

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

**VINÍCIUS CASTAGNA**

**AVALIAÇÃO TÉRMICA DA LIGA COBRE BERÍLIO EMPREGADA NA  
TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM INSERTOS DE MOLDES PARA INJEÇÃO  
TERMOPLÁSTICA.**

**CAXIAS DO SUL**

**2014**

**VINÍCIUS CASTAGNA**

**AVALIAÇÃO TÉRMICA DA LIGA COBRE BERÍLIO EMPREGADA NA  
TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM INSERTOS DE MOLDES PARA INJEÇÃO  
TERMOPLÁSTICA.**

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

Orientador: Professor Me. Juliano Marcon Oliveira.

**CAXIAS DO SUL**

**2014**

**AVALIAÇÃO TÉRMICA DA LIGA COBRE BERÍLIO EMPREGADA NA  
TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM INSERTOS DE MOLDES PARA INJEÇÃO  
TERMOPLÁSTICA.**

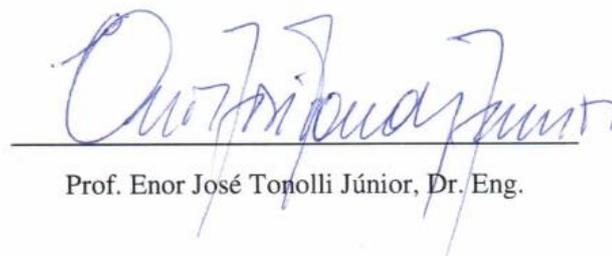
VINÍCIUS CASTAGNA

ESTE RELATÓRIO FOI JULGADO ADEQUADO PARA A APROVAÇÃO NA  
DISCIPLINA DE ESTÁGIO II DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

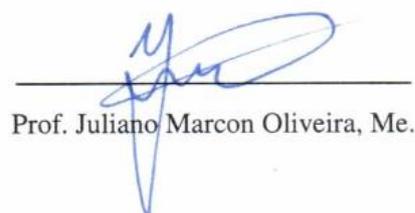
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Carlos Alberto Costa, Dr Eng.



Prof. Enor José Tonolli Júnior, Dr. Eng.



Prof. Juliano Marcon Oliveira, Me.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me proporcionado a capacidade de enfrentar momentos difíceis com muita serenidade e objetividade nos desafios impostos.

Agradeço também a meus pais, Darcy e Leonice, que abdicaram mão de muitos momentos para estarem ao meu lado, incentivando e realizando tudo o que estavam a seu alcance para conquistar meu objetivo final.

À empresa Cemar Legrand, na pessoa do Eng. Rafael Crestani, por me permitir e me auxiliar na realização deste trabalho dentro da unidade de plásticos. Também agradeço a todos os demais colegas de trabalho que proporcionaram momentos contribuições de forma direta ou indireta para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e colegas da Universidade de Caxias do Sul que participaram de debates e discussões, seja em encontros ou na comissão examinadora com sugestões e observações, as quais contribuíram de forma positiva na elaboração do trabalho.

## RESUMO

Este trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica apresenta uma avaliação comparativa do fluxo de energia térmica entre dois materiais, aço AISI P20 e liga CuBe, sendo empregados na forma de insertos no processo de injeção termoplástica. Para tal propósito, foram realizadas soluções analíticas, simulações computacionais e ensaios. Com base no acervo bibliográfico, foi possível o desenvolvimento analítico possibilitando a aproximação matemática do modelo virtual. A solução computacional foi realizada através do *software* CadMould, originando dados passíveis de comparação com a solução analítica. Para o ensaio foi desenvolvido o protótipo de inserto, usinado através da liga CuBe munido com sistema de refrigeração sendo colocado a teste. Após avaliar os resultados foi possível observar a assertividade entre os valores das soluções analíticas e computacionais com os valores obtidos através do ensaio, como também foi possível comprovar que a proposta do uso de inserto CuBe no molde de injeção possibilitou a redução de 22% no tempo da etapa de resfriamento, justificando o investimento necessário para alteração do inserto.

**Palavras-chave:** Liga CuBe. Molde de injeção. Tempo de resfriamento.

## ABSTRACT

This conclusion course article in Mechanical Engineering presents a weighting the flow of thermal energy of two materials, steel AISI P20 and CuBe alloy, and are used as inserts in the thermoplastic injection process. To this aim, were performed: analytical solutions, computer simulations and tests. Based on bibliographic search, the analytical development enabled the mathematical approximation of the virtual model. The computational solution was performed through the software CadMould, creating achievable comparative data through analytic solution. For testing an insert prototype was developed, machined by CuBe alloy equipped with a cooling system to be test. After analysing the results, it was possible to see the assertiveness between the values of analytical and computational solutions with the values acquired by test, and it was also possible to prove that the propose of using the CuBe insert in the injection mold resulted in a reduction of 22% in the cooling step time, explaining the required investment to the insert's alteration.

**Key-words:** CuBe alloy. Injection mold. Cooling time.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação do ciclo de injeção. ....	15
Figura 2 - Produto cemarbox 120 x 80 mm .....	17
Figura 3 - Processo de moldagem por injeção .....	20
Figura 5 – Esboço da proposta de modificação .....	36
Figura 6 - Resistências térmicas para o sistema <i>baffle</i> .....	39
Figura 7 - Layout do sistema de refrigeração dos insertos (CuBe) .....	43
Figura 8 - Modificação placa porta cavidade .....	45
Figura 9 – Modificações realizadas no inserto de CuBe .....	46
Figura 10 - Montagem das cavidades para realização do ensaio .....	47
Figura 11- Posicionamento termopares .....	48
Figura 12 - Célula de teste .....	48
Figura 13 – Medições com pirômetro e câmera termográfica .....	49
Figura 14 - Temperatura do fluido para 1° e 2° inserto .....	52
Figura 15 - Temperatura do fluido para 3° e 4° inserto .....	52
Figura 16 – Temperatura no produto com tempo para resfriamento de 67 s.....	54
Figura 17 - Comparativo temperaturas insertos aço AISI P20 e liga CuBe .....	55
Figura 18 - Imagem Termográfica 01 .....	56
Figura 19 - Imagem por câmera termográfica do produto em diferentes cavidades ....	57
Figura 20 - Simulação novo tempo da etapa de resfriamento do produto .....	58
Figura 21 - Temperaturas do produto com resfriamento de 40 s.....	58
Figura 22 - Temperaturas do produto com resfriamento de 45 s.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas e mecânicas liga CuBe (ampcoloy 83).....	34
Tabela 2 - Dados inserto de CuBe .....	37
Tabela 3 - Dados do polímero e processo.....	38
Tabela 4 - Dados do fluido refrigerante (água) .....	38
Tabela 5 - Dados do produto .....	38
Tabela 6 - Resumo de cálculos para cada inserto.....	44
Tabela 7 - Tabela de tempos para resfriamento e temperatura de saída do fluido para cada inserto .....	51
Tabela 8 - Temperaturas no inserto de número quatro da cavidade dois .....	53
Tabela 9 - Tempo de resfriamento para o volume de polímero na superfície do inserto .....	54

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_s$	área superficial ( $m^2$ );
$Bi$	número de Biot;
$c$	calor específico ( $J/ kg \cdot K$ );
$C_t$	capacitância térmica ( $J/K$ );
$c_p$	calor específico a pressão constante ( $J/kg \cdot K$ );
$D$	diâmetro do tubo (m);
$\dot{E}_g$	taxa de geração de energia (W);
$\dot{E}_e$	taxa de transferência de energia para um volume de controle (W);
$\dot{E}_s$	taxa de transferência de energia a partir de um volume de controle (W);
$h$	coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W/m^2 \cdot k$ );
$k$	condutividade térmica (W/m);
$L_c$	comprimento característico;
$\dot{m}$	vazão em massa (kg/s);
$Nu$	número de Nusselt;
$Pr$	número de Prandtl;
$q$	taxa de transferência de calor (W);
$Q$	transferência de energia (J);
$q_{conv}$	taxa de transferência de calor por convecção (W);
$Re_D$	número de Reynolds;
$R_t$	resistência à transferência de calor por convecção (K/W);
$R_{tot}$	resistência térmica (K/W);
$t$	tempo (s);
$T$	temperatura em um instante $t$ (K);
$T_i$	temperatura inicial do corpo (K);
$T_m$	temperatura média (K)
$T_s$	temperatura da superfície (K);
$T_\infty$	temperatura do ambiente (K);
$u_m$	velocidade média do fluido (m/s);
$U$	coeficiente global de transferência de calor ( $W/ m^2 \cdot K$ );
$\nu$	difusividade de momento ( $m^2/s$ );
$V$	volume ( $m^3$ );

## Letras gregas e símbolos

$\rho$	massa específica (kg/ m <sup>3</sup> );
$\tau_t$	constante de tempo térmico;
$\theta$	diferença de temperatura (K);
$\theta_i$	diferença de temperatura inicial (K);
$\mu$	viscosidade (kg/s . m);
$\rho$	massa específica (kg/m <sup>3</sup> );
$\alpha$	difusidade térmica (m <sup>2</sup> /s);
$\Delta T_{tm}$	diferença média da temperatura (°C);

## LISTA DE SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno de Estireno
ABIPLAST	Associação Brasileira de Plásticos;
CAE	Engenharia Auxiliada por Computador;
CuBe	Cobre Berílio;
FEM	Método de Elementos Finitos;
PSAI	Poliestireno Alto Impacto;

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	<b>7</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>9</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	<b>11</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 AMBIENTE DE ESTÁGIO .....	15
1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO .....	16
1.3 OBJETIVOS.....	17
<b>1.3.1 Objetivo geral</b> .....	<b>17</b>
<b>1.3.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>18</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	19
2.2 PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO PARA TERMOPLÁSTICOS .....	19
2.3 MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS .....	21
2.4 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.....	22
<b>2.4.1 Fluidos utilizados no resfriamento de moldes</b> .....	<b>23</b>
<b>2.4.2 Arquitetura dos circuitos de refrigeração</b> .....	<b>24</b>
2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR APLICADO A MOLDES DE INJEÇÃO.....	26
<b>2.5.1 Método da capacitância global</b> .....	<b>27</b>
<b>2.5.2 Escoamento em tubos circulares</b> .....	<b>30</b>
<b>2.5.3 Balanço de energia</b> .....	<b>31</b>
2.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL UTILIZADA NO PROJETO DE MOLDE ...	33
2.7 MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA CIRCUITOS DE ARREFECIMENTO ....	34
<b>3 PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DO TRABALHO</b> .....	<b>35</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	35
3.2 O MOLDE DE INJEÇÃO DO PRODUTO CEMARBOX .....	35
3.3 A PROPOSTA DE MODIFICAÇÃO DO MOLDE .....	36

3.4	O MÉTODO DE EXECUÇÃO DO TRABALHO .....	36
3.4.1	Resolução analítica .....	37
3.4.2	Simulação computacional .....	44
3.4.3	Alteração do molde.....	45
3.4.4	Ensaio.....	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	51
4.1	INTRODUÇÃO.....	51
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
5	CONCLUSÃO .....	60
	REFERÊNCIAS .....	62
	ANEXO A – <i>DATA SHEET</i> MATERIAL AMPCO 83.....	64
	ANEXO B – PROPRIEDADES PSAI – GRADE SR 550.....	65
	ANEXO C – FICHA DE PROCESSO.....	66
	ANEXO D – PARÂMETROS DE PROGRAMAÇÃO CADMOULD.....	67
	ANEXO E – TABELA CÁLCULO MÉDIA DO INVERSO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DO POLÍMERO.....	68
	ANEXO F – RELATÓRIO CÂMERA TERMOGRÁFICA .....	69

## 1 INTRODUÇÃO

Os polímeros vêm gradativamente interagindo no cotidiano das pessoas, sejam eles empregados em produtos simples, como também em outros que exijam o uso da tecnologia de última geração. Essa tendência somente é possível devido à capacidade com que o termoplástico possui em reproduzir propriedades mecânicas similares quando comparadas a materiais, como madeira, aço, vidro e cerâmica.

Segundo estudo realizado pela ABIPLAST (2012), o Brasil processou 6.665 mil toneladas de material polimérico no decorrer de 2012, atendendo diversas cadeias produtivas da nossa economia, assim fornecendo soluções como elemento de montagem na produção de outros bens, ou até mesmo na forma de produto final, remetido diretamente ao mercado consumidor.

Assim as indústrias de transformação que operam neste segmento se deparam a todo o momento com a necessidade de evoluir, seja qual for o ritmo dos consumidores ou do crescimento econômico. Uma opção seria implementar atualizações e inovações tecnológicas capazes de otimizar o processo produtivo, sendo requisitos essenciais para manter-se competitivo dentro do mercado globalizado.

Embora o aprimoramento das técnicas produtivas seja importante, o molde de injeção não deixa de exercer papel fundamental no desenvolvimento de produtos à base de polímeros, sendo fator decisivo na qualidade do produto e no custo final de produção (SILVA, 2009).

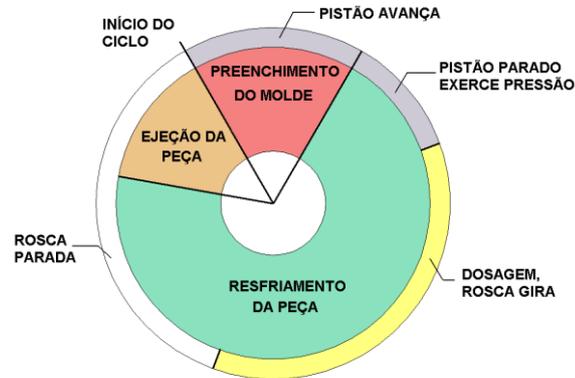
Segundo Berins (1991) e Rees (1995) o molde de injeção é uma ferramenta particular munido de sistemas funcionais, que quando integrada a uma máquina injetora é capaz de dar forma ao polímero fundido, solidificá-lo e extrair o moldado de sua área impressa em um ciclo produtivo. A refrigeração do molde é um dos sistemas funcionais que integram o molde, sendo tema de estudo do trabalho por ser fator determinante no ciclo de injeção.

Muitas vezes a etapa de arrefecimento do molde pode ser a maior fase do ciclo de injeção, sendo este processo totalmente dependente: da espessura do produto; do material a ser processado; do molde; do ambiente em que o molde está inserido. Através do esquema representativo, Figura 1, Manrich (2005) ordenou as operações do ciclo de moldagem denotando uma idéia de tempo, como também a ordem de eventos do molde e os movimentos sequenciais da rosca realizados em um ciclo de injeção.

A representação do ciclo de injeção demonstra que o período de arrefecimento é a etapa mais longa do processo de injeção, a qual possui como principal objetivo a retirada de

calor do termoplástico fundido na cavidade do molde. Destaca Manrich (2005) que a etapa de solidificação do polímero pode chegar a 70% no tempo do ciclo total de injeção.

Figura 1 - Representação do ciclo de injeção.



Fonte: Adaptado de Manrich (2005).

Contudo outros sistemas funcionais do molde como, sistemas de alimentação, sistemas de extração e outros, podem intervir negativamente na eficiência do sistema de refrigeração, gerando diferenças de temperatura na superfície moldante. Para isso o trabalho visa à utilização de um material alternativo, com maior condutividade térmica, que atue em regiões onde exista dificuldade de alocar um circuito de refrigeração interligado por canais.

Diante disto o estudo a seguir apresenta uma comparação entre a utilização de insertos fabricados a partir da liga CuBe com o aço empregado no restante da cavidade do molde. A vantagem desta liga é o aumento da eficácia do sistema de refrigeração em regiões de baixa troca térmica, geralmente localizadas nas geometrias complexas do macho e cavidade.

## 1.1 AMBIENTE DE ESTÁGIO

A Legrand está consolidada no Brasil através de sete plantas industriais, escritório corporativo, sete centros logísticos, seis *showrooms*, além de filiais e representantes distribuídos por todo o país fornecendo as marcas Bticino, Cemar, HDL, Lorenzetti, Pial, SMS e Legrand.

Atuando no segmento de eletroeletrônicos, a Legrand fornece soluções completas de produtos e sistemas para todos os tipos de instalações elétricas, fornecendo soluções para controle e comando da instalação, (interruptores, tomadas, sistemas de automação residencial, interfonia, circuito fechado de televisão e sistema de alarme antifurto), gerenciamento de cabos, (canaletas, eletrocalhas, leitos, perfilados, eletrodutos, caixas de pisos), voz, dados e

imagem (racks e gabinetes, soluções em fibra óptica e cobre, tomadas RJ450 caixas de distribuição multimídia) e no segmento de distribuição e qualidade de energia, voz, dados e imagens, (centros, quadros painéis, disjuntores e nobreaks).

O trabalho de conclusão de curso foi realizado junto às áreas de Engenharia de Processos e Matrizaria, que atualmente são responsáveis pelas alterações construtivas em moldes de injeção. A equipe é composta por duas pessoas, um analista de processos plásticos e um matrizeiro onde desenvolvem as condições de processamento do componente injetado, além da avaliação da integridade do molde diante das alterações propostas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

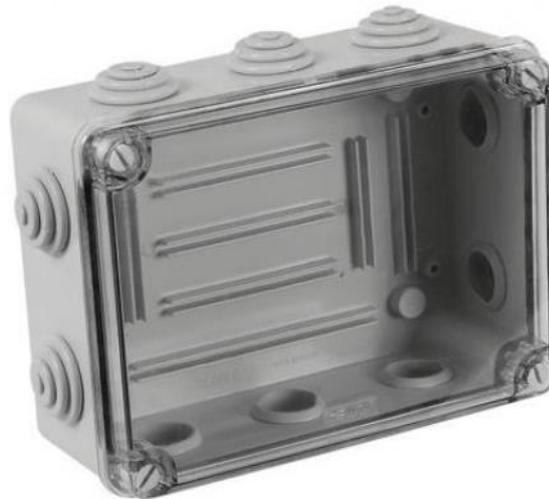
Diante da competitividade dos produtos ofertados ao mercado consumidor, as empresas que atuam neste segmento, estão em uma posição onde a busca por baixo custo de fabricação e aumento da qualidade, são fatores fundamentais para continuarem competitivas.

A política de gestão de processos da Cemar Legrand, tem como foco a constante avaliação e otimização dos métodos de gerenciamento dos processos, assim como a otimização dos processos através da melhoria contínua.

Com base neste contexto, o presente estudo aborda sobre a melhoria do sistema de refrigeração da ferramenta que molda o produto caixa Cemarbox 120x80 mm, Figura 2, o qual foi utilizado como piloto na modificação de seu sistema de refrigeração. Além deste molde, o complemento da linha de produtos contempla sete tamanhos distintos de fundos, porém todos possuem a mesma característica no âmbito do projeto de refrigeração do molde. A linha de produtos Cemarbox no ano de 2012 comercializou 134.901 unidades, gerando um faturamento de R\$ 1.450.000,00. Diante disto uma variação para menor do tempo de refrigeração quando comparado ao praticado atualmente pode agregar um ganho de processo significativo para estes produtos.

Este tamanho molde foi selecionado com base em suas características construtivas, pois fornece as condições necessárias para a alteração proposta. A região a ser estudada já está na forma de inserto, dispensando um trabalho de usinagem para alojamento do novo sistema. Outra característica levada em consideração foi à possibilidade de criar um sistema de refrigeração independente para os insertos. Desta maneira não será necessário o investimento para a fabricação de um molde novo, tendo em vista que o molde selecionado suporta as modificações desejadas.

Figura 2 - Produto cemarbox 120 x 80 mm



Fonte: Cemar Legrand (2013)

Desde seu lançamento em 2003, a família de produtos Cemarbox nunca sofreu nenhuma intervenção de melhoria ou análise de seu projeto construtivo de molde. A baixa eficiência do sistema de refrigeração em regiões específicas faz com que o tempo de resfriamento do moldado seja elevado, sendo necessário para assegurar uma temperatura de desmoldagem baixa, a qual não forneça ao produto danos ou marcas providas do movimento de extração. A realização deste trabalho será de forma oportuna para uma análise e proposta de melhoria do sistema de refrigeração do molde, o qual posteriormente poderá ser replicado para os seis moldes de fundos que complementam a linha de produtos Cemarbox.

### 1.3 OBJETIVOS

Com a intenção de atender os objetivos do trabalho de conclusão de curso e aliado às estratégias da empresa, o mesmo se divide em:

#### 1.3.1 Objetivo geral

Reduzir o tempo da etapa de arrefecimento do moldado, através da melhoria no sistema de refrigeração de um molde de injeção.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- a) Realizar o estudo necessário dos conceitos de refrigeração no projeto de molde;
- b) Realizar cálculo de transferência de calor (temperatura *versus* tempo) entre a interface polímero-inserto;
- c) Realizar simulação computacional da etapa de resfriamento (comparativo cálculos e condição proposta de inserto) utilizando o *software* Cadmould;
- d) Confeccionar novos insertos de liga cobre berílio para refrigeração do molde;
- e) Comparar os resultados obtidos referentes à melhoria do sistema de refrigeração;
- f) Avaliar os custos envolvidos no processo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda a revisão bibliográfica necessária para o entendimento da fundamentação teórica e dos conceitos utilizados no desenvolvimento do trabalho. São apresentados os aspectos gerais referentes ao processo de moldagem por injeção, às características construtivas do molde, transferência de calor, detalhamento analítico da transferência de calor, como também o uso *software* de CAE aplicado no estudo de resfriamento do projeto de molde.

### 2.2 PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO PARA TERMOPLÁSTICOS

O processo de moldagem por injeção foi patenteado em 1872 pelos irmãos John e Isaiás Hyatt para moldagem de produtos celulósicos como: escovas, dentaduras, bolas de bilhar entre outros. O avanço no desenvolvimento da tecnologia moderna do processo de moldagem pode ser atribuído em duas épocas, 1930 sendo acelerado pela segunda guerra mundial, como também no final dos anos 60 e início dos anos 70, gerando uma nova onda de tecnologia de materiais e equipamentos (BERINS, 1991).

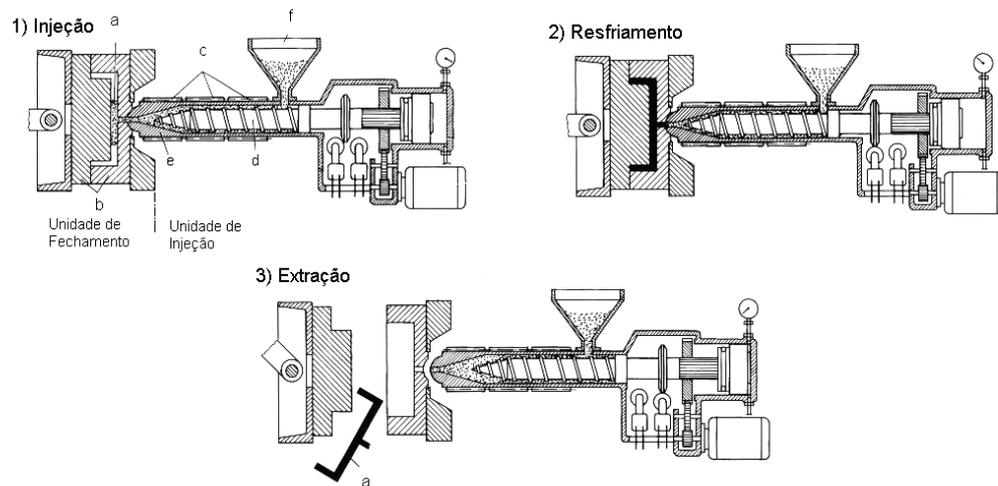
Atualmente, a moldagem por injeção é amplamente utilizada na fabricação de peças à base de polímeros. A transformação pelo processo de injeção é uma das principais técnicas de conversão de resinas termoplásticas em produtos, assim fornecendo soluções como elemento de montagem na produção de outros bens, ou até mesmo na forma de produto final, remetido diretamente ao mercado consumidor.

De acordo com Rubin (1990), Stoeckert e Mennig (1998) uma série de vantagens pode ser atribuída ao processo de injeção, entre elas destacam-se:

- a) produção em grandes volumes, garantindo tolerâncias geométricas;
- b) flexibilidade na produção de produtos com materiais e cores diferentes sendo aplicados no mesmo molde e máquina;
- c) os rejeitos na maioria das vezes podem ser triturados e reprocessados;
- d) capacidade de produção de pequenos e grandes produtos cujos seriam impossíveis de produzir por outros métodos;
- e) o processo é totalmente receptivo para a automação;
- f) o processo pode gerar produtos com baixos custos por unidade produzida.

Uma representação básica do conjunto máquina injetora e molde de injeção podem ser observados na Figura 3. A máquina injetora é dividida em duas partes, sendo composta por uma unidade de injeção e uma unidade de fechamento. A unidade de injeção é responsável pela preparação e injeção da massa polimérica fundida, geralmente a unidade de injeção é composta por um cilindro com resistências de aquecimento externo e um parafuso sem-fim. A unidade de fechamento acomoda o molde, possui uma placa fixa e outra móvel que se movimenta sobre um guia linear realizando movimentos de abertura e fechamento determinados pelo programa inserido na máquina injetora.

Figura 3 - Processo de moldagem por injeção



Fonte: Adaptado Stoeckhert e Mennig (1998)

a: Produto moldado, b: molde, c: aquecedores, d: parafuso sem-fim, e: cilindro, f: reservatório de material.

O processo de moldagem por injeção consiste essencialmente na fusão do material polimérico dentro de um conjunto plastificador e sua sucessiva injeção para o interior da cavidade do molde. O molde que por sua vez está com temperatura abaixo da  $T_g$  (temperatura de transição vítrea do termoplástico), solidifica o material injetado, ao mesmo tempo em que o parafuso sem-fim continua a forçar a entrada de material, compensando a redução de volume resultante do resfriamento do termoplástico (VIEIRA, 2012).

As etapas de extração do moldado e de movimentos de abertura e fechamento são realizadas pela unidade de fechamento. Percorrendo sobre um guia linear, a placa móvel da unidade de fechamento realiza o movimento de abertura do molde, ao final da posição programada de abertura o extrator é liberado geralmente em sentido oposto ao da abertura, desmoldando o produto de sua cavidade.

### 2.3 MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

Segundo Berins (1991), Rees (1995), Stoeckheret (1998), Menges, Michaeli e Mohren (2001) e Manrich (2005), um molde de injeção é uma ferramenta particular, que quando integrada a uma máquina injetora é capaz de dar forma ao polímero fundido injetado em sua cavidade, solidificá-lo e extrair o moldado de sua área impressa, garantindo em ciclo produtivo, repetibilidade do processo e qualidade do moldado, reproduzindo tolerâncias e acabamentos do produto.

De um modo geral o molde de injeção é composto por dois conjuntos, um móvel e outro fixo que são presos às duas placas da unidade de fechamento de uma máquina injetora, possibilitando com que o molde possa ser aberto e fechado. Quando o molde é fechado é originado uma ou mais cavidades, também chamada de área impressa, as quais são responsáveis pela forma do produto moldado. Tendo o molde aberto, o sistema de extração possibilita a ejeção do produto.

Com o propósito de garantir a eficiência produtiva de componentes injetados, o molde é munido de sistemas funcionais, que promovem condições controladas para que o polímero possa preencher toda a cavidade do molde (sistemas de alimentação), resfriar uniformemente sua superfície de forma rápida (sistemas de resfriamento) e desmoldar da cavidade de forma a não danificar o produto (sistemas de extração), como também sistemas que garantam o alinhamento e rigidez do molde, entre o conjunto fixo e móvel (sistemas de centragem e guiamento) (MENGES, MICHAELI e MOHREN, 2001; MANRICH, 2005).

Além destes sistemas funcionais, os conjuntos mais complexos (moldes com gavetas, articulados, mecanismos rotativos, entre outros), podem ser constituídos de outras configurações. A escolha pode ser alterada em função de vários fatores, produtividade solicitada, recurso financeiro disponível, complexibilidade do produto a ser moldado, periféricos a serem inseridos ao processo produtivo, material a ser processado, e outros.

De acordo com Dubois (1987), Berins (1991), Menges, Michaeli e Mohren (2001), Harada (2004) e Manrich (2005), o molde de injeção pode ser classificado em função de alguns sistemas funcionais. O Quadro 1 apresenta um comparativo de classificação dos moldes conforme os autores citados neste parágrafo.

Quadro 1 - Classificação e tipos de moldes por autor

<b>Autor</b>	<b>Dubois (1987)</b>	<b>Berins (1991)</b>	<b>Menges, Michaeli e Mohren (2001)</b>	<b>Harada (2004)</b>	<b>Manrich (2005)</b>
<b>Critério de Classificação</b>	-	-	Sistemas de extração	Sistemas de alimentação e sistemas de extração	Sistemas de alimentação
<b>Tipos de Moldes</b>	molde padrão (duas placas)	molde padrão (duas placas)	molde padrão (duas placas)	molde com canal frio	moldes com canais frios ou convencionais, podendo ser de duas ou três placas
	molde de três placas	molde de três placas	molde de três placas	molde com canal quente	moldes de canais isolados
	molde com elementos móveis	molde com câmara quente	molde com elementos móveis	molde com extração por placa impulsora	moldes com canais quentes, divididos com distribuidor quente e frio
	molde com placa extratora	molde com bico quente	molde com placa extratora	molde com dispositivo de ar comprimido	
	molde com extratores angulares		molde com extratores angulares	molde com dispositivo de núcleo rotativo	
	moldes com dispositivos de rosqueamento		moldes com dispositivos de rosqueamento		

Fonte: Autor (2013)

## 2.4 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Segundo Rees (1995), Menges, Michaeli e Mohren (2001) e Harada (2004) o sistema de refrigeração do molde permite a remoção de calor do produto moldado, agindo de maneira eficaz (rápido) e uniforme, a fim de reduzir à temperatura ao ponto em que o produto suporte as forças de extração sem ser deformado.

Muitas vezes a etapa de arrefecimento do molde pode ser a maior fase do ciclo de injeção, sendo este processo totalmente dependente: da espessura do produto; do material a ser processado; do molde; do ambiente em que o molde está inserido. Segundo Rees (1995), Harada (2004), Manrich (2005) e Ansari e Poornina (2013) a etapa de resfriamento do molde pode ser 50%, ou mais, do ciclo total de injeção.

Para Rees (1995), Menges, Michaeli e Mohren (2001) e Chanda e Roy (2006) a velocidade em que ocorre a transferência de calor entre o polímero e o molde, é elemento determinante para o desempenho econômico da ferramenta de injeção, pois afeta na qualidade do produto moldado e define o tempo de resfriamento necessário para o ciclo de injeção.

O sistema de refrigeração além de determinar a velocidade de transferência de calor, tem como principal atribuição o controle do resfriamento do molde, não só em termos da variação de temperatura do fluido refrigerante, como também, minimizar a diferença de temperaturas das faces que moldam o produto. Rees (1995) e Harada (2004) complementam que um sistema de refrigeração pode ser considerado eficiente, quando a variação de temperatura entre a entrada e saída do fluido refrigerante não exceda 5°C. Problemas como tensão residual termo-induzido (distorção térmica), linha de emenda, vazio, diferença de brilho, rebarba e outros, em muitos casos, podem ser atribuídos à baixa eficiência do sistema de refrigeração.

Diante disto o bom funcionamento do sistema de arrefecimento do molde está relacionado com a soma de diversos fatores: fluido de arrefecimento; formato do circuito de refrigeração; fornecimento do fluido refrigerante (temperatura, conexões, vazão e pressão), material a ser injetado, regime do fluxo de refrigerante (laminar ou turbulento) e outros (REES, 1995; HSU, WANG e HUANG 2013).

#### **2.4.1 Fluidos utilizados no resfriamento de moldes**

Conforme Manrich (2005) e Dias (2008) a água é o principal fluido utilizado pelas indústrias de transformação de polímeros, que é empregado na refrigeração do molde. Isso é caracterizado pelo fato da água mesclar boas características de processo (baixa viscosidade, suscetível a tratamentos, reciclável) com custo acessível.

Destaca Manrich (2005) que é necessário o uso de Metanol + CO<sub>2</sub>, para temperaturas abaixo de 3°C, e óleo quando são necessárias temperaturas acima de 80°C.

Tanto Brito, Matos e Mendes (2004) e Harada (2004), atribuem o emprego do ar quando o sistema de refrigeração a água não pode ser utilizado, como também quando se deseja um resfriamento lento.

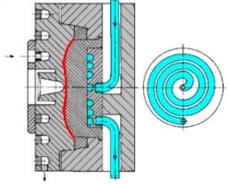
#### 2.4.2 Arquitetura dos circuitos de refrigeração

Existem diferentes formatos e configurações dos sistemas de refrigeração que podem ser aplicados a um molde de injeção, sendo dependente do material a ser processado, produtividade do molde, formato da peça e dos periféricos disponíveis (REES, 1995).

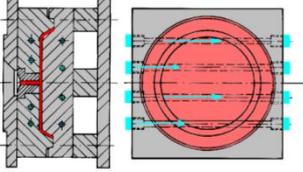
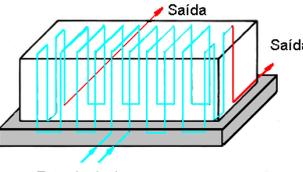
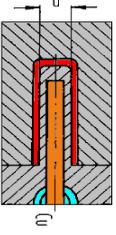
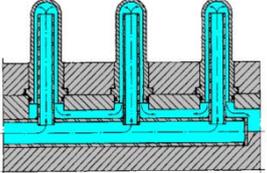
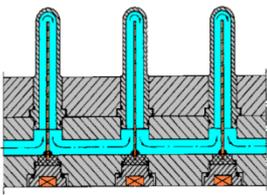
Embora haja grande variedade de sistemas que possam ser aplicados Chanda e Roy (2006), complementam que o resfriamento deve ser uniforme tanto na superfície externa quanto interna do produto. Entretanto para o resfriamento do “exterior” do produto (cavidade) não existem grandes restrições, uma vez que existe espaço na parte fixa do molde, para alocação do sistema de arrefecimento. O mesmo não se pode afirmar para o resfriamento no “interior” do produto (macho), pois o sistema de arrefecimento do molde deve conciliar seu layout com a disposição de outros, como o sistema de extração, insertos e elementos móveis.

O Quadro 2 demonstra alguns modelos de circuitos de arrefecimento, comumente utilizados em moldes para injeção de termoplásticos. Os sistemas podem ser compostos de um nível, ou mais, dependendo da geometria em que se deseja arrefecer. Normalmente são furos que conectados em série, como também em paralelo formam um circuito fechado, com formato de “Z”, “U”, retangular, circular, entre outros. Os canais de refrigeração podem ser usinados diretamente no bloco de aço, como também feitos de tubo de cobre alojados no interior do bloco.

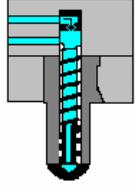
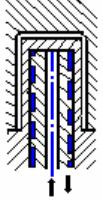
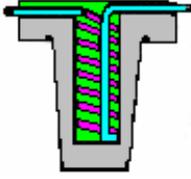
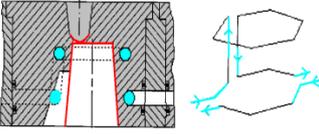
Quadro 2 - Exemplos de modelos de refrigeração (continua)

Tipo	Característica
 <p><b>Circuito em espiral</b></p>	<p>Este circuito é utilizado quando se deseja promover uma maior estabilidade da temperatura sobre a superfície moldante. Geralmente empregado para produtos que exigem alta qualidade do moldado, assim como isentas de deformações termo-induzidas.</p>

Quadro 02 – Exemplos de modelos de refrigeração (continuação)

 <p><b>Circuito em série</b></p>	<p>Empregado em moldes de baixa complexibilidade, não apresenta distribuição uniforme de temperatura na superfície do moldado, porém a facilidade de usinagem dos canais justifica o emprego deste circuito.</p>
 <p><b>Circuito em paralelo</b></p>	<p>Utilizado na maioria dos moldes este sistema permite boa distribuição do arrefecimento na superfície moldante, desde que seus canais estejam dimensionados de modo que o fluxo de troca térmica entre a superfície da cavidade seja a mesma.</p>
 <p><b>Circuito com pino térmico</b></p>	<p>Este sistema possibilita a refrigeração de pequenas áreas com bom fluxo de arrefecimento, sendo mais elevado que a refrigeração por água. A desvantagem está associada à funcionalidade do sistema, pois necessita que <math>\frac{1}{4}</math> da altura do pino térmico fique submersa em água.</p>
 <p><b>Circuito bubbler (borbulhador)</b></p>	<p>Conhecido como borbulhador, este sistema é indicado para arrefecimento de regiões localizadas (menores que 8 mm e localizada em pequenas regiões onde o circuito convencional não pode abranger), necessita de dois canais, um para alimentação e outro para saída do fluido refrigerante.</p>
 <p><b>Circuito baffle (cascata)</b></p>	<p>Semelhante ao sistema borbulhador porém constituído por uma palheta ou lâmina separadora guiando o fluxo de refrigerante ao invés de um tubo. Este método permite seções transversais máximas para o escoamento do fluido, com um único canal de alimentação e saída do fluido refrigerante.</p>

Quadro 02 – Exemplos de modelos de refrigeração (continuação)

 <p><b>Cascata com núcleo helicoidal simples</b></p>	<p>É um sistema padronizado que possui diâmetros aplicáveis de 12 a 50 mm, para aplicação em geometrias cilíndricas. O refrigerante escoá pelo centro do sistema e retorna pela periferia em forma espiral.</p>
 <p><b>Cascata com canal helicoidal</b></p>	<p>Utilizado para qualquer tipo de seção, consiste em um postigo usinado na forma que se deseja arrefecer, com canais específicos para maior controle de temperatura. O fluido refrigerante escoá pelo centro e retorna em forma de espiral.</p>
 <p><b>Tubos de cobre</b></p>	<p>Utilizado para refrigeração de machos, consiste em um circuito construído a partir de tubos de cobre. Não possui grande aplicabilidade, pois necessita de grande área para alocação do sistema e revestimento por outro material de baixo ponto de fusão.</p>
 <p><b>Circuito alternativo para cavidades</b></p>	<p>Utilizado quando é necessária a máxima eficiência de arrefecimento, sendo aplicado principalmente em recipientes com paredes finas. São utilizados em cavidades redondas, quadradas ou blocos retangulares montados sobre uma placa de apoio.</p>

Fonte: REES (1995); Menges, Michaeli e Mohren (2001); Brito, Matos e Mendes (2004); Harada (2004); Dias (2012)

## 2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR APLICADO A MOLDES DE INJEÇÃO

Segundo Rees (1995), a retirada de calor do molde de injeção não pode ser atribuída somente ao período de resfriamento do produto, mas sim ao tempo total do ciclo de injeção.

Incropera e De Witt (2003), associam que a transferência de calor é uma função do tempo, ou seja, se a temperatura de superfície de um sistema for alterada, a temperatura em cada ponto do sistema também será alterada, até o momento em que o regime estacionário

seja alcançado. O mesmo autor também exemplifica que um problema simples, mas comum de condução transiente é aquele no qual o sólido experimenta uma mudança repentina em seu ambiente térmico.

Considerando o fluxo de calor do molde como transiente ou não estacionário, Incropera e De Witt (2003) adotam um procedimento denominado de método da capacitância global. Esse método possibilita a determinação da variação de temperatura no interior de um sólido em processo transiente, assim como a determinação da transferência de calor entre o sólido e seu ambiente desde que os gradientes de temperaturas no interior de determinado sólido possam ser desprezíveis.

Contudo é importante determinar os coeficientes de convecção, associados ao escoamento em tubos. Diante disto será necessário o conhecimento de: grandezas adimensionais, efeitos da camada limite, assim como o balanço global de energia.

Sendo assim correlações para determinar de forma aproximada o coeficiente de transferência de calor por convecção podem ser desenvolvidas em diversas condições de escoamento (INCROPERA e DE WITT, 2003).

As equações apresentadas neste capítulo foram baseadas pelos autores Incropera e De Witt (2003).

### **2.5.1 Método da capacitância global**

Para o desenvolvimento do método de resolução de problemas não estacionários ou transientes, Incropera e De Witt (2003) baseiam-se na hipótese de que a temperatura de determinado corpo será uniforme com o ambiente, em qualquer instante do processo de transferência de calor. Isto implica que a direção e a taxa de variação da temperatura no interior do corpo possam ser desprezíveis.

Com gradiente de temperatura desprezível, a lei de Fourier converge para um valor de condutividade térmica infinita. Para essa condição ser válida, Incropera e De Witt (2003) atribuem o fato de que a resistência à transferência de calor do corpo para a vizinhança deverá ser maior que à resistência a condução no interior do corpo.

Sendo assim a resposta do transiente de temperatura será determinada pela formulação de uma análise global de energia no corpo. A equação geral para a determinação da conservação de energia pode ser realizada com base, na taxa de energia gerada pelo corpo ( $\dot{E}_g$ ), taxa de energia transferida para um volume de controle ( $\dot{E}_e$ ) e taxa de transferência de energia a partir de um volume de controle ( $\dot{E}_s$ ), sendo descrita através da eq. 2.1.

$$\dot{E}_e + \dot{E}_g - \dot{E}_s = \frac{dE_{ar}}{dt} = \dot{E}_{ar} \quad (2.1)$$

Onde  $\dot{E}_{ar}$  é a taxa de elevação da energia armazenada no interior de um volume de controle. Uma forma alternativa para ser utilizada em qualquer instante de tempo, é obtida com a integração da eq. 2.1. Assumindo que a direção e a taxa de variação da temperatura no interior do corpo possam ser desprezíveis o balanço de energia pode ser expresso conforme a eq. 2.2 ou eq. 2.3.

$$-\dot{E}_s = \dot{E}_{ar} \quad (2.2)$$

$$-hA_s(T - T_\infty) = \rho V c \frac{dT}{dt} \quad (2.3)$$

Assumindo a diferença de temperatura como,  $\theta \equiv (T - T_\infty)$ , e reconhecendo  $(d\theta/dt) = (dT/dt)$ , obtem-se a eq. 2.4:

$$\left(\frac{\rho V c}{h A_s}\right) \left(\frac{d\theta}{dt}\right) = -\theta \quad (2.4)$$

Realizando as devidas integrações com condições iniciais  $t = 0$  e  $T(0) = T_i$ , é possível obter a eq. 2.5, referente ao tempo necessário para o corpo alcançar determinada temperatura.

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{\left[-\left(\frac{h A_s}{\rho V c}\right)t\right]} \quad (2.5)$$

Onde:

$h$ : coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{k}$ );

$T$ : temperatura em um instante  $t$  (K);

$T_i$ : temperatura inicial do corpo (K);

$T_\infty$ : temperatura do ambiente (K);

$\rho$ : massa específica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$V$ : volume ( $\text{m}^3$ );

$A_s$ : área superficial ( $\text{m}^2$ );

$c$ : calor específico ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ );

$t$ : tempo (s).

Se o tempo  $t$  convergir para o infinito, os resultados das equações acima, irão indicar que a temperatura do corpo, como também do fluido irão entrar em equilíbrio térmico. Diante disto pode-se atribuir que o tempo para alcançar o equilíbrio térmico ( $\theta = 0$ ) depende da parcela  $\rho Vc / hA_s$ , o qual pode ser definido como constante de tempo térmico ( $\tau_t$ ) sendo representado através da eq. 2.6. Com isso qualquer decréscimo em  $Rt$  ou  $Ct$ , fará com que o corpo responda mais rápido a flutuação de temperatura, reduzindo o tempo para alcançar o equilíbrio térmico.

$$\tau_t = \left(1/hA_s\right)(\rho Vc) = R_t C_t \quad (2.6)$$

Sendo:

$R_t$ : resistência à transferência de calor por convecção (K/W);

$C_t$ : capacitância térmica (J/K).

Após definir um instante de tempo ( $t$ ) a equação de energia total ( $Q$ ) é descrita pela eq. 2.7:

$$Q = \int_0^t q dt = hA_s \int_0^t \theta dt \quad (2.7)$$

substituindo  $\theta$  pela eq. 2.7 e realizando a integração tem-se as eq. 2.8 e eq. 2.9:

$$Q = (\rho Vc)\theta_i [1 - \exp(-t/\tau_t)] \quad (2.8)$$

$$-Q = \Delta E_{ar} \quad (2.9)$$

De acordo com Incropera e De Witt (2003) o valor da energia total ( $Q$ ) será positivo quando houver uma remoção de calor do corpo, no caso de um molde de injeção este processo será a transferência de calor por convecção entre o fluido de arrefecimento e as paredes do circuito de arrefecimento do molde. Do mesmo modo se o corpo aquecido, o valor  $Q$  será negativo.

Para determinar a precisão dos resultados que envolvem as eq. 2.1 a 2.9, é importante determinar o número de Biot ( $Bi$ ), eq. 2.10, o qual fornece um parâmetro adimensional sobre problemas de condução que englobam mecanismo de convecção superficial, como também uma medida da variação de energia interna do corpo em relação à diferença de temperatura entre a superfície e o fluido (INCROPERA e DE WITT, 2003).

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \quad (2.10)$$

Onde:

$L_c$  : comprimento característico;

$K$  : condutividade térmica (W/m).

Para números de Biot  $\ll 1$ , significa dizer que a energia térmica se distribui uniformemente e de forma unidimensional no plano em “X”. Já Biot  $\gg 1$ , implica que a resistência a condução no interior do corpo é muito maior do que a resistência a convecção da interface corpo fluído.

### 2.5.2 Escoamento em tubos circulares

Ao trabalhar com escoamento interno é importante calcular o tipo de escoamento desenvolvido. Para isto o número de Reynolds (eq.2.11 ou 2.12) fornece um número adimensional para caracterização do escoamento em um tubo circular.

$$Re_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} \quad (2.11)$$

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\mu\pi D} \quad (2.12)$$

Onde:

$u_m$ : velocidade média do fluído (m/s);

$D$ : diâmetro do tubo (m);

$\mu$ : viscosidade (kg/s. m);

$\rho$ : massa específica (kg/m<sup>3</sup>);

$\dot{m}$ : vazão em massa (kg/s).

Para um escoamento plenamente desenvolvido, o regime de fluxo turbulento pode ser atribuído quando  $Re \geq 2300$ . Para Reynolds menores o escoamento é caracterizado com laminar (INCROPERA E DE WITT, 2003).

Outras grandezas importantes a serem determinadas são o número de Prandtl e de Nusselt. O número de Prandtl fornece uma medida da efetividade relativa do momento e o transporte de energia por difusão nas camadas limites de velocidade e térmica e é dada pela eq. 2.13.

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (2.13)$$

Onde:

$v$ : difusividade de momento ( $m^2/s$ );

$\alpha$ : difusividade térmica ( $m^2/s$ );

$c_p$ : calor específico a pressão constante ( $J/kg \cdot K$ );

$k$ : condutividade térmica ( $W/m$ ).

O número de Nusselt ( $Nu$ ), eq. 2.14, fornece uma medida da transferência de calor pelo mecanismo de convecção que ocorre na superfície do corpo, sendo independente de  $Re$ ,  $Pr$  e da posição axial.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (2.14)$$

Uma correlação para a convecção em escoamento turbulento, em tubos circulares pode ser feita através da equação de Colburn (eq. 2.15), como também pela equação de Dittus-Boelter para resfriamento (eq. 2.16).

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \quad (2.15)$$

$$Nu_D = 0,0265 Re_D^{4/5} Pr^{0,3} \quad (2.16)$$

### 2.5.3 Balanço de energia

O balanço de energia pode ser aplicado com o propósito de determinar o comportamento da temperatura média ( $T_m$ ) ao longo da convecção com o tubo, assim como relacionar o mecanismo de convecção com as diferentes temperaturas presentes na entrada e saída do tubo (INCROPERA e DE WITT, 2003).

Ao realizar um balanço de energia em um volume de controle para escoamento interno em tubo tem-se a eq. 2.17:

$$q_{conv} = \dot{m}c_p(T_{m,s} - T_{m,i}) \quad (2.17)$$

Considerando que a diferença de temperatura ( $T_s - T_m$ ) decresce exponencialmente com a distância ao longo do eixo do tubo, a eq. 2.17 é representada na seguinte forma através da eq. 2.18:

$$q_{conv} = hA_s(\Delta T_{lm}) \quad (2.18)$$

Onde:

$q_{conv}$ : taxa de transferência por convecção (W);

$A_s$ : área da superfície do tubo (m<sup>2</sup>);

$\Delta T_{lm}$ : diferença média da temperatura sobre o comprimento do tubo conforme eq. 2.19 (°C).

$$\Delta T_{lm} = \left( \frac{\Delta T_s - \Delta T_e}{\ln(\Delta T_s / \Delta T_e)} \right) \quad (2.19)$$

Não definido o parâmetro da temperatura de superfície e admitindo escoamento de fluido externo ao tubo, com temperatura conhecida pode-se substituir a temperatura de superfície do tubo ( $T_s$ ) pela temperatura do fluido externo ( $T_\infty$ ), assim como o coeficiente de calor por convecção ( $h$ ) pelo coeficiente médio global de transferência de calor ( $U$ ). Desta maneira tem-se a eq. 2.20:

$$q = UA_s(\Delta T_{lm}) \quad (2.20)$$

Segundo Incropera e De Witt (2003)  $(UA_s)^{-1}$  é equivalente ao somatório de resistências térmicas totais ( $R_{tot}$ ) entre os fluídos, sendo que a eq. 2.20 pode ser reescrita da seguinte forma através das equações, eq. 2.21 e eq. 2.22 :

$$q = \frac{\Delta T_{lm}}{R_{tot}} \quad (2.21)$$

com:

$$R_{tot} = \frac{1}{UA_s} \quad (2.22)$$

## 2.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL UTILIZADA NO PROJETO DE MOLDE

O processo de moldagem por injeção é caracterizado por um processo descontínuo e extremamente complexo, onde é dependente da resina a ser utilizada, dos parâmetros de processamento, como também da geometria da cavidade (STOECKHERT e MENNIG 1998). Diante disto o *software* de CAE (*Computer Aided Engineering*) proporciona a realização de experimentos, com recursos de aproximação matemática (método de elementos finitos), o qual acelera o processo de desenvolvimento do molde, simulando situações aproximadas quando comparadas ao modelo físico real.

Segundo Stoeckhert e Menning (1998) o *software* de CAE baseia-se em três equações diferenciais para descrever o processo de moldagem por injeção. O equacionamento pode ser resolvido e simplificado pela:

- a) equação da continuidade: é o balanço de massa o qual inclui a conservação do fluxo de massa;
- b) equação do movimento: é um equilíbrio de forças que atuam sobre determinado elemento de volume, podendo ser determinada pelo comportamento reológico e térmico do polímero;
- c) equação de energia: através da condutividade de calor, atrito (calor gerado por cisalhamento), e o mecanismo de convecção define as mudanças na energia sobre os elementos de volume constituindo um balanço de energia.

A partir de uma análise realizada nos softwares de CAE podem ser originados resultados como: pressão de injeção, pressão de recalque, tempo de injeção, tempo de pressão posterior, temperaturas do conjunto injetor, tempo de resfriamento e outros.

Estes dados auxiliam o projetista de molde para a definição dos melhores sistemas funcionais (alimentação e refrigeração) a serem aplicados ao molde de injeção.

## 2.7 MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA CIRCUITOS DE ARREFECIMENTO

Diversas são as alternativas para minimizar o período de arrefecimento em um molde de injeção, entre elas pode-se destacar o emprego de materiais alternativos com alta condutividade térmica, liga de cobre berílio, ligas de alumínio e bronze e outras na construção de moldes para injeção de termoplásticos.

Ligas CuBe são utilizadas devido à capacidade de obter boas propriedades físicas e mecânicas, quando comparadas ao aço normalmente utilizado para a construção de moldes. Diversas ligas CuBe podem ser nitretadas aumentando ainda mais sua dureza superficial, resultando com baixas perdas de condutividade térmica.

Em um molde de injeção as ligas com alta condutividade térmica podem ser empregadas em posições, como também pinos e insertos, com a finalidade de promover maior troca térmica entre o moldado com o circuito refrigerante (AMPCO, 2013).

A Tabela 1 apresenta algumas propriedades da liga CuBe com nome comercial Ampcoloy 83.

Tabela 1 - Propriedades físicas e mecânicas liga CuBe (ampcoloy 83)

Propriedades físicas e mecânicas CuBe	Unidade	Valor
Dureza	HRC	40
Condutividade Térmica	W/ mK	106
Resistência à tração	MPa	1310
Limite ao escoamento	MPa	1000
Alongamento	%	4

Fonte: Ampco (2013)

Com o propósito de obter outras informações, está disponível no ANEXO A o *data sheet* completo da liga CuBe com nome comercial Ampcoloy 83.

### 3 PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DO TRABALHO

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o objeto de estudo, assim como a proposta de solução, relatando a metodologia e o planejamento que foram utilizados na disciplina de Estágio II.

O desenvolvimento deste capítulo está associado com os objetivos específicos mencionados no Capítulo 1.

#### 3.2 O MOLDE DE INJEÇÃO DO PRODUTO CEMARBOX

De acordo com Berins (1991), Manrich (2005) e Harada (2004) o molde utilizado neste trabalho é classificado como molde padrão (duas placas) com canais aquecidos, constituído por sistema de extração com placa extratora no conjunto móvel, como também extração pneumática no conjunto fixo do molde.

Construído com duas cavidades possui alimentação direta por sistema de câmara quente e sistema de extração pneumática para auxiliar a desmoldagem da cavidade, assim como extração por pinos para ejeção do componente no macho.

O material empregado para a construção do porta molde é o aço AISI 1045, o qual possui boas propriedades mecânicas aliado a grande disponibilidade no mercado. Para as cavidades e machos foram utilizados o aço AISI P20, devido à necessidade de durabilidade e repetibilidade do ciclo.

O *layout* da refrigeração apresenta na cavidade um circuito de arrefecimento no formato da geometria externa do produto, com canais ligados em série. No macho o resfriamento é realizado por circuitos *baffle* em série, conectados por um canal de refrigeração em paralelo.

Contudo o sistema de arrefecimento não apresenta temperatura homogênea na superfície moldante. As regiões, com insertos fabricados a partir de aço AISI P20 nitretado não possuem canais de refrigeração, sendo o fluxo de troca térmica da região realizado pelo circuito de arrefecimento do macho e da cavidade. Tal condição eleva a etapa de resfriamento em um ciclo de injeção, chegando a representar 76 % do ciclo total da manufatura.

É importante ressaltar que o molde em estudo foi construído com o propósito de fornecer solução ao mercado consumidor, não sendo este desenvolvido para aplicação experimental.

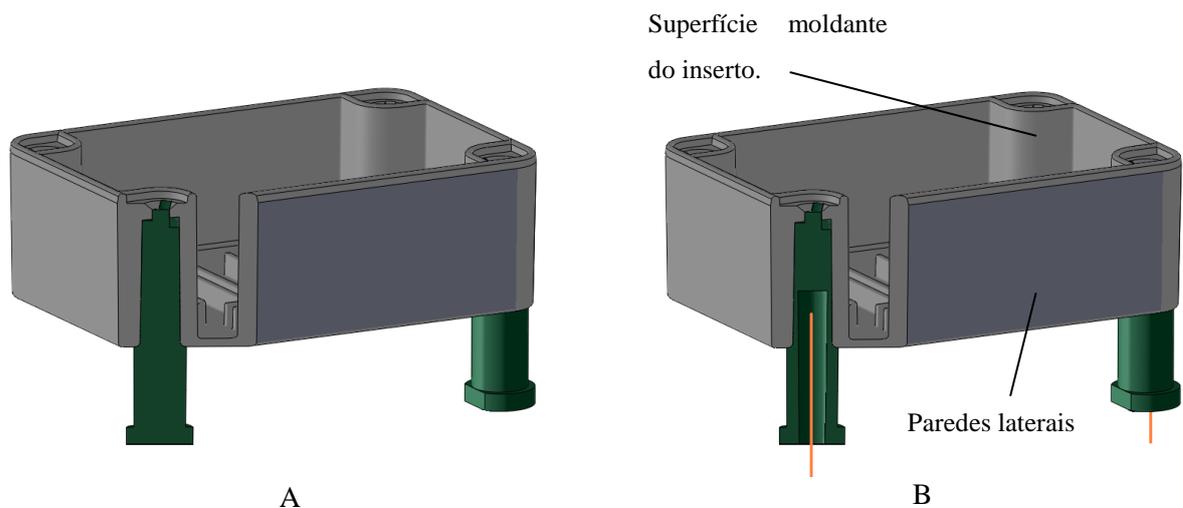
Na próxima seção são descritas a proposta de solução como também o método no qual o referido trabalho foi conduzido.

### 3.3 A PROPOSTA DE MODIFICAÇÃO DO MOLDE

Substituir os insertos atuais construídos a partir do aço AISI P20 (Figura 4-A), por insertos de CuBe (nome comercial Ampcoloy 83) sendo munidos com um circuito de refrigeração em formato *baffle* (Figura 4-B).

Essa modificação visa minimizar a diferença de temperaturas entre as paredes do produto moldado, sendo o tempo para refrigeração da superfície moldante dos insertos 2,4 vezes maior do que o tempo de refrigeração do restante das paredes do produto.

Figura 4 – Esboço da proposta de modificação



Fonte: Autor (2014)

### 3.4 O MÉTODO DE EXECUÇÃO DO TRABALHO

Para melhor compreensão do trabalho, o método de execução foi desenvolvido através de atividades, sendo descrito através de: resolução do equacionamento de transferência de calor entre a interface liga CuBe e termoplástico, simulação computacional da etapa de resfriamento, alteração do molde e ensaio comparativo entre os insertos (liga CuBe e aço AISI P20).

### 3.4.1 Resolução analítica

Nesta seção são desenvolvidos os cálculos de transferência de calor relacionados ao fluxo de energia térmica na região analisada (Figura 5), ou seja, interfaces do polímero, inserto e fluido refrigerante.

Para simplificação do desenvolvimento analítico é admitido que a extração de calor do polímero, na região de estudo, é realizada somente pelo sistema de refrigeração dos insertos, desta maneira o calor cedido pelo polímero fundido na interface do inserto é totalmente removido pelo sistema de refrigeração do núcleo dos insertos.

Desta forma os cálculos apresentados referem-se ao inserto proposto, ou seja, construídos a partir da liga CuBe, pois apresentam um sistema *baffle* que realiza o arrefecimento da zona moldante. Sendo assim não são apresentados os cálculos dos insertos de aço AISI P20 por não ser possível uma comparação, já que não existe um circuito de refrigeração específico para região analisada.

Na Tabela 2 são inseridos os parâmetros de dados do inserto, necessários para o desenvolvimento analítico referente à transferência de calor que ocorre no sistema combinado (polímero, inserto e fluido refrigerante). Diante disto são apresentados parâmetros como diâmetro interno da cascata, profundidade do sistema, condutividade térmica da liga e outros.

Tabela 2 - Dados inserto de CuBe

Parâmetro	Valor	Unidade
Diâmetro da cascata (di)	<b>0,008</b>	m
Diâmetro externo do macho (De)	<b>0,0125</b>	m
Profundidade da cascata	<b>0,0315</b>	m
Condutividade térmica da liga ( $k_{ampco}$ )	<b>106</b>	W/mK
Espessura da lâmina defletora	<b>0,001</b>	m
Diâmetro da passagem de fluido (Dpas)	<b>0,008</b>	m

Fonte: Autor (2014)

Parâmetros como temperatura de processamento, temperatura de extração e condutividade térmica do polímero referente aos dados do processo e polímero podem ser visualizados através da Tabela 3.

Tabela 3 - Dados do polímero e processo

Parâmetro	Valor	Unidade
Temperatura de processamento ( $T_{pol}$ )	220	°C
Temperatura de extração para o sis. <i>baffle</i>	65	°C
Tempo do ciclo total	65	s
Densidade ( $\rho$ )	1183	kg/m <sup>3</sup>
Calor específico (c, cp)	1200	J/kg.K
Condutividade térmica ( $K_{pol}$ )	0,13	W/mK

Fonte: Autor (2014)

Através da Tabela 4 são adquiridos os valores de densidade, calor específico, temperatura de entrada, vazão e outros referentes ao fluido refrigerante.

Tabela 4 - Dados do fluido refrigerante (água)

Parâmetro	Valor	Unidade
Densidade ( $\rho$ )	1000	kg/m <sup>3</sup>
Calor específico (c, cp)	4186	J/kg.K
Coefficiente de condutividade ( $k_{\text{água}}$ )	0,602	W/mK
Viscosidade cinemática ( $\nu$ )	1,2E-06	m <sup>2</sup> /s
Viscosidade absoluta ( $\mu$ )	0,001204	Ns/m <sup>2</sup>
Vazão para cascata (l/min)	4,34	l/min
Temperatura do fluido para cascata ( $T_{flu}$ )	13	°C

Fonte: Autor (2014)

Na Tabela 05 são apresentados valores do diâmetro externo e interno, volume de material polimérico, área superficial e outros, sendo referente aos dados do produto.

Tabela 5 - Dados do produto

Parâmetro	Valor	Unidade
Diâmetro externo ( $D_e$ )	0,0185	m
Diâmetro Interno ( $D_i$ )	0,0125	m
Volume de polímero (Vol)	1,1E-05	m <sup>3</sup>
Comprimento do produto	0,041	m
Área superficial interna ( $A_{pol}$ )	0,00161	m <sup>2</sup>

Fonte: Autor (2014)

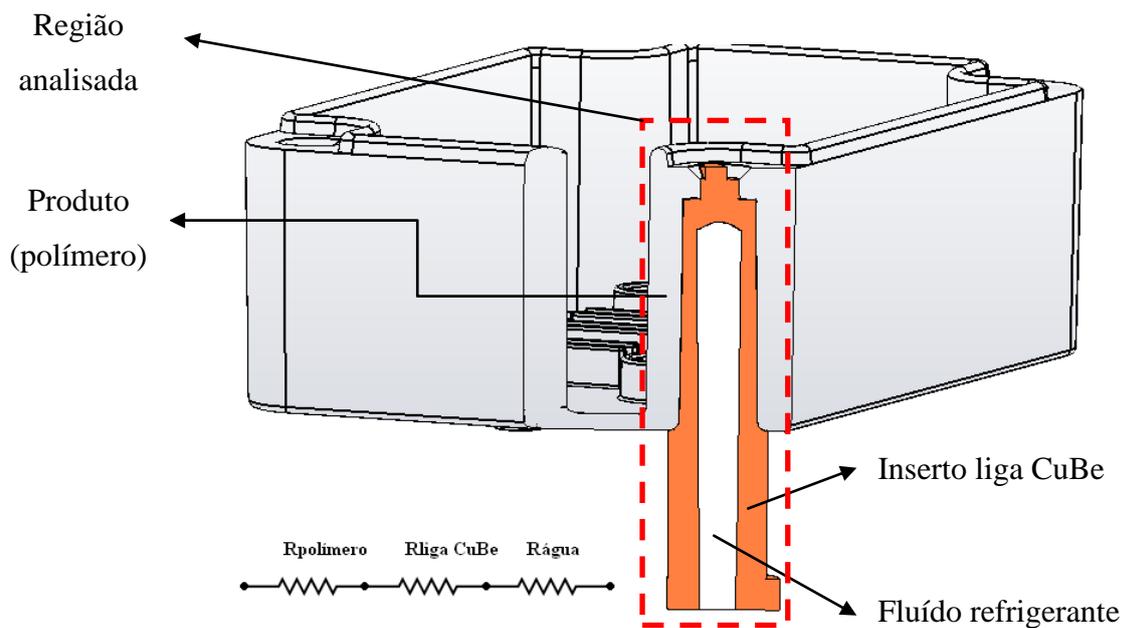
Segundo Incropera e de Witt (2003) a primeira tarefa em análise térmica referente a um trocador de calor é avaliar o coeficiente global de transferência de calor entre as duas correntes de fluido (refrigerante e polímero). Contudo o coeficiente total de transferência de calor pode ser obtido através das resistências individuais do circuito térmico na transferência de calor. Para isto temos a equação 3.0, sendo definida pela equação 3.1:

$$UA = \frac{1}{\sum R_i} = \frac{1}{R_t} \quad (3.0)$$

$$q = UA (t_h - t_c) \quad (3.1)$$

A Figura 5 ilustra uma seção em corte do inserto de estudo, desta maneira é possível visualizar as resistências envolvidas no sistema de transferência de calor combinado.

Figura 5 - Resistências térmicas para o sistema *baffle*



Fonte: Autor (2014)

Onde  $R_{polímero}$  é o somatório das resistências que envolvem o polímero, nos dois processos de transferência de calor pelos mecanismos de convecção e condução, e é dado por:

$$\frac{1}{\frac{1}{R_{t_{pol}}} A_{pol}} = R_{polímero} \quad (3.2)$$

Já  $R_{\text{liga CuBe}}$  é a resistência que envolve o inserto da liga CuBe sendo utilizada no mecanismo de condução para corpos de forma cilíndrica sem geração de calor:

$$\frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 \pi k l} = R_{\text{liga CuBe}} \quad (3.3)$$

Sendo  $R_{\text{água}}$  a resistência do fluido que ocorre através do mecanismo de convecção com a parede interna do inserto, sendo definido por:

$$\frac{1}{h_{\text{água}} A_{\text{água}}} = R_{\text{água}} \quad (3.4)$$

Para determinar o somatório das resistências do sistema, é necessário: calcular o coeficiente convectivo da água, sendo estimado através da solução de três grandezas adimensionais, Reynolds, Prandtl e Nusselt (eq. 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8); estimar a resistência do polímero, determinado através do inverso da resistência térmica total do polímero.

$$Re_D = \frac{\rho u_m D_{pas}}{\mu} \quad (3.5)$$

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{K_{\text{água}}} \quad (3.6)$$

$$Nu = \frac{h k_{\text{água}}}{K_{\text{água}}} \quad (3.7)$$

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \quad \text{Equação de Ditus Boelter para resfriamento} \quad (3.8)$$

$$Re_D = \frac{1000 \cdot 1,439 \cdot 0,008}{0,001204} = 9561,63 \geq 2300 \quad \text{Regime turbulento}$$

$$Pr = \frac{4186 \cdot 0,001204}{0,602} = 8,372$$

$$Nu_D = 0,023 \cdot 9561,63^{4/5} \cdot 8,372^{1/3} = 82,27$$

$$82,27 = \frac{h_{\acute{a}gua} \cdot 0,008}{0,602} \rightarrow h_{\acute{a}gua} = 6191,38 \text{ W}/m^2K$$

Para o cálculo da resistência térmica total do polímero foi preciso considerar que a transferência de calor polímero atue como um somatório de períodos em regime estacionário, mesmo sabendo que o problema é de regime não permanente. Desta maneira é utilizada a equação 3.9 para determinar a temperatura ( $T$ ) em função de cada instante de tempo.

As equações 3.10 e 3.11 representam a quantidade de calor transferido do polímero ( $Q$ ), e o somatório das resistências em cada intervalo temperatura.

$$T = e^{\left[-t \frac{(U \cdot A_{pol})}{\rho \cdot V \cdot c}\right]} \cdot (T_{pol} - T_{\acute{a}gua}) + T_{\acute{a}gua} \quad (3.9)$$

$$Q = \rho \cdot c \cdot V \cdot (t_{pol} - t_{ext}) \quad (3.10)$$

$$UA = \frac{A_{pol}}{\frac{Rt_{pol} \cdot A_{pol}}{A_{pol}} + \frac{A_{pol} \cdot \ln(D_e/D_i)}{2 \cdot \pi \cdot k_{CuBe} \cdot L_{CuBe}} + \frac{A_{pol}}{h_{\acute{a}gua} \cdot A_{\acute{a}gua}}} \quad (3.11)$$

$$q = UADMLT \quad (3.12)$$

Com o objetivo de calcular o inverso da resistência para cada variação de temperatura é necessário isolar a parte que compete ao polímero. Para isso foi calculado a diferença de temperatura média logarítmica (equação 3.13) e realizado a substituição das equações 3.11 e 3.13 na equação 3.12.

$$DMLT = \frac{(T_{pol} - T_{\acute{a}gua}) - (T_{ext} - T_{\acute{a}gua})}{\ln\left(\frac{T_{pol} - T_{\acute{a}gua}}{T_{ext} - T_{\acute{a}gua}}\right)} \quad (3.13)$$

$$DMLT = \frac{(220 - 13) - (65 - 13)}{\ln\left(\frac{220 - 13}{65 - 13}\right)} = 112,19 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$q = \frac{A_{pol}}{\frac{Rt_{pol} \cdot A_{pol}}{A_{pol}} + \frac{A_{pol} \cdot \ln(D_e/D_i)}{2 \cdot \pi \cdot k_{CuBe} \cdot L_{CuBe}} + \frac{A_{pol}}{h_{\acute{a}gua} \cdot A_{\acute{a}gua}}} \cdot \frac{(T_{pol} - T_{\acute{a}gua}) - (T_{ext} - T_{\acute{a}gua})}{\ln\left(\frac{T_{pol} - T_{\acute{a}gua}}{T_{ext} - T_{\acute{a}gua}}\right)} \quad (3.14)$$

$$\frac{1}{Rt_{pol}} = \frac{Q_{ins}}{0,181 - 3,62 \times 10^{-4} \cdot Q_{ins}}$$

De posse das equações 3.9, 3.10 e 3.14 pode-se determinar o inverso da resistência total do polímero para cada temperatura, sendo os valores inseridos na tabela de cálculo da média do inverso da resistência térmica do polímero, no ANEXO E.

Efetuada a média dos valores do inverso da resistência para cada intervalo de temperatura se obtém o valor final para  $1/R_{tot} = 221,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

De posse deste valor é possível avaliar quantitativamente a importância de cada resistência presente. A resolução de cada resistência pode ser obtida através das equações 3.2, 3.3 e 3.4.

$$R_{polímero} = \frac{1}{\frac{1}{221,14}} = 2,81 \text{ K/W}$$

$$R_{liga \text{ CuBe}} = \frac{\ln\left(\frac{0,0125/2}{0,008/2}\right)}{2 \pi \cdot 0,0415 \cdot 106} = 0,016 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{água}} = \frac{1}{6191,38 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 0,004 \cdot 0,0315)} = 0,204 \text{ K/W}$$

Realizando o somatório das resistências conforme a equação 3.15:

$$R_{tot} = R_{polímero} + R_{liga \text{ CuBe}} + R_{\text{água}} \quad (3.15)$$

$$R_{tot} = 2,81 + 0,016 + 0,204 = 3,03 \text{ K/W}$$

Conhecendo  $R_{tot}$  e DMLT pode-se encontrar a transferência de calor total para o sistema através da equação 3.16.

$$q = \frac{DMLT}{R_{tot}} \quad (3.16)$$

$$q = \frac{112,19}{3,03} = 37,03 \text{ W}$$

Através da equação 3.10 é possível determinar a variação de energia interna do polímero, ou quantidade de calor adicionado ao sistema.

$$Q = 1183 \cdot 1200 \cdot (1,107 \times 10^{-5}) \cdot (220 - 65) = 2436,06 \text{ J}$$

Com os valores da quantidade total de calor transferido pelo polímero e da quantidade de calor transferido pelo sistema, é possível determinar o tempo (equação 3.17) necessário para resfriamento do polímero até a temperatura de desmoldagem, e a temperatura de saída do fluido refrigerante para o primeiro inserto (equação 3.18).

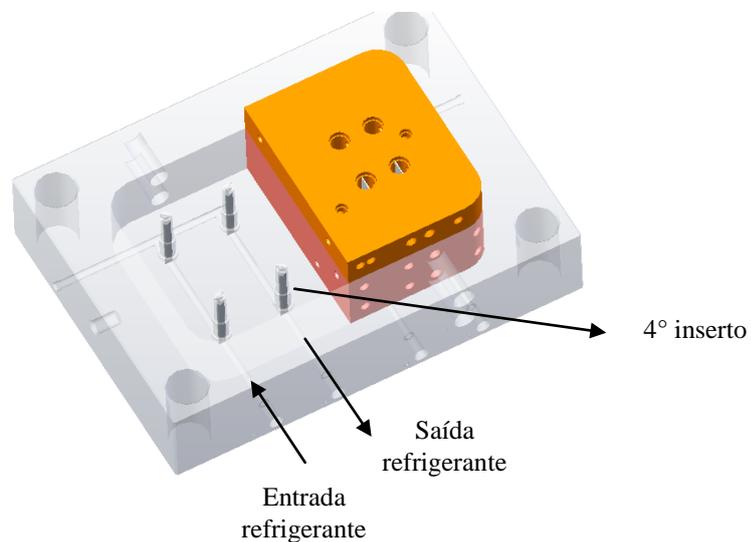
$$t = \frac{Q}{q} \quad (3.17)$$

$$T_{sai} = T_{ent} + \frac{Q}{m \cdot c_p} \quad (3.18)$$

$$t = \frac{2436,06}{37,03} = 65,79 \text{ s}$$

$$T_{sai} = 13 + \frac{37,03}{0,0723 \cdot 1200} = 13,43 \text{ °C}$$

Figura 6 - Layout do sistema de refrigeração dos insertos (CuBe)



Fonte: Autor (2014)

Como o sistema de refrigeração está disposto em série (Figura 6), o mesmo fluido o qual sai à temperatura de 13,43 °C irá realizar o resfriamento do segundo inserto, e assim sucessivamente até o quarto inserto onde o fluido retorna ao reservatório.

Desta maneira são desenvolvidos novamente os cálculos acima para estimar o tempo de resfriamento total no quarto inserto, e a temperatura de saída do fluido refrigerante.

Para facilitar a visualização, os cálculos foram refeitos em uma planilha de Excel, onde a temperatura de saída do inserto foi o único valor que sofreu alteração. Diante disto os valores das equações foram recalculados e apresentados conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Resumo de cálculos para cada inserto

Cálculo	1° inserto	2° inserto	3° inserto	4° inserto	Unidades
Cálculo do número de Reynolds (Eq. 3.5)	9561,63	9561,63	9561,63	9561,63	-
Cálculo do número de Prandtl (Eq. 3.6)	8,37	8,37	8,37	8,37	-
Cálculo do coeficiente convectivo água (Eq. 3.7)	6191,39	6191,39	6191,39	6191,39	-
Cálculo da equação de Dittus Boelter para resfriamento (Eq. 3.8)	82,28	82,28	82,28	82,28	W/ m²K
Cálculo da variação infi. de temp.(Eq. 3.13)	112,20	111,71	111,20	110,70	° C
Cálculo da resistência do polímero (Eq. 3.2)	2,81	2,81	2,81	2,81	K/W
Cálculo da resistência da liga CuBe (Eq. 3.3)	0,02	0,02	0,02	0,02	K/W
Cálculo da resistência da água (Eq. 3.4)	0,20	0,20	0,20	0,20	K/W
Cálculo do somatório das resistências (Eq. 3.15)	3,03	3,03	3,03	3,03	K/W
Cálculo da quantidade de calor trocado (Eq. 3.16)	37,03	36,87	36,70	36,54	W
Cálculo da quantidade de calor fornecida ao sistema (Eq. 3.10)	2436,06	2436,06	2436,06	2436,06	J
Cálculo do tempo para resfriamento (Eq. 3.17)	65,79	66,08	66,37	66,67	s
Cálculo da temperatura de saída do fluido refrigerante (Eq. 3.18)	13,43	13,84	14,27	14,70	°C

Fonte: Autor (2014)

### 3.4.2 Simulação computacional

Em conjunto a resolução analítica do equacionamento de transferência de calor, foram desenvolvidas simulações computacionais da etapa de resfriamento, através do *software* Cadmould 3D-F. A solução computacional foi realizada em conjunto com a empresa NTC Moldes e Plásticos.

Para este trabalho foram geradas três análises de resfriamento. A primeira análise visa à comparação dos resultados de tempo de resfriamento e temperatura da saída do fluido

refrigerante com os valores calculados, ou seja, foi efetuada uma simulação para o resfriamento da proposta de trabalho, (insertos de CuBe refrigerados por um circuito adicional de refrigeração), onde o restante dos sistemas funcionais do molde não interferem no resultado gerado. A segunda análise é referente à condição original do molde, com insertos de aço AISI P20 e refrigeração no macho e na cavidade. Já a terceira análise leva em consideração insertos de CuBe refrigerados mais refrigeração no macho e na cavidade.

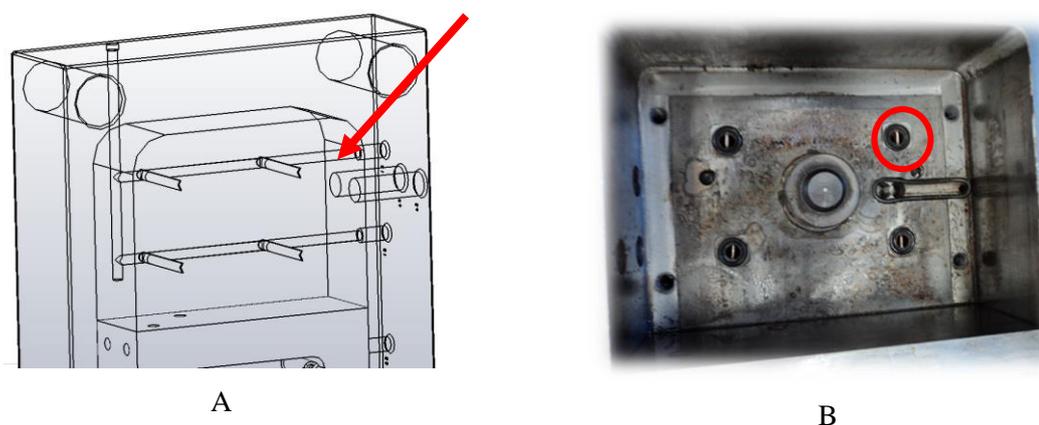
A segunda e terceira análise são utilizadas para comparação do tempo de resfriamento e temperatura de extração do moldado, com valores obtidos através do ensaio prático.

### 3.4.3 Alteração do molde

A terceira etapa do trabalho compreende a modificação do projeto de molde conforme a solução proposta, ou seja, estão inseridas neste contexto as atividades de adequação da placa porta cavidade, manufatura de novos insertos, assim como ajustes e montagem do molde.

Desta forma foram realizadas as modificações necessárias no projeto do molde e encaminhado para orçamentação em matrizarias especializadas. Após avaliação dos orçamentos o molde foi encaminhado para matrizaria Usimolds, onde as modificações propostas foram executadas sob um custo de R\$ 5.800,00.

Figura 7 - Modificação placa porta cavidade



Fonte: Autor (2014)

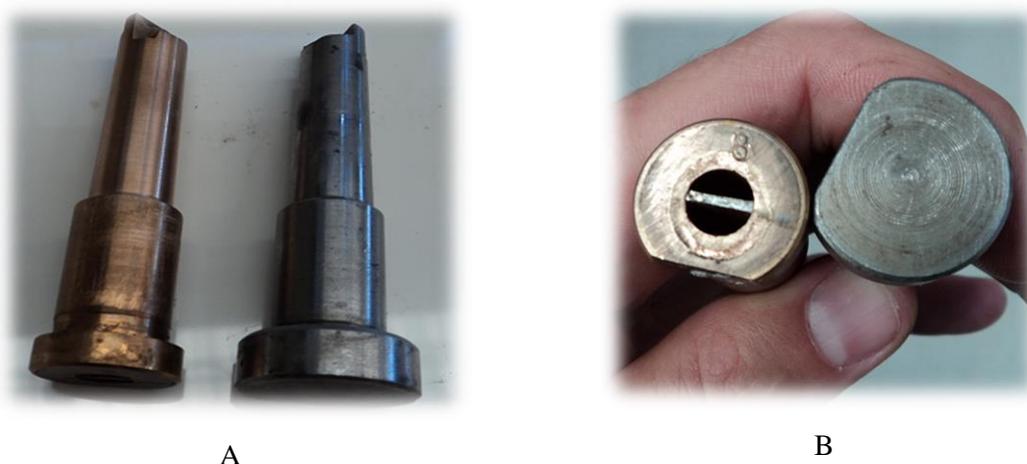
A Figura 7A ilustra o circuito de refrigeração criado para conduzir o fluido de arrefecimento aos insertos. O circuito de formato em “U” possui uma entrada e uma saída realizando o arrefecimento dos quatro insertos em série. Para isto foram necessárias as

inclusões de lâminas defletoras que direcionam o fluxo do fluido refrigerante ao topo do inserto. Conforme Figura 7B pode ser visualizada as lâminas defletoras, assim como o uso de anéis o’rings que realizam a vedação do circuito entre a placa porta cavidade e os insertos.

O novo conjunto de inserto foi usinado a partir da liga CuBe (cujo o nome comercial Ampcoloy 83), sendo a escolha da liga orientada pela mescla de boas propriedades mecânicas e térmicas quando comparado com os insertos de aço AISI P20. Montado na parte fixa do molde realiza fechamento de topo, podendo sofrer grandes esforços de compressão. Já a condutividade térmica da liga de CuBe é aproximadamente 2,8 vezes maior que ao aço AISI P20.

Para confecção do novo conjunto de insertos, tanto a base como o núcleo do inserto, sofreram alterações do projeto original do molde onde, foi reduzido o diâmetro da base, e no núcleo foi manufacturado um sistema de refrigeração *baffle*. As alterações realizadas podem ser visualizadas através da Figura 8A e 08B.

Figura 8 – Modificações realizadas no inserto de CuBe



Fonte: Autor (2014)

Para os insertos de aço AISI P20, não foi possível realizar a manufatura do sistema de refrigeração no núcleo do inserto, devido à indisponibilidade de tempo do molde de injeção.

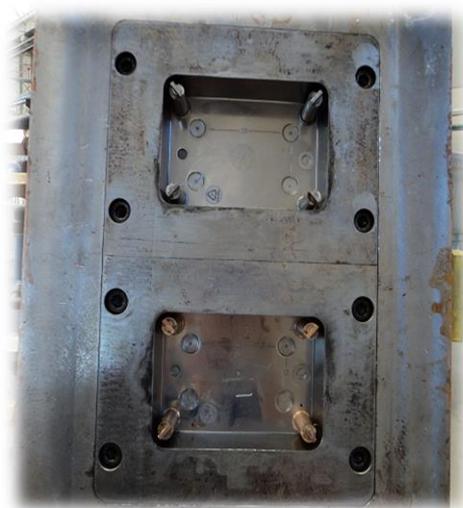
Finalizadas as etapas de modificações do projeto de molde, usinagem da placa porta cavidade e manufatura dos insertos, foi dado segmento a etapa de montagem e ajustes do molde.

### 3.4.4 Ensaio

O ensaio comparativo entre a condição original do molde e a solução proposta foi realizado dentro da empresa Cemar Legrand. Para a execução do teste, a empresa disponibilizou recursos industriais como também recursos humanos.

Com o objetivo de comparação entre as soluções de resfriamento (original e proposta) no mesmo ciclo produtivo, o molde foi montado para o ensaio com os dois modelos de insertos, sendo a cavidade um montada com insertos de aço AISI P20 e a cavidade dois montada com insertos da liga CuBe. A configuração da montagem pode ser visualizada através da Figura 9.

Figura 9 - Montagem das cavidades para realização do ensaio



Fonte: Autor (2014)

Antes de realizar a montagem final do molde, foi inserido um termopar para cada cavidade. Na cavidade dois, o termopar foi posicionado no final do circuito de refrigeração, o que possibilita a visualização do gradiente de temperatura entre a entrada e a saída do fluido refrigerante (Figura 10). Para a cavidade um, o termopar foi inserido no núcleo do último inserto, e possibilitou a visualização do gradiente de temperatura atuante durante o ciclo produtivo.

Figura 10- Posicionamento termopares



Fonte: Autor (2014)

Finalizada a etapa de montagem do molde para o ensaio, foi dado início ao *setup* de máquina na célula de teste (

Figura 11). A programação dos parâmetros de máquina foram orientados através da ficha de processo do produto (ANEXO C) e a resina utilizada foi o PSAI referente ao *grade* SR 550 do fornecedor Innova. As propriedades e condições de processamento da resina podem ser observadas através do *data sheet* do material no ANEXO B.

Figura 11 - Célula de teste



Fonte: Autor (2014)

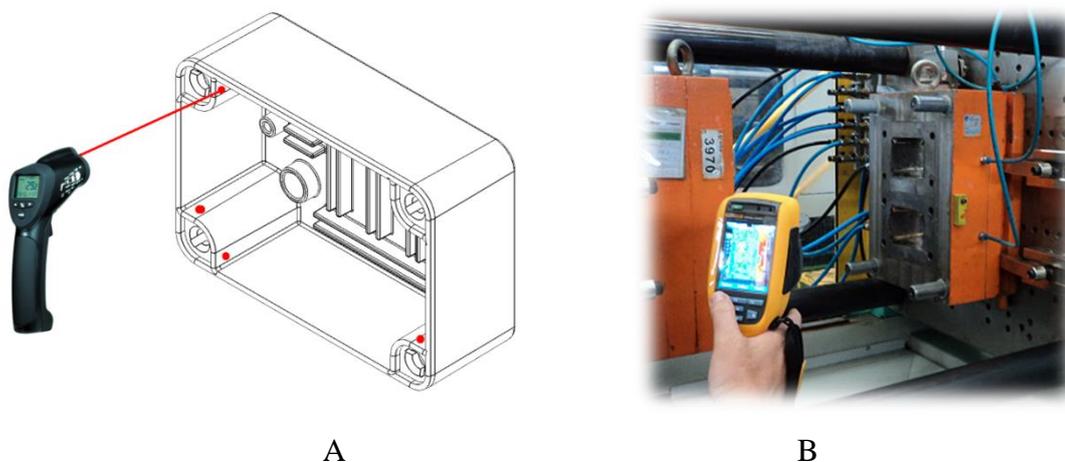
Após definida a peça padrão, conforme requisitos de qualidade foram realizados a execução de 20 ciclos de máquina, onde foram coletados valores de temperaturas, dos termopares, do produto e do molde.

Os valores de temperatura no produto foram obtidos através da leitura com pirômetros, nas quatro torres do produto, conforme representado pela Figura 12A. O comparativo dos valores de temperatura das duas cavidades serão utilizados no capítulo quatro, onde foram comparado as temperaturas de cada torre no produto, representando a eficiência de cada sistema de refrigeração, original ou proposto.

Para obter uma avaliação completa da continuidade do processo, foram capturadas imagens com uma câmera termográfica (Figura 12B), onde foram fotografadas as cavidades do molde e o produto injetado. Nas cavidades foram capturadas quatro imagens, representando o intervalo de cinco ciclos de injeção. No produto foi realizada uma fotografia após a execução do último ciclo.

Na figura 12 A é representado a forma de medição de temperatura no produto sendo realizada através de um pirômetro. A figura 12 B ilustra a maneira de medição de temperatura sobre a superfície da cavidade no molde de injeção.

Figura 12 – Medições com pirômetro e câmera termográfica



Fonte: Autor (2014)

Após de realizado o ensaio comparativo, o molde foi retirado de máquina. Na matrizaria o molde foi desmontado para substituir os insertos da cavidade um, de aço AISI P20 por insertos de CuBe, como também retirados os termopares, visto que o cabo restringe a circulação do fluido refrigerante.

Com o objetivo de determinar a nova temperatura de resfriamento para o ciclo, o molde foi colocado em máquina com as duas cavidades portando insertos de CuBe. Foram ensaiados ciclos de injeção com valores 45 e 40 segundos na etapa de resfriamento. Para cada

tempo foi realizado dez ciclos de injeção, onde a avaliação da temperatura no produto injetado foi realizada através de pirômetro.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos através do desenvolvimento do capítulo três, resolução analítica, simulação computacional e ensaio.

### 4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentadas três análises macro do desenvolvimento realizado no capítulo anterior, sendo divididas de forma que melhore a compreensão do que foi realizado.

A primeira análise a ser realizada é referente ao resfriamento do volume de polímero que ocupa a região moldante do inserto. Devido ao fato de que os insertos constituídos de aço AISI P20 não possuem resfriamento em seu núcleo, fica difícil a determinação do tempo e temperatura para resfriar o volume de material polimérico. Desta maneira são apresentados os resultados referente ao uso dos insertos de CuBe, comparando as variáveis, tempo para resfriamento, temperatura de saída do fluido refrigerante e temperatura de extração, com as resoluções, analíticas, computacionais e ensaio prático.

É importante ressaltar que para os resultados calculados, foi considerado que todo calor transferido do polímero na superfície moldante do inserto fosse retirado somente pelo circuito de refrigeração criado. Desta forma serão comparados valores da simulação computacional e ensaio que respeitam essa condição.

Na resolução analítica foi possível estimar a temperatura de saída do fluido refrigerante para cada inserto. A Tabela 7 demonstra claramente o aumento da temperatura conforme a passagem do fluido pelos insertos, sendo o gradiente de temperatura totalmente dependente da taxa de transferência de calor do sistema.

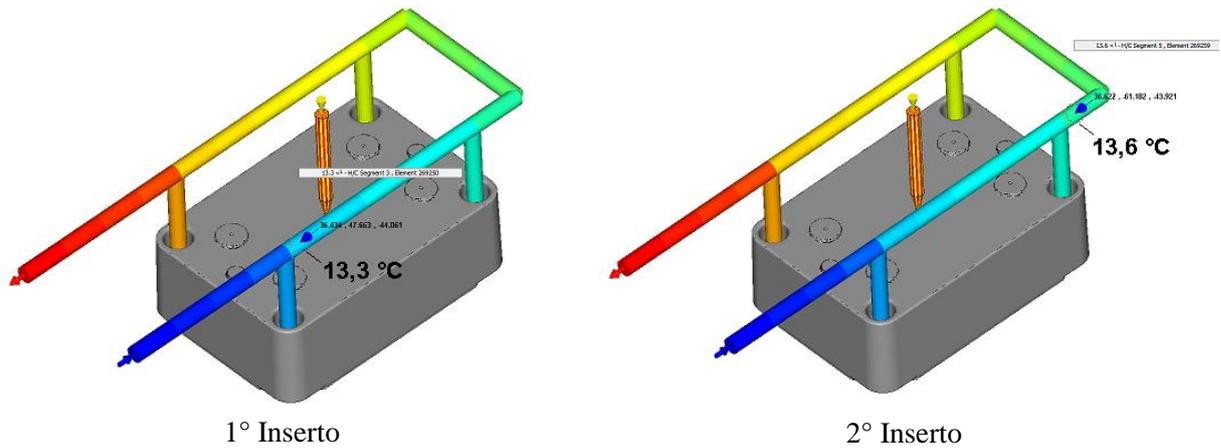
Tabela 7 - Tabela de tempos para resfriamento e temperatura de saída do fluido para cada inserto

<b>Cálculo</b>	<b>1° Inserto</b>	<b>2° Inserto</b>	<b>3° Inserto</b>	<b>4° Inserto</b>	<b>Un.</b>
Cálculo da temperatura de saída do fluido refrigerante (Eq. 3.18)	13,43	13,84	14,27	14,70	°C

Fonte: Autor (2014)

Na simulação computacional também foi possível determinar a temperatura do fluido para cada inserto. Na Figura 13 é possível visualizar as temperaturas do fluido para os insertos, um e dois.

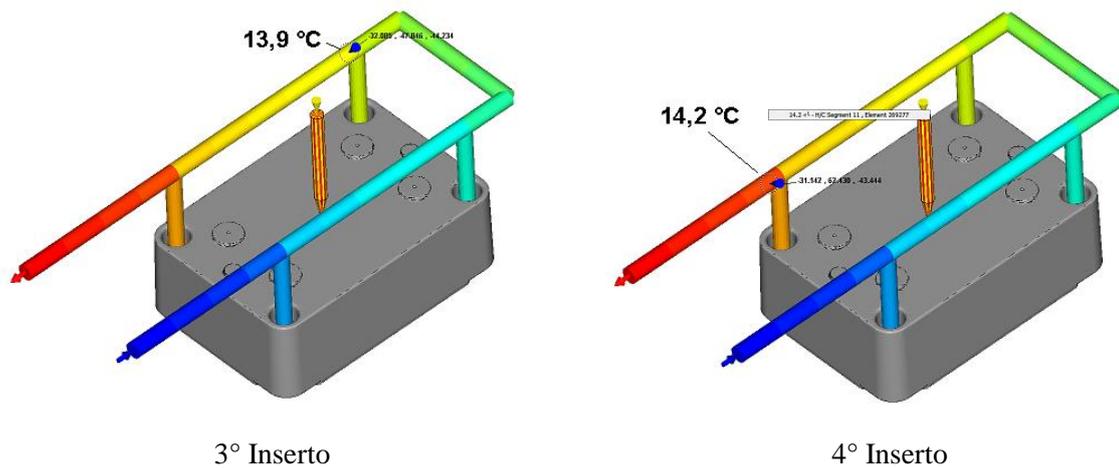
Figura 13 - Temperatura do fluido para 1° e 2° inserto



Fonte: Autor (2014)

Já na Figura 14 é possível visualizar as temperaturas do fluido nos insertos, três e quatro.

Figura 14 - Temperatura do fluido para 3° e 4° inserto



Fonte: Autor (2014)

Ao comparar os valores da simulação computacional com os valores calculados, o resultado ficou muito próximo, possuindo uma diferença máxima de 3,4% no valor da temperatura. Este percentual representa o valor de 0,5°C.

No ensaio prático foi realizada a medição de temperatura do fluido no quarto inserto da cavidade dois, tendo os valores mensurados e apresentados na Tabela 8.

Na coluna momento da leitura a sigla FI significa momento final da injeção e a FE momento final da extração.

Tabela 8 - Temperaturas no inserto de número quatro da cavidade dois

Momento da leitura	Nº do ciclo	Temp. (°C)	Momento da leitura	Nº do ciclo	Temp. (°C)
FI	1	18	FI	11	17
FE	1	17	FE	11	16
FI	2	18	FI	12	17
FE	2	17	FE	12	16
FI	3	17	FI	13	17
FE	3	17	FE	13	16
FI	4	17	FI	14	17
FE	4	16	FE	14	16
FI	5	17	FI	15	17
FE	5	16	FE	15	16
FI	6	17	FI	16	17
FE	6	16	FE	16	16
FI	7	17	FI	17	17
FE	7	16	FE	17	16
FI	8	17	FI	18	16
FE	8	16	FE	18	16
FI	9	17	FI	19	16
FE	9	17	FE	19	16
FI	10	18	FI	20	16
FE	10	17	FE	20	15

Fonte: Autor (2014)

Analisando os valores de temperatura do fluido ao decorrer do ensaio, é possível afirmar que o molde necessitou de aproximadamente dezessete ciclos para que o processo estabilizasse. Mesmo assim a temperatura do fluido acabou sendo um pouco superior aos resultados obtidos através da solução analítica e computacional. Essa diferença de 8,8 % que corresponde a 1,3 °C pode estar associada a outras variáveis do processo, como temperatura da massa polimérica no conjunto injetor e temperatura da câmara quente.

Ainda com a finalidade de validação dos valores calculados, foram efetuadas as resoluções analíticas e computacionais para obter o tempo de resfriamento no volume de polímero na superfície do inserto até a temperatura de desmoldagem.

A Tabela 9 apresenta os valores calculados para o tempo de resfriamento da massa polimérica na superfície do inserto de CuBe até uma temperatura de 65 °C. Fica perceptível que o quarto inserto possui o maior tempo devido a temperatura do fluido refrigerante entrar aquecida ao inserto reduzindo o fluxo de transferência de calor.

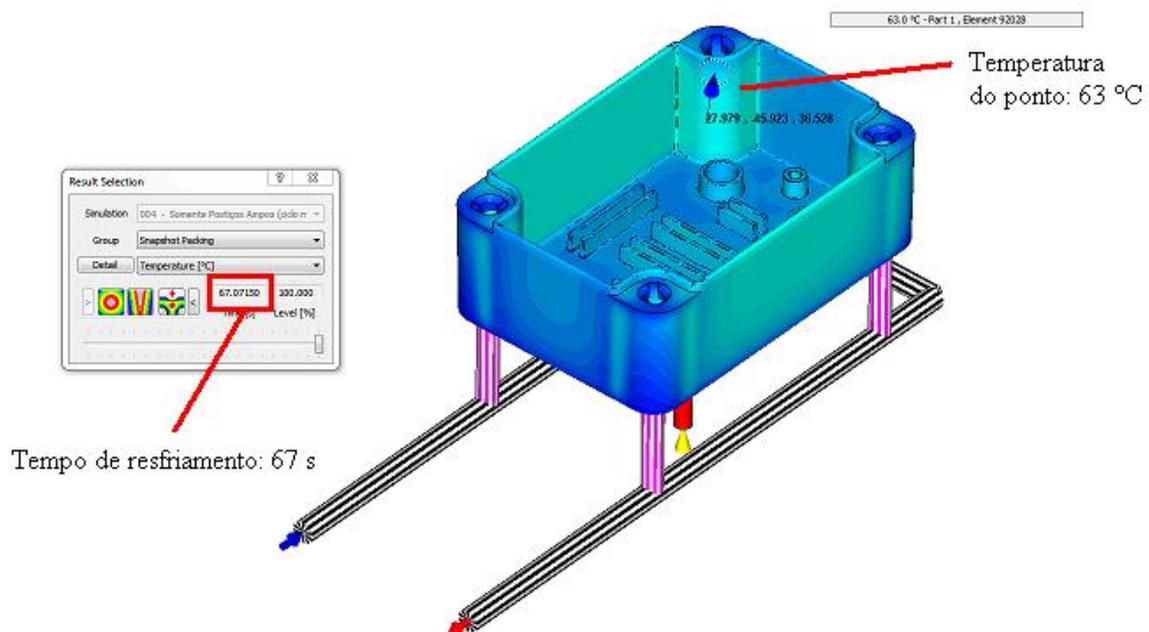
Tabela 9 - Tempo de resfriamento para o volume de polímero na superfície do inserto

Cálculo	1° Inserto	2° Inserto	3° Inserto	4° Inserto	Un.
Cálculo do tempo para resfriamento (Eq. 3.17)	65,79	66,08	66,37	66,67	s

Fonte: Autor (2014)

Para a simulação computacional, foi limitado o tempo de resfriamento com 67 s e gerado o cálculo computacional para descobrir a temperatura de desmoldagem na região analisada, conforme pode ser visualizada através da Figura 15. Essa análise permite capturar a temperatura em qualquer ponto da área superficial na região do inserto. Os parâmetros utilizados para a resolução computacional estão dispostos no ANEXO D.

Figura 15 – Temperatura no produto com tempo para resfriamento de 67 s.



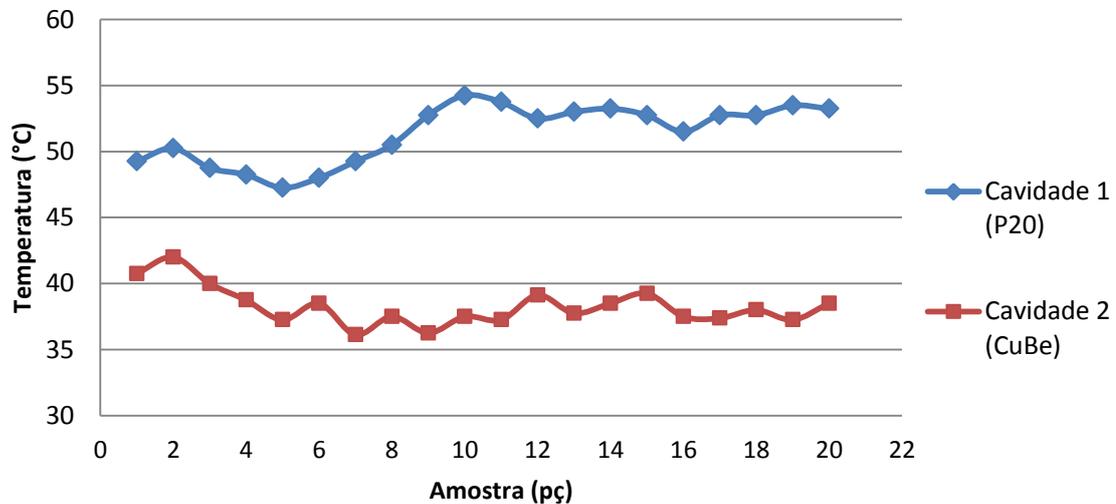
Fonte: Autor (2014)

Analisando em diversos pontos, sobre a região do inserto, foi possível determinar uma temperatura média do polímero. Para o resfriamento de 67 s o produto chegou a uma temperatura de desmoldagem com 72,8°C. Em relação ao cálculo teórico a temperatura de extração simulada ficou aproximadamente 12% maior, o que representa um valor de 7,8 °C. Esta diferença pode estar associada às considerações realizadas no cálculo como também a diferença de espessuras no produto, sendo que para o cálculo teórico foi realizada uma média geral da espessura do componente injetado.

A segunda análise representa um comparativo de temperaturas de ejeção do produto, entre as duas condições de inserto, proposta e original. Para essa avaliação foi utilizado o molde em condição de produção. Desta forma foi possível comparar a efetividade na troca térmica entre as duas condições de inserto.

A Figura 16 apresenta um gráfico onde é possível visualizar a temperatura média do produto, na região analisada, ao decorrer de cada ciclo. São apresentados os vinte ciclos ensaiados, sendo os valores de temperaturas coletados por meio de pirômetro.

Figura 16 - Comparativo temperaturas insertos aço AISI P20 e liga CuBe



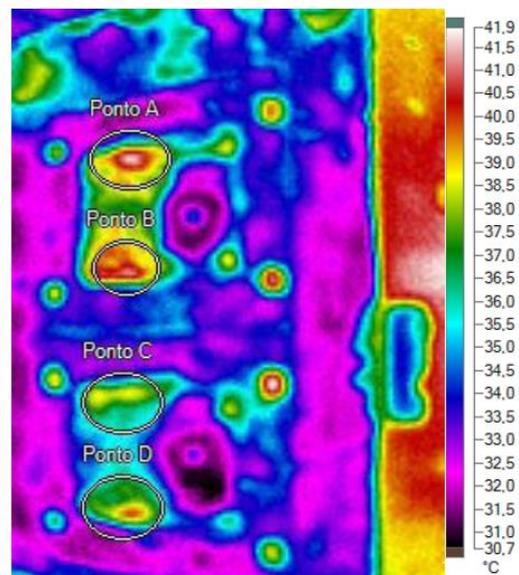
Fonte: Autor (2014)

É possível observar que os primeiros dois ciclos de injeção a temperatura do moldado tem uma elevação, isso aconteceu, pois a vazão de fluido refrigerante foi reduzida, afim de não restringir o fluxo de material polimérico no *gate* de injeção da câmara quente, no início do processo. A flutuação de temperatura no produto é originada pelo balanço de energia

térmica entre o polímero fundido e os mecanismos de transferência de calor do molde e tende a estabilizar ao longo dos ciclos.

Com o objetivo de visualizar a diferença de temperatura no molde, durante os ciclos ensaiados, foram capturadas imagens por câmera termográfica. A primeira imagem foi realizada no início do ensaio e pode ser visualizada através da Figura 17, como também Anexo F (Imagem termográfica N°1). Os pontos A e B são referentes à cavidade um e os pontos C e D são atribuídos a cavidade de número dois. Essas posições foram escolhidas por corresponder a temperatura na entrada (pontos A e C) e saída do fluido refrigerante (pontos B e D).

Figura 17 - Imagem Termográfica 01

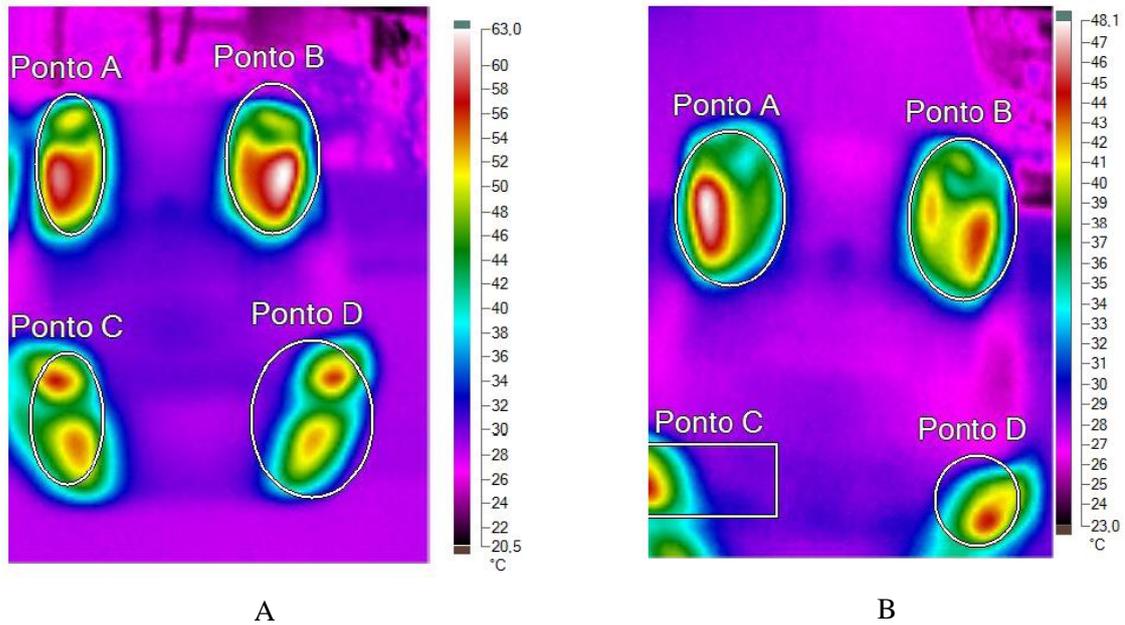


Fonte: Autor (2014)

Outras quatro imagens foram capturadas nos ciclos subsequentes, quinto, décimo, décimo quinto e vigésimo. Elas possibilitaram verificar de forma nítida a distribuição de temperaturas sobre as duas cavidades no decorrer do ensaio. As imagens estão dispostas no Anexo F (Imagem termográfica N°2, Imagem termográfica N°3, Imagem termográfica N°4, Imagem termográfica N°5).

No último ciclo do ensaio, além de capturar a imagem do molde foi retirado uma imagem com câmera termográfica do produto. A Figura 18A apresenta uma fotografia do produto, referente à cavidade 01 e a Figura 18B representa o produto da cavidade dois.

Figura 18 - Imagem por câmera termográfica do produto em diferentes cavidades



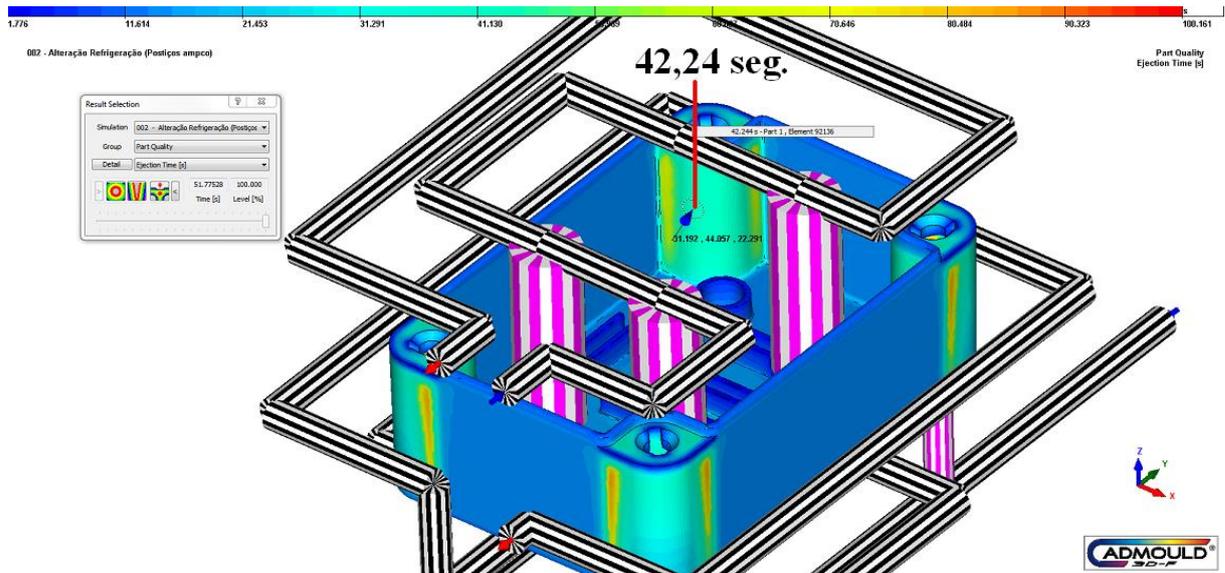
Fonte: Autor (2014)

Analisando a escala de temperatura da Figura 19 é possível observar que a temperatura máxima da cavidade um possui um valor de 63°C, enquanto que a cavidade dois a temperatura máxima foi de 48,1 °C. A variação de 17,9 °C entre os produtos representa a diferença do fluxo de transferência de energia térmica entre as duas condições de inserto (original e proposta).

A terceira análise realizada representa o ganho na etapa de resfriamento com a substituição dos insertos de aço AISI P20 por insertos de CuBe refrigerados. Constatado a diferença de temperaturas através dos comparativos de imagens do produto, foi gerada uma simulação computacional, na qual foi definida a temperatura de extração do produto em 65°C, e simulado o tempo para arrefecimento do componente injetado. A Figura 19 ilustra o modelo utilizado na determinação do novo tempo da etapa de arrefecimento do produto com auxílio do cálculo computacional.

Através da simulação computacional foi obtido o valor de 42,4 segundos para realizar o arrefecimento do produto moldado até a temperatura de desmoldagem. De posse deste valor foram ensaiadas duas condições diferentes de tempo na etapa de resfriamento 40 e 45 segundos.

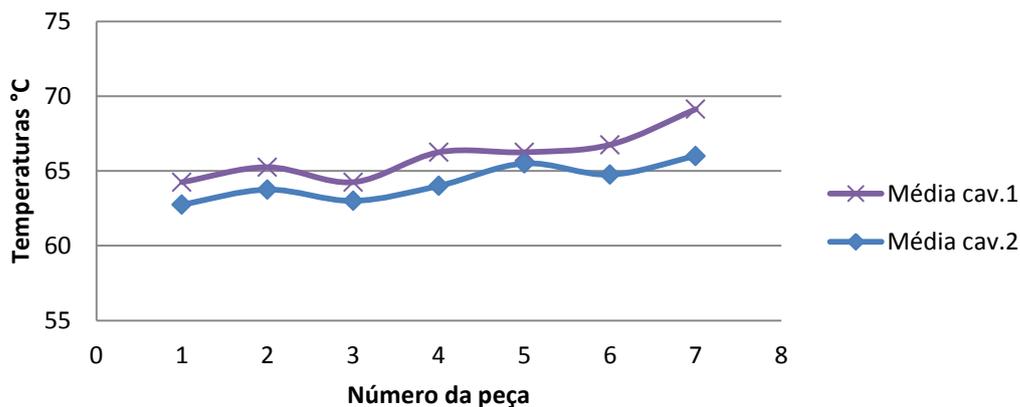
Figura 19 - Simulação novo tempo da etapa de resfriamento do produto



Fonte: Autor (2014)

O primeiro ensaio foi realizado com tempo de 40 segundos na etapa de resfriamento do produto, mantendo outros valores de processo conforme ficha de parâmetros. Foram ensaiados sete ciclos de máquina onde os valores de temperatura do produto, foram coletados na região analisada através da leitura de pirômetro após a ejeção do produto. O gráfico da Figura 20 apresenta a leitura média de temperatura das quatro torres para cada ciclo, com distinção das cavidades um e dois.

Figura 20 - Temperaturas do produto com resfriamento de 40 s



Fonte: Autor (2014)

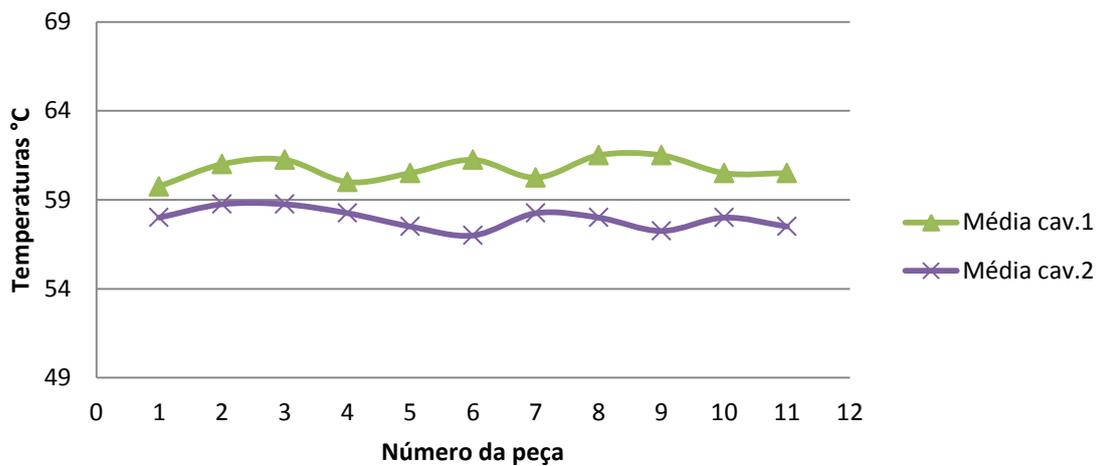
Analisando o gráfico da Figura 20 é possível observar que a temperatura do produto está aumentando gradativamente ao decorrer dos ciclos. Isso ocorre devido ao fato que o

sistema de refrigeração do molde não conseguir dissipar todo calor fornecido pelo polímero durante um ciclo produtivo.

O segundo ensaio foi realizado com o tempo de 45 segundos na etapa de resfriamento, sendo os valores de temperatura média do produto apresentados através do gráfico da

Figura 21. Para este ensaio foram realizados onze ciclos de máquina.

Figura 21 - Temperaturas do produto com resfriamento de 45 s



Fonte: Autor (2014)

Observando o gráfico da Figura 21 é possível considerar que a temperatura de extração do moldado se manteve estável ao longo do ciclo, o que garante que o fluxo de calor recebido pelo polímero é totalmente removido pelo sistema de refrigeração do molde durante o ciclo produtivo.

Desta maneira foi possível determinar o novo tempo da etapa de resfriamento, saindo de 55 para 45 segundos. Esta variação representa a redução de 22% no tempo da etapa de refrigeração. Em capacidade produtiva essa diferença na etapa de resfriamento representou uma redução de 375 horas de uma máquina injetora.

A diferença de temperaturas entre as cavidades um e dois, durante a execução dos ciclos, conforme pode ser visualizada nos gráficos das Figura 20 e Figura 21 são referentes à metodologia de medição. A coleta de leituras sempre ocorreu da cavidade um para a dois e a diferença do gradiente de temperatura é devido ao tempo de espera até a leitura da temperatura no produto da segunda cavidade.

## 5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho teve como principal objetivo, reduzir o tempo do ciclo de injeção através da melhoria no sistema de refrigeração de um molde. Para tanto foi definida uma proposta de melhoria onde houve a substituição do material, como também manufatura de um circuito de arrefecimento para os insertos.

Realizado o estudo necessário através de trabalhos e literaturas existentes foram definidas as etapas do trabalho. Diante disto foram efetuadas resoluções analíticas, computacionais e ensaio produtivo de forma a comparar os resultados obtidos.

A primeira conclusão está associada à assertividade do uso do *software* Cadmould na simulação computacional no processo de injeção. Através do modelo computacional foi possível comparar os valores de tempo, para resfriamento, e temperaturas de extração do produto como também do fluído refrigerante, com uma boa precisão aos valores obtidos através do ensaio prático e resolução analítica, sendo a diferença média entre os valores menores de 10%. A diferença pode estar associada a alguns erros embutidos como, considerações realizadas nos cálculos, diferenças na temperatura do fluído de arrefecimento no decorrer do ensaio e tempo de espera para medição das amostras.

A resolução analítica também se demonstrou importante. Através dos cálculos das resistências térmicas do sistema foi possível obter um comparativo da condução de calor entre as diferentes interfaces na região analisada. Desta maneira é possível utilizar materiais alternativos (outros tipos de ligas e aços) para verificar a condução de calor na região crítica, e melhorar caso seja necessário.

Comparando os resultados do tempo de resfriamento, obtidos através do ensaio comparativo, se pode concluir que o uso da liga CuBe aplicada no molde de injeção do componente Fundo Cemarbox 120x80 é uma boa opção para o arrefecimento de regiões com baixa eficiência de troca térmica.

No produto não houve alteração do aspecto visual da peça. A única variação é a diferença de temperatura de extração entre a superfície moldante dos insertos com o restante da superfície do molde, reduzindo de 2,4 para 1,8 vezes. Não foram realizadas análises de superfície por atualmente não existir nenhum problema com o menor tempo de resfriamento do moldado sendo que a atribuição do trabalho está relacionada com a uniformidade da distribuição de temperatura na superfície moldante.

A substituição do material aço AISI P20 pela liga CuBe nos insertos e criação de um novo circuito de refrigeração, proporcionou uma redução de 18 % no tempo total do ciclo de

injeção. Esta diferença resultou em um ganho de disponibilidade no valor de R\$ 25.500,00 ao ano, sendo quatro vezes maior do que o valor investido para a realização da alteração.

Diante do resultado do trabalho, já foi proposto a substituição dos insertos de aço AISI P20 por insertos de CuBe refrigerados para o restante de moldes que complementam a linha de produtos Cemarbox. Essa alteração no restante dos moldes também irá resultar em ganhos de disponibilidade.

Além de proporcionar um ganho de produtividade, este trabalho auxiliou a difusão de novas técnicas aplicadas ao sistema de refrigeração para moldes dentro da empresa Cemar Legrand, agregando conhecimento técnico a toda equipe de apoio.

Como sequência do trabalho sugere-se a análise térmica de outra liga que possua uma maior condutividade térmica, maximizando ainda mais os resultados obtidos. A sugestão compreende o estudo dos esforços de compressão na área de fechamento dos insertos. Determinado qual a resistência mecânica necessária para suportar as cargas é necessário definir uma liga que possua condutividade térmica maior do que a da liga de CuBe utilizada neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ABIPLAST. **Perfil 2012**: Indústria brasileira de transformação de plásticos. Disponível em: <[http://file.abiplast.org.br/download/estatistica/perfil2012\\_versao\\_eletronica.pdf](http://file.abiplast.org.br/download/estatistica/perfil2012_versao_eletronica.pdf)>. Acesso em: 15 ago. 2013, 22:30.
- ANSARI, M. N. M, PORNIMA, K; Cooling channel design for multi-cavity plastic injection moulds. **International Journal of Science and Research**. v. 2, i.5, India, mai.2013. Disponível em: < <http://ijsr.net/archive/v2i5/IJSRON2013949.pdf>>. Acesso em: 02 out. 2013.
- AMPCO. **Ampco Metal**. Disponível em: <[http://www.ampcometal.com/common/datasheets/en/A83\\_EX\\_E.pdf](http://www.ampcometal.com/common/datasheets/en/A83_EX_E.pdf)> Acesso em: 10 set. 2013, 20:00.
- BERINS, M. L. **Plastics Engineering Handbook**: of the society of the plastics industry. 5. Ed. United States: Springer US, 1991. 845p.
- 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.
- CHANDA, M.; ROY, S.K. **Plastics technology handbook**. 4. ed. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2006. 896p.
- DIAS, K.P. **Proposta de modelo para a gestão do conhecimento no projeto de moldes de injeção**. 2008. 200 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- DUBOIS J.H.; PRIBBLE.W.I. **Plastics mold engineering handbook**. 4. ed. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1987. 694p.
- HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos**: projetos e princípios básicos. São Paulo: Artliber, 2004. 304p.
- HARPER, C.A. **Handbook of plastics process**. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2006. 678p.
- HARPER, C.A. **Modern plastics handbook**. 1. Ed. New York: Mc Graw-Hill Professional, 2000. 1298p.
- HSU, F.H; WANG, K; HUANG, C.T; Chang, R.Y. Investigation on conformal cooling system design in injection molding. **Advances in Production Engineering and Management**. v. 8, n. 2, p. 107-115, Taiwan, 2013. Disponível em:< [http://maja.uni-mb.si/files/APEM/APEM8-2\\_107-115.pdf](http://maja.uni-mb.si/files/APEM/APEM8-2_107-115.pdf)> Acesso em: 08 out. 2013.
- INCROPERA, F.P; DE WITT,D.P. **Transferência de calor e de massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 700 p.

INNOVA. **Petrobrás**. Disponível em:

<[http://www.petrobras.com.ar/Innova/Internet\\_Innova/Portugues/Productos\\_Servicos/Imagenes/SR550.pdf](http://www.petrobras.com.ar/Innova/Internet_Innova/Portugues/Productos_Servicos/Imagenes/SR550.pdf)> . Acesso em: 10 set. 2013, 20:55.

LEGRAND. **Legrand no mundo**. Disponível em:

<<http://www.legrand.com.br/institucional/legrand-no-mundo>>. Acesso em: 10 set. 2013, 20:15.

MANRICH, S. **Processamento de termoplásticos**: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes. São Paulo: Artliber, 2005. 285p.

MENGES, G; MICHAELI, W; MOHREN, P. **How to make injection molds**. 3. ed. Munich: Hanser Publisher, 2001. 596p.

OLIVEIRA, M. C. B. R. **Gestão de resíduos plásticos pós-consumo**: perspectivas para a reciclagem no Brasil. 2012. 104 pg. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação em Planejamento, Rio de Janeiro 2012.

REES, H. **Mold engineering**. Munich: Hanser Publisher, 1995. 609p.

RUBIN, I.I. **Plastic materials and technology**. New York: John Wiley & Sons Inc, 1990. 1225-1267p.

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

STOECKHERT, K. MENNING, G. **Mold-making handbook**. 2. ed. Munich: Hanser Publisher, 1998. 550p.

VIEIRA, L.F. **Influência de parâmetros de processamento e geometria em propriedades mecânicas de peças de PS, PC, e PLA moldadas por injeção**. 2012. 167 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

## ANEXO A – DATA SHEET MATERIAL AMPCO 83

### Technical Data Sheet

# AMPCOLOY® 83

## Extrusions

### Nominal composition:

Beryllium  
Cobalt + Nickel  
Others  
  
Copper

### Specifications:

EN	101C	A4/2
D	DIN 17672	W. Nr. 2.1247
F	AFNOR	UBe2
GB	BS	
USA	CDA RWMA	C17200 Class 4

Mechanical and physical Properties	Units	Nominal Values
Tensile strength Rm	Mpa	1310
Yield strength Rp 0.5	Mpa	1000
Elongation A5	%	4
Brinell hardness	HB 30	380
Rockwell hardness	HRC	40
Modulus of elasticity E	GPa	131
Density ρ	g / cm <sup>3</sup>	8,26
Coefficient of expansion α	10 <sup>-6</sup> / K	17,5
Thermal conductivity λ	W / m ·K	106
Electrical conductivity γ	m / Ω · mm <sup>2</sup>	12,8
Electrical conductivity	% I.A.C.S.	22
Specific heat Cp	J / g ·K	0,42

Assurances given with respect to properties or uses are subject to written approval from AMPCO METAL. AMPCOLOY® 83 is a 2 % Beryllium copper alloy which displays very high mechanical properties with a reasonably good electrical and thermal conductivity.

### WARNING

Since the alloy contains 2 % Beryllium, it is recommended that during any operation which is liable to create dust or fumes (for example dry grinding, polishing or welding) precautions should be taken to ensure there is no inhalation or exposure to eyes or skin. Conventional machining (for example milling and turning) is not generally considered hazardous.

Fonte: Ampco (2013)

## ANEXO B – PROPRIEDADES PSAI – GRADE SR 550



## SR550 - Injeção

Poliestireno Alto  
Impacto

**Características**  
Alta fluidez  
Boas propriedades  
mecânicas e de impacto

**Processos**  
Injeção

**Aplicações**  
Brinquedos  
Acessórios para móveis  
Peças técnicas

Propriedades	ISO			ASTM		
	Norma	Unidades	Valores	Norma	Unidades	Valores
<b>Reológica</b>						
Índice de fluidez	1133	g/ 10 min	11	D-1238	g/ 10 min	11
<b>Mecânicas</b>						
Resistência à tração na ruptura	527	MPa	20	D-638	MPa	20
Alongamento na ruptura	527	%	55	D-638	%	50
Módulo elástico por tração	527	MPa	1950	D-638	MPa	2000
Dureza Rockwell (escala L/M)	2039/ 2	-	L60	D-785	-	L60
Resistência à flexão	178	MPa	41	D-790	MPa	42
Resistência ao impacto IZOD - espessura 4 mm	180/1 <sup>a</sup>	KJ/ m2	9	-	-	-
Resistência ao impacto IZOD - espessura 3,2 mm	-	-	-	D-256	J/m	110
<b>Térmicas</b>						
Temperatura de deflexão sob carga (1,8 Mpa, 120 °C/ h)	75	°C	83	D-648	°C	83
Ponto Vicat (1kg, 50°C/h)	306	°C	92	D-1525	°C	92
Ponto Vicat (5kg, 50°C/h)	306	°C	89	D-1525	°C	89
<b>Físicas</b>						
Densidade	1183	g/cm3	1,04	D-792	g/cm3	1,04
Absorção de umidade	62	%	<0,1	D-570	%	<0,1
Contração no molde	intern o	%	0,4-0,7	-	-	-
Resistência à chama - espessura 1,6 mm	UL-94	classe	HB	-	-	-

Todos os ensaios mecânicos foram realizados a 23°C.

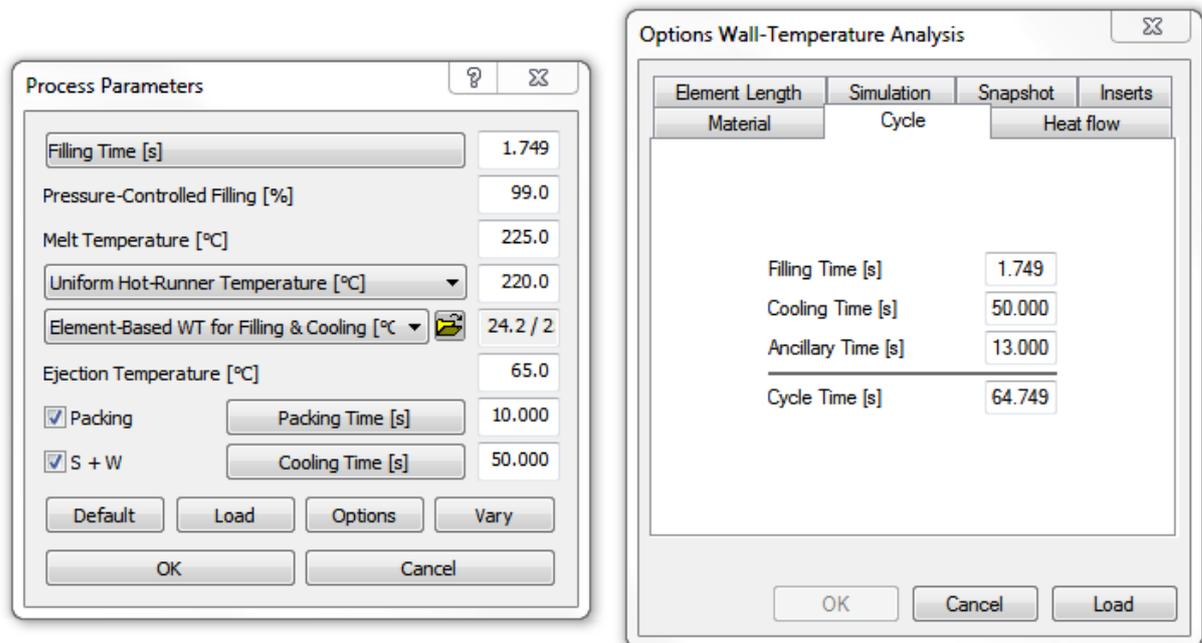
Fonte: Innova (2014)

## ANEXO C – FICHA DE PROCESSO

<b>CEIilar</b> legrand		<b>FICHA DE PROCESSO DE INJEÇÃO</b>					DATA: 15/10/2013	
CODIGO DO ITEM: -		DESCRIÇÃO DO ITEM: <b>FUNDO LISO CBOX-OB/TB - 120x80</b>					REVISÃO: 1	
N° DO MOLDE: -		N° CAVIDADES: 2	PESO DA PEÇA: 103 g		N° PROG. DOS. -	N° PROG. MAQ.: -	CICLO ATUAL: 68,6 ±1	
DESCRIÇÃO MATERIAL: <b>PSAI + PIG. CINZA</b>		% PIGMENTO: 3 %	TIPO: <input checked="" type="radio"/> VIRGEM <input type="radio"/> RECUP. <input type="radio"/> MISTURA			MODO DE TRABALHO: <input checked="" type="radio"/> AUTOM. <input type="radio"/> SEMI.		
OBSERVAÇÕES:								
<b>TEMPERATURA MÁQUINA (°C)</b>				<b>TEMPERATURA BICO/CÂMERA (°C)</b>				
ZONA 1 (BICO)	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5	TEMP.1	TEMP.2	TEMP.3	
225 ±10	230 ±10	230 ±10	230 ±10	200 ±10	230 ±10	230 ±10	230 ±10	
<b>TEMPOS</b>								
MOLDE ABERTO		0,5	RESFRIAMENTO		55 ±1	LIMITE DE CICLO		
					80 ±1			
<b>FECHAMENTO</b>					 200 100			
FASE	1	2	3	PM				TR
mm		300	250	80				6
bar	150	150	150	20				150
mm/s	250	250	220	200				360
TEMPO DE PROTEÇÃO DE MOLDE					0,4			
<b>ABERTURA</b>					 200 100			
mm	370		20					
bar	95	100	110					
mm/s	100	130	100					
400				380				
<b>EXTRAÇÃO</b>								
POSIÇÃO DA PLACA MÓVEL		 200 100		TEMPO DE EXTR. AVANÇADO				
380 ±20				0				
<b>AVANÇO DO EXTRATOR</b>				<b>REPETIÇÃO</b>				
40 ±20	60 ±20	65 ±20	103 ±20	mm	80 ±20	103 ±20	mm	
	30 ±20	30 ±20	30 ±20	bar	- ±20	50 ±20	bar	
	50 ±20	50 ±20	50 ±20	mm/s	- ±20	50 ±20	mm/s	
<b>RECUO DO EXTRATOR</b>								
40 ±20	±20	mm	 100					
100 ±20	100 ±20	bar	200					
200 ±20	200 ±20	mm/s						
DESC. DIANT.		DESC. TRAS.		<b>PLASTIFICAÇÃO</b>				VOLUME DE DOSAGEM
1 ±20	±20	cm <sup>3</sup>	451 ±20	50 ±20	100 ±20	150 ±20	200 ±20	450 ±20
20 ±20	±20	bar	100 ±20	40 ±20	25 ±20	25 ±20	25 ±20	25 ±20
20 ±20	±20	cm <sup>3</sup> /s	100 ±20	43 ±20	30 ±20	30 ±20	30 ±20	30 ±20
		<b>INJEÇÃO</b>		100 ±20 bar				45 ±20
		cm <sup>3</sup> /s	90 ±20	90 ±20	90 ±20	90 ±20	5 ±20	70 ±20
		cm <sup>3</sup>	300 ±20	350 ±20	400 ±20	450 ±20		
		<b>RECALQUE</b>		bar		160 ±20		PRESSÃO DE PASAGEM P/ RECALQUE
				s		80 ±20		49 ±20
ELABORADO: Vinicius Castagna				APROVADO: Vinicius Castagna				

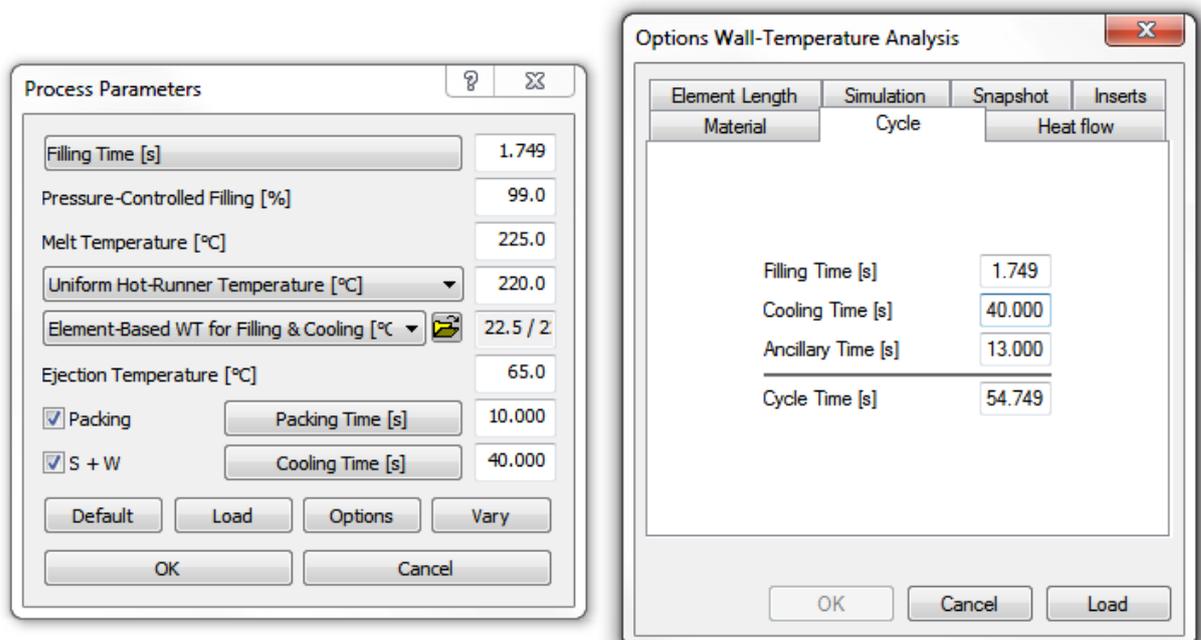
## ANEXO D – PARÂMETROS DE PROGRAMAÇÃO CADMOULD

### Parâmetros processo antigo do molde



Fonte: Autor (2014)

### Parâmetros processo novo do molde



Fonte: Autor (2014)

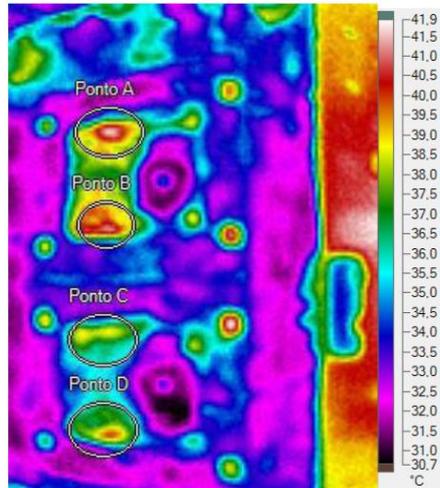
**ANEXO E – TABELA CÁLCULO MÉDIA DO INVERSO DA RESISTÊNCIA  
TÉRMICA DO POLÍMERO**

<b>Tempo (s)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>dT/dt (°C)</b>	<b>q<sub>inst</sub> (W)</b>	<b>1/R<sub>tot</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>dT/dt (°C)</b>	<b>q<sub>inst</sub> (W)</b>	<b>1/R<sub>tot</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>
0	220,00				33	115,65	2,21	34,66	205,73
1	215,65	4,35	68,41	437,90	34	113,49	2,16	33,93	201,09
2	211,39	4,26	66,98	427,27	35	111,38	2,11	33,21	196,56
3	207,21	4,17	65,57	416,93	36	109,31	2,07	32,52	192,14
4	203,13	4,08	64,19	406,87	37	107,29	2,03	31,83	187,82
5	199,13	4,00	62,84	397,08	38	105,30	1,98	31,16	183,61
6	195,22	3,91	61,52	387,56	39	103,36	1,94	30,51	179,50
7	191,39	3,83	60,22	378,29	40	101,46	1,90	29,87	175,48
8	187,63	3,75	58,96	369,27	41	99,60	1,86	29,24	171,57
9	183,96	3,67	57,72	360,50	42	97,78	1,82	28,62	167,74
10	180,37	3,60	56,50	351,95	43	96,00	1,78	28,02	164,00
11	176,85	3,52	55,32	343,63	44	94,25	1,75	27,43	160,35
12	173,40	3,45	54,15	335,52	45	92,54	1,71	26,85	156,79
13	170,03	3,37	53,01	327,63	46	90,87	1,67	26,29	153,31
14	166,73	3,30	51,90	319,94	47	89,23	1,64	25,74	149,91
15	163,49	3,23	50,81	312,45	48	87,63	1,60	25,20	146,59
16	160,33	3,16	49,74	305,16	49	86,06	1,57	24,67	143,35
17	157,23	3,10	48,69	298,05	50	84,52	1,54	24,15	140,18
18	154,20	3,03	47,67	291,12	51	83,02	1,50	23,64	137,09
19	151,23	2,97	46,67	284,37	52	81,55	1,47	23,14	134,06
20	148,32	2,91	45,69	277,79	53	80,11	1,44	22,66	131,11
21	145,48	2,85	44,72	271,37	54	78,70	1,41	22,18	128,22
22	142,69	2,79	43,78	265,12	55	77,31	1,38	21,71	125,41
23	139,96	2,73	42,86	259,02	56	75,96	1,35	21,26	122,65
24	137,29	2,67	41,96	253,07	57	74,64	1,32	20,81	119,96
25	134,68	2,61	41,08	247,27	58	73,34	1,30	20,37	117,33
26	132,12	2,56	40,22	241,62	59	72,07	1,27	19,94	114,76
27	129,61	2,50	39,37	236,10	60	70,83	1,24	19,52	112,25
28	127,16	2,45	38,54	230,72	61	69,61	1,22	19,11	109,80
29	124,76	2,40	37,73	225,48	62	68,42	1,19	18,71	107,40
30	122,41	2,35	36,94	220,36	63	67,26	1,17	18,32	105,05
31	120,11	2,30	36,16	215,36	64	66,12	1,14	17,93	102,76
32	117,86	2,25	35,40	210,49	65	65,00	1,12	17,56	100,52

Fonte: Autor (2014)

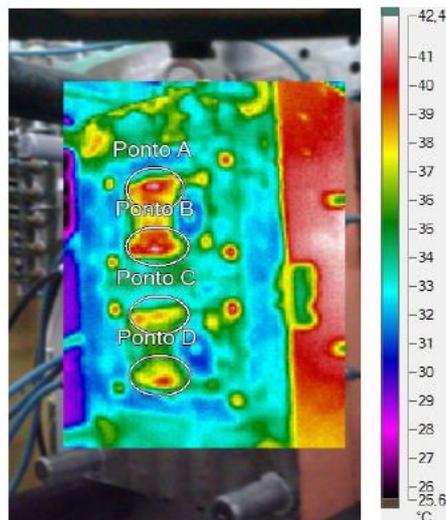
## ANEXO F – RELATÓRIO CÂMERA TERMOGRÁFICA

Imagem Termográfica N° 1



Legenda	Emissivida de	Temp. plano de fundo	Mín.	Méd.	Máx.	Desv. Pad.	Unidades
Ponto A	0,96	20,0	32,1	37,9	41,7	2,16	°C
Ponto B	0,96	20,0	33,0	38,6	41,2	1,94	°C
Ponto C	0,96	20,0	33,2	36,5	38,9	1,23	°C
Ponto D	0,96	20,0	31,4	36,3	39,9	1,96	°C

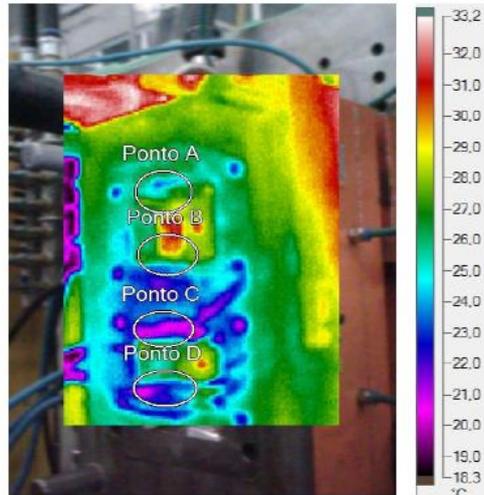
Imagem Termográfica N° 2



Legenda	Emissivida de	Temp. plano de fundo	Mín.	Méd.	Máx.	Desv. Pad.	Unidades
Ponto A	0,96	20,0	31,7	37,1	41,5	2,34	°C
Ponto B	0,96	20,0	31,9	37,1	42,0	2,45	°C
Ponto C	0,96	20,0	32,6	35,6	38,9	1,70	°C
Ponto D	0,96	20,0	31,3	35,5	39,7	1,92	°C

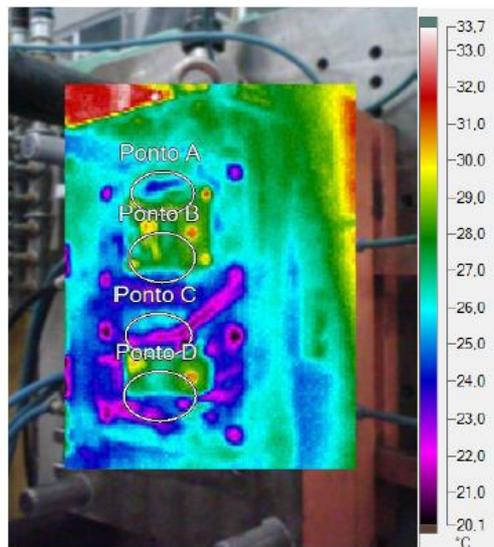
## ANEXO F – RELATÓRIO INFRAVERMELHO (CONTINUAÇÃO)

Imagem Termográfica N° 3



Legenda	Emissivida de	Temp. plano de fundo	Mín.	Méd.	Máx.	Desv. Pad.	Unidades
Ponto A	0,96	20,0	23,4	26,4	29,3	1,35	°C
Ponto B	0,96	20,0	22,6	26,9	31,6	2,24	°C
Ponto C	0,96	20,0	19,6	22,8	27,4	1,91	°C
Ponto D	0,96	20,0	20,1	23,8	27,7	1,66	°C

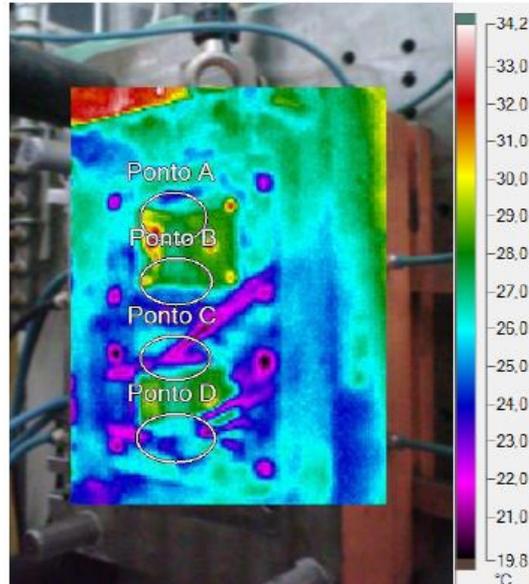
Imagem Termográfica N° 4



Legenda	Emissivida de	Temp. plano de fundo	Mín.	Méd.	Máx.	Desv. Pad.	Unidades
Ponto A	0,96	20,0	23,7	26,8	29,4	1,30	°C
Ponto B	0,96	20,0	23,9	27,2	30,3	1,38	°C
Ponto C	0,96	20,0	20,2	24,1	28,1	1,79	°C
Ponto D	0,96	20,0	21,3	25,3	30,0	1,87	°C

## ANEXO F – RELATÓRIO INFRAVERMELHO (CONTINUAÇÃO)

Imagem Termográfica N° 5



Legenda	Emissivida de	Temp. plano de fundo	Min.	Méd.	Máx.	Desv. Pad.	Unida des
Ponto A	0,96	20,0	23,2	27,7	32,3	1,77	°C
Ponto B	0,96	20,0	23,1	26,8	30,6	1,58	°C
Ponto C	0,96	20,0	20,8	24,8	28,2	1,87	°C
Ponto D	0,96	20,0	20,5	25,1	28,4	1,26	°C

Fonte: Autor (2014)