

**ANDRÉ MARECHAL**

Universidade de São Paulo

## **TEMPO DE DESMOLDAGEM**

**Apresentação do Trabalho de  
Formatura**

**Orientador:  
Prof. Marcelo Breda Mourão**

**SÃO PAULO  
2002**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, Prof. Marcelo Breda Mourão, pela orientação deste trabalho.

Agradeço a todos que me apoiaram da Fundação SVEDALA LTDA no desenvolvimento deste trabalho e os aparelhos emprestados pela empresa.

Agradeço aos Professores do departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP, que favoreceu no aprendizado durante toda a graduação. Agradeço às secretárias márcia Pereira da Silva, Maria Cristina Biasoli e Ivani Aparecida dos Santos Gancho pelo serviços de apoio prestados e pelo incentivo. Agradeço também aos funcionários Paul J. Janson, Ivo de Macedo Gomes, Maria Aparecida Mora de Souza, Danilo A.A. Filho, Márcia Ribeiro, Cláudia F. de Lima, Clélia Meguerditchian.

Agradeço finalmente aos amigos da Graduação do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

## SUMÁRIO

### 1 – INTRODUÇÃO

	Página. 09
--	------------

### 2 – REVISÃO DE LITERATURA

2.1 - INTRODUÇÃO	Página. 10
2.2 - ANÁLISE DOS PROCESSOS DE FUNDIÇÃO VIA COMPUTADOR	Página. 10
2.3- SOLIDIFICAÇÃO	Página. 13
2.4 - ESTRUTURAS DE SOLIDIFICAÇÃO E PROPRIEDADES	Página. 14
2.5 - ESTRUTURAS DE SOLIDIFICAÇÃO E PROPRIEDADES	Página. 16
2.6- MODELO ANALÍTICO PARA SOLIDIFICAÇÃO COM FRENTE PLANA	Página. 21
2.7- TEMPO DE SOLIDIFICAÇÃO	Página. 25

### 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – APLICAÇÃO DA TEORIA DE B. GULYAEV	Página. 27
3.2 – APLICAÇÃO DA RESOLUÇÃO ANALÍTICA	Página. 29

### 4 – RESULTADOS

4.1 – RESULTADOS DO PROGRAMA DO TEMPO DE DESMOLDAGEM	Página. 31
4.2 – RESULTADOS PARA PEÇA EM FORMA DE CHAPA	Página. 36

### 5 – DISCUSSÃO

5.1- ERROS EXISTENTES NOS GRÁFICOS	Página. 41
5.2- APLICABILIDADE DO PERFIL DE SOLIDIFICAÇÃO	Página. 42

### 6 – CONCLUSÕES

	Página. 43
--	------------

### 7 – REFERÊNCIAS

	Página. 44
--	------------

## LISTA DE FIGURAS

### Descrição da Figura e Página

Figura 1 – É apresentado os modos de transferências térmicas durante a solidificação de uma peça. (Página 16)

Figura 2 – Perfil de temperatura para Regime Permanente e Transitório. (Página 17)

Figura 3 – Modos de transferência de calor atuantes na interface metal/molde, como condução, convecção e radiação. (Página 20)

Figura 4 – Apresentação das diferentes formas, sendo elas: a- Barra Arredondada, b- Carcaça, c-Revestimento, d-Cone, e-Mandíbula, f-Martelo, g-Ponta, h-Cunha, i-Chapa. (Página 27)

Figura 5 – Corte que demonstra as seções (molde, metal sólido e metal líquido) e suas temperaturas correspondentes. Com  $L_{molde}$  a espessura do molde em mm, ressaltando que este valor é apresentado em negativo;  $L_{sl}$  apresenta a distância que localiza a interface sólido e líquido;  $E_{1/2}$  é a metade da espessura da chapa em estudo, quando  $L_{sl} = E_{1/2}$  temos a completa solidificação da chapa. (Página 36)

## LISTA DE GRÁFICOS

### Descrição do Gráfico e Página

Gráfico 1 – Resultados de todas as peças coletadas em campo que tinham forma de Ponta, é apresentada a relação entre o tempo(h) e Massa (Kg) tendo como valor fixo a temperatura de 400<sup>0</sup>C no momento da desmoldagem. (Página 31)

Gráfico 2 – Resultados de todas as peças coletadas em campo que tinham forma de Martelo, é apresentado a relação entre o tempo(h) e Massa (Kg) tendo como valor fixo a temperatura de 400<sup>0</sup>C no momento da desmoldagem. Apresentando covariância de 0,5. (Página 32)

Gráfico 3 – Resultados de todas as peças coletadas em campo que tinham forma de Cunha. Apresentando covariância de 0,7. (Página 33)

Gráfico 4 – Resultados de todas as peças coletadas em campo que tinham forma de Chapa. Apresentando covariância de 0,9. (Página 33)

Gráfico 5 – Resultados de todas as peças coletadas em campo que tinham forma de Cone. Apresentando covariância de 0,8. (Página 34)

Gráfico 6 – Resultados de todas as peças coletadas em campo que tinham forma de Carcaça. Apresentando covariância de 0,3. (Página 34)

Gráfico 7 – Resultados de todas as peças coletadas em campo que tinham forma de Mandíbula. Apresentando covariância de 0,9. (Página 35)

Gráfico 8 – Gráfico de chapa com espessura de 28mm, com 1mm de metal solidificado, e tempo de solidificação:  $t = 2,3s$ . (Página 37)

Gráfico 9 – Gráfico de chapa com espessura de 28mm, com 7mm de metal solidificado, e tempo de solidificação:  $t = 17,3s$ . (Página 37)

Gráfico 10 – Gráfico de chapa com espessura de 28mm, com 14mm de metal solidificado, e tempo de solidificação:  $t = 37,5s$ , ou seja a solidificação completa. (Página 38)

Gráfico 11 – Gráfico de chapa com espessura de 98mm, com 1mm de metal solidificado. (Página 38)

Gráfico 12 – Gráfico de chapa com espessura de 98mm, com 14mm de metal solidificado. (Página 39)

Gráfico 13 – Gráfico de chapa com espessura de 98mm, com 32mm de metal solidificado. (Página 39)

Gráfico 14 – Gráfico de chapa com espessura de 98mm, com 40mm de metal solidificado. (Página 39)

Gráfico 15 – Gráfico de chapa com espessura de 98mm, com 49mm de metal solidificado, sendo o fim da solidificação com 180s. (Página 40)

## **LISTA DE TABELAS**

### **Descrição da Tabela e Página**

Tabela 1 – Propriedades térmicas do Fe(Página 30)

Tabela 2 – Propriedades térmicas do molde(Página 30)

## **RESUMO**

Este trabalho apresentará os conhecimentos necessários para a aplicação de um programa computacional que estima qual será o tempo de desmoldagem para peças em uma fundição específica, no caso a Svedala em que foram feitas as coletas das amostras.

Será apresentado os resultados deste programa e um estudo mais detalhado de como ocorre o processo de solidificação, determinando o perfil térmico e o tempo relacionado a espessura solidificada de uma peça em forma de chapa.



## 1 – INTRODUÇÃO

As Indústrias necessitam, cada vez mais, reduzir seus custos em sua produção, assegurando assim produtos competitivos no mercado, sem lançar mão da qualidade. Uma Fundição de areia, não diferente disso, deverá estudar e concentrar seus esforços em sua linha de produção, e uma maneira encontrada para reduzir seus custos é potencializar o estudo no tempo para desmoldagem. Uma peça fundida deverá ser desmoldada o mais rápido possível para assegurar um ótimo fluxo deste material semi-acabado, e assim garantindo mais espaço livre para entrada de outros novos materiais, como moldes de areia a serem vazados, mas a desmoldagem não pode ser tão rápida a ponto de prejudicar a própria peça por ter sido desmoldada a uma temperatura elevada.

Uma das formas de redução de custos numa fundição é “prever” o momento exato para o fundido ser desmoldado garantindo assim, um ponto ótimo para o fluxo de materiais na produção e a qualidade do produto final. Como previsão do tempo ótimo de desmoldagem entende-se a criação, normalmente via análise computacional, de modelos e simulações. As fundições que não possuem softwares utilizam como avaliação do tempo de desmoldagem uma análise empírica do tempo de desmoldagem favorecendo então a ocorrência de erros, onerando então a produtividade da empresa.

A Revisão de Literatura, que será o item seguinte, apresentará os conhecimentos necessários para o entendimento dos programas criados e aplicados para algumas peças na Fundição Svedala LTDA, situada em Sorocaba, SP.

## **2 – REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 – INTRODUÇÃO**

A revisão de literatura apresentará as características que determinam as variáveis que interagem para o tempo de desmoldagem numa Fundição.

Apresento também as teorias existentes que descrevem a relação entre as formas das peças com o perfil de resfriamento (desenvolvido por Chvorinov) e as características dos modelos existentes atualmente e seus programas no mercado que descrevem o resfriamento de peças e a identificação de problemas decorrente da solidificação.

### **2.2– ANÁLISE DOS PROCESSOS DE FUNDIÇÃO VIA COMPUTADOR**

#### **Modelamento ou simulação**

É importante salientar a diferença entre Modelamento e Simulação, muitas vezes confundidos. O modelo é uma representação ou descrição física ou matemática de um processo ou evento, sendo utilizado pela simulação para imitar o que ocorre na realidade. Atualmente, muitas simulações podem ser executadas via computador, empregando com frequência modelos matemáticos desenvolvidos no passado. A simulação também pode ser utilizada para aprimorar o modelo, principalmente nos casos em que é difícil descrever as características físicas do evento.

## **Metodologias**

A simulação por computador de qualquer processo deve considerar duas questões primordiais:

- o tipo de equações utilizadas
- o tratamento matemático destas equações

A escolha do tratamento matemático das equações determina o modo pelo qual a geometria será definida.

Deve-se ressaltar que sistemas inteligentes não são ferramentas de simulação, mas podem ser utilizados para prever algum acontecimento.

## **Enfoque do programa**

Podemos reunir dois tipos de sistemas, sendo que os sistemas baseados nos conhecimentos da física são potencialmente mais precisos.

Os sistemas baseados em regras, no entanto, tendem a ser muito mais rápidos a partir do momento em que as regras são definidas. Entretanto, possuem o inconveniente de somente serem aplicáveis ao sistema o qual foram projetados.

Um exemplo disto é o Solstar, um pacote baseado em regras desenvolvido pela Foseco. Este programa é considerado muito bom para lidar com ligas de aço, mas

apresenta muitos problemas no caso das ligas de Alumínio, que tem uma extensa faixa de solidificação.

Diante as exigências da Fundição é que será definido o tipo de sistema a utilizar, se é baseado em regras ou na física, por exemplo às exigências de uma fundição de peças repetidas manufaturadas em ferro, que utiliza moldes de areia verde, provavelmente serão muito diferentes daqueles de uma fundição do tipo investment casting de superligas, devido à grande diferença técnica entre estes dois processos.

### **Sistemas inteligentes / Técnicas heurísticas**

Existem programas que são denominados de “caixas-pretas”, que apresentam os resultados sem que seja possível saber a técnica utilizada, devido a razões comerciais, entre estes *softwares* destacam-se o Solstar, o Softast, o Novacast e o Cadcast. Alguns destes programas combinam análises experimentais assertivas, além de algumas funções com critérios bem conhecidos, como por exemplo à aplicação da regra de Chorinov e cálculos de módulo.

Grande parte destes pacotes fornece bons resultados, principalmente aqueles em que o *software* foi bem calibrado para as ligas que estão sendo fundidas, tendo como vantagem a grande velocidade com que os resultados são obtidos, o Solstar, por exemplo, pode produzir resultados para 8 milhões de volumes controlados em menos de 15 minutos, se o processador for avançado, como um Pentium.

Alguns pacotes de softwares mais sofisticados, não tão rápidos, pois a solução é criada diante regras, como por exemplo o Rapidcast, da Current Technologies

Corporation, que possui módulos Quick Fill baseados nos princípios de Bernoulli, além de uma técnica de encaminhamento aleatório. Outro exemplo é o software Modulus, baseado nas regras de Chvorinov<sup>(2)</sup>.

## **Métodos Numéricos**

Os dois métodos numéricos mais importantes aplicados na simulação dos processos de fundição por computador são métodos de diferenças finitas (FDM, de *Finite difference method*) e o método de elementos finitos (FEM, de *Finite element method*).

### **2.3– SOLIDIFICAÇÃO**

A solidificação é um fenômeno de transformação de fases bastante familiar e associado à nossa rotina diária, desde a simples produção de cubos de gelo até o manuseio de utensílios e componentes, os quais, quase que invariavelmente, passaram por um estágio de solidificação durante a sua fabricação.

Uma análise global dos atuais processos de manufatura de peças e componentes metálicos mostra que, com exceção dos artigos produzidos por técnica de metalurgia do pó, todos os demais passam, pelo menos uma vez, pelo processo de solidificação. Com a fusão dos metais há uma queda abrupta na viscosidade, de tal maneira que se pode essencialmente acomodar o metal líquido em um molde de determinada geometria para proporcionar o formato de uma peça semi-acabada. Isso faz com que a fundição constitua

a rota mais econômica na conformação de uma peça metálica, desde que o ponto de fusão não seja extremamente elevado.

## **2.4– ESTRUTURAS DE SOLIDIFICAÇÃO E PROPRIEDADES**

A estrutura que se forma imediatamente após a solidificação determina as propriedades do produto final, não somente no caso de peças de fundição que já apresentam essencialmente a forma definitiva, mas também naqueles produtos que serão trabalhados para a produção de chapas, fios ou forjados. Embora se acredite que eventuais defeitos da estruturas brutas de solidificação sejam eliminados durante a etapa de conformação plástica de lingotes, não ocorre exatamente isso na prática. Mesmo que determinamos defeitos desapareçam macroscopicamente com o processo de deformação, geralmente a maioria deles é conduzida até o produto acabado. As características mecânicas desse produto dependem do tamanho de grão, espaçamentos dendríticos, espaçamentos lamelares ou fibrosos, das heterogeneidades de composição química, do tamanho, forma e distribuição das inclusões, das porosidades formadas etc. Todos esses aspectos da microestrutura dependem fortemente das condições de solidificação, desde o início do processo com o metal no estado líquido. Uma vez fixada a composição química da liga metálica, a dinâmica do processo de solidificação é que se encarregará de determinar a microestrutura resultante. A temperatura de vazamento do metal líquido surge como a primeira variável de influência juntamente com a intensidade das correntes convectivas durante o preenchimento do molde. O molde, por sua vez, além de conferir forma à peça, atuará como o absorvedor de calor responsável pela extração de calor do

metal, garantindo a transformação do líquido em sólido. Dependendo da capacidade de absorção de calor pelo molde, o processo desenvolverá com maior ou menor rapidez com influência direta nas taxas de resfriamento da peça.

Vê-se que a compreensão da teoria da solidificação é fundamental para o planejamento dos processos de fabricação, já que permite o conhecimento dos fatores que influenciam a microestrutura e, conseqüentemente, a qualidade do produto. Apesar disso, um alto grau de empirismo perdura ou, principalmente na indústria de fundição, até o final da primeira metade do século XX, quando os primeiros grupos de pesquisa passaram a analisar de forma científica os fenômenos que ocorrem durante a solidificação de materiais. A partir dessas análises, muitos problemas de interesse prático começaram a ser desvendados, e processos tradicionais, como a fundição e o lingotamento, incorporaram sensíveis inovações tecnológicas<sup>(1)</sup>.

## 2.5- MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Para compreender como ocorre a transferência de calor durante a perda térmica da peça fundida será apresentados a seguir os mecanismos básicos para a transferência de calor que são: condução, convecção e radiação. Este mecanismo é apresentado por Amauri Garcia <sup>(1)</sup>. Na figura 1 está demonstrado um elemento de referência extraído do sistema metal/molde que evidencia todos os modos de transferência de calor que podem ocorrer ao longo de sua solidificação.

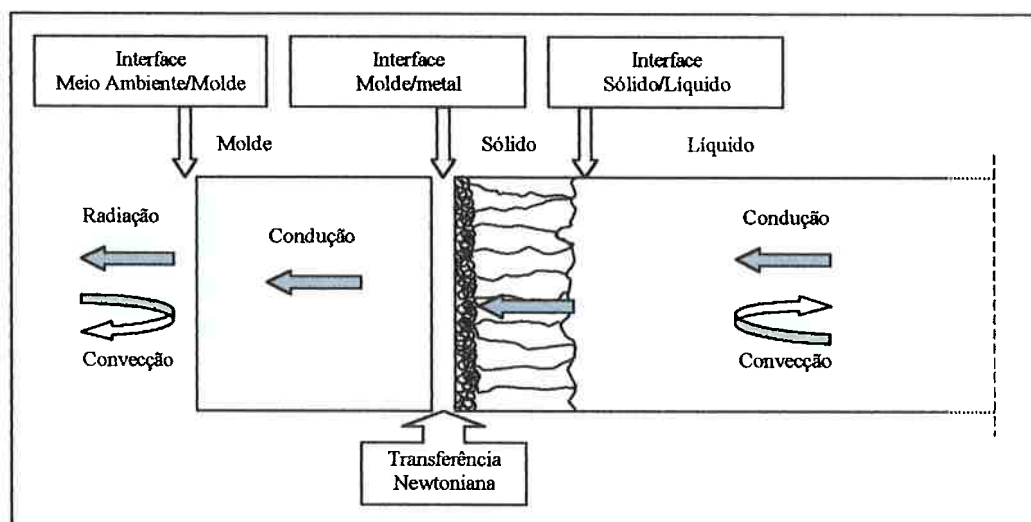


Figura 1 – É apresentado os modos de transferências térmicas durante a solidificação de uma peça.

A **Condução térmica** é um mecanismo que pode ocorrer em regime permanente ou em regime transitório. No regime permanente o calor é conduzido no sentido da temperatura mais alta para a mais baixa, conforme a expressão a seguir:



$$q_k = -\frac{K}{S}(T_L - T_0) \quad \text{equação 1}$$

onde  $q$  é o fluxo de calor ( $\text{W/m}^2$ ),  $K$  é a condutividade térmica do material ( $\text{W/mK}$ ),  $S$  é a espessura da placa (m), e  $T_L$  e  $T_0$  são as temperaturas nos dois extremos da placa, sendo  $T_L > T_0$  (K).

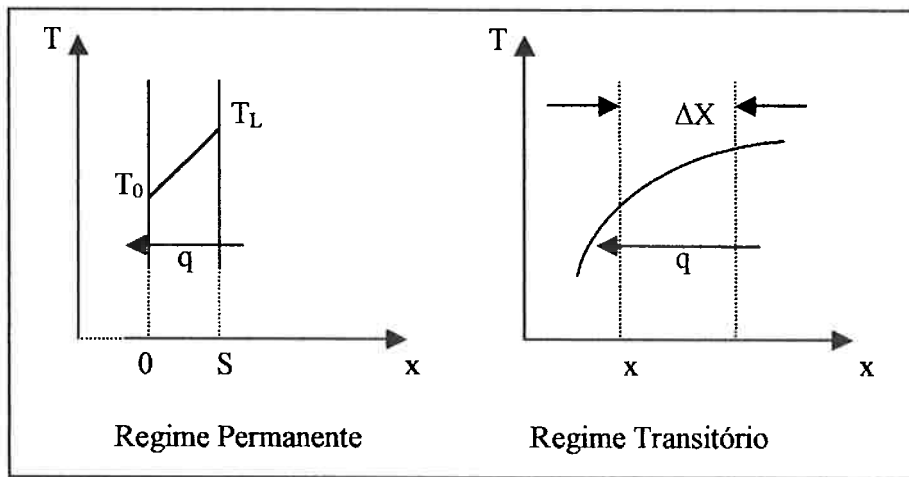


Figura 2 – Perfil de temperatura para Regime Permanente e Transitório.

Para condução transitória, em que temos uma distribuição de temperatura não-linear, conforme é apresentado na Figura 2. No elemento de volume de espessura  $\Delta x$ , o calor conduzido para dentro desse elemento através da superfície em  $x + \Delta x$  é menor que o calor conduzido para fora do elemento em  $x$ , e utilizando-se o princípio de conservação de energia pode-se escrever:

$$A \cdot q_x = A \cdot q_{x+\Delta x} + A \cdot \Delta x \cdot d \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{equação 2}$$

onde  $A$  é a área de troca térmica ( $m^2$ ),  $d$  é a densidade do material ( $kg/m^3$ ),  $c$  é o calor específico ( $J/kgK$ ), e  $\partial T / \partial t$  é a taxa de aquecimento/resfriamento ( $K/s$ ). A equação 2 pode ser usada para derivar-se a equação de energia para condução térmica unidimensional, através da divisão de cada um de seus termos por  $\Delta x$ , temos:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left( \frac{q_{x+\Delta x} - q_x}{\Delta x} \right) = -dc \frac{\partial T}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial q}{\partial x} = -dc \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{equação 3}$$

onde  $a = K/cd$  ( $m^2/s$ ) é a difusividade térmica.

A equação 3 pode ser utilizada na solução de problemas unidimensionais de condução térmica tanto em regime permanente quanto transitório.

A **Convecção** é um mecanismo de troca de energia térmica através da movimentação de um fluido, e sua avaliação quantitativa depende da velocidade do fluido e da geometria da superfície do sólido. A quantificação do fluxo convectivo é feita através de expressões do tipo:

$$q_c = h_c(T_s - T_0) \quad \text{equação 4}$$

onde  $T_s$  é a temperatura da superfície do sólido, e  $T_0$  é a temperatura uniforme do fluido a uma certa distância da superfície,  $h_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ).

A **radiação** é a transferência térmica através de um mecanismo de radiação eletromagnética chamado de radiação térmica. O fluxo de calor nessas situações é quantificado pela lei de Stefan-Boltzmann, e para situações de uma superfície mantida a uma temperatura  $T_s$  e completamente envolvida por um meio a uma temperatura  $T_0$ .

$$q_R = \sigma \epsilon (T_s^4 - T_0^4) \text{ equação 5}$$

onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann de valor igual a  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ , e  $\epsilon$  é a emissividade da superfície que relaciona a radiação de uma superfície cinzenta com a de uma superfície negra ideal.

Os moldes de areia possuem como função principal, conferir forma ao metal líquido preste a se solidificar. Na interface de molde/metal ocorrerá a transferência de calor por meio da condução, pelos pontos de contato e através dos gases aprisionados pelos espaços existentes, e também por convecção e radiação entre as duas superfícies separadas, sendo estes mecanismos apresentados na Figura 3.

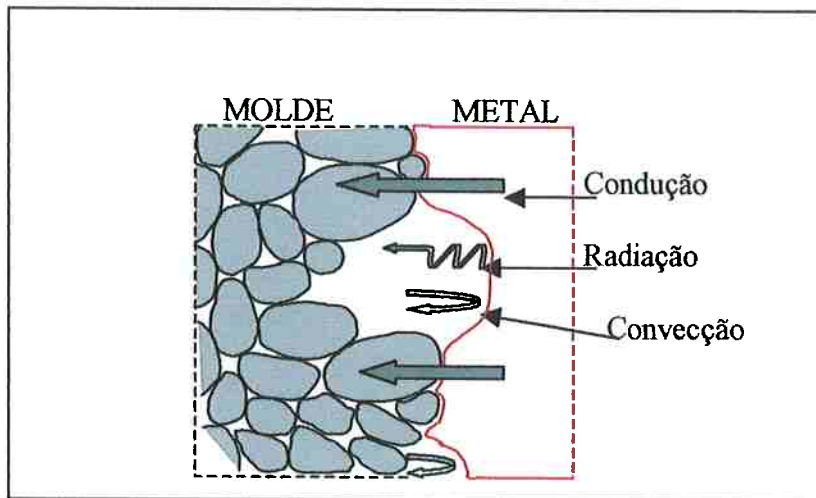


Figura 3 – Modos de transferência de calor atuantes na interface metal/molde, como condução, convecção e radiação.

Para simplificar o tratamento da troca térmica entre duas superfícies em contato, Newton admitiu que essas superfícies fossem perfeitamente planas e paralelas separadas por uma distância  $e$ , sendo esse espaço de separação preenchido por um determinado gás, esta transferência térmica é definida como **Transferência Newtoniana**, apresentada pelas equações:

$$q_N = \frac{K_g}{e}(T_{is} - T_{im}) \quad \text{ou} \quad q_N = h_i(T_{is} - T_{im}) \quad \text{equação 6}$$

onde  $T_{is}$  e  $T_{im}$  são as temperaturas das superfícies do material e do molde respectivamente, e  $h_i$  é o coeficiente de transferência de calor material/molde ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ). Esse coeficiente deve necessariamente ser determinado de forma experimental para cada par material/molde.

## **2.6- MODELO ANALÍTICO PARA SOLIDIFICAÇÃO COM FRENTE**

### **PLANA**

Existem vários métodos que são utilizados na busca de soluções para a análise da transferência de calor durante o processo de solidificação, e que podem ser sintetizados em: modelos analíticos; abordagens experimentais e métodos numéricos.

Será apresentado um modelo analítico que avalia a análise de transferência de calor durante o processo de solidificação com a o objeto de apresentar a distribuição de temperaturas no sistema material/molde. Do ponto de vista matemático, o tratamento formal do problema apresenta complexidade considerável, causada principalmente pela contínua geração de calor latente na interface sólido/líquido e pelo movimento dessa fronteira que torna o problema não-linear.

#### **Solidificação com frente plana**

Para substâncias puras e misturas eutéticas a solidificação ocorre a uma única temperatura, apresentando uma fronteira bem determinada de separação entre líquido e sólido. A seguir será demonstrados os conceitos matemáticos deste modelo analítico para uma peça com forma de chapa, estes conceitos são demonstrados por Amauri Garcia <sup>(1)</sup>.

Apresentarei as hipóteses de caráter físico para o desenvolvimento de soluções exatas:

- o fluxo de calor é unidirecional, sendo metal e molde considerados semi-infinitos;

- a resistência térmica da interface metal/molde é apresentada por um coeficiente de transferência de calor  $h_i$ ;
- o metal solidifica-se com uma interface sólido/líquido macroscopicamente plana;
- o metal líquido encontra-se inicialmente a uma temperatura  $T_v$ , não muito acima da temperatura de fusão, como ocorre usualmente na prática, de modo que a convecção no líquido é desprezada sendo considerado apenas o fluxo por condução;
- as propriedades termofísicas do metal sólido, metal líquido e do molde permanecem constantes durante o processo.

Os perfis térmicos matemáticos para os seguintes meios serão apresentados a seguir:

No molde:

$$T_m = T_0 + \frac{(T_f - T_0) \cdot M}{M + \text{erf}(\phi)} \cdot \left[ 1 + \text{erf} \left( \phi \frac{2 \cdot \alpha \cdot N \cdot x - \beta}{2 \cdot \alpha \cdot S + \beta} \right) \right] \text{ equação 7}$$

Onde:

$$N = \sqrt{\frac{a_s}{a_m}} \text{ [adimensional], equação 8 ,}$$

$$\text{e } a = \frac{K}{c \cdot d} \text{ [m}^2\text{/s], equação 9}$$

então:

$$a_s = \frac{K_s}{c_s \cdot d_s} \text{ e o mesmo para } a_m.$$

$$\alpha = \frac{1}{4 \cdot a_s \cdot \phi^2} [\text{m}^2/\text{s}] \text{ equação 10}$$

$$\beta = \frac{c_s \cdot d_s}{\sqrt{\pi} \cdot \phi \exp(\phi^2) \cdot [M + \text{erf}(\phi)] \cdot h_i} [\text{s/m}] \text{ equação 11}$$

$$M = \frac{b_s}{b_m} [\text{adimensional}] \text{ equação 12, com } b = \sqrt{K \cdot c \cdot d} [\text{Ws}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}] \text{ equação 13,}$$

para  $b_s = \sqrt{K_s \cdot c_s \cdot d_s}$  e o mesmo para  $b_m$ . Sendo S a espessura do metal solidificado (mm).

No metal sólido:

$$T_s = T_0 + \frac{(T_f - T_0)}{M + \text{erf}(\phi)} \cdot \left[ M + \text{erf}\left(\phi \frac{2 \cdot \alpha \cdot x + \beta}{2 \cdot \alpha \cdot S + \beta}\right) \right] \text{ equação 14}$$

No metal líquido:

$$T_l = T_v - \frac{(T_v - T_f)}{1 - \text{erf}(n \cdot \phi)} \cdot \left[ 1 - \text{erf}\left(n \cdot \phi \frac{2 \cdot \alpha \cdot x + \beta}{2 \cdot \alpha \cdot S + \beta}\right) \right] \text{ equação 15}$$

Com:

$$T_v = T_f + \Delta T [\text{K}] \text{ equação 16}$$

sendo  $\Delta T$  o superaquecimento com  $T_v$  a temperatura de vazamento e  $T_f$  a temperatura de fusão.

$$n = \sqrt{\frac{a_s}{a_l}} [\text{adimensional}] \text{ equação 17}$$

### Determinação da constante de solidificação ( $\phi$ )

A constante de solidificação ( $\phi$ ) está vinculada ao deslocamento da fronteira sólido/líquido, e sua determinação pode decorrer de um balanço de energia térmica nessa fronteira. Temos então a equação, que é resolvida por métodos iterativos.

$$\frac{\exp(-\phi^2)}{M + \operatorname{erf}(\phi)} - m \frac{(T_v - T_f) \exp(-n^2 \phi^2)}{(T_f - T_0) [1 - \operatorname{erf}(n\phi)]} - \sqrt{\pi} \cdot \phi \frac{L}{c_s (T_f - T_0)} = 0 \quad \text{equação 18}$$

sendo  $m = b_l/b_s$  [adimensional] equação 19



## 2.7- TEMPO DE SOLIDIFICAÇÃO

N. Chovirnov foi um dos primeiros cientistas que apresentou uma publicação referindo sobre a solidificação. A Teoria da Solidificação foi desenvolvida em 1940 na Czechoslovakia e A.Veinik (1953) na Rússia.

P. Bidulya<sup>(3)</sup> descreve a evolução das análises experimentais diante da teoria desenvolvida por N. Chvorinov, que apresentou a equação 20, que poderemos encontrar o tempo de solidificação para peças com geometria específica.

$$x = k\sqrt{\tau} \quad \text{equação 20}$$

, onde:

$x$  - espessura da camada solidificada de metal (cm)

$\tau$  - tempo de solidificação (s)

B. Gulyaev ao aplicar a teoria de Chvorinov nas análises experimentais, propõem então a equação, que descreve o tempo necessário para a ocorrência da solidificação completa:

$$\tau_3 = M\Phi R^2, \quad \text{Equação 21}$$

onde:  $\tau_3$  = capacidade da solidificação completa, (h)

$M$  = coeficiente dependente do tipo do material e a forma do fundido, formado pelo B. Gulyaev dos resultados de investigações numerosas

$\Phi$  = coeficiente da forma, na qual 1.00 é para chapa plana, 0,76 para cilindro e 0,47 para esfera.

R = metade da espessura ou raio do elemento (m)

### **Tempo de solidificação parcial**

Para encontrar o tempo de solidificação referente a espessura da camada solidificada, G. H. Geiger<sup>(4)</sup> apresenta a equação:

$$t = \frac{d_s \cdot L \cdot \Theta}{h_i (T_s - T_0)} \left( S + \frac{h_i}{K_s} \cdot S^2 \right) \text{ Equação 22}$$

$$\text{com } \Theta = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{c_s \cdot (T_s - T_0)}{3 \cdot L}} \text{ Equação 23}$$

sendo  $h_i$  o coeficiente de transferência de calor material/molde ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ), e L o calor latente do metal [ $\text{J/Kg}$ ].

### 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão descritos os procedimentos e as condições adotadas para a obtenção dos resultados experimentais. A aplicação da teoria de B. Gulyaev<sup>(2)</sup> será explicado inicialmente, apresentando a teoria que conduz a metodologia de coleta de dados, que apresenta de uma forma geral como é o campo de trabalho na área de vazamento e a seleção e identificação das peças a serem desmoldadas.

#### 3.1 – APLICAÇÃO DA TEORIA DE B. GULYAEV

Diante da teoria de B. Gulyaev, em que é considerada a forma e as condições do meio e espessura da peça, foi dividida as formas encontradas no setor de vazamento nas seguintes categorias:

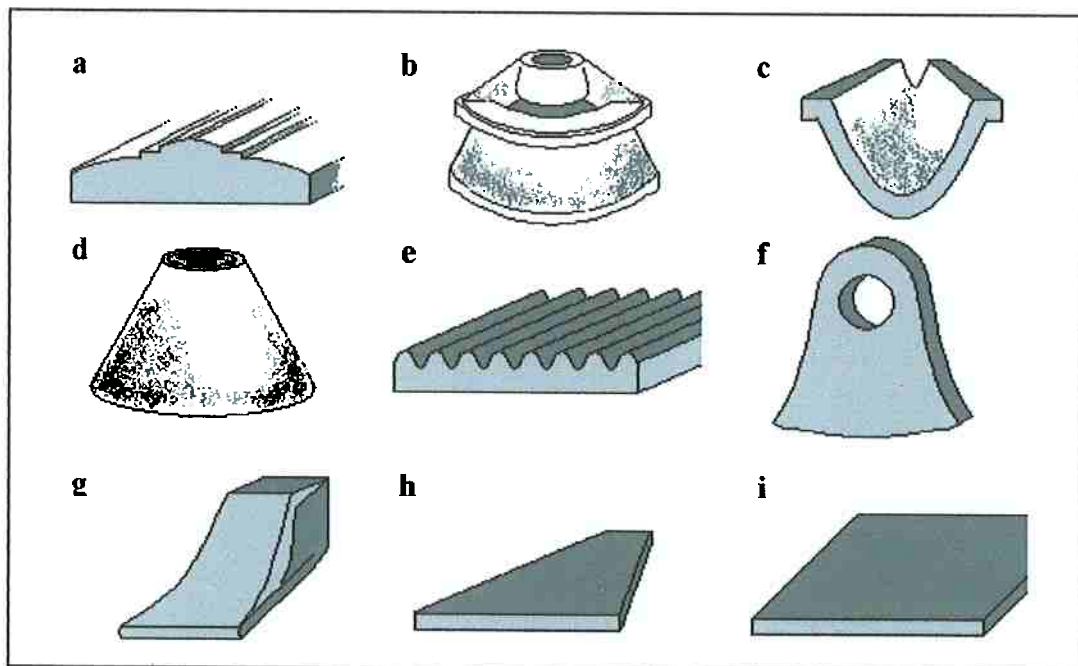


Figura 4 – Apresentação das diferentes formas, sendo elas: a- Barra Arredondada, b-Carcaça, c-Revestimento, d-Cone, e-Mandíbula, f-Martelo, g-Ponta, h-Cunha, i-Chapa.

No momento da desmoldagem era coletado e anotado o tempo e a etiqueta de identificação da peça que apresentava: Relação metal/areia; espessura da peça; tempo de “espera”, que era o tempo de vazamento até sua desmoldagem; identificação da peça como o nome comercial e o número de série; sua categoria ou forma.

Todos estes dados foram armazenados em uma planilha de Excel com interação em Visual Basic.

Foi criado um programa que permitia um acesso fácil a todos os dados com a apresentação de seus gráficos, como por exemplo a criação de um gráfico que apresentava a evolução da temperatura com o tempo (gráfico de resfriamento). O programa cria um gráfico que fornece o tempo para desmoldagem para uma peça de forma, temperatura de desmoldagem, massa a definir. Este gráfico, foi a intenção primordial para a criação deste programa pois é possível com ele determinar o tempo para a desmoldagem de uma peça nunca antes desmoldada, ressaltando: fixando a forma, massa e temperatura da peça. Este programa se baseia nos experimentos de B. Gulyaev<sup>(2)</sup>, em que temos a equação:  $\tau_3 = M\Phi R^2$ , (equação 21), sendo M e  $\Phi$  características da forma e as condições do meio serem constante:

- Materiais do molde (todas as peças são produzidas pelos mesmos materiais, ou seja areia com mesma constituição)
- Ambiente (considero como hipótese a temperatura do meio constante e valendo 300K)
- Forma do fundido (a forma será constante no momento de definirmos a criação do gráfico)

O coeficiente R, é definido por B. Gulyaev como a metade da espessura da peça, mas ao criar o programa considero que R possuirá uma relação diretamente proporcional com a massa do fundido.

O programa não avalia o tempo de solidificação (diferente de B. Gulyaev) e sim o tempo para a desmoldagem, considerando que o tempo de desmoldagem é de alguma forma mais valorizado para a empresa que o tempo de solidificação sabendo que este programa foi feito com o objetivo de ser aplicado em sua produção.

A forma da peça está relacionada com a intensidade de extração de calor, com isso aproximo que o tempo para a desmoldagem estará relacionado com sua forma, reescrevendo então a equação de B. Gulyaev;  $T_{desm} = M \cdot \Phi \cdot massa$  (originária da equação 21), onde M e  $\Phi$  tem os mesmos significados da equação original e a *massa* é definida como a massa da peça.

### 3.2 – APLICAÇÃO DA RESOLUÇÃO ANALÍTICA

Será avaliado o perfil térmico de chapas, pois elas podem ser estudadas com mais profundidade, sendo que de todas as peças coletadas em campo, a chapa é a única que possui forma simples o suficiente a permitir uma interpretação matemática do perfil térmico sem tanta complexidade.

Para o desenvolvimento dos cálculos matemáticos será apresentado a seguir as constantes que permitem a análise matemática<sup>(1)</sup>:

Para o Fe:

Tabela 1 – Propriedades térmicas do Fe

	K(W/mK)	c(J/KgK)	d(Kg/m <sup>3</sup> )	Tf(K)	L(J/Kg)
Sólido	40	600	7500	1809	277000
Líquido	30	790	7000	-	-

Tabela 2 – Propriedades térmicas do molde

	K(W/mK)	c(J/KgK)	d(Kg/m <sup>3</sup> )	Tf(K)	L(J/Kg)
Molde de areia (silica)	0,82	1170	1600	-	-

Como as peças em forma de chapa eram de diferentes ligas, assumi o estudo das condições do Ferro que é um metal que possui propriedades já definidas e conhecidas. As ligas estudadas em campo não possuem referências sendo então necessário para obter as propriedades térmicas um estudo mais profundo em campo. Será avaliado o perfil térmico para ligas eutéticas ou puras e não para ligas binárias a utilização do Fe como material de análise será de grande utilidade.

Foi admitido que  $h_i$  (coeficiente de transferência de calor da interface metal/molde) tivesse valor de 1000 W/m<sup>2</sup>K, obtido pelo G.H. Geiger<sup>(4)</sup>.

## 4 – RESULTADOS

### 4.1 – RESULTADOS DO PROGRAMA DO TEMPO DE DESMOLDAGEM

Será apresentado os resultados para as diferentes peças, todos eles obtidos através do programa desenvolvido.

A seguir serão apresentados os gráficos para as diferentes formas (conforme demonstra a Figura 4), o gráfico relaciona o tempo necessário em horas para a peça, com forma específica, e sua massa em Kg. Sendo variáveis a massa da peça e o tempo de desmoldagem, e fixo a temperatura para a desmoldagem a 400<sup>0</sup>C

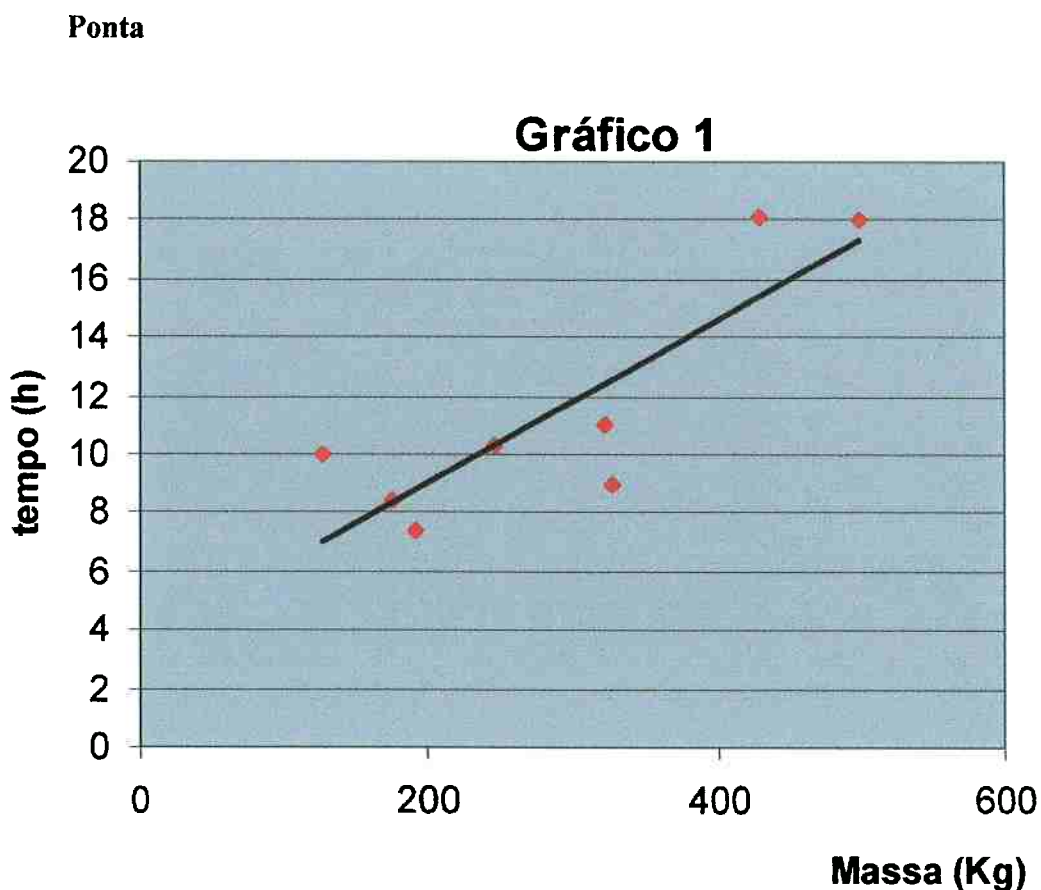


Gráfico 1 – Resultados de todas as peças coletadas em campo que tinham forma de Ponta, é apresentada a relação entre o tempo(h) e Massa (Kg) tendo como valor fixo a temperatura de 400<sup>0</sup>C no momento da desmoldagem.

Este gráfico apresenta covariância de 0,9. Para valor equivalente a 1,0 significa que as amostras estão distribuídas exatamente numa reta, para valores menores que 1,0 significa que os dados das amostras estão dispersos, sendo que quanto mais disperso menor será o valor de covariância, com o menor numero equivalendo a 0 significando valores tão dispersos que não é possível obter uma reta média.

### Martelo

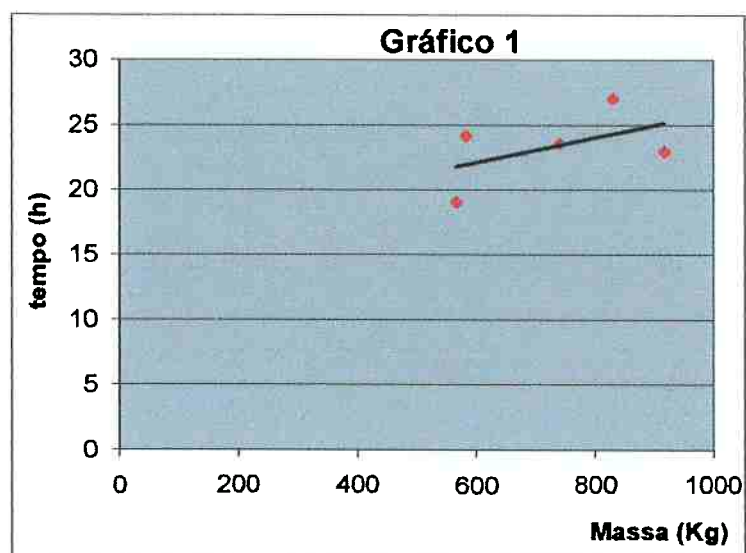


Gráfico 2 – Resultados de todas as peças coletadas em campo que tinham forma de Martelo, é apresentado a relação entre o tempo(h) e Massa (Kg) tendo como valor fixo a temperatura de 400<sup>0</sup>C no momento da desmoldagem. Apresentando covariância de 0,5.



## Cunha

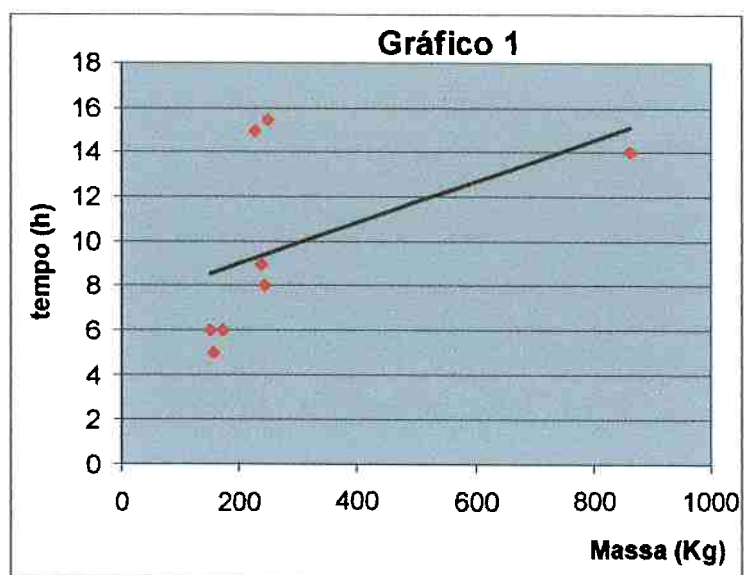


Gráfico 3 – Resultados de todas as peças coletadas em campo que tinham forma de Cunha. Apresentando covariância de 0,7.

## Chapa

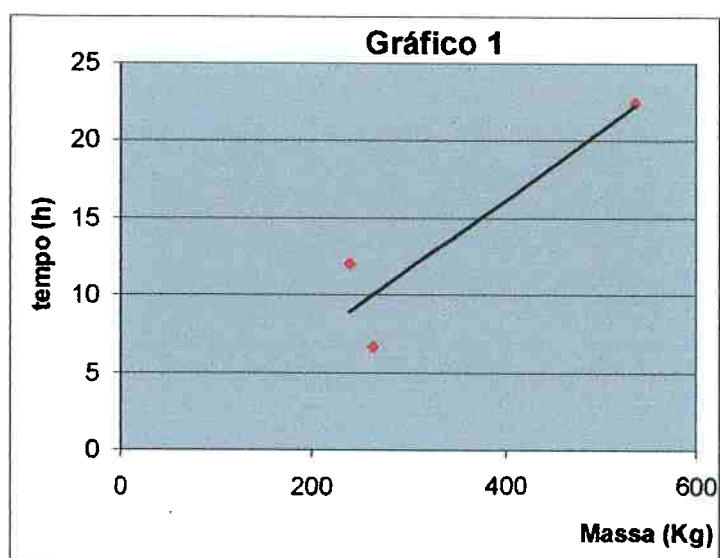


Gráfico 4 – Resultados de todas as peças coletadas em campo que tinham forma de Chapa. Apresentando covariância de 0,9.

## Cone

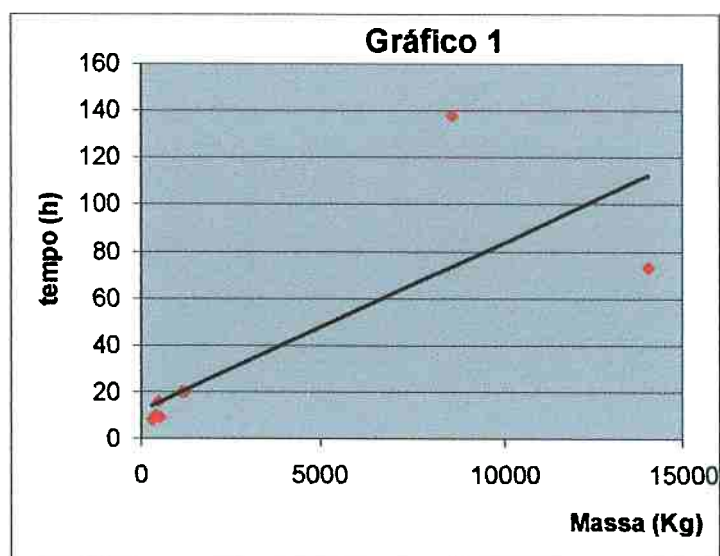


Gráfico 5 – Resultados de todas as peças coletadas em campo que tinham forma de Cone. Apresentando covariância de 0,8.

## Carcaça

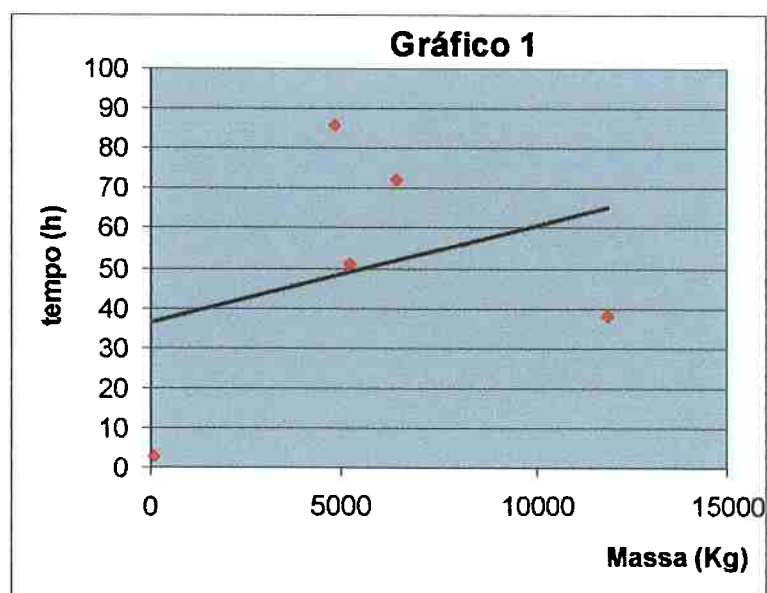


Gráfico 6 – Resultados de todas as peças coletadas em campo que tinham forma de Carcaça. Apresentando covariância de 0,3.

## Mandíbula

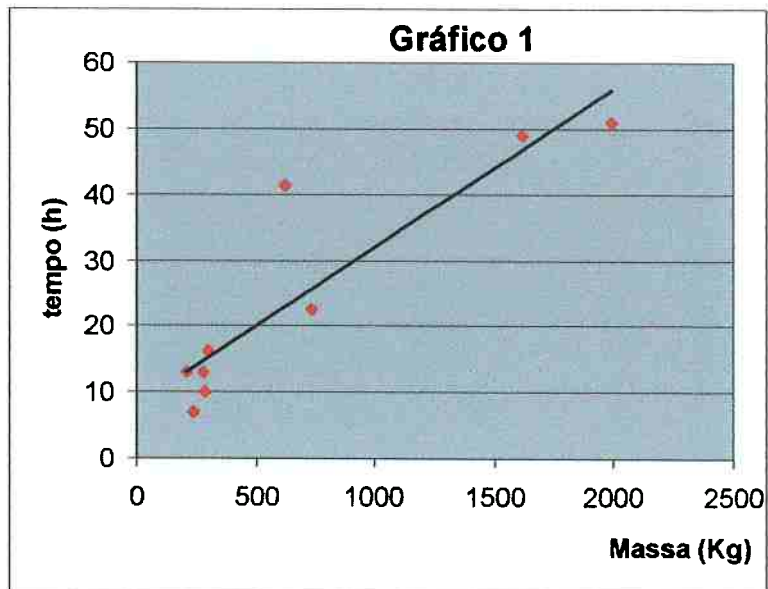


Gráfico 7 – Resultados de todas as peças coletadas em campo que tinham forma de Mandíbula. Apresentando covariância de 0,9.

## 4.2 – RESULTADOS PARA PEÇA EM FORMA DE CHAPA

Serão apresentados os resultados dos cálculos para o perfil térmico para a peça que possui forma de chapa. Os gráficos a seguir representam o perfil térmico no molde, no metal líquido e no metal sólido, conforme é ilustrado na Figura a seguir:

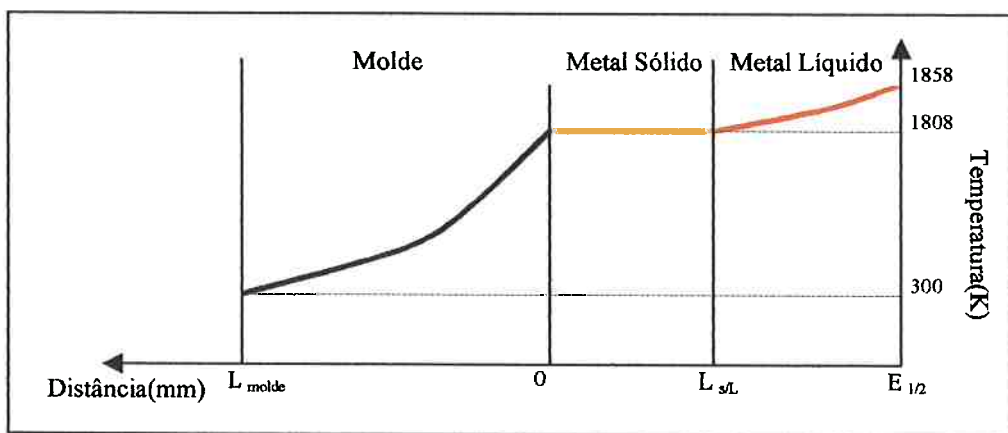


Figura 5 – Corte que demonstra as seções (molde, metal sólido e metal líquido) e suas temperaturas correspondentes. Com  $L_{molde}$  a espessura do molde em mm, ressaltando que este valor é apresentado em negativo;  $L_{s/L}$  apresenta a distância que localiza a interface sólido e líquido;  $E_{1/2}$  é a metade da espessura da chapa em estudo, quando  $L_{s/L} = E_{1/2}$  temos a completa solidificação da chapa.

Apresentarei a seguir o perfil térmico de uma chapa com espessura de 28mm e espessura do molde de 100mm, este perfil térmico foi obtido utilizando o modelo analítico para solidificação de frente plana.

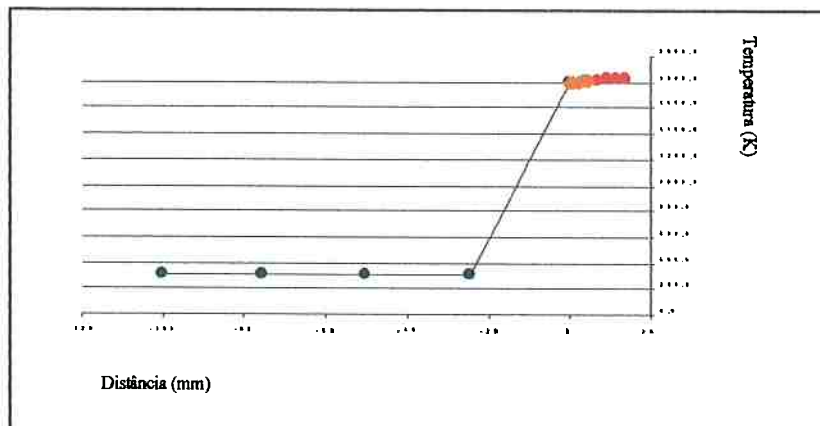


Gráfico 8 – Gráfico de chapa com espessura de 28mm, com 1mm de metal solidificado, e tempo de solidificação:  $t = 2,3s$ .

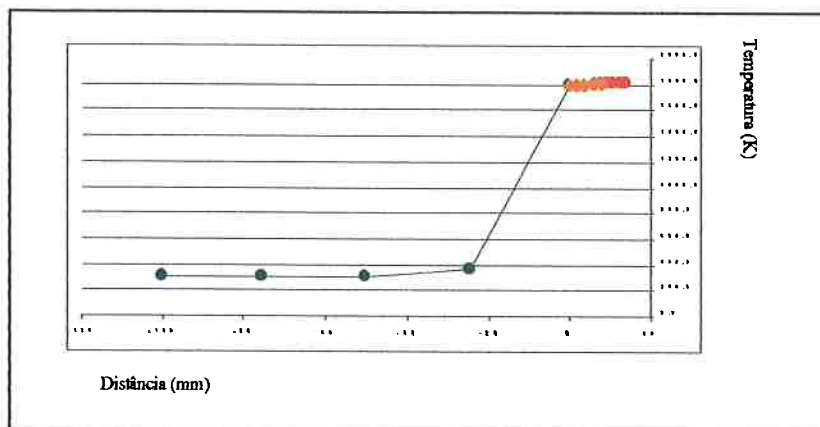


Gráfico 9 – Gráfico de chapa com espessura de 28mm, com 7mm de metal solidificado, e tempo de solidificação:  $t = 17,3s$ .

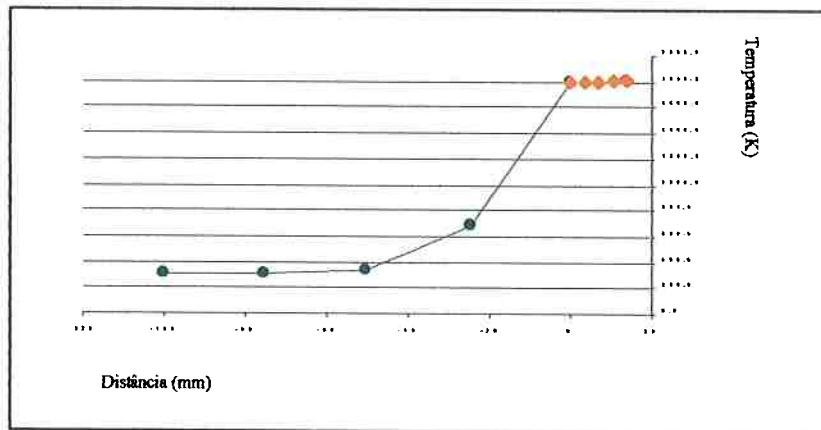


Gráfico 10 – Gráfico de chapa com espessura de 28mm, com 14mm de metal solidificado, e tempo de solidificação:  $t = 37,5s$ , ou seja a solidificação completa.

Para uma chapa com 98mm de espessura e 150mm de espessura do molde, temos os resultados:

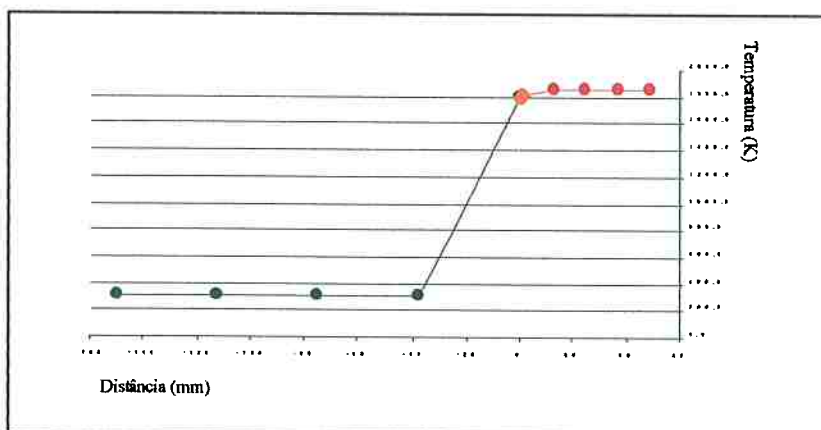


Gráfico 11 – Gráfico de chapa com espessura de 98mm, com 1mm de metal solidificado.

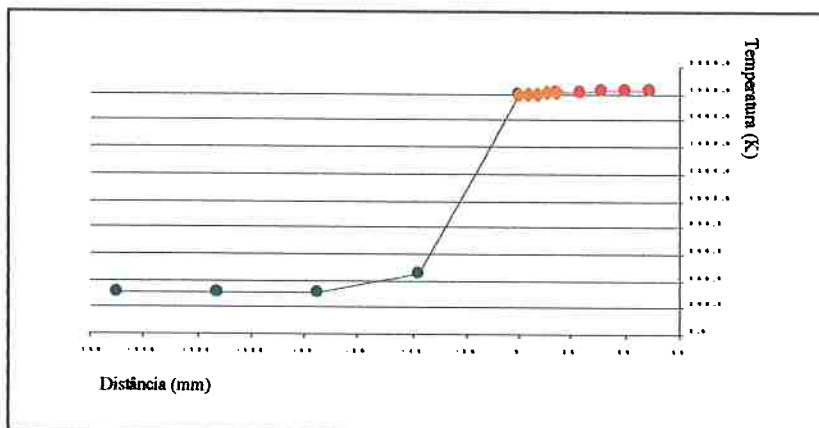


Gráfico 12 – Gráfico de chapa com espessura de 98mm, com 14mm de metal solidificado.

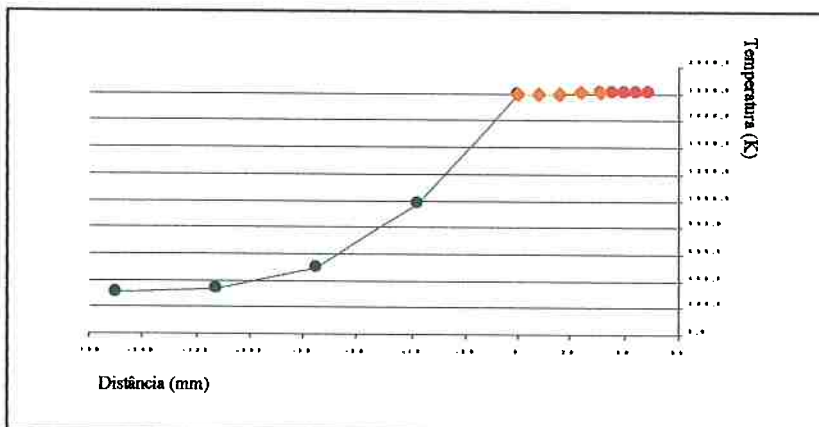


Gráfico 13 – Gráfico de chapa com espessura de 98mm, com 32mm de metal solidificado.

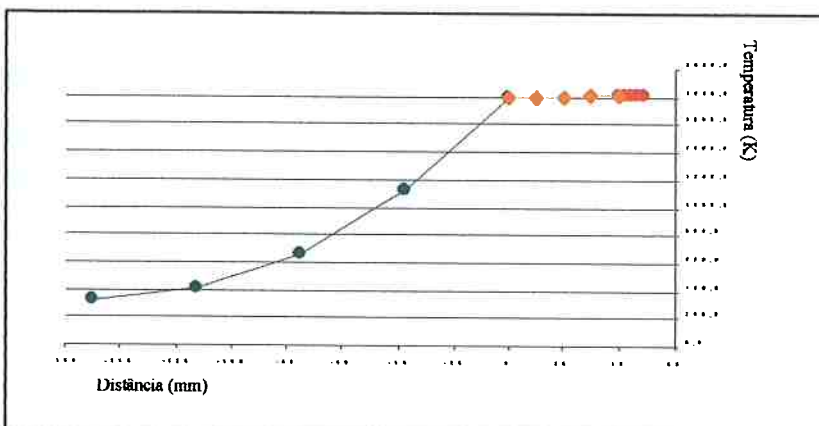


Gráfico 14 – Gráfico de chapa com espessura de 98mm, com 40mm de metal solidificado.

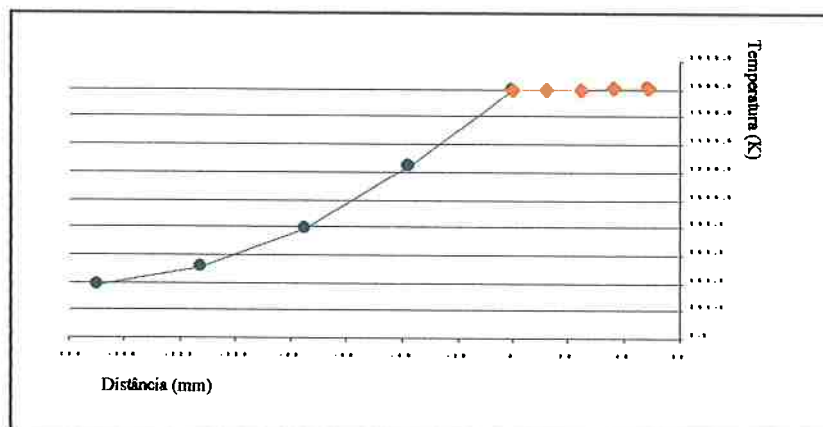


Gráfico 15 – Gráfico de chapa com espessura de 98mm, com 49mm de metal solidificado, sendo o fim da solidificação com 180s.



## **5 – DISCUSSÃO**

A discussão dos resultados mostrados no item anterior será apresentada em duas partes, a saber: quais os problemas existentes nos resultados obtido no programa de tempo de desmoldagem e qual a aplicação do perfil térmico existente no molde e metal durante o processo de solidificação que ocorre após o vazamento.

### **5.1– ERROS EXISTENTES NOS GRÁFICOS**

É observado nos gráficos obtidos pelo programa de tempo de desmoldagem a obtenção de curvas com covariância inferior a 0,8, ou seja, as amostras estarem distribuídas não uniformemente numa reta.

#### **Erro na coleta de dados**

Quanto maior for a peça mais imprecisa será a coleta de sua temperatura, pois não é possível no ato da desmoldagem coletar a temperatura devido as enormes caixas, que são estruturas metálicas que suportam a areia do molde. Só é possível obter a temperatura da peça quando estas caixas são retiradas, ou seja, as caixas com molde e a peça metálica são desmoldadas na mesa vibratória e após uma hora, mais ou menos, é retirada a caixa metálica que as envolvem e neste momento é coletada a temperatura de desmoldagem, durante este processo de vibração para a retirada de areia durante uma hora, temos o resfriamento da peça ao ar, o que torna a perda térmica mais eficiente.

É possível observar este erro no Gráfico 6 com covariância 0,3, em que a forma é a carcaça, sendo que estas peças possuem peso superior a 5 toneladas.

Outro erro possível, é a não identificação da forma corretamente durante a desmoldagem, pois a Fundição produz peças de diferentes formas e em grande escala

sendo nem todas podendo se enquadrar nas formas determinadas na Figura 4, a coleta dos dados de uma peça com identificação errada de sua forma pode apresentar erros nos gráficos finais.

### **Diferentes ligas**

Como a fundição trabalha com diferentes ligas metálicas, como: ligas com alto teor de manganês, aço carbono e ferro fundido. Para uma mesma forma temos ligas variadas, estas ligas possuem características térmicas totalmente diferentes. No momento que é gerado o gráfico pelo programa de tempo de desmoldagem é pressuposto uma liga comum entre as peças de mesma forma.

## **5.2– APLICABILIDADE DO PERFIL DE SOLIDIFICAÇÃO**

Para um estudo mais preciso do perfil térmico de solidificação, era preciso coletar em campo as propriedades térmicas características.

Foi assumido que a solidificação ocorre com frente plana para uma substancia pura (Fe), o que não ocorre na prática, pois existem diferentes ligas que durante a solidificação forma se uma zona pastosa característica para cada liga, e suas propriedades muito difícil para ser obtida.

Os gráficos do perfil térmico são apresentados com intuito de esclarecer como ocorre a transferência de calor durante a solidificação e o tempo que este processo se desenvolve.

## 7 – REFERÊNCIAS

- [1] - “Solidificação Fundamentos e Aplicações”, Amauri Garcia, Livro texto Editora Unicamp 2001 (páginas 19 até 24)
- [2] - “Fundição e Serviços”, MAR. 2001 – página 60 – Modelamento matemático aplicado a fundições, Extraído de um texto de um autor do Centro de Fundição da Universidade de Birmingham(Inglaterra), originalmente publicado na revista inglesa Foundry Trade Journal, edição de Outubro de 1996.
- [3] - “Steel Foundry Practice”, P. Bidulya Peace Publishers Moscow, Ed. 1966
- [4] - “Transport Phenomena in Materials Processing”, 1994, D.R. Poirier G.H. Geiger