

CARMELO CARLOMAGNO FILHO

ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE  
LINGOTES DE CHUMBO VISANDO REDUZIR O SEU TEMPO DE SOLIDIFICAÇÃO

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Horácio A. Vielmo

Porto Alegre  
2004



**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Escola de Engenharia**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE LINGOTES DE CHUMBO VISANDO REDUZIR O SEU TEMPO DE SOLIDIFICAÇÃO

CARMELO CARLOMAGNO FILHO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS RE-  
QUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
**ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Flávio J. Lorini  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França  
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello  
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider  
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre  
2004

de modo especial, à todos que me ajudaram na concretização deste sonho, e à minha esposa Leticia e filha Rafaela.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer:

ao meu orientador, *Prof. Dr. Horácio A. Vielmo* que com sua experiência no assunto me aconselhou e auxiliou no embasamento teórico durante a elaboração da pesquisa.

aos meus pais *Carmelo e Erecê*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram os estudos de seus filhos em escolas públicas.

à Sulina de Metais S.A., em particular ao engenheiro *Everton Vargas Andrade*, pela busca contínua das melhorias de sua planta industrial, proporcionando o estudo de problemas e gerando motivação para vencer os desafios que surgem.

Aos amigos *Gabriel Santa Maria, João Maurício e Otto Schwieder* que contribuíram nas horas difíceis, apoiando e auxiliando nos trabalhos acadêmicos.

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:

- Empresa Sulina de Metais SA
- VIDU Manutenção Industrial e Transporte LTDA

Os livros são produtos de primeira necessidade  
*Mario Quintana*

CARLOMAGNO FILHO, C. **Análise Experimental E Numérica Do Comportamento Térmico De Lingotes De Chumbo Visando Reduzir O Seu Tempo De Solidificação**. 2004. 31f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

## **RESUMO**

O presente trabalho apresenta uma análise do comportamento térmico de um lingote de chumbo durante a sua solidificação a partir de duas histórias térmicas: uma pela convecção natural do ar e radiação com o meio, e outro pela convecção forçada da água. Nas duas histórias térmicas são obtidas as curvas de temperatura ao longo do tempo tanto nos ensaios experimentais como na simulação numérica. Este perfil mostrou-se simétrico no lingote em uma pré-análise. O método de incorporar o calor latente de fusão ao calor específico do sólido, para as simulações numéricas, não mostra o comportamento do perfil de temperatura com patamar de troca de fase em relação ao perfil experimental, mas o balanço de energia é satisfeito em grande parte da simulação. Analisando os resultados, experimentais e numéricos, foi possível obter o tempo de solidificação do metal durante o seu resfriamento, e confirmar a intuição de que o resfriamento por água traz vantagens na transferência de calor metal-molde. Desta forma será possível conceber projetos para melhorar e baratear o processo de vazamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resfriamento, Solidificação, Lingote de Chumbo, Numérico-experimental, Sistemas trocadores de calor, Calor Latente.

CARLOMAGNO FILHO, C. **Análise Experimental e Numérica Do Comportamento Térmico De Lingotes De Chumbo Visando Reduzir o seu Tempo De Solidificação.** 2004. 31f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

## **ABSTRACT**

The present work presents an analysis of the thermal behavior of a lead ingot during its solidification from two thermal histories: one for radiation the natural convection of air and another one for the forced convection on water. In two thermal histories the fields of temperature along the time in such a way in the experimental measurement are detained as well as in the numerical simulation, this profile revealed symmetrical in the ingot in one daily pay-analyzes. The method to incorporate the latent heat of fusing to the specific heat of the solid for the numerical simulations does not show the behavior of the curve of the profile of temperature in satisfactory way in relation to the experimental profile, but the energy balance is satisfied on a large part of simulation. Analyzing the results experimental and numerical it was possible to obtain the time of solidification of the metal during its cooling, thus being, confirming the intuition of that the water cooling brings advantages in the heat transference metal-mold, to conceive optimized and low-cost projects of such processes.

**KEYWORDS:** Lead cooling, Solidification, Ingot, Numerical experimental, exchanging Systems of heat, Latent Heat.



## LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolo

$T_v$	temperatura de vazamento.....	[°C]
$T_a$	temperatura ambiente.....	[°C]
$T_n$	temperatura norte.....	[°C]
$T_s$	temperatura sul.....	[°C]
$T_e$	temperatura leste.....	[°C]
$T_w$	temperatura oeste.....	[°C]
$h$	coeficiente de transferência de calor por convecção....	[W/m <sup>2</sup> K]
$h_v$	coeficiente da superfície vertical.....	[W/m <sup>2</sup> K]
$h_{hi}$	coeficiente da superfície horizontal inferior.....	[W/m <sup>2</sup> K]
$h_{hs}$	coeficiente da superfície horizontal superior.....	[W/m <sup>2</sup> K]
$h_r$	coeficiente da radiação.....	[W/m <sup>2</sup> K]
$h_1, h_2$	entalpia.....	[kJ/kg]
$m$	massa.....	[kg]
$m'$	vazão mássica.....	[kg/h]
$L$	calor latente de solidificação.....	[J/kg]
$C_p$	calor específico.....	[J/kg K]
$C_{p,L}$	calor específico do líquido.....	[J/kg K]
$C_{p,S}$	calor específico do sólido.....	[J/kg K]
$t$	tempo.....	[s]
$Q$	calor.....	[J]
$Q'$	taxa de calor.....	[W]
$q''$	Fluxo de Calor.....	[W/m <sup>2</sup> ]
$A$	área.....	[m <sup>2</sup> ]
$P$	pressão.....	[kPa]
$k, k_e, k_s, k_l, k_n$	condutividade térmica.....	[W/m <sup>2</sup> ]

## LETRAS GREGAS

$\rho$	massa específica.....	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\Delta T$	gradiente de temperatura.....	[°C]
$\Delta T_L$	gradiente de temperatura da fase líquida.....	[°C]
$\Delta T_S$	gradiente de temperatura da fase sólida.....	[°C]
$\Delta t$	passo de tempo.....	[s]
$\mu$	viscosidade.....	[Ns/m <sup>2</sup> ]

## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 3.1 Esboço do volume de controle para cada condição de convecção. (A) Convecção natural. (B) Convecção forçada.....	14
Fig. 3.2 Modelo da análise térmica. (A) Volume de controle com o mesmo volume do lingote. (B) Simetria no volume, fronteira isolada, hipótese verificada a partir de testes preliminares.....	15
Fig. 3.3 Modelo Físico do Problema.....	15
Fig. 3.4 Posição dos termopares no molde metálico.....	16
Fig. 4.1 Vista geral do aparato experimental para convecção natural.....	18
Fig. 4.2 Vista geral do aparato experimental para convecção forçada. (A) Vista interna do tanque e (B) Vista Frontal do tanque.....	18
Fig. 4.3 Diagrama do sistema resfriador da água.....	19
Fig. 4.4 Malha sobre o domínio de solução (A) condição de contorno. (B) Variação da Malha.....	21
Fig. 4.5 Condições de contorno de 3ª espécie e os volumes de controle para o modelo.....	22
Fig. 5.1 Comportamento experimental das temperaturas nos quatro sensores – resfriamento ao ar.....	23
Fig. 5.2 Comportamento experimental das temperaturas nos quatro sensores – resfriamento à água .....	23
Fig. 5.3 Comparação das temperaturas no sensor norte na primeira hora – resfriamento ao ar .....	24
Fig. 5.4 Comparação das temperaturas no sensor norte – resfriamento ao ar.....	24
Fig. 5.5 Comparação dos valores experimentais com o numérico no final do processo.....	25
Fig. 5.6 Comparação dos valores experimentais com o numérico no final do processo.....	25
Fig. 5.7 Comportamento da temperatura da água sem refrigeração no tanque.....	26

## SUMÁRIO

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>8</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>12</b>
<b>3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Hipóteses Para Modelagem .....</b>	<b>13</b>
<b>4. METODOLOGIA DE ANÁLISE .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1 Modelo Experimental .....</b>	<b>17</b>
<b>4.2.1 Descrição Do Sistema De Montagem .....</b>	<b>18</b>
<b>4.2 Modelo Numérico .....</b>	<b>19</b>
<b>5. RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>21</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>26</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>26</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....</b>	<b>27</b>
<b>APÊNDICE A - PROJETO TÉCNICO DO MOLDE METÁLICO E DO LINGOTE DE CHUMBO PURO .....</b>	<b>28</b>
<b>APÊNDICE B - PROJETO TÉCNICO DO TANQUE METÁLICO .....</b>	<b>29</b>
<b>APÊNDICE C - TABELA DE COMPARAÇÃO DOS VALORES DE TEMPERATURA PARA OS TERMOPARES DO TIPO K. ....</b>	<b>30</b>
<b>ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO E MANUTENÇÃO DO INDICADOR DE TEMPERATURA DA MARCA MINIPA .....</b>	<b>31</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade atual em se reciclar cada vez mais os metais não ferrosos na forma de lingotes para produção de acumuladores elétricos no setor terciário faz com que chumbo puro seja o material vital na produção de baterias. Existem os mais diversos tipos e tamanhos de lingotes, cada qual atendendo ao pedido do fabricante de baterias. Isto impõe desafios à indústria metalúrgica, onde os esforços aplicados em otimizar os processos de vazamento e solidificação de chumbo na forma de lingotes são constantes, para satisfação dos clientes.

No presente trabalho deve-se desenvolver uma metodologia experimental e numérica para avaliação da transferência de calor, do tempo de troca de fase e do tempo de resfriamento, desde a temperatura de vazamento,  $T_v$ , até a temperatura ambiente,  $T_a$ , de um lingote de chumbo puro com uma massa de 900kg em uma indústria recicladora de metais de Cachoeirinha (Sulina de Metais SA). Para o resfriamento do lingote são propostas duas histórias térmicas convectivas diferentes, isto é, primeiramente o modo de transferência de calor por convecção utilizará o ar e depois a água como refrigeração de um lingote.

Há motivação suficiente para um estudo na diminuição do tempo de solidificação, bem como o levantamento de uma curva de temperatura para o lingote e para a água de resfriamento, pois o projeto de uma futura automatização de refrigeração necessita de um estudo do comportamento térmico do lingote.

Para este caso foram feitas idealizações sobre o estado da massa contida no interior do sistema. Estas idealizações tornam a análise transiente tratável.

Vários pesquisadores têm desenvolvido métodos analíticos e modelos numéricos unidirecionais, que no caso do estudo proposto não poderão ser aplicados, gerando a necessidade da experimentação.

No presente trabalho tem-se o objetivo de desenvolver um aparato experimental, capaz de permitir o esboço da temperatura no tempo e a visualização dos fenômenos do processo de solidificação durante os dois tipos de resfriamento a que serão submetidos os lingotes de chumbo puro, verificando qual o melhor processo de resfriamento. É proposto também validar um modelo numérico bidirecional por um software livre da área de transferência de calor, e por fim comparar os resultados obtidos, para que futuramente possam ser usados no projeto de automatização do processo de vazamento deste tipo de lingote.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos últimos anos, as considerações sobre a economia de energia e de materiais estimularam o desenvolvimento de esforços visando à produção de equipamentos de troca térmica mais eficiente mediante a ampliação da área de transferência de calor.

No Brasil o problema da solidificação vem sendo abordado sob o ponto de vista da sua aplicação no processo de fabricação por fundição [Müller, 1994], experimental [Zaro, 1992], e simulação computacional [Garcia e Prates, 1978; Vielmo, 1993; Braga, 1993; Awruch e Reitz, 1993; Vielmo e Prata, 1994; Awruch e Reitz, 1994; Milón e Braga, 2000; Souza, S. I. S., Vielmo, 2000; Jesus, Ismail, K. A. R., 2000; Rodrigues, 2001].

Os problemas de transferência de calor com mudança de fase, em particular a solidificação, caracteriza-se por possuir uma fronteira livre que se desloca com o passar do tempo. As primeiras soluções deste tipo de problema remontam ao século XIX (Lamé e Clapeyron, 1831; Neumann, 1860; Stefan, 1889). Nestes primeiros equacionamentos do problema era resolvida somente a equação da difusão de calor, em forma transiente em uma dimensão. As necessidades no campo metalúrgico, armazenamento de calor com mudança de fase e outras exigiram a solução de problemas mais complexos, especialmente no caso da solidificação de

metais, onde além da condução de calor tem-se difusão de massa, dando origem a complexos padrões de convecção natural. Em 1977 Patankar, Sparrow e Ramadhyani, obtiveram a primeira solução de uma formulação incorporando o movimento da fase líquida.

Stefan (1891), sugere um dos primeiros modelos para a transferência de calor na fusão e solidificação. Sua principal hipótese simplificativa foi considerar que todo o domínio já estivesse na temperatura de mudança de fase. Este modelamento ficou conhecido como Problema de Stefan.

Schwarz (1931), ambientou o Problema de Stefan na presença de moldes.

Garcia e Prates (1978), desenvolveram um modelo de lingotes com resistência interfacial metal-molde, com validação experimental em lingotes de chumbo.

Müller (2002), descreve em trabalho não publicado que na falta de condições de contorno estáveis, as soluções analíticas são sempre simplificativas, e portanto aproximadas, como é o caso do modelo de fluxo estacionário.

Veinik (1968), estabelece o critério de Veinik, que relaciona o intervalo de solidificação e a queda de temperatura provocada por um choque térmico a ela imposto. Se a relação for menor que um o crescimento de grão é progressivo (exógeno), se origina da periferia e cresce para o centro. Ao contrário na extensiva (endógena), onde dispersa-se em toda a massa líquida.

Vielmo e Prata (1992), apresentam uma formulação para a solidificação de ligas metálicas, acoplando os problemas térmico e mássico através de uma formulação em entalpia, e não equilíbrio termodinâmico na interface.

Maliska (1996), descreve que as dificuldades para desenvolver métodos gerais para a solução de problemas definidos em geometrias complexas, sendo rigorosamente todos os problemas de interesse prático tridimensionais, e os efeitos difusivos são problemas elípticos.

### 3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

#### 3.1 HIPÓTESES PARA MODELAGEM

O processo de solidificação de metais, é um processo que ocorre em regime transiente. A transferência de energia na forma de calor através da fronteira de um volume de controle para um lingote dar-se-á durante três estágios: a perda de energia na forma de calor sensível, isto é, resfriamento do metal líquido superaquecido até a temperatura de solidificação; a perda de energia na forma de calor latente, e por fim a perda de energia na forma sensível desde a temperatura de troca de fase até a temperatura de equilíbrio com a do ambiente, que é estipulado à  $T_a$  no valor de 25°C.

Nos apêndices A e B são mostradas as dimensões de cada um dos recipientes (molde e tanque) e do lingote de chumbo.

Pode-se perceber experimentalmente que para a temperatura do lingote de chumbo puro atinja seu valor limite de 25°C é em média de 12h e 38min, onde apenas a convecção natural é o modo de transferência de calor mais significativa durante todo o processo de resfriamento e solidificação.

O calor total perdido pelo lingote de chumbo será transferido do metal através das paredes do molde<sup>1</sup> para o fluido refrigerante por meio das transferências por convecção, condução e radiação. Porém não é considerada a transferência de calor por condução no escopo deste trabalho, pois o gradiente de temperatura entre as superfícies do molde é muito pequeno, as painéis de refino não são modeladas. Visando apenas o interesse no modo de transferência de calor por convecção (difusão e movimento global do fluido), despreza-se o modo de transfe-

<sup>1</sup> Significa ser considerado ideal na condução de calor.

rência de calor por condução na interface de contato do fluido com a superfície metal-molde.

O material de mudança de fase, na sua condição inicial, está em uma temperatura acima da temperatura de mudança de fase, pois o material vazado geralmente está superaquecido, para garantir um vazamento seguro no molde.

O metal irá iniciar sua solidificação na interface metal-molde, isto é, o material irá se solidificar no sentido da superfície da interface metal-molde ao centro do lingote. As análises térmicas concentram-se no contato entre um fluido (ar ou água) em movimento nas superfícies metal-molde, quando os dois se encontram a temperaturas diferentes.

As propriedades termofísicas do ar, água e chumbo serão considerados constantes ( $\rho$ ,  $c_p$ ,  $h$ ,  $L$ ,  $m$ ).

Na figura 3.1.a mostra-se o volume de controle adotado para um sistema resfriado por convecção natural e radiação combinadas, onde o fluido refrigerante é o ar. Na figura 3.1.b é esboçado o volume de controle adotado para um outro sistema resfriado por convecção forçada onde o fluido refrigerante é a água. Os dois tipos de transferência de calor irão resfriar o mesmo tipo de lingote de chumbo puro até a temperatura ambiente em tempos diferentes.

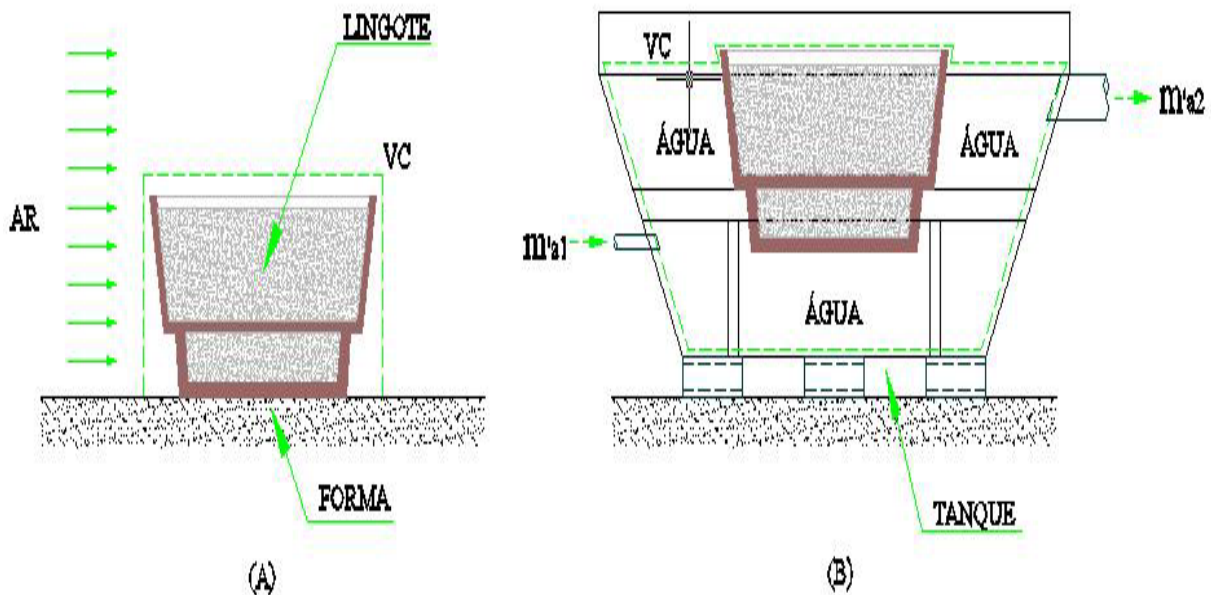


Fig. 3.1 Esboço do volume de controle para cada condição de contorno.  
(A) Convecção natural e radiação. (B) Convecção forçada.

Haverá para os dois tipos de resfriamento a mesma simplificação de geometria do lingote, isto é, a geometria similar a tronco de pirâmide será transformada em uma geometria retangular, sempre respeitando o mesmo volume do lingote. Esta geometria será a adotada na simulação computacional do problema. O volume de controle mostrado na figura 3.1a e 3.1b podem ser ainda reduzidos, pois a linha de simetria que divide o volume de controle ao meio será considerada. Esta simplificação do volume de controle pode ser vista na Figura 3.2a e 3.2b.

Na figura 3.3 é apresentado o modelo físico adotado neste trabalho, assim sendo, para cada modo de transferência de calor haverá um fluido numa certa temperatura recebendo calor a taxas diferentes do lingote de chumbo. As taxas de energia estão associadas aos coeficientes de transferência de calor. Para cada uma das superfícies do volume de controle são adotados coeficientes combinados ou não, isto é, O valor do coeficiente para a superfície horizontal superior é diferente do calculado para a superfície horizontal inferior, sendo estes dois mencionados diferentes do valor do coeficiente de transferência por convecção para a superfície vertical.

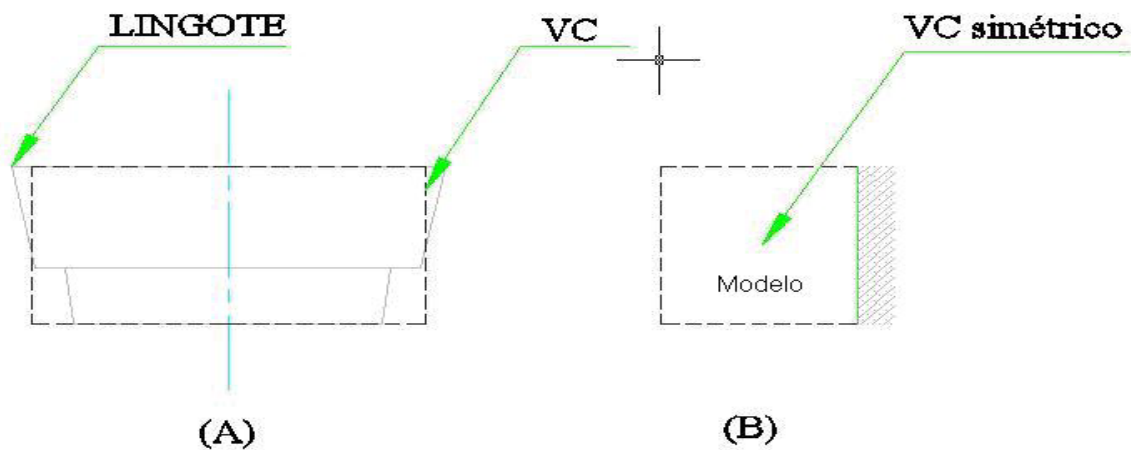


Fig. 3.2 Modelos para análise térmica. (A) Volume de controle com o mesmo volume do lingote. (B) Simetria no volume de controle, fronteira isolada.

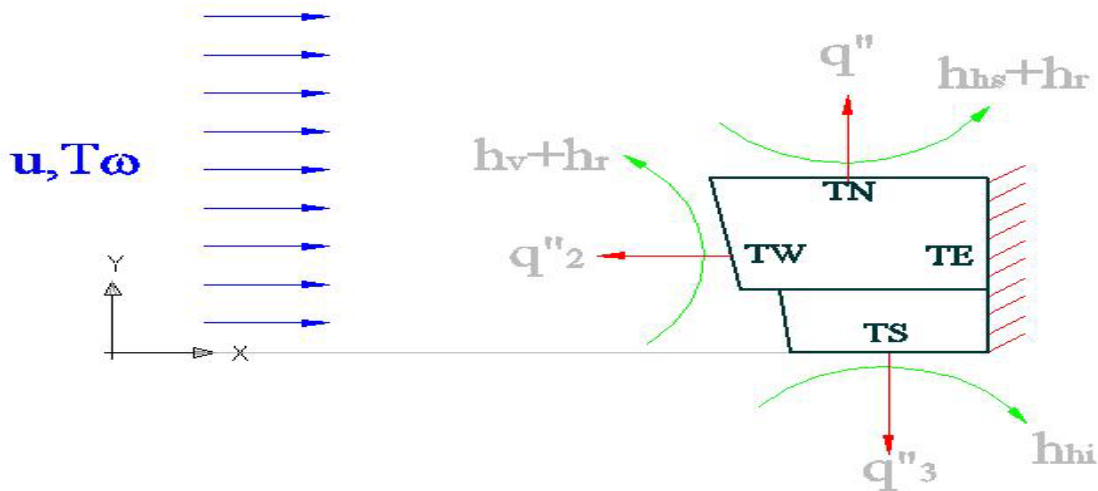


Fig. 3.3 Modelo Físico do Problema

Tendo em vista o volume de controle proposto e o modelo físico do problema, o conhecimento dos coeficientes do fluido dar-se-ão pela aplicação das correlações de convecção livre e forçada para placas planas (INCROPERA e DeWITT, 1998). A radiação não é modelada separadamente, e sim acrescentada, ao coeficiente combinado  $h$ , ajustando-se os valores conforme resultados empíricos. O conhecimento da temperatura em certo ponto do lingote será feita por termopares do tipo K (Cromel – Alumel) classe dois, minerais, bitola 8 AWG com limites de erros  $2,2^\circ\text{C}$  ou  $0,75\%$ , num total de quatro, conforme mostra a figura 3.4. Para indicar a temperatura lida pelo termopar serão utilizados instrumentos das marcas Novus, Icil e Minipa.

Conseguir eliminar ou atenuar as mais diversas perturbações causadas por fontes de calor externas ao modelo experimental foi mais um desafio no presente trabalho. Na figura 3.4 estão mostradas as posições destes termopares.

Pode-se integrar o fluxo térmico local  $q''$  ao longo de toda a superfície resultando na taxa total de transferência de calor.

Uma vez que se necessita determinar o tempo total de solidificação  $t_f$  do lingote, e o tempo total do processo de resfriamento,  $t$ , pode-se aplicar a primeira lei da termodinâmica em um intervalo de tempo  $\Delta t = t_f$ .

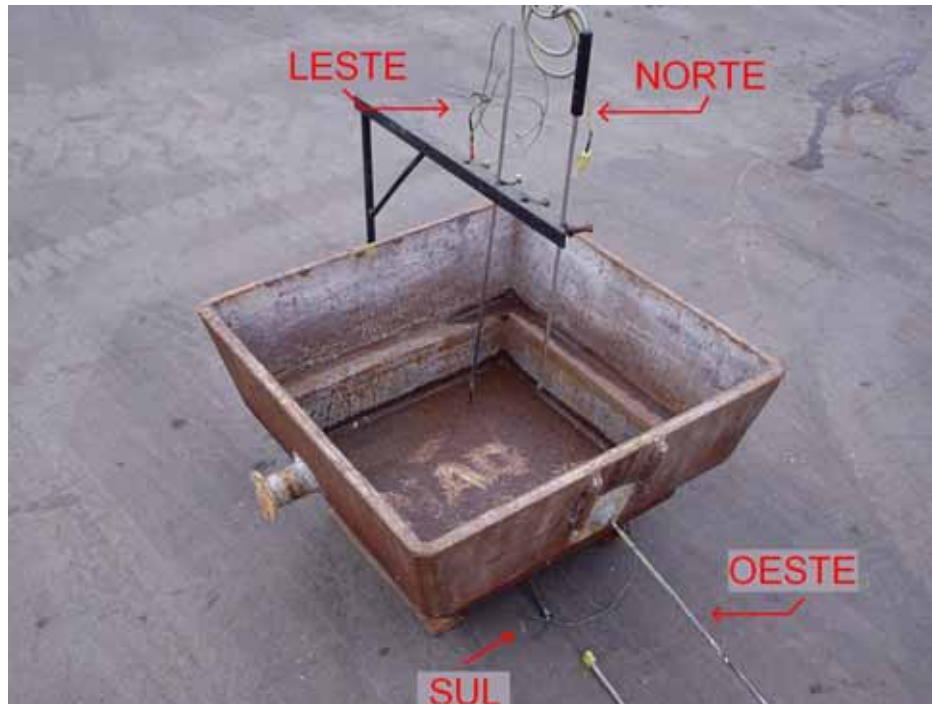


Fig.3.4 Posição dos termopares no molde metálico.

Assumindo-se que a transferência de calor através do material ocorra por difusão pura, a maior parcela de energia a ser retirada é aquela em forma latente, pois o metal tem uma densidade elevada, na faixa dos 11300 kg/m<sup>3</sup> e um calor de solidificação na faixa dos 24100 J/kg. A taxa de calor removida será maior usando um fluido refrigerante com melhores propriedades térmicas, isto é, que troque uma quantidade maior calor na interface metal-molde.

Por tratar-se de uma substância pura com um valor mínimo de 99,97% de chumbo, e um máximo de 99,99%, apenas o problema térmico está presente.

A seguir as propriedades termofísicas adotadas no presente trabalho.

Tabela 3.1 – Propriedades Termofísicas dos fluidos

300K					
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kgK))	$\mu \cdot 10^{-6}$ (Ns/m <sup>2</sup> )	$k$ ( W/mK)	Pr
Ar	1,1614	1,007	184,6	0,0263	0,707
Água	997	4,179	855	0,613	5,83

Fonte: INCROPERA e DEWITT (1998)

Tabela 3.2 – Propriedades Termofísicas dos sólidos metálicos

300K					
	Pto de fusão (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kgK))	$k$ ( W/mK)	$L_f$ (kJ/kg)
Chumbo	327,5	11300	0,129	33	24100
Aço 1020		7870	0,486	51,9	

Fonte: MÜLLER(2002)

Fonte: MATWEB, MATERIAL PROPERTY DATA (2004)

O gap de ar que se forma entre peça e molde é uma resistência térmica adicional, mas aqui neste trabalho é desprezado, como muitas vezes é feita em trabalhos práticos, já que sua formulação é complexa.



## 4. METODOLOGIA DE ANÁLISE

### 4.1 MODELO EXPERIMENTAL

Durante anos tem se concebido e utilizado a experimentação para buscar o entendimento dos processos de solidificação, e também para avaliar teorias. As altas temperaturas e a opacidade dos metais dificultam muito os experimentos em laboratório, aumentando assim os erros no estudo da solidificação. Como exemplo de técnicas para fixação dos termopares em solidificadores cita-se os trabalhos de GARCIA e PRATES, 1978; CLYNE, 1982 e MÜLLER, 2002, onde pode ser notado o esquema mais adequado de montagem dos registradores de temperatura. Os ensaios experimentais são desenvolvidos em seções de testes, com recipientes metálicos, por serem bons condutores de calor e fáceis de trabalhar.

Um esquema para o aparato experimental para o resfriamento por convecção natural com todos os instrumentos e equipamentos para o registro das propriedades intensivas macroscópicas como temperatura e pressão é mostrado na figura 4.1. Os referidos ensaios são montados na própria área industrial. Para as duas histórias térmicas de análise são usados os seguintes equipamentos:

- Um molde de aço 1020 (ver Apêndice A e B).
- Quatro sensores de temperatura posicionados nas posições médias de cada superfície de análise.
- Quatro termômetros digitais, sendo que dois aparecem na figura 4.1, estes tem certificados de calibração (ver anexo A).
- Um anemômetro.
- Um barômetro e um higrômetro.



Fig. 4.1 Detalhe do aparato experimental da análise térmica resfriada naturalmente.

O chumbo no estado líquido está inicialmente numa panela de refino, à temperatura de 400°C, que é mantida por meio de um sistema automatizado que controla a potência do queimador. Para dar início ao vazamento esta condição deve ser respeitada, pois o chumbo solidifica-se rapidamente nas tubulações de vazamento, necessitando estar superaquecido. Por meio de uma bomba centrífuga que trabalha na vazão de meio litro por segundo, o chumbo é conduzido até o molde por meio de um duto. A temperatura média com que o chumbo chega na forma é de 350°C.

Os ensaios iniciaram com o preenchimento completo da forma pelo metal em estado líquido, tomando-se o cuidado de respeitar sempre o mesmo volume e o tempo de enchimento,

e também o posicionamento da forma na mesma área de vazamento na empresa. O tempo total de enchimento é em média de 2 minutos e 30 segundos, a partir deste tempo iniciam-se os registros das temperaturas nos quatro sensores. Esta rotina foi realizada cinco vezes com o objetivo de diminuir os eventuais erros de operação e conferir a repetição dos resultados, assim sendo, os três melhores ensaios servirão como base de dados para as conclusões do estudo.

Nota-se que existe uma pequena variação entre os valores dos três ensaios. A maior destas diferenças se deu no termopar norte, por ser mais sensíveis às variações do volume de chumbo durante os enchimentos, pois os demais sensores têm suas posições fixas no molde.

São mostrados na figura 4.2 os detalhes do tanque para recircular a água em torno do molde que receberá o metal líquido superaquecido.

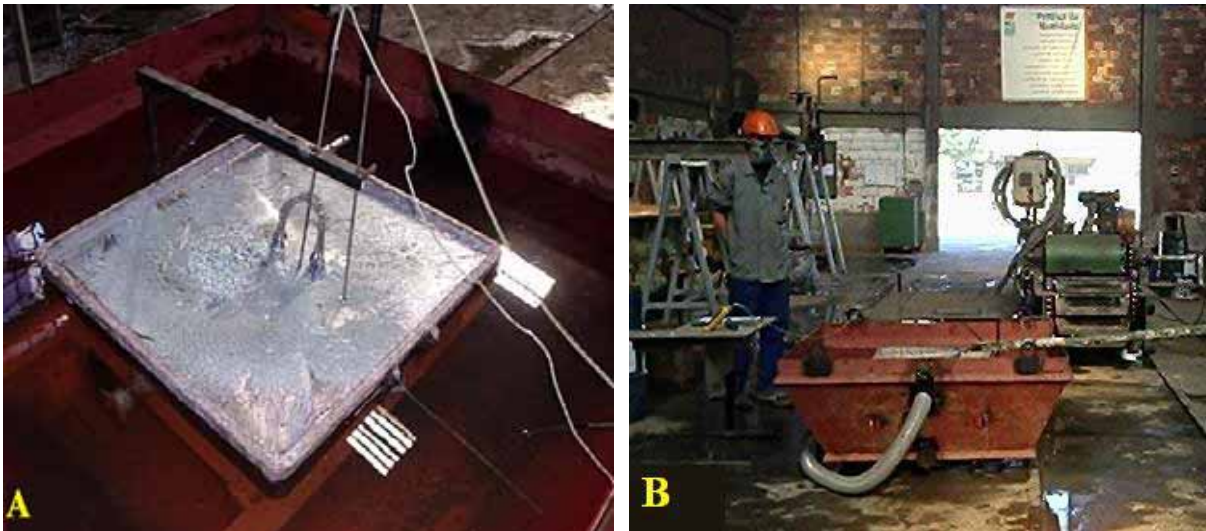


Fig. 4.2 Aparato experimental. (A) Vista interna do tanque (B) Vista Frontal do tanque.

O fluido de refrigeração usado é a água de poço artesiano, e será considerada com propriedades constantes ao longo de todo o processo de resfriamento do lingote. Será utilizado um volume em média de 430L.

#### 4.2.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MONTAGEM

Um tanque, que contém 420 kg de água líquida inicialmente a temperatura ambiente, possui uma entrada e uma saída que apresentam um escoamento com a mesma vazão volumétrica. Água é admitida no tanque a  $T_a$  e uma vazão volumétrica de 4320 kg/h, é bem misturada de tal modo que a temperatura é uniforme no interior do tanque. As pressões de entrada e saída são iguais, e os efeitos de energia cinética e potencial podem ser ignorados.

O fluido é proveniente de um sistema que contém um reservatório com capacidade para 500 litros existente na planta da fábrica, uma torre de resfriamento da marca Hidro Term modelo HT16, duas bombas centrífugas da marca WEG do tipo 1CV - IP55 - 380V e tubulações de pvc. Estes equipamentos e seus componentes podem ser vistos com detalhes no sistema resfriado por água na figura 4.3. A fim de homogeneizar a água de retorno do tanque usa-se o reservatório, que pode ser visto como o número 7 na figura 4.3. A vazão de saída do reservatório é maior do que a de entrada, assim sendo, o nível do reservatório é completado com água fria vinda diretamente da cisterna do poço.

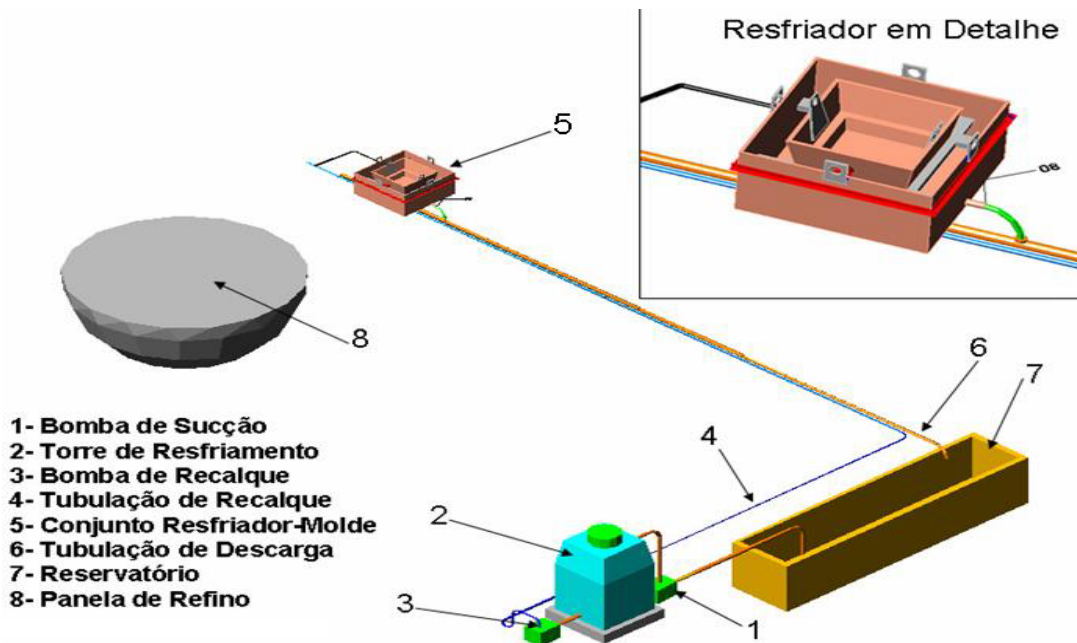


Fig. 4.3 Sistema resfriador da água para os experimentos convectivos forçados.

## 4.2 MODELO NUMÉRICO

O software livre escolhido para a análise numérica é o TRANSCAL V1.1, que emprega o Método dos Volumes Finitos, e foi desenvolvido pelo SINMEC / UFSC. Este software resolve apenas domínios em difusão pura, em fase única, não estando portanto apto a abordar diretamente problemas de fusão-solidificação. Para contornar este problema é proposta neste trabalho a inclusão de uma quantidade de calor adicional ao  $c_p$  do chumbo, de modo a considerar o calor latente de solidificação. Desta forma o balanço global de energia é satisfeito.

Além desta, seguem-se as seguintes hipóteses:

O processo é bidimensional e transiente.

As propriedades termofísicas do chumbo são consideradas constantes, independentes da fase em que se encontra o metal.

Os coeficientes de transferência de calor  $h$  são calculados a partir de correlações empíricas extraídas da literatura (Incropera e De Witt, 1995) para o caso de convecção natural combinada com radiação, e convecção forçada.

Nos esquemas numéricos as equações diferenciais são aproximadas por equações algébricas, a partir da discretização do domínio de cálculo, conforme o Método dos Volumes finitos (Maliska, 1995).

O passo de tempo utilizado durante toda a solução é o mesmo do caso das análises experimentais, a cada intervalo de 30 segundos, isto é, facilitando a leitura das temperaturas e a posterior comparação dos resultados experimentais com os numéricos.

Referente ao método numérico é importante observar que não há necessidade de se rastrear a frente de mudança de fase, pois não é do interesse deste trabalho descobrir onde se encontra ao passar do tempo a frente de solidificação do metal. O objetivo é saber que naquele ponto de análise o domínio de cálculo inteiro trocou de fase, simplificando o modelo e resolvendo o problema da transferência de calor.

A figura 4.4 mostra a malha utilizada, com as mesmas dimensões cartesianas ao longo de todo o domínio da malha.  $\delta x_e$ ,  $\delta x_w$ ,  $\delta y_n$ ,  $\delta y_s$  são as distâncias entre os centros dos volumes de controle vizinhos, posicionados em “E” (leste), “W” (oeste), “N” (norte) e “S” (sul). A condutividade térmica é representada pelas letras  $k_e$ ,  $k_w$ ,  $k_n$  e  $k_s$ .

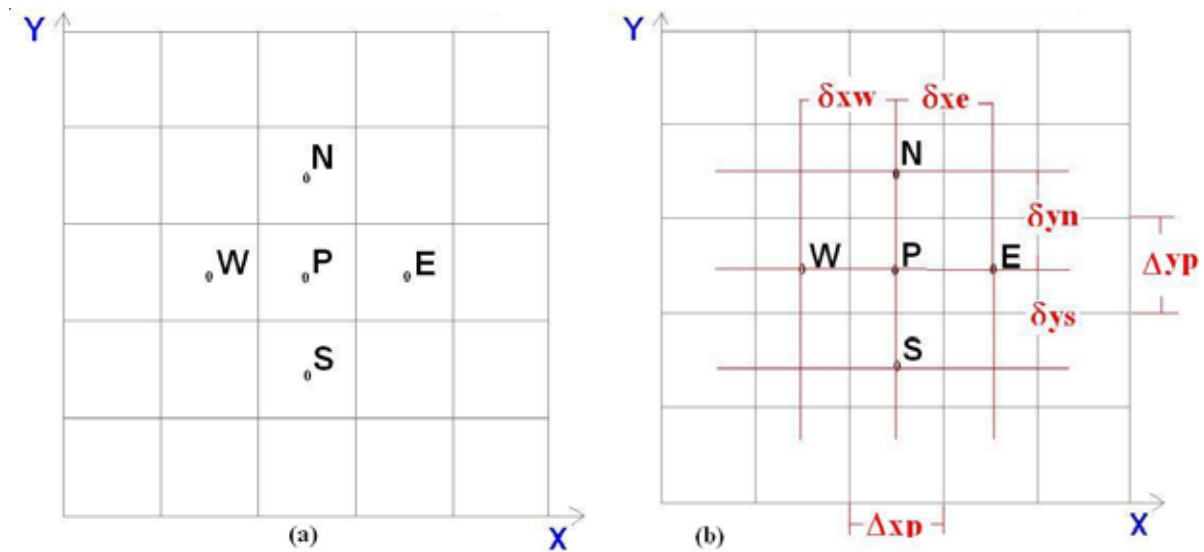


Fig. 4.4 Malha sobre o domínio da solução

A equação da difusão de calor em duas dimensões, sem fonte e coeficientes variáveis é:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q^{\circ} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

O termo fonte  $q^{\circ}$  é nulo.

Integrando sobre o volume de controle no seu interior obtém-se:

$$b = a_p^{\circ} T_p^{\circ}$$

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (2)$$

Os coeficientes da equação anterior são os seguintes:

$$a_E = \frac{k_e \Delta y_P}{\delta x_e} \quad a_W = \frac{k_w \Delta y_P}{\delta x_w} \quad a_N = \frac{k_n \Delta x_P}{\delta y_n}$$

$$a_S = \frac{k_s \Delta x_P}{\delta y_s} \quad a_p^{\circ} = \frac{\rho c_p \Delta x_P \Delta y_P}{\Delta t}$$

O coeficiente  $a_p$ , é dado por:

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_p^{\circ} \quad (3)$$

A eq. (2) forma o sistema de equações algébricas a ser resolvido.

A malha é uniforme, contendo 400 volumes de controle, e foi escolhida para combinar com a dimensão do modelo simétrico, e também gerar resultados não dependentes do seu número de volumes. Ela é mostrada na figura 4.5. Os volumes de controle tem dimensões de 14 mm de largura por 14,2mm de altura.

A figura 4.5 mostra as condições de controle na fronteira dos volumes de controle.

Os valores dos coeficientes para as condições de contorno será o fluxo prescrito de 3ª espécie via coeficiente de troca de calor  $h$  e temperatura do meio. O escoamento de ar sobre o

lingote foi medido com anemômetro, o qual marcou em média um metro por segundos, aplicando as correlações (INCROPERA & DeWitt, 1998), os valores dos coeficientes de troca são:.

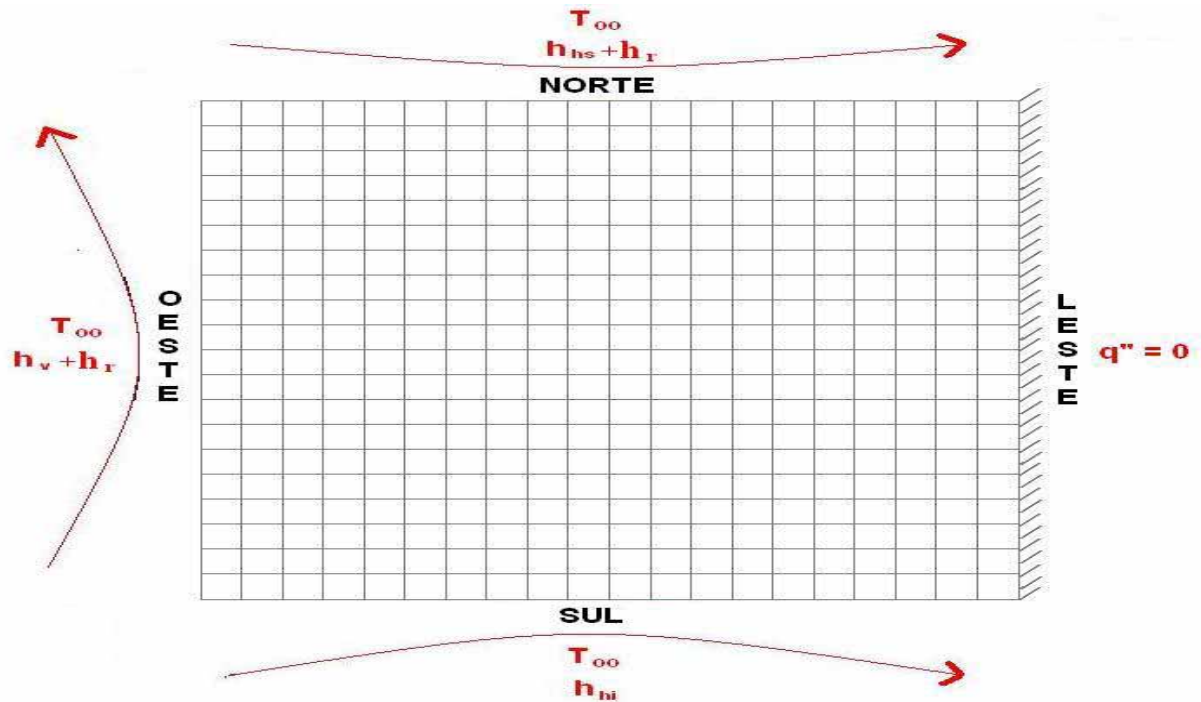


Fig. 4.5 Condições de contorno de 3ª espécie e os volumes de controle para o modelo resfriado por ar.

Fluxo prescrito de 2ª espécie é nulo ( $q'' = 0$ ) ao longo da linha de simetria.

As propriedades termofísicas como calor específico, condutividade, calor latente de fusão e densidade são retirados da tabela 3.1 e 3.2. Os valores foram calculados para aplicação na simulação numérica, resfriamento ao ar e arbitrados conforme literatura para o resfriamento à água, todos os valores foram ajustados conforme resultados empíricos. O chute inicial foi:

$$h_v = 8,5 \text{ W/m}^2\text{K}, h_{hs} = 6,1 \text{ W/m}^2\text{K}, h_{hi} = 5 \text{ W/m}^2\text{K}, h_r = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T = 350 - 25 = 325^{\circ}\text{C}$$

$$c_{ps} = 129 \text{ kJ / kg K}$$

$$c_p = 129 + 24100/325 = 203 \text{ kJ/kgK (parcela sensível + latente adicionada artificialmente)}$$

$$L = 24100 \text{ kJ / kg}$$

$$\rho = 11300 \text{ kg / m}^3$$

$$k = 53 \text{ W / m K}$$

Chega-se a valores finais dos coeficientes de transferência de calor que são os seguintes:

$$\text{Convecção natural - } h_v = 14 \text{ W/m}^2\text{K}, h_{hs} = 12 \text{ W/m}^2\text{K}, h_{hi} = 5 \text{ W/m}^2\text{K}, h_r = 11 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{Convecção forçada - } h_v = 669 \text{ W/m}^2\text{K}, h_{hs} = 6,1 \text{ W/m}^2\text{K}, h_{hi} = 100 \text{ W/m}^2\text{K}, h_r = 11 \text{ W/m}^2\text{K}$$

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

Nos procedimentos experimentais descrito anteriormente na seção 4.1, os resultados se repetiram em todos os quatro sensores com maior variação nas temperaturas para o sensor Norte.

A figura 5.1 mostra as seguintes curvas: As médias dos ensaios experimentais nos quatro sensores desde o tempo inicial do experimento até transcorrer uma hora de resfriamento ao ar. Os coeficientes de transferência de calor por convecção utilizados para cada fronteira do volume de controle são a soma de seus respectivos coeficientes de convecção calculados empiricamente somados a média do coeficiente de radiação, conforme mostrou a figura 4.5. Nota-se na figura 5.1 o patamar de mudança de fase ( $327^{\circ}\text{C}$ ) nos sensores Norte e Leste.

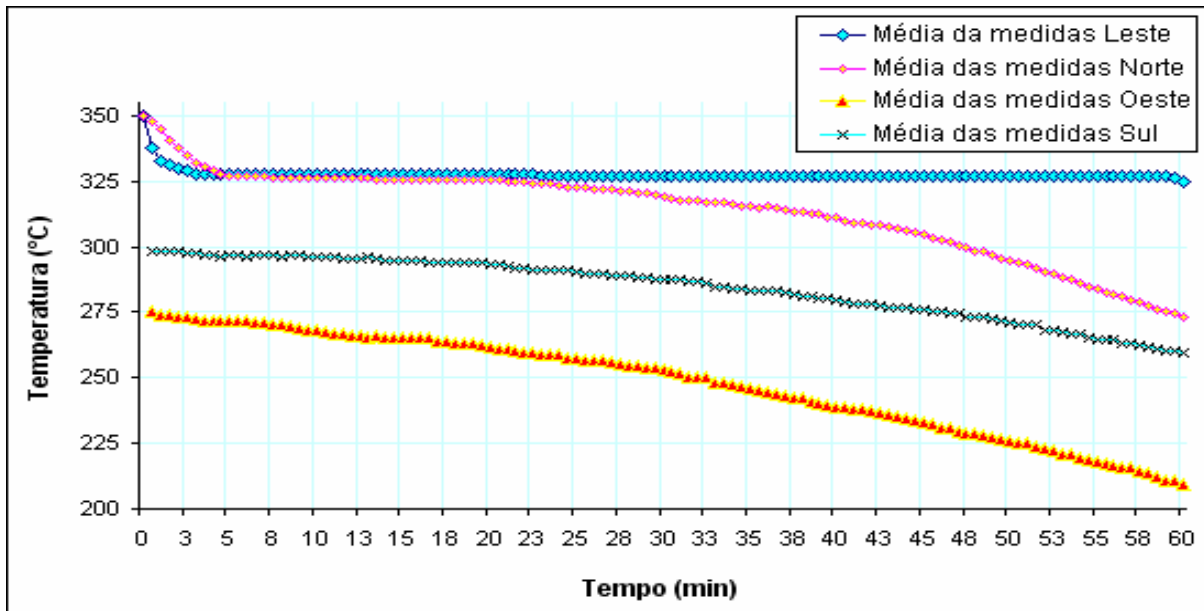


Figura 5.1 Comportamento experimental das temperaturas nos quatro sensores – resfriamento ao ar

A figura 5.2 mostra as seguintes curvas de temperatura: As médias dos ensaios experimentais desde o tempo inicial do experimento até transcorrer uma hora de resfriamento à água. Nota-se que o patamar de mudança de fase dos sensores norte e leste são menores, isto é, estes acontecem em um intervalo menor de tempo quando comparado ao experimento ao ar.

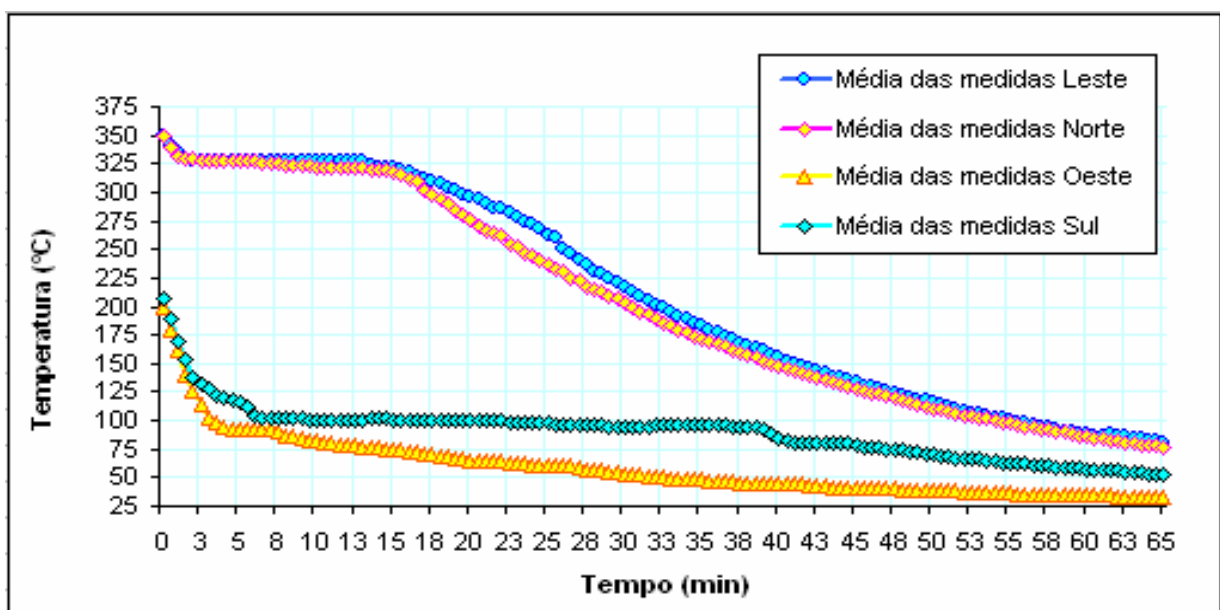


Fig. 5.2 Comportamento experimental das temperaturas nos quatro sensores - resfriamento à água

Do procedimento numérico descrito na seção 4.2 são apresentados agora os resultados obtidos comparados com os resultados experimentais.

A figura 5.3 mostra a comparação entre as curvas da simulação numérica e da média das medidas experimentais para o caso do resfriamento ao ar. A equação da taxa de transferência de calor por radiação, fez com que a taxa de troca térmica fosse proporcional à diferença de temperatura, resultando que,  $hr$ , depende fortemente da temperatura, enquanto que a dependência do coeficiente de transferência de calor por convecção é, em geral, fraca, sendo o coeficiente combinado muito pequeno. Isto explica a pouca curvatura na primeira hora de simulação, não podendo ser considerada como uma curva linear, como pode ser visto na figura 5.4.

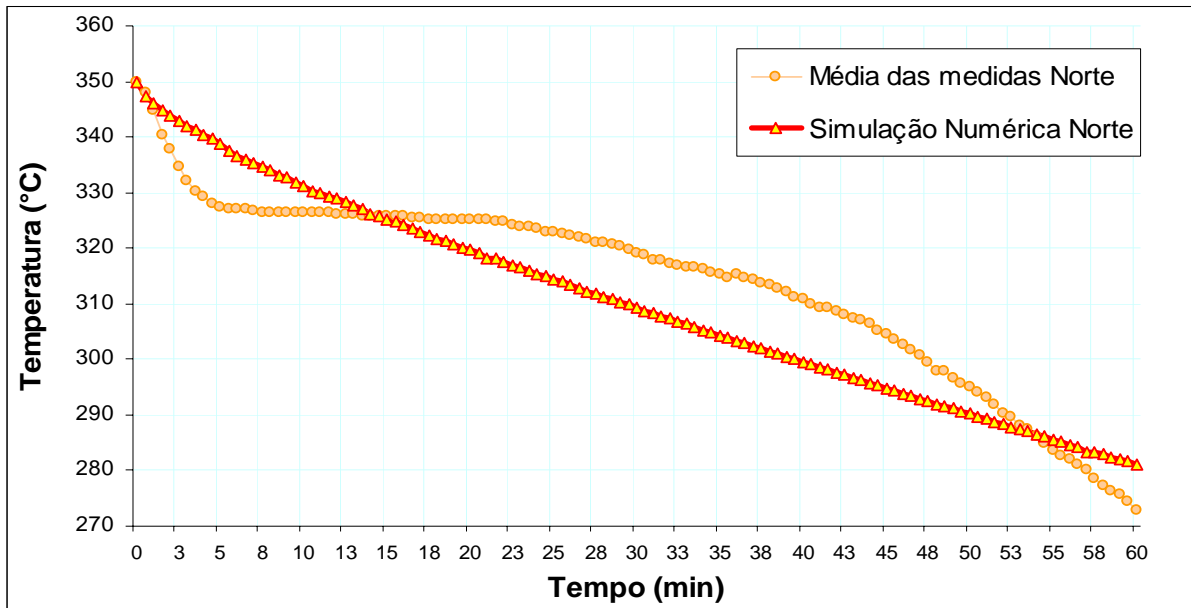


Fig. 5.3 Comparação das temperaturas no sensor norte na primeira hora – resfriamento a ar

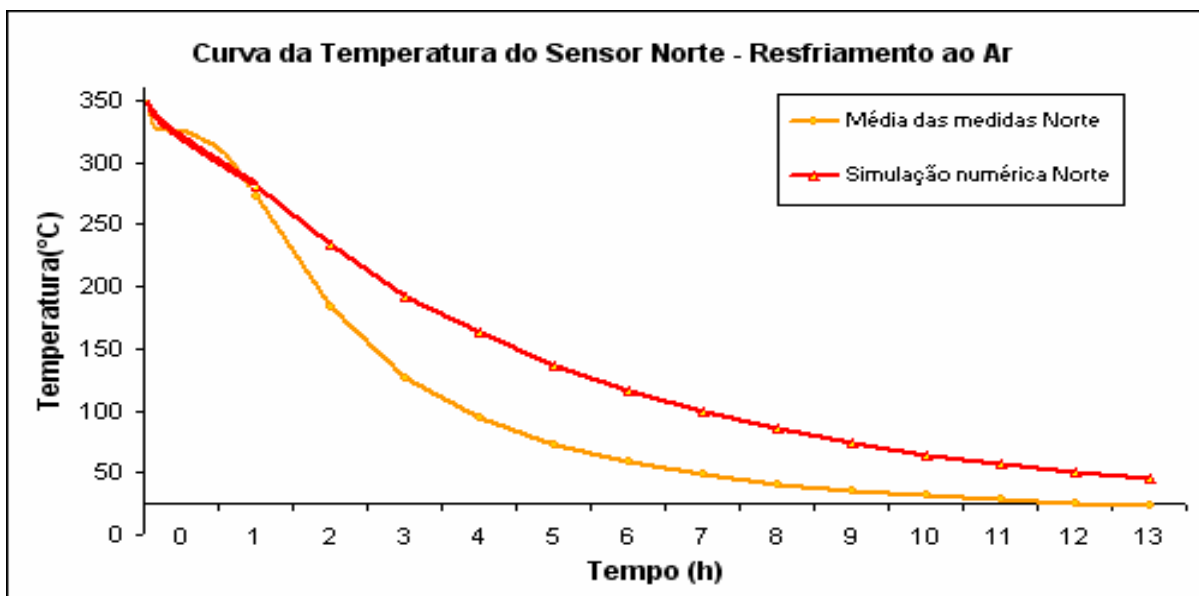


Fig. 5.4 Comparação das temperaturas no sensor norte – resfriamento a ar

A figura 5.5 mostra a comparação entre as curvas da simulação numérica e da média das medidas experimentais para o caso do resfriamento a água. A curva simulada se comporta com uma curvatura maior quando comparada com o resfriamento ao ar, porque os valores dos

coeficientes de transferência de calor por convecção adotados nas fronteiras oeste e sul são muito maiores que os calculados nas curvas mostradas nas figuras 5.3 e 5.4.

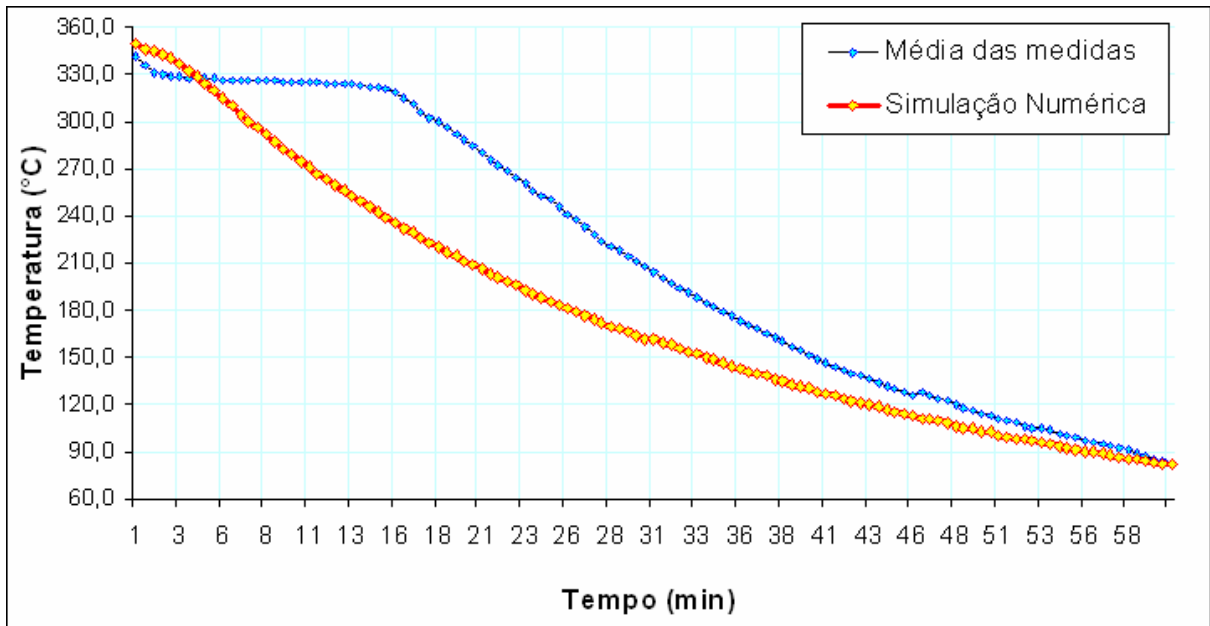


Fig. 5.5 Comparação das temperaturas no sensor norte na primeira hora – resfriamento à água

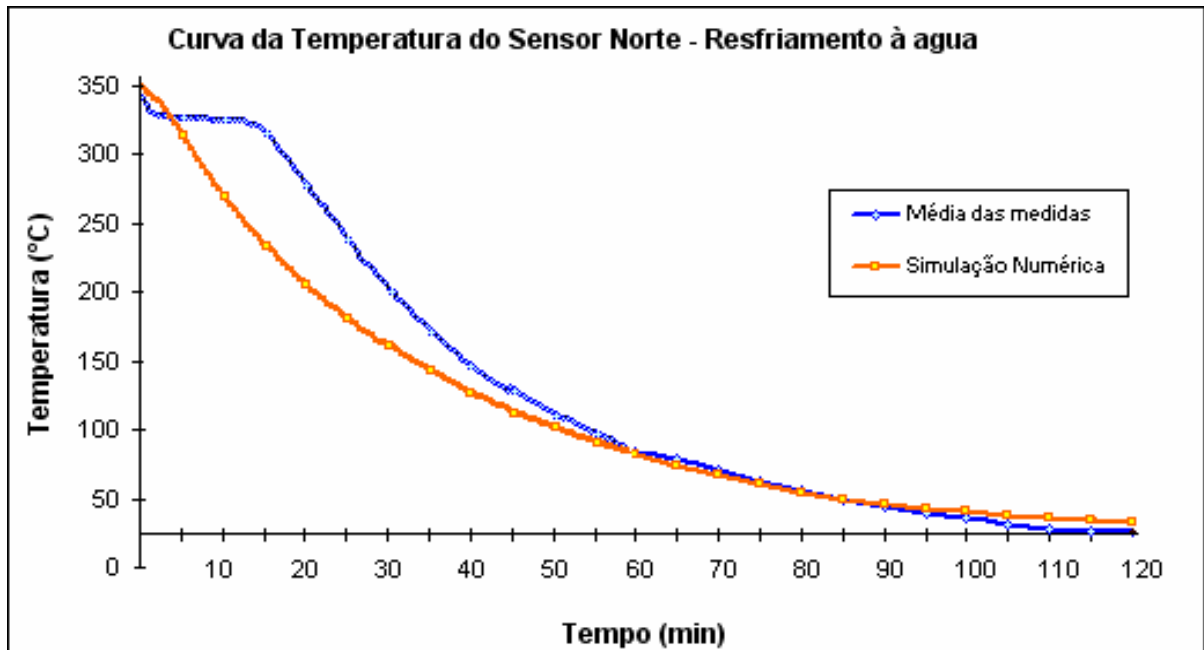


Fig. 5.6 Comparação das temperaturas no sensor norte – resfriamento à água

A fim de avaliar a temperatura da água de refrigeração, pode-se aplicar a primeira lei da termodinâmica. Para o volume de controle mostrado na figura 3.1.b, a única transferência de calor significativa esta associada às perdas de calor sensível dos estados líquido e sólido mais a perda de calor latente do lingote de chumbo. É considerada a temperatura inicial de 400°C para o processo em análise.

Calor de resfriamento sensível do líquido: 400°C até 327,5°C

$$QL = m \cdot c_p \cdot L \cdot \Delta TL = 9.307.500J \quad (6)$$



Calor Latente: 327,5°C

$$QF = m L = 20.400.000J \quad (7)$$

Calor de resfriamento sensível do sólido: 327,5°C até 66°C

$$QS = m c_{p,S} \Delta TS = 30.360.000 J \quad (8)$$

$$Qt = QL + Qf + Qs = 60 MJ \quad (9)$$

Substituindo nas equações as hipóteses, tem-se a solução da equação de balanço como uma equação diferencial ordinária:

$$m_{vc} \cdot C_p \frac{dT}{dt} = Q'_{vc} + W'_{vc} + [ m' \cdot C_p (T - T_i) ] \quad (10)$$

sendo  $Q'_{vc} = 0,83 Q_t$ , isto é,  $Q'_{vc}$  equivale a 5/6 do calor total perdido pelo lingote, sendo o calor perdido da face superior, que esta em contato com o ar, desprezado nos cálculos. Desta forma  $Q'_{vc} = 49,8 MJ/\Delta t$ .

Substituindo os valores numéricos da massa, vazão, calor, temperatura inicial e juntamente com o calor específico  $c_p$  para água tem-se:

$$T = T_i + 2,74 \cdot [1 - \exp(9,8 \cdot t)] \quad (11)$$

A Figura abaixo mostra o comportamento da temperatura da água de refrigeração no tanque quando é feito o seu resfriamento pela torre de refrigeração, inicialmente existe um gradiente de temperatura considerável que é amenizado pela entrada de água resfriada pela torre de resfriamento e pela perda de energia do processo de solidificação. A temperatura experimental foi medida com um termômetro de vidro de imersão parcial, lembrando que a água do tanque deve ser misturada artificialmente para que sua temperatura fique a mais homogênia possível.

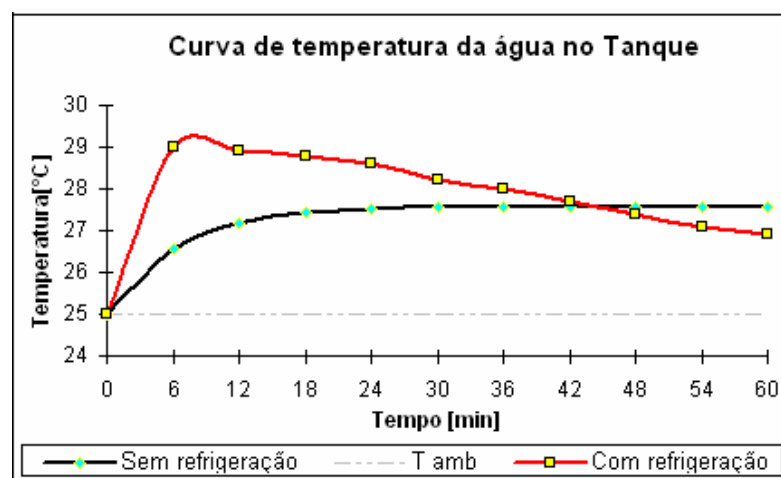


Fig. 5.7 Comportamento da temperatura da água sem resfriamento no tanque.

Da figuras 5.7 conclui-se a necessidade do resfriamento da água de refrigeração, somando-se a isto o fato de que são solidificados vários lingotes em seqüência, o que irá propor-

cionar um aumento na temperatura água do tanque.

## 6. CONCLUSÕES

A análise experimental por termopares oferece de forma simples e barata a avaliação do processo de solidificação do lingote de chumbo puro. Através dela foram avaliados o tempo provável de duração da troca de fase e o tempo total do processo de vazamento e resfriamento do lingote. Nota-se que no resfriamento com ar, o tempo médio de troca de fase no sensor leste é respectivamente de 58 e 30 minutos e o tempo médio desde a temperatura de vazamento até a temperatura ambiente é de 12h e 38 minutos. Já no resfriamento à água estes dois tempos caíram bastante, isto é, o tempo médio de troca de fase no sensor leste é de 13 minutos e o tempo médio total desde a temperatura de vazamento até a temperatura ambiente é de 1h e 55 minutos.

Pela dificuldade em se obter um valor específico para cada coeficiente de transferência de calor por convecção para o resfriamento à água, optou-se por realizar um ajuste fino através de soluções tentativas com o software.

Os resultados das simulações numéricas e experimentais foram comparados, obtendo-se boa concordância entre eles. Porém na análise de resfriamento natural os resultados numéricos até a primeira hora de processo apresentaram desvios significativos. Entretanto se aproximaram da curva experimental nas últimas horas de processo.

Um dos motivos para que ocorra esta diferença entre as curvas pode ser a hipótese de condição de contorno de terceira espécie constante ao longo de toda a simulação, e também a ocorrência da mudança de fase, que na simulação numérica foi tratada de forma simplificada. Os resultados da comparação das curvas da média das medidas e da simulação numérica melhoraram quando o  $\Delta t$  de solidificação experimental foi menor, isto é, enquanto o intervalo de solidificação do resfriamento à ar chega a uma hora, o intervalo para o resfriamento à água não passa de 13 minutos. Levando-se em conta que atualmente é necessário esperar em média 22 minutos para retirar o lingote da forma, sabendo que na região central não está totalmente solidificado, com o resfriamento à água este tempo cai para 13 minutos, assim sendo, para solidificar os 36000 kg da panela de refino o tempo será de 1h e 30 minutos, isto é, 35 minutos a menos no tempo de processo com lingotes a uma temperatura muito mais baixa.

As metodologias de abordagem do processo ficam validadas, e prontas para serem aplicadas a outros casos semelhantes, além de se poder utilizar os dados para futuros projetos de melhorias do resfriamento deste tipo de lingote.

Algumas sugestões relativas a pesquisas futuras são feitas a seguir, baseadas nas conclusões do presente trabalho:

- aprimorar o aparato experimental, agregando um sistema de aquisição de dados.
- aumentar a vazão volumétrica de entrada e saída de água, e acrescentar um misturador no tanque.
- adoção de termopares do tipo J, classe 1, por apresentar uma faixa de trabalho mais adequada.
- programar em uma linguagem computacional incluindo a fase de solidificação na análise.

## 7. REFERÊNCIAS

AWRUCH, A.M., Reitz, R., 1994. **Simulação Numérica De Problemas De Solidificação Usando O Método Dos Elementos Finitos**, CPGE/UFGRS, 1994

GARCIA, A., PRATES, M., **Mathematical Model for the unidirectional solidification of metals: Cooled Molds**, Metallurgical Transaction B, Vol 9B, 1978

SCHWARZ, Z. **Angew. Math. Mech**, Vol. 13, 1933

## 8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BRANCHER, J.D. **Solução Analítica para o Cálculo da Constante de Solidificação do Modelo de Resfriamento de Schwarz**. Porto Alegre: PROMEC/UFRGS, 1994

INCROPERA, F.P; DeWITT, D.P. **Fundamentos da Transferência de Calor e Massa**. 4.ed. Rio de Janeiro:LTC, 1998

MALISKA, C.R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Flúídos Computacional**. Rio de Janeiro:LTC, 1995

MATWEB, Materials Data Book internet

MORAN, M.J; SHAPIRO, H.N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia 4 ed**. Rio de Janeiro: LTC, 2002

MÜLLER, A. **Solidificação e Análise Térmica dos Metais**. 1.ed. Porto Alegre: UFRGS , 2002

INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION. CHICAGO, ILLINOIS: ASME, 1994

ÖZISIK, M.N. **Transferência de Calor um texto básico**. Rio de Janeiro:Guanabara Kogan S.A., 1990

OHNO, A. **Solidificação dos Metais**. São Paulo: LTCE , 1988

RODRIGUES, A.F.A. **Análise Experimental e Numérica da Solidificação Direcional de Materiais de Mudança de Fase**. Porto Alegre: PROMEC/UFRGS, 2001

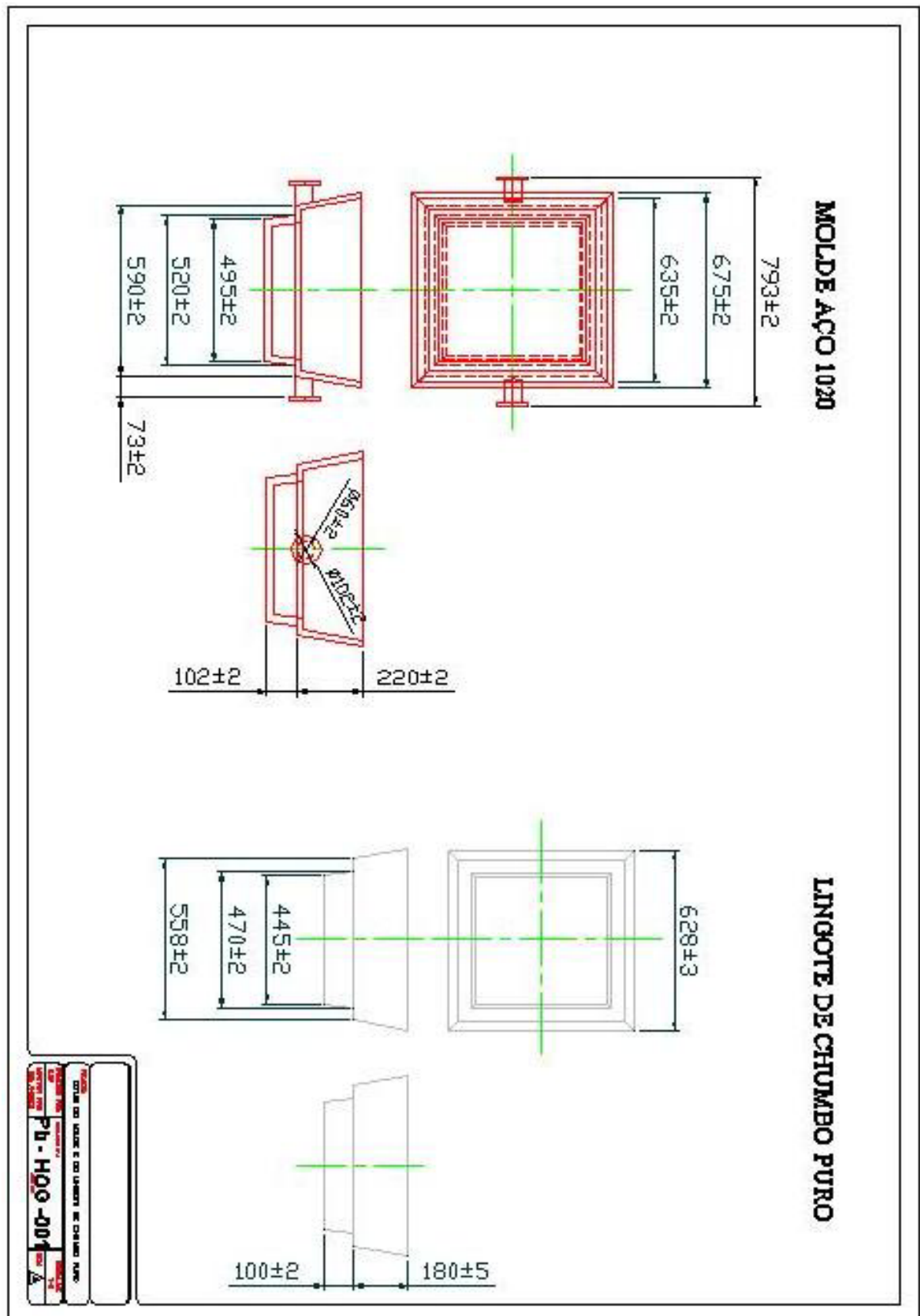
SCHNEIDER, P.S., **Apostilas da Disciplina de Medições Térmicas**, Material Didático, DEMEC/UFRGS, 2003

ZARO, M.A., **Medição de Temperatura – Termopares**. Porto Alegre: PROMEC/UFRGS, 2000

TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL. ENG3008-UFRGS: Notas de aula. Porto Alegre, 2003

I SEMINÁRIO DE MODELAMENTO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE TÉRMICA EM SOLIDIFICAÇÃO E FUNDIÇÃO. Porto Alegre: UFRGS, 1994

APÊNDICE A - Projeto Técnico do Molde Metálico e do Lingote de Chumbo puro





APÊNDICE C - Tabela de Comparação dos Valores de Temperatura para os Termopares do tipo K.

Escalas calibradas: °C - tipo K

Procedimento utilizado: Comparação

Padrão utilizado: Indicador de temperatura Novus, modelo TDPK certificado nº100/2004 - D&S Eletro Industrial

Valores Obtidos

Água destilada	Amostras	TERMOPARES TIPO K				Termômetro de vidro
		Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3	Termopar flexível	
<b>Fervida</b>	<b>Medida 1</b>	103	102	101	101	99,2
	<b>Medida 2</b>	103	100,5	100,5	101	99,2
	<b>Medida 3</b>	103	102	101	101	99,3
	<b>MÉDIA</b>	103	101,5	100,8	101	99,2
	<b>Erro (%)</b>	2,1	0,7	0,0	0,2	1,6
<b>Congelada</b>	<b>Medida 1</b>	5	5	4	3	2
	<b>Medida 2</b>	4	5	3	3	3
	<b>Medida 3</b>	3	4	2	3	2
	<b>MÉDIA</b>	4	4,7	3	3	2,3
	<b>Erro (%)</b>	0,3	0,4	0,0	0,0	0,3

**CONDIÇÕES:**

Temperatura que ferve a água	<b>99,63</b>	°C	<b>372,78</b>	<b>K</b>
Temperatura que congela a água	<b>0,1</b>	°C	<b>273,25</b>	<b>K</b>
Temperatura Ambiente	<b>25</b>	°C	<b>298,15</b>	<b>K</b>
Umidade relativa	<b>65</b>	%		
Pressão	<b>101,8</b>	Kpa		

Os valores obtidos correspondem aos valores estáveis de três medições com in-

tervalo de 60s.

ANEXO A – Certificado de Calibração e Manutenção do Indicador de Temperatura da marca Minipa

# D & S

Eleto Industrial

Comércio e manutenção de equipamentos para automação industrial e instrumentação de precisão.

## Laudo de conserto e calibração N°. 103/2004

Data: 01/06/2004.

Requerente: SULINA DE METAIS S/A

### Características do Objeto:

Nome: TERMÔMETRO

Fabricante: MINIPA

Modelo: MT-5104

N ° de controle: 4850

Setor: ASSIST. TÉCNICA

Escalas Calibradas: °C

N ° Total de Escalas Calibradas: 01

Procedimento(S) Utilizado(S): COMPARAÇÃO

Padrão(ões) Utilizado(S):

- Multi-Calibrador Rotek Modelo 2500 Série 116 – Certificado n ° 075/00-RBC – LABELO

### VALORES OBTIDOS :

ESCALA	200	400	800	1000
Vlr. INICIAL	203	405	803	1014
Vlr. FINAL MÉD	201	401	800	1002
ERRO MÁX. %	0,5 %	0,25 %	0 %	0,2 %

Condições: Temperatura ambiente: 18°C ± 3°C.

Umidade relativa: 55% ± 3%

Observação:

- Este certificado é válido exclusivamente para o objeto calibrado, não sendo extensivo a quaisquer lotes, mesmo que similares.
- Sugerimos recalibrar o instrumento em um prazo máximo de 12 meses
- Os valores obtidos correspondem à média de quatro medições com intervalo de 60 segundos.

Técnico :

Técnico responsável: Daniel Ceresoli