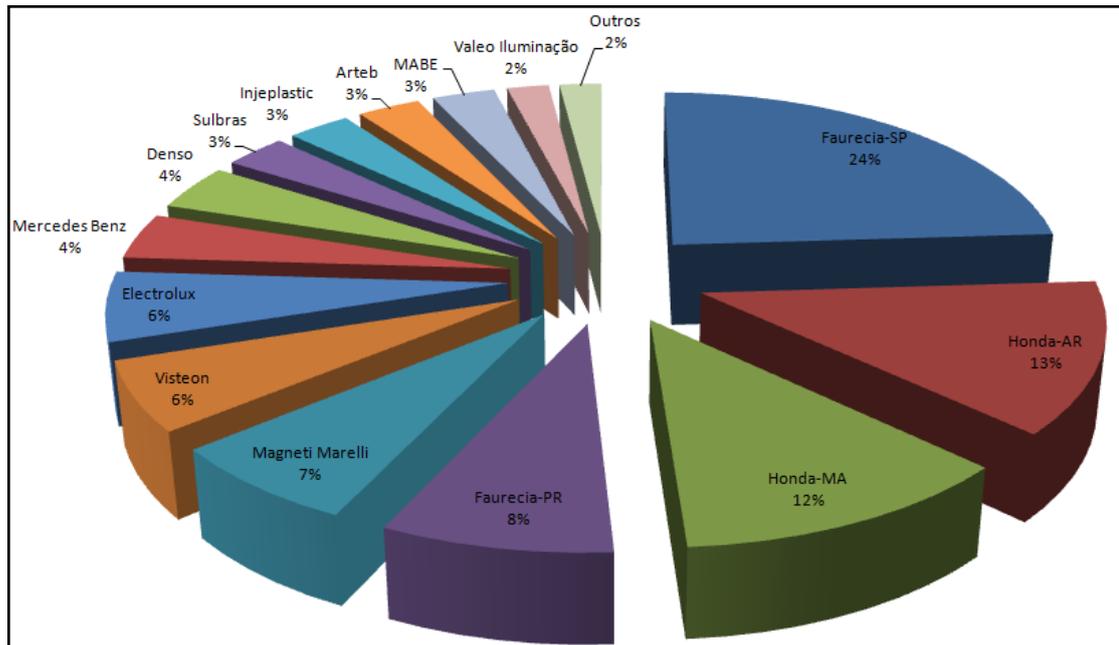
A Indústria de Matrizes Belga foi fundada no dia 2 de maio de 1979 com o objetivo de suprir a demanda de mercado na utilização do polímero em diversos segmentos da indústria (BELGA, 2012).

A empresa possui hoje uma área total de 12.294 m<sup>2</sup> sendo 3.382 m<sup>2</sup> de área construída, conta com um quadro de cerca de 120 colaboradores. Atualmente, estruturada basicamente em três grandes grupos: administrativa/financeira/comercial (administrativa, financeira, recursos humanos, vendas e suprimentos); engenharia e qualidade (engenharia e engenharia da qualidade); e industrial (usinagem, montagem e polimento, PCP e manutenção).

Atualmente a Belga Matrizes detém a liderança na fabricação de moldes de grande porte no mercado nacional. Desde que iniciou as atividades, já produziu mais de 4000 moldes e segue na busca constante de soluções inovadoras na área de equipamentos para transformação de polímeros e não ferrosos (BELGA, 2012).

A empresa tem capacidade para produzir moldes de até 40 toneladas, e atua principalmente nos setores automotivo, agrícola, eletroeletrônico, linha branca, construção civil e utilidades domésticas, atendendo a clientes das regiões Sul e Sudeste do Brasil (Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Minas Gerais), Mercosul e América Central (BELGA, 2012). A Figura 1 mostra a porcentagem de vendas por cliente no ano de 2009.

Figura 1 – Vendas por cliente.



Fonte: BELGA (2009).

Dentre suas principais tecnologias de construção de moldes estão:

- moldes de injeção bicolor;
- moldes de injeção tricolor;
- moldes de injeção bi componente;
- moldes de sobre injeção;
- injeção com gás;
- moldes para termofixos BMC e SMC.

A parte teórica e a análise virtual deste estágio serão desenvolvidas no Departamento de Engenharia da Indústria de Matrizes Belga Ltda. e em parceria com a Universidade de Caxias do Sul, onde, será utilizada a estrutura dos laboratórios de mecânica e de polímeros para realizar os testes práticos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Devido à grande exigência do mercado e dos clientes, com relação aos produtos injetados quanto à redução de ciclos, estabilidade dimensional, qualidade estética, menor grau de deformação entre outras exigências, e para que se possam atender as mesmas, um dos principais fatores responsável pelos resultados dessas exigências é o tempo de resfriamento

das peças injetadas e a refrigeração do molde, que por este motivo é o foco deste trabalho, analisar as diferenças entre circuitos de refrigeração em série e paralelo.

Com um tempo uma redução no tempo de resfriamento se tem um ganho no ciclo total da peça, e isso representa um fator decisivo para a lucratividade do negócio, pois aumenta a produtividade do molde e diminui o custo de produção por peça injetada e também melhora a qualidade das peças.

Este trabalho vem contribuir para o projetista de moldes no momento de projetar, devido ser um assunto de grande importância e responsabilidade, buscando um aperfeiçoamento com os resultados das diferentes análises de circuitos de refrigeração que ao longo deste trabalho será desenvolvido.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Analisar a eficiência de circuitos de refrigeração com canais em série e paralelo em moldes de injeção de polímeros.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar os principais parâmetros associados à refrigeração de moldes como, vazão do circuito e distâncias do canal.
2. Definir uma configuração de circuitos em série e paralelo para o desenvolvimento do estudo.
3. Desenvolver análises virtuais para confrontar com o resultado prático.
4. Projetar um molde experimental.
5. Fabricar o molde experimental.
6. Análise de duas configurações diferentes de canais de refrigeração.
7. Fazer ensaios dimensionais
8. Coletar temperaturas através das leituras de termopares.
9. Avaliar os resultados obtidos dos testes práticos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica realizada para dar apoio ao entendimento dos conceitos envolvidos nesse trabalho. É apresentado um breve conceito de moldes de injeção com ênfase em diferentes conceitos de arrefecimentos e como ocorre a transferência de calor nos moldes.

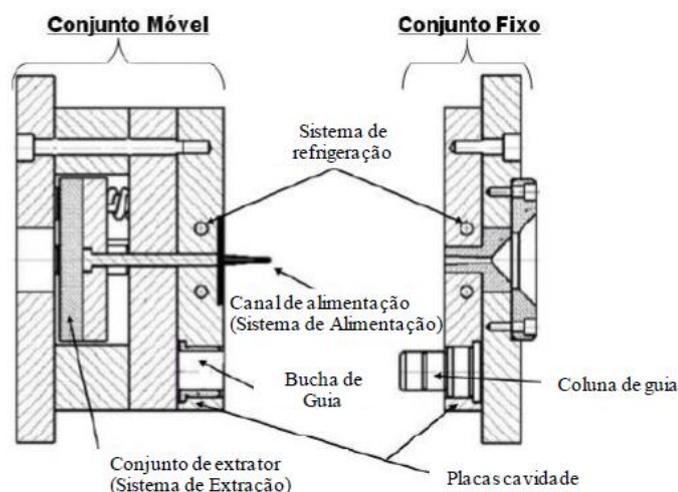
### 2.2 MOLDE PARA INJEÇÃO DE POLÍMEROS

Injeção é um dos processos industriais mais explorados na produção de peças de polímero. O princípio básico de moldagem por injeção é um polímero sólido fundido dentro de uma cavidade no interior de um molde, que é então arrefecida e a peça é injetada a partir da máquina injetora (Dimla, 2005).

Segundo Harada (2004), o molde de injeção é uma unidade completa com condições de produzir peças moldadas. Suas cavidades possuem as formas e as dimensões da peça desejada. O molde é adaptado ao final da máquina de injeção e recebe, em sua cavidade, o polímero fundido, introduzido por meio de pressão.

Silva (2009) exemplifica que, o molde de injeção é constituído de um conjunto fixo e outro móvel (Figura 2), os quais são constituídos de uma ou mais cavidades que dão forma ao produto.

Figura 2 – Configuração básica do molde de injeção



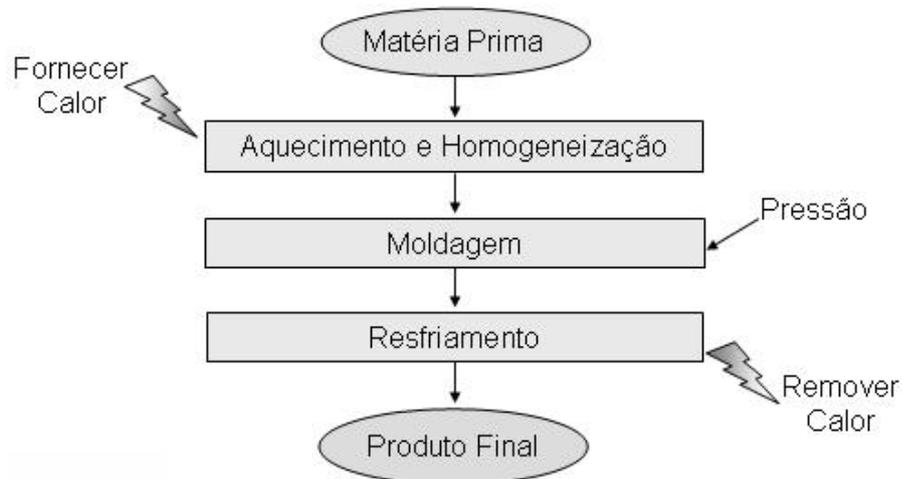
Fonte: Silva, S. (2009)

O processo de fabricação de peças através da injeção em moldes tem sido amplamente usado na produção de produtos poliméricos (NISHIMOTO, 2001). É um processo versátil,

que permite, desde a produção de pequenos componentes eletrônicos, até a produção de grandes para-choques para a indústria automotiva (C-MOLD DESIGN GUIDE, 1994).

Para Cunha et al. (2004), o processo de injeção de polímeros obedece a uma rotina cíclica, (Figura 3), envolvendo seqüencialmente as seguintes etapas: aquecimento do material (fornecimento de calor) até adquirir viscosidade suficientemente baixa e necessária para, na seqüência, ser moldado na cavidade do molde sob pressão e, após o produto moldado, ocorrer a etapa de resfriamento (remoção do calor) para que o material injetado recupere sua rigidez. Na refrigeração, existirá a solidificação do material para que ele possa ser extraído, e essa fase é crítica, pois se mal distribuída pode causar problemas nas peças, como o dimensionamento, marcas, linhas de solda, aumento no tempo do ciclo, entre outros.

Figura 3 – Rotina de transformação de polímeros



Fonte: CUNHA et al. (2004)

### 2.3 CIRCUITOS DE REFRIGERAÇÃO EM MOLDES DE INJEÇÃO

O sistema de refrigeração em um molde de injeção é um dos detalhes mais importantes para o bom funcionamento do mesmo, influenciando, diretamente, na qualidade da peça injetada (Cruz, 2002). A velocidade da troca de calor entre o polímero injetado e o molde é um determinante fator no desempenho econômico de um molde de injeção. O calor tem de ser tirado a partir do polímero, até que um estado estável seja alcançado, o que permite a desmoldagem. O tempo necessário para alcançar este objetivo é chamado de tempo de resfriamento (MENGES e MOHREN, 2001).

Esse processo de resfriamento na maioria das vezes é feito através de canais (furos) de passagem que passam internamente nas cavidades do molde, onde por eles circulam um fluido refrigerante que pode ser água, óleo ou ar, dependendo da material a ser injetado.

O desempenho térmico do molde de injeção para polímeros é determinado através do sistema de refrigeração, tem influência direta nas propriedades e nos defeitos aparentes no produto e na produtividade dessas ferramentas (MENGES e MOHREN, 2001; REES, 1995 e HARADA, 2004).

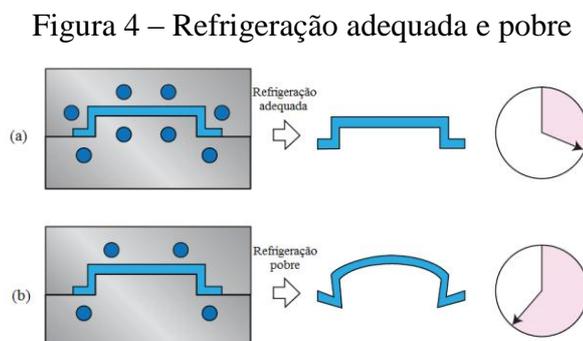
No mínimo 60% dos defeitos aparentes (distorção de formato, variações dimensionais, formação de rebarbas e defeitos superficiais), a princípio, têm sua causa na configuração térmica heterogênea do molde, ou seja, podem estar relacionados com o desenvolvimento e projeto incorreto ou ainda com a escolha do sistema de refrigeração inadequado (Steinko, 2004).

Uma das principais preocupações na fase de projeto de layout é a viabilidade da construção do sistema de refrigeração dentro da inserção do molde, sem interferir com os outros componentes do molde.

Os projetos dos sistemas de refrigeração aplicados ao molde de injeção, normalmente costumam estar situados onde há espaço disponível para eles e não onde realmente são necessários (STITZET, SCHILCK e POOP, 2002). Na maioria das vezes os canais de refrigeração são projetados de forma intuitiva pelo projetista por tentativas e erro, contando com sua experiência.

O sistema de refrigeração tem como principal função o controle da temperatura do molde. Portanto a diferença de temperatura entre as superfícies da cavidade do molde deve encontrar-se entre 2° e 5°C. Nesses parâmetros, a refrigeração do molde torna-se eficiente, possibilitando a redução ou eliminação de possíveis tensões residuais termo-induzidas, provenientes do resfriamento desbalanceado. (MENGES e MOHREN, 2001; HARADA, 2004).

Na Figura 4 podem ser observados com maiores detalhes os efeitos do processo de resfriamento balanceado (a) e um desbalanceado (b).



Fonte: Shoemacher (2006)

A Figura 4(a) apresenta um exemplo de sistema de refrigeração balanceado e eficiente, que proporciona condições adequadas ao fluxo do material no interior das cavidades e garante o resfriamento heterogêneo da peça até atingir seu estado sólido, permitindo que seja extraída sem que apresentem distorções. Já na Figura 4(b) verifica-se uma peça com distorções aparentes, que se dá em função da ineficiência do projeto do sistema de refrigeração, onde se observa a má distribuição do mesmo, fato que não possibilita a obtenção de uma peça livre das tensões residuais termo-induzidas, originando peças com defeitos, Silva (2009).

Segundo Menges e Mohren (2001), Rees (1995), Stitzet, Schilck e Poop (2002), Harada (2004) e Brito, Matos e Mendes (2004), alguns aspectos devem ser levados em consideração para um correto dimensionamento, tendo em vista que esses aspectos têm 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 condutividade 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.

Bruto, Matos e Mendes (2004), completa que os circuitos independentes e simétricos relativo à zona, ou zonas de injeção, deve acompanhar o máximo possível da forma do produto. Desta forma se terá um arrefecimento igual, com temperaturas mais uniformes, e o percurso do fluido não deve permitir o aquecimento do fluido em 5°C.

Harada (2004) menciona que a distância e o espaçamento da superfície moldante variam quando existem seções espessas. E, indica que, na utilização de furos, para passagem de fluido refrigerante, estes devem estar localizados a uma distância mínima de 25mm à peça.

Já Manrich (2005) cita uma distância de uma vez e meia o diâmetro do furo, a partir do centro do furo à superfície moldante; e espaçamento entre furos, de três a cinco vezes o diâmetro do mesmo.

## 2.4 CIRCUITOS DE REFRIGERAÇÃO

A arquitetura dos sistemas de controle de temperatura (sistema de refrigeração) depende 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 (BRITO, MATOS e MENDES, 2004).

Este trabalho aborda alguns tipos (arquiteturas) de circuitos mais utilizados descritos por alguns autores, que serão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Exemplos de circuitos de refrigeração (continua)

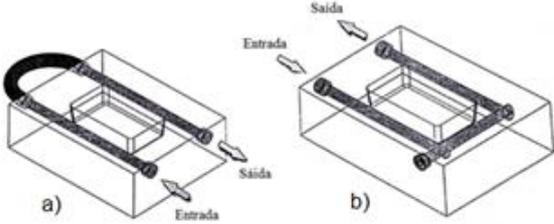
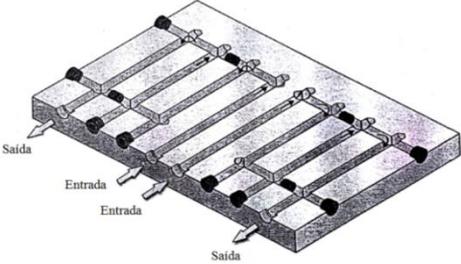
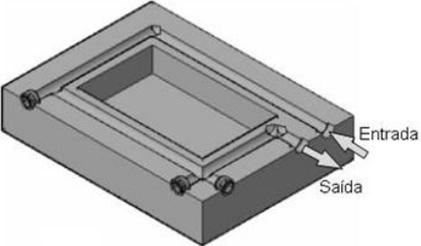
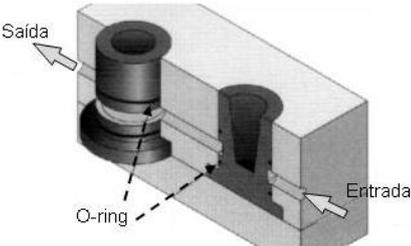
Tipo	Características
 <p data-bbox="421 757 619 790">Circuitos em U</p>	<p data-bbox="842 488 1437 770">Este tipo de circuito é usado para refrigeração de cavidades largas e estreitas. Dessa forma podem existir três tipos de ligações entre os canais, ligação feita por fora através de mangueira (Figura a), ligação interna, com furos se cruzando (Figura b).</p>
 <p data-bbox="429 1160 609 1193">Circuito em Z</p>	<p data-bbox="842 860 1437 1144">É o tipo de circuito muito utilizado para produtos planos, é bem próximo do circuito em U, porém tem mais ligações entre furos internos. Nesse tipo de circuito deve-se procurar que o número de canais seja sempre par, para que a entrada e saída estejam para o mesmo lado.</p>
 <p data-bbox="293 1509 746 1543">Circuito em cavidades retangulares</p>	<p data-bbox="842 1263 1437 1496">Este tipo de circuito é usado para o resfriamento das paredes laterais de peças retangulares, permitindo um controle térmico mais uniforme do que o circuito U, em que uma das faces da peça não seria refrigerada.</p>
 <p data-bbox="280 1883 759 1917">Refrigeração para postigos circulares</p>	<p data-bbox="842 1599 1437 1883">No caso de peças circulares o resfriamento com canais retos não são aconselháveis, já que estes não permitem acompanhar a forma da peça e, portanto, provocam um resfriamento não uniforme. Uma solução seria de usinar as cavidades em postigos circulares.</p>

Tabela 1 – Exemplos de circuitos de refrigeração (continuação)

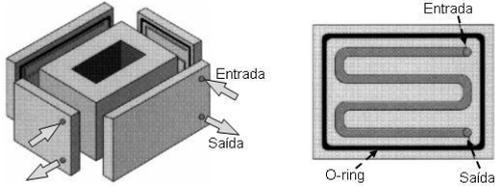
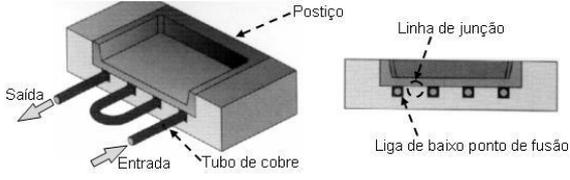
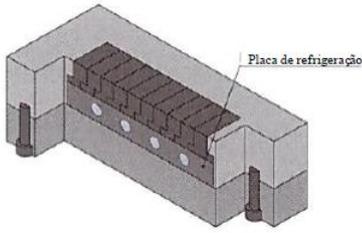
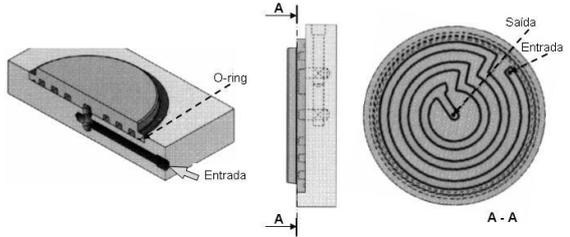
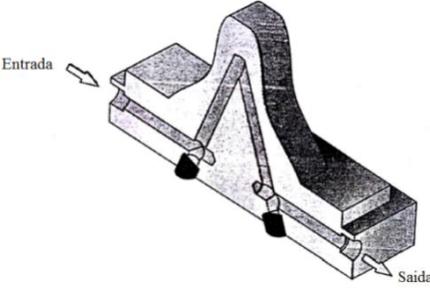
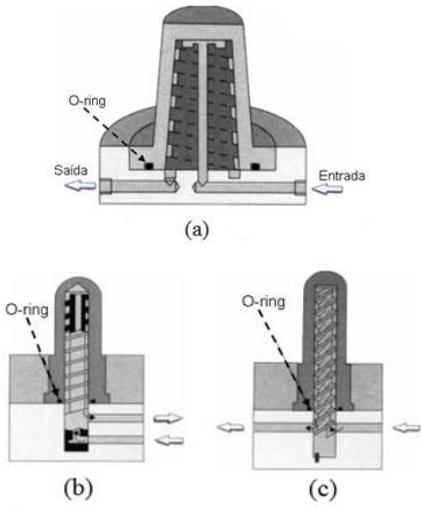
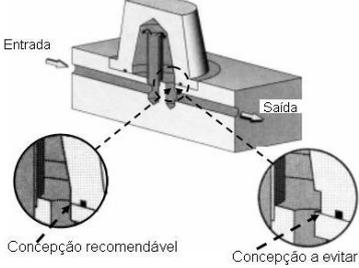
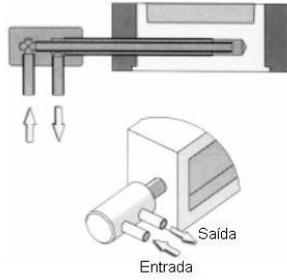
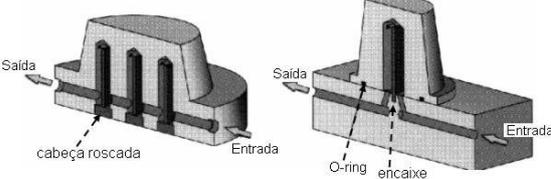
Tipo	Características
 <p data-bbox="389 555 651 589">Placas de refrigeração</p>	<p data-bbox="863 371 1417 555">Estas placas, com o circuito de refrigeração já usinado, podem ser fixadas às placas do molde através de parafusos ou por meio de solda. A vedação é promovida por vedantes (O-rings).</p>
 <p data-bbox="389 882 651 916">Uso de tubos de cobre</p>	<p data-bbox="842 703 1433 887">Uma alternativa para refrigerar peças usinadas em posições montados em caixas abertas na placa, pode ser a utilização de tubos de cobre conformáveis.</p>
 <p data-bbox="252 1205 794 1238">Placas em ligas de alta condutividade térmica</p>	<p data-bbox="842 967 1433 1196">Quando uma cavidade ou bucha tem muitos posições, extratores, parafusos, etc., não restando espaço para a circulação de refrigeração, pode-se utilizar placas de refrigeração em ligas de alta condutibilidade térmica.</p>
 <p data-bbox="304 1525 746 1559">Circuitos de água abertos em espiral</p>	<p data-bbox="842 1267 1433 1554">No caso de buchas circulares baixas de grande dimensão, pode ser usado um circuito em espiral como representado na figura ao lado. O número de espiras dependerá da dimensão da bucha. Este tipo de circuito promove uma distribuição de temperatura bastante uniforme</p>
 <p data-bbox="357 1912 699 1946">Circuito com furo inclinado</p>	<p data-bbox="842 1671 1433 1854">Outra solução será a de usinar furos inclinados ligados no topo, como o representado na figura ao lado, evitando desta forma, furar a parede lateral da bucha e os defeitos na peça</p>

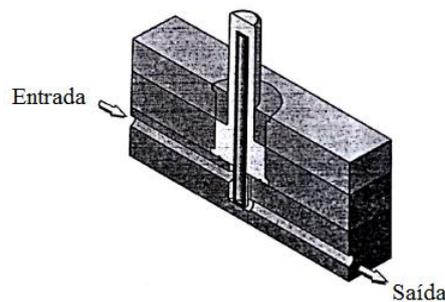
Tabela 1 – Exemplos de circuitos de refrigeração (continuação)

Tipo	Características
 <p>Circuito de água com canal helicoidal</p>	<p>No caso de buchas fundas, em que também há necessidade de refrigerar as paredes laterais das peças, podem ser utilizados canais helicoidais (figura a). Já a figura (b) mostra um circuito helicoidal simples, com componentes de refrigeração normalizados, o fluido de refrigeração entra pelo centro e desce pela helicoidal (espira vertical), e na figura (c) mostra o circuito helicoidal duplo, onde o fluido sobe por um helicoidal e desce pelo outro.</p>
 <p>Circuito de águas em cascata com núcleo de refrigeração</p>	<p>Consiste em introduzir um tubo no interior de um furo, de forma ao fluido entrar pelo interior do mesmo e sair pela folga existente entre o tubo e o furo. Um cuidado a se tomar é a formação de câmaras que irão alojar bolsas de ar, prejudiciais ao sistema.</p>
 <p>Circuito de água em cascata com núcleo de refrigeração na cavidade</p>	<p>Este sistema de circuito pode ser utilizado em cavidades, principalmente quando se pretende levar a refrigeração a algum lado que, pela falta de espaço, não permite criar um canal de retorno.</p>
 <p>Circuito de água em cascata com lâminas separadoras ou desviadoras</p>	<p>Uma alternativa também para machos onde não é possível chegar com o circuito, é fazer furos e colocar laminas separadoras.</p>

### 2.4.1 Circuito de águas com pino térmico

Se as dimensões interiores das peças forem muito pequenas, impossibilitando a utilização de qualquer dos sistemas anteriores referidos, existe ainda a possibilidade de utilização de pinos térmicos (Figura 5), que são encontrados no mercado com diâmetros de 2 à 12mm e comprimentos que variam de 25 a 250mm.

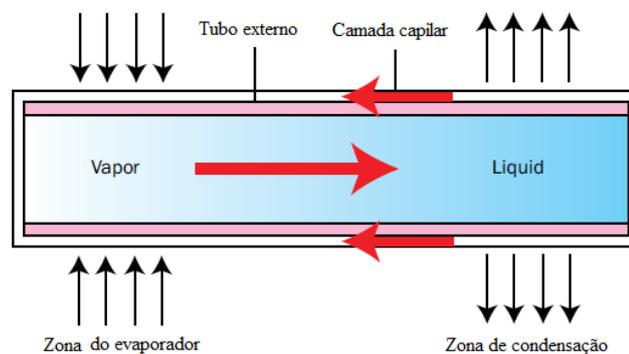
Figura 5 – Circuitos de águas com pino térmico



Fonte: Adaptado de Brito, Matos e Mendes (2004)

Um pino térmico é uma alternativa aos deflectores e borbulhadores. É um cilindro selado cheio com um fluido. O líquido vaporiza, se retira calor a partir da ferramenta de aço e condensa-se, uma vez que liberta o calor para o fluido de arrefecimento, como se mostra na Figura 6. A eficiência térmica de um pino de transferência de calor é quase 10 vezes maior do que um tubo de cobre. Para uma boa condução de calor deve-se evitar uma folga entre o pino térmico e o molde, ou enchê-lo com um selante altamente condutivo.

Figura 6 – Sistemas com tubos transferidores de calor



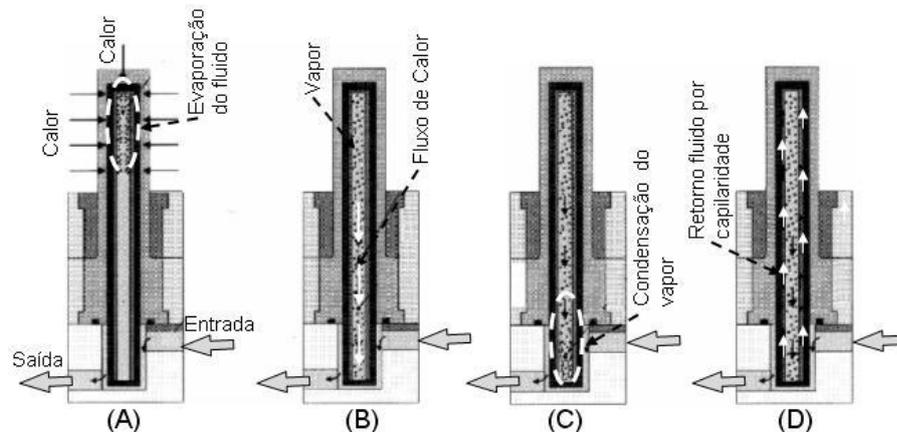
Fonte: Adaptado de Shoemaker (2006)

A eficiência deste sistema é superior ao uso unicamente de fluido como a água. Como inconveniência há os pinos que não podem ser cortados, ou seja, ajustados a uma altura determinada e, para serem eficientes, necessitam que 1/4 do seu comprimento encontre-se

banhado em um fluido refrigerante, dessa forma condicionando o projeto do molde em determinadas medidas.

Quanto ao funcionamento, dá-se de forma cíclica, conforme apresentado na Figura 7. Numa extremidade encontra-se a fonte de calor (A), onde fluido é valorizado e na sequência desloca-se para a outra extremidade (B), que se encontra mergulhada num fluido resfriado (C), momento onde o vapor perde calor e condensa, voltando à outra extremidade por capilaridade (D), assim iniciando-se um novo ciclo.

Figura 7 – Funcionamento dos pinos térmicos

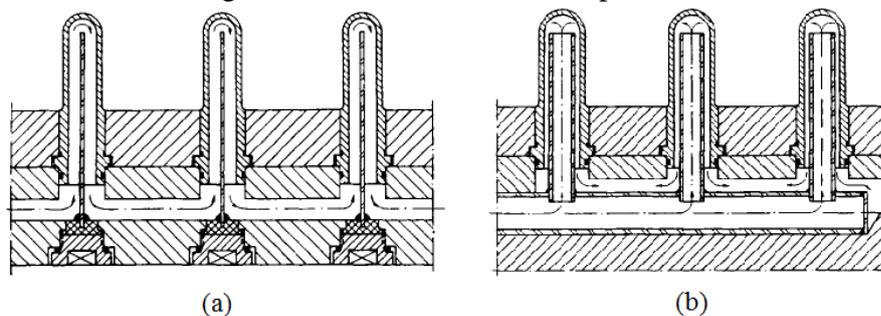


Fonte: Adaptado de Brito, Matos e Mendes (2004)

#### 2.4.2 Circuito em paralelos e série

Com o circuito em série, os núcleos individuais são fornecidos com um líquido de resfriamento seguindo um ao outro, conforme mostra Figura 8a, aumentando o diferencial de temperatura entre a moldagem, e o resfriamento diminui com o aumento do comprimento do fluxo do líquido fornecido. Com um molde multi-cavidades a qualidade de todas as peças não serão as mesmas. Para evitar este inconveniente, é utilizado o resfriamento em paralelo (Figura 8b).

Figura 8 – Circuitos em série e paralelo



Fonte: Menges e Mohren (2001)

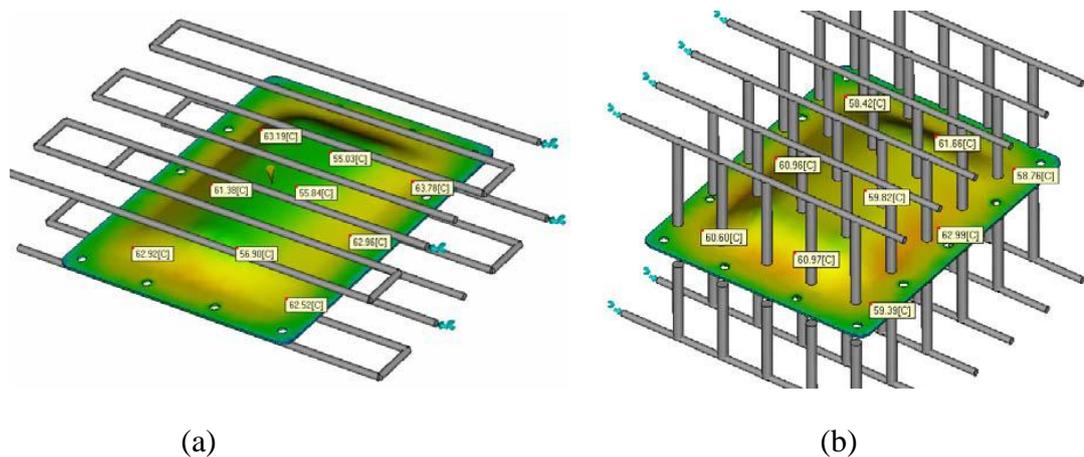
Com o resfriamento em paralelo dos núcleos individuais, a entrada do líquido ocorre por um canal, (furo) principal que distribui para os núcleos ao mesmo tempo, e sua saída ocorre por outro canal, que recebe o líquido de todos os núcleos. Dessa forma, o arrefecimento fica uniforme.

Este o objetivo desse trabalho de conclusão de curso é analisar a diferença entre circuitos de refrigeração em série e paralelo. Contudo nesse caso serão usados canais passantes furados diretamente nos insertos.

Park e Dang (2010) compararam a diferença entre a distribuição da temperatura da superfície da peça entre canais de refrigeração em linha reta (Figura 9a), e canais de refrigeração com lâminas defletoras, (Figura 9b).

O resultado mostrou que a temperatura da superfície de moldagem, com circuito de laminas defletoras distribuiu mais uniforme do que aquela de canais em linha reta, a variação da distribuição da temperatura no topo da face do molde é cerca de 8,5°C, já com lâminas defletoras caiu para 4,3°C. Diante esta diferença Park e Dang (2010), pode concluir que, o uso de canais com lâminas defletoras podem levar um controle mais eficiente e uniforme para fazer a distribuição da temperatura, e que este tipo de canal de resfriamento é eficaz para o molde de médio e grande porte para peças moldadas com uma forma complexa ou superfície de forma livre.

Figura 9 – Circuitos em furos retos e circuito com lâminas defletoras



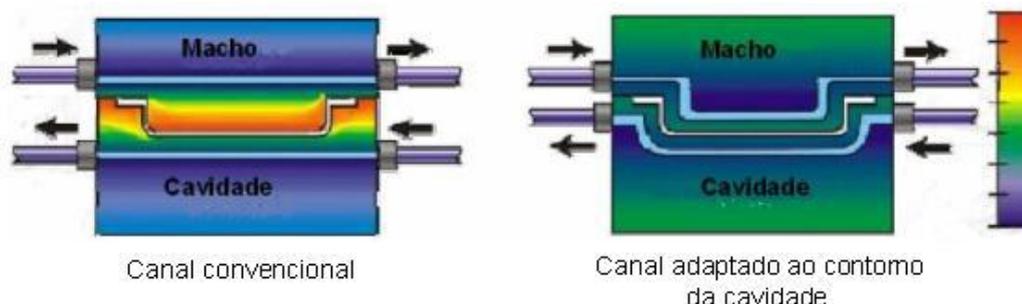
Fonte: Park e Dang (2010)

### 2.4.3 Canais para resfriamento adaptados ao contorno das peças.

De acordo com Stitz, Schilck e Poop (2002); Lima, Ramos e Pouzada (2004); Cardon (2008) e Silva (2009), são canais de resfriamento que, em função do princípio construtivo, permite que os canais sejam desenvolvidos próximo ao contorno da cavidade (Figura 10). Essa condição contribui significativamente na homogeneização do campo de temperatura nas

cavidades do molde e aumenta as taxas de transferência de calor, comparando-se aos canais tratados como convencionais.

Figura 10 – Comparação entre a eficiência dos tipos de canais



Fonte: Cardon (2008)

Os canais desenvolvidos de acordo com o perfil da cavidade podem ser obtidos através do princípio de prototipagem rápida ou outras técnicas de ferramental rápido.

## 2.5 TRANSFERENCIA DE CALOR

Segundo Manrich (2005), os moldes de injeção devem possuir um sistema de controle de temperatura e existem diversas maneiras de se calcular a troca de calor, bem como dimensionar os canais de resfriamento.

Durante a refrigeração do molde alguns mecanismos de transferência de calor ocorrem: a condução, a convecção e a radiação, esses mecanismos devem remover o calor que foi conduzido para dentro da cavidade pela massa fundida.

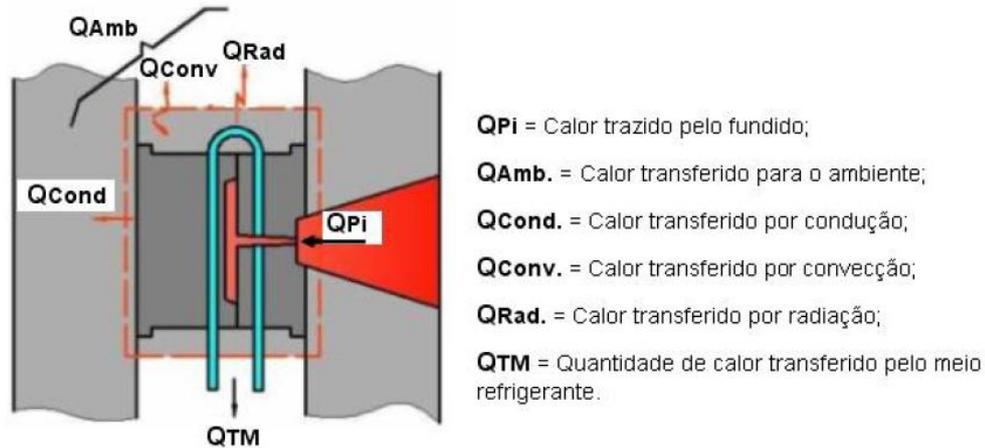
Ainda segundo Manrich, ao projetar o sistema de refrigeração de um molde de injeção devem-se levar em conta esses mecanismos de transferência de calor, mas o dimensionamento exato desse sistema envolve um desenvolvimento matemático mais complexo. Conhecimentos avançados de transferência de calor e mecânica dos fluidos que muitas vezes não são de conhecimento do projetista que acabam usando de suas experiências em projetos passados ou até mesmo na forma de tentativas e erros.

Desta forma Brito, Matos e Mendes (2004), propõem algumas simplificações implícitas para fazer os cálculos não afetando de maneira significativa os resultados que em termos práticos continuam a ser satisfatórios, sendo eles:

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

Na Figura 11 ilustra esquematicamente o balanço térmico no molde de injeção onde estão representados os mecanismos de transferência de calor envolvidos no processo.

Figura 11 – Transferência de calor em um molde



Fonte: Adaptado de Brito, Matos e Mendes (2004)

Silva(2009), explica como ocorre estes três mecanismos:

- convecção ( $Q_{conv}$ ) - A convecção pode se dar de duas formas, a primeira através da convecção natural na superfície do molde com o ambiente que o circunda ( $Q_{Amb}$ ) durante todo o processo de injeção e a segunda através da convecção forçada, quando se bombeia o fluido refrigerante pelos canais de refrigeração ( $Q_{TM}$ ) ou mesmo, por resfriamento através do sopro de ar no molde aberto;
- condução ( $Q_{cond}$ ) - ocorre na transmissão do calor do polímero fundido, através dos componentes do molde, chegando aos canais de refrigeração;
- radiação ( $Q_{rad}$ ) - O calor transferido por radiação ocorre do molde para o ambiente que o circunda ( $Q_{Amb}$ ).

Para calcular estes mecanismos na transferência de calor, será apresentada uma série de equações que, de acordo com Menges e Mohren(1993), Manrich (2005) e Brito, Matos e Mendes (2004), são utilizadas no dimensionamento de um sistema de refrigeração.

Para efeitos do balanço térmico no molde, considera-se como positivo o calor recebido pelo molde e negativo, o calor cedido, assim o balanço térmico é expresso pela equação 1:

$$\sum_i = Q_i = Q_{TM} + Q_{PI} + Q_{Amb} = 0 \quad (1)$$

Onde se obtém a equação 2:

$$Q_{Amb} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} = 0 \quad (2)$$

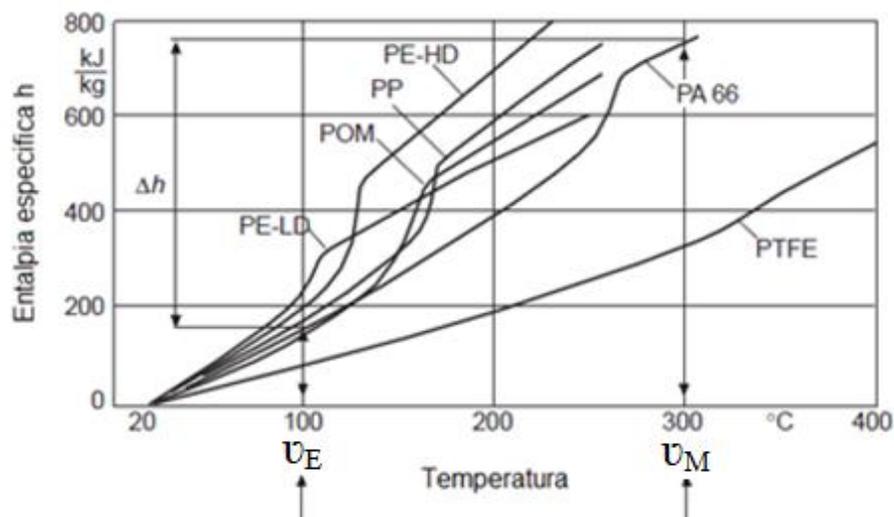
O fluxo de calor cedido pelo fundido, durante o tempo em que a cavidade do molde permanece cheia, é dado pela equação 3:

$$Q_{PI} = \frac{m (h_{inj} - h_{ext})}{t_c} \quad (3)$$

Onde  $m$  é a massa fundida injetada (kg),  $h$  é a entalpia de injeção e extração do polímero respectivamente (J/kg), e  $t_c$  é o tempo de residência do material no molde (s).

Na Figura 12 está representada a entalpia de alguns polímeros em função da temperatura.

Figura 12 – Variação da entalpia para alguns polímeros.



Fonte: Zölner (1997)

O tempo de residência do material no molde, que se pode considerar como sendo o tempo de arrefecimento, pode ser calculado pela equação de Wübken, 4:

$$t_c = \frac{s^2 \cdot \ln[(k \cdot Y)]}{\pi^2 \cdot \alpha_{ef}} \quad (4)$$

Onde que:

$s$  – espessura da parede (m);

$\alpha_{ef}$  – difusividade térmica efetiva do polímero ( $\mu\text{m}^2/\text{s}$ );

$k$  – coeficiente dependente da espessura da peça ( $4/\pi$  para  $s \leq 3$  mm e  $8/\pi^2$  para  $s > 3$ );

$Y$  – temperatura adimensional dada pela equação 5:

$$Y = \frac{T_{inj} - T_{mol}}{T_{ext} - T_{mol}} \quad (5)$$

Onde,  $T_{inj}$ ,  $T_{ext}$  e  $T_{mol}$  são as temperaturas de injeção, de extração e do molde ( $^{\circ}\text{C}$ ). Na Tabela 2 são apresentados valores da difusividade térmica efetiva média para alguns polímeros.

Tabela 2 – Difusividade térmica efetiva para alguns polímeros

Material	$\alpha_{ef}$ ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	$T_{cav}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
Polycarbonato	105	70 a 90
Poliestireno	80	20 a 70
ABS	80	40 a 80
PMMA	75	70
PVC	70	30 a 60
PEBD	90	20
PEBD	75	60
PEAD	95	20
PEAD	55	80
Polipropileno	65	20 a 80
Poliacetal	65	60
Poliacetal	50	100
Nylon 6	70	80 a 100
Nylon 6.6	85	80 a 100
PBT	90	80 a 100

Fonte: Adaptado de Brito, Matos e Mendes (2004)

A transferência de calor para o ambiente dá-se pelos três processos habituais: condução, convecção e radiação, que são apresentados nos próximos subitens.

### 2.5.1 Condução

Dá-se por via de placas de fixação do molde, sendo proporcional à diferença entre as temperaturas do molde,  $T_{mol}$  e a temperatura do ambiente,  $T_{amb}$  e pode ser calculada de acordo com a equação 6:

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

Sendo  $A_{fix}$ , a área de contato do molde e  $\beta$ , o fator de proporcionalidade ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ), que esta exemplificado na Tabela 3:

Tabela 3 – Fator de proporcionalidade

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

Fonte: Adaptado de Brito, Matos e Mendes (2004)

Segundo Brito, Matos e Mendes (2004), as trocas de calor para o ambiente, as perdas por condução são as maiores (aproximadamente 70 a 80% do total das perdas de calor para o ambiente). Para reduzi-las, os moldes que vão trabalhar a temperaturas elevadas (maiores que 60 °C), deverão ter placas isoladoras.

### 2.5.2 Convecção

Dá-se pela área lateral do molde, podendo ser calculado pela equação 7:

$$Q_{conv} = A_{lat} \cdot \alpha \cdot (T_{amb} - T_{mol}) \quad (7)$$

Onde:  $A_{lat}$ , é a área exposta do molde ( $m^2$ );  $\alpha$ , o coeficiente de transferência de calor para convecção livre do ar ( $\approx 15 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ).

### 2.5.3 Radiação

O fluxo de radiação pode ser calculado pela equação 8:

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

Onde:  $\varepsilon$  é o fator de emissão (0,25 para o aço);  $C_{rad}$ , o coeficiente de radiação do corpo negro ( $5,77 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ); a temperatura absoluta ( $\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,18$ ). Conhecido o valor de calor transportado pelo polímero fundido (sempre positivo para os polímeros) e das trocas de calor com o ambiente (geralmente negativo, exceto quando a temperatura do molde é inferior à ambiente), a quantidade de calor a ser retirada pelo fluido refrigerante pode ser calculada pela equação 9 de balanço térmico:

$$Q_{TM} = Q_{PI} - Q_{amb} \quad (9)$$

## 2.6 CÁLCULO DA VAZÃO DO FLUIDO REFRIGERANTE

A vazão do fluido refrigerante através de uma linha de resfriamento é estimada fixando-se o aumento de temperatura durante a passagem pelo molde. Essa variação de temperatura deve ser, em geral, de 2,5°C. A vazão é dada pela equação 10:

$$\dot{m} = \frac{|Q_{TM}|}{c \cdot \Delta T} \quad (10)$$

Onde: c é o calor específico do fluido (4,186 KJ/Kg.°C para água);  $\Delta T$ , variação da temperatura do fluido.

Para que a transferência de calor seja mais eficiente, deve-se garantir que o escoamento seja turbulento. Isto ocorre quando o número de Reynolds é superior a 3500. Na Tabela 3, mostra a relação entre o número de Reynolds e o tipo de escoamento.

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)

Para calcular o número de Reynolds se usa a equação 11:

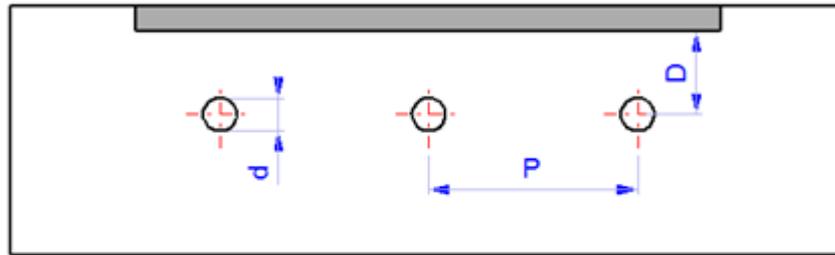
$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (11)$$

Sendo que V é a velocidade do escoamento do fluido refrigerante, D é o diâmetro de tubulação e  $\nu$  a viscosidade cinemática do fluido.

Sendo, e, a distância dos canais à superfície do polímero fundido; K, a condutividade térmica do material do molde (J/m.s.°C); d, o diâmetro dos canais (m);

Para que a temperatura nas superfícies moldantes seja mais uniforme, o distanciamento entre os canais deve, na medida do possível, obedecer às relações apresentadas na Figura 13.

Figura 13 – Distâncias dos furos



$d$  = diâmetro dos canais de refrigeração  
 $P$  = passo entre canais - 2,5 a 3,5 $d$   
 $D$  = profundidade dos canais - 0,8 a 1,5 $d$

Fonte: Adaptado de Manrich (2005)

As distâncias entre os furos e do produto dos circuitos série e paralelo que serão estudados neste trabalho, seguirão as relações apresentadas na Figura 27.

### 3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

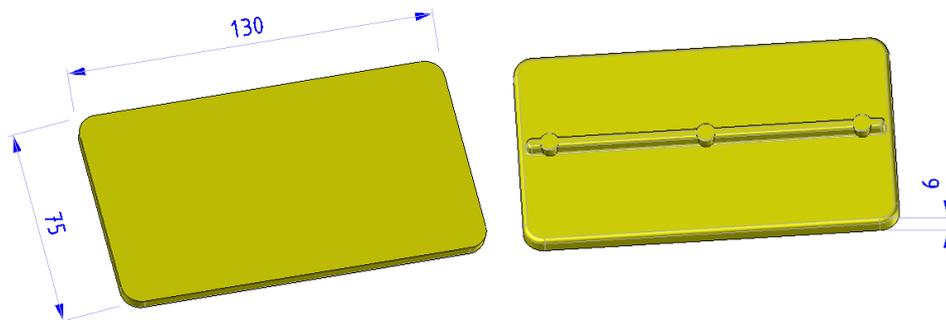
Neste capítulo, é apresentada a descrição do desenvolvimento experimental deste trabalho, sua definição e planejamento, quais os equipamentos e materiais que foram utilizados para chegar aos resultados dos testes realizados.

#### 3.1 MATERIAL E FERRAMENTAS UTILIZADAS

##### 3.1.1 Protótipo

O corpo de prova utilizado para este trabalho foi uma placa plana de 130mm x 75mm com 6mm de espessura e uma nervura no centro. Essa geometria foi escolhida porque, como o trabalho se trata de análise de resfriamento, uma geometria plana é interessante para avaliar a deformação, as marcas de linha de fluxo e manchas na peça moldada. As dimensões da geometria escolhida foi definida de acordo com a adaptação no molde protótipo, sendo assim necessária apenas a fabricação das cavidades e não de todo o molde. A Figura 14 mostra um esboço do corpo de prova.

Figura 14 – Corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

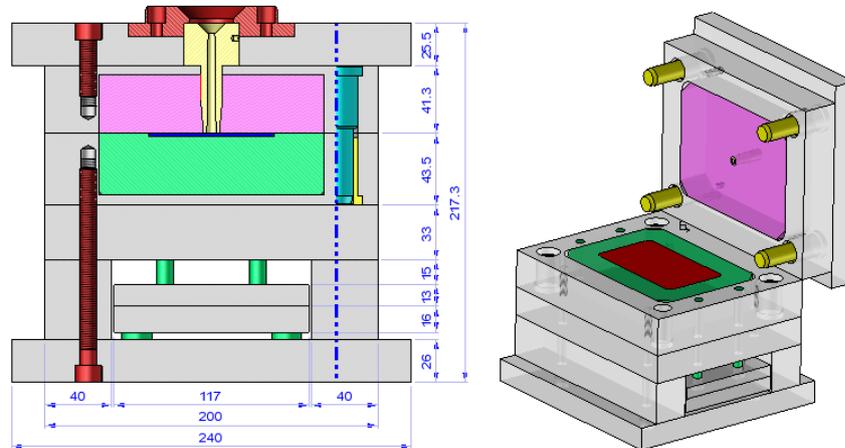
O material utilizado foi o Polipropileno (PP) CP241 da Braskem, com índice de fluidez de 20 g/min, os demais dados do material estão no Anexo C. Esse polímero foi selecionado, por ser um polímero semicristalino, apresentando fácil processamento, ampla faixa de cristalinidade, boa estabilidade do fundido, elevada resistência mecânica (CANEVAROLO, 2004; BLASS, 1988).

##### 3.1.2 Molde de injeção experimental

Foi utilizado um molde protótipo da Universidade de Caxias do Sul com o objetivo de redução de custos e tempo de fabricação, onde neste foi substituída as cavidades de acordo

com a proposta deste trabalho. Este molde apresenta a configuração básica de duas placas, conforme Figura 15.

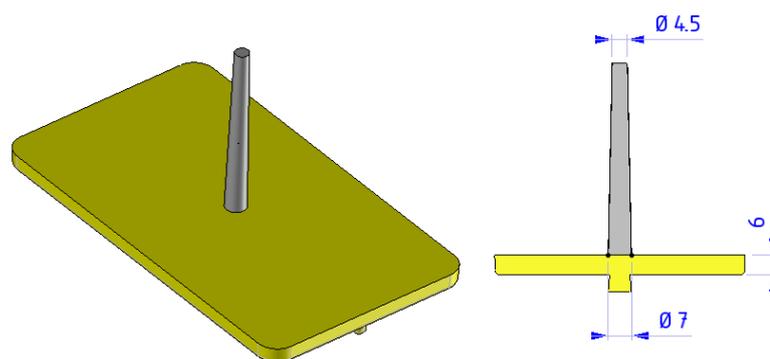
Figura 15 – Desenho Molde Protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

O molde possui as dimensões de 240mm x 250mm x 217.3mm, as placas que correspondem a estrutura é de material AISI 1045, e possui 4 colunas e buchas para fazer o guiamento no instante de abertura e fechamento. A forma de injeção do polímero foi através de uma bucha fria, com injeção direta na peça, foi tomado o cuidado para que o diâmetro de entrada de material na peça fosse maior que a espessura para assim evitar o congelamento do canal antes da peça. A forma de injeção esta indicada na Figura 16.

Figura 16 – Forma de injeção

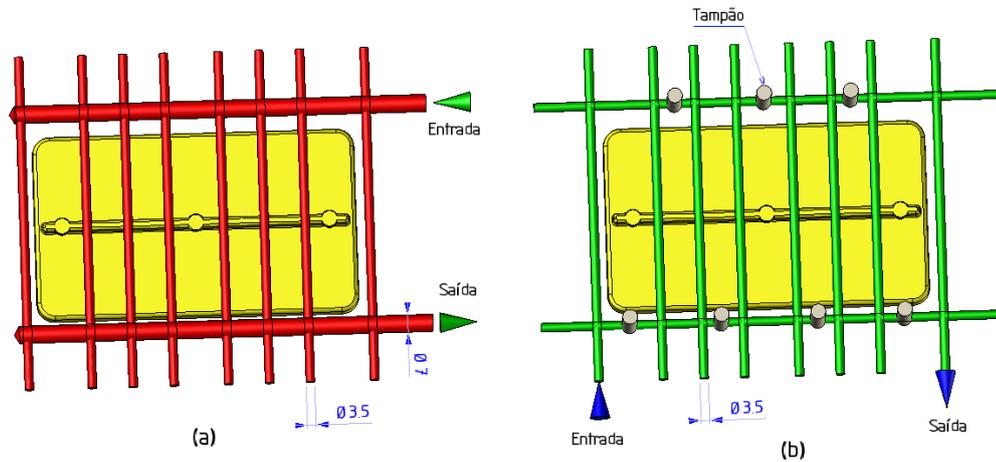


Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

O molde protótipo que foi utilizado no primeiro momento não possuía refrigeração definida, entretanto, para a elaboração deste trabalho com o objetivo de analisar as diferenças em circuitos de refrigeração para isso foram projetado os dois tipos de circuitos (série e paralelo), com base nas análises virtuais descritas no decorrer deste trabalho.

A Figura 17 mostra as configurações dos circuitos em paralelo (a), e o circuito em série (b) que foram analisados.

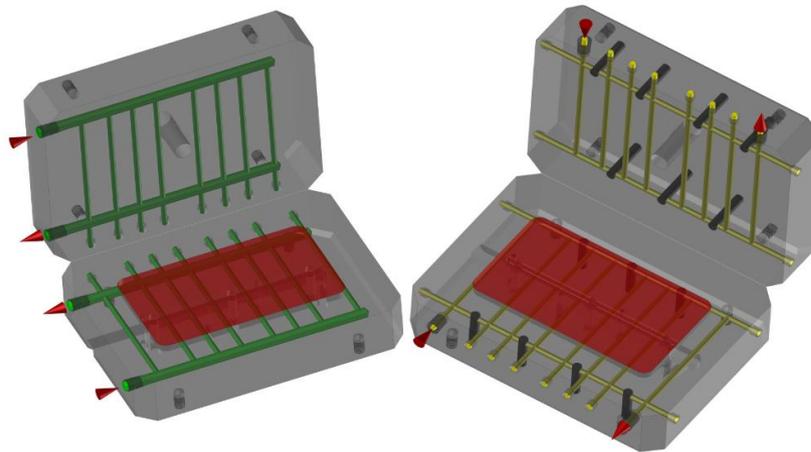
Figura 17 – Circuito em paralelo (a) e série (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Para a utilização deste molde experimental foram projetados duas cavidades e dois machos intercambiáveis, sendo um conjunto com a configuração de refrigeração em paralelo e o outro em série. A Figura 18 mostra as imagens do conjunto moldante que foi projetado para as análises.

Figura 18 – Machos e cavidades projetados



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

### 3.1.3 Análise computacional

Após definido o modelo do corpo de prova e o sistema de refrigeração a ser utilizado, optou-se por simular o processo antes de passar para a fase de fabricação do molde, a fim de prever o comportamento do processo, identificar possíveis problemas que possam surgir, bem como definir previamente os parâmetros de processo a serem utilizados na regulagem inicial da injetora. Para isso foi escolhido o software da Autodesk denominado Autodesk Simulation

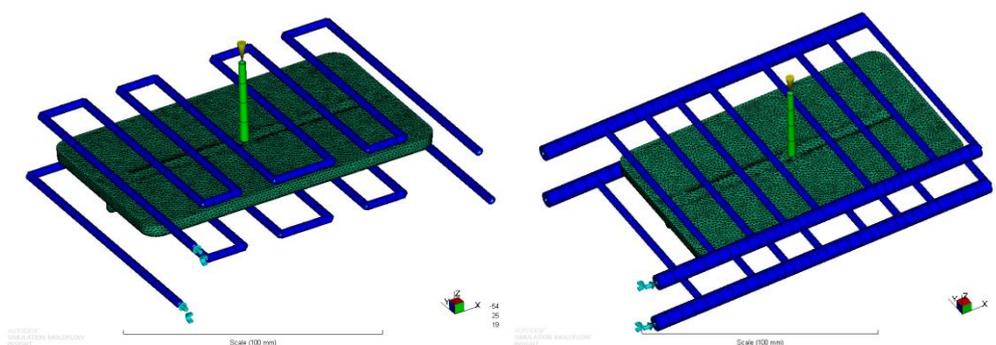
Moldflow Synergy (ASMI), que era antigamente conhecido como MoldFlow. Este software é especificamente um simulador de injeção de termoplásticos, podendo simular todas as fases do processo desde o preenchimento, compactação (recalque), refrigeração do molde e deformação (empenamento) da peça.

A simulação é realizada através de uma malha de elementos finitos que é gerada a partir de um modelo sólido criado em outro software modelador de sólidos denominado TopSolid e importado via formato neutro tipo “parasolid”. O MoldFlow permite realizar simulações através de três tipos de malha, quais sejam em ordem crescente de precisão malha Midplane, malha Dual-Domain e malha 3D, cada uma utilizando um tipo diferente de algoritmo para calcular a simulação.

A escolha de qual tipo de malha a ser utilizado levou em conta a geometria do corpo de provas, o qual possui uma espessura elevada em relação ao seu tamanho (largura e comprimento). Nestes casos a malha 3D é mais indicada por ser constituída de tetraedros e por isso oferece maior precisão no cálculo do comportamento do material em cada ponto do volume interno da cavidade.

A partir das simulações foi possível definir os parâmetros de processo a serem utilizados na injetora, tais como velocidade de injeção, pressão e tempo de recalque, tempo total de ciclo, etc. Uma simulação é um cálculo matemático e por mais sofisticado que ele seja, não consegue prever cem por cento dos fatores que interagem durante o processo de moldagem. Portanto, estes parâmetros não são determinantes, mas devem ser entendidos como uma orientação para a regulagem da injetora. Posteriormente, quando da realização dos testes práticos, estes parâmetros são definitivamente regulados. A seguir, é apresentado a configuração do modelo simulado no MoldFlow, (Figura 19).

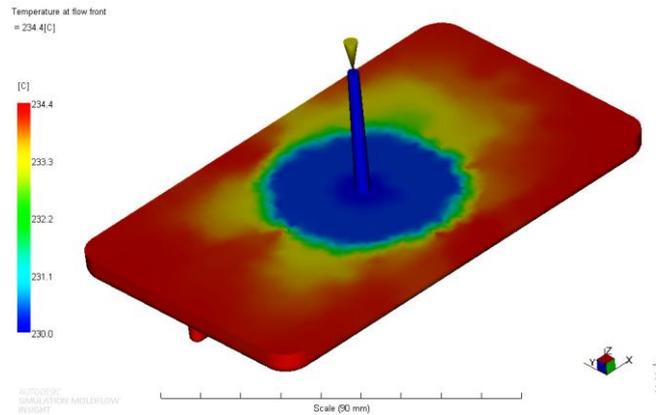
Figura 19 – Modelo simulado no Moldflow



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Para as duas configurações simuladas foram mantidas algumas constantes como a temperatura do polímero injetado em 230°C, vazão do refrigerante à 15 l/min, e temperatura de entrada da água em 22°C. Pode-se observar na Figura 20, o gradiente de temperatura do fluxo frontal não ultrapassa 5°C. Condição para que o fluxo de massa fundida se una completamente, eliminando a presença de linhas de solda.

Figura 20 – Simulação de temperatura na frente de fluxo

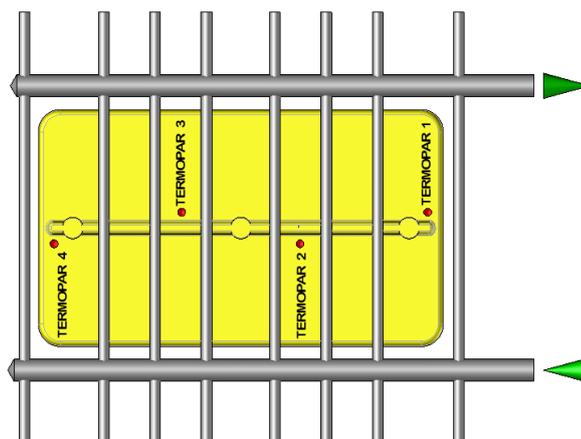


Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Os resultados dessa análise completa podem ser observados no Anexo A.

Com o auxílio das análises virtuais foram escolhidos os pontos de posicionamento para instalação dos termopares (Figura 21) que serviram para obter a temperatura aproximada num ponto específico.

Figura 21 – Posição termopar



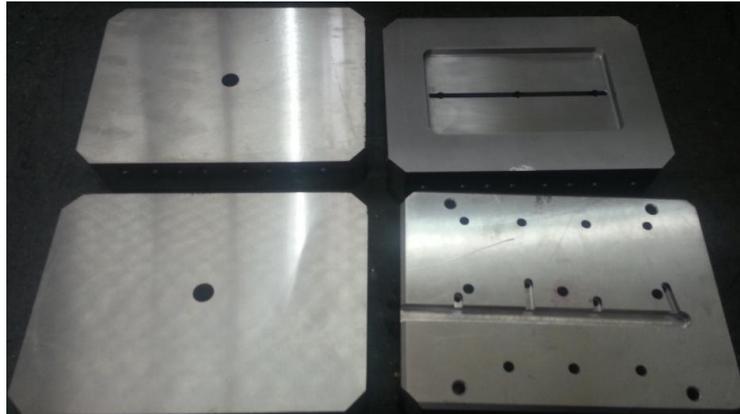
Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

As temperaturas coletadas pelos termopares serviram para fazer um comparativo entre os dois circuitos, bem como para avaliar a eficiência dos mesmos mantendo as cavidades com as temperaturas desejadas.

### 3.2 FABRICAÇÃO DO MOLDE

Após toda definição de projeto e simulação, começou o processo de fabricação das cavidades. O material utilizado para a construção das cavidades foi o P20, muito usado nas construções de moldes onde há contato com a superfície do produto. A Figura 22 mostra as imagens dos insertos que foram fabricados para as análises.

Figura 22 – Machos e cavidades fabricados



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Com as cavidades usinadas começou a parte de montagem do molde e ajustes, deixando o molde pronto para injetar os corpos de provas. A Figura 23 mostra o molde que foi utilizado para os testes com um dos conjuntos de macho e cavidade e termopares montados.

Figura 23 – Molde experimental pronto para teste



Fonte: Elaborado pelo autor (2013)

Toda essa parte construtiva das cavidades bem como, aquisição do material, furações de refrigeração, alojamento dos termopares, usinagem (CNC) da configuração do produto, e

montagem do molde, foram desenvolvidas internamente na empresa Belga Matrizes, onde foram trabalhadas aproximadamente 40 horas.

### 3.2.1 Instrumentação do molde

Para fazer a medição de temperatura das cavidades durante o ciclo de injeção, foram instalados quatro termopares no interior de cada macho. No primeiro teste foram utilizados termopares tipo K de fabricação Minipa com faixa de medição de -50 a 250°C e incerteza de  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ , conforme Figura 24.

Figura 24 – Termopar tipo K



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Devido o cabo ter apenas um metro de comprimento, se houve dificuldades na instalação do mesmo em chegar com os cabos até o scanner. No entanto, para o segundo teste foram utilizados termopares tipo K (Figura 25) de compensação de 2 metros de comprimento de cabo.

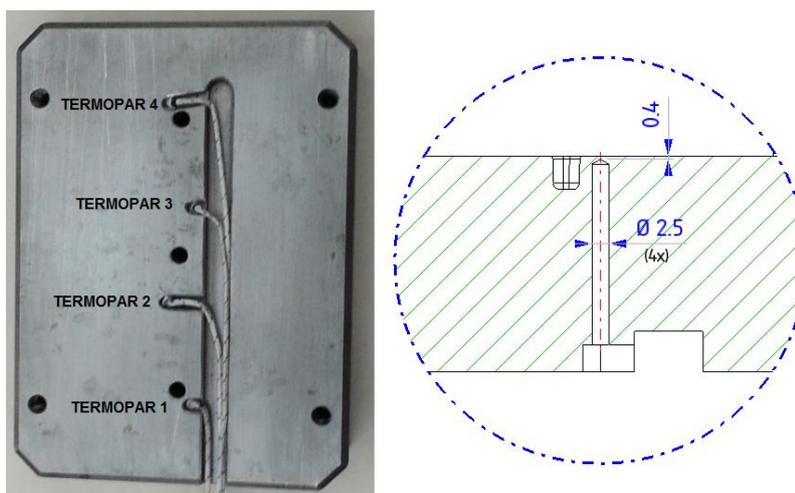
Figura 25 – Cabo de compensação tipo K



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Os termopares foram alojados em uma região próxima a superfície de contato com o polímero injetado (aproximadamente 0,4mm). A posição e os alojamentos de instalação são mostrados na Figura 26.

Figura 26 – Posicionamento dos termopares



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

O sistema utilizado para a aquisição de dados foi um *scanner* 5100 com 5 portas de saída para termopar da marca *VISHAY*, modelo *System 5000*.

O sistema de aquisição de dados é um conversor A/D de 16 bit (resolução típica usual 15 bit). O tempo total de conversão por leitura é de  $40 \times 10^{-3}$  s, sendo que a taxa de amostragem é de 1 ms por ponto. Isso equivale a 1000 medições/s, igual a 1000Hz.

Os canais de entrada em cada placa são varridas sequencialmente a 25000 medições/s e com o auxílio de um micro computador e são armazenados na memória dentro de um intervalo de 1 ms. Os dados são convertidos em um arquivo texto e processados posteriormente no *software* Excel.

### 3.2.2 Termômetro infravermelho

O termômetro óptico foi utilizado para a medição da temperatura da peça no momento da extração. Este termômetro na sua medição abrange uma área mínima de  $18\text{mm}^2$  numa faixa de temperatura que vai de  $-18$  a  $275^\circ\text{C}$ , com precisão de 2% ou variação de  $\pm 2^\circ\text{C}$ .

### 3.2.3 Termômetro digital

Foi utilizado para a medição da temperatura de entrada da água. O equipamento foi um termômetro de referência NOVUS 51, e apresenta uma resolução de  $0,10^\circ\text{C}$ .

## 3.3 TESTE EXPERIMENTAL

A máquina de injeção utilizada para o experimento foi uma Himaco LH 150-80 de 80 toneladas de força de fechamento, instalada do Laboratório de Polímeros (LPOL) da

Universidade de Caxias do Sul. Também foi instalado o sistema computadorizado (Figura 27) para a aquisição de dados de temperatura *VISHAY System 5000* (item 3.2.1).

Figura 27 – Injetora Himaco LH 150-80 e Refrigerador de água



Fonte: UCS (2013)

Para fazer a circulação de água no interior do molde, foi utilizado refrigerador de água modelo TC-12 de fabricação Tecnoclima (Figura 27), com capacidade de resfriamento de 20934W e com um reservatório de 230 litros. Este equipamento é uma máquina de condensação a água que permite o controle de pressão, proporcionando uma vazão constante.

Com as configurações simuladas, se usou os parâmetros das simulações para programar a máquina injetora. Mas cabe lembrar que o CLP da máquina não possui a mesma resolução do *software* da análise, optou-se por arredondar os valores para cima. O programa do CLP da máquina injetora HIMACO, usada nesse trabalho, está configurado a ter como entrada de dados um valor percentual para a velocidade de injeção e para a temperatura da zonal final do canhão de injeção (bico). Por isso, a valor da velocidade de injeção é um percentual da relação existente entre a pressão hidráulica máxima rotação e geometria da rosca de injeção.

### 3.4 VALIDAÇÃO

Foi injetado um lote de corpos de prova a fim de fazer análises. De acordo com HARADA, (2004); MANRICH, (2005) e CANEVAROLO, (2004), a refrigeração ineficiente nos moldes de injeção causam defeitos nas peças moldadas, e alguns desses defeitos, descritos na sequência, serão avaliados nas peças injetadas.

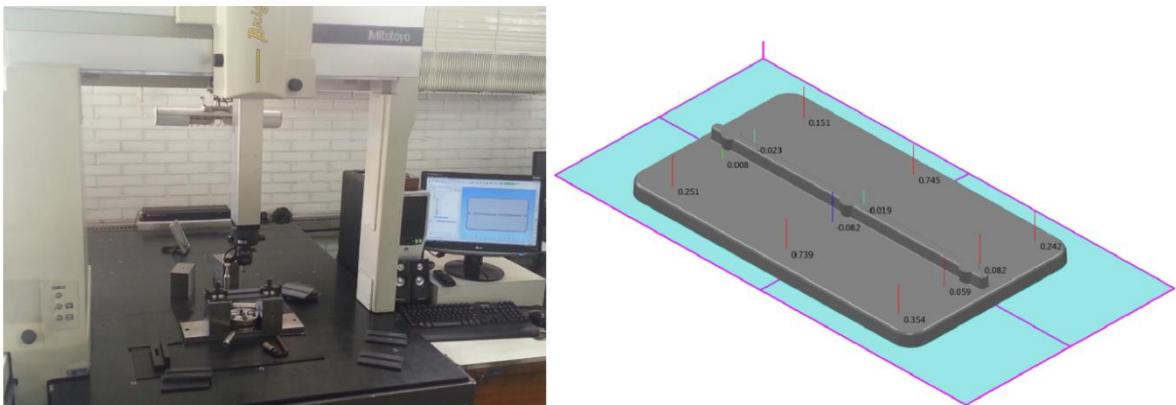
#### 3.4.1 Dimensional, Forma e Aparência

As análises dimensionais serviram para fazer uma avaliação quanto à contração e deformação das peças injetadas. As medições nos corpos de prova foram realizadas no

laboratório de metrologia da empresa Belga, ambiente de temperatura controlada em 20°C, e umidade relativa de 50% onde as amostras foram mantidas por 48 horas após o processo de injeção, para dar início às medições. Com relação à aparência das amostras injetadas, a análise foi visual, com o objetivo de identificar manchas e linhas de emenda.

Para a forma, foram analisadas juntamente com a deformação das amostras, as mesmas foram medidas na máquina tridimensional da marca Mitutoyo, comparando com o modelo 3D, onde foi definido um plano de referência, e com isso foi medido 12 pontos sobre a superfície da peça, conforme ilustrado na Figura 28.

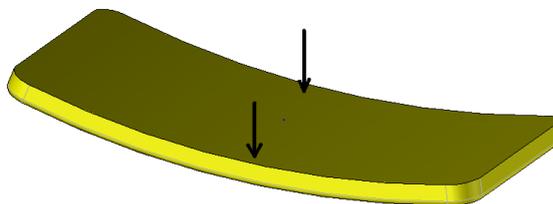
Figura 28 – Medição de deformação na tridimensional



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Os seis pontos próximos da nervura central, para o resultados foram desconsiderados por terem sofrido deformações influenciados pela nervura. As amostras sofreram deformações formando uma flecha central, essa deformação será mostrada na Figura 29 como uma imagem ilustrativa de como essa deformação ocorreu.

Figura 29 – Indicação de deformação das amostras



Fonte: Elaborado pelo autor

As setas indicadas na Figura 29 mostram a região onde as amostras sofreram maior deformação, esses resultados serão mostrados na sequencia do trabalho.

Para medir o comprimento e a largura utilizou-se um paquímetro com relógio da marca Tesa e de abertura máxima de 150mm e resolução 0,02mm, já para medir a espessura

foi utilizado um micrometro externo com faixa de medição de 0 – 25mm e resolução de 0,001mm da marca Mitutoyo.

As medidas de controle foram o comprimento (130mm), a largura (75mm) e a espessura (6mm). Para fazer essas medições foram utilizadas cinco amostras de cada configuração analisada. Também foram avaliadas as marcas visuais da peça como, linha de fluxo e machas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados associados aos testes, equipamentos e recursos utilizados, todo o processo para a obtenção das amostras, os resultados obtidos, assim como sua análise e conclusão. Esses resultados são divididos em duas seções, devido à necessidade de ter feito dois testes experimentais que serão justificados na sequência do trabalho.

### 4.1 TESTE PRÁTICO 1

Com o molde usinado, ajustado e montado foi então, instalado na injetora do Laboratório de Polímeros (LPOL) da Universidade de Caxias do sul, conforme descrito no item 3.3, para então se dar início ao teste prático. A Figura 30 mostra o molde montado na máquina injetora.

Figura 30 – Molde montado na injetora



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

No momento da ligação das mangueiras de refrigeração foi tomado o cuidado para fazer a ligação de entradas e saídas do mesmo lado (entradas em baixo e saídas em cima), para manter a mesma direção do fluxo do refrigerante em ambas as cavidades.

Os parâmetros iniciais de processo foram determinados pela simulação feita no *software* MoldFlow®, mas para chegar a um processo estável com as peças livres de falhas e imperfeições, alguns parâmetros foram definidos no momento do teste direto na máquina

injetora. Com o processo estabilizado, foram coletados os parâmetros de saída do painel da máquina injetora, que seguem abaixo:

- a) tempo de injeção (injeção + recalque) 5,5s;
- b) tempo de resfriamento 30s;
- c) pressão de injeção 103Mpa;
- d) pressão de recalque 47Mpa;
- e) temperatura do fundido 230°C.

A vazão utilizada foi de 15 l/mim, e a temperatura de entrada da água no molde foi de 22°C.

Foi injetado primeiramente um lote de 10 peças com os insertos de circuito de refrigeração em série. Após o término de injeção do lote, foi retirado o molde da injetora e substituído os insertos de circuito em série para os insertos de circuito em paralelo. Feito isso, foi montado o molde novamente na injetora, ligado os termopares no scanner e repetido os mesmos parâmetros de injeção para tirar o lote de 10 peças do circuito em paralelo. Na Figura 31 pode ser observada uma das amostras injetadas.

Figura 31 – Peça protótipo injetada



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

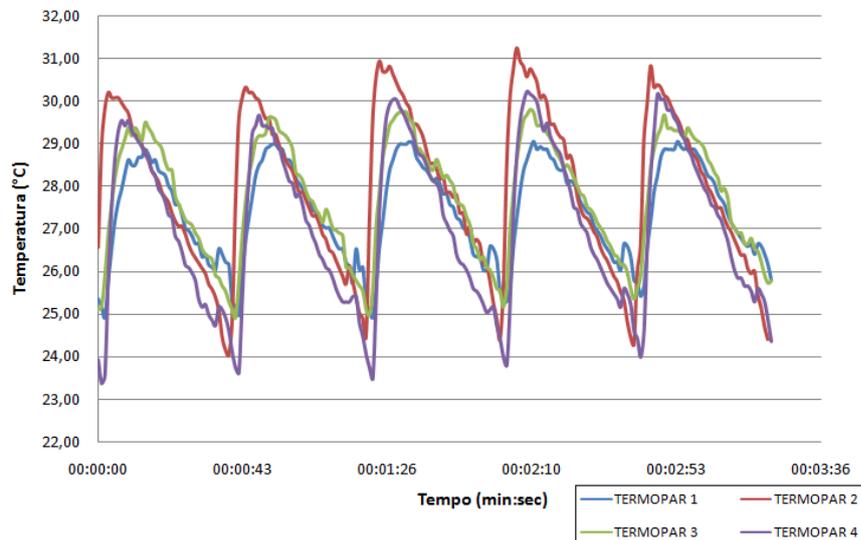
## 4.2 RESULTADOS DO TESTE 1

### 4.2.1 Dados coletados pelos termopares

Esse estudo foi realizado para verificar o comportamento térmico dos dois tipos de circuito de refrigeração testados durante o processo de injeção. Contudo, na sequência (Figura 32 e 33) são mostrados os gráficos com cinco ciclos de injeção completos e consecutivos para

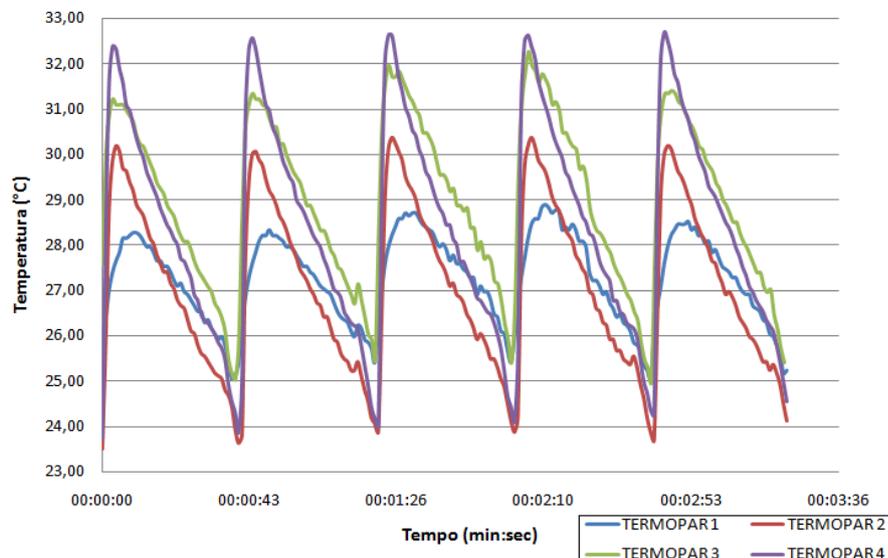
cada sistema monitorado pelos termopares, considerando os parâmetros de injeção descritos no item 4.1.

Figura 32 – Gráfico do circuito em série T1



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Figura 33 – Gráfico do sistema em paralelo T1



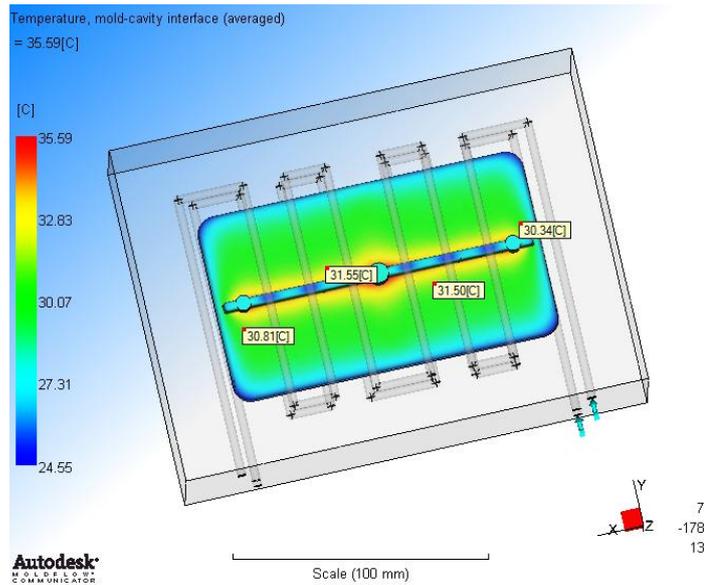
Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

O ponto mais alto de cada curva dos gráficos é o momento de injeção, quando a cavidade esta sendo preenchida, e após o preenchimento total da cavidade e da fase de recalque começa o período de resfriamento, momento que a temperatura estabiliza e chega ao ponto mínimo da curva do gráfico.

Nas Figuras 32 e 33 observa-se através das leituras dos termopares que, no sistema de refrigeração paralelo há uma oscilação de temperatura maior que o circuito em série, o que

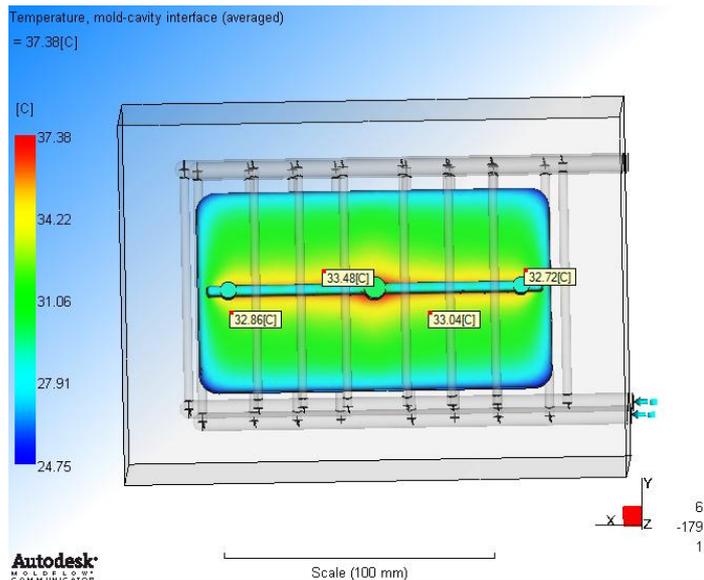
pode resultar em uma deformação maior nas amostras injetadas com o circuito em paralelo. Já no circuito em série as leituras dos termopares mostraram que as temperaturas no interior do inserto mantiveram-se com oscilações menores e mais estáveis. As temperaturas ficaram próximas de 30°C, temperatura indicada para o polímero que está sendo injetado. Nas simulações no Moldflow® foi identificado o mesmo efeito com relação à diferença de temperatura entre os circuitos, resultados que podem ser analisados nas Figuras 34 e 35.

Figura 34 – Temperatura na superfície de contato com o produto – série T1



Fonte: Elaborado pelo auotr (2014)

Figura 35 – Temperatura na superfície de contato com o produto – paralelo T1



Fonte: Elaborado pelo auotr (2014)

#### 4.2.2 Análises Dimensionais

O ensaio dimensional foi realizado conforme descrito no item 3.4.1. Os resultados estão tabelados de forma independente, ou seja, na Tabela 5 encontram-se os resultados do sistema de refrigeração em série e na Tabela 6 os resultados do sistema de refrigeração em paralelo.

Tabela 5 – Resultado dimensional com o circuito série T1

<b>CIRCUITO SÉRIE (T1)</b>			
<i>Amostras</i>	<i>Comprimento (130mm)</i>	<i>Largura (75mm)</i>	<i>Espessura (6mm)</i>
1	126.75	72.98	5.85
2	126.77	72.97	5.86
3	126.78	72.98	5.85
4	126.76	72.95	5.85
5	126.77	72.95	5.86
<b>Média</b>	<b>126.77</b>	<b>72.97</b>	<b>5.85</b>
<b>Desvio-Padrão</b>	<b>0.011</b>	<b>0.015</b>	<b>0.005</b>
<b>Incerteza</b>	<b>0.021</b>	<b>0.025</b>	<b>0.015</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Tabela 6 – Resultado dimensional com o circuito paralelo T1

<b>CIRCUITO PARALELO (T1)</b>			
<i>Amostras</i>	<i>Comprimento (130mm)</i>	<i>Largura (75mm)</i>	<i>Espessura (6mm)</i>
1	126.74	72.93	5.86
2	126.73	72.90	5.86
3	126.72	72.93	5.85
4	126.70	72.92	5.86
5	126.71	72.91	5.85
<b>Média</b>	<b>126.72</b>	<b>72.92</b>	<b>5.86</b>
<b>Desvio-Padrão</b>	<b>0.016</b>	<b>0.013</b>	<b>0.005</b>
<b>Incerteza</b>	<b>0.025</b>	<b>0.023</b>	<b>0.015</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Para medir a deformação seguiram-se os passos descritos no item 3.4.1, e pode-se averiguar que neste primeiro teste as amostras injetadas tiveram grandes deformações até mesmo sob aspecto visual pode-se verificar essas deformações, que será comprovada através da análise dimensional, que podem ser conferidas na Tabela 7.

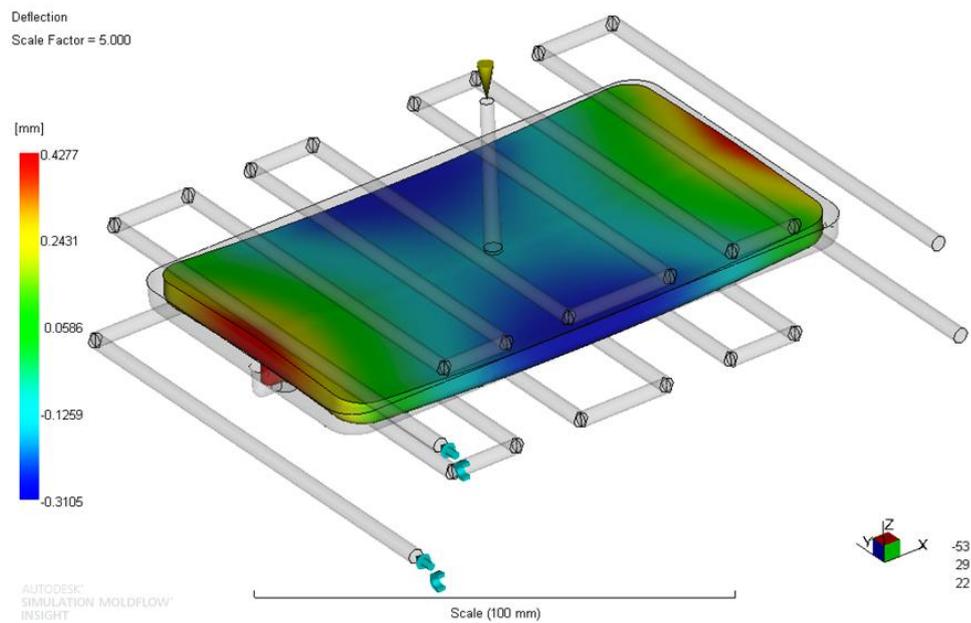
Tabela 7 – Resultado de medição de deformação máxima T1

DEFORMAÇÃO (T1)		
<i>Amostras</i>	<i>Série (mm)</i>	<i>Paralelo (mm)</i>
1	0.83	0.95
2	0.80	0.88
3	0.89	0.83
4	0.77	0.91
5	0.85	0.85
<b>Média</b>	<b>0.83</b>	<b>0.88</b>
<b>Desvio-Padrão</b>	<b>0.046</b>	<b>0.048</b>
<b>Incerteza</b>	<b>0.043</b>	<b>0.044</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

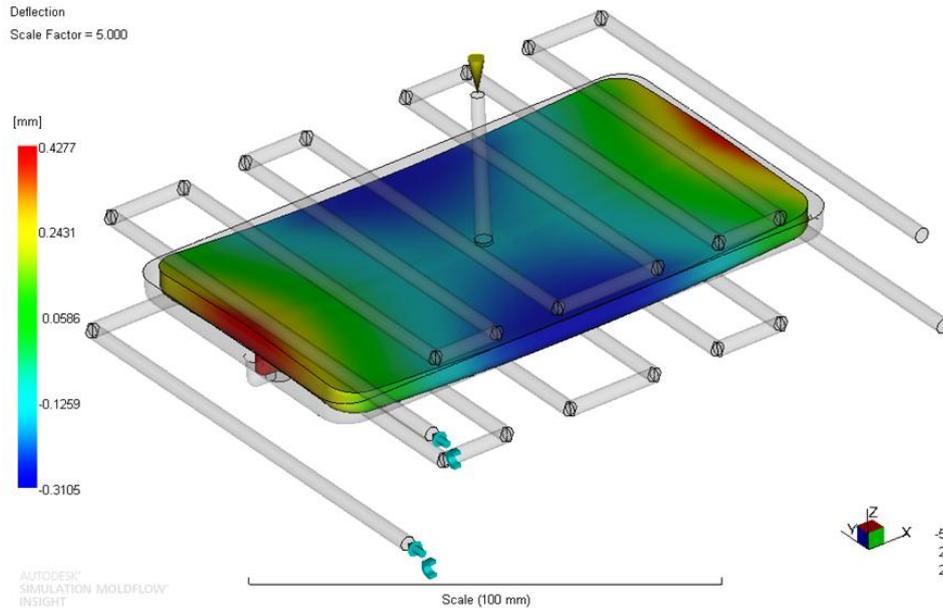
Nas simulações, os dois circuitos apresentaram deformações inferiores ao teste prático, e praticamente não houve diferença entre os dois circuitos, os resultados dessa deformação simulados podem ser visualizados na Figura 36 para o circuito em série e Figura 37 para o circuito paralelo.

Figura 36 – Resultado da simulação para deformação séire T1



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Figura 37 – Resultado da simulação para deformação paralelo T1



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Para calcular o percentual de contração foi considerada a cota de comprimento (130mm) das amostras, por se tratar da maior cota de controle. Os resultados podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 – Percentual de contração para o comprimento T1

<i>Amostras</i>	<i>Série Comprimento (mm)</i>	<i>Série Contração (%)</i>	<i>Paralelo Comprimento (mm)</i>	<i>Paralelo Contração (%)</i>
1	126.75	2.50	126.74	2.51
2	126.77	2.48	126.73	2.52
3	126.78	2.48	126.72	2.52
4	126.76	2.49	126.70	2.54
5	126.77	2.48	126.71	2.53
<b>Média</b>	<b>126.77</b>	<b>2.49</b>	<b>126.72</b>	<b>2.52</b>
<b>Desvio-Padrão</b>	<b>0.011</b>	<b>0.009</b>	<b>0.016</b>	<b>0.011</b>
<b>Incerteza</b>	<b>0.021</b>	<b>0.019</b>	<b>0.025</b>	<b>0.021</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

O percentual de contração da peça injetada está diretamente ligado com a temperatura do molde, que quanto maior a temperatura do molde, maior é o grau de encolhimento (Manrich, 2005).

Sob o aspecto dimensional, o circuito em série apresentou melhores índices, teve um desvio-padrão inferior, ou seja, uma variação dimensional menor que o circuito em paralelo. Analisando os resultados da Tabela 7 observa-se que as amostras injetadas com o circuito em

série tiveram um percentual de contração menor que as peças injetadas com o circuito em paralelo, devido o circuito em série ter mantido temperaturas inferiores no molde. Essas temperaturas podem ser observadas pelos resultados das leituras dos termopares indicados no item 4.2.1.

Após os resultados de ensaios dimensionais, leituras dos termopares e até mesmo análise visual das amostras, observou-se que melhorias poderiam ser feitas com relação ao experimento. As amostras injetadas apresentaram uma deformação acima da média (Tabela 8), e percebida visualmente. Também houve queimas de gases aprisionados nos quatro cantos das amostras (Figura 38), pelo fato de não ter feito as saídas de gases.

Figura 38 – Queima de gás na peça injetada



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Com esse primeiro teste foi possível fazer toda a parte de ensaios e análises descrita anteriormente, e fazer um comparativo entre os dois circuitos. Porém decidiu-se fazer novas simulações mudando alguns parâmetros como, tempo de resfriamento, pressão de recalque, e conseqüentemente fazer um novo teste experimental com o objetivo de melhorar a qualidade das amostras injetadas com relação à deformação. Já para as queimas de gases nos cantos das peças foram feitas as saídas de gases nos aços, para que no segundo teste essas queimas fossem eliminadas.

### 4.3 TESTE PRÁTICO 2

Conforme relatado no item 4.2.2 houve a necessidade de fazer um segundo teste experimental, e para que houvesse uma melhora nas amostras injetadas foram mudados alguns parâmetros de injeção (Tabela 9) baseados numa nova simulação virtual. Para esse segundo teste foi feito as saídas de gases nos insertos para eliminar o problema de queima de gás ocorrido no primeiro teste.

Tabela 9 – Parâmetros alterados

Parâmetros	Teste 1	Teste 2
<b>Tempo de injeção + Recalque *</b>	5,5s	10s
<b>Tempo de resfriamento</b>	30s	40s
<b>Pressão de injeção</b>	103 MPa	94 MPa
<b>Fluxo de injeção</b>	61 cm <sup>3</sup> /s	61 cm <sup>3</sup> /s
<b>Pressão de recalque</b>	47 Mpa	75 Mpa
<b>Fluxo de recalque</b>	37,6 cm <sup>3</sup> /s	47 cm <sup>3</sup> /s
<b>Pressão de dosagem</b>	169 MPa	169 MPa
<b>Dosagem</b>	50mm	44mm
<b>Descompressão</b>	60mm	55mm
<b>Vazão</b>	15L/min	13L/min

\* A injetora utilizada para os testes fornece o tempo de injeção e recalque juntos

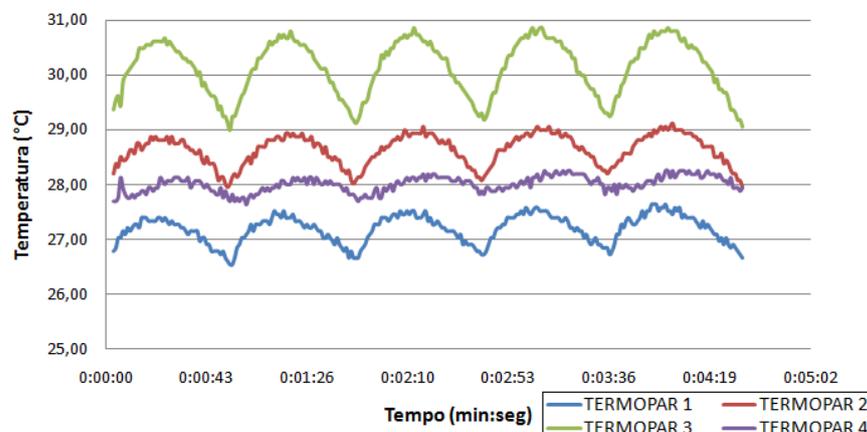
Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

O resultado das simulações com os parâmetros utilizados no segundo teste pode ser visualizado no anexo B.

A metodologia para o segundo teste foi à mesma do primeiro. Contudo, cabe lembrar que os termopares utilizados para o segundo teste foram trocados por cabos de compensação tipo K, conforme descrito no item 3.2.1. Quanto ao processo de avaliação dimensional repetiu-se o do primeiro teste.

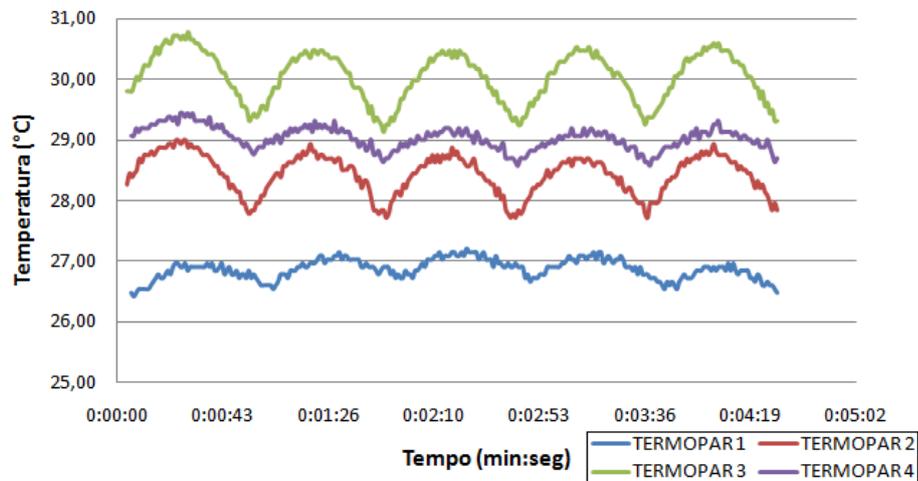
Os resultados dos termopares estão representados nas Figuras 39 e 40, tanto no circuito em série e paralelo. Com essa mudança pode-se perceber uma diferença de temperatura com relação ao primeiro teste. As temperaturas ficaram menores e mais estáveis devido ao tempo de resfriamento que passou de 30 segundos para 40 segundos.

Figura 39 – Gráfico do circuito em série T2



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

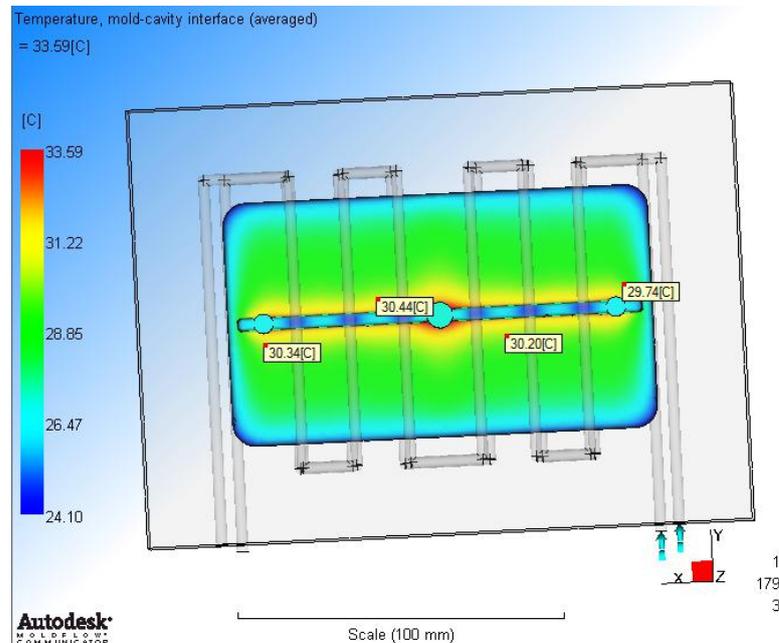
Figura 40 – Gráfico do circuito em paralelo T2



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

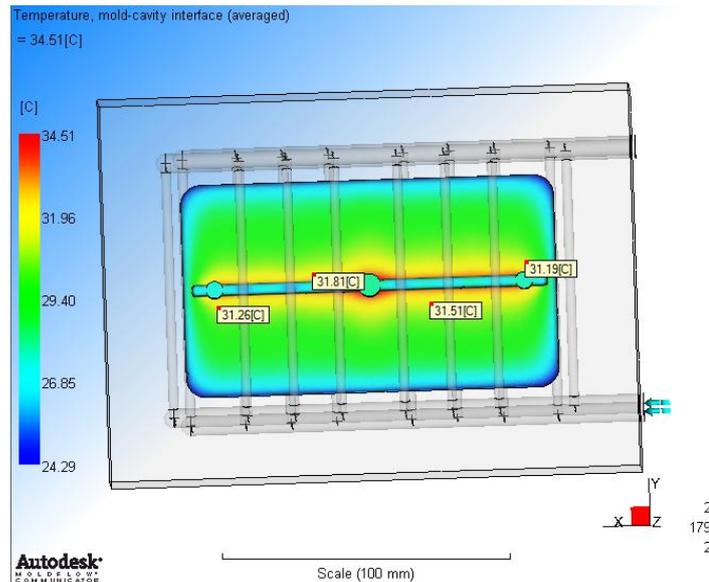
As diferenças de temperaturas dos pontos dos termopares entre os dois circuitos se mostraram pequenas, menores que 1°C. Essa diferença ficou muito próxima da simulação (Anexo B) que indicou entre 1° e 2°C. Com apenas os resultados dos termopares fica difícil dizer qual sistema apresentou melhor eficiência sobre as amostras injetadas. No entanto, os ensaios dimensionais serviram para detalhar melhor esta diferença. As Figuras 41 e 42 mostram os resultados da simulação das temperaturas na superfície do produto.

Figura 41 – Temperatura na superfície de contato com o produto – série T2



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Figura 42 – Temperatura na superfície de contato com o produto – paralelo T2



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

No primeiro momento, só pela análise visual, foi possível notar a diferença com relação ao primeiro teste. As amostras ficaram com deformações inferiores as amostras do primeiro teste e um aspecto visual melhor. As saídas de gases feitas nos aços tiveram bons resultados, as amostras não apresentaram queimas nos cantos, conforme tinham as mostras do primeiro teste. Para a melhora na deformação será comprovada com os resultados do ensaio dimensional realizado.

As amostras injetadas com o circuito em série tiveram um encolhimento menor que as do circuito em paralelo. Os valores das medidas de controle realizadas através do ensaio dimensional estão nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Resultado dimensional com o circuito série T2

<b>CIRCUITO SÉRIE (T2)</b>			
<i>Amostras</i>	<i>Comprimento (130mm)</i>	<i>Largura (75mm)</i>	<i>Espessura (6mm)</i>
1	126.86	73.22	5.90
2	126.85	73.20	5.91
3	126.84	73.21	5.90
4	126.86	73.20	5.92
5	126.85	73.19	5.92
<b>Média</b>	<b>126.85</b>	<b>73.20</b>	<b>5.91</b>
<b>Desvio-Padrão</b>	<b>0.008</b>	<b>0.011</b>	<b>0.010</b>
<b>Incerteza</b>	<b>0.018</b>	<b>0.021</b>	<b>0.020</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Tabela 11 – Resultado dimensional com o circuito paralelo T2

<b>CIRCUITO PARALELO (T2)</b>			
<i>Amostras</i>	<i>Comprimento (130mm)</i>	<i>Largura (75mm)</i>	<i>Espessura (6mm)</i>
1	126.82	73.18	5.88
2	126.81	73.16	5.90
3	126.78	73.16	5.91
4	126.80	73.17	5.90
5	126.82	73.18	5.90
<b>Média</b>	<b>126.81</b>	<b>73.17</b>	<b>5.90</b>
<b>Desvio-Padrão</b>	<b>0.017</b>	<b>0.010</b>	<b>0.011</b>
<b>Incerteza</b>	<b>0.026</b>	<b>0.020</b>	<b>0.021</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

As amostras do segundo teste encolheram menos que as do primeiro. Fatores que colaboraram para essa melhora foram o tempo de resfriamento e o recalque que aumentaram no segundo teste. Com isso as peças tiveram um percentual de contração menor que o primeiro teste. Com relação à diferença entre os dois circuitos novamente o circuito em série teve um encolhimento menor que o circuito em paralelo, pois apresentou um percentual de contração menor que pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 – Percentual de contração para o comprimento T2

<i>Amostras</i>	<i>Série Comprimento (mm)</i>	<i>Série Contração (%)</i>	<i>Paralelo Comprimento (mm)</i>	<i>Paralelo Contração (%)</i>
1	126.86	2.42	126.82	2.45
2	126.85	2.42	126.81	2.45
3	126.84	2.43	126.78	2.48
4	126.86	2.42	126.80	2.46
5	126.85	2.42	126.82	2.45
<b>Média</b>	<b>126.85</b>	<b>2.42</b>	<b>126.81</b>	<b>2.46</b>
<b>Desvio-Padrão</b>	<b>0.008</b>	<b>0.006</b>	<b>0.017</b>	<b>0.012</b>
<b>Incerteza</b>	<b>0.018</b>	<b>0.016</b>	<b>0.026</b>	<b>0.021</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

A deformação foi inferior ao primeiro teste, sendo que o maior responsável por isso foi o tempo de compactação da peça que aumentou e o tempo de resfriamento também colaborou. A diferença de deformação entre os dois circuitos foi muito pequena, sob o aspecto dimensional. O circuito em série teve uma pequena vantagem sobre o circuito paralelo, os resultados estão apresentados na Tabela 13.

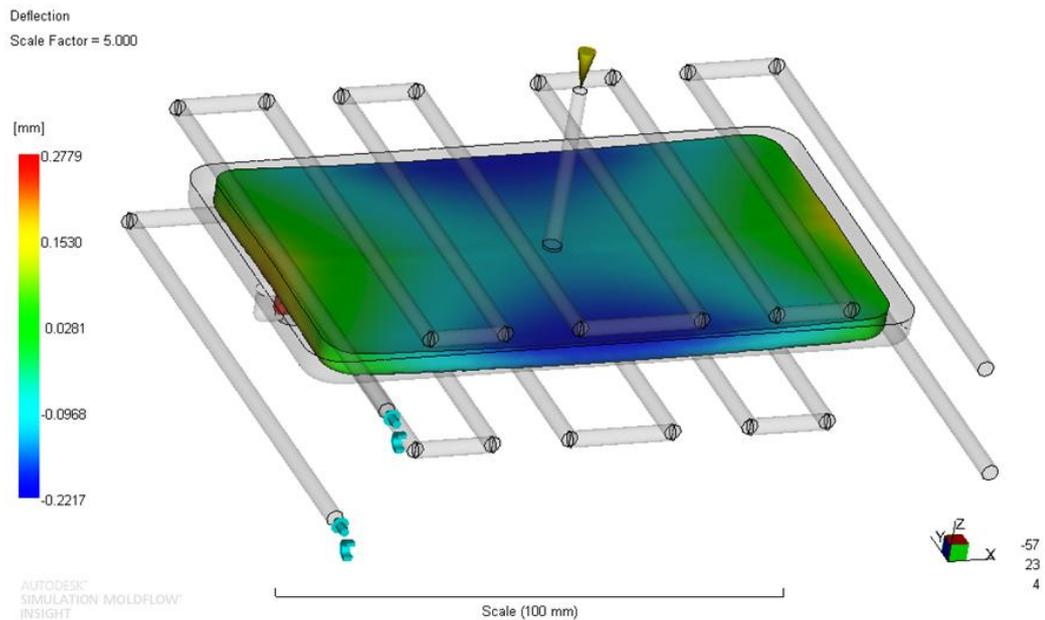
Tabela 13 – Resultado de medição de deformação máxima T2

<b>DEFORMAÇÃO (T2)</b>			
<i>Amostras</i>	<i>Série</i>	<i>(mm)</i>	<i>Paralelo</i>
			<i>(mm)</i>
1		0.35	0.28
2		0.36	0.45
3		0.32	0.34
4		0.35	0.42
5		0.38	0.32
<b>Média</b>		<b>0.35</b>	<b>0.36</b>
<b>Desvio-Padrão</b>		<b>0.020</b>	<b>0.071</b>
<b>Incerteza</b>		<b>0.028</b>	<b>0.053</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

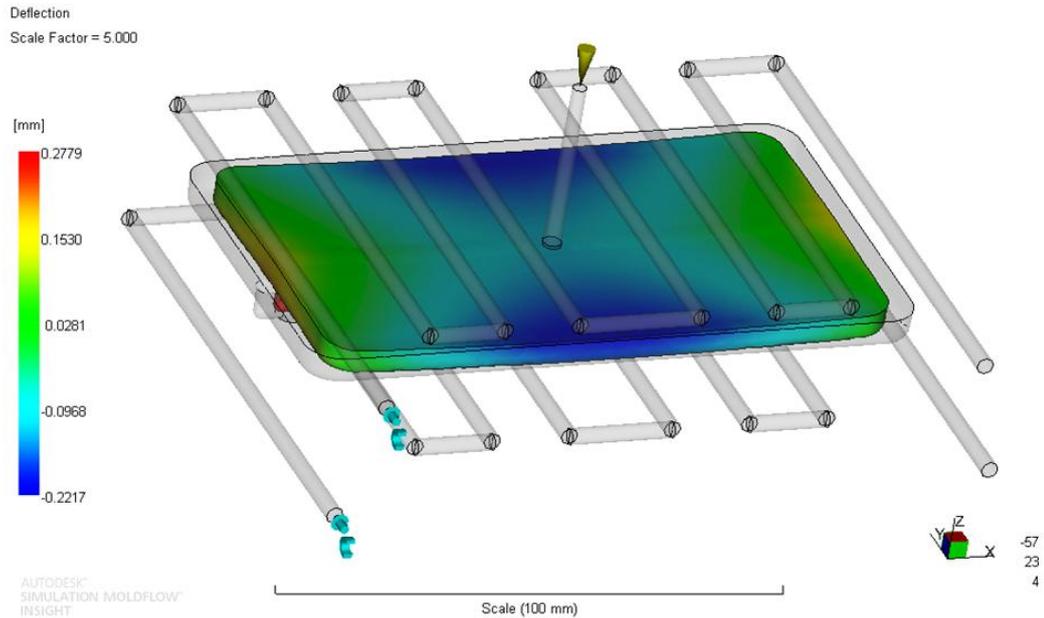
Nas novas simulações baseadas nos parâmetros modificados para o segundo teste, o resultado da deformação ficou inferior com relação ao primeiro teste, mas novamente não apresentou diferença entre os dois circuitos, os valores ficaram muito próximos. Esses resultados podem ser observados nas Figuras 43 para o circuito em série e Figura 44 para o paralelo.

Figura 43 – Resultados da simulação de deformação série T2



Fonte: elaborado pelo autor (2014)

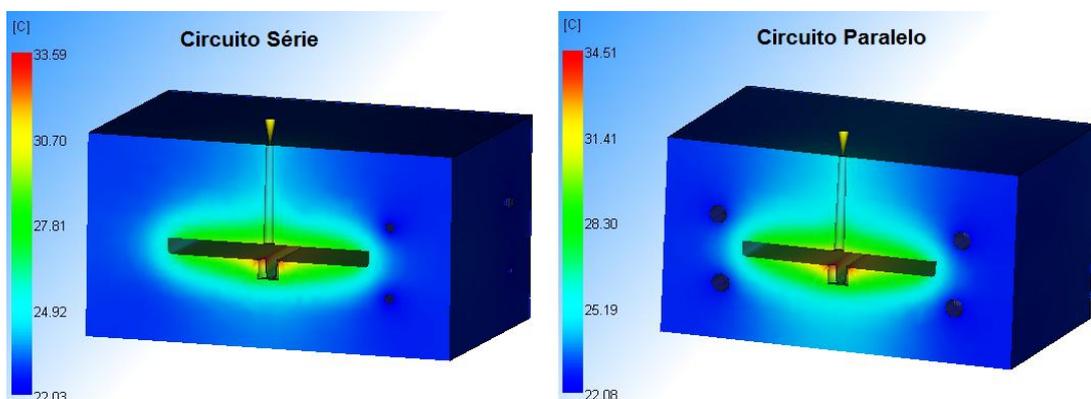
Figura 44 – Resultados da simulação de deformação paralelo T2



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Os ensaios dimensionais serviram para detalhar as diferenças entre as amostradas injetadas com os dois tipos de circuitos. A maior vantagem foi com relação ao percentual de contração das amostras, onde o circuito em série mostrou um percentual menor que o circuito em paralelo, isso pode ser atribuído ao fato de a peça com circuito em série sair mais fria do molde, reduzindo sua contração posterior. Na Figura 45, observam-se as temperaturas dos insertos com os dois tipos de circuitos durante o processo de injeção, comprovando que o circuito em série mantém temperaturas inferiores em relação ao circuito paralelo. Resultado obtido através da simulação.

Figura 45 – Temperaturas dos insertos no processo de injeção



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Durante o processo de injeção alguns mecanismos de transferência de calor ocorrem conforme já mencionado no item 2.5, e através de equações essa transferência será mostrada.

O  $Q_{PI}$  é o fluxo de calor cedido pela massa fundida durante o tempo em que a cavidade do molde permanece cheia, mas antes é necessário calcular o tempo de residência do polímero no molde que é definido pela Equação 4.

$$t_c = \frac{6^2 \cdot \ln\left(\frac{8}{\pi^2 \cdot 2,56}\right)}{\pi^2 \cdot 0,065} = 40,96s \quad (12)$$

O tempo de resfriamento utilizado no teste foi de 40s próximo do calculado, e com o tempo calculado pode-se estimar o  $Q_{PI}$  Equação (3), utilizando o valor de entalpia retirada da curva específica do material (PP) no gráfico da Figura 26 para uma temperatura de injeção de 230°C e 108°C para extração.

$$Q_{PI} = \frac{0,055 \cdot (620 - 160)}{40,96} = 617,67W \quad (13)$$

Com a somatória das parcelas de transferência de calor por condução, convecção e radiação obtêm-se o fluxo de calor com o ambiente  $Q_{Amb}$  que podem ser calculadas respectivamente pelas Equações 6, 7 e 8. As dimensões principais do molde foram definidas pelo molde experimental utilizado nos testes e a temperatura ambiente foi considerada 22°C, temperatura ambiente que estava no Laboratório de Polímeros (LPOL) durante os dois testes.

$$Q_{cond} = (0,24 \cdot 0,26 \cdot 2) \cdot 100 \cdot (22 - 30) = -99,84 W \quad (14)$$

$$Q_{conv} = \left( (0,218 \cdot 0,25 \cdot 2) + (0,24 \cdot 0,218 \cdot 2) \right) \cdot 15 \cdot (22 - 30) = -25,64 W \quad (15)$$

$$Q_{rad} = 0,214 \cdot 0,25 \cdot 5,77 \cdot \left( \left( \frac{295,15}{100} \right)^4 - \left( \frac{303,15}{100} \right)^4 \right) = -2,65 W \quad (16)$$

Com esses valores de fluxo de calor conhecidos, o fluxo de calor para o meio ambiente  $Q_{Amb}$  pode ser definido pela Equação 2:

$$Q_{Amb} = -100 + (-25,64) + (-2,65) = -128,3 W \quad (17)$$

Com o valores de  $Q_{PI}$  e  $Q_{Amb}$  calculados, é possível saber a quantidade de calor retirada pelo fluido refrigerante através da Equação 9 de balanço térmico. Como foi empregada refrigeração no macho e cavidade o fluxo de remoção de calor pelo ambiente será dividido por dois.

$$Q_{TM} = 617,67 - (-128,3 \div 2) = 681,82 \text{ W} \quad (18)$$

Através da Equação 10 é possível definir a vazão do fluido refrigerante.

$$\dot{m} = \frac{|681,82/1000|}{4,186 \cdot 2} = 0,0815 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 4,89 \text{ l/min} \quad (19)$$

Esta vazão seria a mínima recomendada para ser utilizada, mas devido às limitações da máquina e equipamentos utilizados durante o teste não foi possível usar esta vazão, conforme já descrito anteriormente a vazão utilizada para o segundo teste foi aproximada de 13 l/min.

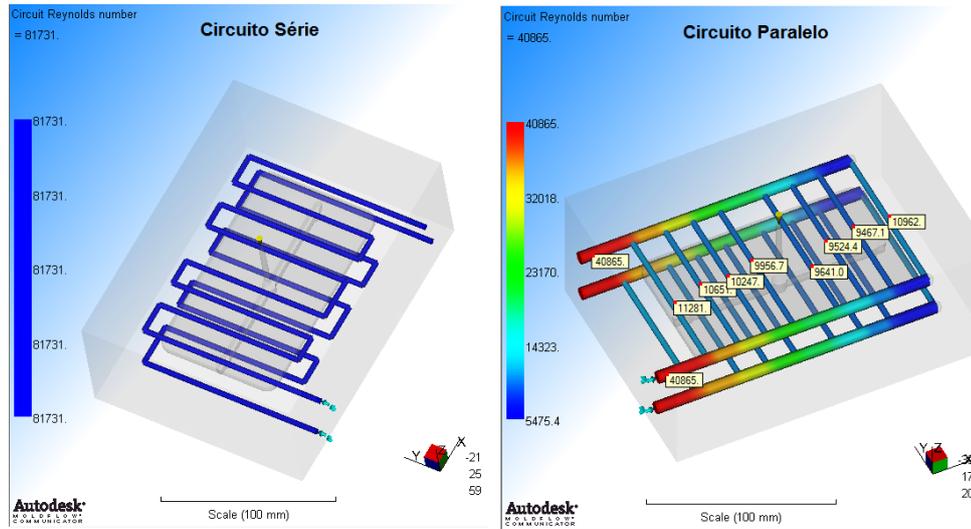
Como não foi possível usar a vazão recomendada, vale ressaltar que o Número de Reynolds ficou dentro do recomendado pela literatura acima de 4000, para os dois tipos de circuitos analisados, o que significa escoamento turbulento. Através da equação 11, será mostrado o valor do Reynolds para ambos os circuitos em série e paralelo.

$$Re = \frac{22,45 \cdot 0,0035}{1 \times 10^{-6}} = 78575 \quad (20)$$

$$Re = \frac{5,61 \cdot 0,007}{1 \times 10^{-6}} = 39270 \quad (21)$$

Os dois resultados calculados ficaram próximos dos resultados da simulação, para o circuito em série o calculado foi de 78575 e no simulado foi de 81731, e o circuito paralelo calculado foi 39270 já o simulado foi 40865. Esses valores podem ser conferidos na Figura 46.

Figura 46 – Número de Reynolds através da simulação



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo estudar eficiência entre dois circuitos de refrigeração em moldes de injeção: circuito em série e circuito em paralelo, e com os resultados buscados definir qual seria o circuito que proporciona a melhor eficiência de refrigeração para o molde.

Uma das fontes que auxiliaram a busca de resultados e fazer o comparativo com os testes práticos desenvolvidos foi à utilização do *software* Moldflow®, ferramenta que vem auxiliando muito as empresas que atuam no ramo de desenvolvimento de moldes de injeção termoplásticos.

Perante a isso, foram projetados e fabricados insertos intercambiáveis com circuitos de refrigeração em série e paralelo a fim de desenvolver testes práticos através do processo de injeção. A coleta das temperaturas no interior do molde foi feita através de termopares, e posteriormente as amostras foram submetidas a ensaios dimensionais, com o propósito de buscar uma resposta efetiva de qual circuito apresentaria maior eficiência de arrefecimento para as amostras injetadas.

Baseado nos resultados apresentados dos dois testes práticos efetuados, conclui-se que o sistema de refrigeração de circuito em série apresentou vantagem em relação ao circuito paralelo. Embora nos dois testes realizados as leituras dos termopares terem apresentados diferenças pequenas entre os dois circuitos, os ensaios dimensionais realizados mostraram diferenças dimensionais entre as amostradas de ambos os circuitos.

As amostras injetadas com os circuitos em série, tiveram um menor encolhimento com relação às amostras dos circuitos em paralelo, resultando num percentual de contração para o sistema circuito em série em média de 2,42% e o circuito em paralelo em 2,46%. Essa diferença deve-se ao fato das amostras com o circuito em série terem saído mais frio do molde, com isso reduzindo sua contração posterior.

Com relação à deformação, a diferença entre os dois circuitos ficou muito próxima, talvez se a análise fosse feita em uma peça de maior porte com área projetada maior e mais complexa, essa diferença fosse mais significativa.

Sob o aspecto visual as amostras do segundo teste ficaram bem melhores que as do primeiro, deformaram menos, essa diferença deve-se ao fato que para o segundo teste a pressão de recalque e o tempo de resfriamento das amostras foram superiores. Esses parâmetros foram modificados com o auxílio das simulações no Moldflow®. Porém linhas de solda e manchas não se mostraram presentes nas amostras, devido o ponto de injeção estar

localizado no centro de massa da peça injetada. Para as queimas de gases apresentada no primeiro teste, apenas com as saídas de gases feitas nos insertos essas queimas foram eliminadas no segundo teste.

O uso do *software* Moldflow® mostrou-se de extrema importância para a determinação dos parâmetros usados nos testes práticos, e auxiliaram no entendimento dos resultados das diferenças entre os dois circuitos.

No entanto, cabe ressaltar que as análises desenvolvidas neste trabalho foram em uma peça de geometria plana e comportada onde os circuitos de refrigeração tiveram suas configurações uniformes, pois no dia a dia nem sempre é possível trabalhar com esse tipo de circuito uniforme devido o desenho da peça não permitir.

## REFERÊNCIAS

- AZEREDO M.B.V.; SILVA S.S. **Análise da influência das variáveis do processo de injeção de plásticos na temperatura do molde utilizando planejamento de experimentos.** Rio de Janeiro, 2000.
- BARROS, I. **Modelação do comportamento térmico de moldes de injeção.** 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Minho, Portugal 1997.
- BELGA LTDA. Disponível em: <http://www.belgamatrizes.com.br>. Acesso em: 17 ago. 2013.
- BLASS, Arno. **Processamento de Polímeros.** 2a ed. Florianópolis: UFSC. 1988
- 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.
- CANEVAROLO, S. V., **Ciência dos Polímeros.** São Paulo: Artliber, 2004.
- CARDON, L.. **RapidPrototyping&Tooling.** Projeto redes de centros tecnológicos e apoio às pequenas e médias empresas, (PMEs). Apostila, SOCIESC, Joinville, 2008.
- CUNHA, A.; BRITO, A. M.; MATOS, A.; MENDES, S. S. **Manual do projetista para moldes de injeção de plásticos.** v. 2: moldação por injeção e materiais plásticos. Marinha Grande: Centimfe, 2004.
- CRUZ, Sérgio da. **Moldes de injeção: termoplásticos, termofixos, zamak, alumínio, sopro.** 2.ed. rev. e ampl. Curitiba: Hemus, 2002. 242 p.
- C-MOLD DESIGN GUIDE, 1994. **A Resource for Plastics Engineers,** AC Technology, Ithaca, New York.
- DIMLA, D.E. M. Camilotto; F. Miani. **Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools.** Italy 2005.
- HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos.** São Paulo: ArtLiber, 2004. 308 p.
- 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.
- LIMA, P. S.; RAMOS, J. POUZADA, A. S. Estudo Analisa o Desempenho Térmico de Moldes Híbridos. **Plástico Industrial,** ano VIII p. 80-87, Fevereiro, 2004.
- MANRICH, S. **Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes.** São Paulo: Artliber, 2005. 431 p.
- MENGES, G., MOHREN, P. **How to make injection molds.** 2. ed. Munich: Hanser, 2001.
- NISHIMOTO, A. R. **Simulação numérica da injeção de termoplásticos em moldes - Estudo comparativo de alguns modelos computacionais.** 2001. 103 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2001.

PACHIONE, R. 2013. **Plástico nos Automóveis: Em busca de leveza, setor se rende aos termoplásticos**. Disponível em <<http://www.plastico.com.br/plastico/plastico/plastico-nos-automoveis-em-busca-de-leveza-setor-se-rende-aos-termoplasticos/>>, Acesso em: 17 agosto 2013.

PARK, H; DANG, X. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. **Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold**. Korean Society for Precision Engineering, December 2010.

REES, H. **Mold Engineering**. Munich; Vienna; New York: Hanser; Cincinnati: Hanser/Gardner, 1995.

RÓRIZ, J. R. C. **A evolução do plástico na sociedade**. Abiplast, Disponível em: <[http://file.abiplast.org.br/download/estatistica/perfil2012\\_versao\\_eletronica.pdf](http://file.abiplast.org.br/download/estatistica/perfil2012_versao_eletronica.pdf)>. Acessado em 2 dez. 2013.

SACCHELLI, Carlos Maurício. **Sistematização do Processo de Desenvolvimento Integrado de Moldes de Injeção de Termoplásticos**. 2007. 305 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Santa Catarina Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2007.

SILVA, Sérgio Luis. **Sistemática para o Projeto do Sistema de Refrigeração de Moldes para Injeção de Polímeros**. 2009. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2009.

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

STITZ, S; SCHILCK, K.; POOP, M. **Estudo Identifica Modos mais Eficientes de Resfriamento do Ferramental de Injeção**. Plástico Industrial, ano IV n° 48, agosto, 2002.

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

ZÖLNER, O. Optimised mould temperature control. **Application Technology Information**, 30 nov. 1997.

## ANEXO A – ANÁLISE NO MOLDFLOW DO TESTE 1

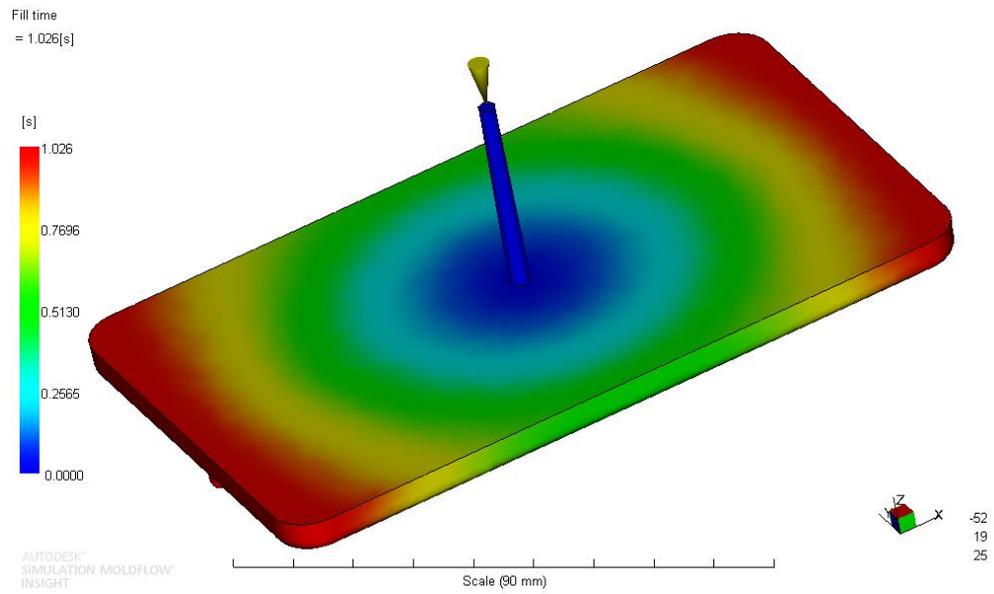


Figura A.1 – Tempo de preenchimento

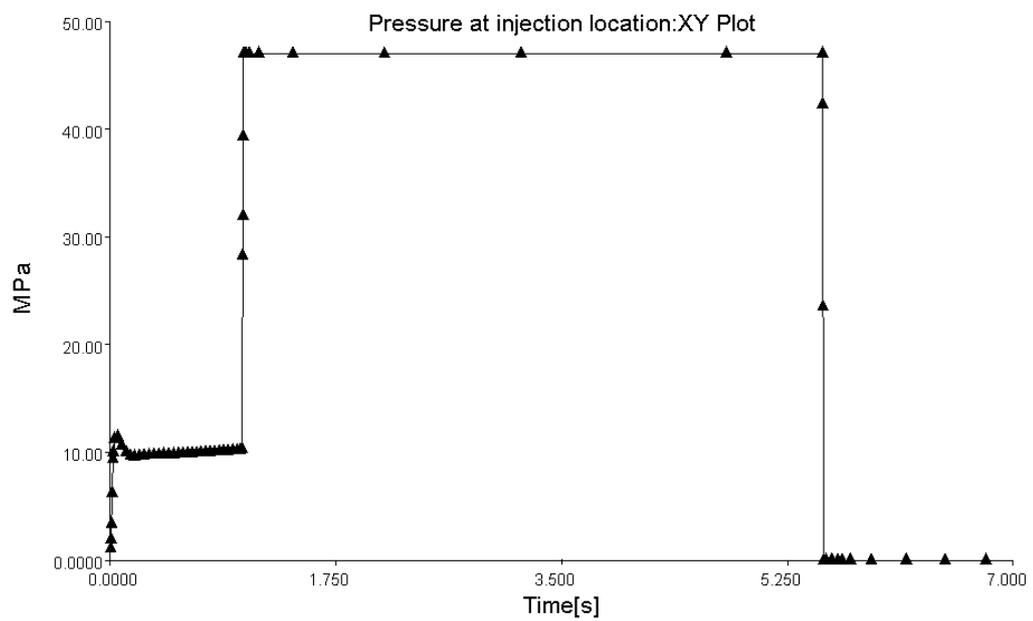


Figura A.2 – Pressão de recalque x tempo

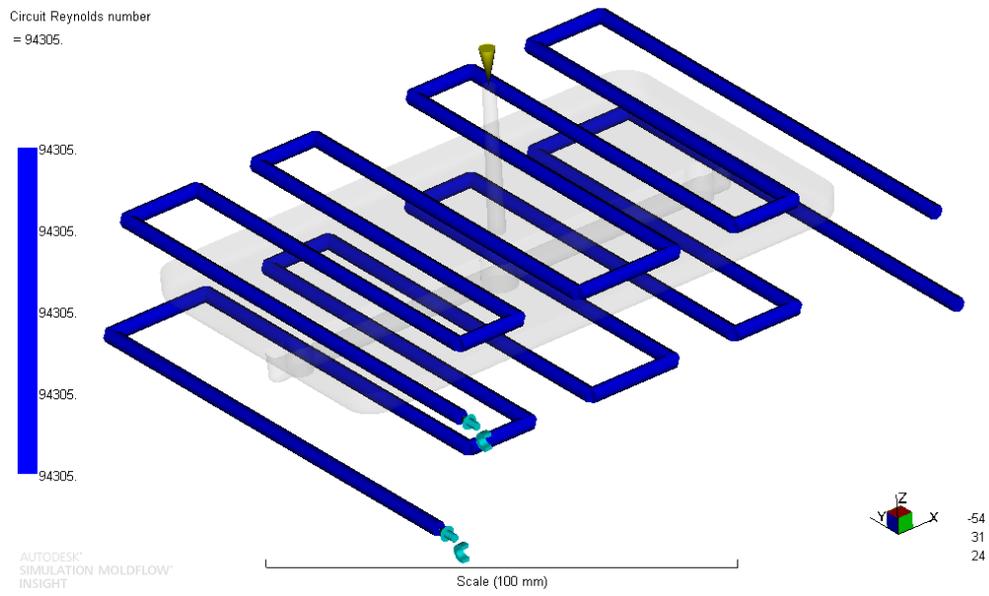


Figura A.3 – Reynolds circuito série

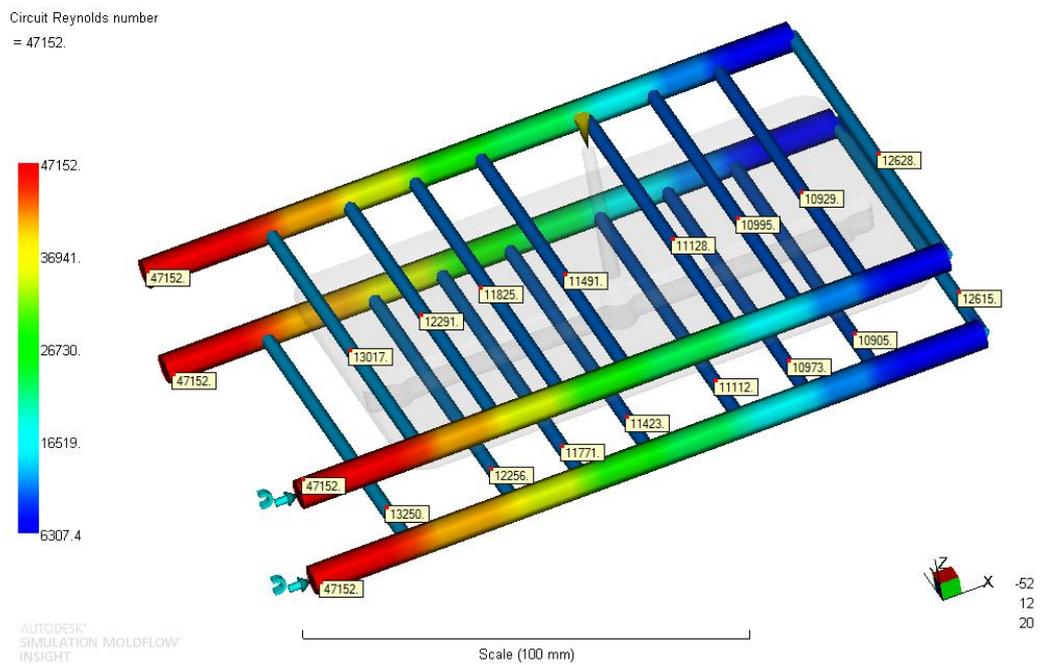
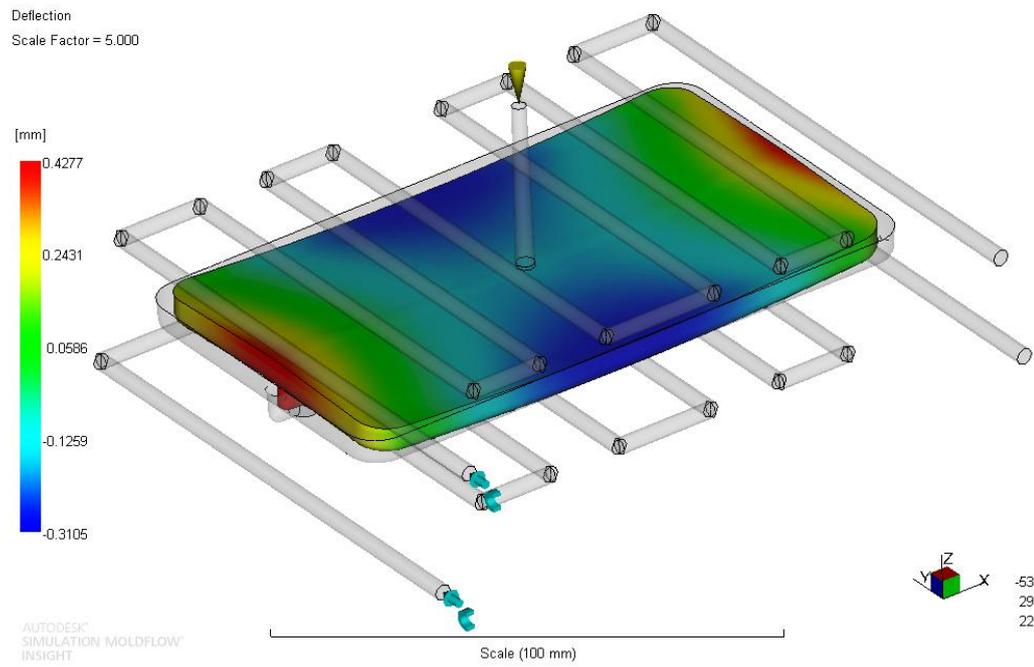
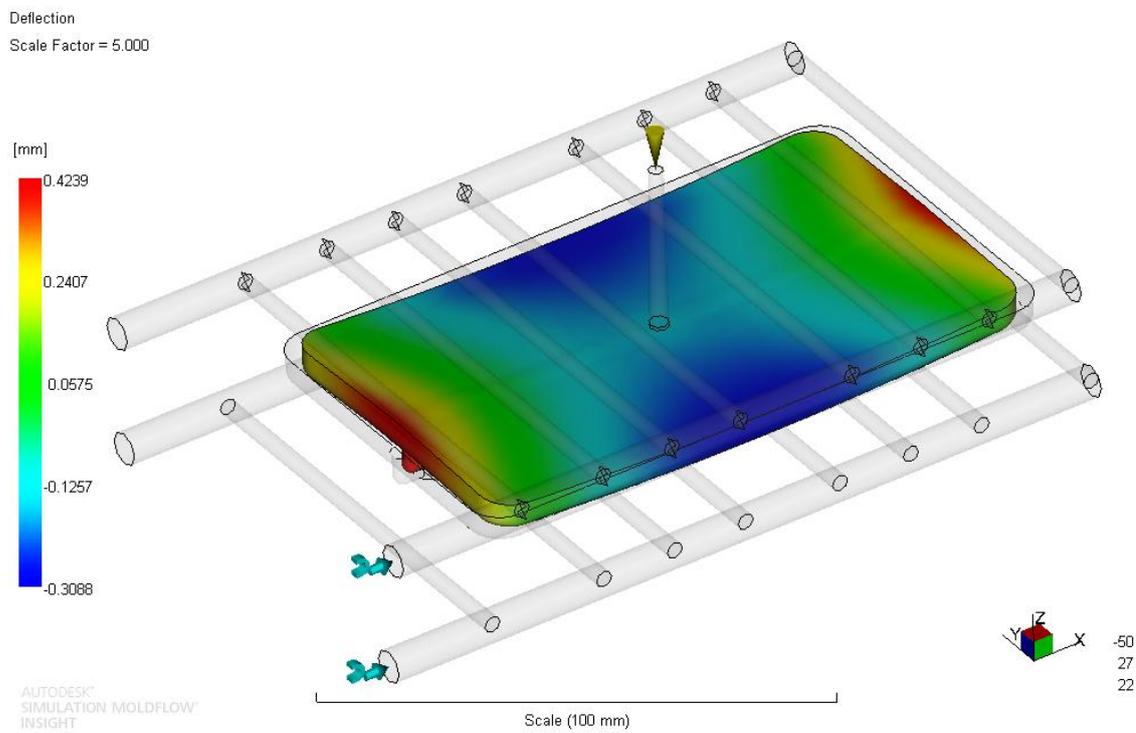


Figura A.4 – Reynolds circuito paralelo



*Figura A.5 – Deflexão circuito série*



*Figura A.6 – Deflexão circuito paralelo*

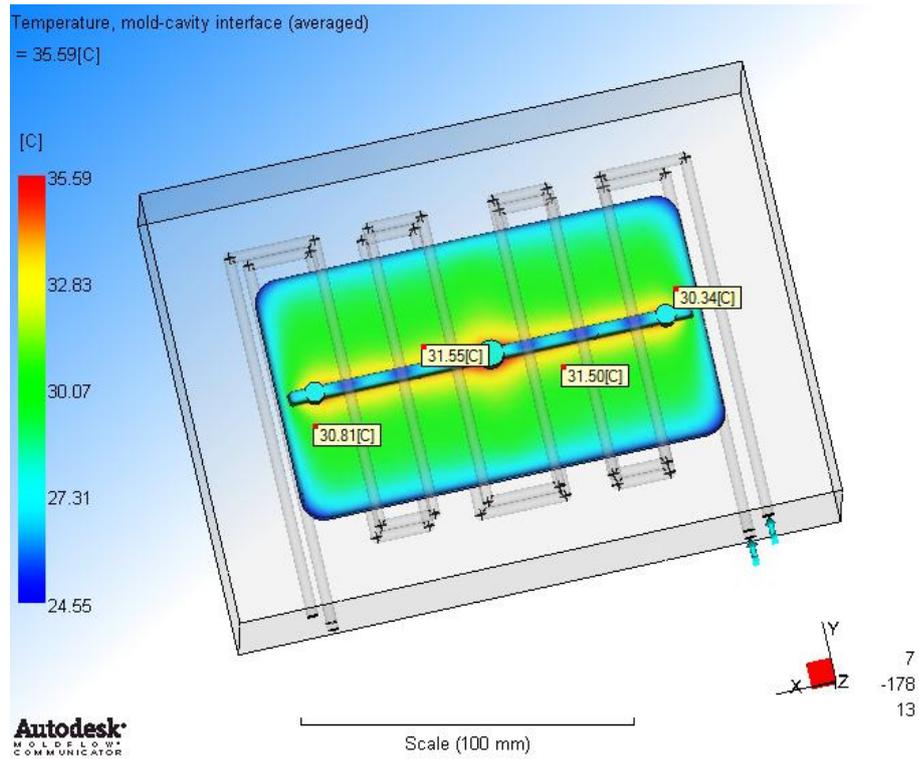


Figura A.7 – Temperatura na superfície de contato com o produto com o circuito em série

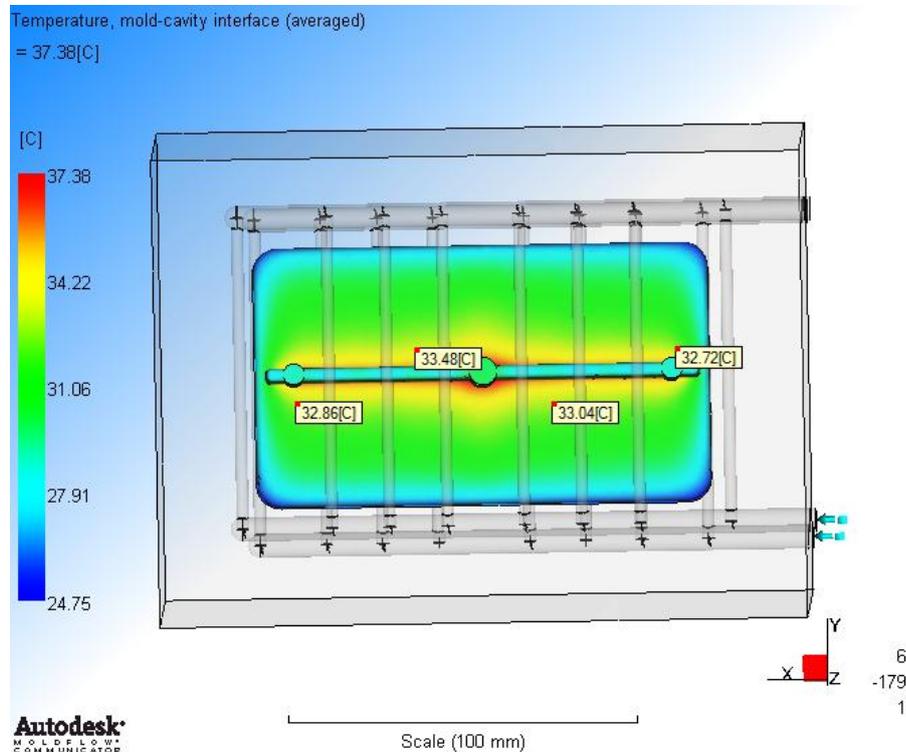


Figura A.8 – Temperatura na superfície de contato com o produto com o circuito em paralelo

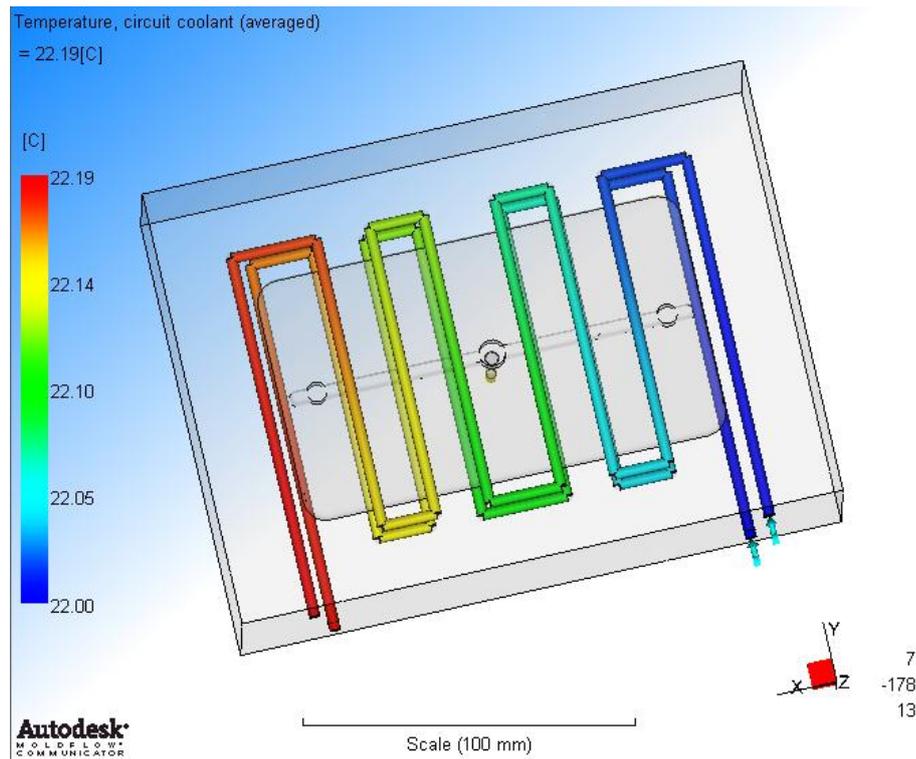


Figura A.9 – Variação de temperatura do circuito em série

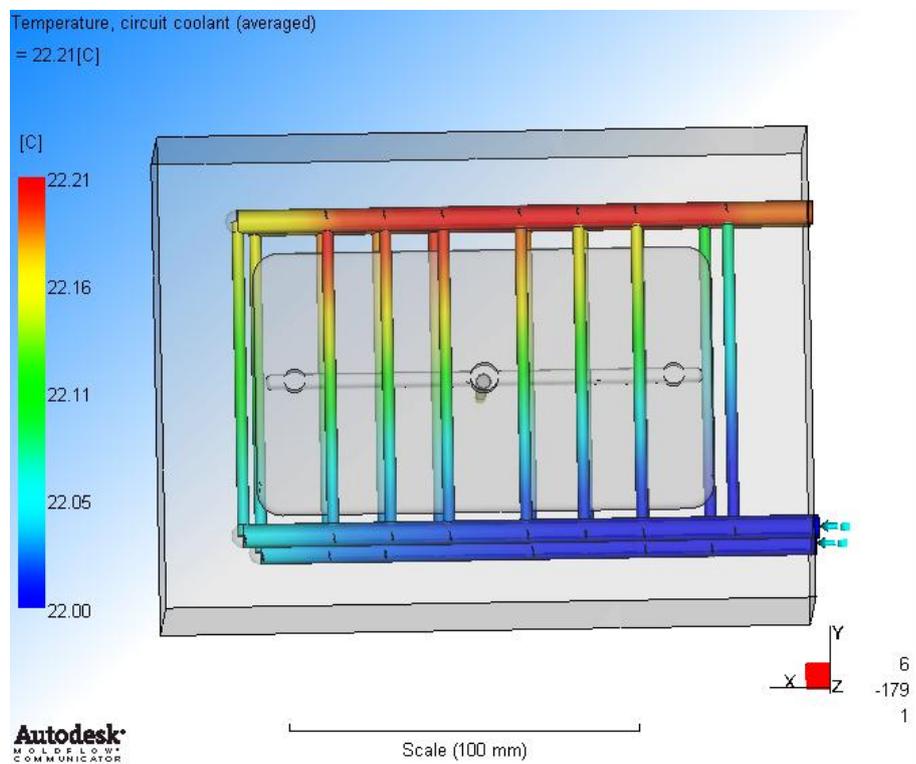
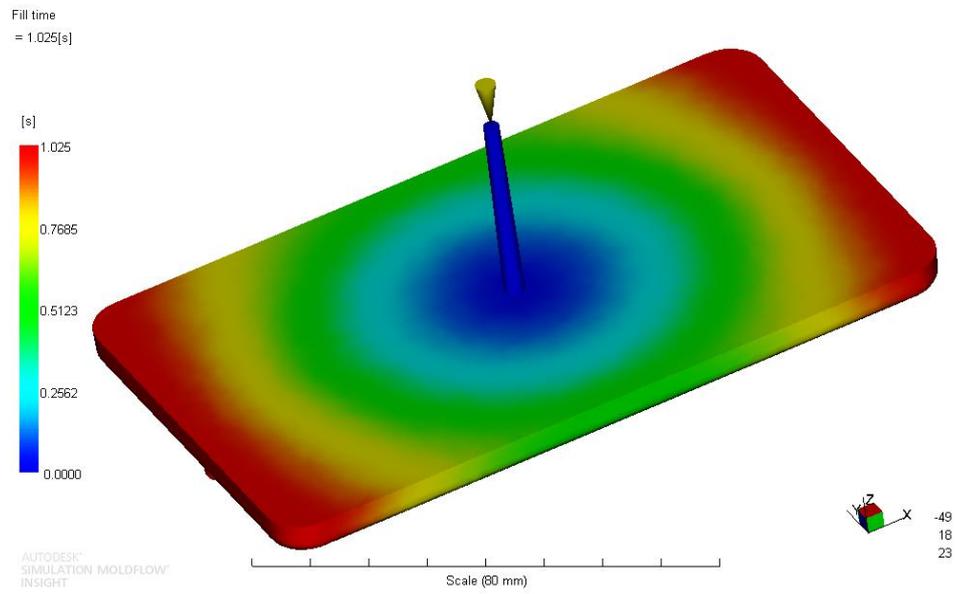
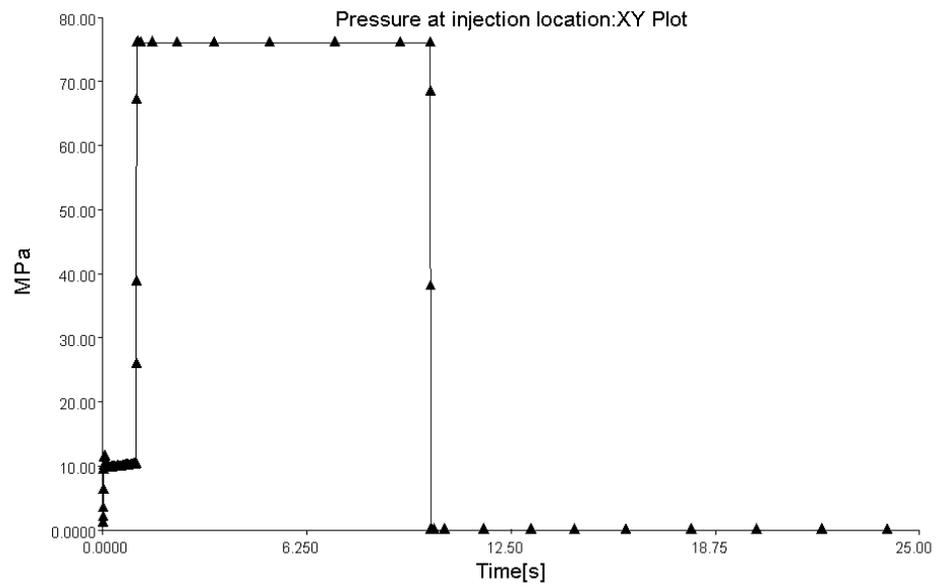


Figura A.10 – Variação de temperatura do circuito em paralelo

**ANEXO B - ANÁLISE NO MOLDFLOW DO TESTE 2***Figura A.1 – Tempo de preenchimento**Figura A.2 – Pressão de recalque x tempo*

Circuit Reynolds number  
= 81731.

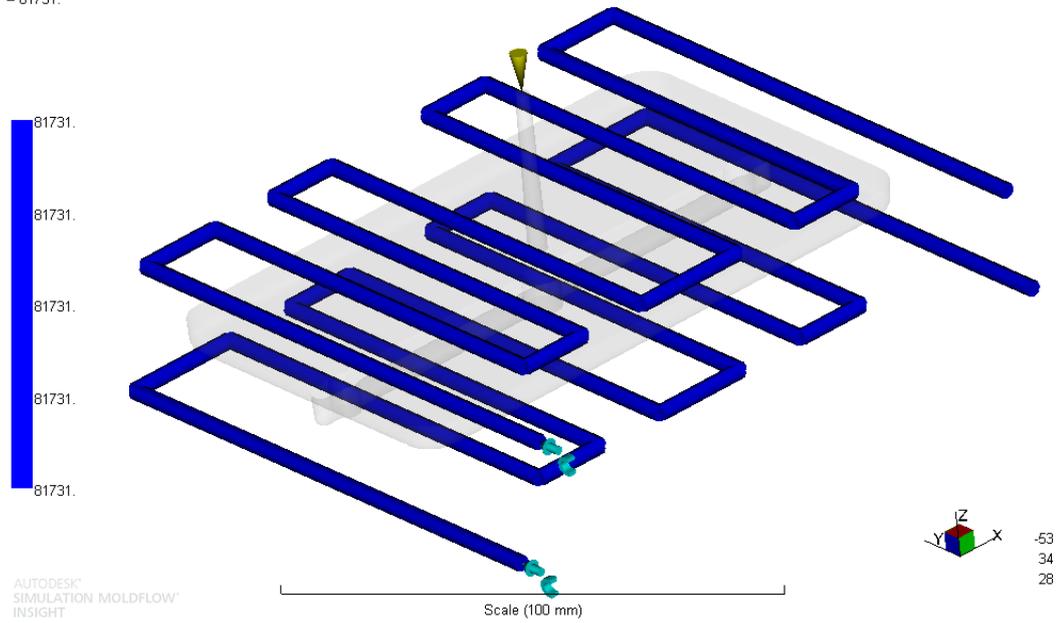


Figura A.3 – Reynolds circuito série

Circuit Reynolds number  
= 40865.

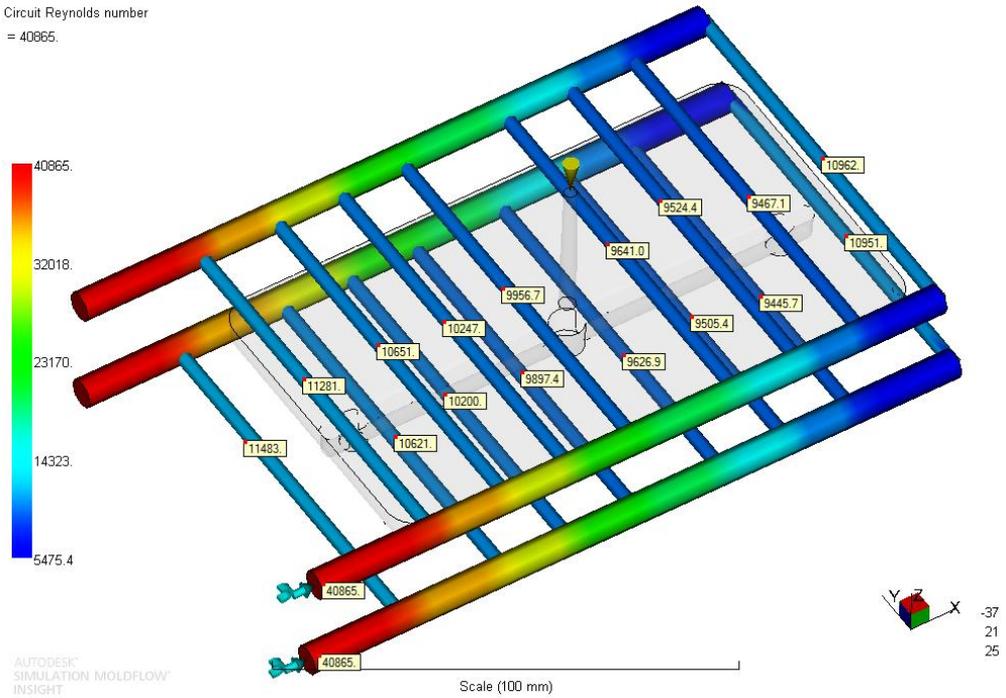
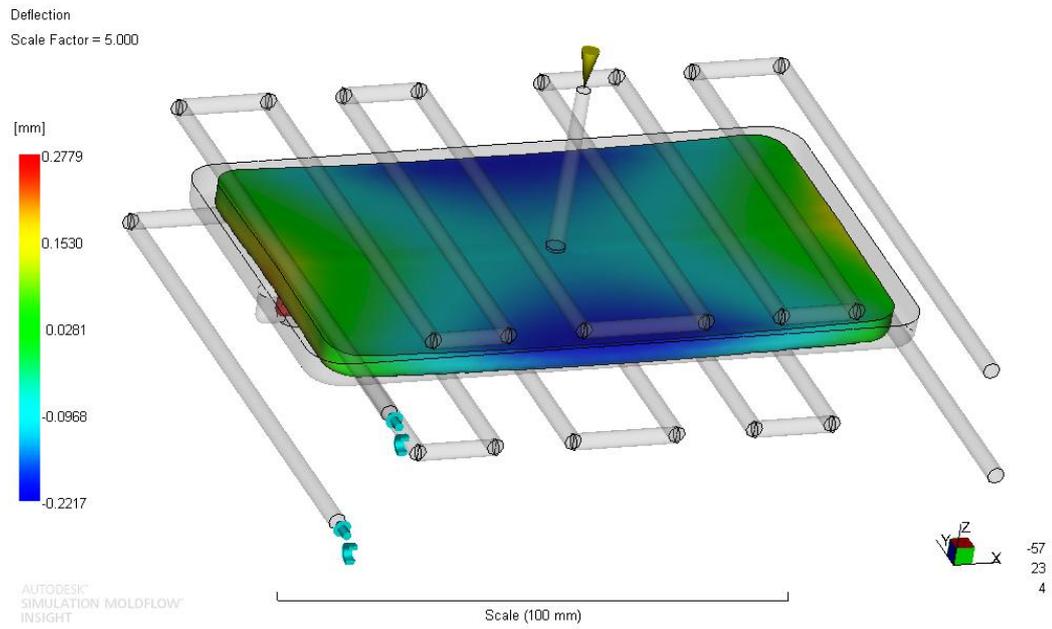
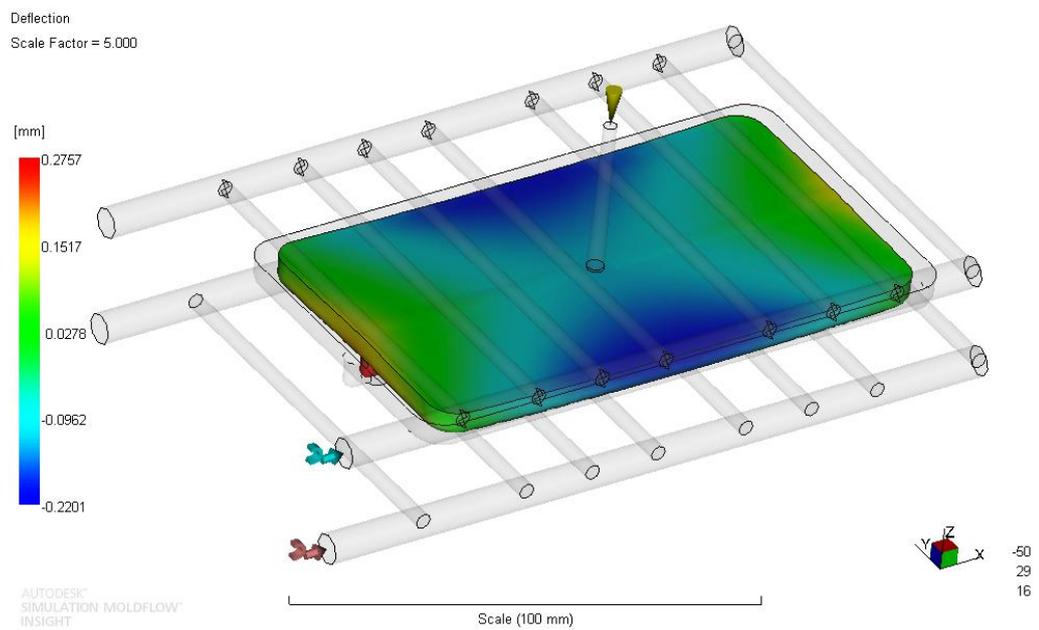


Figura A.4 – Reynolds circuito paralelo



*Figura A.5 – Deflexão circuito série*



*Figura A.6 – Deflexão circuito paralelo*

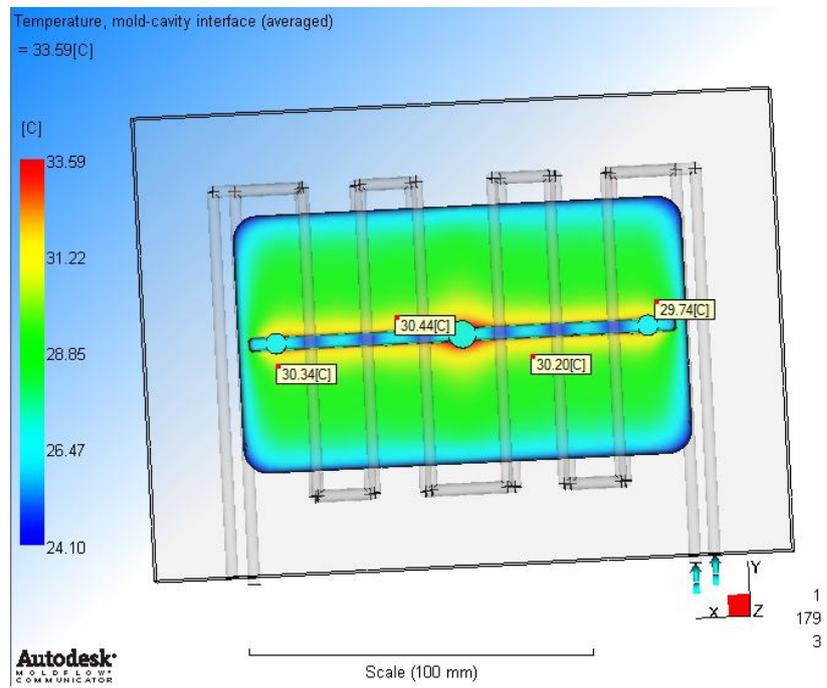


Figura A.7 – Temperatura na superfície de contato com o produto com o circuito em série

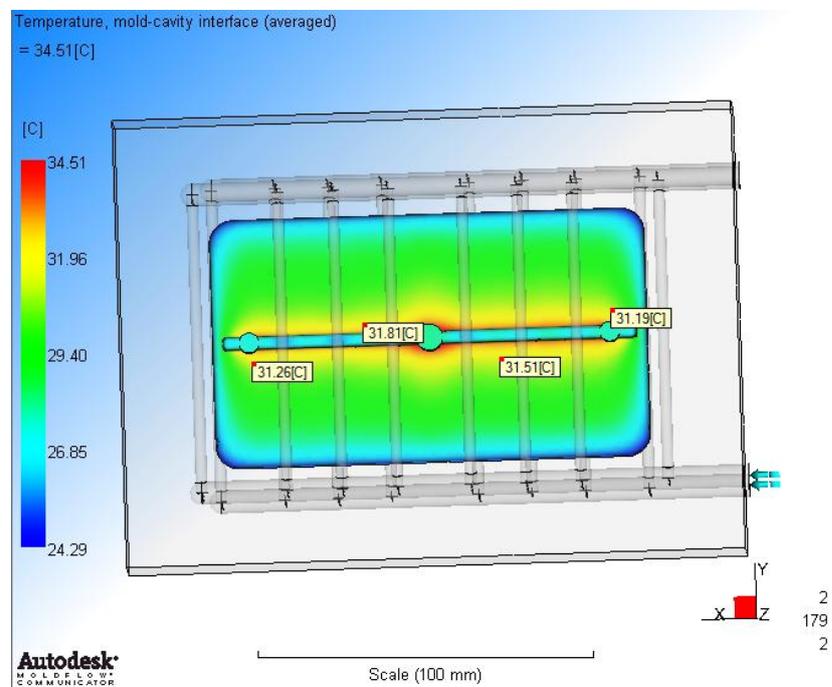


Figura A.8 – Temperatura na superfície de contato com o produto com o circuito em paralelo

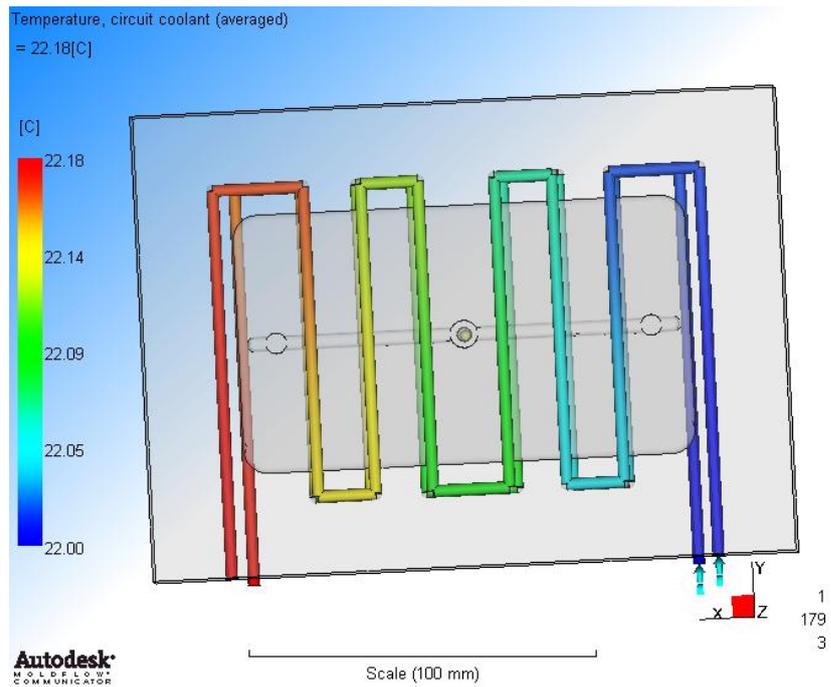


Figura A.9 – Variação de temperatura do circuito em série

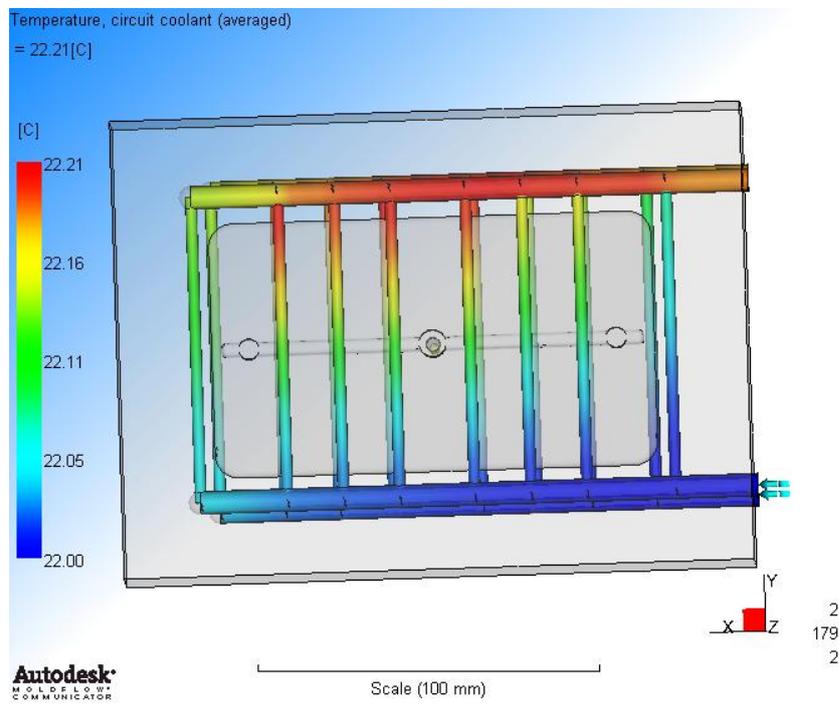


Figura A.10 – Variação de temperatura do circuito em paralelo

## ANEXO C – FOLHA DE DADOS DO POLIPROPILENO CP 241



Folha de Dados  
Revisão 11 (Novembro/12)

### Polipropileno CP 241

**Subfamília:**

Copolímero Heterofásico

**Descrição:**

O CP 241 é um copolímero heterofásico de propeno e eteno, de alto índice de fluidez, com reologia especial, aditivado para uso geral. Indicado para injeção de peças com boa resistência ao impacto. Esta resina apresenta excelente processabilidade e produtividade com bom balanço rigidez/impacto

**Aplicações:**

Utilidades domésticas; Eletrodomésticos; Tampas com rosca.

**Processo:**

Moldagem por Injeção

**Propriedades de Controle:**

	Método ASTM	Unidades	Valores
Índice de Fluidez (230°C/2,16kg)	D 1238	g/10 min	20

**Propriedades Típicas<sup>a</sup>:**

	Método ASTM	Unidades	Valores
Densidade	D 792	g/cm <sup>3</sup>	0,900
Módulo de Flexão Secante a 1%	D 790	MPa	950
Resistência à Tração no Escoamento	D 638	MPa	22
Alongamento no Escoamento	D 638	%	10
Dureza Rockwell (Escala R)	D 785	-	68
Resistência ao Impacto Izod a 23°C	D 256	J/m	300
Resistência ao Impacto Izod a -20°C	D 256	J/m	50
Temperatura de Deflexão Térmica a 0,455 MPa	D 648	°C	85
Temperatura de Deflexão Térmica a 1,820 MPa	D 648	°C	53
Temperatura de Amolecimento Vicat a 10 N	D 1525	°C	145

a) Ensaios em corpo de prova moldado por injeção conforme ASTM D 4101

**Observações Finais:**

- Esta resina atende à regulamentação FDA (*Food and Drug Administration*) para polímeros olefínicos do CFR 21 seção 177.1520, vigente na data de publicação desta especificação. Os aditivos presentes são sancionados por regulamentação apropriada do FDA.
- As informações aqui contidas são dadas de boa fé, indicando valores típicos obtidos em nossos laboratórios, não devendo ser consideradas como absolutas ou como garantia. Apenas as propriedades e os valores que constam do certificado de qualidade devem ser considerados como garantia do produto.
- Em algumas aplicações a Braskem tem desenvolvido resinas *tailor-made* para alcançar características específicas.
- Em caso de dúvida na utilização ou para discutir outras aplicações, entre em contato com a Área de Serviços Técnicos.
- Para informações de segurança, manuseio, proteção individual, primeiros socorros e disposição de resíduos, consultar a FISPQ – Folha de Informações de Segurança de Produtos Químicos. Número de registro no CAS: 9010-79-1.
- Os valores constantes nesse documento poderão sofrer alterações sem comunicação prévia da Braskem.
- A Braskem não recomenda o uso desse produto para fabricação de embalagens, peças ou qualquer outro tipo de produto, que será utilizado para o armazenamento ou contato com soluções parenterais ou que terá qualquer tipo de contato interno com o corpo humano.
- Esta resina não contém a substância Bisfenol A (BPA, CAS#80-05-7) em sua composição.