

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

CENTRO DE TECNOLOGIA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS RECOBRIMENTOS DE MOLDE NO
CONTROLE DA SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL DO CHUMBO
COMERCIALMENTE PURO*

ENGº . CARLOS ALFREDO BAPTISTA DE CAMPOS

* Trabalho apresentado para obtenção
do título de Mestre em Engenharia
Mecânica, pela Comissão de Pós-Gra
duação da Faculdade de Engenharia
da UNICAMP.

CAMPINAS

-1975-

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

R E S U M O

Tendo em vista a influência que os recobrimentos de molde exercem sobre o regime de transferência de calor do sistema metal-molde, estudou-se de forma sistemática os efeitos de diversos recobrimentos (Alumina, Negro de Fumo Dycote 39 e Dycote 34), sobre a eficiência do contato térmico entre o metal e o molde, traduzida parametricamente pelo coeficiente de transmissão de calor da interface metal-molde. Para tanto adotou-se o chumbo comercialmente puro como metal tipo o qual foi solidificado sob diversas condições em um dispositivo unidirecional especialmente projetado e construído. Os resultados obtidos mostram a possibilidade de controle do processo de solidificação por meio da aplicação adequada dos diferentes tipos de recobrimentos de molde, em particular no que se refere a cinética de solidificação, a macroestrutura resultante (Tamanho de Grão) e a variação da temperatura da interface metal-molde. Finalmente testa-se um modelo unidirecional parabólico para a descrição analítica da solidificação do chumbo comercial.

A B S T R A C T

Considering the influence that the coatings - applied on the metal-mold interface have on the heat extrac- tions conditions of the system, it was analysed the influence of different coatings covering the internal surface of the re- frigerated mold (Alumina, Lamp-black, Dycote 39 e Dycote 34), over the efficiency of the thermal contact between metal and mold, represented parametrically by the heat transfer coeffi- cient of the metal-mold interface. It was used commercial - lead as the standard material solidified under several condi- tions, in an unidirectional apparatus, designed and built for this purpose. The results showed the possibility of control- ling the solidification process by applying the correct coa- ting at the metal-mold interface, particularly the kinetics - of the process, the resulting structure and the temperatura - of the metal-mold interface. Finally, the parabolic unidirec- tional model was verified for the case of solidification of commercial lead.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas . Agradeço ao seu Diretor *Prof. Dr. Dino Ferraresi* pelo grande apoio prestado .

Agradeço ao *Prof. Dr. Maurício Prates de Campos Filho*, pelo estímulo cooperação e apoio que incansavelmente dedicou na orientação deste trabalho.

Agradeço a inestimável colaboração dos técnicos *Keizi Takahashi Ito* , *Nivaldo José Martini* , *Paulo Sergio de Castro Santos* , da escriturária *Vanda Furquim* e do desenhista *José Francisco da Costa Neto*; assim como aos demais funcionários e engenheiros do Centro de Tecnologia da UNICAMP que tornaram possível a execução deste trabalho.

À minha esposa

Célia Maria

Aos meus pais

Olga

Mário

I N D I C E

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS RECOBRIMENTOS DE MOLDE NO CONTROLE DA
SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL DO CHUMBO COMERCIALMENTE PURO

	<u>PÁGINA</u>
<i>CAP. I- INTRODUÇÃO</i>	01
I.1- Importância do Processo de Solidificação na Tecnologia Metalúrgica	01
I.2- Influência da Capacidade de Extração de Calor do Molde no Controle do Processo- de Solidificação	03
I.3- Natureza das Resistências Térmicas do Sis- tema Metal-Molde	07
I.4- Importância dos Recobrimentos de Molde - no Controle do Processo de Solidificação	09
I.5- Objetivos do Trabalho	12
 <i>CAP. II- <u>ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE h_i</u></i>	 13
II.1- Relação entre o Coeficiente h_i e a V_e locidade Inicial de Solidificação	13
II.2- Influência do Coeficiente h_i na Cinēti- ca de Solidificação	15
II.3- Influência do Coeficiente h_i na Tempera- tura da Interface Metal-Molde	18

<i>CAP. III- <u>TÉCNICAS EXPERIMENTAIS</u></i>	24
III.1- Metal Utilizado	24
III.2- Dispositivo Unidirecional	24
III.3- Técnicas de Medida de Temperatura , e de Avanço da Interface Sólido-Líquido..	28
III.4- Controle do Contato Térmico da Interfa ce Metal-Molde	37
III.5- Macrografias	38
 <i>CAP. IV- <u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u></i>	 40
IV.1- Apresentação Geral dos Resultados.....	40
IV.2- Influência dos Recobrimentos na Cinética de Solidificação	44
IV.3- Influência dos Recobrimentos de Molde no Valor do Coeficiente h_i	44
IV.4- Influência dos Recobrimentos de Molde na Temperatura da Interface Metal-Molde ...	50
IV.5- Influência dos Recobrimentos de Molde no Tamanho de Grão da Macroestrutura	52
IV.6- Aplicabilidade do Modelo Unidirecional - Parabólico	53
IV.7- Aplicabilidade do Perfil Térmico Linear	59
 <i>CAP. V- <u>CONCLUSÕES</u></i>	 64
 <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	 68
 <u>APÊNDICE - 1</u>	 71
1- Simbologia Utilizada	71
1.1- Parâmetros dimensionais	71
1.2- Parâmetros adimensionais	73

1.3- Índices empregados	73
1.4- Operadores Matemáticos	73
<u>APÊNDICE - 2</u>	74
2- Desenvolvimento do Modelo Unidirecional para Determinação do Tempo de Solidifica ção	74
2.1- Tempo total de solidificação	74
2.2- Determinação do tempo parcial	
($T_m + T_s$) de solidificação pela So lução Exata de Schwarz	75
2.3- Determinação do tempo de solidifica ção devido ao efeito isolado da re sistência térmica da interface me tal-molde	79
<u>APÊNDICE - 3</u>	82
3- Propriedades Físicas do Chumbo	82

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS RECOBRIMENTOS DE MOLDE NO CONTROLE
DA SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL DO CHUMBO COMERCIALMENTE PURO.

C A P Í T U L O I

I N T R O D U Ç Ã O

I.1- Importância do Processo de Solidificação na Tecnologia
Metalúrgica

A fundição e o lingotamento são processos de transformação metalúrgica de grande importância tecnológica. Todos os produtos metálicos, excluindo-se aqueles que são conformados pela Metalurgia do Pó, passam pelo menos uma vez pelo processo de solidificação [1,2], como ilustra a figura I.1.

Grande parte das peças utilizadas industrialmente são os fundidos com forma definitiva ou quase definitiva, necessitando apenas de pequenas operações de usinagem. Deste modo, a estrutura bruta de fundição obtida durante o processo de solidificação, influencia necessariamente as propriedades que a peça vai apresentar em serviço, mesmo que esta venha a sofrer tratamentos térmicos posteriores [3]. Alguns defeitos tais como Bólgas Gasosas (Blows), Rachaduras de Contração (Shrinkage Cracks), etc, são inerentes ao processo de solidificação e não podem ser eliminados por nenhum tipo de tratamento térmico [4].

No caso do lingotamento a estrutura é modificada por meio de tratamentos termomecânicos, tais como: lamina

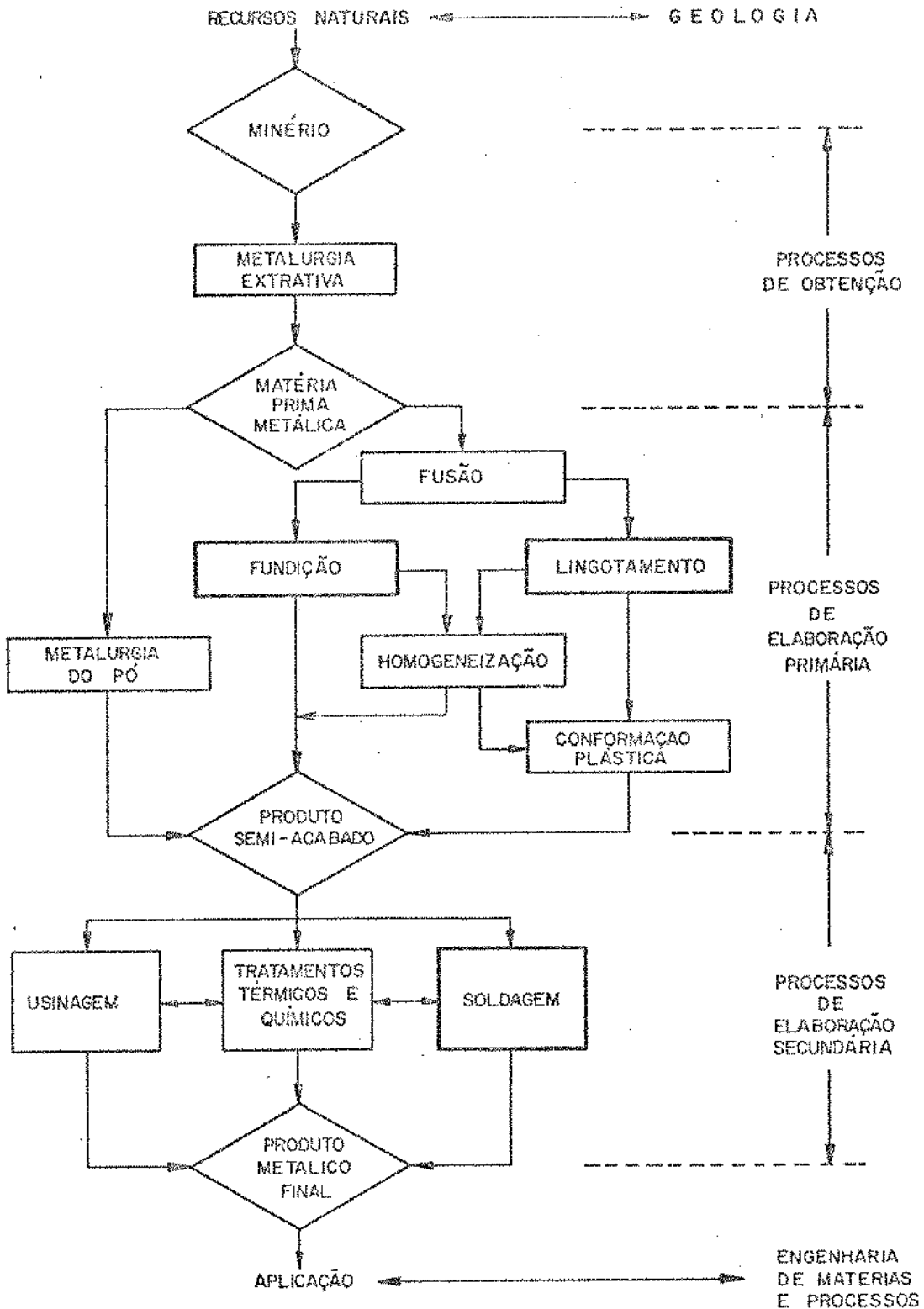


Figura I.1- Fluxograma geral da Tecnologia Metalúrgica, mostrando a incidência da Solidificação no processamento de metais.

ção a quente e a frio, forjamento, etc, e conseqüentemente, as peças obtidas são densas, não apresentando vazios internos em virtude dos esforços mecânicos aplicados [4]. A estrutura bruta do lingote porém, tem papel decisivo sobre toda a vida do material. Este efeito deve-se ao fato de que a distribuição de fases e inclusões, dependem fundamentalmente do processo de solidificação. Isto exercerá influências nas propriedades dos materiais, mesmo após diversos processos de transformação que o lingote venha a sofrer [5,3].

A soldagem é outro método de se dar forma aos metais, envolvendo transformações metalúrgicas. Trata-se de um processo de solidificação localizado, onde as partes metálicas a serem unidas se comportam como extratores de calor do sistema. Neste caso também os efeitos da solidificação se farão sentir nas propriedades físicas e mecânicas das partes soldadas [6,7].

É evidente que o processo de solidificação do metal é de vital importância no que se refere a qualidade metalúrgica do produto final obtido. Isto resultou numa preocupação dos pesquisadores, em fornecer resultados que permitam melhor controle dos complicados processos tecnológicos em que a solidificação intervem.

I.2- Influência da Capacidade de Extração de Calor do Molde no Controle do Processo de Solidificação

A figura I.2 mostra as correlações entre as variáveis que permitem o controle do processo de solidificação. A qualidade metalúrgica de um metal solidificado, depende basicamente do grau de instabilidade termodinâmica da interface de crescimento sólido-líquido. Esta instabilidade é determinada pela intensidade do super-resfriamento constitucional SC , que ocorre durante a solidificação, gerado pela existência de uma região enriquecida de soluto rejeitado adiante da interface sólido-líquido [8].

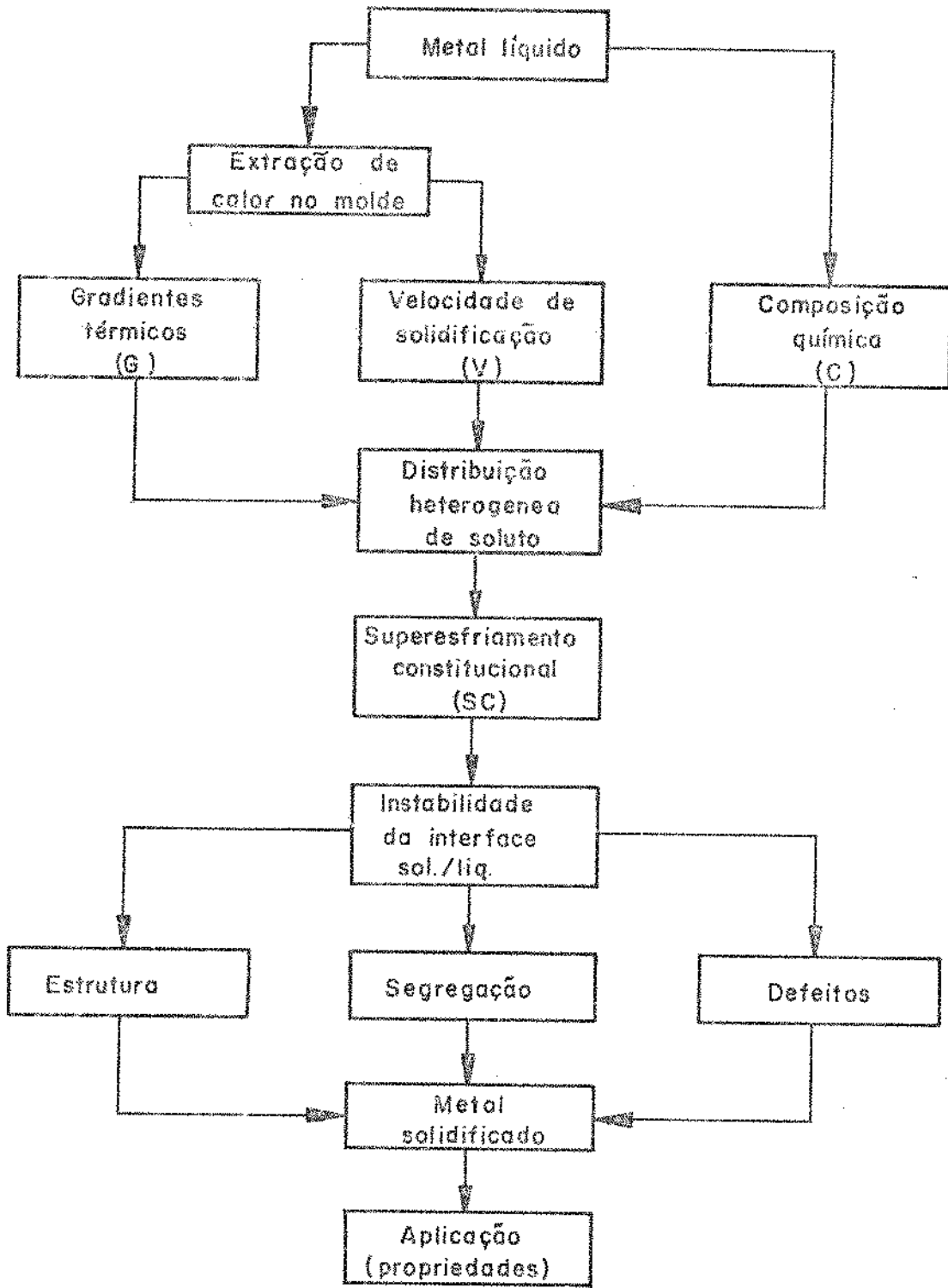


Figura I.2- Esquema da correlação existente entre as variáveis e os parâmetros que regem o processo de solidificação.

O parâmetro que traduz a intensidade do SC é a relação :

$$SC = \frac{G}{VC} \quad (1)$$

onde :

G = Gradiente térmico adiante da interface sólido-líquido

V = Velocidade de solidificação

C = Composição nominal da liga.

A medida que o grau de SC aumenta, o valor desse parâmetro diminui (diminuição do gradiente e/ou aumento da velocidade e/ou aumento do teor de soluto) e a micromorfologia da interface sólido-líquido aumenta sua instabilidade termodinâmica, passando de plana a celular e finalmente à morfologia dendrítica [9]. Colocando-se num gráfico os valores de C em função da relação G/\sqrt{V} , pode-se identificar os limites de transição entre estes diferentes tipos de micromorfologia, como ilustra a figura I.3. Como a composição química de uma liga tem um valor nominal fixo, somente os parâmetros determinados pelas condições de extração de calor do molde, quais sejam G e V , poderão ser variados de terminando as características estruturais do metal. Tendo-se em vista que a estrutura de fundição está correlacionada com as propriedades mecânicas, físicas e químicas de uma peça, conclui-se que é importante do ponto de vista tecnológico que se possa prever a velocidade de solidificação e o gradiente térmico, em função de parâmetros que controlam a extração de calor do molde.

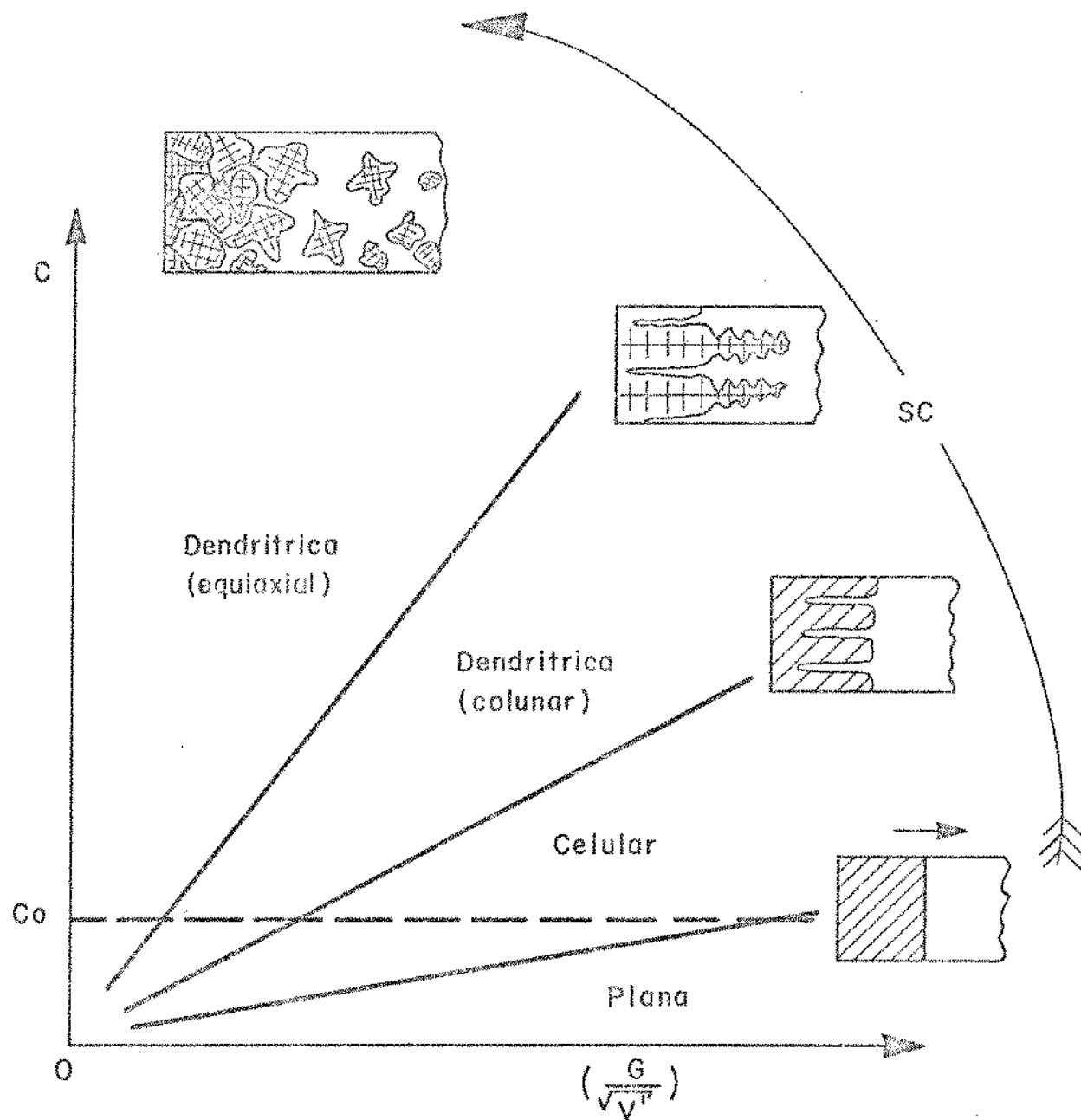


Figura 1.3- *Variação da micromorfologia da interface sólido-líquido. O gráfico mostra que uma liga com composição nominal C_0 , pode apresentar qualquer tipo de micromorfologia, variando-se apenas as condições de transferência de calor.*

I.3- Natureza das Resistências Térmicas do Sistema Metal-Molde

A figura I.4 mostra os modos essenciais de transferência de calor para um dado instante do processo de solidificação em um sistema metal-molde. A cada um destes modos de transferência de calor, existe associada uma resistência térmica que se opõe ao fluxo de calor, determinando a intensidade da extração de calor do sistema [10] .

São elas:

- A resistência térmica do metal que solidifica R_s , que é inexistente no primeiro contato entre o metal e o molde, e aumenta a medida que o calor latente evolui da interface sólido-líquido, ou seja :

$$\text{para } t = 0, \quad R_s = 0$$

$$\text{para } t > 0, \quad R_s > 0$$

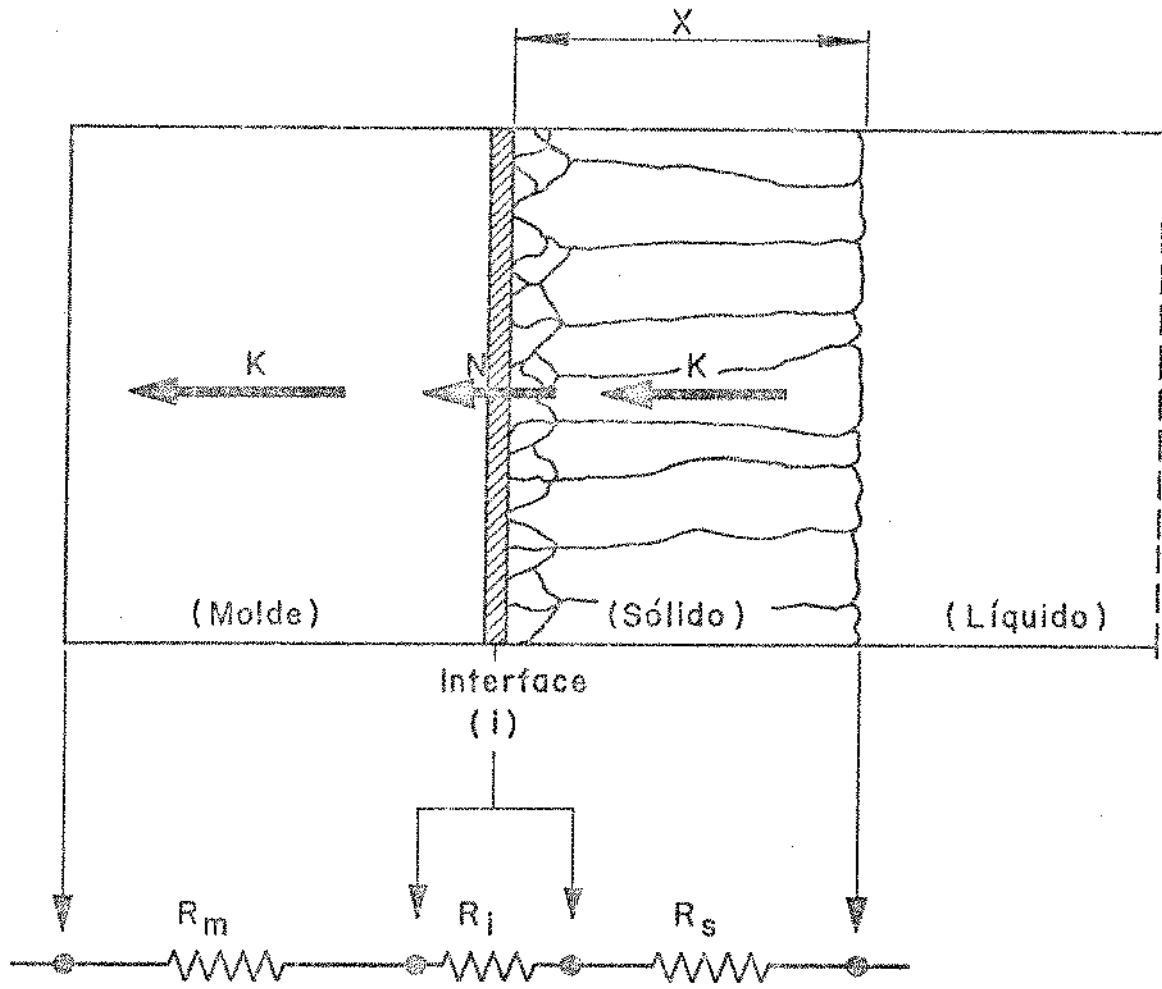
- A resistência térmica do molde R_m , que também é inexistente no instante do primeiro contato entre o metal líquido e o molde, e aumenta a medida que o material do molde vai se saturando de calor, ou seja :

$$\text{para } t = 0, \quad R_m = 0$$

$$\text{para } t > 0, \quad R_m > 0$$

- A resistência térmica da interface metal-molde R_i , que apresenta um valor finito no instante do primeiro contato entre o metal e o molde e que se mantém constante durante o processo. Eventualmente o valor de R_i pode crescer em virtude da formação de um "gap" de ar, devido a contração volumétrica do metal solidificado [11,12], ou seja :

$$\text{para } t = 0, \quad R_i = \text{cte}$$



K = CONDUÇÃO

N = TRANSFERENCIA NEWTONIANA

Figura I.4- Esquema ilustrativo de um sistema metal-molde em um dado instante da solidificação mostrando os modos essenciais de transferência de calor, e as resistências térmicas do sistema para uma espessura solidificada X .

para $t > 0$, $R_i = \text{cte}$ ou

A atuação conjunta destas três resistências térmicas dispostas em série durante a solidificação, determinará a variação do fluxo de calor no sistema e conseqüentemente comandará a cinética do processo.

Nos instantes iniciais do processo de solidificação, durante o primeiro contato entre o metal e o molde a única resistência térmica atuante no sistema será a da interface metal-molde:

$$R_i = \frac{1}{h_i} \quad (2)$$

onde h_i é o coeficiente de transmissão de calor resultante do contato térmico entre o metal e o molde. Isto evidencia que o valor do referido coeficiente condiciona o processo de solidificação nos primeiros instantes, determinando as estruturas iniciais [13].

I.4- Importância dos Recobrimentos de Molde no Controle do Processo de Solidificação

Apesar da contração volumétrica que a maioria dos metais sofrem ao solidificar-se, ocorre em alguns casos certos problemas de "pega" (micro soldagem) entre o molde e o metal [14]. A solução mais econômica consiste em aplicar recobrimentos isolantes na superfície interna do molde, evitando a micro soldagem e aumentando a vida útil do mesmo. Por outro lado se observa que a existência de películas isolantes sobre os moldes, fazem aumentar a resistência térmica da interface metal-molde (diminuição do coeficiente h_i), influido notadamente nos seguintes aspectos na solidificação -

de um metal :

- formação da macro estrutura,
- cinética de solidificação,
- variação da temperatura da interface metal - molde T_i .

A literatura especializada é bastante escassa - no que se refere aos valores do coeficiente h_i e à natureza física do contato térmico entre o metal e o molde. As informações existentes a respeito do coeficiente h_i , quase sempre se referem a casos particulares de lingotamento contínuo. Métodos de medição de caráter mais geral foram desenvolvidos - por *Reynolds* [15] e *Prates* [10]. Este último desenvolveu um método experimental de medida indireta, baseado em ensaios especiais de fluidez linear. As medidas experimentais, realizadas por este autor, mostram que o estado superficial do molde atua de maneira notável no coeficiente h_i . De um modo geral, pode-se ter que [16,17] :

- Para moldes com superfície polida

$$h_i \approx 10^{-1} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{C}$$

- Para moldes com superfície oxidada

$$h_i \approx 5 \cdot 10^{-2} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{C}$$

- Para moldes com superfície protegida com recobrimentos isolantes tais como : negro de fumo, alumina, etc.

$$h_i \approx 10^{-2} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{C}$$

I.5- Objetivos do Trabalho

Utilizando-se como metal-tipo o chumbo comercialmente puro, solidificado unidirecionalmente em moldes refrigerados, dimensionou-se os seguintes objetivos para este trabalho :

- a) Determinar experimentalmente a influência dos recobrimentos na cinética de solidificação.
- b) Determinar a influência dos recobrimentos no valor do coeficiente h_i .
- c) Determinar experimentalmente a influência dos recobrimentos na variação da temperatura da interface metal-molde.
- d) Verificar a influência dos recobrimentos no tamanho de grão do metal solidificado.
- e) Verificar a aplicabilidade de modelos analíticos que descrevam confiavelmente a cinética do processo de solidificação.
- f) Verificar a aplicabilidade de modelos analíticos que descrevam confiavelmente a variação da temperatura da interface metal-molde.

C A P Í T U L O II

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE h_i

II.1- Relação entre o Coeficiente h_i e a Velocidade Inicial de Solidificação .

São admitidas as seguintes hipóteses para minimizar a complexidade algébrica do modelo analítico utilizado, porém sem comprometer o problema real:

- a. O fluxo de calor é unidirecional;
- b. A resistência térmica da interface metal-molde é constante durante o processo de solidificação;
- c. A interface sólido-líquido é macroscopicamente plana;
- d. Não existe fluxo de massa no sistema;
- e. As propriedades térmicas dos elementos que compõem o sistema, não variam durante o processo de solidificação.

Ao sistema metal-molde utilizado na análise, se associa um sistema de coordenadas lineares (T, x) , tal que:

$x < 0$	molde
$x = 0$	interface metal-molde
$x > 0$	metal
$x = X$	interface sólido-líquido
$0 < x < X$	metal solidificado

$x > X$ metal líquido

A simbologia empregada neste trabalho se encontra definida no apêndice 1.

A figura II.1 mostra o perfil térmico nos instantes iniciais da solidificação unidirecional de um metal, - sem superaquecimento em molde refrigerado.

Seja dX a espessura de material solidificado - num intervalo de tempo dt . Nestas condições, fazendo-se um balanço térmico na interface metal-molde ($x = 0$), resulta :

$$\sum_{x=0} q = q_i - q_{s,0} = 0 \quad (3)$$

Levando-se em consideração que no início da solidificação $T_i \approx T_f$, tem-se :

$$q_i = h_i (T_f - T_0) \quad (4)$$

A quantidade de calor gerada no volume solidificado será:

$$Q = dV' (H d_s) \quad (5)$$

ou

$$Q = A dX (H d_s) \quad (6)$$

O fluxo de calor será igual a:

$$q_{s,0} = \frac{A dX (H d_s)}{A dt} \quad (7)$$

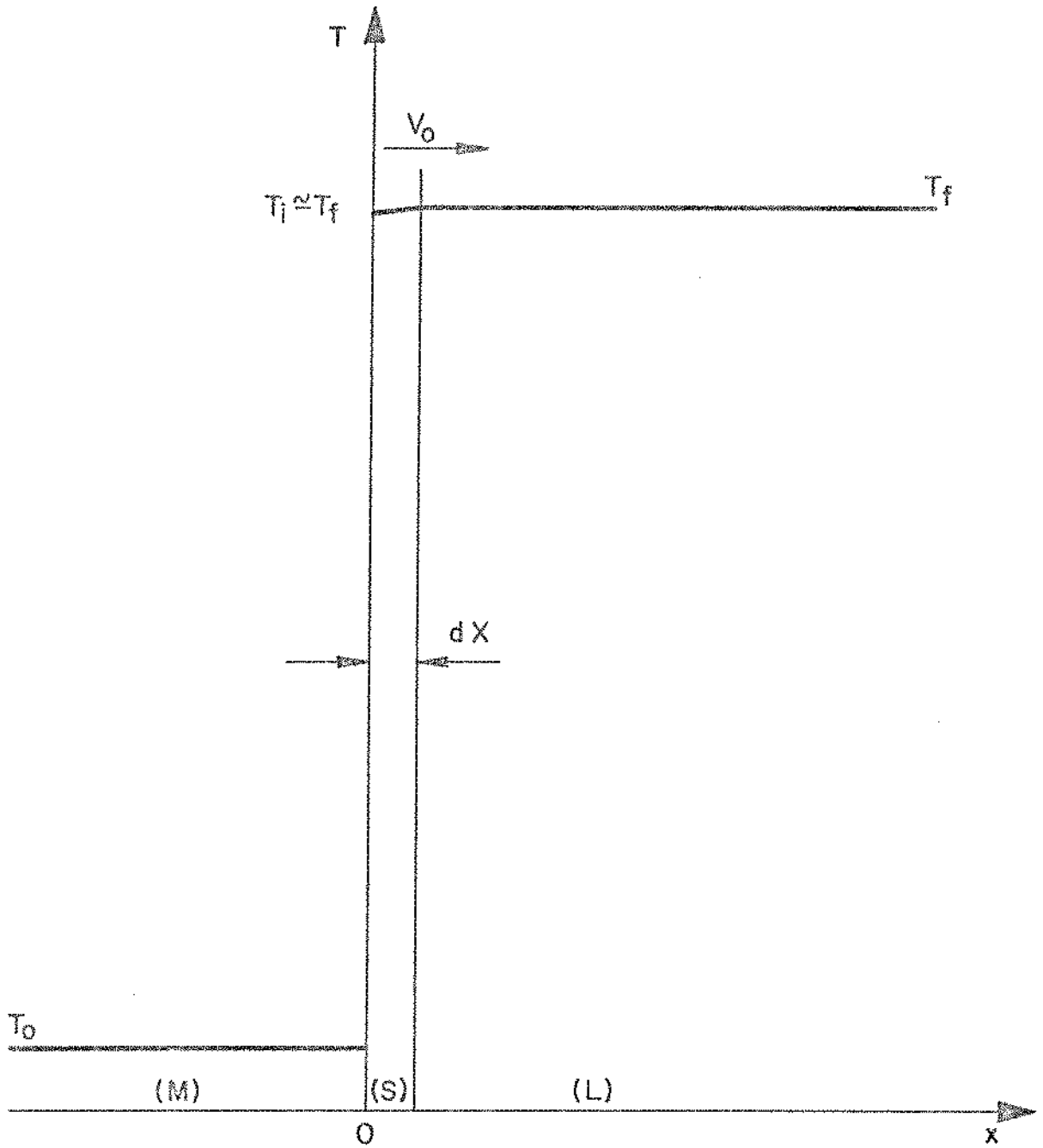


Figura II.1- Esquema do perfil térmico no instante inicial da solidificação unidirecional de um metal em molde refrigerado.

ou

$$q_{s,0} = V_0 H d_s \quad (8)$$

Substituindo (4) e (8) em (3) decorre que :

$$h_i (T_f - T_0) = H d_s V_0 \quad (9)$$

Portanto:

$$h_i = \left(\frac{H d_s}{T_f - T_0} \right) V_0 \quad (10)$$

Para o chumbo comercialmente puro tem-se :

$$h_i = (0,221) V_0 \quad (11)$$

O valor de V_0 é obtido a partir da derivação gráfica da curva tempo versus espessura solidificada, obtida experimentalmente, como ilustra a figura II.2.

II.2- Influência do Coeficiente h_i na Cinética de Solidificação.

Pires, Prates & Biloni [18] propuseram uma equação para descrever a cinética da solidificação unidirecional de metais, vazados sem superaquecimento, em moldes refrigerados a água. Admitiu-se como hipótese fundamental, que o efeito das resistências térmicas do sistema metal-molde sobre o tempo de solidificação é cumulativo. A equação proposta é da forma (Vide apêndice 2):

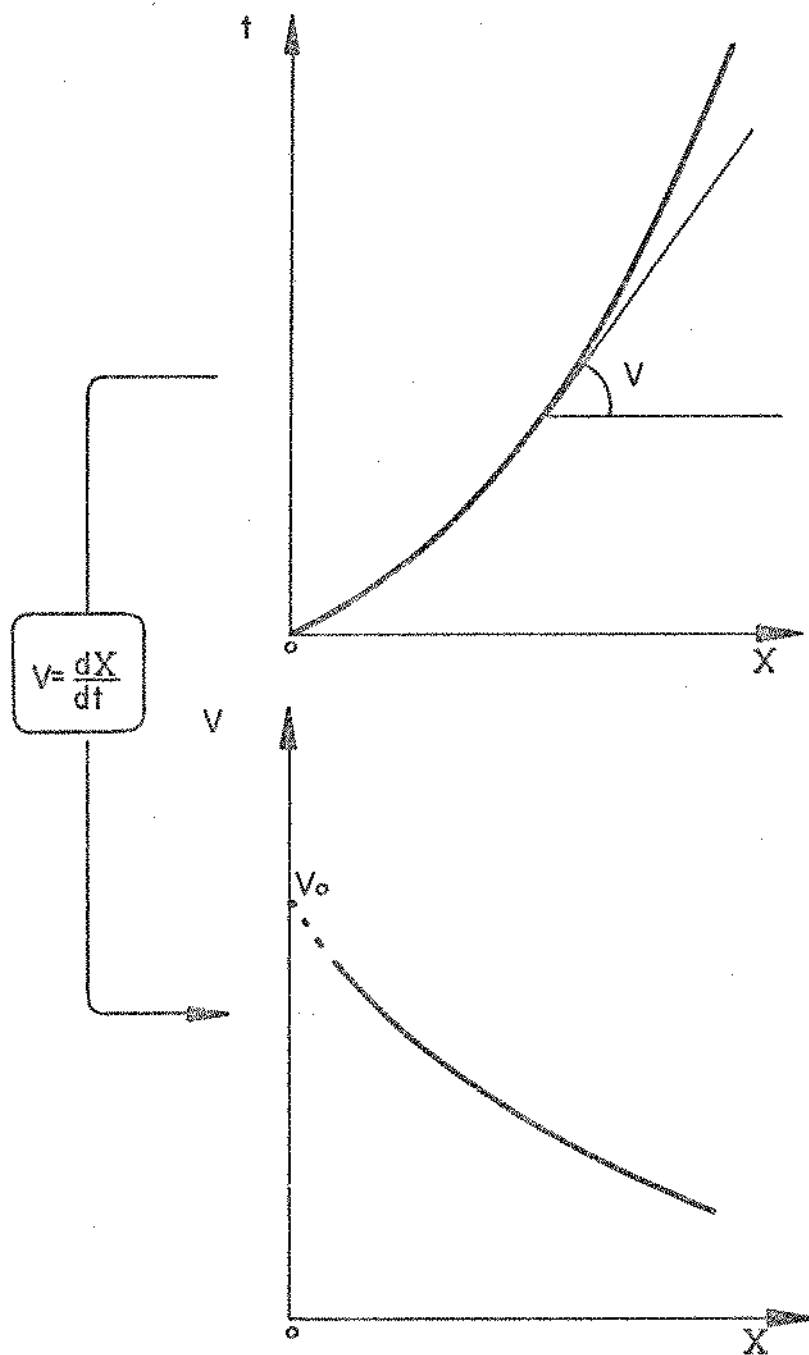


Figura II.2- *Obtensão das velocidades de solidificação a partir da derivação gráfica da curva tempo de solidificação (t) versus espessura solidificada (X).*

$$t = \alpha X^2 + \beta X \quad (12)$$

onde t é o tempo, após o contato inicial entre o metal e o molde, necessário para solidificar a espessura X de metal. Para um dado metal, α é uma constante que depende da capacidade de extração de calor do molde e β é uma constante que depende da eficiência de contato térmico entre o metal e o molde.

A constante α é expressa pela relação:

$$\alpha = \frac{1}{4 \phi^2 a_s^2} \quad (13)$$

A constante β é expressa pela relação:

$$\beta = \frac{H d_s}{h_i (T_f - T_0)} \quad (14)$$

A velocidade de avanço da interface sólido-líquido pode ser obtida derivando-se a equação (12):

$$V = \frac{1}{2\alpha X + \beta} \quad (15)$$

Para o chumbo comercialmente puro, as equações (12) e (15) podem ser descritas na forma:

$$t = (2,272) X^2 + \frac{(0,221)X}{h_i} \quad (16)$$

$$V = \frac{1}{(4,544)x + (0,221)/h_i} \quad (17)$$

A figura II.3 e a figura II.4 mostram as representações gráficas das equações (16) e (17) respectivamente. Ambas foram obtidas através de uma traçadora de gráficos - HP 9862-A acoplada a uma calculadora HP 9810-A, para vários valores de h_i .

II.3- Influência do Coeficiente h_i na Temperatura da Interface Metal-Molde.

A equação (12) descreve como se desenvolve o avanço da interface sólido-líquido em função do tempo. Por outro lado não esclarece qual é a distribuição de temperaturas do sistema em função do tempo e do espaço. Por este motivo o presente trabalho se propõe a desenvolver um modelo analítico que mostre o perfil de temperaturas do metal durante a solidificação.

A figura II.5 admite uma função linear T_s para descrever o perfil térmico do sólido, na solidificação unidirecional de um metal sem superaquecimento, em molde refrigerado.

Nestas circunstâncias, fazendo-se um balanço térmico na interface metal-molde ($x = 0$), resulta em :

$$h_i (T_i - T_o) - \frac{K_s}{X} (T_f - T_i) = 0 \quad (18)$$

Somando -se e subtraindo-se o valor $K_s T_o/X$ na equação (18) resulta:

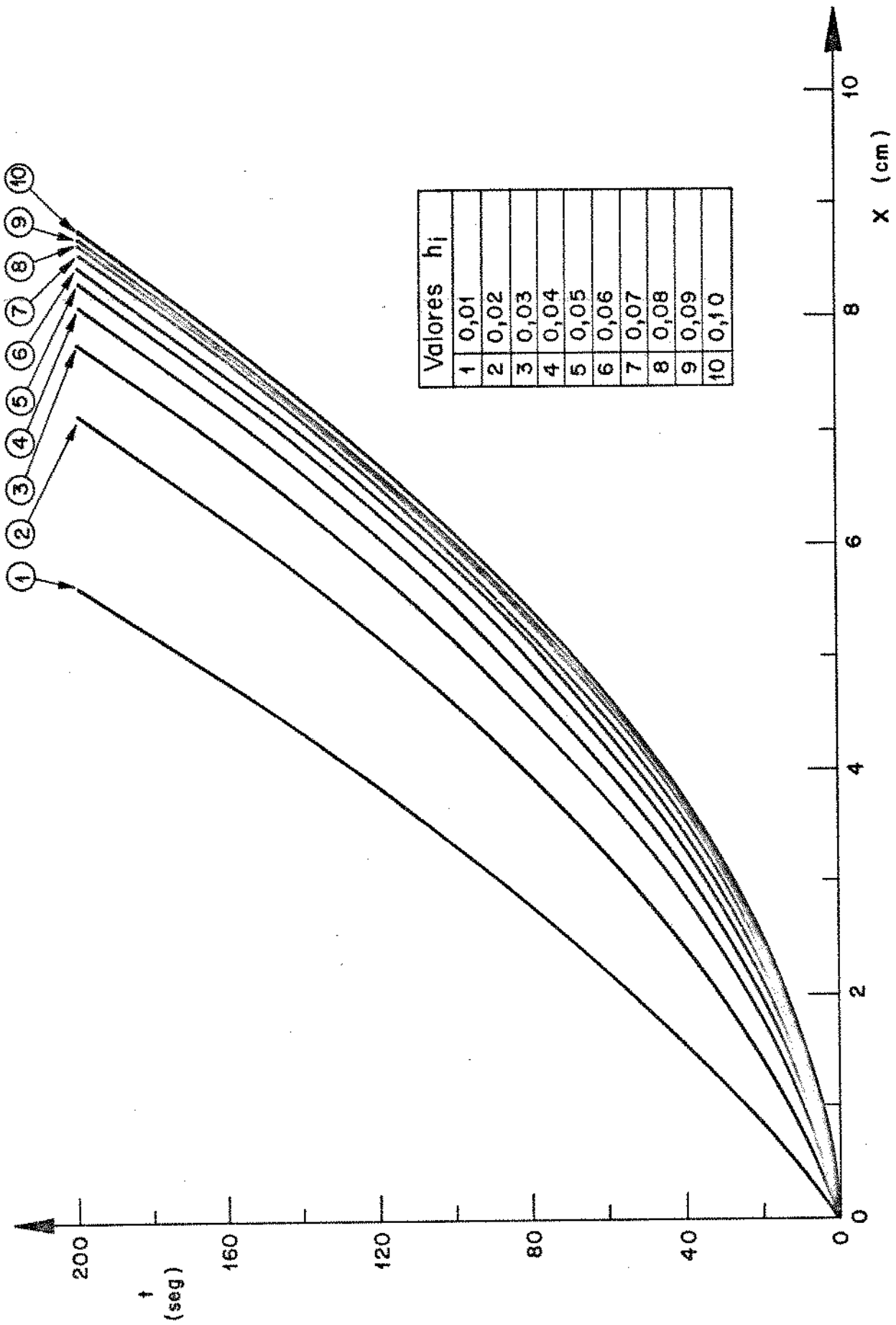


Figura II.3- Variação do tempo de solidificação (t) em função da espessura solidificada (X) de chumbo comercialmente puro, para vários valores do coeficiente de transmissão de calor da interface metal-molde (h_i).

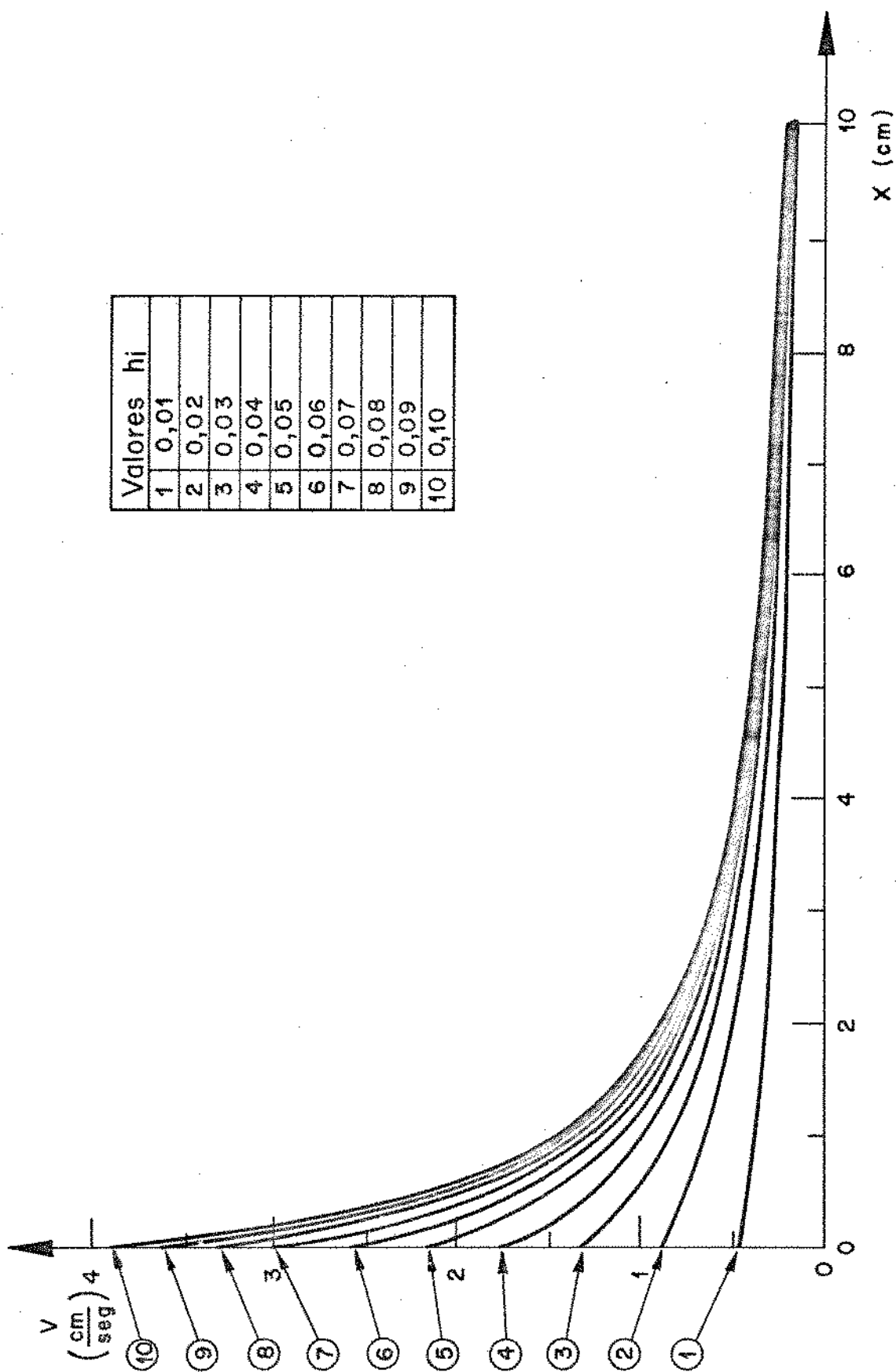


Figura II.4- Variação da velocidade de solidificação (V) em função da espessura solidificada (X) de chumbo comercialmente puro, para vários valores do coeficiente de transmissão de calor da interface metal-metal (h_i).

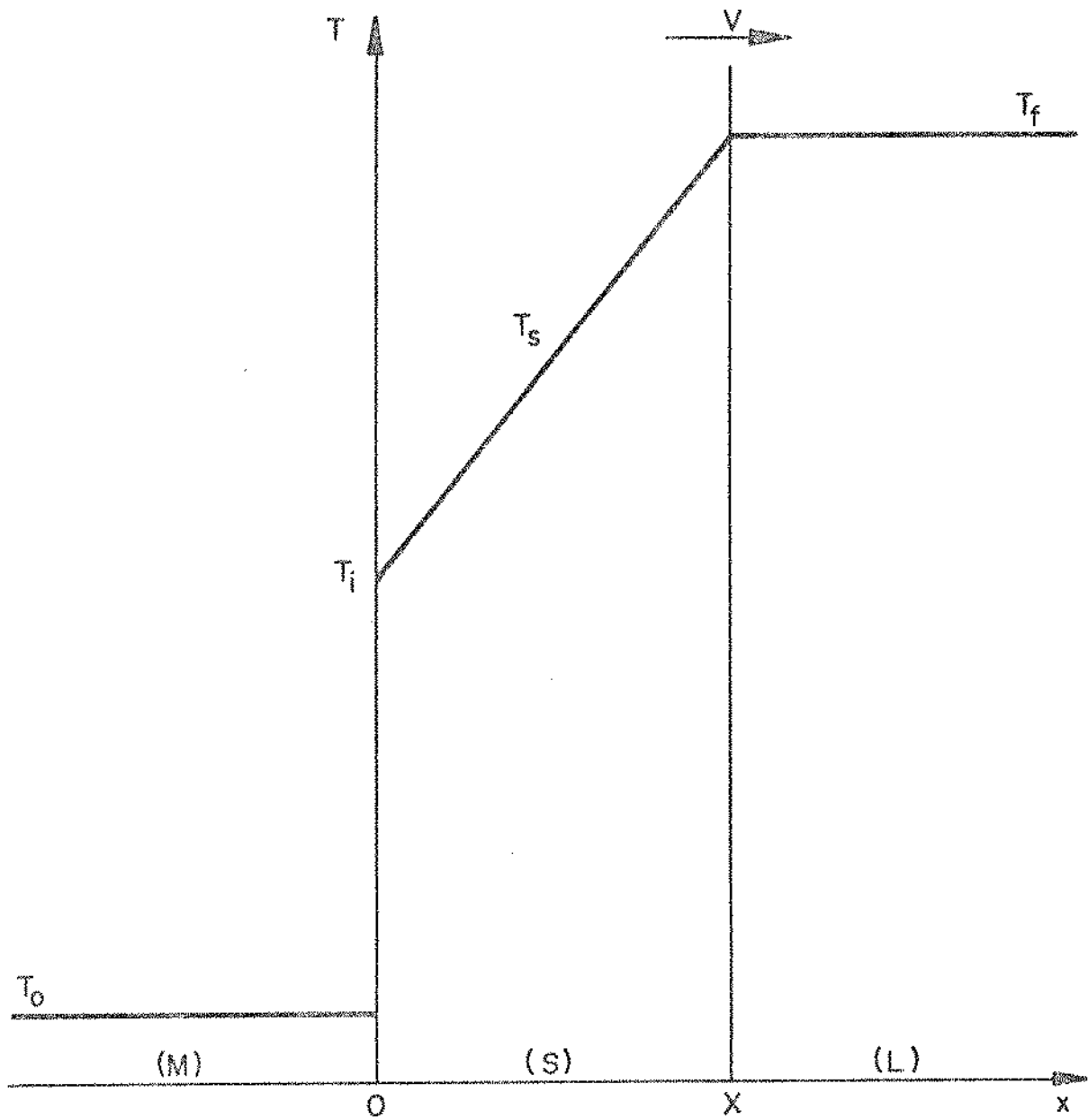


Figura II.5- *Distribuição de temperaturas durante a solidificação de um metal em molde refrigerado, supondo linear o perfil térmico do sólido.*

$$\frac{T_i - T_o}{T_f - T_o} = \frac{1}{1 + h_i X/K_s} \quad (19)$$

Para o chumbo comercialmente puro tem-se :

$$\frac{T_i - T_o}{T_f - T_o} = \frac{1}{1 + 14,29 h_i X}$$

A figura II.6 mostra a representação gráfica da equação (20), obtida através de uma traçadora de gráficos HP 9862-A acoplada a uma calculadora HP 9810-A, para vários valores de h_i .

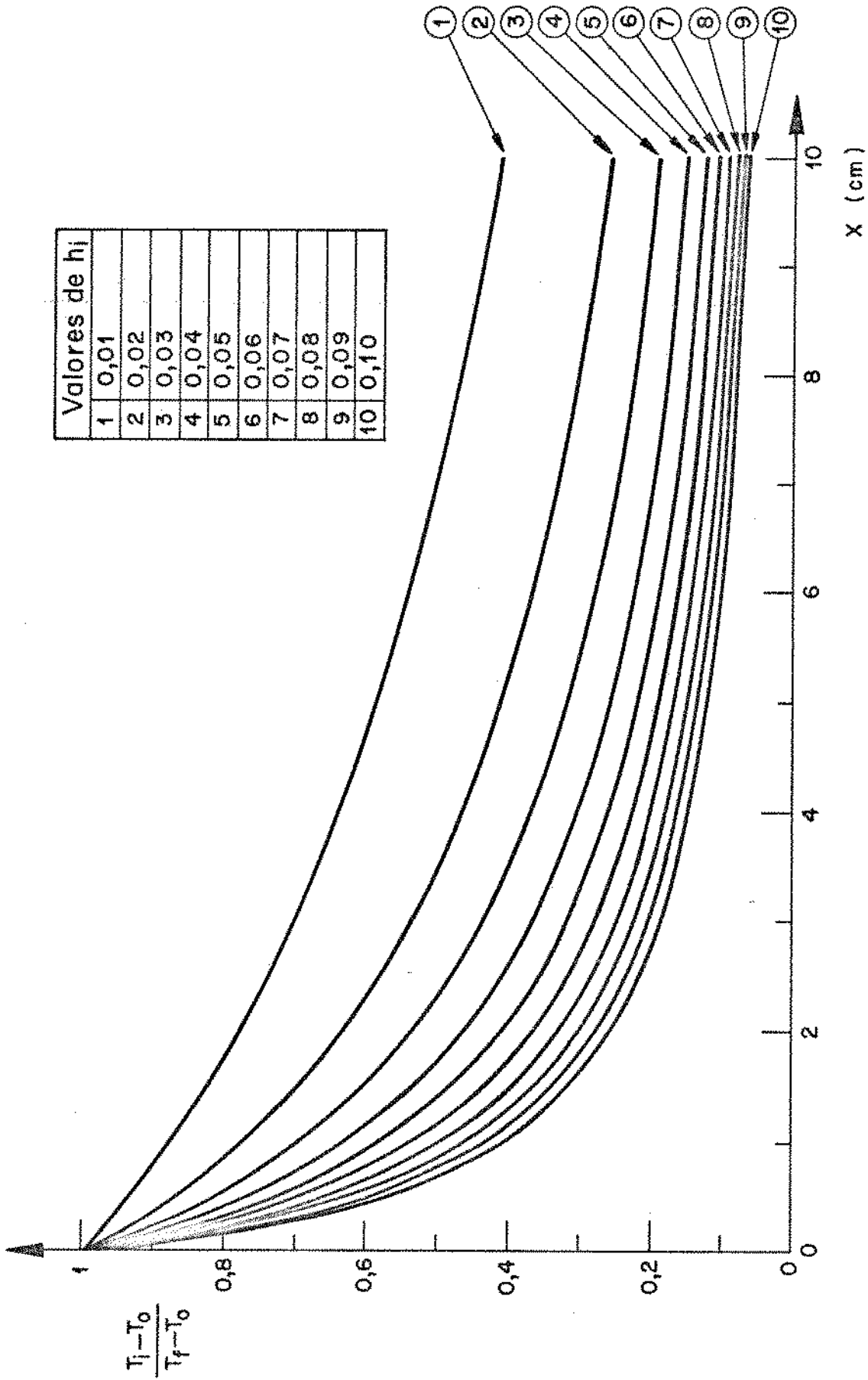


Figura II.6- Variação da relação $T_i - T_0 / T_f - T_0$ em função da espessura solidificada (X) de chumbo comercialmente puro, para vários valores do coeficiente de transmissão de calor da interface metal-molde (h_i).

C A P Í T U L O I I I

TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

III.1- Metal Utilizado

Nos trabalhos experimentais foi utilizado o chumbo comercialmente puro (99,95% de pureza), devido a sua pequena porcentagem de contração volumétrica durante a solidificação, evitando a formação do "gap" de ar entre o metal e o molde [12]. Além disso, as informações a respeito das propriedades físicas deste metal são bastante precisas, e seu baixo ponto de fusão facilita a utilização do mesmo em laboratório [19].

As características e propriedades físicas do chumbo encontram-se no apêndice 3.

III.2- Dispositivo Unidirecional

No sistema metal-molde utilizado a solidificação unidirecional foi obtida no sentido vertical, de forma ascendente, o qual além de garantir um mínimo de convecção térmica, assegura um contato térmico constante entre o metal e o molde, devido a pressão que o peso do metal exerce sobre a interface metal-molde [17].

A figura III.1 mostra o esquema do dispositivo que foi especialmente construído para a realização da parte experimental deste trabalho. As paredes deste dispositivo se constituíram de um forno elétrico tubular, com o objetivo de assegurar uma solidificação unidirecional com perdas de calor desprezíveis lateralmente. As características deste

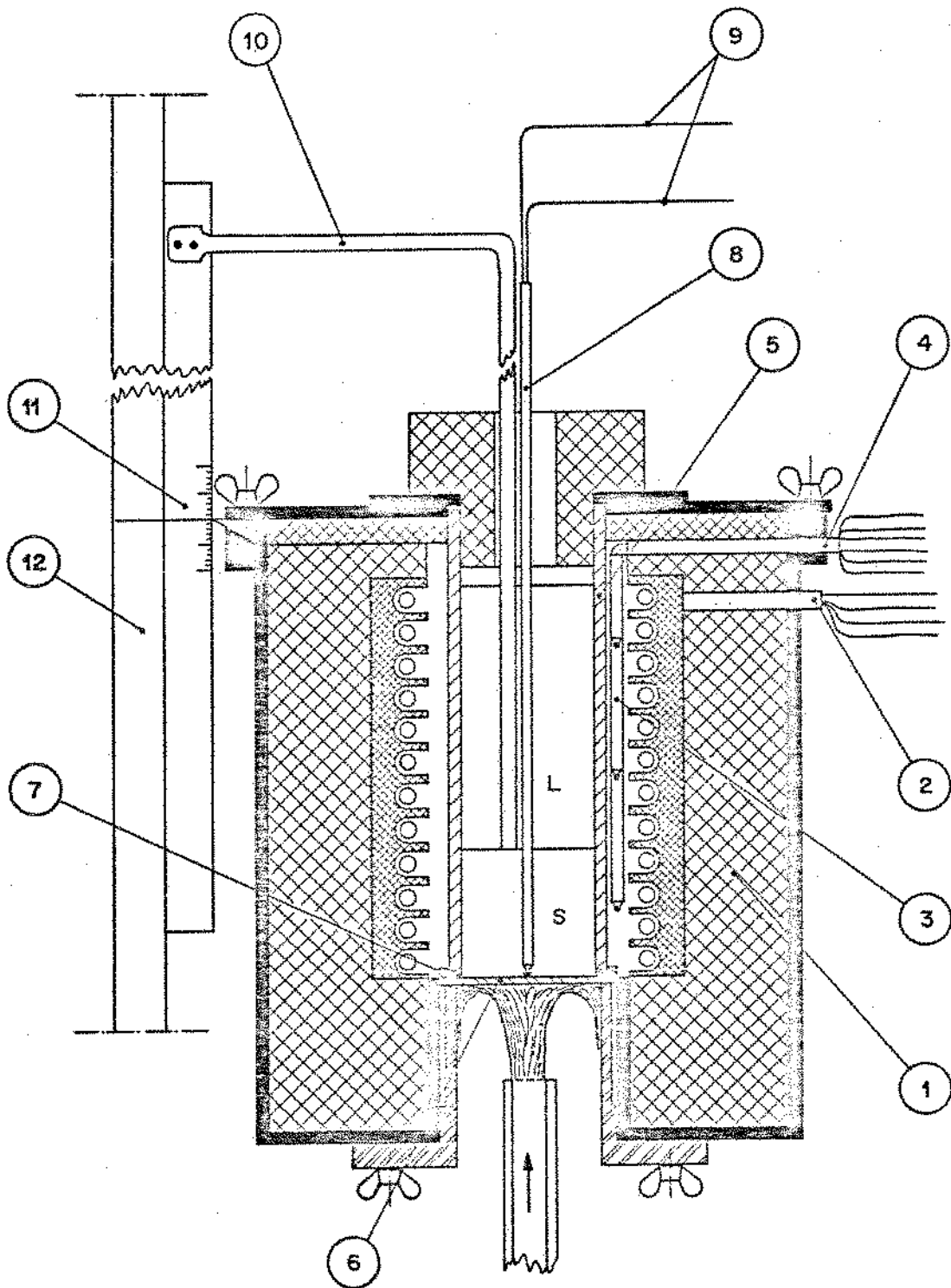


Figura III.1- Esquema do dispositivo de solidificação unidirecional.
1) Forno elétrico ; 2) Ligação ao painel de controle do forno ; 3) Termopares para medida de temperatura do forno ; 4) Ligação aos indicadores de temperatura ; 5) Tubo de aço inox ; 6) Chapa-molde ; 7) Anel de amianto para vedação ; 8) Termopar para medida de T_i ; 9) Ligação ao registrador de temperaturas ; 10) haste rígida de aço inox ; 11) Régua metálica milimetrada ; 12) Nivelador vertical .

forno são as seguintes:

- Potência : 1,8 KW
- Tensão : 110 V
- Altura útil : 160 mm
- Diâmetro útil: 70 mm
- Resistência elétrica : Kanthal A-1 ϕ 1,00 mm
- Temperatura máxima : 1300 °C

As resistências elétricas foram distribuídas - ao longo do forno em três zonas, cada uma com potência de 600 Watts . Estas foram controladas independentemente por meio - de chaves automáticas para controle de temperaturas marca - Robertshaw Controls Company de 110 V e 15 A, com a finalidade de manter todo dispositivo a uma temperatura constante.

O registro de temperatura de cada zona foi ob- tido através de um termopar de cromel-alumel de 1,2 mm de diâ- metro, protegido com bainha de silimanita . Os termopares es- tavam acoplados a três indicadores de temperatura marca Har- tmann & Braun , modelo Indim , com fundo de escala para 1200°C.

A figura III.2 mostra o circuito do painel de controle do forno , juntamente com a posição e a ligação dos termopares aos indicadores de temperatura .

Na parte central do forno adaptou-se um tubo de aço inoxidável de 60 mm de diâmetro , 160 mm de altura e 4 mm de espessura, cuja superfície interna foi pintada com re- cobrimento isolante comercial (Dycote 39), para evitar a micro- soldagem e facilitar a retirada de lingotes . Abaixo deste tu- bo foi fixado sob pressão, um molde circular feito de chapa de aço SAE 1020 de 2,5 mm de espessura e 75 mm de diâmetro , - refrigerado por um jato de água com vazão de 0,3 litros/seg.

O material foi fundido em um forno tipo mufla e em seguida o metal líquido foi transportado para o interior do dispositivo . A refrigeração somente era acionada quando se atingia superaquecimento nulo.

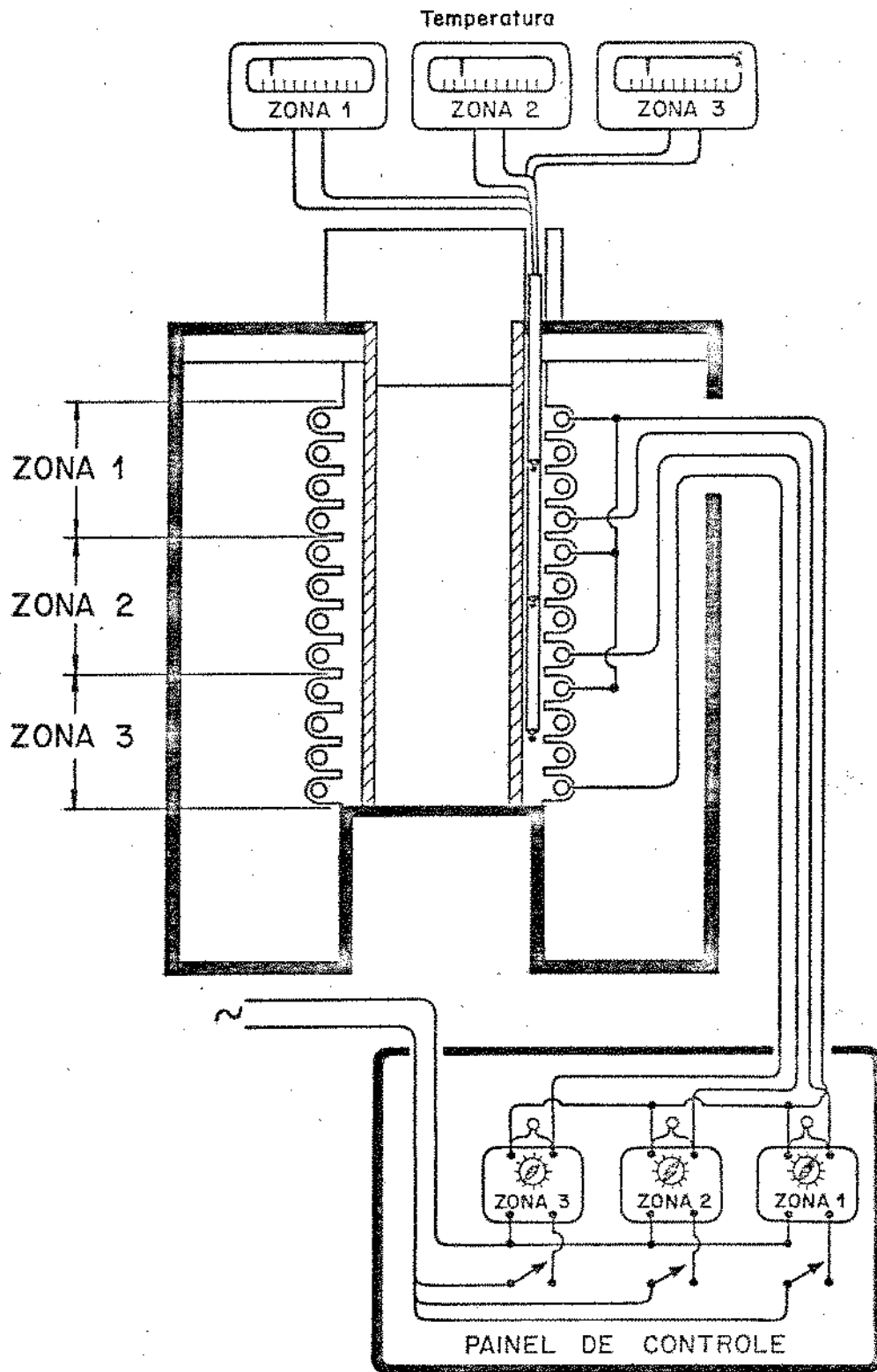


Figura III.2- Esquema do circuito elétrico do dispositivo de solidificação unidirecional .

O registro de temperatura do metal estudado foi realizado com termopar absoluto de imersão, feito de fios de cromel-alumel, com 0,4 mm de diâmetro, protegido com bainha de silimanita e com junta quente exposta. O termopar foi acoplado a um registrador potenciométrico de temperatura, marca PHILIPS, modelo PR 4011, com as seguintes especificações :

- Fundo de escala : 600 °C
- Precisão de leitura : ± 3 °C
- Velocidade do papel : 12.000 e 30.000 mm/h

A figura III.3 mostra a montagem do equipamento utilizado e a figura III.4 mostra elementos do dispositivo esquemmatizados na figura III.1.

As figuras III.5 (a,b e c) mostram lingotes de diferentes tipos de materiais, solidificados unidirecionalmente no dispositivo construído, comprovado a eficiência do equipamento e a unidirecionalidade da solidificação.

III.3- Técnicas de Medida de Temperatura, e de Avanço da In- terface Sólido-Líquido

O registro da temperatura $T_i = f(t)$, para cada tipo de interface metal-molde foi obtido, colocando-se junto a esta interface um termopar acoplado ao registrador. A refrigeração era acionada juntamente com o registrador no momento em que se atingia superaquecimento nulo. Da mesma forma foram obtidos os tempos necessários para a solidificação de uma espessura dada de metal, posicionando o termopar em pontos, cuja distância \bar{a} interface metal-molde era conhecida.

A figura III.6 mostra um exemplo obtido de um registro de temperatura $T_i = f(t)$ para a interface metal-molde recoberta com alumina. As figuras III.7 (a,b e c) mostram a obtenção dos tempos de solidificação para as espessuras

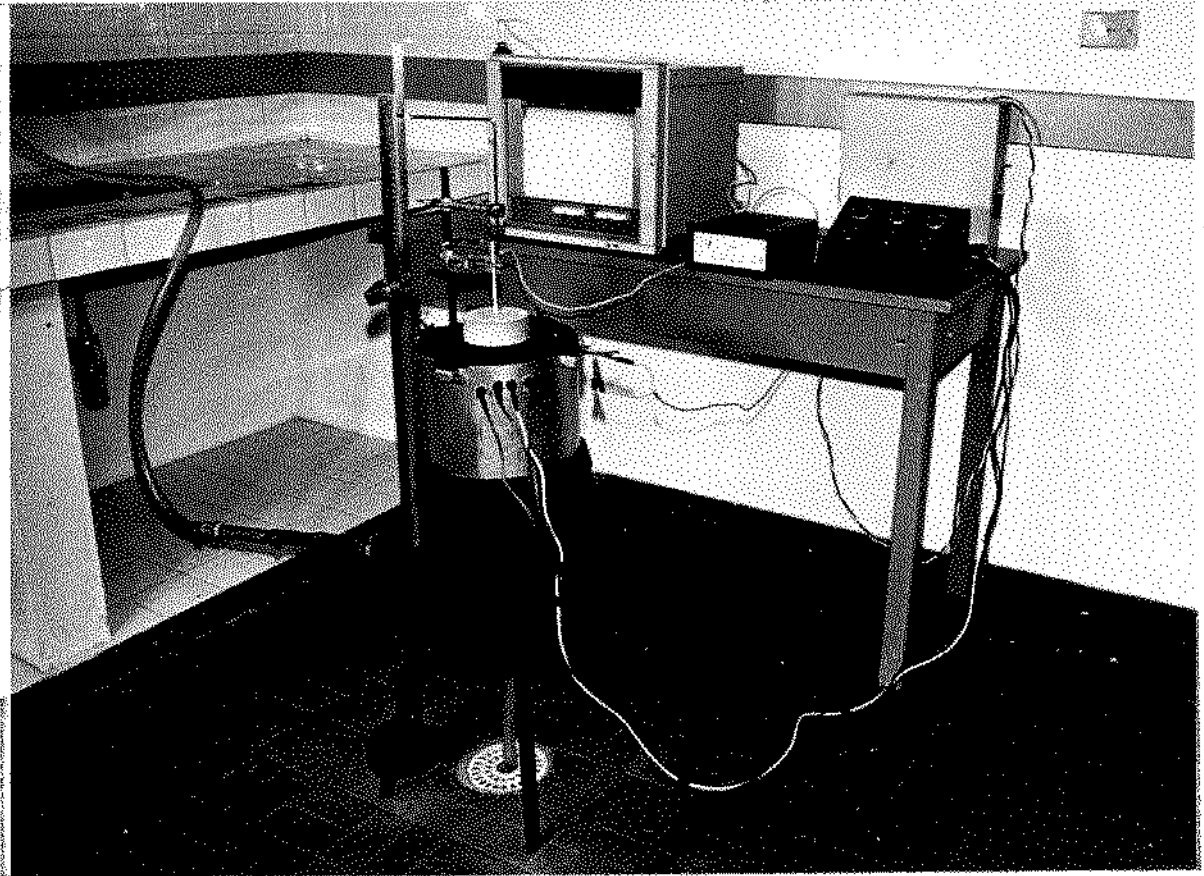


Figura III.3- *Montagem dos elementos utilizados na parte experimental deste trabalho.*



Figura III.4- *Elementos do dispositivo de solidificação - unidirecional esquematizados na figura III.1*



Figura III.5.a- Macroestrutura de um lingote de chumbo comercialmente puro, solidificado unidirecionalmente em molde polido (X 1,1).



Figura III.5.b- Macroestrutura de um lingote de zinco comercialmente puro solidificado unidirecionalmente em molde polido. (X 1,1)



Figura III.5.c- *Macroestrutura de um lingote de alumínio comercialmente puro solidificado unidirecionalmente em molde polido (X 1,1).*

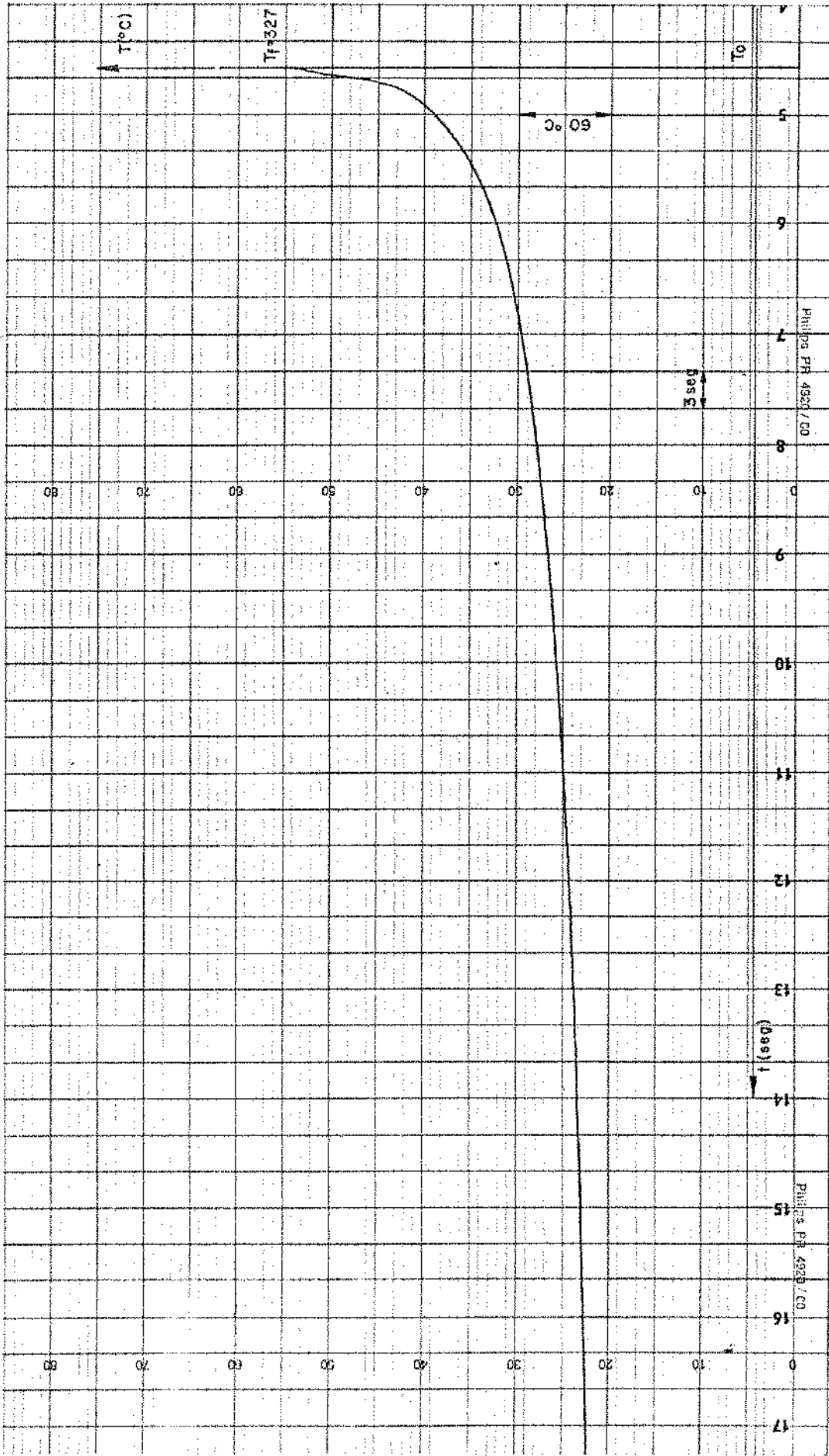


Figura III.6- Exemplo do registro da variação da temperatura da interface metal-molde (T_i) em função do tempo. Interface metal-molde recoberta com alumina.

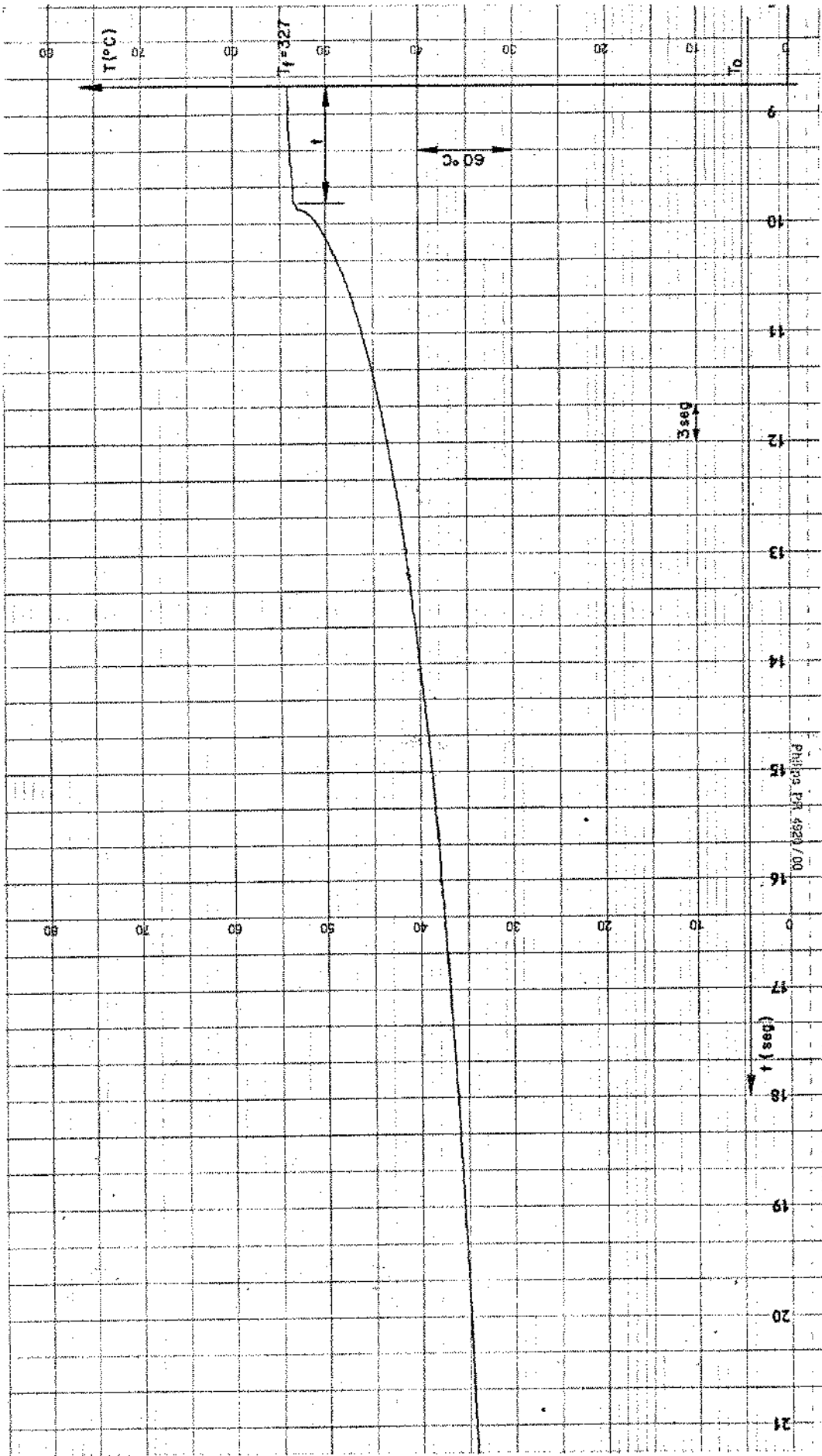


Figura III. 7.a- Registro da variação de temperatura a 1cm da interface metal-molde em função do tempo. Interface metal-molde recoberta com alumina.

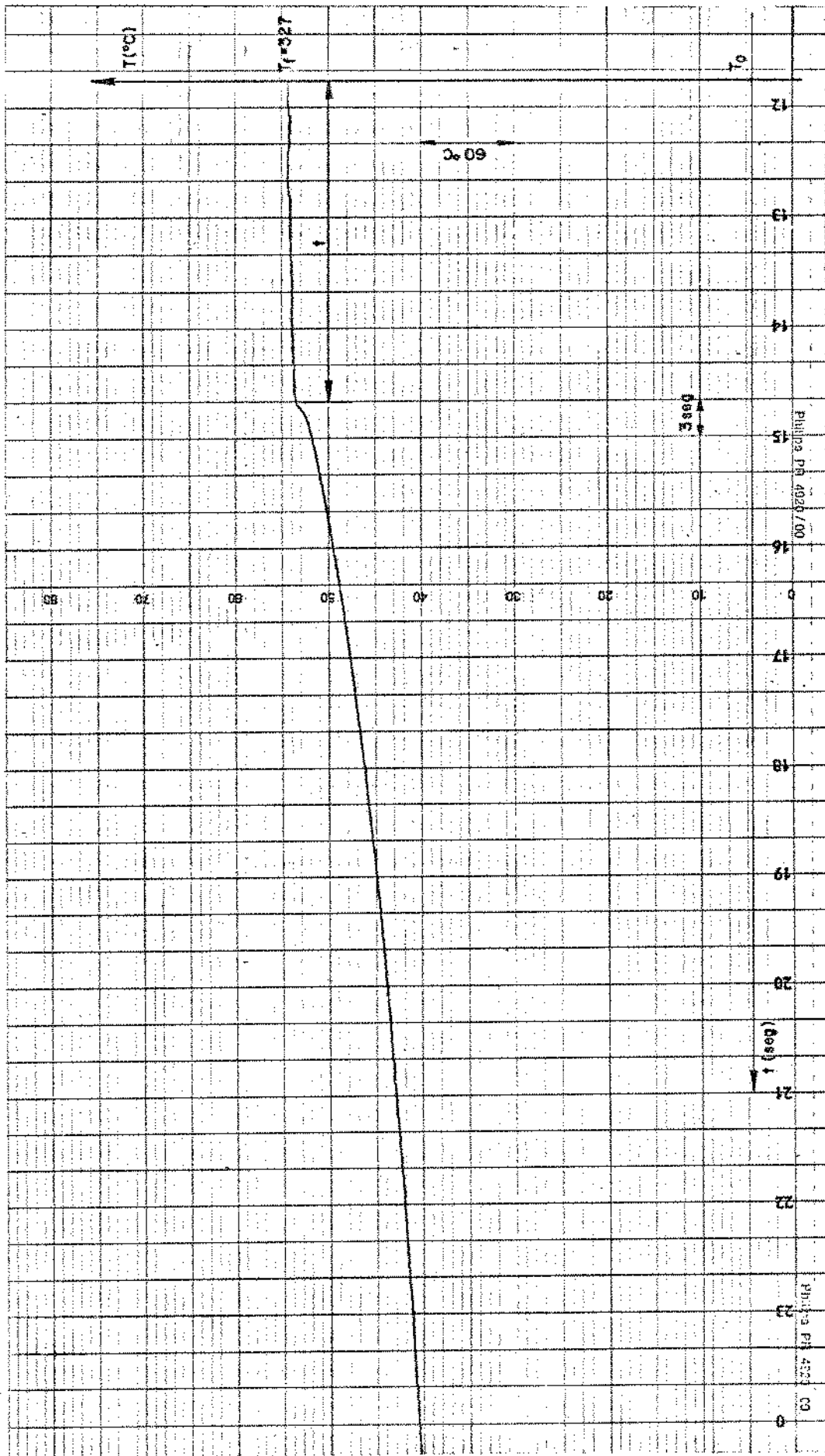


Figura III.7.b- Registro da variação de temperatura a 2 cm da interface metal-molde em função do tempo. Interface metal-molde recoberta com alumina.

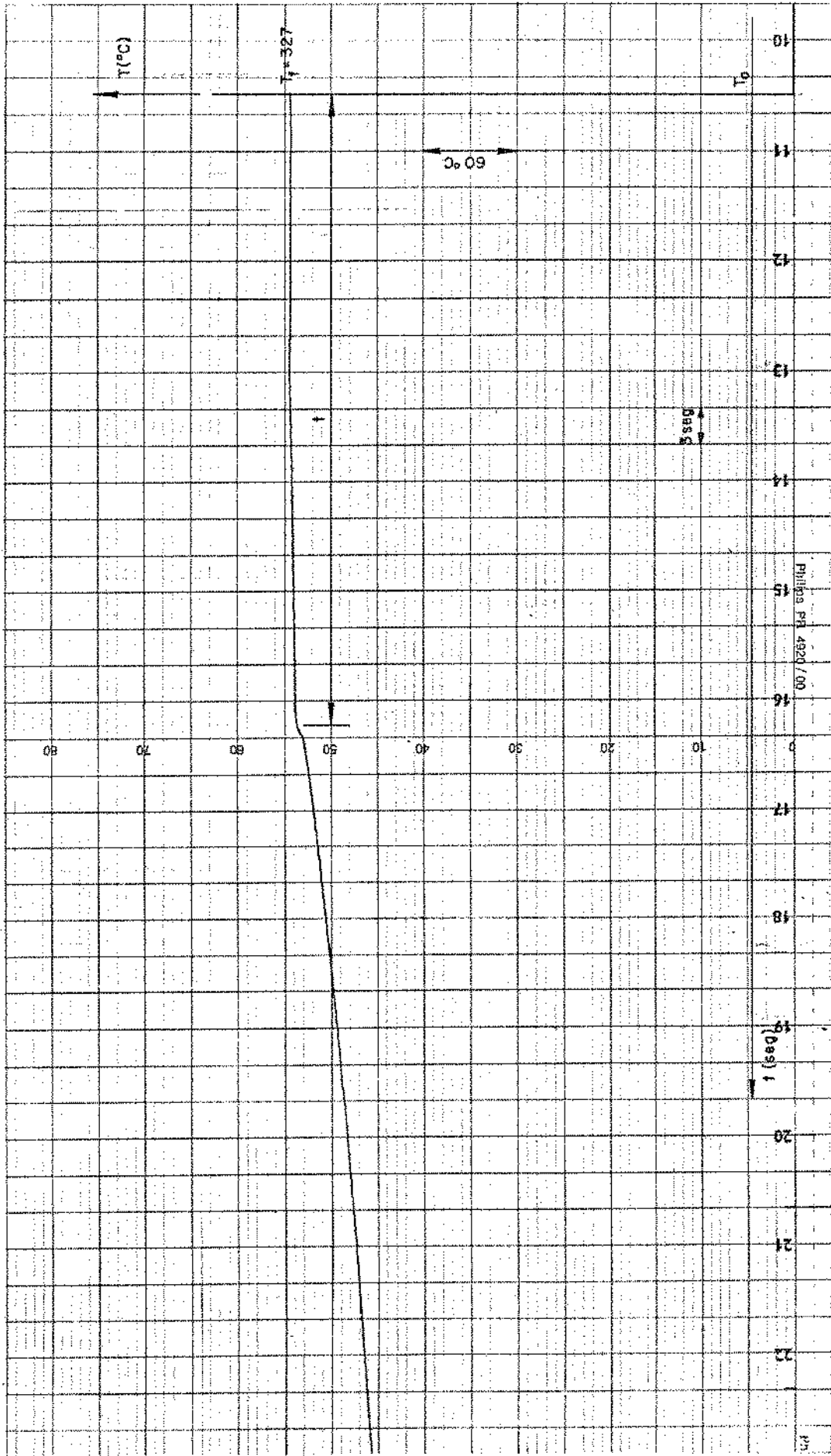


Figura III.7.c- Registro da variação de temperatura a 3 em da interface metal-molde em função do tempo. Interface metal-molde recoberta com alumina .

de 10,20 e 30 mm respectivamente a partir dos gráficos experimentais obtidos, para o mesmo tipo de recobrimento.

Foi utilizado amplamente o "dipstick", técnica já consagrada em diversos trabalhos de alto nível [10,20], para a medida do avanço da interface sólido líquido com o tempo $T = f(X)$. Esta técnica foi comprovada no presente trabalho pela termometria realizada.

III.4- Controle do Contato Térmico da Interface Metal-Molde

A eficiência do contato térmico da interface metal-molde é função de uma série de fatores dentre os quais, o que mais destaca é o estado superficial do molde. A presença de rugosidades, películas de óxidos, e principalmente películas de pinturas protetoras alteram sensivelmente a resistência térmica da interface metal-molde. Sendo possível a variação da eficiência do contato térmico pela aplicação de recobrimentos isolantes no presente trabalho, o molde de chapa de aço refrigerado por água, foi recoberto com uma camada de aproximadamente 100 micra de espessura dos seguintes recobrimentos.

- a. Alumina com granulação de diâmetro 1/4 de micra.
- b. Dycote 34, fabricação Foseco.
- c. Dycote 39, fabricação Foseco.
- d. Negro de fumo.

A aplicação da alumina, Dycote 34 e Dycote 39 foi feita sobre o molde aquecido a uma temperatura de aproximadamente 150°C. Estes recobrimentos foram diluídos em água e aplicados por meio de uma pistola pulverizadora. O negro de fumo, foi obtido, e depositado na superfície do molde, através

da fuligem desprendida durante a queima do benzeno.

III. 5- Macrografias.

Os lingotes de chumbo utilizados nas medidas experimentais, foram seccionados no sentido longitudinal . Em seguida foram polidos manualmente com lixas de grama 180 , - 220, 400 e 600 com extremo cuidado, para evitar possível en cruamento e recristalização da estrutura.

Os reagentes químicos utilizados para o macro-ataque do chumbo foram :

Ácido Nitríco conc. - 20 ml

Água Destilada - 80 ml

(Tempo de ataque aproximado - 30 minutos)

Para comprovar a eficiência e a unidirecionalidade da estrutura dos lingotes a serem obtidos no dispositivo experimental construído, foram utilizados em ensaios preliminares o alumínio e o zinco comercialmente puros. Os lin gotes destes materiais foram seccionados e polidos da mesma forma citada anteriormente.

Os reagentes químicos utilizados para o macro-ataque foram :

- Para alumínio comercialmente puro

Ácido Clorídrico conc.- 64 ml

Ácido Nítrico conc. - 32 ml

Ácido Fluorídrico (c. 40%) - 4 ml

(Tempo de ataque aproximado - 20 segundos)

- Para zinco comercialmente puro

Ácido Clorídrico - 50 ml

Água Destilada - 50 ml

(Tempo de ataque aproximado - 15 segundos)

Foi utilizado o método planimétrico de *Jefferies* [21] para a medida do tamanho de grão dos lingotes de chumbo. Essas medidas foram tomadas da base do lingote (zona coquilhada) e em uma secção transversal a 5 cm acima desta base. (zona colunar).

C A P Í T U L O . I V

RESULTADOS E DISCUSSÃO

IV.1- Apresentação Geral dos Resultados

Os resultados experimentais obtidos na solidificação unidirecional do chumbo comercialmente puro, para os diversos tipos de recobrimentos utilizados no presente trabalho, encontram-se agrupadas nas tabelas IV (a,b,c e d)

Espessura Solidificada x (cm)	Tempo (Dipstik) t (seg)	Tempo (Termopar) t (seg)	Temperatura da Interface T_i ($^{\circ}C$)
0,25	1,9	-	256,0
0,5	4,0	-	233,5
1,0	8,4	9,4	209,0
1,5	14,0	-	191,5
2,0	24,0	25,9	175,5
2,5	35,0	-	164,5
3,0	49,0	51,4	155,0
3,5	65,0	-	147,0
4,0	80,0	-	142,0
4,5	98,0	-	138,0
5,0	118,0	-	134,0
5,5	139,0	-	131,0
6,0	160,0	-	128,0

Tabela IV.a- Resultados obtidos para a interface metal-molde recoberta com alumina de granulação de diâmetro $1/\mu$, superaquecimento nulo e $T_0 = 27^{\circ}C$.

Espessura Solidificada X (cm)	Tempo (Dipstick) t (seg)	Temperatura da Interface T_i ($^{\circ}\text{C}$)
0,25	1,7	250,0
0,5	3,5	229,0
1,0	8,0	196,0
1,5	13,5	176,0
2,0	23,0	161,5
2,5	33,5	152,0
3,0	47,0	144,0
3,5	62,5	137,0
4,0	77,5	131,0
4,5	95,0	126,5
5,0	114,5	122,5
5,5	135,0	119,0
6,0	156,0	116,0

Tabela IV.b- Resultados obtidos para a interface metal-molde recoberta com negro de fumo, superaquecimento nulo e $T_0 = 25^{\circ}\text{C}$.

Espessura Solidificada x (cm)	Tempo (Dipstick) t (seg)	Temperatura da Interface T_i ($^{\circ}\text{C}$)
0,25	1,4	250,0
0,5	3,0	226,0
1,0	7,0	187,0
1,5	12,5	165,0
2,0	21,5	149,0
2,5	31,5	141,5
3,0	44,5	135,0
3,5	60,0	128,5
4,0	74,5	123,0
4,5	92,0	118,0
5,0	112,0	113,0
5,5	130,5	109,5
6,0	151,5	107,5

Tabela IV.c- Resultados obtidos para a interface metal-molde recoberta com Dycote 39, superaquecimento nulo e $T_0 = 25^{\circ}\text{C}$.

Espessura Solidificada x (cm)	Tempo (Dipstick) t (seg)	Tempo (Termopar) t (seg)	Temperatura da Interface T_i ($^{\circ}\text{C}$)
0,25	1,0	-	250,0
0,5	2,2	-	220,5
1,0	5,5	6,3	177,0
1,5	9,5	-	154,5
2,0	16,0	16,8	139,0
2,5	24,5	-	129,5
3,0	36,0	36,9	120,5
3,5	49,5	-	114,0
4,0	64,0	-	108,5
4,5	80,0	-	104,0
5,0	97,0	-	100,0
5,5	114,0	-	96,0
6,0	134,0	-	94,0

Tabela IV.d- *Resultados obtidos para a interface metal-molde recoberta com Dycote 34, superaquecimento nulo e $T_0 = 25^{\circ}\text{C}$.*

IV.2- Influência dos Recobrimentos na Cinética de Solidificação

Foram levantadas as curvas de espessura solidificada com o tempo de solidificação para o chumbo comercialmente puro, sem superaquecimento, em diferentes condições de contato térmico da interface metal-molde. A figura IV.1 mostra a influência dos revestimentos de molde utilizados neste trabalho, na cinética de solidificação, evidenciando que a alumina foi o recobrimento que reduziu com maior intensidade a eficiência do contato térmico da interface metal-molde, seguindo-se os recobrimentos de negro de fumo, Dycote 39 e Dycote 34.

IV.3- Influência dos Recobrimentos de Molde no Valor do Coeficiente h_i .

A figura IV.2 mostra as velocidades de solidificação, para as diferentes condições de contato térmico da interface metal-molde. Estas curvas foram obtidas por derivação gráfica da figura IV.1. (ver figura II.2, capítulo II). Pode-se notar que as velocidades de solidificação são praticamente da mesma ordem de grandeza, para valores da espessura solidificada superiores a 4 cm, sendo que após este valor, independe do tipo de recobrimento utilizado na interface metal-molde.

Os valores da velocidade inicial V_o , do processo de solidificação, para as diferentes condições de contato térmico da interface metal-molde, podem ser obtidas da figura IV.2. Substituindo-se estes valores, na equação (11) desenvolvida no capítulo II, determina-se os valores do coeficiente de transmissão de calor da interface metal-molde (h_i)

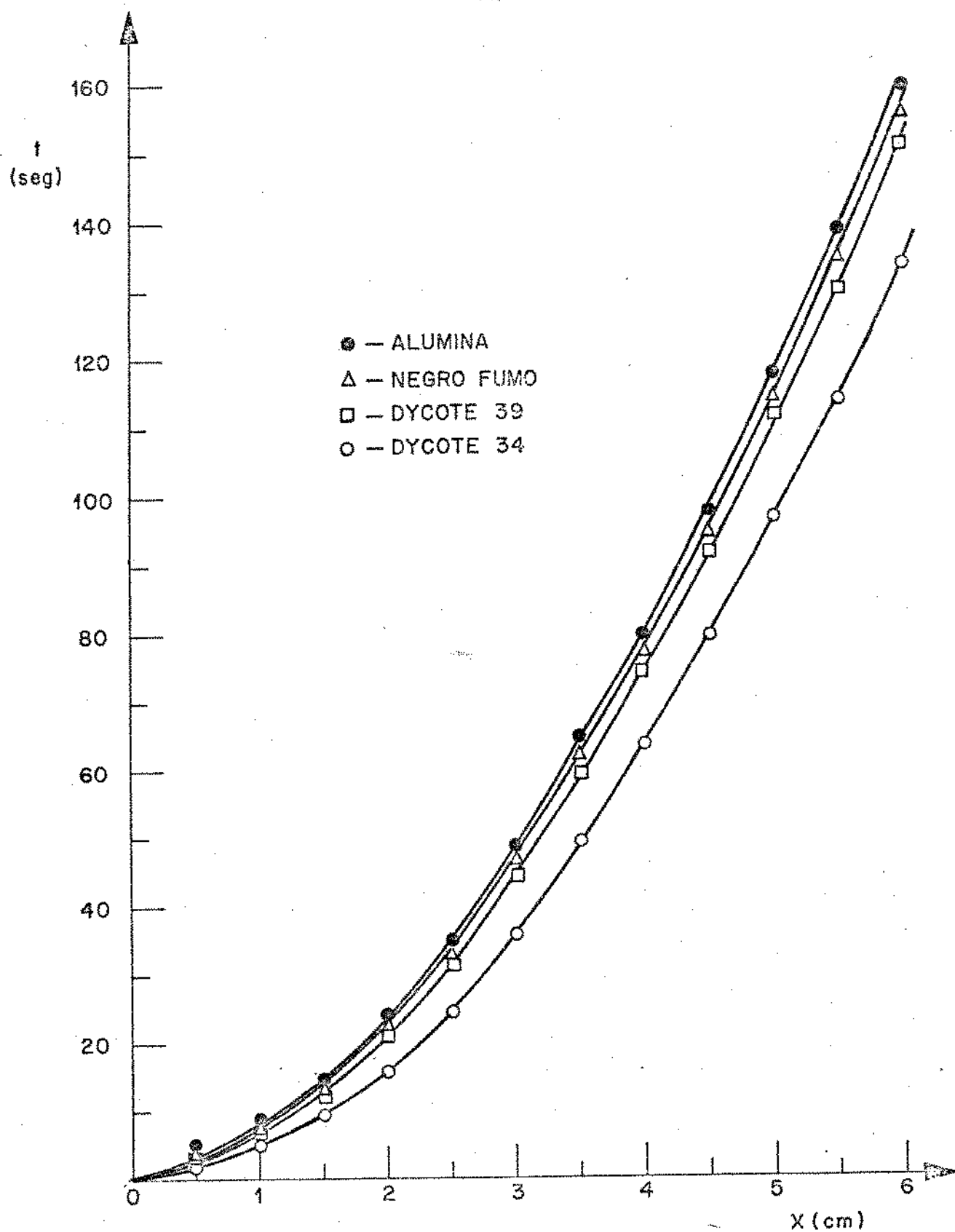


Figura IV.1- *Curvas experimentais da cinética de solidificação do chumbo comercialmente puro, em molde refrigerado, sob diferentes condições de contato térmico. Tempo t necessário para solidificar uma espessura X , de metal sem superaquecimento.*

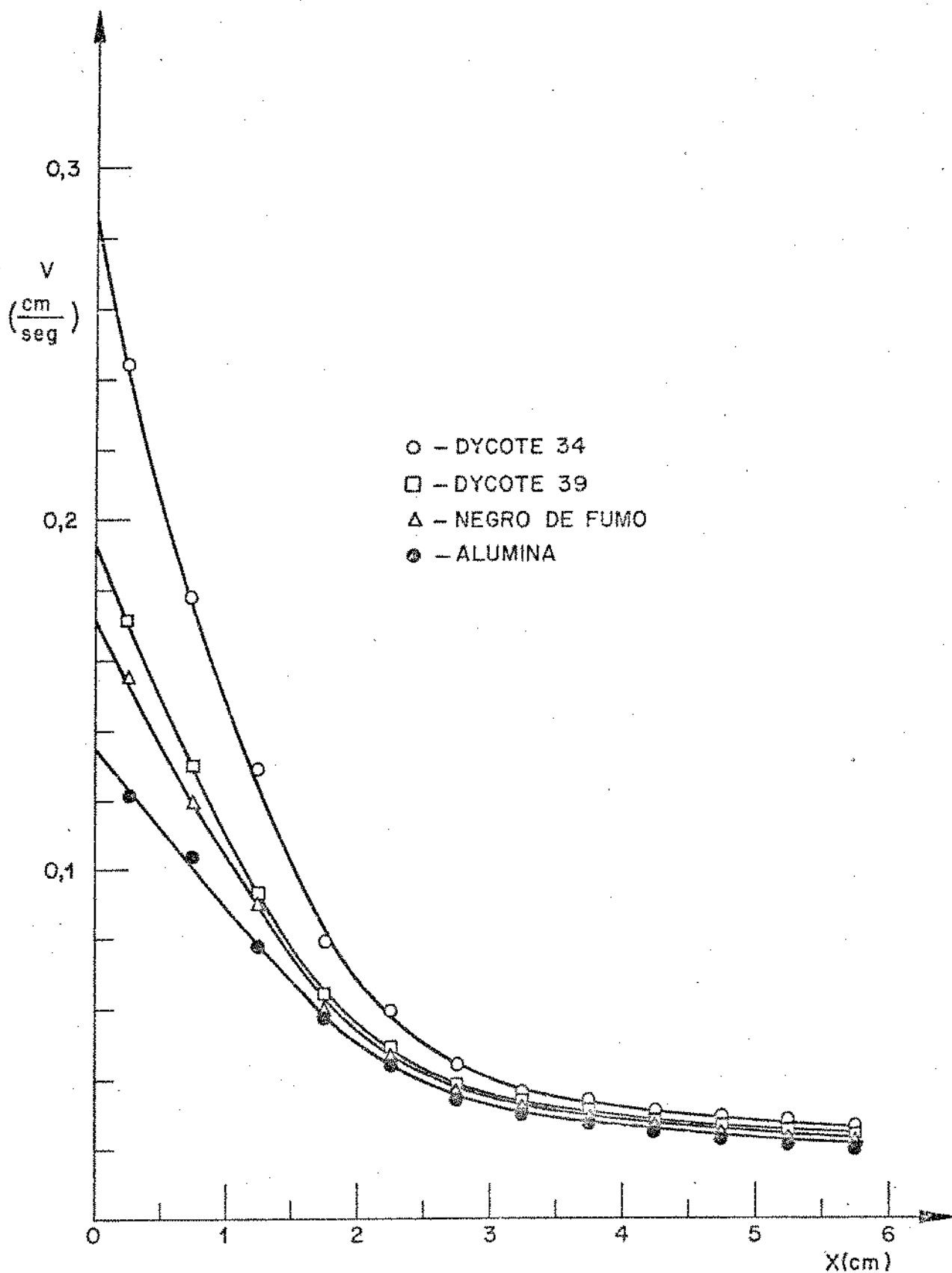


Figura IV.2- *Variação da velocidade de solidificação (V) em função da espessura solidificada (X), para o chumbo comercialmente puro, solidificado em um molde refrigerado, sob diversas condições de contato térmico da interface metal-molde e superaquecimento nulo.*

A tabela IV. 5 mostra os valores de h_i calculados para cada tipo de interface metal-molde.

Interface Metal-Molde	Velocidade Inicial de Solidificação V_o (cm/seg)	Coefficiente de Transmissão de Calor da Interface Metal-Molde. h_i (cal/cm ² . °C. seg)
Alumina	136×10^{-3}	30×10^{-3}
Negro de Fumo	171×10^{-3}	38×10^{-3}
Dycote 39	194×10^{-3}	43×10^{-3}
Dycote 34	285×10^{-3}	63×10^{-3}

Tabela IV. 5 - Valores do coeficiente de transmissão de calor da interface metal-molde (h_i), calculados a partir da velocidade inicial de solidificação para o chumbo comercialmente puro.

Deve-se salientar no entanto que os valores calculados acima não representam somente o coeficiente h_i , mas sim um coeficiente de transmissão de calor global de um sistema formado pelo fluido de refrigeração, pelo molde e pelo recobrimento utilizado, onde :

$$h_{global} = \frac{1}{R_{global}} \quad (21)$$

Entretanto pode-se mostrar que em um molde eficientemente refrigerado a influência do fluido refrigerante e

do molde tornam-se desprezíveis em relação a resistência térmica do recobrimento. Considerando a solidificação unidirecional de um metal em molde refrigerado com aplicação de um recobrimento como mostra a figura IV. 3, pode-se verificar - que a resistência térmica global do sistema é igual a :

$$R_{global} = R_{\omega} + R_M + R_i \quad (22)$$

sendo :

R_{ω} = Resistência térmica da interface fluido refrigerante -chapa molde, dada pela relação :

$$R_{\omega} = \frac{1}{h_{\omega}} \quad (23)$$

onde :

$$h_{\omega} = 3 \times 10^{-3} v_{\omega}^{0,8} \quad (24)$$

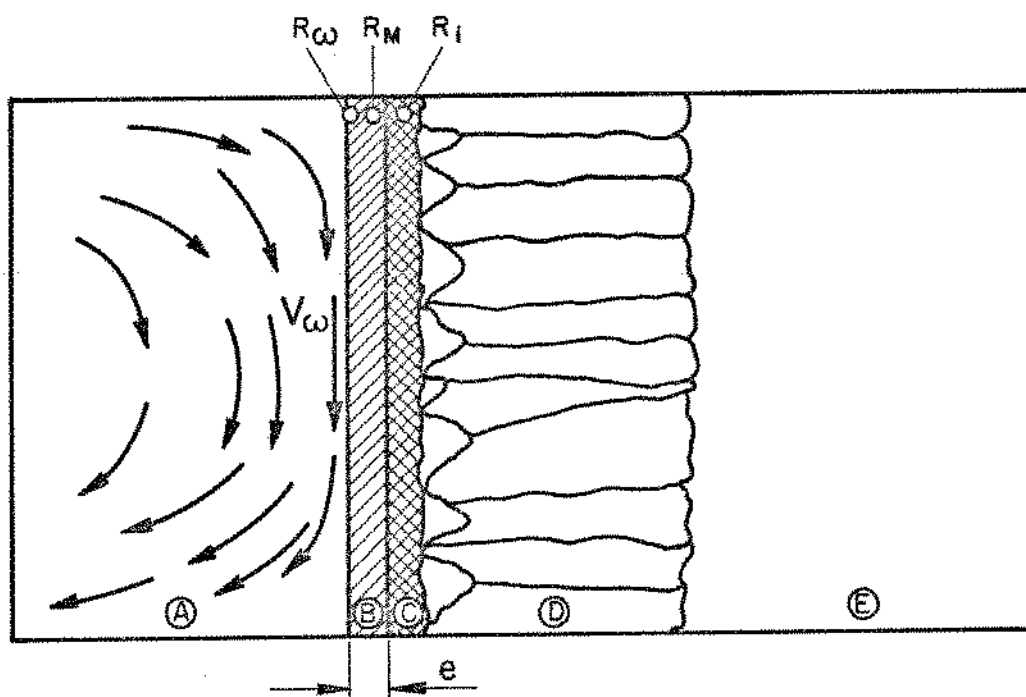
Os valores de R_{ω} para moldes eficientemente refrigerados é da ordem de 10^{-1} C G S [22].

R_M = Resistência térmica do molde dada pela relação :

$$R_M = \frac{e}{K_M} \quad (25)$$

Os valores de R_M para moldes de chapa de aço estão na ordem de 10^0 C G S .

R_i = Resistência térmica da interface metal-molde dada pela relação :



- A – FLUIDO DE REFRIGERAÇÃO
- B – CHAPA MOLDE DE ESPESSURA e
- C – RECOBRIMENTO ISOLANTE
- D – METAL SOLIDO
- E – METAL LIQUIDO
- R_{ω} – RESISTENCIA TERMICA FLUIDO – CHAPA MOLDE
- R_M – RESISTENCIA TERMICA DA CHAPA MOLDE
- R_i – RESISTENCIA TERMICA DA INTERFACE METAL – METAL
- V_{ω} – VELOCIDADE DO FLUIDO DE REFRIGERAÇÃO

Figura IV.3- Esquema mostrando as resistências térmicas que atuam em um sistema metal-molde refrigerado com aplicação de recobrimento isolante.

$$R_i = \frac{1}{h_i} \quad (26)$$

Os valores de R_i , para moldes com aplicação de recobrimentos isolantes são da ordem de 10^2 C G S.

Como $R_i \gg R_w, R_M$ pode-se verificar sem erros apreciáveis que :

$$R_i = R_{global} \quad (27)$$

portanto :

$$h_i = h_{global} \quad (28)$$

Deve-se salientar ainda que a natureza física do contato térmico é bastante complexa podendo variar de ponto a ponto na superfície do molde , e por este motivo os valores calculados na tabela IV. 5, representam valores médios e globais do coeficiente de transmissão de calor da interface metal-molde (h_i).

IV. 4 - Influência dos Recobrimentos da Molde na Temperatura da Interface Metal- Molde .

A figura IV. 4 mostra a variação da temperatura da interface metal-molde em função do tempo de solidificação para diferentes condições de contato térmico. Observa-se na figura dois regimes diferentes de temperatura para cada tipo de interface. Inicialmente uma queda brusca de temperatura, tanto maior quanto maior o coeficiente de transmissão de calor h_i , passando para uma queda menos acentuada, e praticamente constante para qualquer valor do

(127)

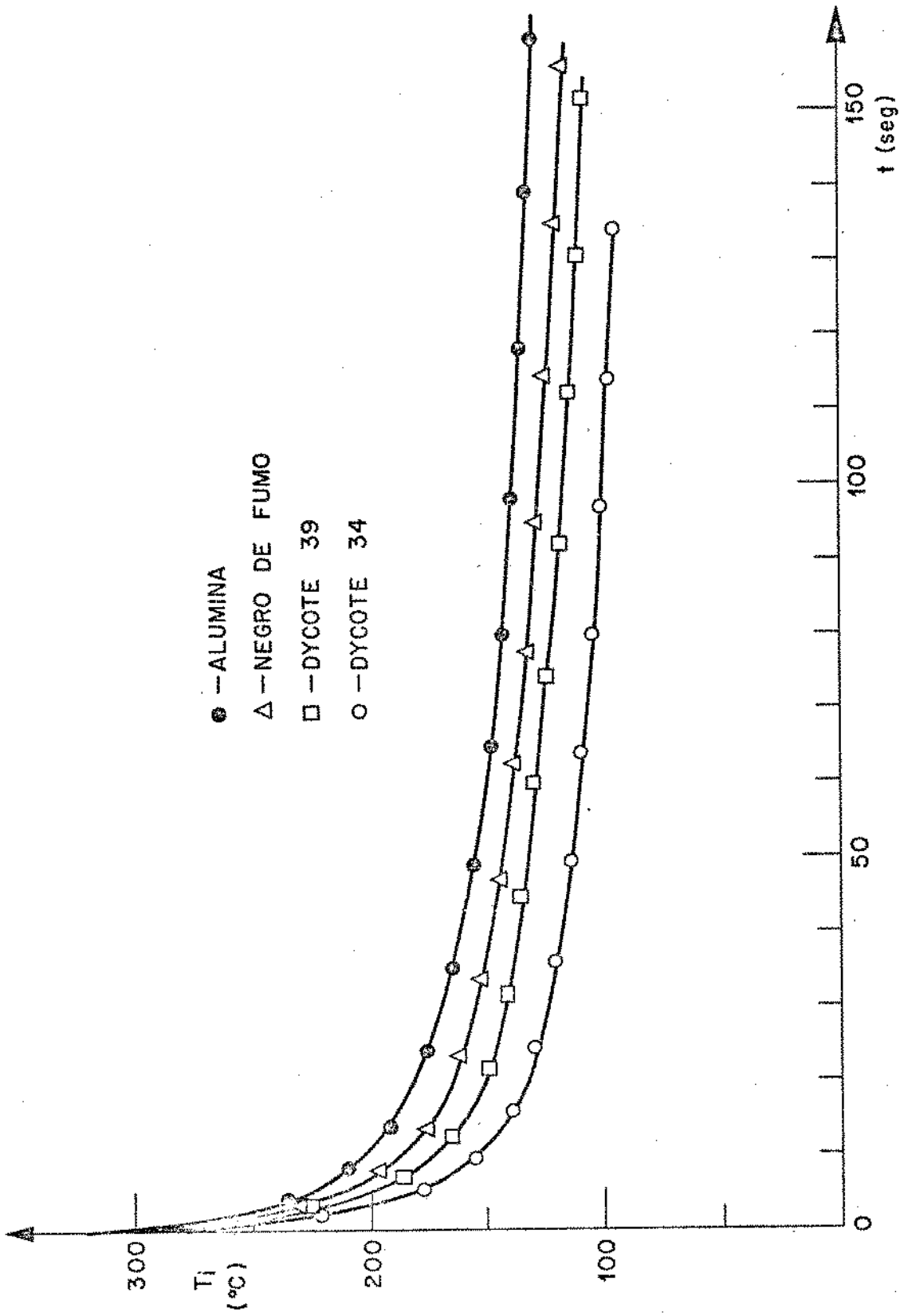


Figura IV.4- Variação da temperatura da interface metal-molde (T_i) em função do tempo de solidificação para diversas condições de contato térmico da interface metal-molde (h_i).

coeficiente de transmissão de calor da interface metal-molde (h_i).

IV. 5 - Influência dos Recobrimentos de Molde no Tamanho de Grão da Macroestrutura .

A tabela IV.6 mostra o número de grãos por unidade de área da zona coquilhada e colunar dos lingotes de chumbo comercialmente puro, solidificados unidirecionalmente em função dos coeficientes de transmissão de calor da interface metal-molde.

h_i (C G S)	Densidade de Grão (Grãos/cm ²)	
	Zona Coquilhada	Zona Colunar (5 cm acima da base do lingote)
30×10^{-3}	9 - 10	2,5 - 3,0
63×10^{-3}	15 - 16	3,0 - 3,5

Tabela IV.6- Número de grãos por unidade de área da zona coquilhada e colunar dos lingotes de chumbo comercialmente puro, solidificados unidirecionalmente em função do coeficiente de transmissão de calor da interface metal-molde.

Através desta tabela pode-se observar que houve uma brusca diminuição de densidade de grãos da zona coquilhada para a zona colunar dos lingotes obtidos. Observa-se também que a variação do número de grãos da zona coquilhada que era de 9 a 16 grãos/cm² para diferentes valores do coefi-

coefficiente de transmissão de calor da interface metal-molde (h_i), passa a ter variações da ordem de 2,5 a 3,5 grãos/cm² na zona colunar, evidenciando novamente o fato de que nos primeiros instantes da solidificação o valor do coeficiente h_i é mandatório na formação da macroestrutura dos lingotes, e após um determinado valor da espessura solidificada a influência deste coeficiente torna-se praticamente desprezível e os grãos crescem com velocidades de mesma ordem de grandeza, qualquer que seja o recobrimento utilizado.

As figuras IV.5 (a,b,c e d) mostram as macroestruturas dos lingotes de chumbo comercialmente puro, solidificados unidirecionalmente. Observa-se nesta figura a variação da macroestrutura para os diversos tipos de recobrimentos utilizados neste trabalho.

IV.6- Aplicabilidade do Modelo Unidirecional Parabólico

Para melhor manipulação dos resultados a equação (12) de Pires, Prates e Biloni [17] foi adimensionalizada. Tomando-se a equação :

$$t = \frac{1}{4\phi^2 a_s^2} X^2 + \frac{H d_s}{h_i (T_f - T_o)} X \quad (29)$$

e multiplicando-se todos os termos por $(h_i/b_s)^2$ tem-se :

$$\left(\frac{h_i}{b_s} \right)^2 t = \frac{h_i^2}{4\phi^2 a_s^2 b_s^2} X^2 + \frac{H d_s h_i^2}{h_i (T_f - T_o) b_s^2} X \quad (30)$$



Figura IV.5.a- Macroestrutura de um lingote de chumbo comercialmente puro, solidificado unidirecionalmente em molde refrigerado com aplicação de Dycote 34 .



Figura IV.5.b- Macroestrutura de um lingote de chumbo comercialmente puro, solidificado unidirecionalmente em molde refrigerado com aplicação de Dycote 39.



Figura IV.5.c- Macroestrutura de um lingote de chumbo comercialmente puro, solidificado unidirecionalmente em molde refrigerado com aplicação de negro de fumo.



Figura IV.5.d- Macroestrutura de um lingote de chumbo comercialmente puro, solidificado unidirecionalmente em molde refrigerado com aplicação de alumina.

COMO

$$\left(\frac{h_i}{b_s} \right)^2 t = t^* = \text{tempo adimensional} ; \quad (31)$$

$$\frac{h_i X}{a_s b_s} = X^* = \text{espessura adimensional} ; \quad (32)$$

$$\frac{H}{c_s (T_f - T_o)} = H^* = \text{Calor latente adimensional} ; \quad (33)$$

a equação (30) resulta em :

$$t^* = \left(\frac{X^*}{2\phi} \right)^2 + H^* X^* ; \quad (34)$$

Para o chumbo comercialmente puro a equação (34) pode ser descrita por :

$$t^* = 0,47 X^{*2} + 0,65 X^* \quad (35)$$

A figura IV. 6 mostra a curva representativa do tempo de solidificação adimensional, com a espessura solidificada adimensional para o chumbo comercialmente puro. Esta curva foi levantada por meio de uma traçadora de gráficos HP 9862-A acoplada a uma calculadora HP 9810-A. Na mesma figura encontram-se os pontos obtidos experimentalmente, também adimensionalizados por meio das equações (31) e (32).

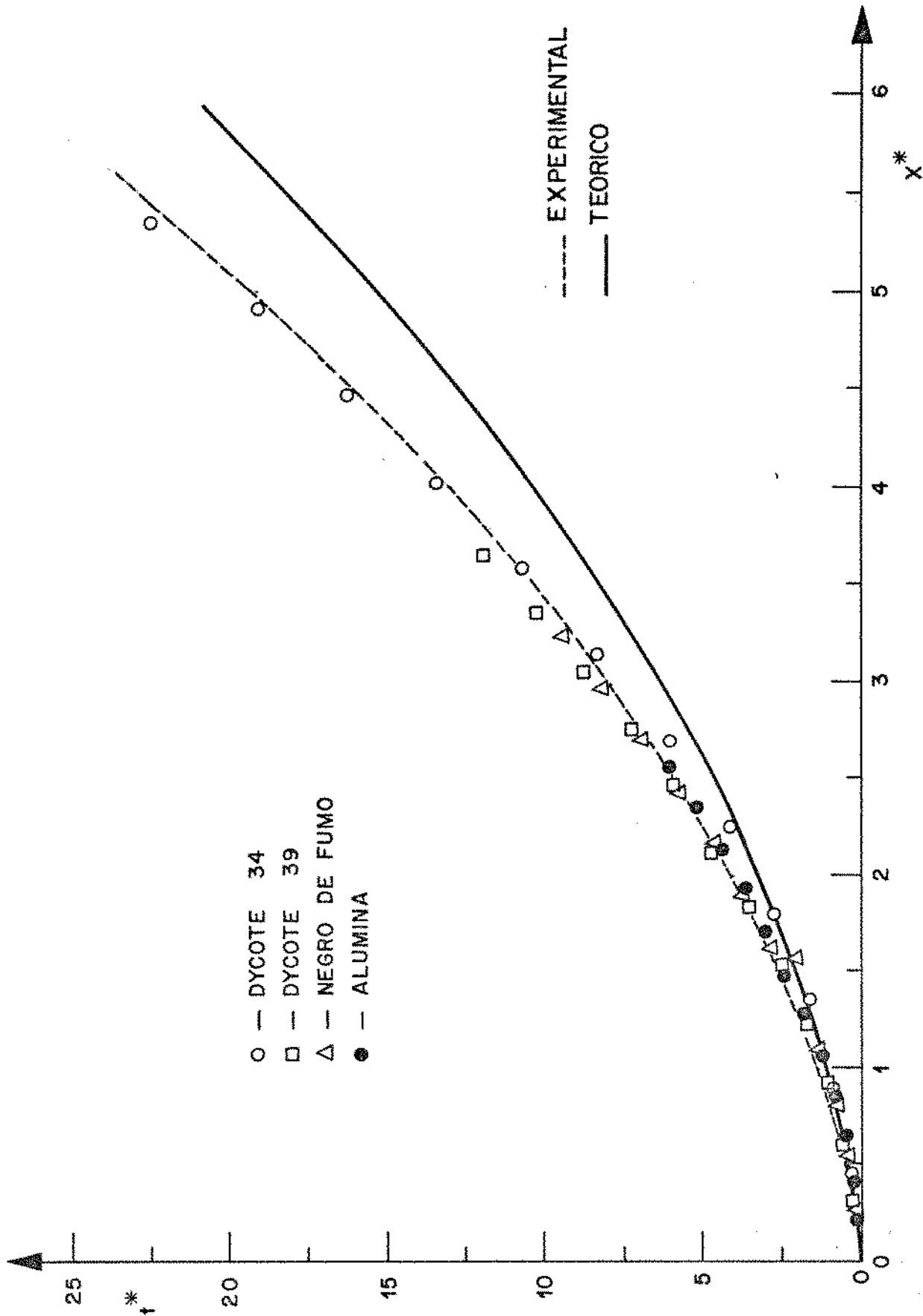


Figura IV.6- Variação do tempo de solidificação em função da espessura solidificada, apresentados em sua forma adimensional. Curva representativa do modelo unidirecional - parabólico e curva obtida por regressão dos pontos experimentais .

A figura mencionada mostra que a equação (12) de *Pires, Prates e Biloni* [17] é quantitativamente representativa somente para pequenas espessuras de chumbo solidificado unidirecionalmente em moldes com aplicação de recobrimentos isolantes. Para maiores espessuras de material solidificado a diferença na determinação do tempo de solidificação através da equação (12) em comparação com os resultados práticos aumenta progressivamente.

Fazendo-se uma análise das condições impostas aos trabalhos experimentais para verificação da equação utilizada, vale ressaltar que outros fatores interferiram no processo de solidificação de maneira a aumentar a diferença existente entre a parte teórica e a parte experimental, como por exemplo a formação de um pequeno "gap" de ar entre o metal e o molde, provocado pela contração volumétrica do metal. Este "gap" de ar não é previsto pela equação em questão e com toda certeza, faz aumentar significativamente a resistência térmica da interface metal-molde durante a solidificação.

Como para grandes espessuras solidificadas o modelo unidirecional parabólico mostra uma não coincidência com os valores experimentais é possível acrescentar mais um fator na equação (35) de maneira a tornar desprezíveis as diferenças dos resultados na determinação do tempo de solidificação. Este fator de correção é de 1,27 e foi obtido a partir da regressão dos pontos experimentais. A validade da utilização deste fator está restrita às condições impostas nas experiências realizadas, ou seja, solidificação unidirecional do chumbo comercialmente puro sem superaquecimento em moldes refrigerados com aplicação de recobrimentos isolantes.

A fórmula pode ser desenvolvida da seguinte maneira :

$$t^* = F. (0,47 X^{*2} + 0,65 X^*) \quad (36)$$

onde

$$F = 1,27$$

Para moldes com aplicação dos seguintes recobrimentos : Alumina, Negro de Fumo, Dycote - 39 e Dycote 34.

A figura IV. 6 apresenta a correção proposta sob forma gráfica .

IV. 7- Aplicabilidade do Perfil Térmico Linear

A relação que descreve a temperatura da interface metal-molde (T_i), em função da espessura solidificada \bar{x} é representada pela equação (19)

$$\frac{T_i - T_o}{T_f - T_o} = \frac{1}{1 + h_i \bar{x}/K_s}$$

sabendo-se que :

$$\frac{h_i \bar{x}}{K_s} = x^* = \begin{array}{l} \text{Espessura solidificada} \\ \text{adimensional} \end{array} \quad (37)$$

e

$$\frac{T_i - T_o}{T_f - T_o} = T_i^* = \begin{array}{l} \text{Temperatura da interface} \\ \text{metal-molde adimensional} \end{array} \quad (38)$$

a equação (19) pode ser escrita na sua forma adimensional, - onde :

$$T_i^* = \frac{1}{1 + X^*} \quad (39)$$

A figura IV. 7 mostra graficamente a variação da temperatura da interface metal-molde adimensional em função da espessura solidificada adimensional. Esta curva foi levantada por meio de uma traçadora de graficos HP 9862-A - acoplada a uma calculadora HP 9810-A. Observa-se que o valor de T_i^* decresce assintoticamente, tendendo a zero, para altos valores de X^* . Esta afirmação mostra que o valor da temperatura da interface metal-molde (T_i) vide equação - (38) , cai ao valor da temperatura do molde quando se trabalha com sistemas metal-molde refrigerados. A figura IV. 7 apresenta ainda, os pontos obtidos experimentalmente também adimensionalizados, para o caso da solidificação unidirecional do chumbo comercialmente puro.

Comparando-se os pontos experimentais com o modelo analítico proposto, verificou-se que este último satisfaz de uma forma razoável a variação da temperatura da interface metal-molde, para todos os recobrimentos utilizados , a menos de certos desvios para o caso de grandes espessuras solidificadas. No caso de pequenas espessuras de material solidificado, observa-se valores de T_i^* menores do que a prevista pelo modelo. Como as temperaturas da interface metal-molde, descritas pelo modelo linear são as menores que poderiam ocorrer em qualquer caso de solidificação unidirecional em sistemas metal-molde refrigerados, é provável que estes desvios tenham ocorrido devido ao fato de que foram considerados para efeito de cálculo valores médios das propriedades físicas do metal durante a solidificação , quando na realidade alguns valores tais como os de K_s , ρ_s , e d_s variam com a temperatura .

A figura IV.8 mostra os perfis térmicos obtidos experimentalmente para várias espessuras solidificadas-

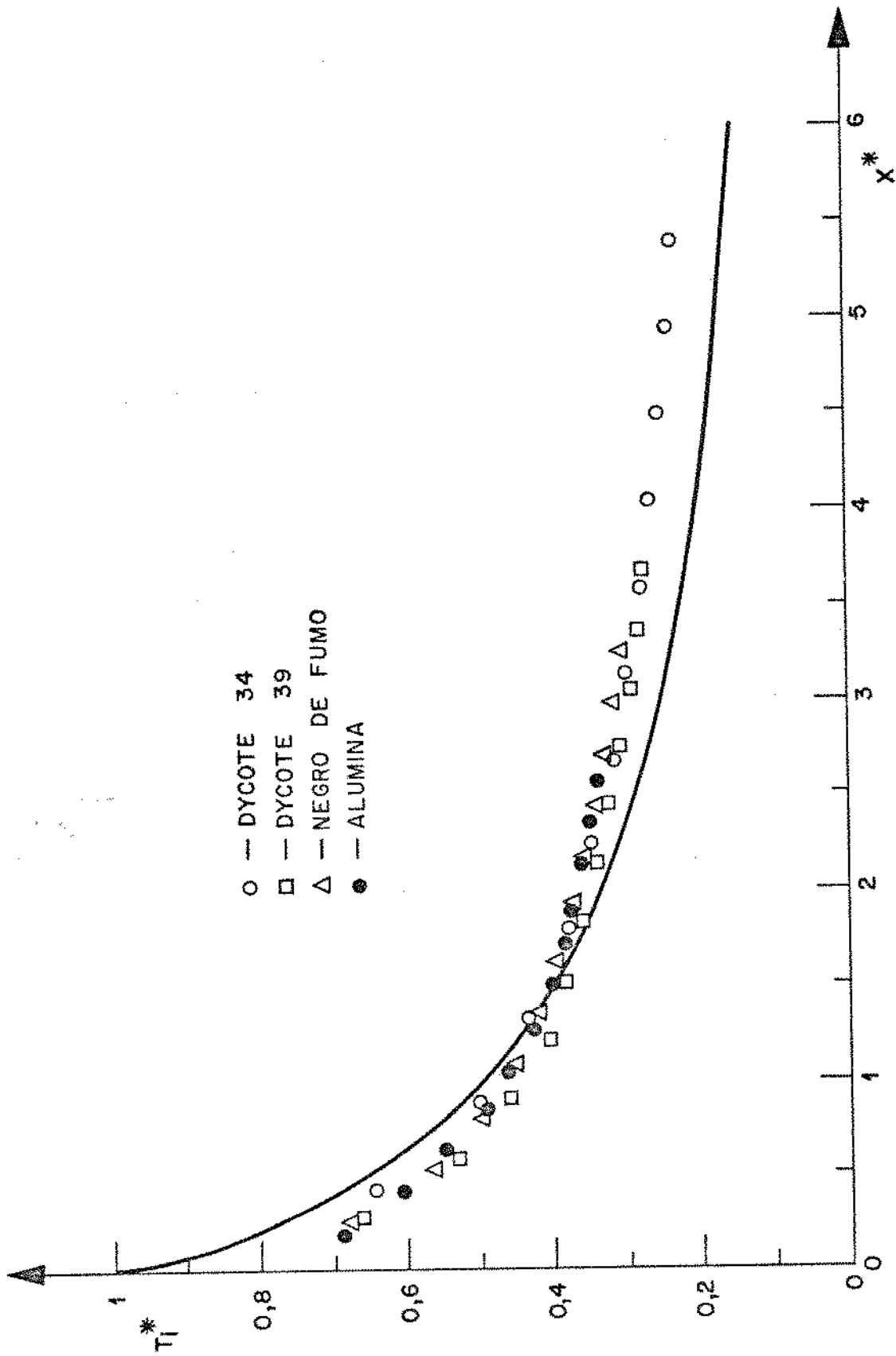


Figura IV.7- Variação da temperatura da interface metal-molde (T_i) em função da espessura solidificada, apresentados em sua forma adimensional. Curva representativa do modelo linear e pontos obtidos experimentalmente.

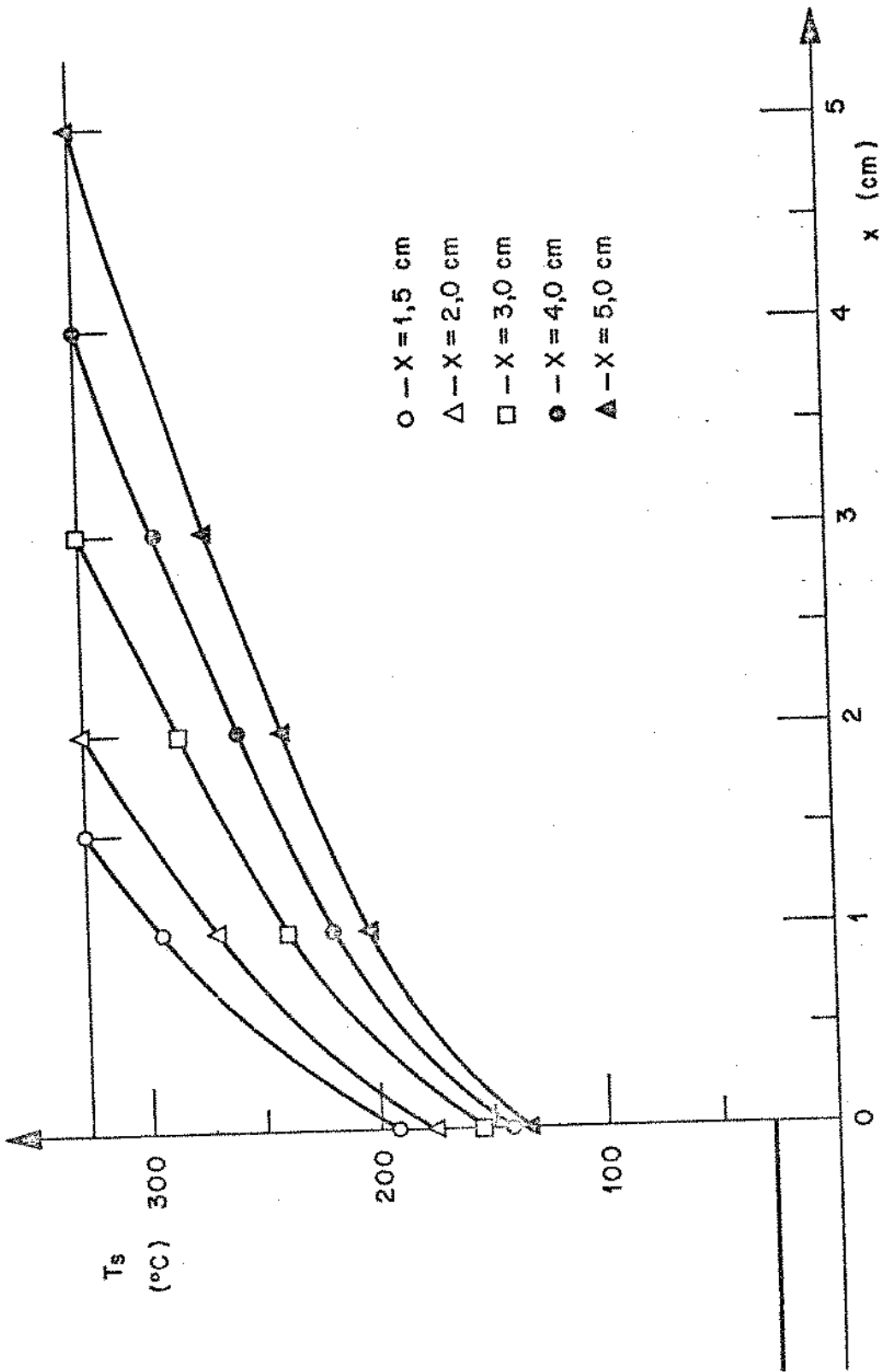


Figura IV.8- Perfis térmicos do metal sólido obtidos experimentalmente para várias espessuras solidificadas, no caso da solidificação unidirecional do chumbo em molde refrigerado com aplicação de alumina .

no caso da solidificação unidirecional do chumbo em molde recoberto com alumina. Nota-se na figura que nos estágios iniciais da solidificação, o perfil térmico do sólido apresenta pequena curvatura aumentando gradativamente à medida que a solidificação evolui. Este fato evidencia que no início da solidificação o perfil térmico do sólido pode ser comparado ao modelo linear proposto, entretanto esta linearidade não se mantém para grandes espessuras solidificadas.

C A P Í T U L O - V

C O N C L U S Õ E S

Os resultados obtidos neste trabalho permitem que sejam extraídas as seguintes conclusões relativas à solidificação unidirecional do chumbo comercialmente puro, em sistemas metal-molde refrigerados.

V.1 - A cinética de solidificação depende da eficiência do contato térmico entre o metal e o molde a qual pode ser controlada por meio da aplicação de revestimentos isolantes na superfície interna do molde. Quanto menos eficiente for este contato térmico, menores serão os valores da velocidade de solidificação, sendo esta dependência tanto mais evidente quanto menor for a espessura solidificada. Dos revestimentos utilizados o que mais reduziu a eficiência do contato térmico foi o de Alumina, seguido pelos de Negro de Fumo, Dycote 39 e Dycote 34, correspondendo aos seguintes valores da velocidade inicial de solidificação :

Recobrimento	Velocidade Inicial de Solidificação V_0 (cm/seg)
Alumina	136×10^{-3}
Negro de Fumo	171×10^{-3}
Dycote 39	194×10^{-3}
Dycote 34	285×10^{-3}

V.2- A eficiência do contato térmico entre o metal e o molde é medida pelo coeficiente de transmissão de calor da interface metal-molde (h_i), cujo valor depende do tipo de revestimento aplicado na superfície interna do molde. Para os revestimentos utilizados os valores deste coeficiente são :

Recobrimento	Coeficiente de Transmissão de Calor da Interface Metal-Molde . h_i (cal/cm ² . °C . seg)
Alumina	30 x 10 ⁻³
Negro de Fumo	38 x 10 ⁻³
Dycote 39	43 x 10 ⁻³
Dycote 34	63 x 10 ⁻³

V.3- A variação da temperatura da interface metal-molde (menor temperatura do metal durante a solidificação), depende da eficiência do contato térmico entre o metal e o molde. Quanto menor a eficiência deste contato térmico maiores serão os valores da temperatura da interface, sendo este efeito tanto mais evidente quanto maior for a espessura de metal solidificado. O efeito dos revestimentos utilizados sobre a temperatura da interface, para uma espessura de referência de 5 cm foi de :

Recobrimento	Temperatura da Interface Metal-Molde ($X = 5 \text{ cm}$) T_i ($^{\circ}\text{C}$)
Alumina	134,0
Negro de Fumo	122,5
Dycote 39	113,0
Dycote 34	100,0

V.4- A evolução da macro-estrutura de solidificação depende da eficiência do contato térmico entre o metal e o molde. Quanto maior a eficiência deste contato térmico menor tenderá ser o tamanho de grão, e este efeito é tanto mais evidente quanto menor a espessura solidificada. O efeito dos coeficientes de transmissão de calor sobre o tamanho de grão, medidos em duas regiões distintas dos lingotes obtidos foi de :

h_i C G S	Tamanho de Grão (grãos/cm ²)	
	Zona Coquilhada	Zona Colunar
30×10^{-3}	9 - 10	2,5 - 3,0
63×10^{-3}	15 - 16	3,0 - 3,5

V.5- A cinética de solidificação unidirecional do chumbo tende a obedecer uma lei parabólica do tipo :

$$t^* = 0,60 x^{*2} + 0,83 x^*$$

onde

$$t^* = \text{tempo adimensional} = \left(\frac{h_i}{b_s} \right)^2 t$$

e

$$X^* = \text{espessura solidificada adimensional} = \left(\frac{h_i}{K_s} \right) X$$

V.6- A variação da temperatura da interface metal-molde em função da espessura solidificada se dá entôrno da equação :

$$T_i^* = \frac{1}{1 + X^*}$$

onde

$$T_i^* = \text{temperatura da interface metal-molde adimensional} = \frac{T_i - T_o}{T_f - T_o}$$

$$X^* = \text{espessura solidificada adimensional} = \left(\frac{h_i}{K_s} \right) X$$

A qual pode ser utilizada para estimativa aproximada da temperatura da interface metal-molde com êrros variando de - 10,7% (no início da solidificação) a + 40,0% (para uma espessura de metal solidificado de 6 cm).

B I B L I O G R A F I A

- [1] CHALMERS, B. - Principles of solidification. New York, John Wiley, 1964.
- [2] FLEMINGS, M. C. - Solidification processing. New York, McGraw Hill, 1973.
- [3] BILONI, H. - Estado atual da pesquisa na área da solidificação de metais e ligas. R. Metalurgia, São Paulo, 26(155):803-823, out.1970.
- [4] BRADASCHIA, C. - Curso de fundição de ligas não ferrosas. São Paulo, ABM, 1971.
- [5] CHALMERS, B.- Le contrôle de la structure des lingots. R. Métallurgie, Paris, p.115-120, fev. 1965.
- [6] SAVAGE, W. F.; LUNDIN, C. D. & ARONSON, A. H.- Weld metal solidification mechanics. Welding Journal Research Supplement, New York, p.1-7, apr.1965.
- [7] SAVAGE, W. F.; LUNDIN, C. D. & CHASE, T. F.- Solidification of fusion welds in face-centered cubic metals. Welding Journal Research Supplement, New York, p.1-5, nov.1968.
- [8] BRODY, H. D. & FLEMINGS, M. C.- Solute redistribution in dendritic solidification. Trans. Met. Soc. AIME, 236:615, 1966.

- [9] PRATES, M.; CARDOSO, R. J. & PIRES, O. S. - Segre-
gação de soluto na solidificação de lingotes.
R. Metalurgia , São Paulo, 28(181):875-882, dez.
1972.
- [10] PRATES, M. - Influencia de la capacidad de extrac-
cion calorica del sistema metal/molde sobre el
proceso de solidificacion. Buenos Aires, Uni-
versidad Nacional del Sur de la Republica Argen-
tina, 1971. 175p. tese (doutoramento)
- [11] PRATES, M. & PIRES, O. S. - A resistência térmica
da interface metal/molde e sua importância na
solidificação de lingotes. R. Metalurgia, São
Paulo, 29(184):157-164, mar.1973.
- [12] HENZEL, J. G. & KEVERIAN, J. - Gap formation in
permanent mold casting. Trans. A.F.S., 68:373,
1960.
- [13] PRATES, M. & BILONI, H. - Variables affecting the
nature of the chill zone. Metallurgical Trans.,
New York, 3:1501-1510, jun.1972.
- [14] PATTO, U. S.; PIRES, O. S. & PRATES, M. - Lingota-
mento contínuo dos aços: características do pro-
cesso e dimensionamento da lingoteira. São Jo-
sê dos Campos, Astep, 1974.
- [15] REYNOLDS, C. C. - Solidification in dies and per-
manent molds. MIT, Cambridge, 1963. tese -
(doutoramento)

- [16] PIRES, O. S.; MARTINS, A. B. & PRATES, M. - Efeito das condições de extração de calor do sistema metal/lingoteira sobre o comportamento mecânico em laminação de lingotes de aço Ni-Cr-V. R. Metalurgia, São Paulo, 30(200):485-488, jul.1974.
- [17] PRATES, M.; FISSOLO, J. & BILONI, H. - Heat flow parameters affecting the unidirectional solidification of pure metals. Metallurgical Trans., New York, 3:1419-1425, jun.1972.
- [18] PIRES, O. S.; PRATES, M. & BILONI, H. - Unidirectional solidification of metals with zero superheat: case of cooled molds. Z. Metallkde, s.l., 65(2):143-149, 1974.
- [19] PIRES, O. S. - Determinação da cinética da solidificação unidirecional de metais. São José dos Campos, Instituto Tecnológico de Aeronáutica , 1972. 98p. tese (mestre em ciências).
- [20] HILLS, A. W. & MOORE, M. R. - The solidification of pure metals under unidirectional heat flow conditions. I-Solidification with zero superheat. Trans. Met. Soc. AIME, 245:1481-1492, jul.1969.
- [21] SUBBARAO, E. C. et alii. - Experiências de ciência dos materiais. São Paulo, Edgard Blücher, 1973. 236p.
- [22] RUDDLE, R. W. - The solidification of casting. Institute of Metals, Non, and Report nº 7, London, 1957.

A P Ê N D I C E - 1

1) Simbologia Utilizada

1.1) Parâmetros dimensionais (unidade C G S)

- A - Constante de integração
- A' - Área de contato entre o metal e o molde (cm²)
- a - Difusividade de temperatura = $\sqrt{k/c\bar{d}}$ (cm²/seg)
- B - Constante de integração.
- b - Difusividade de calor = \sqrt{kcd} (cal/°C.cm².seg^{1/2})
- C - Teor global de soluto
- C_o - Teor global de soluto de uma liga
- c - Calor específico (cal/g . °C)
- d - Densidade (g/cm³)
- e - Espessura da chapa-molde (cm)
- erf - Função erro
- F - Constante do modelo unidirecional parabólico
- G - Gradiente térmico no líquido (°C/cm)
- H - Calor latente de fusão (cal/g)
- h - Coeficiente de transmissão de calor (cal/cm².seg. °C)
- h_{global} - Coeficiente de transmissão de calor global do sistema (cal/cm². seg . °C).
- h_M - Coeficiente de transmissão de calor da chapa-molde - (cal/cm². seg . °C)
- h_ω - Coeficiente de transmissão de calor do fluido-chapa - molde (cal/cm². seg . °C)

- K - Condutividade térmica ($cal/cm \cdot seg \cdot ^\circ C$)
- K_M - Condutividade térmica da chapa-molde ($cal/cm \cdot seg \cdot ^\circ C$)
- Q - Calor (cal)
- q - Fluxo de calor ($cal/cm^2 \cdot seg$)
- R - Resistência térmica
- R_{global} - Resistência térmica global do sistema
- R_M - Resistência térmica da chapa-molde.
- R_ω - Resistência térmica do fluido de refrigeração - chapa-molde
- S - Superaquecimento do metal líquido ($^\circ C$)
- SC - Superesfriamento constitucional
- T - Temperatura ($^\circ C$)
- T_v - Temperatura de vazamento ($^\circ C$)
- T_f - Temperatura de fusão ($^\circ C$)
- T_o - Temperatura do fluido de refrigeração ($^\circ C$)
- t - Tempo de solidificação (seg)
- t_t - Tempo total de solidificação (seg)
- V' - Volume de metal solidificado (cm^3)
- V - Velocidade de solidificação (cm/seg)
- V_o - Velocidade inicial de solidificação (cm/seg)
- V_ω - Velocidade do fluido de refrigeração (cm/seg)
- X - Espessura solidificada (cm)
- x - Distância à interface metal-molde (cm)
- α - Coeficiente do modelo unidirecional parabólico
- β - Coeficiente do modelo unidirecional parabólico
- ϕ - Constante de solidificação

1.2) Parâmetros adimensionais

$$X^* = \text{Espessura solidificada} = \frac{h_i X}{a_s b_s}$$

$$t^* = \text{Tempo} = t \left(\frac{h_i}{b_s} \right)^2$$

$$H^* = \text{Calor latente} = \frac{H}{c_s (T_f - T_o)}$$

$$T_i^* = \text{Temperatura da interface metal-molde} = \frac{T_i - T_o}{T_f - T_o}$$

1.3) Índices empregados

- (m) = molde
- (i) = interface metal-molde
- (s) = metal sólido
- (l) = metal líquido

1.4) Operadores matemáticos

- ∂/∂ = derivada parcial
- d/d = derivada total
- erf = função-erro
- $erfc$ = função-erro complementar

A P Ê N D I C E - 2

2) Desenvolvimento do Modelo Unidirecional para Determinação do Tempo de Solidificação

2.1) Tempo total de solidificação

Admitindo-se o efeito conjunto das resistências-térmicas do sistema (R_m , R_s e R_i) como sendo cumulativo, o tempo total de solidificação para uma certa espessura solidificada X , será :

$$t_t = t_m + t_s + t_i \quad (2.1)$$

onde :

t_m = tempo de solidificação devido ao efeito isolado da resistência térmica do molde R_m (considerando $R_s = R_i = 0$)

t_s = tempo de solidificação devido ao efeito isolado da resistência térmica do metal sólido R_s (considerando $R_m = R_i = 0$)

t_i = tempo de solidificação devido ao efeito isolado da resistência térmica da interface metal-molde R_i (considerando $R_m = R_s = 0$)

O tempo parcial ($t_m + t_s$) é dado pela Solução Exata de Schwarz ($R_i = 0$), e o tempo parcial (t_i) pode ser calculado por análise infinitesimal, admitindo-se que $R_m = R_s = 0$

2.2) Determinação do tempo parcial ($t_m + t_s$) de solidificação pela Solução Exata de Schwarz.

As soluções analíticas exatas admitem as seguintes hipóteses gerais :

a) o fluxo de calor é unidirecional, comportando-se o metal e o molde como elementos semi-infinitos ;

b) a interface sólido-líquido é macroscopicamente plana ;

c) não há fluxo de massa nem de energia radiante;

d) o contato térmico na interface metal-molde é perfeito;

e) as propriedades físicas do metal e do molde são constantes durante o processo.

Associa-se ao sistema metal-molde um eixo de coordenadas (x, T) tal que (ver figura 2.1) :

- $x < 0$ molde
- $x = 0$ interface metal-molde
- $x > 0$ metal que solidifica
- $x = X$ interface sólido-líquido
- $0 < x < X$ metal solidificado
- $x > X$ metal líquido

Em decorrência as hipóteses admitidas, o problema se resume à transmissão de calor do tipo não estacionária e dessa forma podem ser aplicadas a todos os pontos do sistema as equações de *Fourier* :

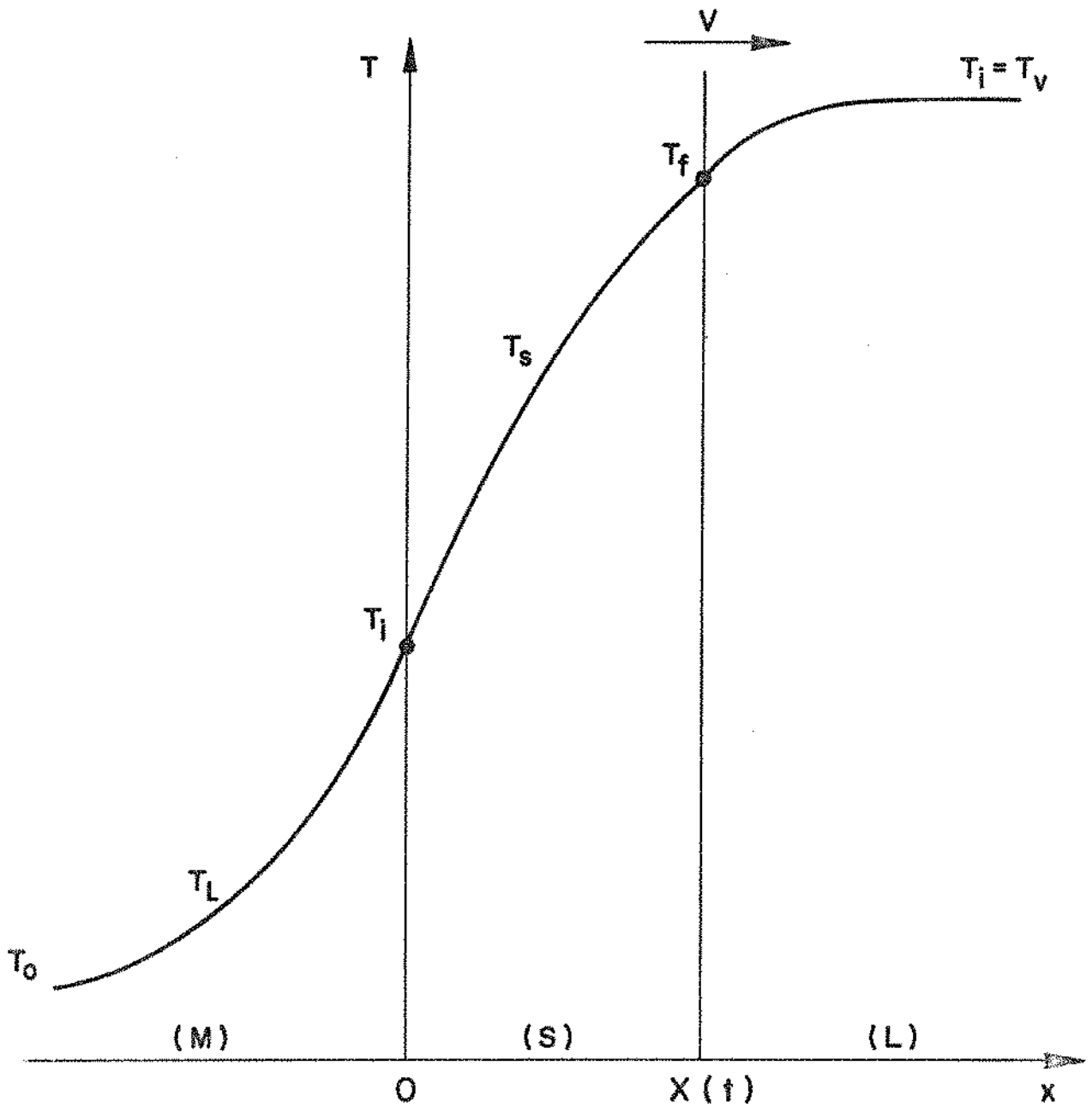


Figura 2.1- Perfil térmico de um sistema metal-molde durante a solidificação, quando se considera transferência de calor por condução e resistência térmica da interface metal-molde nula.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (2.2)$$

$$q = K \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.3)$$

As soluções devem satisfazer as seguintes condições de contorno :

$$\text{para } t = 0 \quad x < 0, T_m = T_o \quad (2.4)$$

$$x > 0, T_l = T_v \quad (2.5)$$

$$\text{para } t > 0 \quad x \rightarrow -\infty : T_m \rightarrow T_o \quad (2.6)$$

$$x \rightarrow +\infty : T_l \rightarrow T_v \quad (2.7)$$

$$x = 0 : T_{m,s} = T_i = \text{constante} \quad (2.8)$$

$$x = X : T_{s,l} = T_f = \text{constante} \quad (2.9)$$

O balanço térmico na interface metal-molde para $x = 0, t > 0$ leva a :

$$K_m \left(\frac{\partial T_m}{\partial x} \right)_{x=0} - K_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial x} \right)_{x=0} = 0 \quad (2.10)$$

O balanço térmico na interface sólido-líquido para $x = X, t > 0$ leva a :

$$K_l \left(\frac{\partial T_l}{\partial x} \right)_{x=X} - K_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial x} \right)_{x=X} + H d_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right) = 0 \quad (2.11)$$

As equações de *Fourier* admitem solução do tipo :

$$T(x,t) = A + B \operatorname{erf} \frac{x}{2 a_s \sqrt{t}} \quad (2.12)$$

onde A e B são constantes de integração e erf é a função erro. A relação satisfaz a equação (2.2) e as condições de contorno (2.4) a (2.9) permitem que se determinem as constantes A e B . Da equação (2.12) decorre imediatamente que :

$$x = X \rightarrow T = T_f = \text{constante} \rightarrow \frac{X}{2 a_s \sqrt{t}} = \phi = \text{constante} \quad (2.13)$$

onde ϕ é chamada constante de solidificação do sistema. Obtem-se então :

$$X = 2 \phi a_s \sqrt{t} \quad (2.14)$$

ou

$$t = \frac{X^2}{4 \phi^2 a_s^2} \quad (2.15)$$

A constante ϕ é determinada para cada sistema metal-molde por uma função do tipo :

$$F(M, m, n, S^*, H^*, \phi) = 0 \quad (2.16)$$

As equações (2.12) e (2.15) são resolvidas em função das condições de contorno e do balanço térmico na interface sólido-líquido, resultando :

$$\frac{\exp(-\phi^2)}{M + \operatorname{erf}(\phi)} - m S^* \frac{\exp(-n^2 \phi^2)}{\operatorname{erfc}(n \phi)} - \sqrt{\pi} H^* \phi = 0 \quad (2.17)$$

Admitindo-se que o molde é eficientemente refrigerado, possuindo uma difusividade calórica infinita, e que a solidificação ocorra sem superaquecimento do líquido, ou seja :

$$M = 0$$

$$S = 0$$

a equação (2.15) resulta em :

$$\phi \exp(\phi^2) \operatorname{erf}(\phi) = \frac{1}{\sqrt{\pi} H^*} \quad (2.18)$$

A constante de solidificação ϕ é determinada através da equação (2.17) pelo método das tentativas. Para o chumbo comercialmente puro utilizado no presente trabalho o valor de ϕ encontra-se tabelado no apêndice 3.

Portanto o tempo parcial de solidificação - $(t_m + t_s)$ será dado pela equação (2.15) e desta forma obtém-se :

$$t_m + t_s = \frac{X^2}{4 \phi^2 a_s^2} \quad (2.19)$$

2.3) Determinação do tempo de solidificação devido ao efeito isolado da resistência térmica da interface metal-molde.

Admitindo-se $R_m = 0$ e $R_s = 0$, o perfil de temperaturas do sistema metal-molde pode ser esquematizado como mostra a figura 2.2.

Seja dX a espessura de metal solidificado num intervalo de tempo dt . Se só há transferência de calor do tipo *Newtoniana*, temos para qualquer intervalo de tempo que :

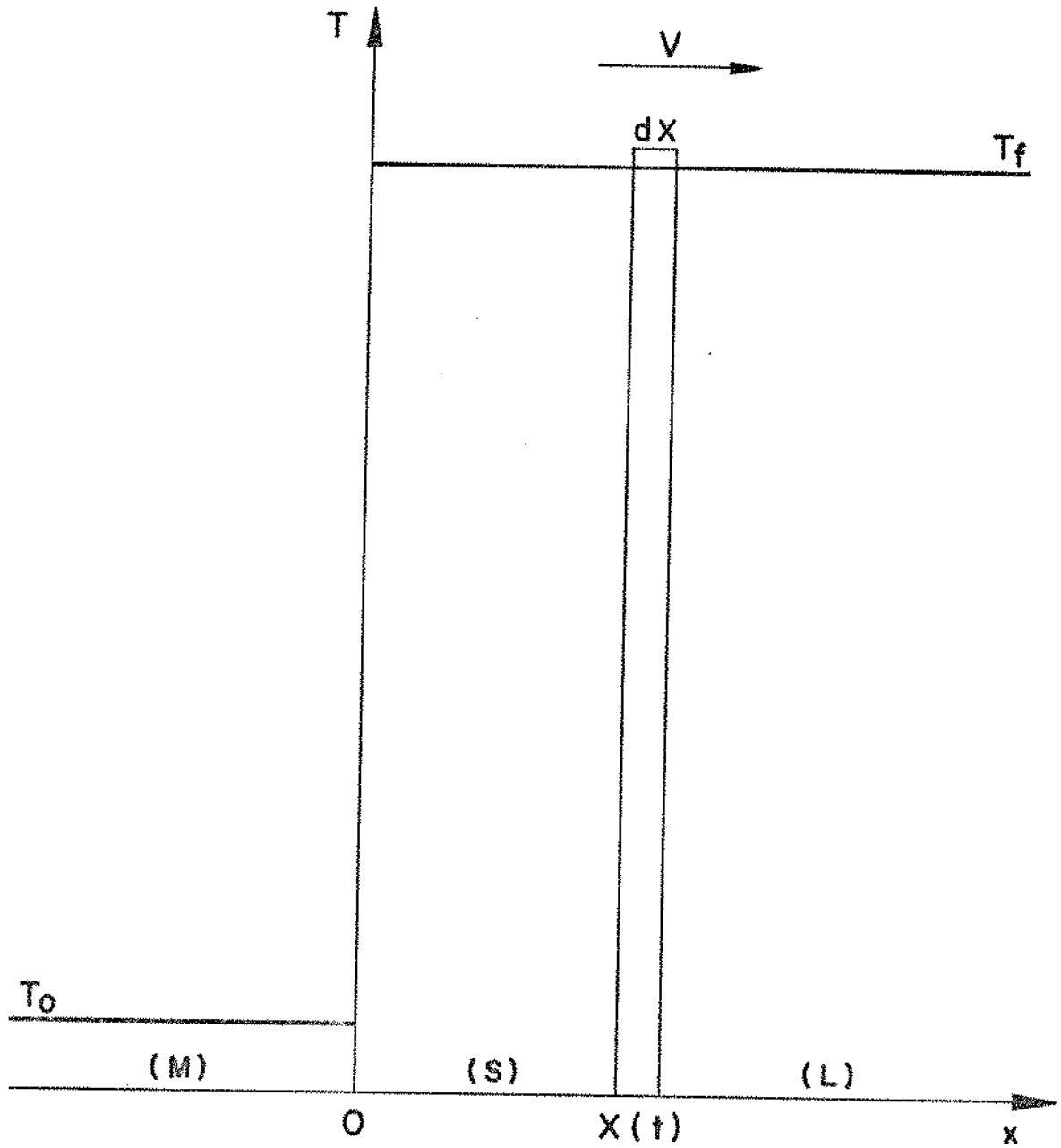


Figura 2.2- Perfil térmico de um sistema metal-molde durante a solidificação quando se considera somente transferência de calor Newtoniana.

$$q = h_i (T_f - T_o) \quad (2.20)$$

como

$$q = dV' H d_s = A dX H d_s \quad (2.21)$$

$$q = \frac{A dX H d_s}{dt_i A} = H d_s \frac{dX}{dt_i} \quad (2.22)$$

$$H d_s \frac{dX}{dt_i} = h_i (T_f - T_o) \quad (2.23)$$

e portanto :

$$dX = \frac{h_i (T_f - T_o)}{H d_s} dt_i \quad (2.24)$$

e :

$$X = \int_0^t \frac{h_i (T_f - T_o)}{H d_s} dt_i \quad (2.25)$$

$$X = \frac{h_i (T_f - T_o)}{H d_s} t_i \quad (2.26)$$

logo :

$$t_i = \frac{H d_s}{h_i (T_f - T_o)} X \quad (2.27)$$

Finalmente o tempo total de solidificação -
será dado pelas equações (2.1), (2.19) e (2.27) :

$$t_t = \frac{1}{4 \phi^2 a_s^2} X^2 + \frac{H d_s}{h_i (T_f - T_o)} X \quad (2.28)$$

A P Ê N D I C E - 3

Propriedades Físicas do Chumbo
(Sistema C G S)

Temperatura de fusão (T_f)	327
Condutividade térmica (K)	0,07
Calor específico (c)	0,03
Densidade (d)	11,3
Calor latente de fusão (H)	5,9
Difusividade de temperatura (α^2)	0,206
Constante de solidificação (ϕ)	0,73

Obs: Valores médios entre 20°C e 320 °C.