



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**“Projeto, Construção e Aferição de um Dispositivo de
Solidificação Unidirecional Horizontal Refrigerado à Água”**

Autor: José Nazareno Santos da Silva
Orientador: Prof. Dr. Antonio Luciano Seabra Moreira
Co-Orientador: Prof. Dr. Otávio Fernandes Lima da Rocha

Belém, abril de 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**“Projeto, Construção e Aferição de um Dispositivo de
Solidificação Unidirecional Horizontal Refrigerado à Água”**

Autor: José Nazareno Santos da Silva

Orientador: Prof. Dr. Antonio Luciano Seabra Moreira

Co-Orientador: Prof. Dr. Otávio Fernandes Lima da Rocha

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-graduação em Engenharia Mecânica como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Belém - Pará - Brasil

abril / 2007

| S586p Silva, José Nazareno Santos da
Projeto, construção e aferição de um dispositivo de solidificação unidirecional horizontal refrigerado à água / José Nazareno Santos da Silva; orientador, Antonio Luciano Seabra Moreira.-2007.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Belém, 2007.

1. Metais não ferroso –testes. 2. Fundição. 3. Solidificação. I. Título.

CDD – 21. ed. 620.180287

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**“Projeto, Construção e Aferição de um Dispositivo de
Solidificação Unidirecional Horizontal Refrigerado à Água”**

Autor: José Nazareno Santos da Silva

Orientador: Prof. Dr. Antonio Luciano Seabra Moreira

Co-Orientador: Prof. Dr. Otávio Fernandes Lima da Rocha

Prof. Dr. Antonio Luciano Seabra Moreira

Universidade Federal do Para – Faculdade de Engenharia Mecânica

Prof. Dr. Rezende Gomes dos Santos

Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica

Prof. Dr. Fernando Antônio Sá

Universidade Federal do Para – Faculdade de Engenharia Mecânica

Prof. Dr. Otávio Fernandes Lima da Rocha

Centro Federal de Educação Tecnológica do Pará – Curso de Engenharia de Materiais

Belém, 16 de abril de 2007.

Dedicatória

**À meus Pais;
À Walena Madeira, e a
Nossos Filhos
Thales e Túlio.**

Agradecimentos

A **DEUS**, Pai criador.

Ao Professor Dr. **Antonio Luciano Seabra Moreira**, pela amizade, dedicação e orientação na elaboração deste trabalho.

Ao Professor Dr. **Otávio Fernandes Lima da Rocha**, coordenador do Grupo de Pesquisa de Metalurgia Física e de Transformação do CEFET/PA pela elaboração do projeto e incansável luta no acompanhamento dos resultados experimentais.

Agradeço de modo especial, ao amigo e companheiro Prof. **Daniel Joaquim da Conceição Moutinho**, pelo empenho e dedicação demonstrados no acompanhamento ao longo de todo este trabalho.

Ao Prof. Dr. **João Lobo Peralta**, coordenador do Curso de Metalurgia, à época, pela amizade e pelo grande apoio no suporte na realização da construção do dispositivo.

Aos colegas do curso de **Metalurgia do CEFET/PA** pelo estímulo e apoio.

Ao Prof. **Arildomá Lobato Peixoto** pela execução dos desenhos do dispositivo.

Ao Prof. Dr. **Evaldo Júlio Ferreira Soares** pela doação dos lingotes de estanho.

Ao **Centro Federal de Educação Tecnológica do Pará CEFET/PA**, pelo apoio administrativo e financeiro, com destaque ao Professor **Edson Ary Fontes**, Diretor Geral que não mediu esforços para alcance do sucesso deste trabalho.

À **Universidade Federal do Pará**, por proporcionar a busca ao conhecimento.

Ao Prof. **Cláudio Nery Lamarão**, do **Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará**, pela realização das análises química das amostras através do MEV.

À **ALBRÁS**, pela doação do alumínio e tijolos refratários para a construção do dispositivo.

À **ALUBAR**, pelo apoio na realização da análise química das amostras.

À **COPALA**, pelo apoio na montagem das resistências elétricas e tijolos refratários do dispositivo.

Ao Grupo de Pesquisa de Solidificação da Unicamp em disponibilizar o modelo numérico utilizado neste trabalho, com destaque ao Professor Dr. **Amauri Garcia** e Dr. **Ivaldo Leão Ferreira**.

À Profa. **Carmem Gilda Barroso Tavares Dias**, coordenadora do PPGEM à época da realização deste trabalho.

Aos Professores **Fernando Antônio de Sá**, **Carlos Alberto Mendes da Mota**, **Eduardo de Magalhães Braga** e **Roberto Tetsuo Fujiyama**, aos amigos e colegas que colaboraram no apoio dos experimentos e a todos aqueles que não foram citados que, no entanto, contribuíram de forma positiva para a realização deste trabalho.

Nós, seres humanos, temos consciência de que somos inacabados e esta consciência é que nos estimula a pesquisar, perceber criticamente e modificar "o que está condicionado, mas não determinado", passando então a sermos sujeitos e não apenas objetos da nossa história.

Paulo Freire (1921- 1997)

RESUMO

O estudo das estruturas de solidificação em função dos parâmetros térmicos é de fundamental importância para o comportamento mecânico dos materiais metálicos. Assim, tais estruturas são bastante influenciadas pelas condições de extração de calor do sistema metal/molde durante o processo de solidificação. Considerando o exposto, o principal objetivo deste trabalho é projetar, construir e aferir um dispositivo capaz de representar o processo de solidificação unidirecional horizontal refrigerado à água onde o efeito da convecção solutal é considerado. A aferição do dispositivo de solidificação em questão foi realizada através da avaliação da unidirecionalidade dos grãos colunares por meio da caracterização das macroestruturas das ligas Al-4%Cu, Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb. Os resultados experimentais obtidos da posição da isoterma liquidus em função do tempo são comparados com aqueles fornecidos por um modelo numérico proposto na literatura. Finalmente, é realizada uma comparação entre os valores dos coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde levantados no dispositivo construído, com aqueles obtidos por outros trabalhos desenvolvidos recentemente para o caso da solidificação unidirecional vertical ascendente e descendente.

Palavras Chaves: Dispositivo; Solidificação unidirecional horizontal; liga Al-4%Cu; ligas Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb; coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde.

ABSTRACT

The aim is about the solidification structures of thermal parameters is important to mechanic behaviour of the metallic materials. These structures are influenced by means of heat removal conditions of metal/ mould system during the solidification process. Despite of this, some mathematic models have been developed to appraise the structural and thermal variation mainly considering the upright unidirectional solidification process . This research plans to project, construct and check up one device in order to be able to represent the horizontal unidirectional solidification process cooled by water which considers the solute convection effects. To check up the solidification device, a comparative study was done between the representative experimental bend of metal's thickness solidification related to time to Al-4%Cu, Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb alloys. The present results shows positive consonances. The unidirectional aspect of the heat removal constructed was estimate trough the macrostructure characterization of the studied alloys. Finally a comparative study is done between values of the interface metal/mold heat transfer coefficient obtained trough other newly works developed about ascendant and descendent unidirectional solidification process.

Key words: device, horizontal unidirectional solidification, heat transfer coefficient, Al-4%Cu, Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb alloys,

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	viii
NOMENCLATURA	ix
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DESTE TRABALHO	4
CAPÍTULO 2	5
FUNDAMENTOS DA SOLIDIFICAÇÃO	5
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	5
2.2 ANALOGIA ENTRE SISTEMAS TÉRMICOS E ELÉTRICOS	8
2.2.1 Moldes Refratários	10
2.2.2 Moldes Refrigerados.....	10
2.2.3 Contato Térmico Perfeito na interface Metal/Molde.....	11
2.3 ANÁLISE MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO	12
2.4 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR METAL/MOLDE (h_i)	19
2.5 DETERMINAÇÃO DE h_i A PARTIR DO CONFRONTO TEÓRICO- EXPERIMENTAL DE PERFIS TÉRMICOS.....	21
2.6 SISTEMAS UNIDIRECIONAIS DE SOLIDIFICAÇÃO PROPOSTOS NA LITERATURA PARA CONDIÇÕES TRANSITÓRIAS DE EXTRAÇÃO DE CALOR .	26
2.6.1 Solidificação Unidirecional Vertical Ascendente.....	26
2.6.2 Solidificação Unidirecional Vertical Descendente.....	28
2.6.3 Solidificação Unidirecional Horizontal	29
CAPÍTULO 3	30
MATERIAIS E MÉTODOS	30

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	30
3.2 MATERIAIS.....	30
3.2.1 Materiais Utilizados na Construção do Dispositivo de Solidificação Unidirecional Horizontal Refrigerado à Água	30
3.2.2 Equipamentos Utilizados na Construção do Dispositivo	32
3.2.3 Materiais Utilizados na Aferição do Dispositivo	32
3.2.4 Equipamentos Utilizados na Aferição do Dispositivo.....	33
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	36
3.3.1 Projeto do Dispositivo	36
3.3.2 Construção do Dispositivo.....	42
3.3.3 Justificativa da Utilização das Ligas Al-4%Cu e do Sistema Sn-Pb	46
3.3.4 Obtenção das Ligas Al-4%Cu e Sn-5, 15, 20% Pb e Levantamento das Curvas de Resfriamento	48
3.3.5 Análise Química das Ligas Al-4%Cu e Sn -5, 15 e 20%Pb.....	49
3.3.6 Procedimento Experimental para Determinação dos Parâmetros Térmicos de Solidificação das Ligas Estudadas	52
3.3.7 Procedimento Experimental para a Determinação da Macroestrutura de Solidificação.....	57
CAPÍTULO 4	58
RESULTADOS OBTIDOS.....	58
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	58
4.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS	58
4.2.1 Coeficiente de Transferência de Calor na Interface Metal/Molde (hi).....	58
4.2.2 Comparação do valor do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde para a liga Sn-15%Pb levantado no dispositivo construído, com aquele obtido por outros trabalhos recentes desenvolvidos para o caso da solidificação unidirecional vertical ascendente e descendente.....	61
4.2.3 Análise das Curvas Posição X Tempo para as Ligas Estudadas	63
4.2.4 Comparação entre os Resultados Experimentais e Numérico obtidos da Posição em Função do Tempo para as Ligas do Sistema Sn-Pb	65
4.3 ANÁLISE DAS MACROESTRUTURAS	66
CAPÍTULO 5	69
CONCLUSÃO	69

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 2

Figura 2.1. Modos de transferência de calor atuantes no sistema metal/molde (Garcia, 2001).....	7
Figura 2.2. Circuito Térmico de um Sistema Metal/Molde (Garcia, 2001).....	8
Figura 2.3. Representação esquemática do estudo realizado por Spinelli (2005).....	14
Figura 2.4. Fluxo de calor através da interface metal/molde (Spinelli, 2005).....	17
Figura 2.5. Resistência térmicas na interface metal/molde em molde refrigerado (Spinelli, 2005).....	18
Figura 2.6. Ilustração esquemática dos modos de transferência de calor atuante na interface metal/molde e do modelo equivalente de Newton (Garcia,2001).....	20
Figura 2.7 Correlação entre as curvas que representam o comportamento de h_i para sistema de ligas Sn-Pb obtidas por (Quaresma, 1999).....	22
Figura 2.8. Evolução do coeficiente de transferência de calor metal/molde em função do tempo para diferentes ligas do sistema Sn-Pb (Siqueira, 2002).....	23
Figura 2.9. Variação do coeficiente de transferência de calor metal/molde na solidificação unidirecional vertical ascendente de ligas do sistema Sn-Pb (Rocha, 2003).....	24
Figura 2.10. Variação do coeficiente de transferência de calor metal/molde na solidificação unidirecional vertical ascendente de ligas do sistema Al-Cu (Rocha, 2003).....	24
Figura 2.11. Valores do coeficiente de transferência de calor metal/molde na solidificação unidirecional vertical ascendente de ligas do sistema Al-Si (Peres, 2004).....	25
Figura 2.12. Variação do coeficiente de transferência de calor metal/molde na solidificação unidirecional vertical descendente de ligas do sistema Sn-Pb (Spinelli, 2005).....	25
Figura 2.13. Dispositivo de solidificação vertical ascendente utilizado por Siqueira (2002), Rocha (2003), Sá (2004) e Peres (2005).....	27
Figura 2.14. Dispositivo de solidificação vertical descendente utilizado por (Spinelli, 2005).....	28

Figura 2.15. Dispositivo de solidificação unidirecional horizontal utilizado por (Quaresma, 1999; Goulart, 2005).....	29
---	----

CAPITULO 3

Figura 3.1. Fluxograma de etapas de experimentos e análise dos dados experimentais.....	31
Figura 3.2. Resistência Elétrica,.....	32
Figura 3.3. Tijolo Refratário Silico-aluminoso.....	32
Figura 3.4. (a) forno elétrico; (b) cadinho; (c) garra.....	33
Figura 3.5. Registrador de temperatura tipo Almemo.....	33
Figura 3.6 – Tela de iniciação do programa AMR-Software, marca Almemo Data-Control...	34
Figura 3.7 - Laboratório de preparação de amostras do MEV do Centro de Geociências da UFPA.....	35
Figura 3.8 - Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura – LABMEV do Centro de Geociências da UFPA.....	35
Figura 3.9 – Dimensões de peças de aço carbono comum constituintes do dispositivo utilizado neste trabalho.....	37
Figura 3.10 - Dimensões de peças de aço carbono comum constituintes do dispositivo utilizado neste trabalho.....	38
Figura 3.11 - Dimensões de peças de aço carbono comum constituintes do dispositivo utilizado neste trabalho.....	39
Figura 3.12 - Dimensões de peças de aço carbono comum constituintes do dispositivo utilizado neste trabalho.....	40
Figura 3.13 – Vista geral do conjunto de peças componentes do dispositivo de solidificação utilizado neste trabalho.....	41
Figura 3.14 - Corte longitudinal do dispositivo utilizado neste trabalho mostrando as resistências elétricas e o posicionamento dos termopares no interior do mesmo.....	43
Figura 3.15 - Vista do dispositivo construído com a respectiva montagem dos termopares....	44
Figura 3.16 - Lingoteira de aço com a frente livre.....	44
Figura 3.17 - Esquema completo do dispositivo de solidificação mostrando sua interface com o sistema de registro de temperaturas acoplado ao computador.....	45
Figura 3.18 - Esquema da instalação elétrica para funcionamento adequado do dispositivo..	46

Figura 3.19 - Diagrama de equilíbrio parcial do sistema Al–Cu (Rocha et al, 2003).....	47
Figura 3.20 - Diagrama de equilíbrio parcial do sistema Pb–Sn (Rocha et al, 2003).....	48
Figura 3.21 - Curvas de resfriamento das ligas Al-4%Cu, Sn-5%Pb, Sn-15%, e Sn-20%Pb respectivamente.....	49
Figura 3.22 – Imagem do MEV de uma amostra da liga Sn-20%Pb.....	50
Figura 3.23 – Espectro obtido no MEV/EDS; mostrando os elementos químicos em uma amostra da liga Sn-15%Pb.....	51
Figura 3.24 – (a) Vazamento do metal líquido no interior da lingoteira do dispositivo estando os termopares posicionados a 6, 10, 16, 36 e 54 mm à frente da câmara de refrigeração; (b) Perfil térmico obtido durante a solidificação das ligas estudadas.....	53
Figura 3.25 - Tela de iniciação do programa Software Genesiswin 32.....	54
Figura 3.26 - Tela de seleção e inserção das propriedades termofísicas para a liga de Al-4%Cu simuladas no Software Genesiswin 32.....	55
Figura 3.27 - Tela de execução do programa utilizado neste trabalho com opções de escolha dos parâmetros de simulação, inserção dos dados de vazamento e valores de h_i para a liga Sn-15%Pb.....	55
Figura 3.28 - Perfis térmicos experimentais para as sete posições de termopares em relação à superfície de refrigeração para a liga Sn-5%Pb obtidos por (Spinelli, 2005).....	56

CAPITULO 4

Figura 4.1 – Variação da temperatura em função do tempo para cinco diferentes posições de termopares em relação à interface metal/câmara refrigerada.....	59
Figura 4.2 - Curvas de resfriamento experimental e simulada para determinação do h_i das ligas Al-4%Cu, Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb.....	60
Figura 4.3 – Coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde para ligas do sistema Sn-Pb.....	61
Figura 4.4 - Comparação de valores para o perfil do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde levantados para a liga Sn-15%Pb em diferentes sistemas de solidificação unidirecional refrigerados à água.....	62
Figura 4.5 – Variação da temperatura em função do tempo para as ligas estudadas neste trabalho.....	63

Figura 4.6 - Comportamento experimental da posição da isoterma liquidus em função do tempo para ligas Al-4%Cu, Sn – 5%Pb, Sn15%Pb e Sn-20%Pb.....	64
Figura 4.7 – Representação das curvas da isoterma liquidus em função do tempo para as ligas Sn-Pb estudadas neste trabalho.....	65
Figura 4.8 - Macroestrutura de solidificação da liga Al-4%Cu.....	66
Figura 4.9 - Macroestrutura de solidificação da liga Sn-5%Pb.....	67
Figura 4.10 - Macroestrutura de solidificação da liga Sn-15%Pb.....	67
Figura 4.11 – Macroestrutura de solidificação da liga Sn-20%Pb.....	68

LISTA DE TABELAS**CAPITULO 3**

Tabela 3.1 – Análise química dos metais puros utilizados na preparação das ligas estudadas neste trabalho.....	32
Tabela 3.2 - Descrição e dimensões das peças componentes do dispositivo de solidificação..	42
Tabela 3.3 - Composição química da liga Al–4%Cu obtida através do método espectrometria ótica.....	50
Tabela 3.4 - análise química do sistema de ligas Sn – Pb obtidas através do MEV.....	52
Tabela 3.5 - Propriedades termofísicas das ligas utilizadas.....	54

NOMENCLATURA

Letras latinas

A = área unitária térmica [m^2]

C = calor específico [$J / kg K$]

C_L = calor específico na fase líquida [$J / kg K$]

C_S = concentração de soluto na fase sólida [%]

C_0 = concentração nominal da liga [%]

C_1 = concentração no líquido [%]

d_s = derivada do espaço

dt = derivada do tempo

e_m – espessura do molde [m]

h_{Amb} = coeficiente de transferência de calor na interface molde/ambiente [$W / m^2 K$]

h_c = coeficiente de transferência de calor convectivo do gás [$W / m^2.K$]

h_g = coeficiente global de transferência de calor [$W / m^2 K$]

h_i = coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde [$W / m^2 K$]

h_R = coeficiente de transferência de calor radiativo [$W / m^2 K$]

g = fração volumétrica [adimensional]

k_o = coeficiente de partição [%]

k_L = condutividade térmica do líquido [$W / m K$]

k_M = condutividade térmica no material da parede do molde [$W / m K$]

k_S = condutividade térmica do sólido ou metal sólido [$W / m K$]

K = condutibilidade térmica do material [$W / m K$]

L = calor latente de fusão do material [J / m^3] ou [J / kg]

q = fluxo de calor na interface metal/molde [W / m^2]

R_e = resistência elétrica [$m^2 K / W$]

R_i = resistência térmica da interface metal/molde [$m^2 K / W$]

R_L = resistência térmica da camada líquida [$m^2 K / W$]

R_M = resistência térmica da parede do molde [$m^2 K / W$]

R_{Amb} = resistência térmica da interface molde/ambiente [$\text{m}^2 \text{ K} / \text{W}$]

R_{S} = resistência térmica da camada solidificada [$\text{m}^2 \text{ K} / \text{W}$]

R_{g} = resistência térmica global do sistema [$\text{m}^2 \text{ K} / \text{W}$]

R_{t} = resistência térmica total [$\text{m}^2 \text{ K} / \text{W}$]

S = espessura solidificada [m]

t = tempo de deslocamento da isoterma solidus [s]

T = temperatura da fase líquida na frente da interface sólido/líquido [K]

T_0 = temperatura ambiente ou inicial do molde [K]

T_{is} = temperatura da superfície externa do molde [K]

T_{F} = temperatura de fusão do metal base do sistema [K]

T_{L} = temperatura da linha liquidus da liga [K]

T_{IC} = temperatura superficial do lingote [K]

T_{S} = temperatura da linha solidus da liga [K]

T_{V} = temperatura de vazamento [K]

V = velocidade de solidificação [m / s]

μ_1 = velocidade do líquido [m/s]

x = posição da interface sólido/líquido [m]

Letras Gregas

ρ_1 = densidade no líquido [kg / m^3]

ρ_{S} = densidade no sólido [kg / m^3]

ρ_{C} = calor volumétrico [J / m^3]

Δt = diferença de temperatura [K]

ΔV = diferença de potencial [V]

ΔT = superaquecimento [K]

Δx = distância percorrida pelo fluxo de calor entre os pontos centrais [m]

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Na década de 60, o estudo dos materiais passou a ser considerado como ciência aplicada tendo como objetivos, entre outros, a análise das estruturas, composição, características, propriedades e desempenho dos mesmos quando empregados na obtenção de produtos utilizados pela indústria. Foi nessa década que se fizeram as primeiras experiências de solidificação rápida, que através da mesma se chegaram à descoberta das ligas amorfas, o que constituiu, de certo modo, a grande importância na idéia da ordem do estado cristalino (Fortes, 1992).

Por outro lado, a solidificação de metais, fenômeno envolvido no processo de conformação através da fundição, pode ser definida como sendo a extração de calor em regime transiente, com mudança de fase, no qual certa quantidade de energia térmica deve ser transferida por meio do molde da fase líquida para o meio ambiente, possibilitando a nucleação e o crescimento da fase sólida. A eficiência da retirada de calor durante o processo depende, basicamente, das propriedades térmicas do metal, das características do molde (material, geometria, dimensão e espessura da parede), das condições da interface metal/molde (contato térmico) e das características do meio que vai absorver o calor (água, ar, etc) (Santos, 2006).

Nos processos de fundição convencional e lingotamento contínuo o fluxo de calor através da interface metal/molde definido como coeficiente de transferência de calor (h_i), é variável ao longo de todo o processo. Assim, a fim de possibilitar um melhor controle das estruturas de solidificação obtidas, além de compreender os mecanismos de fluxo de extração de calor envolvidos, é necessário conhecer o referido coeficiente de transferência de calor durante a solidificação. Devido a sua grande influência na taxa ou velocidade de solidificação, o mesmo tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores. Com a formação do “gap” de ar

nesta interface, o coeficiente de transferência de calor pode rapidamente decrescer, dificultando, portanto a retirada de calor e desacelerando o processo de solidificação do metal líquido. A estrutura, as propriedades e desempenho de uma peça fundida dependem das condições térmicas durante a solidificação, ou seja, das taxas de resfriamento que, por sua vez, dependem da resistência térmica metal/molde.

A possibilidade da aplicação de uma ampla gama de condições operacionais em processos de solidificação tem como decorrência direta, a geração de uma diversidade de estruturas de solidificação. Os parâmetros térmicos são bastante influenciados pelo comportamento do sistema metal / molde, impondo uma correlação estreita entre os mesmos e as estruturas resultantes.

Inúmeros processos industriais que envolvem o fenômeno da solidificação são influenciados pelos modos de convecção térmica e constitucional. Processos similares de solidificação unidirecional são utilizados como fontes de estudos da ação convectiva (Garcia, 2001). Quando o processo, por exemplo, é realizado na forma vertical ascendente, em condições de gradiente de temperatura positivo no líquido, a influência da convecção é minimizada quando o soluto é rejeitado para as regiões interdendríticas proporcionando a formação de um líquido interdendrítico mais denso que o volume global de metal líquido. Na solidificação unidirecional horizontal, por outro lado, a convecção em função dos gradientes de composição no líquido sempre vai ocorrer. Solutos mais densos ou menos densos podem induzir correntes por decantação ou flutuação do líquido rico em soluto rejeitado (Rocha, 2003).

Na solidificação em condições transitórias de extração de calor, a velocidade de solidificação e o gradiente térmico são interdependentes, não podem ser controlados e variam continuamente ao longo do processo, o que dificulta a análise da evolução das alterações nos parâmetros estruturais. Entretanto, é exatamente este tipo de evolução que ocorre na grande maioria dos processos industriais que envolvem a solidificação.

Existem vários trabalhos que propõem modelos matemáticos e experimentais correlacionando os parâmetros estruturais com parâmetros térmicos tais como gradiente térmico, velocidade de crescimento e tempo local de solidificação, assim como com a resposta mecânica da estrutura bruta de solidificação (Chalmers, 1964; Flemings, 1974; Kurz & Fisher, 1984; Santos, 1997, Quaresma, 1999; Osório, 2000, 2004; Garcia, 2002; Siqueira, Garcia, 2003, Sá, 2004; Peres, 2005). Mesmo assim, estes modelos foram validados através de

resultados muito particularizados. Esta situação não permite ainda que se possa concluir sobre sua aplicabilidade a ligas metálicas de diversas composições químicas e a uma faixa expressiva de situações térmicas de solidificação. Em face da situação, torna-se extremamente importante a avaliação teórico-experimental da influência das variáveis térmicas em condições de solidificação unidirecional em regime transitório sobre parâmetros estruturais para diversos sistemas metálicos binários e uma ampla faixa de concentração de soluto. Para tanto, devem ser utilizados diferentes dispositivos experimentais de maneira que permitam mapear termicamente a solidificação com o objetivo de correlacionar variáveis térmicas da evolução do processo com parâmetros da estrutura formada (Spinelli, 2004).

A forma horizontal é, sem dúvida, a configuração bastante complexa sob ponto de vista da determinação das variáveis térmicas de solidificação. Neste caso, o processo pode ser conduzido de duas maneiras distintas, isto é, a partir do vazamento de metal líquido no interior de um molde isolado termicamente nas laterais com o calor sendo retirado somente por uma das extremidades através de um bloco maciço metálico (Quaresma, 1999) ou através do sistema proposto neste trabalho. No primeiro caso, a turbulência do vazamento induz correntes de convecção forçada, que levam algum tempo para se dissipar, que agem com intensidades diferentes ao longo da seção do lingote. Neste caso, não se pode considerar que esteja ocorrendo rigorosamente uma solidificação unidirecional mesmo com a fonte fria determinando o transporte de calor essencialmente em sua direção.

Considerando o exposto acima bem como o fato de que a grande maioria dos estudos desenvolvidos sobre o assunto refere-se a sistemas verticais ascendentes, onde a convecção devido o efeito do soluto na formação das estruturas de solidificação é praticamente eliminado, este trabalho apresenta como objetivo principal o projeto, construção e aferição de um dispositivo de solidificação horizontal refrigerado à água, em condições transitórias de extração de calor, que leve em conta os efeitos impostos pela ação de correntes convectivas. Para a sua aferição, foram analisadas as macroestruturas das ligas binárias Al-4%Cu, Sn-5%Pb, Sn-15%Pb, e Sn-20%Pb bem como um modelo matemático numérico existente na literatura (Ferreira, 2004) para determinação tanto do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde como da posição da isoterma liquidus em função do tempo de solidificação de cada liga. A confiabilidade e precisão dos resultados encontrados para as ligas estudadas no dispositivo construído são comparados com valores teóricos obtidos por este modelo numérico.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DESTE TRABALHO

Considerando o exposto e a importância do assunto foram estabelecidos os seguintes objetivos para este trabalho:

- Projetar e construir um dispositivo experimental capaz de representar a solidificação unidirecional horizontal refrigerada à água.
- Obter as ligas binárias Al-4%Cu, Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb caracterizando-as termicamente visando à confirmação das temperaturas liquidus e solidus.
- Calcular os respectivos coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde das ligas estudadas, a partir de registros térmicos experimentais levantados no dispositivo experimental, comparando-os a seguir com resultados teóricos de um modelo numérico que permita analisar a evolução da solidificação unidirecional horizontal em regime transitório de extração de calor sob a ação de correntes convectivas.
- Comparar o valor do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde da liga Sn-15%Pb, levantado no dispositivo construído, com aquele obtido por outros trabalhos desenvolvidos recentemente para o caso da solidificação unidirecional vertical ascendente e descendente, visando fortalecer a unidirecionalidade do dispositivo.
- Determinar experimentalmente, para as referidas ligas, a posição da isoterma liquidus em função do tempo.
- Aferir o dispositivo de solidificação em questão através da avaliação da unidirecionalidade da extração de calor por meio da caracterização da macroestrutura das ligas analisadas;
- Comparar os resultados experimentais da posição da isoterma liquidus obtidos pelo dispositivo com aqueles calculados por um modelo numérico previsto na literatura.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS DA SOLIDIFICAÇÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O fenômeno da solidificação de metais e ligas pode ser considerado fundamentalmente como um processo de transferência de calor em regime transitório. A velocidade com que o calor é extraído e transferido através do sistema metal/molde tem relação direta com a velocidade de solidificação e com os gradientes térmicos do sistema os quais interferem diretamente na sua estrutura e, afetam também o estabelecimento de tempos de desmoldagem em processos convencionais de fundição e o controle da espessura solidificada em diferentes etapas dos processos de lingotamento contínuo, portanto, o conhecimento de tais parâmetros é importante para o controle da estrutura final do metal solidificado. Assim sendo, a análise do processo de transferência de calor que ocorre durante a solidificação apresenta uma importância significativa no dimensionamento e controle de sistemas metal/molde.

Para melhor compreensão da análise da transferência de calor na solidificação torna-se necessária a seleção de um elemento de referência do sistema metal/molde. Esse elemento deve ser definido de tal forma que seu comportamento térmico seja típico do sistema como um todo. A viabilidade da referida análise também dependerá de algumas simplificações que atenuem sua complexidade matemática, porém que não comprometam a confiabilidade dos resultados obtidos (Prates, 1978).

A realização do estudo da transferência de calor na solidificação de um metal apresenta dois objetivos:

- Cálculo da distribuição de temperaturas, ou perfil térmico, do sistema em função da distância e do tempo:

$$T = f(x,t) \quad (2.1)$$

onde,

T = temperatura em um ponto qualquer do sistema

x = posição relativa do ponto

t = tempo a partir do processo

- Determinação da cinética de solidificação do metal, isto é, do tempo necessário para solidificar certa camada de metal, ou seja:

$$t = f(S) \quad (2.2)$$

onde,

S = espessura do metal solidificado

A partir desta equação pode ser determinada a velocidade de solidificação do metal, ou seja, a velocidade com a qual a interface sólido/líquido avança no metal líquido segundo a função:

$$V = \frac{dS}{dt} = f(S) \quad (2.3)$$

A transformação líquido/sólido é acompanhada por liberação de energia térmica com uma fronteira móvel separando as duas fases de propriedades termofísicas distintas. Para melhor compreender a análise em questão a Figura 2.1 evidencia todos os modos de

transferência de calor que podem ocorrer ao longo da solidificação unidirecional: condução térmica no metal e no molde, transferência newtoniana na interface metal/molde, convecção no metal líquido e na interface molde/ambiente e, finalmente, radiação térmica do molde para o meio ambiente.

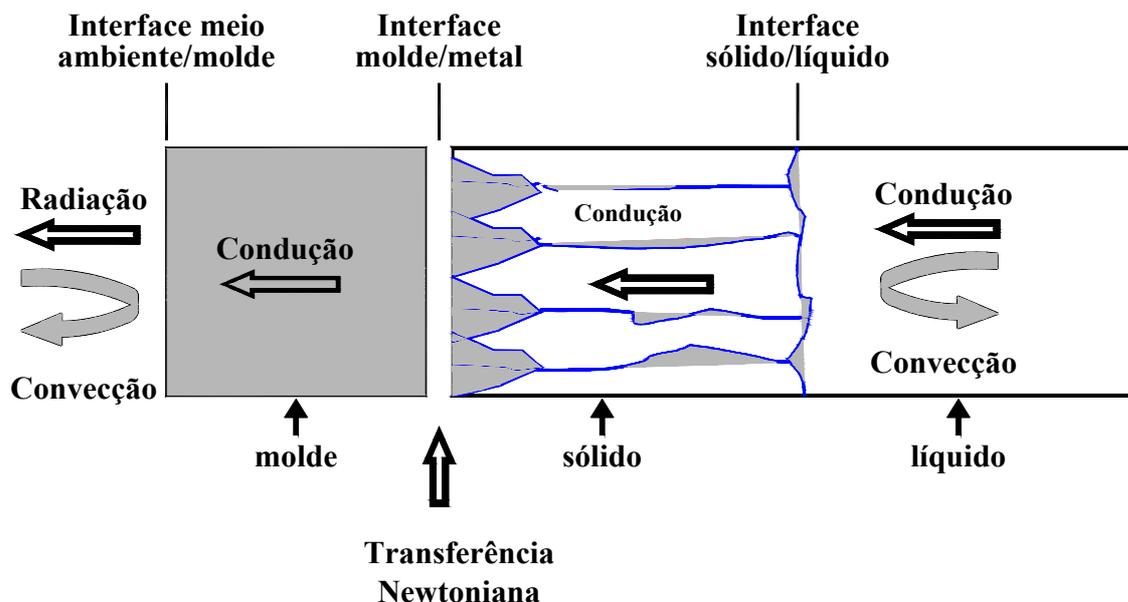


Figura 2.1 : Modos de transferência de calor atuantes no sistema metal/molde (Garcia, 2001).

Estudos experimentais recentes, para condições de regime transitório de extração de calor que visam relacionar parâmetros térmicos da solidificação, como velocidade de deslocamento da isoterma líquidus com parâmetros estruturais, têm sido desenvolvidos para ligas binárias dos sistemas Al-Cu (Siqueira et al, 2002, 2003; Rocha et al, 2002, 2003, Sá, et al, 2004), Sn-Pb (Siqueira et al, 2002, 2003; Rocha et al, 2002, 2003, Sá et al, 2004) e Al-Si (Peres et al, 2004), todos para condições de solidificação unidirecional vertical ascendente, onde a convecção solutal no líquido é desprezada devido a densidade do soluto no líquido ser maior que a densidade da liga formada. No que se refere aos sistemas que consideram a convecção no líquido devido ao efeito de soluto, alguns estudos foram desenvolvidos para ligas binárias dos sistemas Sn-Pb em condições de solidificação unidirecional vertical descendente (Spinelli, 2005), Al-Cu (Quaresma, 1999) e Al-Si (Goulart, 2005) em condições de solidificação unidirecional horizontal.

2.2 ANALOGIA ENTRE SISTEMAS TÉRMICOS E ELÉTRICOS

Durante a análise do processo de solidificação, pode ser muito útil na quantificação dos modos de transferência de calor mais atuantes e significativos à utilização de uma analogia entre o circuito térmico, como o representado na Figura 2.1, e um correspondente circuito elétrico como mostrado na Figura 2.2.

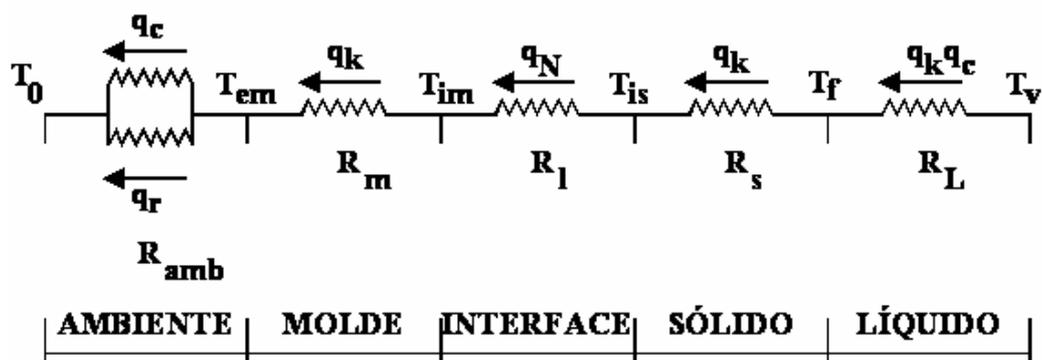


Figura 2.2: Circuito térmico de um sistema metal/molde (Garcia, 2001).

A taxa de transferência de calor por unidade de área pode ser considerada como um fluxo enquanto que a combinação da condutividade térmica e da espessura solidificada, uma resistência a esse fluxo. A temperatura é a força motriz para o fluxo de calor, logo:

$$\text{Fluxo de calor} = \frac{\text{Diferença de potencial térmico}}{\text{Resistência térmica}}$$

que é uma relação semelhante à lei de Ohm, para circuitos elétricos, isto é:

$$q = \frac{\Delta T}{R_t} \Leftrightarrow i = \frac{\Delta V}{R_e} \quad (2.4)$$

sendo,

q – fluxo de calor

Δt – diferença de temperatura

i – corrente elétrica

ΔV – diferença de potencial

R_t – resistência térmica

R_e – resistência elétrica

A resistência térmica na condução é dada por:

$$R_t = \frac{S}{K} \left[\frac{m^2}{w} K \right] \quad (2.5)$$

A resistência térmica total ao fluxo de calor do centro do metal, que se encontra à temperatura T_v , até a temperatura ambiente T_0 é dada por:

$$R_T = R_{amb} + R_m + R_i + R_s + R_L \quad (2.6)$$

onde,

$R_T = \frac{1}{h_{Amb}}$ é a resistência térmica da superfície externa do molde ao meio ambiente

$h_{amb} = h_c + h_r$ é o coeficiente de transferência de calor molde/ambiente dado pela soma respectivamente, dos coeficientes de convecção e de radiação da superfície do molde ao ambiente

$R_m = \frac{e_m}{Km}$ é a resistência térmica do molde, dada pela relação entre a espessura do molde e sua condutividade térmica

$R_i = \frac{1}{h_i}$ é a resistência térmica da interface metal /molde, dada pelo inverso do coeficiente de transferência de calor da interface metal/molde

$R_s = \frac{S}{K_s}$ é a resistência térmica da camada solidificada, dada pela relação entre a espessura do sólido formado e sua condutividade térmica

$R_L = \frac{L}{(K_L + h_c \times L)}$ é a resistência térmica do líquido, considerando a condução no líquido (K_L) de espessura L e a convecção do líquido (h_c) para a interface sólido/líquido.

Utilizando-se, portanto, o circuito térmico da Figura 2.2, pode-se estudar diferentes condições de sistemas metal/molde e verificar quais os modos de transferência de calor significativos para uma avaliação quantitativa das variáveis térmicas de interesse no processo de solidificação, como por exemplo:

2.2.1 Moldes Refratários

De modo geral, os moldes refratários, em particular os de areia, têm ampla aplicação na tecnologia de fundição devido a sua boa capacidade de moldagem de geometrias complexas a um custo bastante acessível. Apresentam, entretanto, uma baixa capacidade de absorção de calor quando comparados a moldes de outros tipos o que implica, conseqüentemente, em uma resistência térmica bastante elevada e muito superior a todas as outras resistências do circuito térmico. Nessas condições, têm-se:

$$R_m \gg R_i + R_s + R_L \quad (2.7)$$

Tal fato significa que o fluxo de calor pode ser controlado exclusivamente pela resistência térmica do molde, e que todas as outras resistências podem ser desprezadas na análise. Como conseqüência, a solidificação vai ocorrer com variações mínimas no perfil de temperaturas no metal e na interface metal/molde e com a existência de perfis térmicos significativos apenas no molde.

2.2.2 Moldes Refrigerados

No outro extremo da capacidade de absorção de calor encontram-se os moldes refrigerados, objeto de estudo deste trabalho, cuja aplicação tecnológica de maior importância pode ser encontrada no processo de lingotamento contínuo de materiais metálicos. Como

nesse tipo de molde o fluido de refrigeração é renovado continuamente pode-se considerar que, em condições eficientes de refrigeração, os mesmos apresentam uma capacidade infinita de absorção de calor e, como decorrência, uma resistência térmica praticamente nula, ou seja:

$$R_m \ll R_i + R_s + R_L \quad (2.8)$$

2.2.3 Contato Térmico Perfeito na interface Metal/Molde

Para que se possa considerar um contato térmico perfeito entre metal e molde é preciso que a afinidade físico-química entre ambos seja total e, conseqüentemente, que a molhabilidade do metal líquido na superfície interna do molde seja completa. A condição idealizada da resistência térmica nula na interface metal/molde não ocorre em condições práticas de lingotamento e fundição e somente pode ser considerada quando o metal líquido estiver em contato com um substrato responsável pela absorção de calor de mesma natureza, conforme ocorre na refusão superficial de materiais por laser quando uma poça de líquido é formada (Garcia 2001) e, em seguida, solidificada em contato com o mesmo material no estado sólido que não chegou a fundir-se sob a ação do feixe de laser. Entretanto, em algumas situações, R_i , embora não seja nula, pode ser desprezada em função da maior magnitude das outras resistências do circuito térmico. Como exemplo, pode ser citado o caso de peças ou lingotes de grandes dimensões, como lingotes de aços de algumas toneladas produzidos por lingotamento convencional em siderúrgicas nos quais, em função da dimensão da espessura total a solidificar e da baixa condutividade térmica do aço, tem-se:

$$R_i \ll R_m + R_s + R_L \quad (2.9)$$

Na situação oposta, encontra-se a fundição de peças de paredes finas em moldes metálicos, onde a pequena espessura da camada a ser solidificada faz com que R_i seja a resistência mais significativa do circuito térmico, ou seja:

$$R_i \gg R_m + R_s + R_L \quad (2.10)$$

Nesse caso, podemos dizer que o processo de solidificação é controlado pela interface metal/molde (Garcia, 2001).

2.3 ANÁLISE MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO

Do ponto de vista matemático, o tratamento da solidificação apresenta complexidade considerável proporcionada, principalmente, pela contínua geração de calor latente na interface sólido/líquido bem como pelo movimento dessa fronteira fatos que tornam o problema não linear. A abordagem de situações reais de fundição e lingotamento contínuo apresenta ainda uma complicação extra, que consiste em levar em conta a transferência newtoniana existente na interface metal/molde. Os métodos matemáticos considerados para a análise do problema podem ser classificados em:

- Métodos analíticos
- Métodos numéricos
- Métodos experimentais

Para efeito comparativo dos resultados dos perfis térmicos obtidos neste trabalho e dos parâmetros térmicos da solidificação, objetivando avaliar a eficiência do sistema de solidificação aqui proposto, os mesmos serão comparados com um modelo numérico previsto na literatura apresentado em trabalho recente (Spinelli, 2005; Ferreira, 2003, 2004).

Constatam-se, por meio de levantamento bibliográfico realizado neste trabalho, poucos estudos científicos que enfatizam as condições de solidificação unidirecional horizontal. Por outro lado, a seleção de um determinado método matemático depende das características do mesmo e das particularidades do problema a ser analisado. As técnicas numéricas têm sido cada vez mais utilizadas no acompanhamento da solidificação de peças fundidas. Diante da necessidade e da facilidade atualmente encontrada na manipulação de modelos matemáticos em computadores vários trabalhos tem sido desenvolvido por diversos pesquisadores na tentativa de caracterizar com precisão o fenômeno em um sistema metal/molde (Brimacombe, 1986/1988/1993; Kumar, 1993; Samarasekera, 1994; Spim, 1995).

Nesse sentido, Spinelli (2005), trabalhando em sistemas de solidificação unidirecional vertical descendente contribuiu para a compreensão das interações entre as variáveis térmicas da solidificação e os valores numéricos obtidos por Ferreira (2004) devido às soluções

analíticas apresentadas na literatura serem aplicáveis somente a situações físicas que consideram moldes de geometrias relativamente simples. Entretanto, as peças produzidas através do processo de fundição são caracterizadas tipicamente por geometrias complexas, o que implica na inviabilidade da utilização dessas soluções em tais situações. A solidificação de ligas em um intervalo de temperaturas implica em uma liberação gradual de calor latente e, conseqüentemente, em diferentes formas de evolução da fração sólida. As propriedades termofísicas também variam com o estado de agregação e com a temperatura de tal forma que, quando todas essas características são integradas, as únicas soluções realísticas viáveis são aquelas obtidas através de métodos numéricos (Amauri, 2001). Esses métodos conduzem a utilização de hipóteses matemáticas mais próximas das condições reais de solidificação.

Assim, este trabalho visa, através do projeto, construção e aferição de um dispositivo de solidificação unidirecional horizontal refrigerado à água, contribuir com os resultados obtidos por Spinelli no que se refere à análise térmica do processo de solidificação em sistemas onde a convecção no líquido, devido o efeito do soluto, é estudada.

No estudo em questão foi utilizado um método numérico para representar a solidificação de ligas binárias em um molde cilíndrico resfriado a partir da superfície superior, fornecendo como dados de saída os perfis teóricos da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus e as taxas de resfriamento. A obtenção das variáveis térmicas de solidificação depende da determinação prévia dos coeficientes de transferência de calor metal/molde (h_i). Inicialmente, a liga é assumida no estado líquido e uniformemente homogeneizada, com temperatura excedendo a temperatura liquidus. O tratamento matemático da convecção no líquido foi incluído no sentido de prever os efeitos da convecção térmica e da convecção de soluto, presentes durante a solidificação. A parte inferior do molde e as paredes laterais foram isoladas termicamente, o que favoreceu a extração de calor do sistema somente pela parte superior do mesmo. O coeficiente transitório de transferência de calor metal/molde impõe a taxa de extração de calor. A formulação matemática do problema de solidificação é baseada na proposta de Voller (1998). Apenas algumas modificações foram incorporadas, tais como, o emprego de diferentes propriedades termofísicas para as fases líquida e sólida bem como a inserção do coeficiente transitório de transferência de calor metal/molde.

Considerando $t < 0$, a liga encontra-se no estado líquido com concentração nominal C_0 em um molde com paredes isoladas definido por $0 < z < z_b$ conforme apresenta a Figura 2.3. A solidificação inicia através do resfriamento do metal a partir da câmara refrigerada com água ($z = 0$) até que a temperatura alcance um valor abaixo do patamar eutético (T_{eut}).

Passando a considerar $t > 0$, formam-se três regiões: sólida, sólida+líquida e líquida. Durante esse processo, o soluto é rejeitado na zona pastosa e conseqüentemente redistribuído por escoamento de fluido induzido por contração em direção à base. Isto resulta numa camada rica em soluto na região da base do lingote.

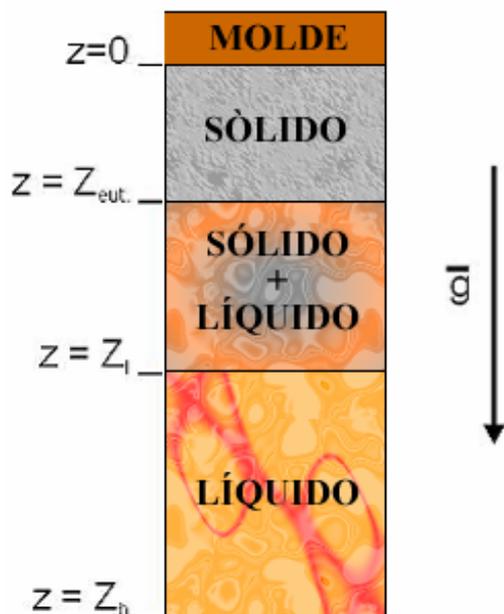


Figura 2.3 : Representação esquemática do estudo realizado por Spinelli (2005).

Para o desenvolvimento da solução numérica das equações acopladas dos campos térmico e constitucional, foram admitidas as seguintes simplificações:

- O domínio é unidimensional sendo definido por $0 < z < z_b$, onde z_b é um ponto distante removido da região de segregação.
- A região é livre de porosidade.
- A fase sólida é estacionária, ou seja, quando formada apresenta velocidade igual a zero.
- Levando em consideração um elemento de volume representativo, a concentração no líquido C_1 , a temperatura T , a densidade do líquido ρ_1 e a velocidade do líquido μ_1 são assumidas constantes
- No diagrama de fases, o coeficiente de partição k_0 e a inclinação da linha liquidus m são consideradas constantes.

- Existem condições de equilíbrio na interface sólido/líquido, tais que:

$$T = T_f - mC_L \quad (2.11)$$

e,

$$C_S = k_0 C_L \quad (2.12)$$

onde T é a temperatura, C a concentração, T_f a temperatura de fusão do solvente puro e C_S a concentração de sólido na interface

- Os calores específicos, c_s e c_l , as condutividades térmicas k_s e k_l e as densidades ρ_s e ρ_l , são constantes dentro de cada fase, contudo, diferentes entre as fases sólida e líquida. O calor latente de fusão L é determinado pela diferença entre as entalpias de cada uma das fases.
- A resistência térmica metal/molde varia com o tempo sendo incorporada no coeficiente de transferência de calor global hg.

O software Thermo-calc foi utilizado para geração dos diagramas de fases analisados e através da interface desses softwares com a linguagem computacional Fortran/C foram recalculados os dados gerados obtendo-se resultados mais confiáveis. Assim, as tendências não-lineares das linhas liquidus e solidus dos reificados diagramas puderam ser levadas em conta nos cálculos.

Considerando as hipóteses anteriormente mencionadas, as equações utilizadas para a solidificação de ligas binárias são apresentadas a seguir:

Energia:

$$\frac{\partial \rho c T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 c_1 \mu T) = \nabla \cdot (K \nabla T) - \rho_s L \frac{\delta g}{\delta t} \quad (2.13)$$

Espécie (soluto):

$$\frac{\delta \rho C}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho_1 \mu C_L) = 0. \quad (2.14)$$

Massa:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho_1 \mu) = 0, \quad (2.15)$$

onde g é a fração volumétrica de líquido e μ é a velocidade média do volume líquido definida como:

$$\mu = g \mu_1 \quad (2.16)$$

Massa específica da mistura:

$$\rho = \int_0^{1-g} \rho_s d\alpha + g \rho_1, \quad (2.17)$$

Massa específica do soluto na mistura:

$$\rho c = \int_0^{1-g} \rho_s C_s d\alpha + g \rho_1 C_L, \quad (2.18)$$

onde a condutividade térmica K e o calor específico volumétrico ρc são tomados como médias ponderadas da fração volumétrica.

As condições de contorno assumidas são as seguintes:

$$\text{para } z=0 \rightarrow \mu=0, \quad K \frac{\delta T}{\delta z} = h_i (T_0 - T_{x=0}) \quad \text{e} \quad \frac{\delta C_L}{\delta z} = 0, \quad (2.19)$$

$$\text{para } z=z_b \rightarrow T \rightarrow T_v \quad \text{e} \quad C \rightarrow C_0 \quad (2.20)$$

O modelo numérico, com adequada avaliação do perfil correspondente ao coeficiente de transferência de calor transiente, é utilizado para calcular as variáveis térmicas de solidificação normalmente associadas com aspectos da estrutura de solidificação.

Objetivando uma modelagem matemática precisa, torna-se essencial que sejam estabelecidas as devidas condições de contorno. A transferência de calor na interface metal/molde é uma destas condições que assume um papel fundamental quando considerada a magnitude da transmissão de calor durante os primeiros estágios da solidificação. A maneira pela qual o calor flui através do lingote e da superfície do molde afeta a evolução da solidificação sendo de notável importância na determinação das condições de resfriamento no lingote, principalmente na maioria dos sistemas de fundição de elevada difusividade de calor, como é o caso de sistemas refrigerados. A perda de calor inicial, quando o metal entra em contato com o molde, não é somente regulada pela capacidade térmica de armazenamento do material do molde, porém, também, pelas condições de transferência de calor dentro do metal e, particularmente, na interface metal/molde. As partículas sólidas encontram-se em contato apenas em pontos isolados e a área real de contato é somente uma pequena fração da área nominal, conforme apresentado na Figura 2.4.

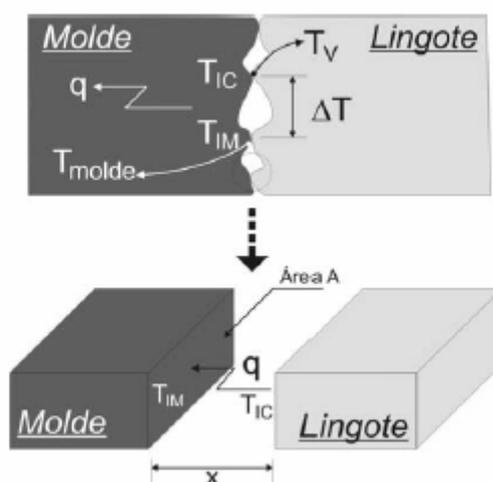


Figura 2.4 : Fluxo de calor através da interface metal/molde (Spinelli, 20050).

Parte do fluxo de calor é extraído através dos pontos de contato real; todavia, o calor remanescente deve ser transmitido por meios intersticiais gasosos e não-gasosos existentes na interface metal/molde. Os interstícios são limitados em sua dimensão e, desta forma, a convecção pode ser desprezada. Se as diferenças de temperaturas não são extremas, a radiação

não é tão significativa e, por conseguinte, a maior parte da energia fluirá por condução através da área real de contato físico.

O fluxo de calor através da interface metal/molde, conforme indicado esquematicamente na Figura 2.4, pode ser caracterizado por um coeficiente médio macroscópico de transferência de calor da interface metal/molde h_i , dado por:

$$h_i = \frac{q}{A(T_{IC} - T_{IM})} \quad (2.21)$$

onde q é o fluxo de calor global através da interface em W; T_{IC} e T_{IM} são, respectivamente, as temperaturas superficiais do lingote e do molde, e A é a área.

Em moldes refrigerados à água, o fluxo de calor global é afetado por uma série de resistências térmicas, conforme mostra a Figura 2.5.

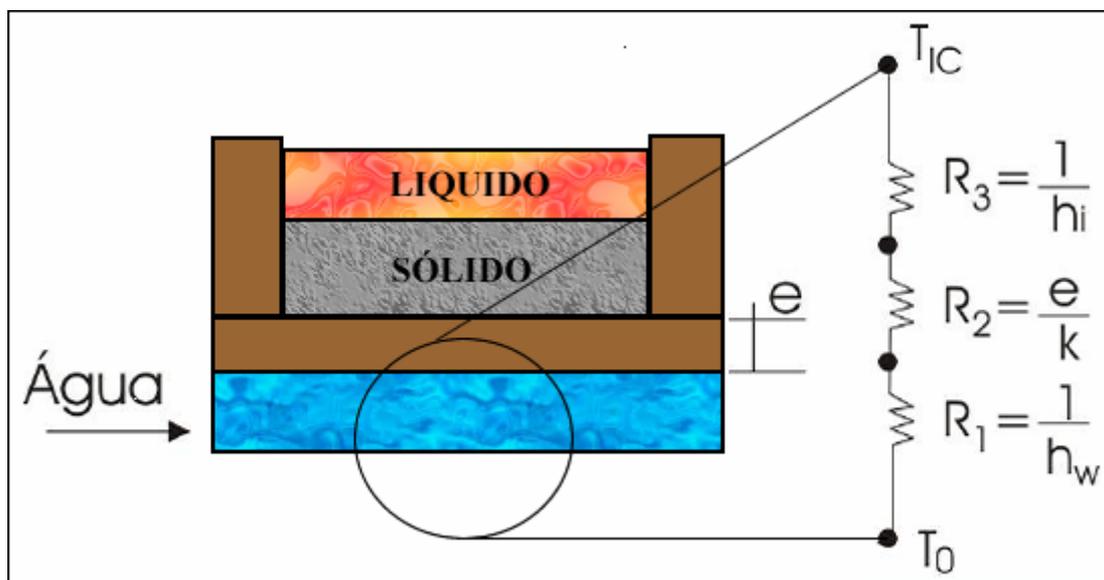


Figura 2.5 : Resistência térmicas na interface metal/molde em molde refrigerado à água (Spinelli, 2005).

A resistência interfacial entre as superfícies do lingote e do molde são geralmente as maiores e a resistência térmica global $\frac{1}{h_g}$ é expressa por:

$$\frac{1}{h_g} = \frac{1}{h_w} + \frac{e}{K} + \frac{1}{h_i} \quad (2.22)$$

onde h_g é o coeficiente global de transmissão de calor entre a superfície do lingote e o fluido refrigerante; e é a espessura da base do molde e, finalmente, h_w é o coeficiente de transmissão de calor molde/fluido de refrigeração. O fluxo de calor médio da superfície do lingote ate a água que refrigera o sistema é então fornecido por:

$$q = h_g (T_{IC} - T_o) \quad (2.23)$$

em que T_o é a temperatura da água.

2.4 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR METAL/MOLDE (h_i)

Pode-se verificar, pelo esquema mostrado na Figura 2.1 que o metal líquido, ao ser vazado em um molde, entra em contato com as suas paredes e, na interface metal/molde, surge uma resistência de contato conhecida como newtoniana, que é decorrente de vários fatores dentre os quais a afinidade físico-química entre o material do molde e o metal a ser solidificado. O emprego de lubrificantes para facilitar a desmoldagem proporciona a formação de uma película de separação entre material e molde. A contração de solidificação, por outro lado, provoca uma separação entre o molde e o metal solidificado. Nessas condições, a transferência de calor na interface metal/molde ocorre por condução através dos pontos de contato e por meio dos gases aprisionados nos vazios criados, e também por convecção e radiação entre as duas superfícies separadas. A Figura 2.6 apresenta esquematicamente os efeitos da resistência newtoniana, os modos de transferência de calor existentes na interface metal/molde bem como o modelo equivalente de Newton.

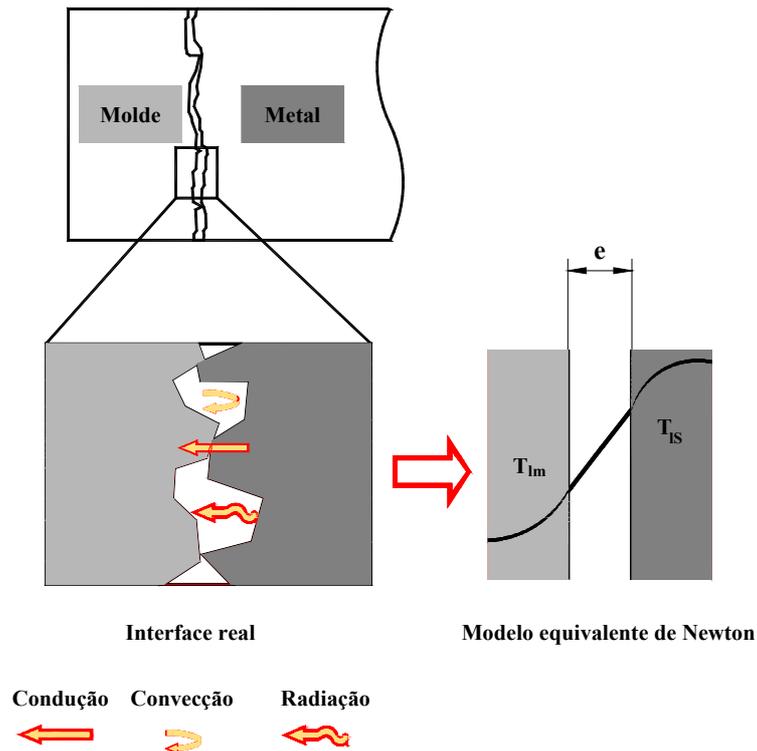


Figura 2.6 : Ilustração esquemática dos modos de transferência de calor atuantes na interface metal/molde e do modelo equivalente de Newton (Garcia,2001).

Do estudo dos coeficientes de transferência de calor nas interfaces metal/molde (h_i) e molde/ambiente (h_{Amb}), sabe-se que logo no início do processo de solidificação existe um bom contato térmico entre o metal fundido e a parede do molde, contudo, que este passa a inexistir instantes depois devido a formação de um vazio, denominado “*gap* de ar”, que tende a diminuir a eficiência da extração de calor do sistema, que pode ser traduzida pelo coeficiente h_i . A diminuição do valor deste coeficiente provoca uma desaceleração no processo de solidificação possibilitando a formação de uma microestrutura mais grosseira, afetando consideravelmente as propriedades mecânicas do material fundido (Quaresma, et al,1998). Inicialmente, o valor de h_i depende da afinidade físico-química entre metal líquido e molde, superaquecimento e condições de acabamento da superfície de contato do molde (Quaresma, et al,1997). Nesse início de processo, o coeficiente h_i tende a ser elevado devido a ação da pressão metalostática exercida pelo metal líquido remanescente sobre a camada sólida inicialmente formada. Esse coeficiente vai diminuindo gradativamente à medida que a contração volumétrica que acompanha a evolução da solidificação supera tal pressão resultando assim um contato térmico metal/molde inadequado e conseqüentemente na formação do *gap*. Torna-se evidente, assim, a fundamental importância do conhecimento do

comportamento da transferência de calor na interface metal/molde para que se obtenham resultados coerentes e precisos, quando do mapeamento térmico dos sistemas de fundição desenvolvidos por simulação numérica. A determinação desses coeficientes é realizada através da superposição de resultados experimentais e numéricos (Santos, 1997, Quaresma, 1999).

2.5 DETERMINAÇÃO DE h_i A PARTIR DO CONFRONTO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE PERFIS TÉRMICOS

Dentre os vários métodos recomendados na literatura para determinação de h_i (Garcia 2001), o método do confronto-teórico experimental de perfis térmicos é uma forma indireta de determinação de h_i . O mesmo consiste em mapear experimentalmente as temperaturas em determinados pontos do molde e do metal ao longo da solidificação e, posteriormente, confrontar os perfis de temperatura ou curvas de resfriamento experimentais obtidas com as curvas teóricas simuladas através de um modelo numérico de solidificação, que tenha sido devidamente aferido. A Figura 2.7 ilustra uma seqüência deste procedimento onde é mostrada a possibilidade da determinação tanto de valores médios de h_i quanto de valores variáveis com o tempo na solidificação de ligas do sistema Sn-Pb em moldes de aço. Esse método de determinação de h_i devido a maior disponibilidade de ferramentas computacionais é extremamente conveniente, principalmente quando se dispõe de um sistema de aquisição de dados para a monitorização experimental das temperaturas. O respectivo método tem sido utilizado por vários autores na literatura em trabalhos recentes (Spim, 1996; Quaresma, 1999; Siqueira, 2002; Rocha, 2003; Ferreira, 2004; Sá, 2004; Peres, 2005; Spinelli, 2005 e outros).

Quaresma (1999), utilizando um aparato experimental com solidificação unidirecional horizontal através de um molde maciço de aço, onde a convecção devido o soluto é levada em consideração, analisou o efeito da composição do soluto nos valores de h_i , em sistemas de ligas Sn-Pb concluindo que as ligas de maior concentração de soluto apresentam h_i mais baixos do que o verificado para ligas mais diluídas.

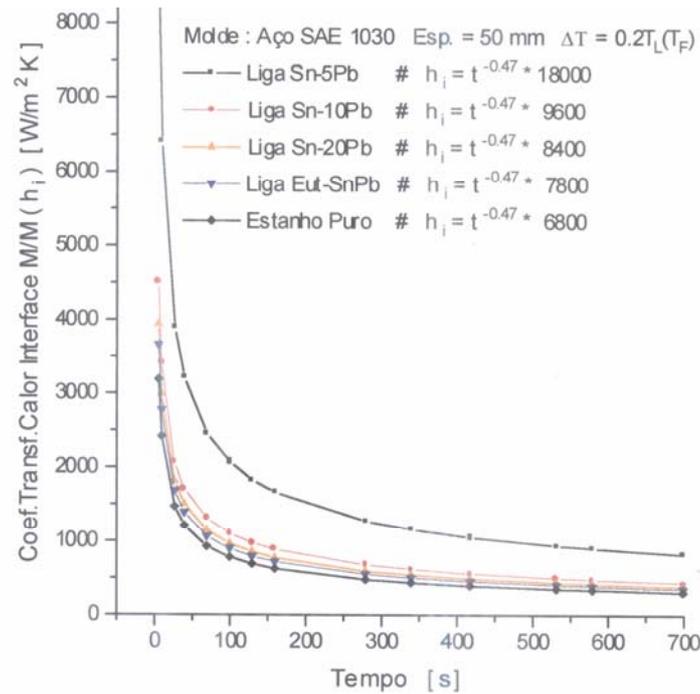


Figura 2.7: Correlação entre as curvas que representam o comportamento de h_i para o sistema de ligas Sn-Pb obtidas por (Quaresma, 1999).

Siqueira (2002), estudando a solidificação unidirecional vertical ascendente refrigerado à água em ligas do sistema Sn-Pb, sob condições transitórias de extração de calor onde o efeito da convecção devido o soluto não é analisada, apresenta a influência do teor de soluto sobre os perfis transitórios de h_i , e os resultados obtidos pelo respectivo autor mostram uma tendência de diminuição dos perfis com o aumento do teor de soluto. A Figura 2.8 mostra os resultados experimentais obtidos por Siqueira.

A curva referente à composição Sn-5%Pb evidencia uma exceção, tendo em vista que foi necessário um aumento da camada de alumina, de $100\mu\text{m}$ para $300\mu\text{m}$, para que a transição colunar/equiaxial fosse alcançada. Assim, pode-se notar uma sensível influência da adição do recobrimento do molde sobre os perfis de h_i , ou seja, os valores de h_i são fortemente influenciados pelas condições de extração de calor na interface metal/molde.

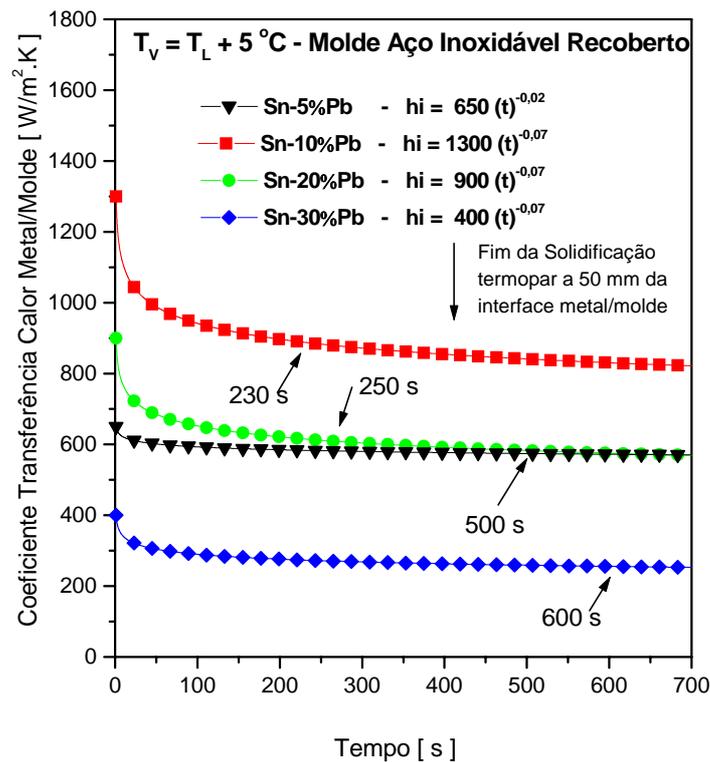


Figura. 2.8: Evolução do coeficiente de transferência de calor metal/molde em função do tempo para diferentes ligas do sistema Sn-Pb (Siqueira, 2002).

Por outro lado, Rocha (2003), utilizando o mesmo dispositivo de Siqueira, ao analisar ligas dos sistemas Al-Cu e Sn-Pb, obteve resultados contrários para os mesmos, isto é, enquanto para as ligas Al-Cu os valores de h_i aumentaram com o teor de soluto, nas ligas Sn-Pb, os mesmos diminuíram com o aumento da composição do soluto. As Figuras 2.9 e 2.10 apresentam os resultados alcançados pelo respectivo autor.

Rocha observou também que, apesar das ligas Al-Cu possuírem maior contração volumétrica que as ligas Sn-Pb, as mesmas caracterizam-se por apresentar o fenômeno de segregação inversa, que proporciona a formação de um perfil de concentração de soluto com valores iniciais maiores do que a concentração nominal da liga e que diminui gradativamente e reverte a tendência a partir de certo ponto, levando as concentrações menores do que a nominal no final da peça. Esse fenômeno, segundo o respectivo autor, provocado pela contração volumétrica e pelo fluxo interdendrítico de soluto, melhora o contato térmico metal/molde. Ao mesmo tempo, o aumento do teor de cobre parece implicar em um aumento da molhabilidade, ao contrário das ligas Sn-Pb o que é demonstrado pelos valores iniciais de h_i da Figura 2.10.

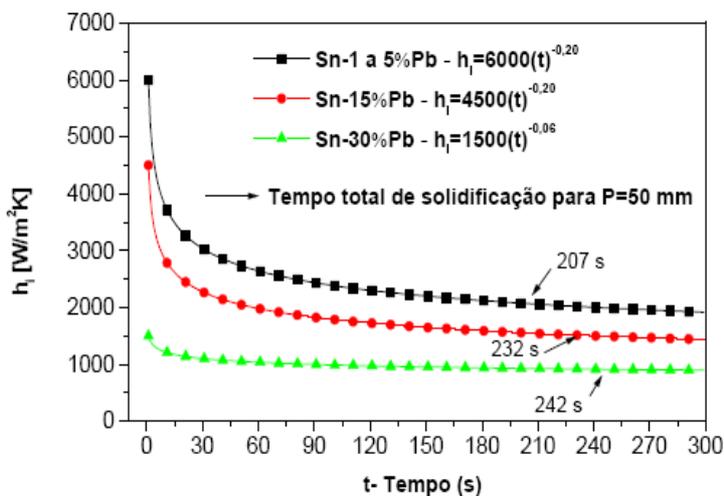


Figura 2.9: Variação do coeficiente de transferência de calor metal/molde na solidificação unidirecional vertical ascendente de ligas do sistema Sn-Pb (Rocha, 2003).

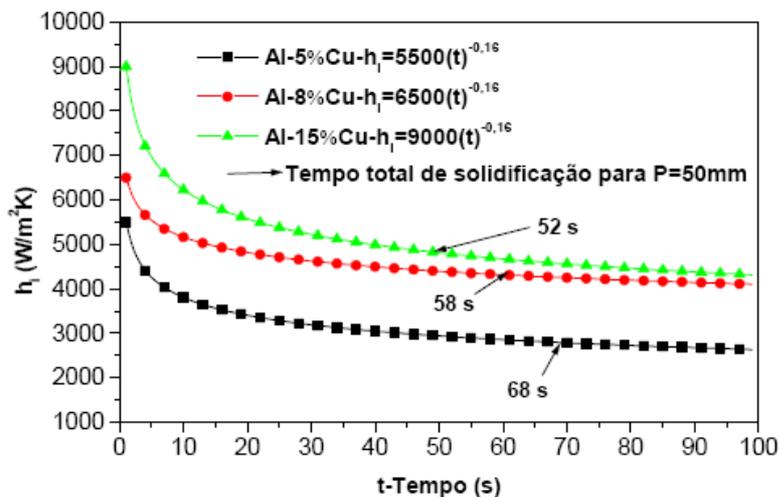


Figura 2.10: Variação do coeficiente de transferência de calor metal/molde na solidificação unidirecional vertical ascendente de ligas do sistema Al-Cu (Rocha, 2003).

Peres (2004), da mesma forma que Siqueira e Rocha, estudando ligas hipoeutéticas do sistema Al-Si, verificou uma tendência semelhante àquela observada por Siqueira e Rocha, para as ligas Sn-Pb, ou seja, os valores de h_i diminuem com o aumento do teor de soluto. A Figura 2.11 sintetiza os resultados alcançados pelo respectivo autor.

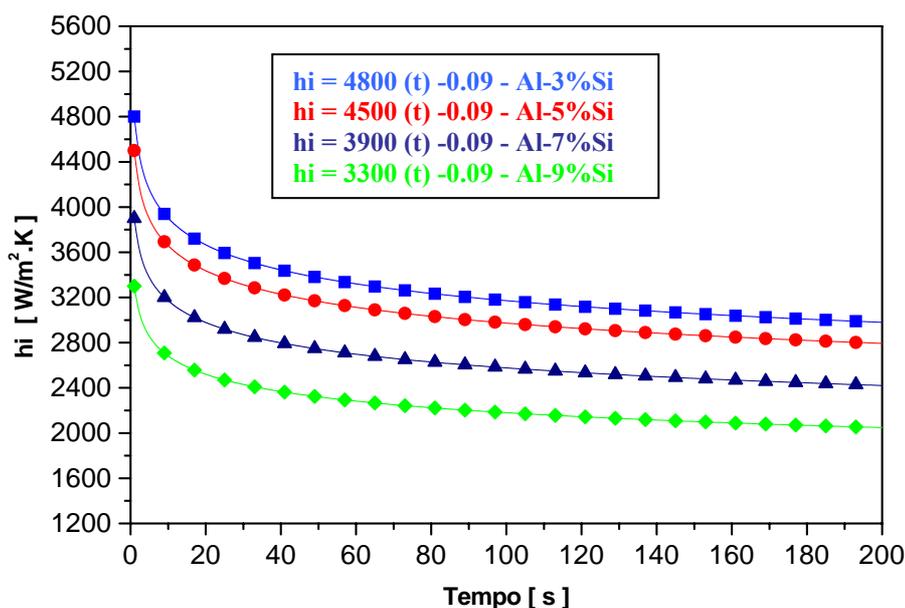


Figura 2.11: Valores do coeficiente de transferência de calor metal/molde na solidificação unidirecional vertical ascendente de ligas do sistema Al-Si (Peres, 2004).

Spinelli (2005), visando contribuir com os estudos anteriormente realizados com relação ao efeito da convecção devidos o teor de soluto nos valores de h_i em ligas Sn-Pb desenvolveu um dispositivo de solidificação unidirecional vertical descendente refrigerado à água, também sob condições transitórias de extração de calor, cujos resultados encontram-se mostrados na Figura 2.12.

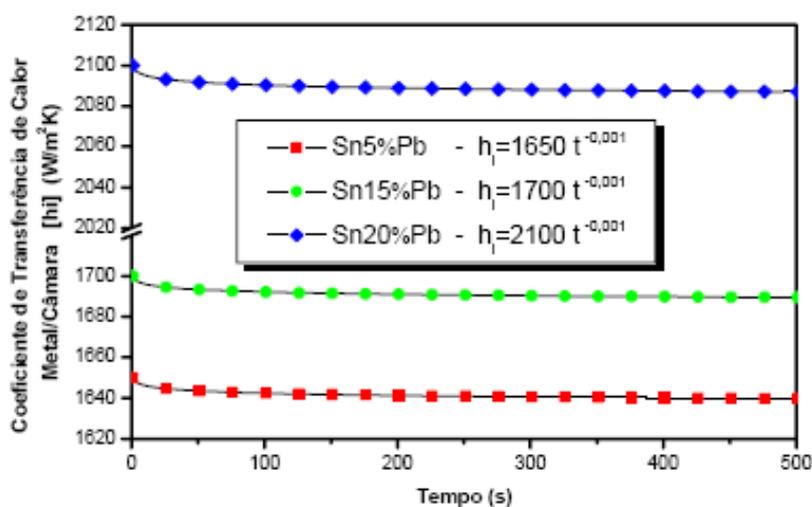


Figura 2.12: Variação do coeficiente de transferência de calor metal/molde na solidificação unidirecional vertical descendente de ligas do sistema Sn-Pb (Spinelli, 2005).

Os resultados de h_i obtidos por Spinelli, mostram um comportamento diferente daqueles obtidos por Siqueira (2002) e Rocha (2003), isto é, os valores de h_i aumentam à medida que a composição de soluto se eleva, além do que os mesmos são inferiores àqueles obtidos por Rocha (2003) para as ligas Sn-5%Pb e Sn-15%Pb. Segundo Spinelli, tal comportamento de h_i pode ser justificado pelo fato de que o lingote, no caso da solidificação descendente, apresenta um menor contato térmico em relação à parede da câmara de refrigeração, proporcionado tanto pela contração volumétrica como pelo peso próprio do lingote. Dessa forma, o contato térmico metal/câmara torna-se menos eficiente, o que implica numa redução significativa dos valores do coeficiente global de transferência de calor. No caso da solidificação unidirecional ascendente, ao contrário, a contração volumétrica e o peso próprio do lingote auxiliam na melhoria do contato metal/molde, o que resulta em coeficientes de transferência de calor mais elevados.

2.6 SISTEMAS UNIDIRECIONAIS DE SOLIDIFICAÇÃO PROPOSTOS NA LITERATURA PARA CONDIÇÕES TRANSITÓRIAS DE EXTRAÇÃO DE CALOR

2.6.1 Solidificação Unidirecional Vertical Ascendente

No que se refere à solidificação unidirecional vertical, a literatura destaca vários trabalhos (Blanco, M, Barelli N; Benedetti A. V; Flor, S. W. A, 2003; Melo, M. L. N. M; Madiuto, P. F; Davelli, C. R; Massak, M. V, 2004; Melo; Rizzo; Santos, 2004;). A Figura 2.13 apresenta um esquema do dispositivo de solidificação vertical ascendente utilizado por (Siqueira, 2002; Rocha, 2003; Sá, 2004; Peres, 2005), em que o metal é fundido dentro do dispositivo e, quando a temperatura do metal líquido atinge um determinado valor, a solidificação se inicia através do acionamento da água de refrigeração na parte inferior do molde.

Nestas condições, a solidificação se processa no forno vertical e de baixo para cima. Cinco termopares inseridos dentro do metal em diferentes posições a partir da base permitem o registro da evolução térmica durante todo o processo. Estes dados armazenados, na memória de um computador, são utilizados posteriormente para o levantamento das variáveis térmicas de solidificação tais como coeficientes transitórios de extração de calor entre o metal e a água de refrigeração, velocidades das isothermas solidus e liquidus, gradientes térmicos e taxas de

resfriamento. Neste dispositivo, a solidificação evolui em sentido contrário ao da ação da gravidade e, conseqüentemente, o peso próprio do lingote atua no sentido de favorecer o contato térmico com a base refrigerada. Outro aspecto interessante e típico deste dispositivo experimental é que, quando o soluto rejeitado na solidificação provoca a formação de um líquido interdendrítico mais denso que o volume do metal líquido de origem, a solidificação se processa de forma completamente estável sob o ponto de vista de movimentação do líquido, ou seja, como o perfil de temperaturas no líquido é crescente em direção ao topo do lingote e o líquido mais denso localiza-se junto à fronteira das transformações sólido/líquido, não ocorrem correntes convectivas nem por diferença de temperatura e nem por diferença de densidade. Isto permite uma análise experimental e cálculos teóricos isentos deste complicador, uma vez que a transferência de calor dentro do lingote é realizada essencialmente por condução térmica unidimensional. O dispositivo permite ainda que sejam programados experimentos para analisar a influência do superaquecimento no metal líquido e para investigar a função da resistência térmica de contato metal/molde na estrutura de solidificação (Spinelli, 2005).

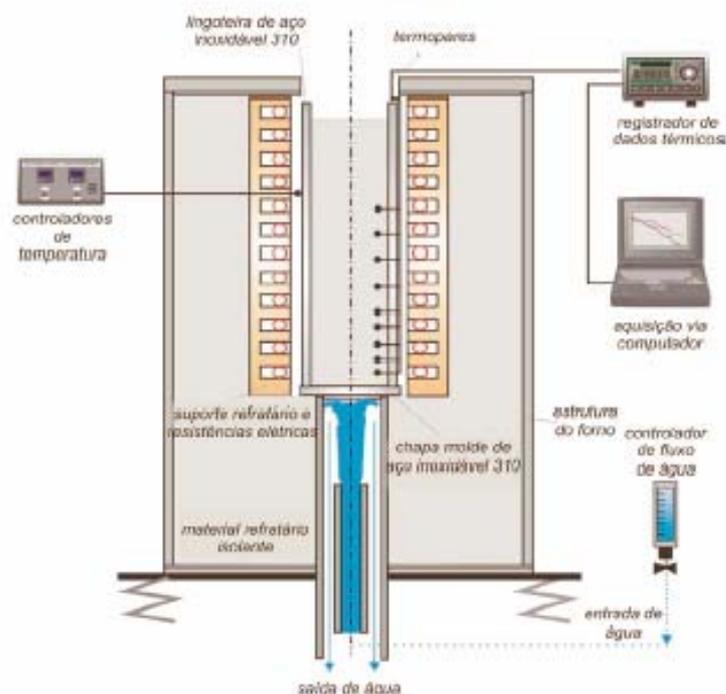


Figura 2.13: Dispositivo de solidificação vertical ascendente utilizado por Siqueira (2002), Rocha (2003), Sá (2004) e Peres (2005).

2.6.2 Solidificação Unidirecional Vertical Descendente

A Figura 2.14 mostra um esquema do dispositivo de solidificação vertical descendente utilizado por (Spinelli, 2005). É bastante similar ao anterior quanto à sua estruturação; entretanto, a câmara refrigerada à água é localizada no topo do lingote. Nestas condições, a solidificação acontece no mesmo sentido da ação da força gravitacional, com o peso próprio do lingote atuando no sentido de deslocar o mesmo do contato com a base refrigerada, o que irá configurar uma situação de maior resistência térmica à passagem de calor do lingote em direção ao fluido de refrigeração, quando comparada com a solidificação ascendente. Outra diferença essencial consiste sempre na presença de algum movimento convectivo, já que o perfil de temperatura do líquido é crescente em direção à base do lingote (isolada termicamente), o que significa que ocorrerá pelo menos convecção por diferença de temperatura no líquido. Naturalmente que, se o soluto rejeitado provocar um líquido interdendrítico de maior densidade do que o líquido nominal ocorrerá também movimento convectivo por diferenças de densidade. Este arranjo experimental, proposto por Spinelli, é importante exatamente para fazer comparações com a solidificação ascendente permitindo a verificação da influência de correntes convectivas sobre o arranjo de estruturas de solidificação, indicando as diferenças entre os dois sistemas quando são solidificadas ligas de mesma composição.

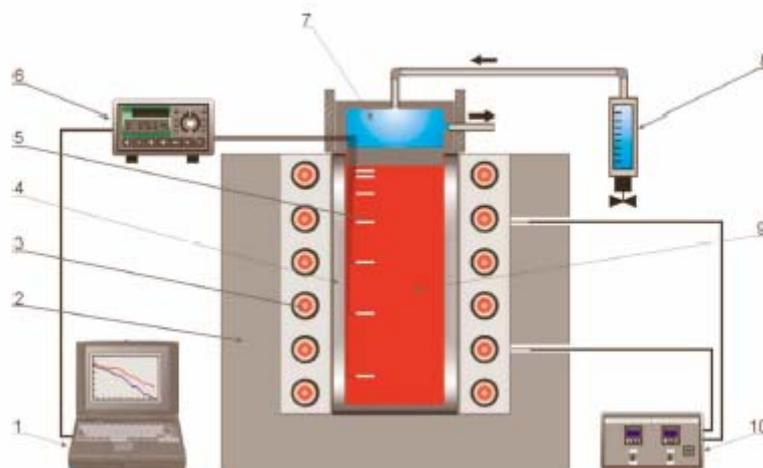


Figura 2.14: Dispositivo de solidificação vertical descendente utilizado por (Spinelli, 2005); (1) Aquisição via computador; (2) Material refratário isolante; (3) Resistência elétrica; (4) Lingoteira bipartida; (5) Termopares; (6) Registrador de dados térmicos; (7) Câmara de refrigeração; (8) Rotâmetro; (9) Metal líquido; (10) Controle de potência do forno.

2.6.3 Solidificação Unidirecional Horizontal

A Figura 2.15 apresenta um esquema do dispositivo de solidificação unidirecional horizontal utilizado por (Quaresma, 1999; Goulart, 2005). A forma horizontal é, sem dúvida, a configuração bastante complexa sob ponto de vista de determinação das variáveis térmicas de solidificação. Neste caso, o processo pode ser conduzido de duas maneiras distintas, isto é, a partir do vazamento de metal líquido dentro do molde isolado termicamente nas laterais com o calor sendo retirado somente por uma das extremidades através de um bloco maciço metálico. Nesse caso, a turbulência do vazamento induz correntes de convecção forçada que levam algum tempo para se dissipar e agem com intensidades diferentes ao longo da seção do lingote. Uma outra maneira seria com o calor sendo extraído através de uma câmara de refrigeração, proposta neste trabalho. A escolha do molde de aço como absorvedor de calor, foi realizada de forma comparativa depois de repetidos vazamentos com uma parede de cobre, devido se ter obtido uma melhor unidirecionalidade microestrutural e com base na grande quantidade de trabalhos que utilizam coquilhas de aço. As outras paredes foram todas construídas com material isolante à base de sílica para garantir que a maior parte da carga térmica seria retirada apenas através da parede metálica. A posição do orifício cônico na tampa superior próximo à parede oposta à parede metálica, tem a finalidade de minimizar a turbulência proporcionada pelo vazamento de metal líquido, que seria maior se o fluxo do mesmo ocorresse mais próximo à parede metálica (Quaresma, 1999).

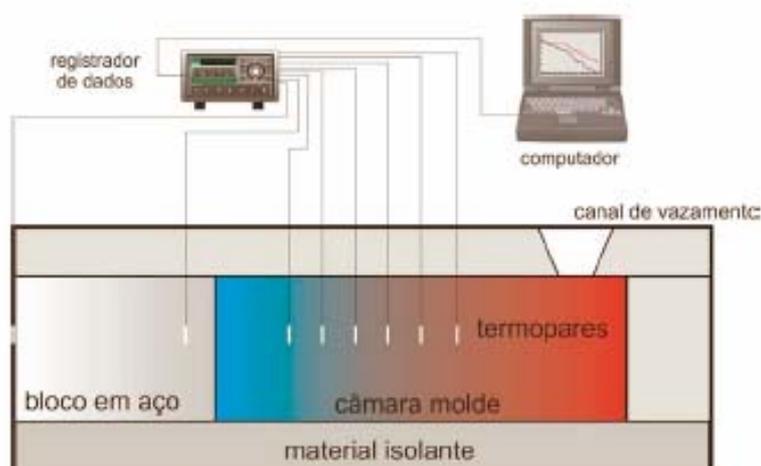


Figura 2.15: Dispositivo de solidificação unidirecional horizontal utilizado por (Quaresma, 1999; Goulart, 2005).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O plano de trabalho foi elaborado prevendo-se matérias primas e equipamentos a serem utilizados na construção e aferição do Dispositivo de Solidificação Unidirecional Horizontal Refrigerado à Água, bem como as etapas a serem seguidas para sua execução conforme indica o fluxograma da Figura 3.1.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Materiais Utilizados na Construção do Dispositivo de Solidificação Unidirecional Horizontal Refrigerado à Água

- Chapa de aço carbono comum (SAE 1020) de 3 mm para confecção da carcaça externa do dispositivo e da lingoteira em forma trapezoidal para facilitar a saída do lingote..
- Chapa de aço carbono comum (SAE 1020) de 4 mm para confecção da haste de fixação dos termopares.
- Resistência elétrica Kanthal com 5 mm de diâmetro da espira, 320 W de potência, 220 V de tensão e temperatura de trabalho até 1000 °C, conforme mostra a Figura 3.2.
- Tijolo refratário sílico-aluminoso para reforçar o revestimento interno do dispositivo que permitirá o isolamento térmico evitando a troca de calor pelas paredes laterais conforme indica a Figura 3.3.

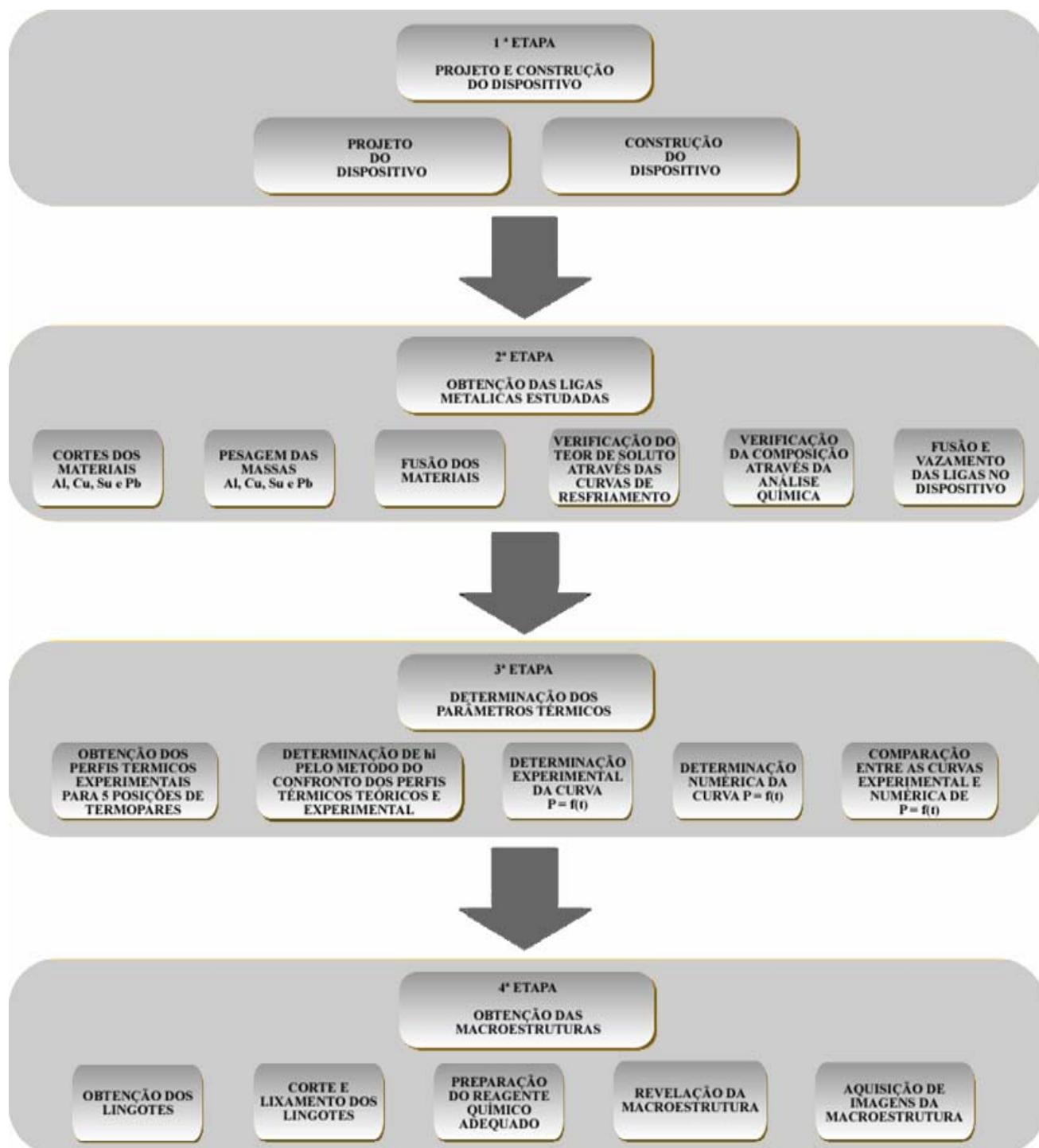


Figura 3.1: Fluxograma das diversas etapas envolvidas na realização dos trabalhos experimentais.



Figura 3.2: Resistência elétrica.



Figura 3.3: Tijolo refratário sílico-aluminoso.

- Massa refratária tipo cimento para acabamento interno do dispositivo.

3.2.2 Equipamentos Utilizados na Construção do Dispositivo

- Guillotina para corte de chapas metálicas, tipo Norton, capacidade 1/4 in.
- Máquina de soldagem com eletrodo revestido AWS E- 6013.
- Furadeira manual tipo Bosch.

3.2.3 Materiais Utilizados na Aferição do Dispositivo

Tabela 3.1: Mostra a análise química dos metais puros utilizados na preparação das ligas estudadas neste trabalho

Metal	Al%	Cu %	Sn%	Pb%	Ni%	Si%	Mg%	Cr%	Mn%	Zn%	Fe%
Al	99,66	0,024			0,0082	0,12	0,0013				0,17
Cu		98,63		0,002		0,90		0,27	0,05	0,41	0,05
Sn		0,101	98,74	0,30	0,056	0,59		0,04	0,03	0,16	0,06
Pb		0,10	0,406	98,9	0,198	0,07	0,042	0,09	0,08	0,27	0,16

- Tinta à base de caulim para evitar contaminação do banho de metal líquido e preservar o cadinho por mais tempo.

3.2.4 Equipamentos Utilizados na Aferição do Dispositivo

- Forno horizontal à resistência tipo mufla com temperatura de trabalho até 1250°C, mostrado na Figura 3.4.a.
- Cadinho de carbetto de silício tipo AS-6 da Carbosil com capacidade de 1 litro, apresentado na Figura 3.4.b.
- Tenaz ou garra metálica utilizada para introduzir e retirar o cadinho do forno durante as operações de fusão e vazamento do metal líquido, indicado Figura 3.4.c.



Figura 3.4: (a) Forno elétrico; (b) Cadinho; (c) Tenaz.

- Registrador de temperatura tipo Almemo, modelo 2290-8, apresentando uma configuração que permite a leitura e aquisição direta de temperaturas em até cinco canais de entrada e dois canais de saída, mostrado Figura 3.5.

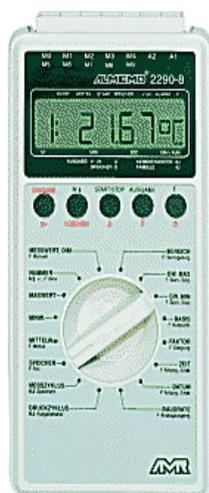


Figura 3.5: Registrador de temperatura tipo Almemo.

- AMR-Software, marca ALMEMO Data-Control, utilizado para acompanhar, registrar e armazenar os dados obtidos pelos termopares durante o processo de solidificação, além de possibilitar uma monitorização *on-line* dos dados medidos, apresentado na Figura 3.6.

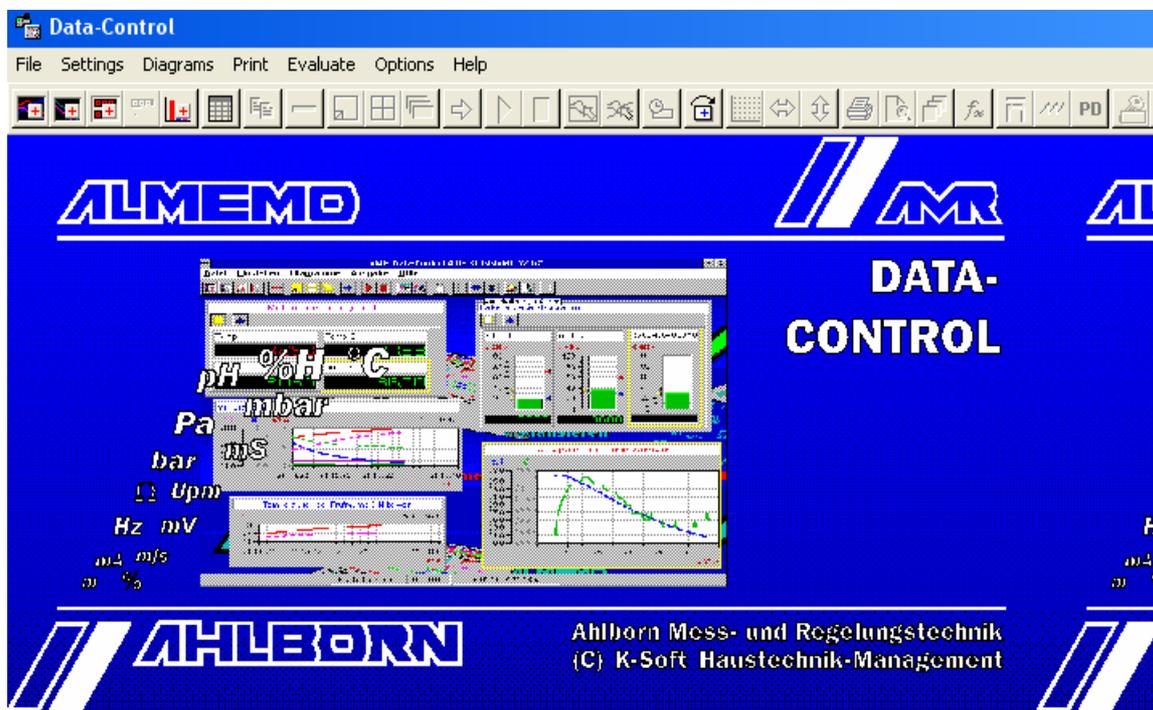


Figura 3.6: Tela de iniciação do programa AMR-Software, marca Almemo Data-Control.

- Coquilha de aço para coleta de amostras das ligas para análise química.
- Espectrômetro ótico cedido pela Alumínio de Barcarena-ALUBAR para a determinação da composição química da liga Al-4%Cu.
- Termopares de Chromel-Alumel do tipo K, com diâmetro de 1,5 mm, com faixa de utilização até 1260°C para mapear horizontalmente os lingotes. A escolha desse tipo de termopar pode ser justificada em função da grande faixa de utilização de temperaturas o que permitiu que o mesmo fosse utilizado para os dois sistemas de ligas investigados.
- Microscópio eletrônico de varredura (MEV) acoplado a um sistema de análise por energia dispersiva (EDS), para a determinação da composição química das ligas do sistema Sn-Pb, apresentado nas Figuras 3.7. e 3.8.
- Balança eletrônica de precisão de 0,01 mg utilizada na pesagem de metais para a elaboração das ligas



Figura 3.7: Laboratório de preparação de amostras do MEV do Centro de Geociências da UFPA.



Figura 3.8: Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura – LABMEV do Centro de Geociências da UFPA.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.3.1 Projeto do Dispositivo

Tendo em vista a implantação do Grupo de Pesquisa de Metalurgia Física e de Transformação do Centro Federal de Educação Tecnológica do Pará – CEFET/PA, nucleado a partir da montagem do Laboratório de Solidificação de Metais para o desenvolvimento de pesquisas, iniciou-se o projeto do referido dispositivo com a definição de suas dimensões baseadas no sistema de solidificação horizontal desenvolvido por Quaresma (1999). Assim, o projeto do dispositivo foi executado com auxílio do software AUTO-CAD Versão 2004, conforme esquematizado nas Figuras de 3.9 a 3.12, as quais representam as dimensões das peças individuais que, depois de montadas, constituem o dispositivo mostrado na Figura 3.13. Objetivando evitar vibrações mecânicas durante as etapas de vazamento e resfriamento do lingote, o dispositivo foi montado sobre uma bancada de aço. Para a instalação da resistência elétrica, foram usinadas cavidades adequadas nos tijolos refratários a fim de ajustá-la e garantir o aquecimento das paredes evitando, assim, perdas de calor pelo fundo e laterais do dispositivo.

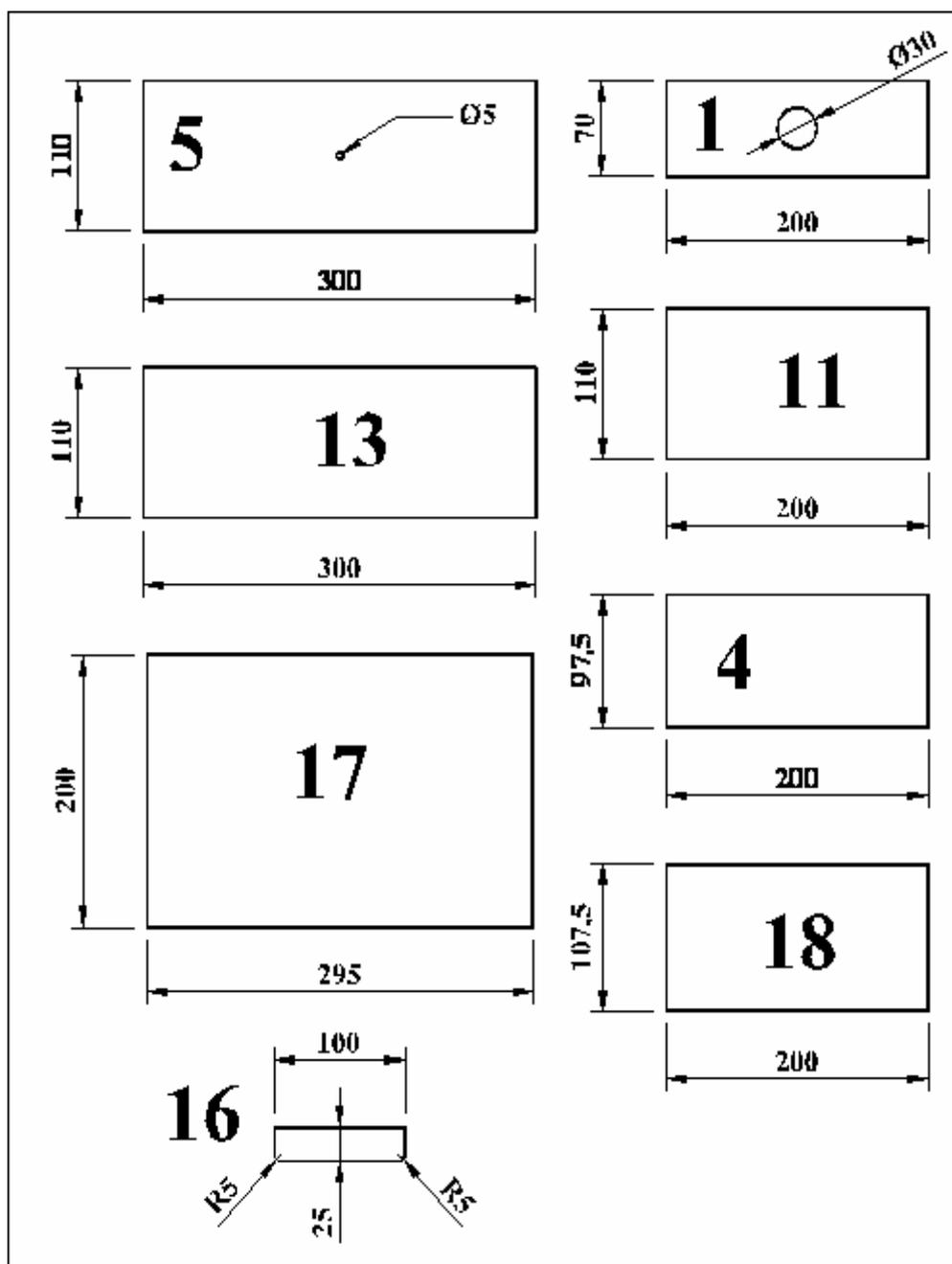


Figura 3.9: Dimensões de peças de aço carbono comum constituintes do dispositivo utilizado neste trabalho.

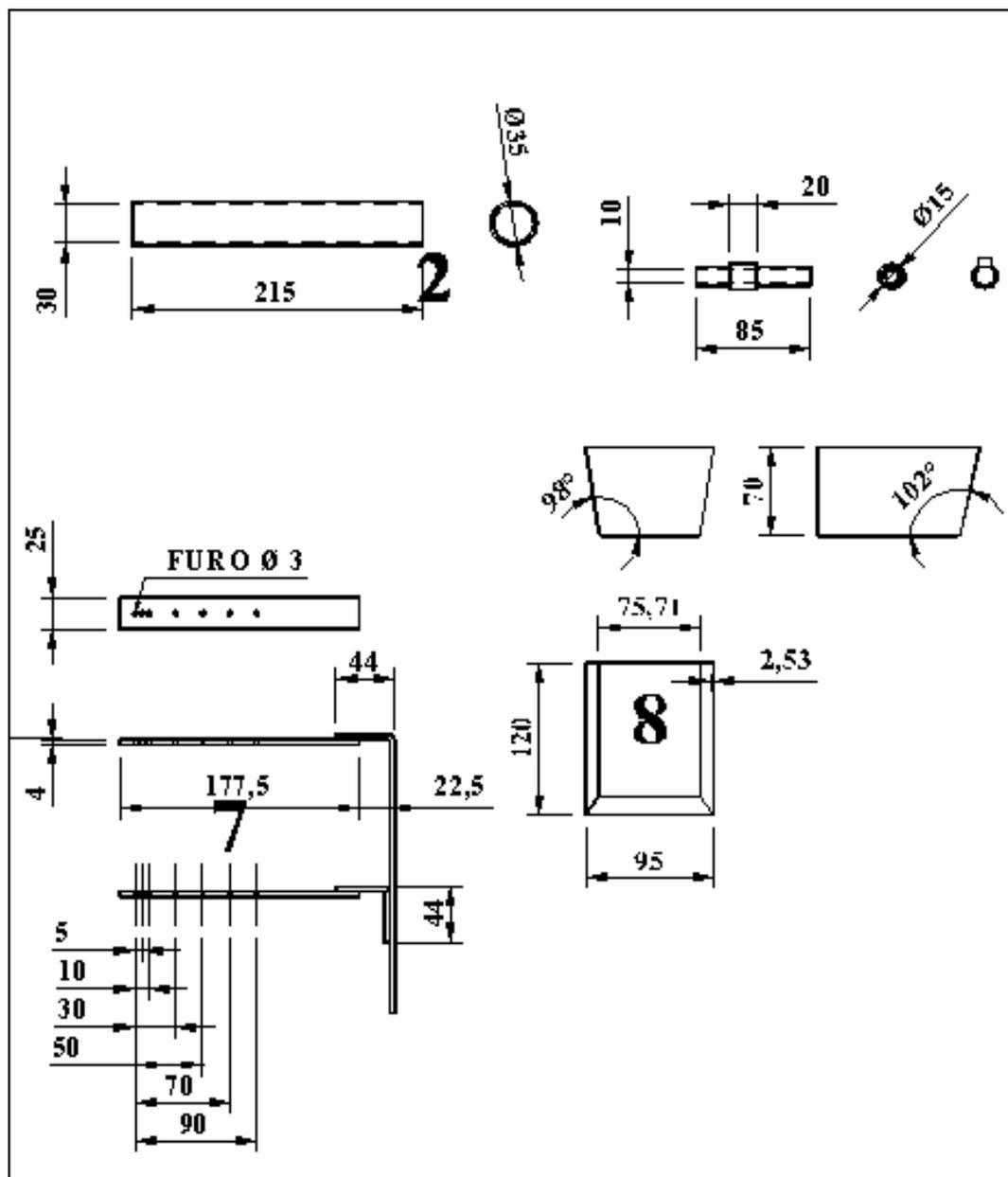


Figura 3.10: Dimensões de peças de aço carbono comum constituintes do dispositivo utilizado neste trabalho.

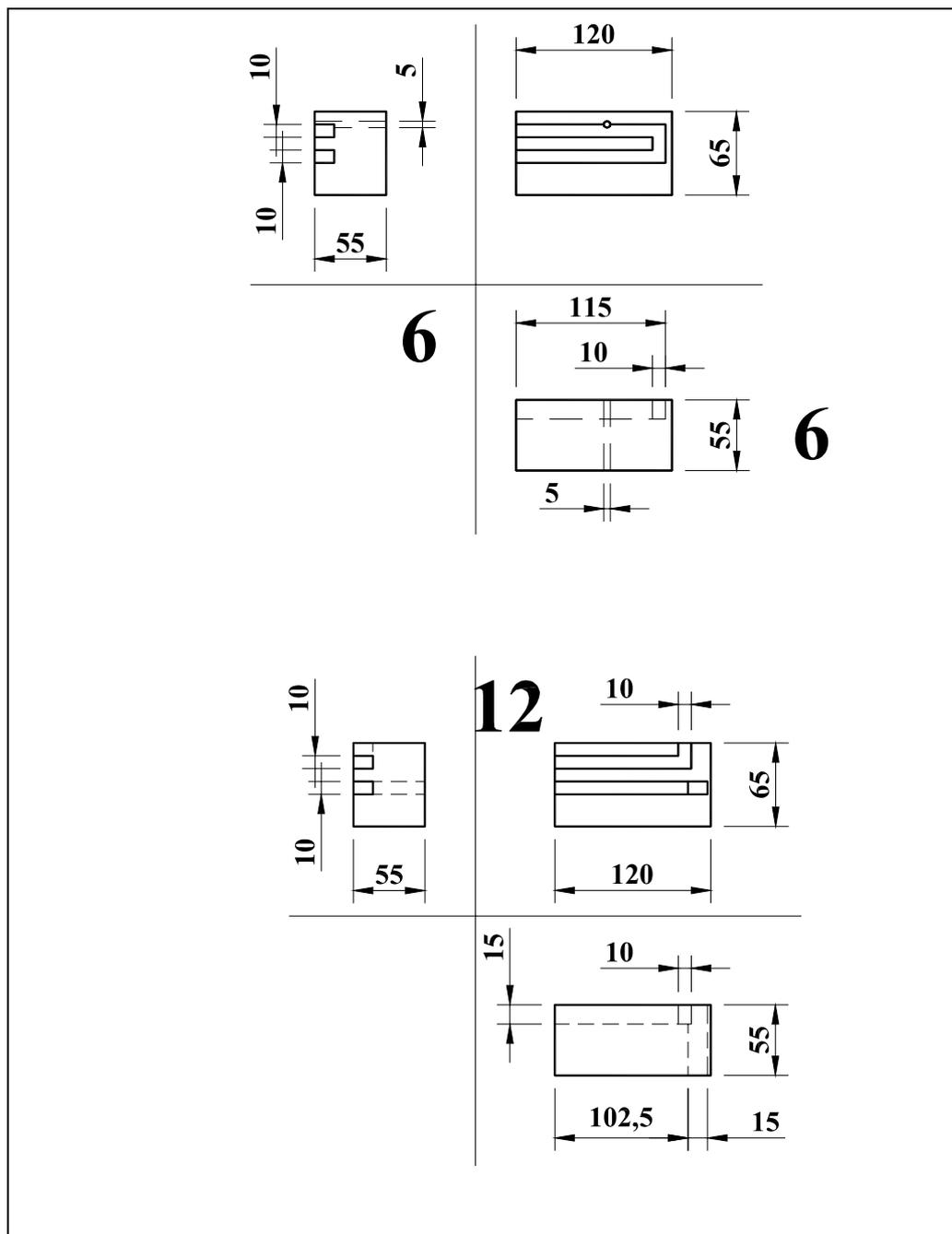


Figura 3.11: Dimensões de peças de aço carbono comum constituintes do dispositivo utilizado neste trabalho.

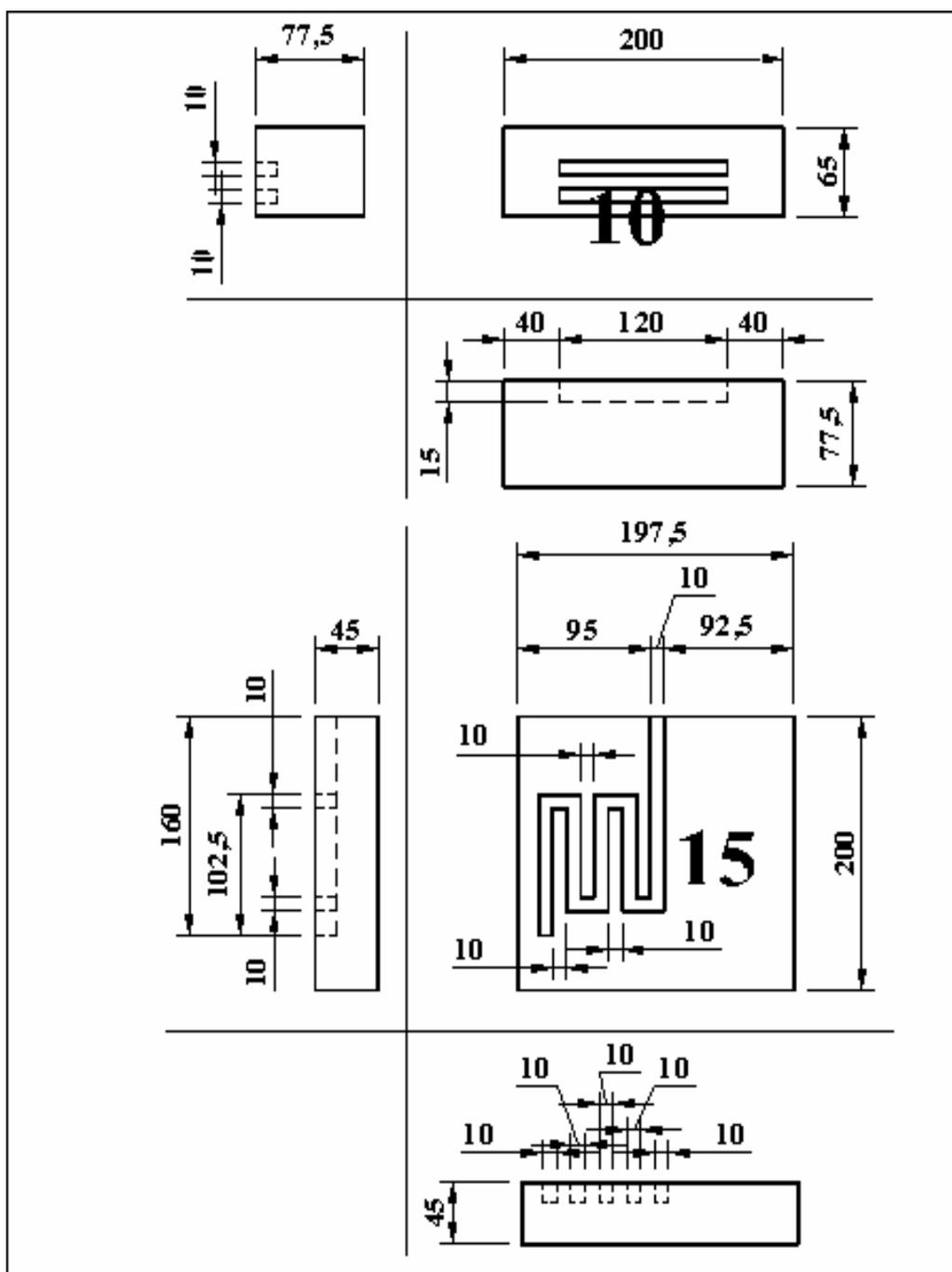


Figura 3.12: Dimensões de peças de aço carbono comum constituintes do dispositivo utilizado neste trabalho.

A Figura 3.13 apresenta a montagem conjunta de todas as peças que constituem o dispositivo de solidificação unidirecional horizontal refrigerado à água.

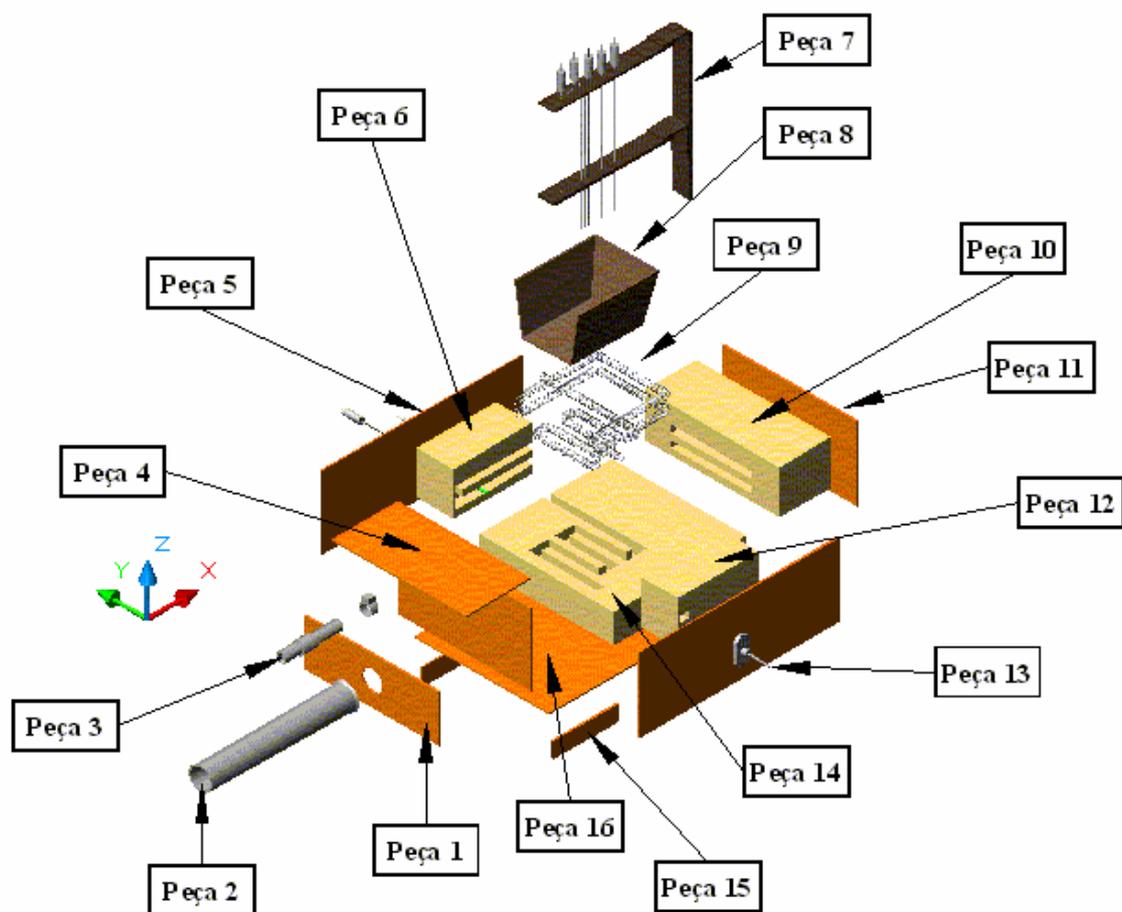


Figura 3.13: Vista geral do conjunto de peças componentes do dispositivo de solidificação utilizado neste trabalho.

A Tabela 3.2: Apresenta as peças do dispositivo utilizado neste trabalho com suas respectivas dimensões

Nº	Descrição das Peças	Dimensões (mm)
Peça 1	Chapa de aço 1020 de 3mm	200 x 60
Peça 2	Tubo de aço para saída de água	Diâmetro 35
Peça 3	Tubo de aço para entrada de água	Diâmetro 15
Peça 4	Chapa de aço 1020 de 3mm	200 x 100
Peças 5, 13	Chapa de aço 1020 de 3mm	300 x 110
Peças 6, 12	Tijolo refratário com cavidade para acoplamento das resistências	120 x 50 x 60
Peça 7	Haste de sustentação dos termopares	200 x 25
Peça 8	Lingoteira de chapa de aço 1020 de 3mm	Base maior 80; Base menor 70; Altura 60; 110 Comprimento
Peça 9	Resistência elétrica envolvendo o dispositivo	Diâmetro da espira 5
Peça 10	Tijolo refratário utilizado na base do dispositivo	200 x 75 x 60
Peça 11	Chapa de aço 1020 de 3mm	200 x 110
Peça 14	Massa refratária compactada na base do dispositivo	Altura 50
Peça 15	Chapa de aço 1020 de 3mm	100 x 25
Peça 16	Chapa de aço 1020 de 3mm	300 x 200

3.3.2 Construção do Dispositivo

Após a soldagem das chapas de aço as mesmas foram revestidas com tijolos refratários para que a resistência elétrica, com potência controlada, fosse introduzida a fim de estabilizar os diferentes níveis de superaquecimento no metal líquido bem como para proporcionar um isolamento térmico adequado evitando perdas de calor pelas laterais e base da lingoteira, impedindo dessa maneira a possibilidade de nucleação de cristais nessas paredes bem como na base da lingoteira, conforme apresentado na Figura 3.14.

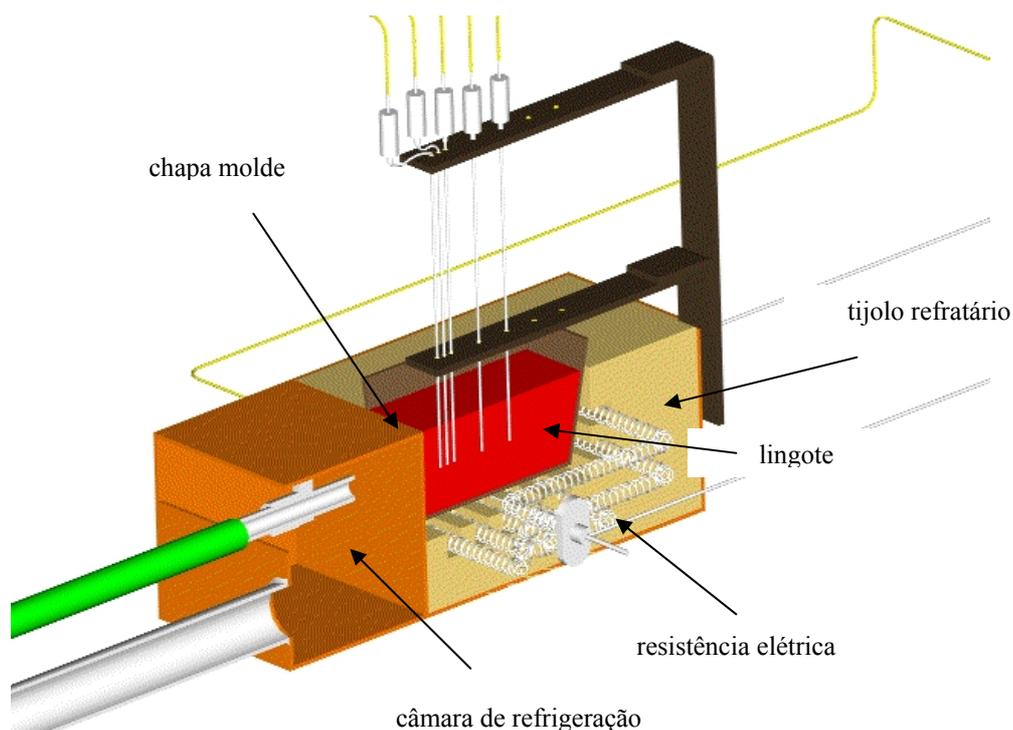


Figura 3.14: Corte longitudinal do dispositivo utilizado neste trabalho mostrando a resistência elétrica e o posicionamento dos termopares no interior do mesmo.

Na parte superior do dispositivo, conforme esquema mostrado na Figura 3.15 foi montada uma haste metálica com furos que permitiu o acoplamento de 5 (cinco) termopares ao longo do lingote.

A lingoteira de chapa de aço comum foi soldada com uma frente livre para ser posicionada no dispositivo evitando uma resistência térmica com a chapa da câmara de refrigeração onde ocorre o fluxo constante de água, conforme indicado na Figura 3.16.

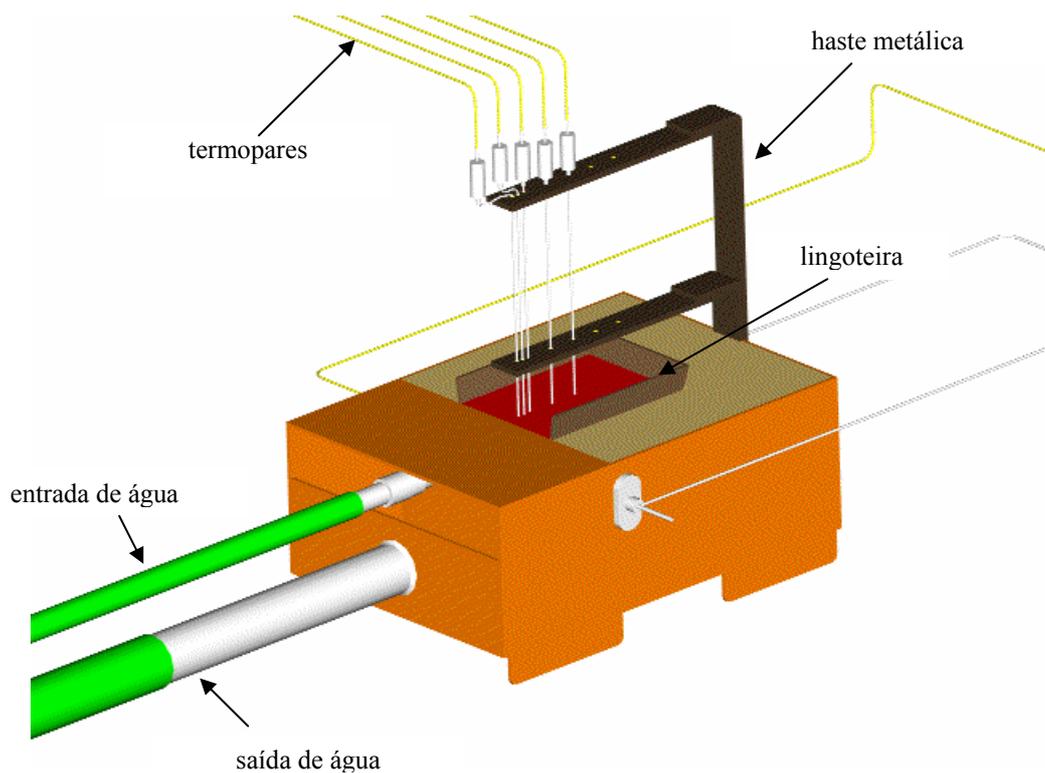


Figura 3.15: Vista do dispositivo construído com a respectiva montagem dos termopares.

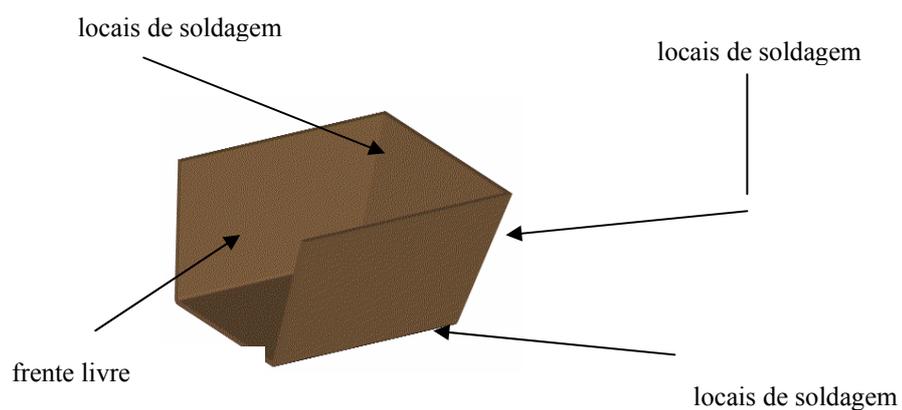


Figura 3.16: Lingoteira de aço com a frente livre.

A temperatura da resistência elétrica do dispositivo foi monitorada através de um termopar tipo K posicionado na parte inferior da lingoteira e conectado ao controlador digital

de temperaturas, conforme indicado na Figura 3.17, montado em um painel com display de visualização no qual existem dois comandos, isto é, um que programa a temperatura de trabalho e outro que estabiliza essa temperatura. A instalação elétrica propicia o alcance de temperaturas próximas de 1000°C cujo esquema encontra-se detalhado na Figura 3.18.

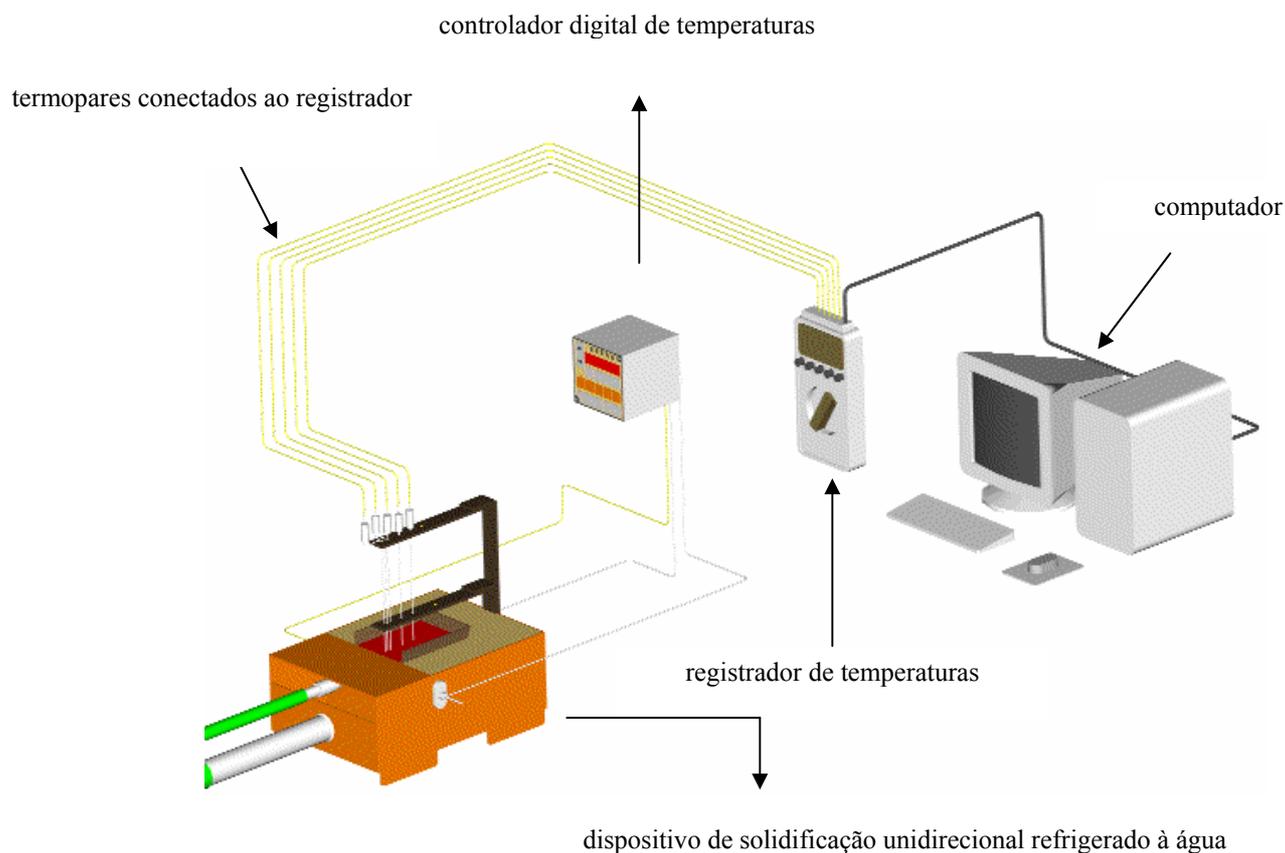
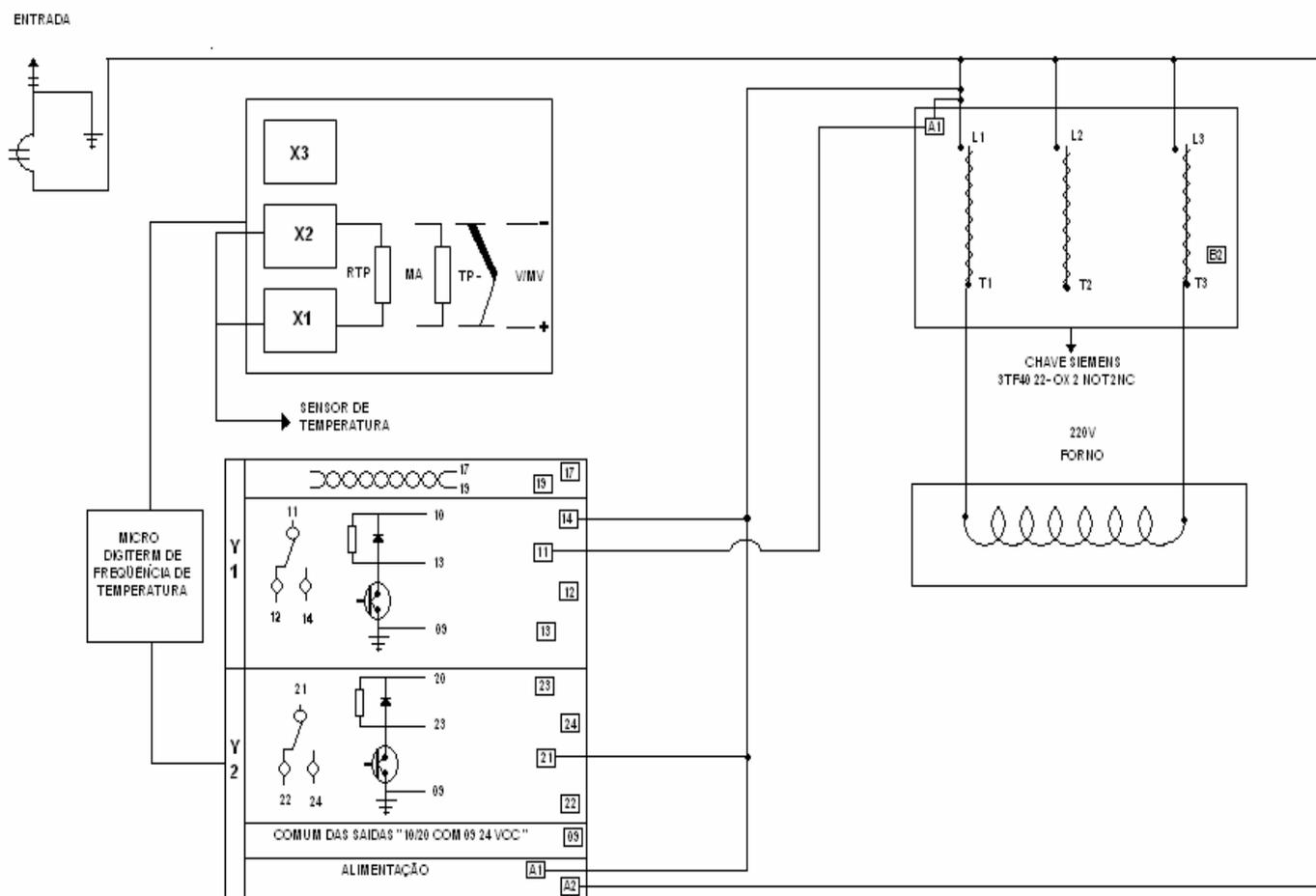


Figura 3.17 - Esquema completo do dispositivo de solidificação mostrando sua interface com o sistema de registro de temperaturas acoplado ao computador.

O emprego deste dispositivo experimental permite analisar o efeito da convecção proveniente de correntes convectivas por rejeição do soluto uma vez que, em trabalhos anteriores (solidificação ascendente), o soluto rejeitado durante a solidificação apresentava densidade maior que a do metal líquido correspondente, minimizando este efeito.



3.18: Esquema da instalação elétrica para funcionamento adequado do dispositivo.

3.3.3 Justificativa da Utilização das Ligas Al-4%Cu e do Sistema Sn-Pb

A escolha de ligas pertencentes aos sistemas binários acima mencionados para testar a aplicação do dispositivo de solidificação apresentado neste trabalho podem ser justificada através dos seguintes motivos:

- As ligas escolhidas, pertencentes aos respectivos sistemas binários, apresentam respostas térmicas durante o resfriamento bastante distintas.
- As suas propriedades termofísicas são conhecidas.

- A liga Al-4%Cu apresenta grande importância nas indústrias mecânica e metalúrgica devido apresentar elevada resistência à tração (540 MPa), após adequados tratamentos térmico e mecânico (Coutinho, 1980), além de possuir boas condições de lixamento, polimento e ataque químico para análise metalográfica, com técnicas de caracterização consolidadas na literatura. O diagrama de equilíbrio do sistema Al-Cu encontra-se parcialmente mostrado na Figura 3.19.
- Por outro lado, a escolha das ligas Sn-Pb, deve-se ao fato das mesmas apresentarem temperaturas liquidus relativamente baixas o que facilita as operações de fusão e vazamento. A Figura 3.20 apresenta parcialmente o diagrama de equilíbrio do sistema Pb-Sn.

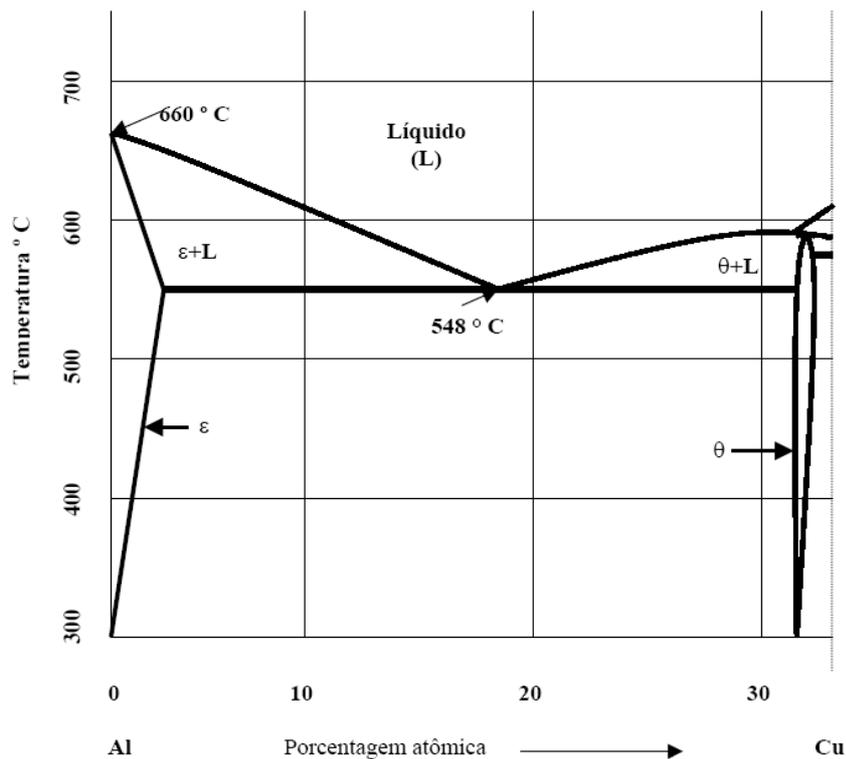


Figura 3.19: Diagrama de equilíbrio parcial do sistema Al-Cu (Rocha et al, 2003).

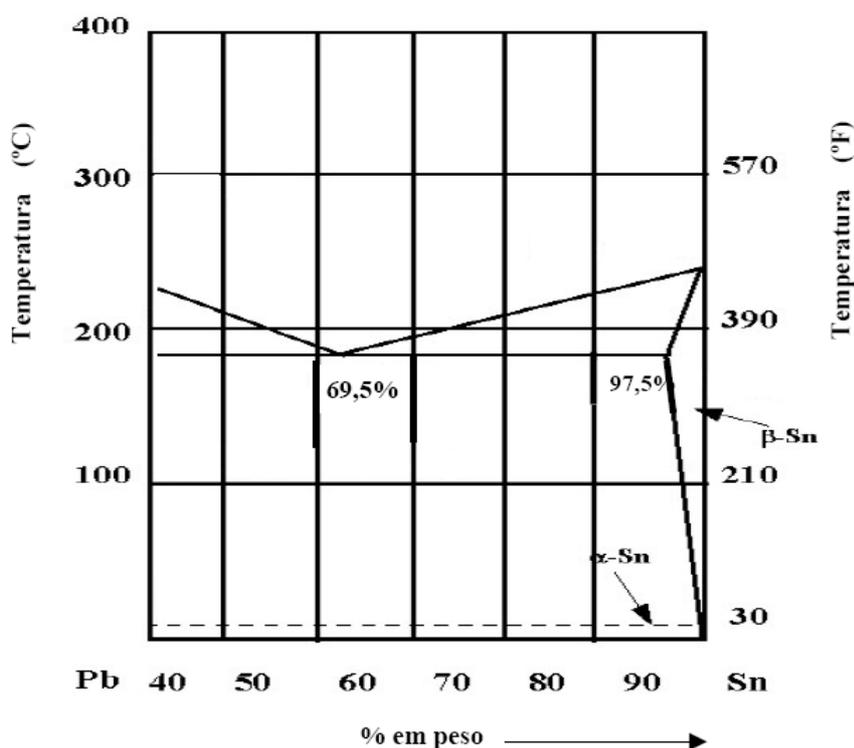


Figura 3.20: Diagrama de equilíbrio parcial do sistema Pb-Sn (Rocha et al, 20030).

3.3.4 Obtenção das Ligas Al-4%Cu e Sn-5, 15, 20% Pb e Levantamento das Curvas de Resfriamento.

As ligas foram fundidas em um forno elétrico tipo mufla à resistência. Inicialmente, foram colocados manualmente os respectivos materiais constituintes na proporção exata no cadinho de carbetto de silício, revestido internamente por uma camada protetora de tinta à base de caulim, na proporção de 75% de caulim e 25% de água. A temperatura do forno foi programada para garantir um superaquecimento de 10 % acima da temperatura liquidus das ligas. Logo após, o cadinho foi retirado do forno e o metal líquido homogeneizado durante um tempo de aproximadamente 3 min. Em seguida, retirou-se uma amostra de metal para verificação da análise química das ligas.

As curvas de resfriamento das ligas, foram obtidas através do registro de temperaturas a cada 10 segundos até a completa solidificação da liga. Os dados foram armazenados em um registrador de temperaturas do tipo AMR-CONTROL, marca ALMEMO, modelo 2290-8, conforme mostrado na Figura 3.7. Os dados armazenados no mesmo foram tratados em software específico para plotagem das curvas de cada liga analisada como indicado na Figura

3.21. As composições das ligas depois foram confirmadas pelas análises químicas, obtidas pelo método de espectrometria ótica e através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplado a um sistema de análise por energia dispersiva (EDS), cujos resultados encontram-se mostrados nas Tabelas 3.3 e 3.4.

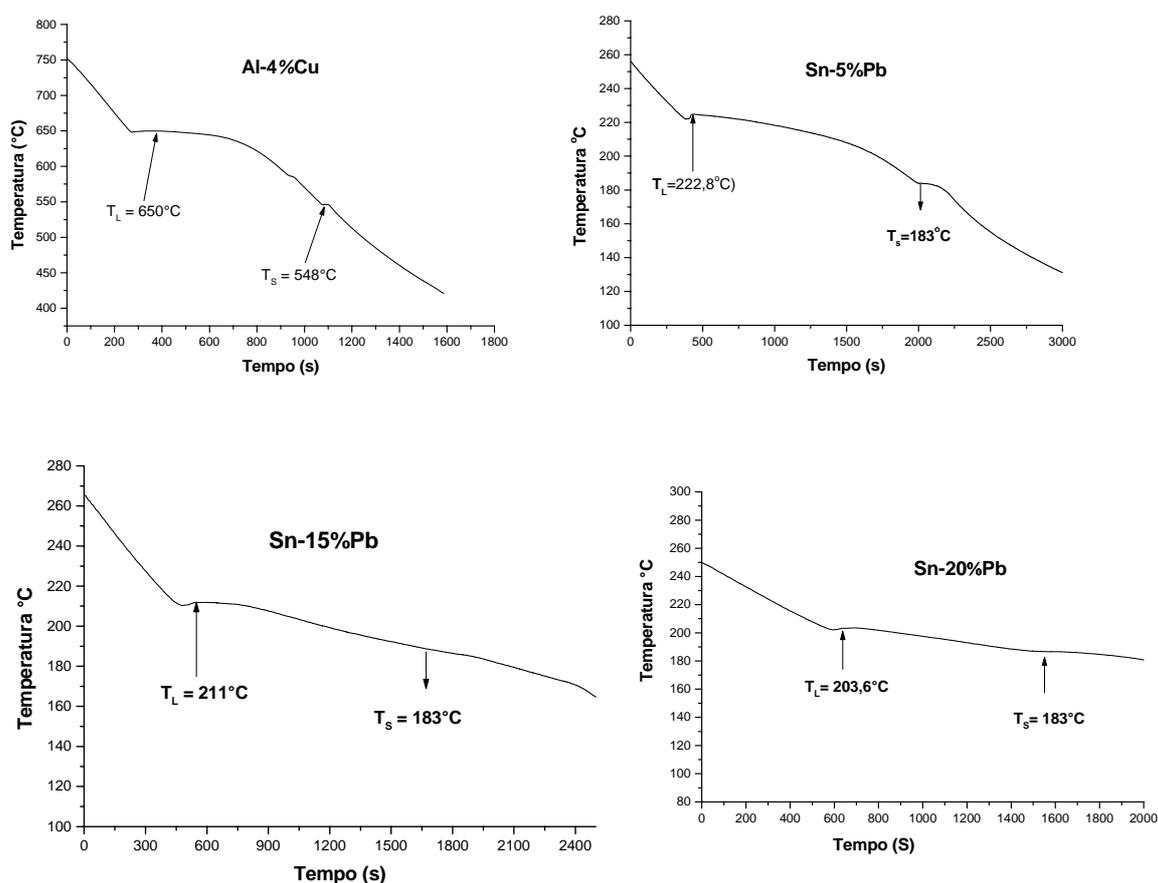


Figura 3.21: Curvas de resfriamento das ligas Al-4%Cu, Sn-5%Pb, Sn-15%, e Sn-20%Pb respectivamente.

3.3.5 Análise Química das Ligas Al-4%Cu e Sn -5, 15 e 20%Pb

A análise química da liga Al-4%Cu foi conseguida através do método de espectrometria ótica sendo a mesma apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Composição química da liga Al-4%Cu obtida através do método de espectrometria ótica

Liga %	Al	Cu	Ni	Si	Mg	Pb	Ti	B	Ca	Fe
Al Cu	95,4	4,34	0,004	0,44	0,0003	0,0024	0,004	0,0001	0,0002	0,18

A análise das ligas do sistema Sn-Pb foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura-LABMEV do Centro de Geociências da UFPA. O equipamento utilizado foi um MEV modelo LEO-1430. As condições de análise para as imagens de elétrons retro-espalhados foram as seguintes: corrente do feixe de elétrons = 90 μ A, voltagem de aceleração constante = 20 kv e distância de trabalho = 15 mm. As imagens são produzidas utilizando elétrons ao invés de comprimentos de onda e são geradas em preto e branco em diferentes tonalidades de cinza, conforme indicado na Figura 3.22.

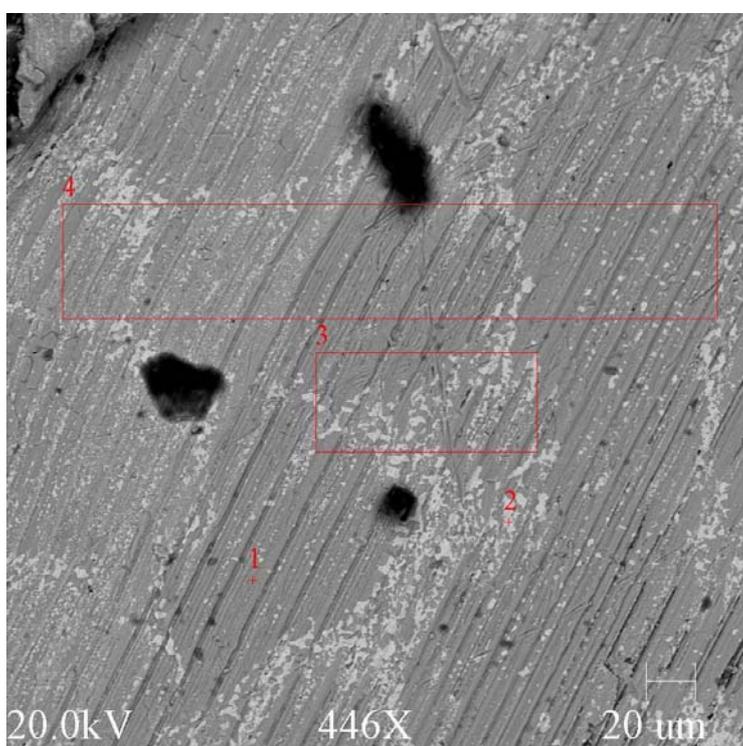


Figura 3.22: Imagem do MEV de uma amostra da liga Sn-20%Pb.

Após o equipamento ter atingido o vácuo, um feixe de elétrons de alta voltagem (~20 kv) é emitido a partir de um filamento de tungstênio (A054). Esse feixe de elétrons adquire forma e foco (fino *spot*) antes de atingir a amostra com a ajuda de lentes eletromagnéticas. Próximo à base, uma série de bobinas direcionam o feixe para baixo até a amostra. Quando o referido feixe atinge a amostra, elétrons secundários, retro-espalhados e raios-X são produzidos pelo bombardeamento. Um coletor capta e um detector conta esses elétrons e envia sinais para um amplificador. A imagem final é formada a partir de um número de elétrons emitidos de cada spot sobre a amostra fazendo a leitura dos elementos químicos, conforme a Figura 3. 23 cujos resultados são mostrados na Tabela 3.4.

A interação entre o feixe primário com os átomos da amostra causa mudanças de orbitais, as quais resultam na emissão de raios-X os quais apresentam uma energia característica do elemento parente. A detecção e medida dessa energia permitem a obtenção de uma análise do elemento (*Energy Dispersive Spectroscopy* ou EDS).

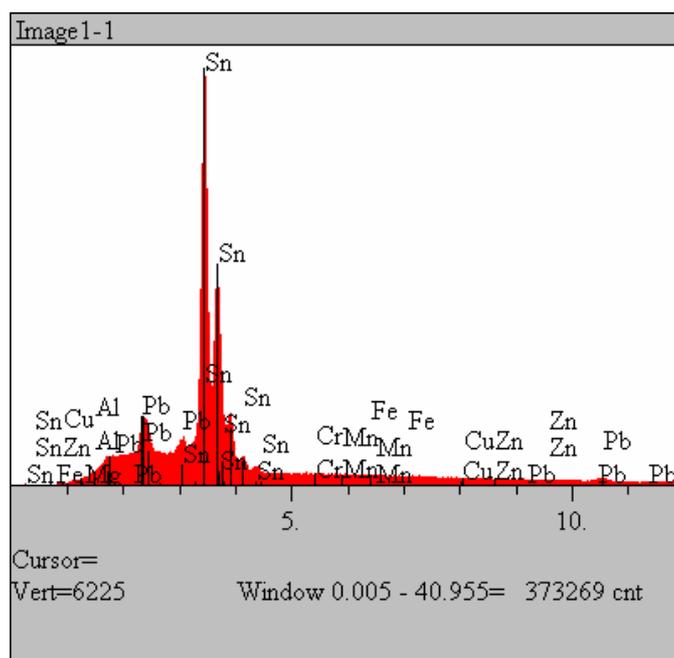


Figura 3.23: Espectro obtido no MEV/EDS, mostrando os elementos químicos em uma amostra da liga Sn-15%Pb.

Tabela 3.4: Resultados da análise química das ligas do sistema Sn–Pb analisadas neste trabalho obtidas através do MEV.

Liga (%)	Sn	Pb	Cu	Mg	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Zn
Sn-5%Pb	94,8	4,32	0,11	0,013	0,014	0,350	0,035	0,103	0,129	0,082
Sn-15%Pb	84,9	14,02	0,18	0,018	0,029	0,232	0,041	0,168	0,156	0,118
Sn-20%Pb	77,5	21,37	0,16	0,022	0,048	0,426	0,05	0,073	0,163	0,173

3.3.6 Procedimento Experimental para Determinação dos Parâmetros Térmicos de Solidificação das Ligas Estudadas

O processo de solidificação consistiu no vazamento das ligas Al-4%Cu, e Sn-5, 15 e 20%Pb, no interior de um molde de chapa de aço 1020, posicionado na parte superior do dispositivo, devidamente aquecido por resistência elétrica a fim de permitir a obtenção dos níveis de superaquecimento desejados, conforme mencionado anteriormente. Uma vez atingida a temperatura de vazamento estabelecida, 10% acima da temperatura liquidus das respectivas ligas, o dispositivo foi desligado e o processo de refrigeração iniciado através de um fluxo de água a uma vazão constante de 21,5 l/min, injetada pela parte frontal do dispositivo garantindo, assim, um eficiente contato do fluido com a área útil da superfície externa da câmara de refrigeração. Os registros fotográficos apresentados na Figura 3.24 mostram um dos momentos do vazamento de uma das ligas no dispositivo de solidificação.

As posições dos termopares no interior do molde durante os trabalhos experimentais são definidas objetivando monitorar a extração unidirecional de calor. Assim, as posições assumidas para os termopares, neste trabalho, durante a solidificação das ligas analisadas foram 6, 10, 16, 36 e 54 mm em relação à câmara refrigerada, medidas essas confirmadas através de um paquímetro. Em seguida, os dados obtidos relacionados à temperatura em função do tempo foram armazenados em um registrador de temperaturas do tipo AMR – softwan, marca “ALMEMO”, modelo 2290 – 8.



(a)

(b)

Figura 3.24: (a) Vazamento do metal líquido no interior da lingoteira do dispositivo estando os termopares posicionados a 6, 10, 16, 36 e 54 mm à frente da câmara de refrigeração; (b) Perfil térmico obtido durante a solidificação das ligas estudadas.

(a) Monitoramento das Temperaturas Durante o Processo de Solidificação

Para cada liga analisada a temperatura foi monitorada durante a solidificação com base na obtenção das curvas experimentais de variação de temperatura com o tempo para posições estratégicas de cinco termopares todos conectados por um cabo coaxial a um registrador de dados interligado a um computador a fim de verificar a eficiência da unidirecionalidade da extração de calor. As curvas obtidas são então comparadas com as geradas pelo modelo matemático de (Ferreira, 2004) para as respectivas ligas.

(b) Determinação do Coeficiente de Transferência de Calor na Interface Metal/Molde (hi)

Para efeito do cálculo dos valores de h_i é utilizado o perfil térmico correspondente ao termopar mais próximo à câmara de refrigeração, posição para a qual a eventual perda de calor pelas laterais do lingote é mais improvável, o que assegura a unidirecionalidade do fluxo de calor.

O método aplicado para determinar o coeficiente de transferência de calor metal/molde (h_i) utiliza o arquivo contendo o monitoramento experimental das temperaturas e um

programa numérico, que simula as condições de solidificação unidirecional horizontal, apresentado recentemente (Ferreira, 2004). Os dados térmicos experimentais são comparados com aqueles simulados numericamente e, por meio de um processo iterativo, é determinado o perfil transitório de h_i , que fornece o melhor ajuste entre as curvas. As propriedades termofísicas das ligas utilizadas encontram-se apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Propriedades termofísicas das ligas estudadas.

Liga	T_s °C	T_L °C	K_s W/mK	K_L W/mK	ρ_s Kg/m ³	ρ_L Kg/m ³	C_s J/Kg.K	C_L J/Kg.K	L J/Kg	m °C/%	K_e
Al-4%Cu	548.2	650	196.2	89.5	2640.8	2475.0	1095.5	1062.4	382132.0	3.39	0.0990
Sn-5%Pb	183	224,9	65,6	32,8	7475,2	7180,9	217	253,0	59213,6	1,38	0,0656
Sn-15%Pb	183	210.9	62.46	32.5	7867,8	7551.7	208.1	240.8	55860,8	1.38	0.0656
Sn-20%Pb	183	204,2	60,5	32,3	8108,0	7735,6	202,8	234,8	53809,0	1,38	0,0656

Algumas das principais telas de manipulação do aplicativo desenvolvido por (Ferreira 2004) para o ambiente Windows utilizado neste trabalho encontram-se apresentadas nas Figuras 3.25, 3.26 e 3.27.

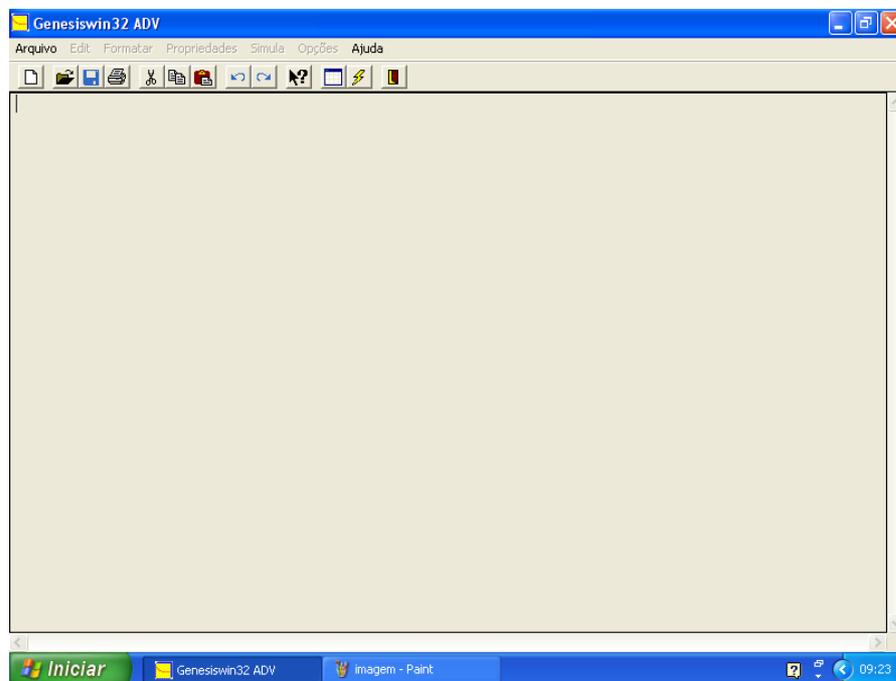


Figura 3.25: Tela de iniciação do programa Software Genesiswin 32.

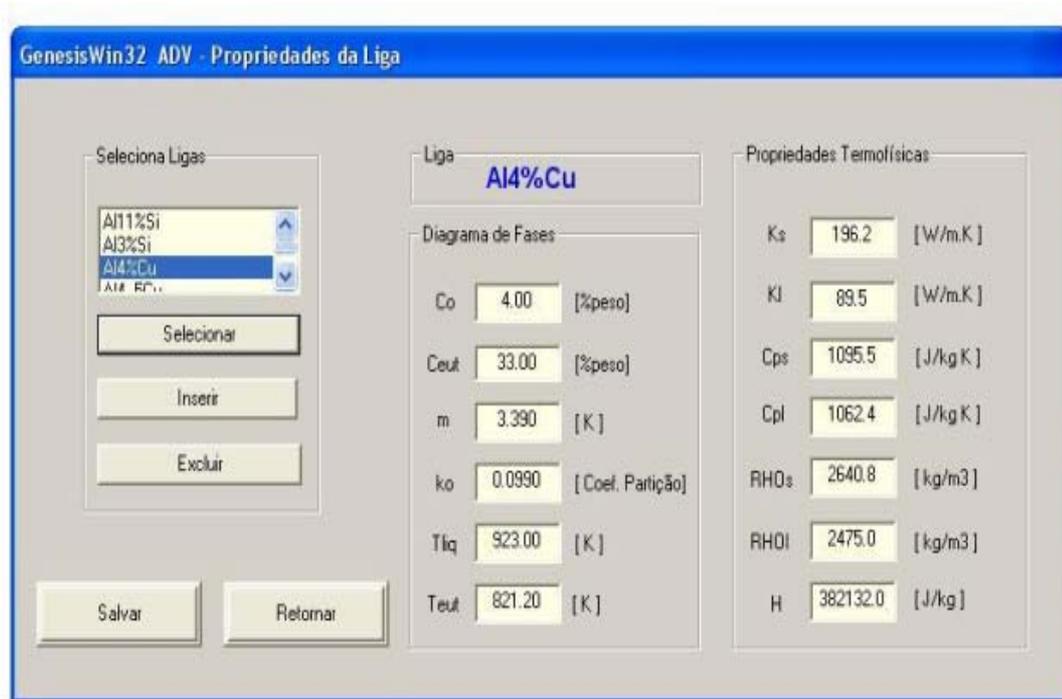


Figura 3.26: Tela de seleção e inserção das propriedades termofísicas para a liga de Al-4%Cu simuladas no Software Genesiswin 32.

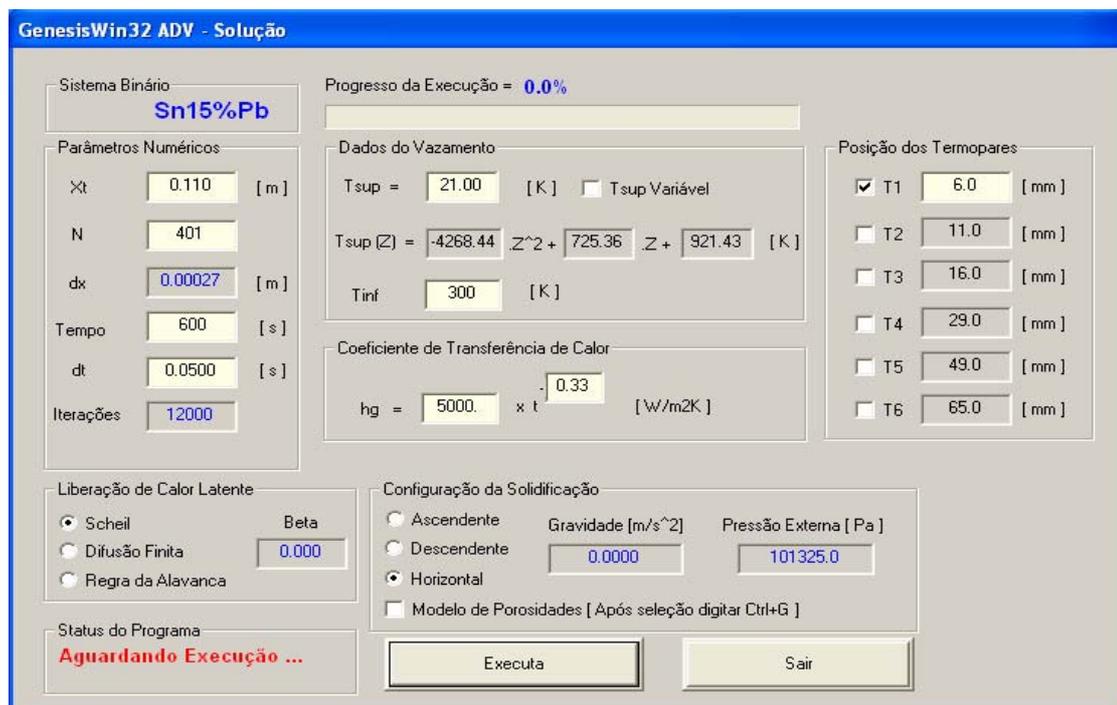


Figura 3.27: Tela de execução do programa utilizado neste trabalho com opções de escolha dos parâmetros de simulação, inserção dos dados de vazamento e valores de h_i para a liga Sn-15%Pb.

(c) Determinação Experimental da Posição da Isotherma Liquidus em Função do Tempo

A posição da linha liquidus em função do tempo para cada liga estudada é obtida experimentalmente a partir da interseção das retas correspondentes a temperatura liquidus (T_L) com as curvas da variação da temperatura com o tempo levantadas por cada termopar conforme mostra o exemplo da Figura 3.28. Através das interseções dessa reta com as curvas da variação da temperatura com o tempo, obtém-se o tempo correspondente que pode ser definido como sendo o tempo de passagem da isoterma liquidus em cada posição do termopar.

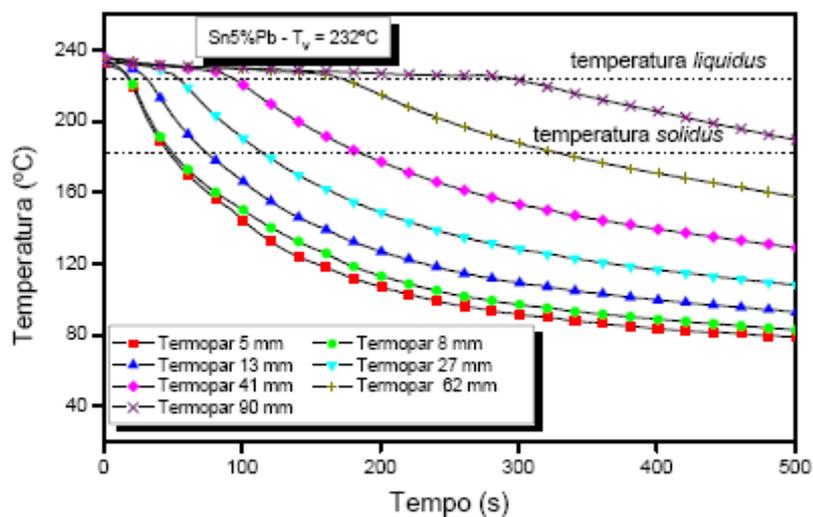


Figura 3.28: Variação da temperatura em função do tempo durante a solidificação unidirecional para as sete posições de termopares em relação à superfície de refrigeração para a liga Sn-5%Pb obtidas por (Spinelli, 2005).

3.3.7 Procedimento Experimental para a Determinação da Macroestrutura de Solidificação

Após o processo de obtenção dos lingotes, procedeu-se à preparação dos mesmos para a caracterização macroestrutural das amostras visando a existência e unidirecionalidade da zona colunar induzida pelas condições de solidificação, através de técnicas metalográficas tradicionais propostas na literatura.

Os lingotes foram seccionados na seção longitudinal e posteriormente polido em lixadeira manual, utilizando-se lixas d'água de carbetto de silício de granulometrias variáveis em uma seqüência crescente (100, 120, 220, 320, 400, e 600 mesh). Após a última operação de lixamento, utilizou-se álcool etílico 99° GL na limpeza das superfícies com o objetivo de eliminar resíduo e manchas existentes e ao mesmo tempo obter uma superfície seca evitando oxidação.

Finalmente, as superfícies foram atacadas com reagentes químicos adequados, cujas composições foram 15 ml HF, 4,5 ml HNO₃, 9 ml HCl e 271,5 ml H₂O para a liga Al-4% Cu e 100 ml H₂O; 2 ml HCl e 10 g FeCl₃ para as ligas do sistema Sn-Pb [Siqueira, 2002]. Os respectivos ataques foram realizados por imersão da superfície dos lingotes durante aproximadamente um minuto para a liga Al-4%Cu e quatro minutos para as ligas do sistema Sn-Pb, tempos suficientes para que as macroestruturas de solidificação desejadas fossem perfeitamente reveladas.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS OBTIDOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os trabalhos experimentais desenvolveram-se, conforme mencionado anteriormente, utilizando-se as ligas Al-4%Cu, Sn-5%, Sn-15% e Sn-20%Pb cujos resultados, após análise térmica, são comparados com aqueles obtidos a partir de simulações numéricas (Ferreira, 2004).

4.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS

4.2.1 Coeficiente de Transferência de Calor na Interface Metal/Molde (hi)

Após caracterização térmica das ligas, onde se confirmaram as temperaturas liquidus e solidus, as composições destas, foram confirmadas posteriormente pelas análises químicas, obtidas pelo método de espectrometria ótica e através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada a um sistema de análise por energia dispersiva (EDS) que é capaz de fornecer rápidas análises qualitativas ou, com padrões adequados, análises semiquantitativas com uma profundidade de amostragem de 1 a 2 μm .

A Figura 4.1 mostra a distribuição de temperaturas obtida durante os experimentos, para as ligas do sistema Sn-Pb. Quando as temperaturas liquidus são atingidas, ocorre o início da liberação do calor latente e do processo de recristalização, nesta ordem. A linha liquidus representa o início da solidificação ao passo que a linha solidus representa o final da mesma. O tempo total de solidificação registrado para a liga Sn-5%Pb, considerando o termopar a 54 mm da superfície refrigerada, foi de 659 segundos enquanto que para os casos das ligas Sn-15%Pb e Sn-20%Pb, para o mesmo termopar, os tempos obtidos foram, respectivamente, 667 e 750 segundos.

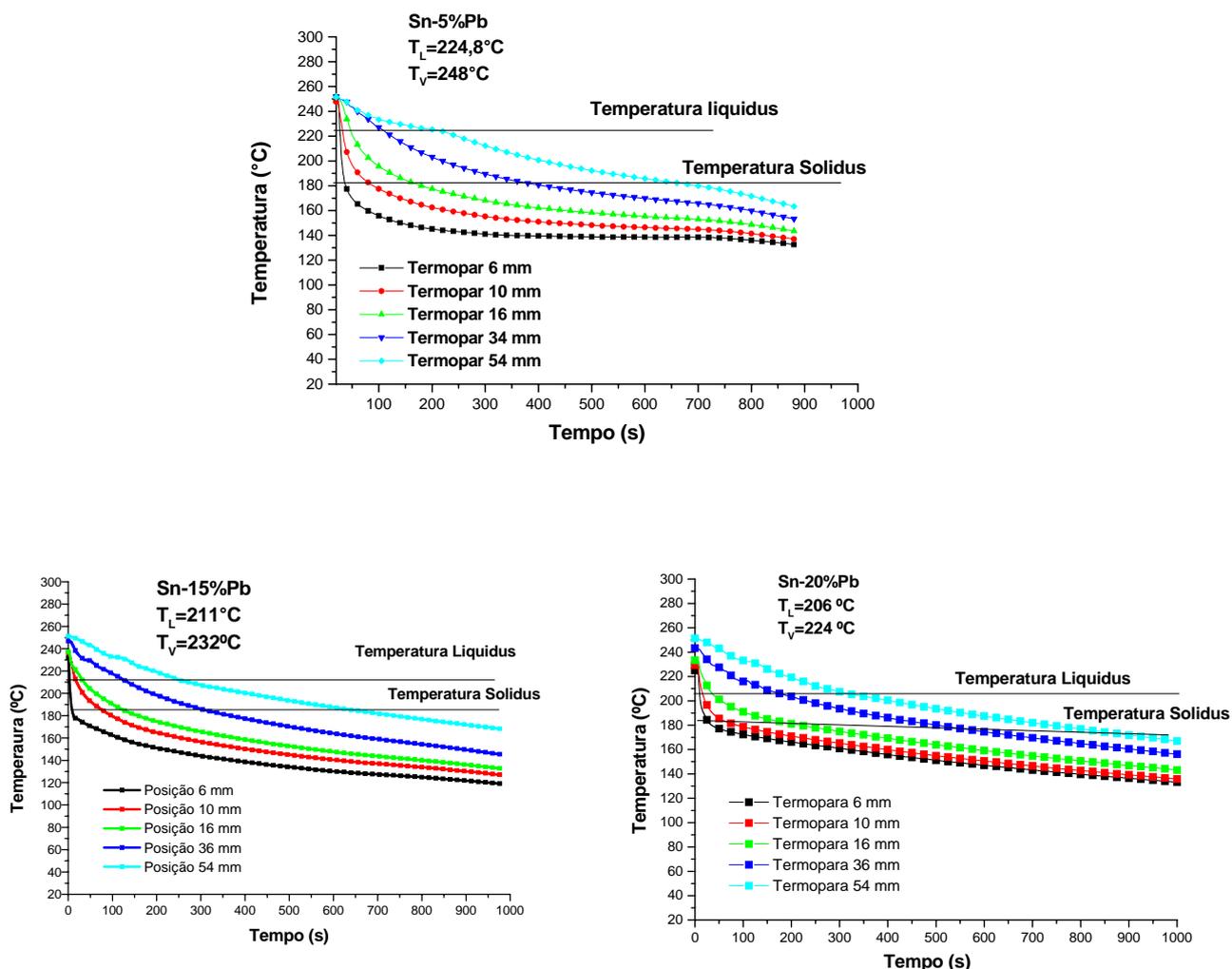


Figura 4.1: Variação da temperatura em função do tempo para cinco diferentes posições de termopares em relação à interface metal/câmara refrigerada das ligas Al-4%Cu, Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb.

O método aplicado para determinar o coeficiente de transferência de calor metal/molde (h_i), descrito no Capítulo 3, utiliza arquivos contendo o monitoramento experimental das temperaturas e um programa numérico que simula as condições de solidificação unidirecional horizontal, apresentado recentemente (Ferreira, 2004). Os dados térmicos experimentais são então comparados com aqueles simulados numericamente por meio de um processo iterativo.

A operação de simulação resulta num gráfico de temperatura em função do tempo, conforme mostra a Figura 4.2. que apresenta os valores de h_i obtidos respectivamente para as ligas Al-4%Cu, Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb considerando o termopar localizado a 6 mm da interface metal/câmara refrigerada.

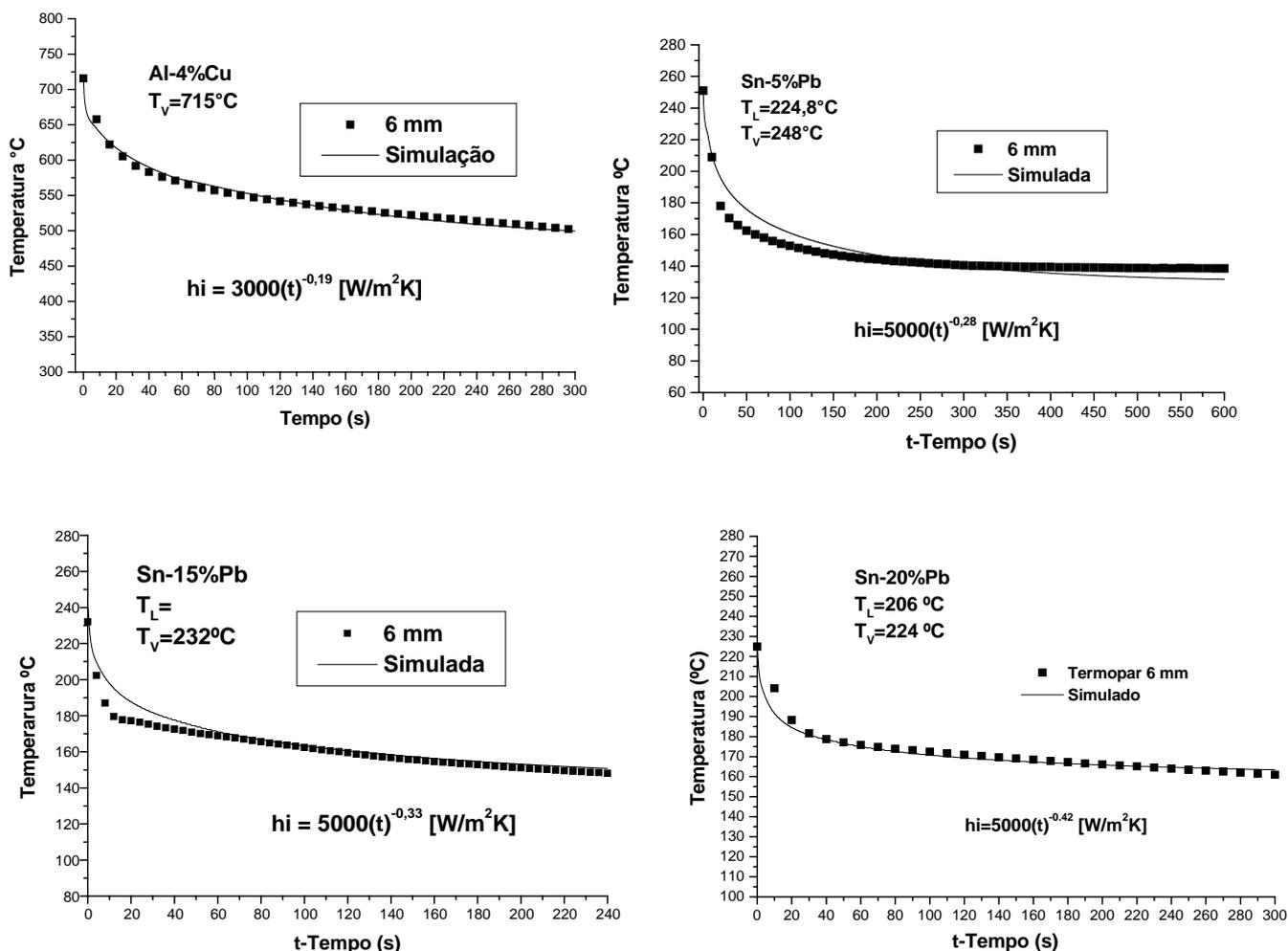


Figura 4.2: Curvas de resfriamento experimental e simulada para determinação do h_i das ligas Al-4%Cu, Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb.

A Figura 4.3 ilustra a comparação entre as curvas características de h_i em função do tempo para as ligas analisadas. Observa-se que a convecção proporcionada pelo efeito do soluto, nas ligas estudadas promove uma diminuição nos valores de h_i à medida que aumenta o teor de soluto. Provavelmente, o comportamento aqui analisado se deve ao fato da convecção produzir um maior “gap” na interface metal/molde, sendo o mesmo mais intenso para maiores teores de soluto reproduzindo, portanto, nesta interface, uma resistência térmica maior e tempos totais de solidificação maiores para altas composições. Nota-se, ainda, para todas as composições uma diminuição acentuada dos valores de h_i (cerca de 50%) nos instantes iniciais da solidificação, principalmente nos primeiros vinte segundos, tempo que

representa aproximadamente 3 % do tempo total de solidificação correspondente à posição do termopar $P = 54 \text{ mm}$. A partir deste tempo até os 200 segundos do processo ocorre uma diminuição gradativa nos valores de h_i e, após este tempo, permanecem praticamente constantes até o final da solidificação.

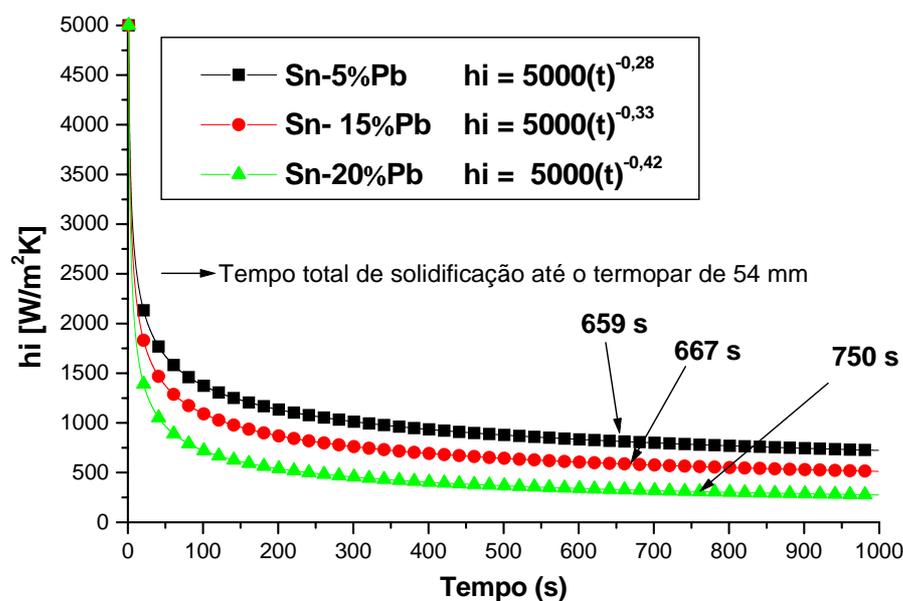


Figura 4.3: Coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde para ligas do sistema Sn-Pb.

4.2.2 Comparação do valor do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde para a liga Sn-15%Pb levantado no dispositivo construído, com aquele obtido por outros trabalhos recentes desenvolvidos para o caso da solidificação unidirecional vertical ascendente e descendente.

Para efeito de confirmação dos resultados obtidos neste trabalho visando ratificar a eficiência de unidirecionalidade de extração de calor do dispositivo construído, a Figura 4.4 estabelece uma comparação entre o perfil do coeficiente de transferência de calor para a liga Sn-15%Pb solidificada segundo as condições utilizadas neste estudo com outros perfis do coeficiente de transferência de calor para a mesma liga obtido em trabalhos recentes desenvolvidos nos sistemas vertical ascendente (Rocha, 2003) e descendente (Spinelli, 2005), nas mesmas condições de solidificação assumidas neste trabalho, ou seja, ambos refrigerados à água e com extração de calor em regime transiente. Com exceção do perfil térmico do

trabalho de Spinelli, obtido com superaquecimento de 3% acima da temperatura liquidus, os demais são para superaquecimento de 10%.

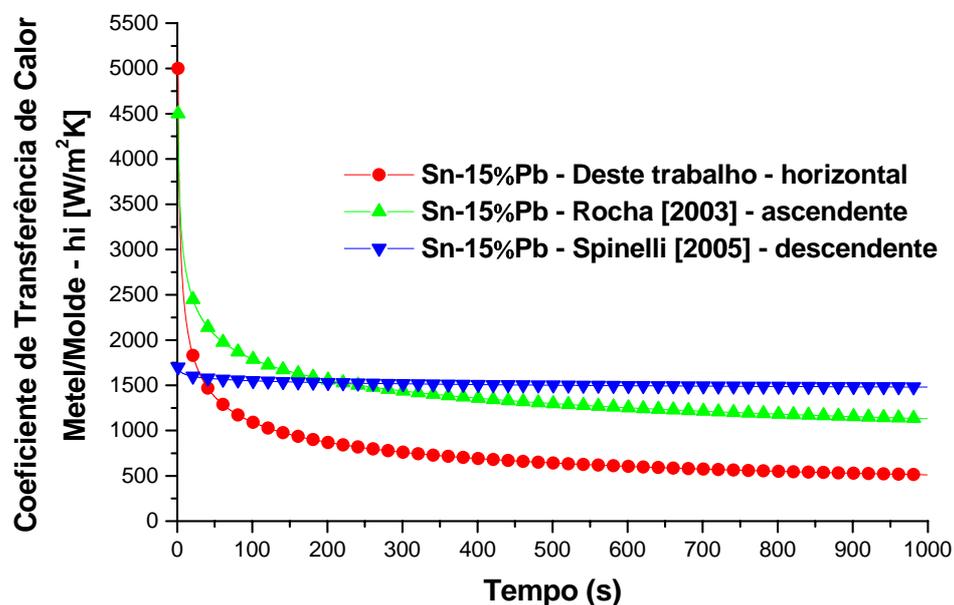


Figura 4.4: Comparação de valores para o perfil do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde levantados para a liga Sn-15%Pb em diferentes sistemas de solidificação unidirecional refrigerados à água.

Observa-se que, nos instantes iniciais do processo de solidificação, o perfil obtido por Rocha apresenta um comportamento semelhante àquele conseguido neste trabalho. No entanto, os valores de h_i do referido autor ao longo da solidificação, com exceção dos instantes iniciais do processo, são mais elevados devido à configuração do sistema ser vertical com solidificação ascendente, o que proporciona um maior contato térmico metal/câmara de refrigeração. Por outro lado, verifica-se para o caso do perfil obtido por Spinelli, que o valor de h_i pouco se altera, permanecendo praticamente constante durante a solidificação, apresentando valores para h_i menores que aqueles determinados por Rocha até, aproximadamente, o tempo de duzentos segundos ao longo do processo. Os valores de h_i obtidos por este autor podem ser justificados pelo fato de que o lingote, no caso da solidificação descendente, apresenta um menor contato térmico em relação à parede da câmara de refrigeração, proporcionado pela contração volumétrica, pelo aumento da concentração de soluto no líquido e pelo peso próprio do lingote, o que configura uma situação de maior resistência na interface metal/molde à passagem de calor do lingote em direção ao fluido de refrigeração. Dessa forma, o contato térmico metal/câmara torna-se

menos eficiente devido à formação do “gap” de ar nesta interface, dificultando a retirada de calor da mesma desacelerando, portanto o processo de solidificação do metal líquido, tendo como consequência uma redução significativa dos valores do coeficiente de transferência de calor. Outra importante diferença observada no processo de solidificação unidirecional descendente consiste na presença contínua de movimento convectivo no líquido, uma vez que o perfil de temperatura no mesmo é crescente em direção à base da lingoteira (isolada termicamente), o que significa que ocorrerá pelo menos convecção por diferença de temperatura no líquido. Naturalmente que, se o soluto rejeitado provocar um líquido interdendrítico de maior densidade do que o líquido nominal ocorrerá também movimento convectivo por diferença de densidade.

4.2.3 Análise da Curva Posição da isoterma liquidus em função do Tempo para as Ligas Estudadas

A Figura 4.5 apresenta, para cada liga analisada, a distribuição de temperatura em função do tempo durante os experimentos obtidos para as cinco diferentes posições dos termopares no metal líquido a partir da interface metal câmara refrigerada.

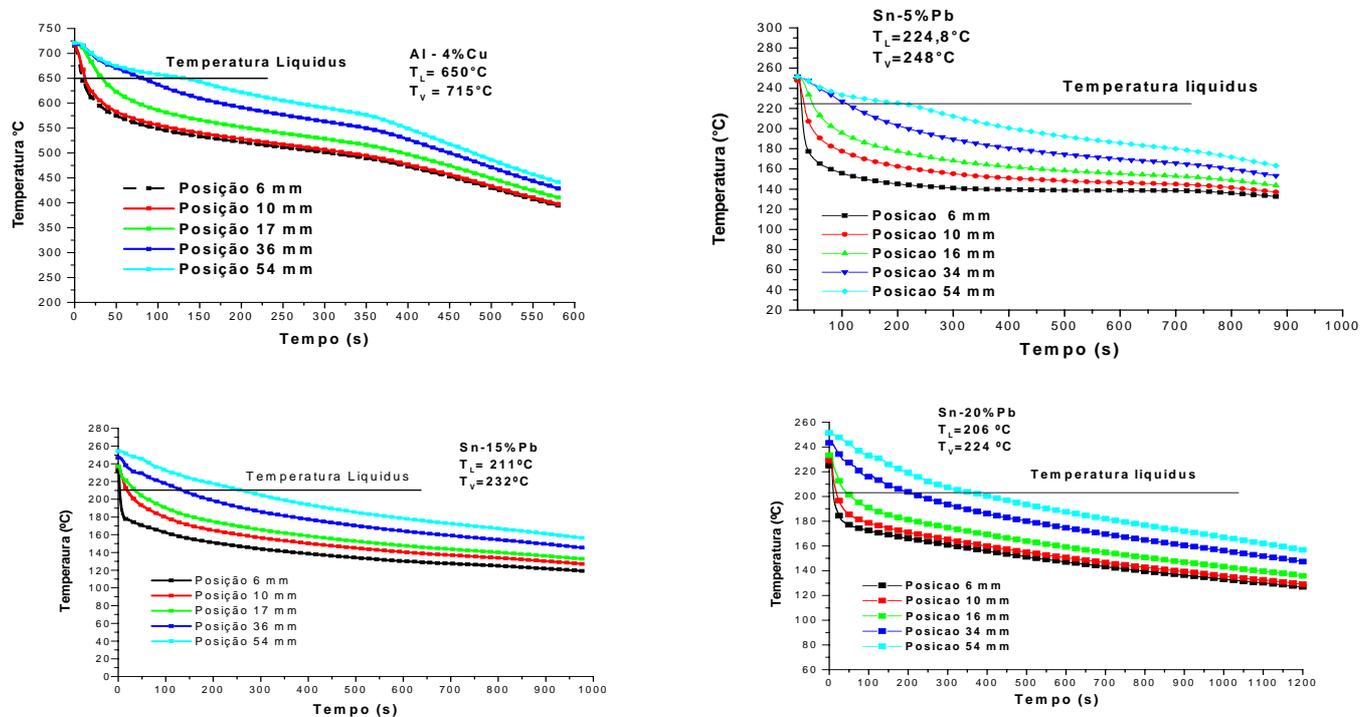


Figura 4.5: Variação da temperatura em função do tempo para cinco diferentes posições de termopares em relação à interface metal/molde das ligas estudadas neste trabalho.

A Figura 4.6 mostra os resultados finais obtidos para a posição da isoterma liquidus em função do tempo para as ligas analisadas os quais foram conseguidos a partir da obtenção de pares ordenados experimentais da posição em função do tempo, cujo procedimento adotado para sua determinação foi apresentado no Capítulo 3, assim como de valores teóricos calculados com base no modelo numérico proposto por Ferreira (2004). Pode-se observar uma boa aproximação entre os resultados.

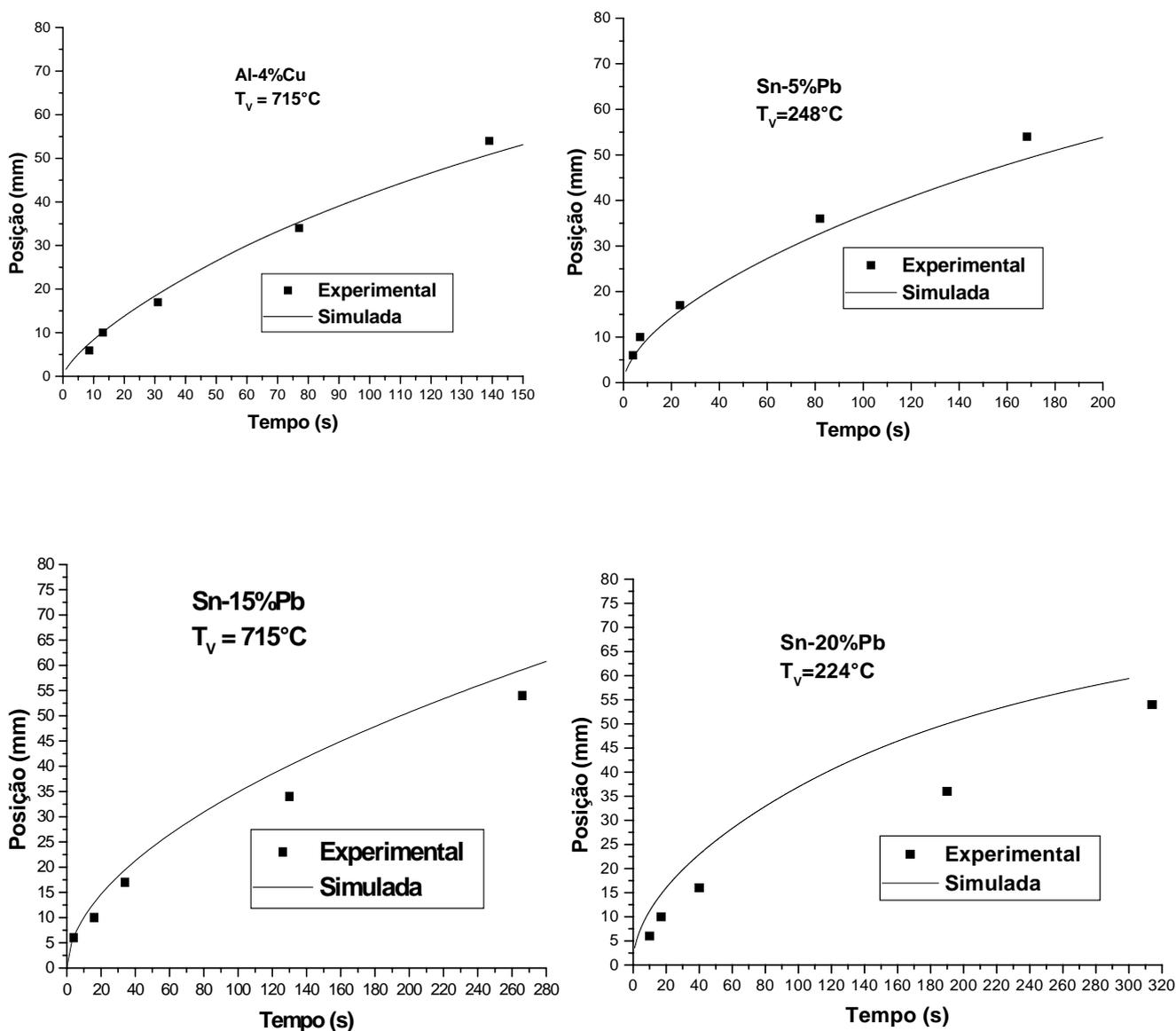


Figura 4.6: Comportamento experimental da posição da isoterma liquidus em função do tempo para ligas Al-4%Cu, Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb.

4.2.4 Comparação entre os Resultados Experimentais para diferentes teores de soluto da Posição da isoterma liquidus em Função do Tempo para as Ligas do Sistema Sn-Pb

A comparação entre os resultados experimentais e numéricos da posição da isoterma liquidus em função do tempo para as ligas do sistema Sn-Pb é mostrada na Figura 4.7. Nota-se, através da mesma, que à medida que o teor de soluto aumenta, o tempo que a isoterma liquidus atinge o último termopar também aumenta, isto é, quanto maior o teor de soluto mais prolongado é o processo de solidificação das ligas. Tais resultados reforçam a análise realizada para os valores de h_i encontrados e apresentados na Figura 4.3, ou seja, maiores coeficientes de extração de calor permitem a obtenção de menores tempos de solidificação.

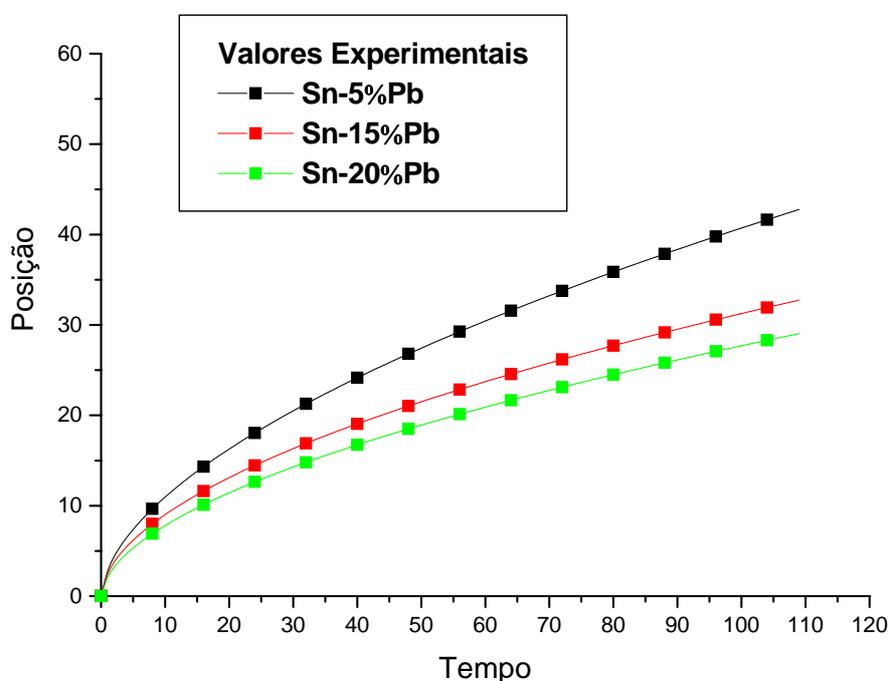


Figura 4.7: Representação da curva da posição da isoterma liquidus em função do tempo para as ligas Sn-Pb estudadas neste trabalho.

4.3 Análise das Macroestruturas

As Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam, pela ordem, as macroestruturas características obtidas para as ligas Al-4%Cu, Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb. Observa-se, por meio das mesmas, que os grãos colunares crescem com a mesma direção da extração de calor através da base refrigerada. Tal comportamento macroestrutural comprova, que o dispositivo construído e aferido apresenta uma unidirecionalidade de extração de calor bastante satisfatória.

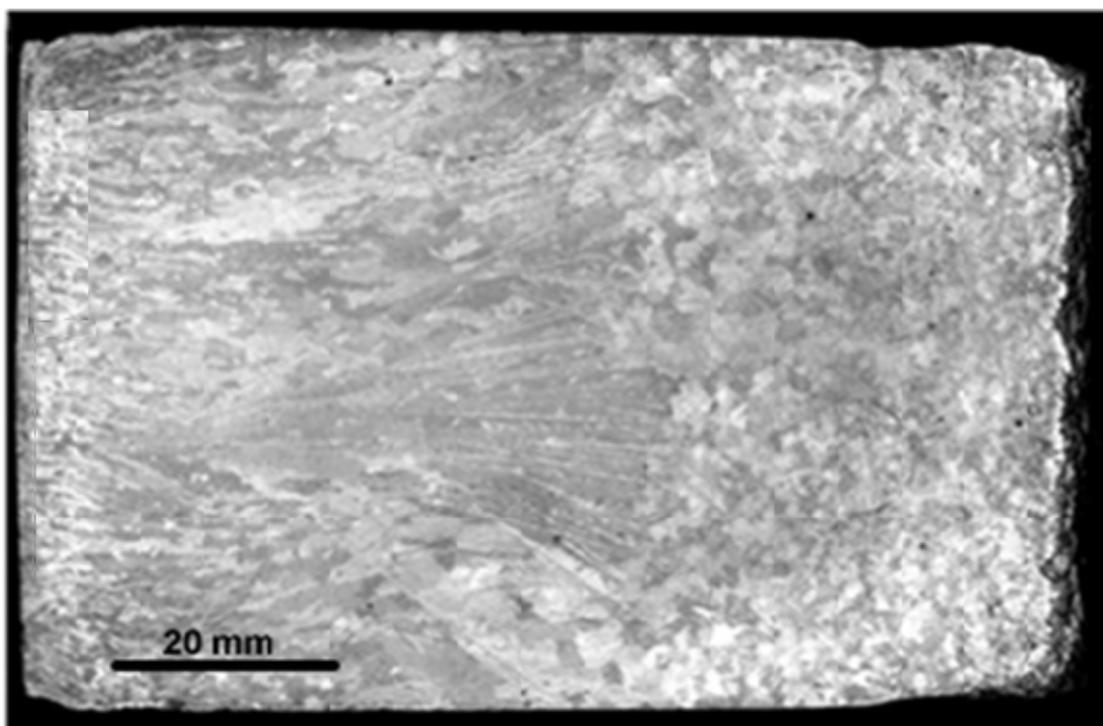


Figura 4.8: Macroestrutura de solidificação da liga Al-4%Cu.

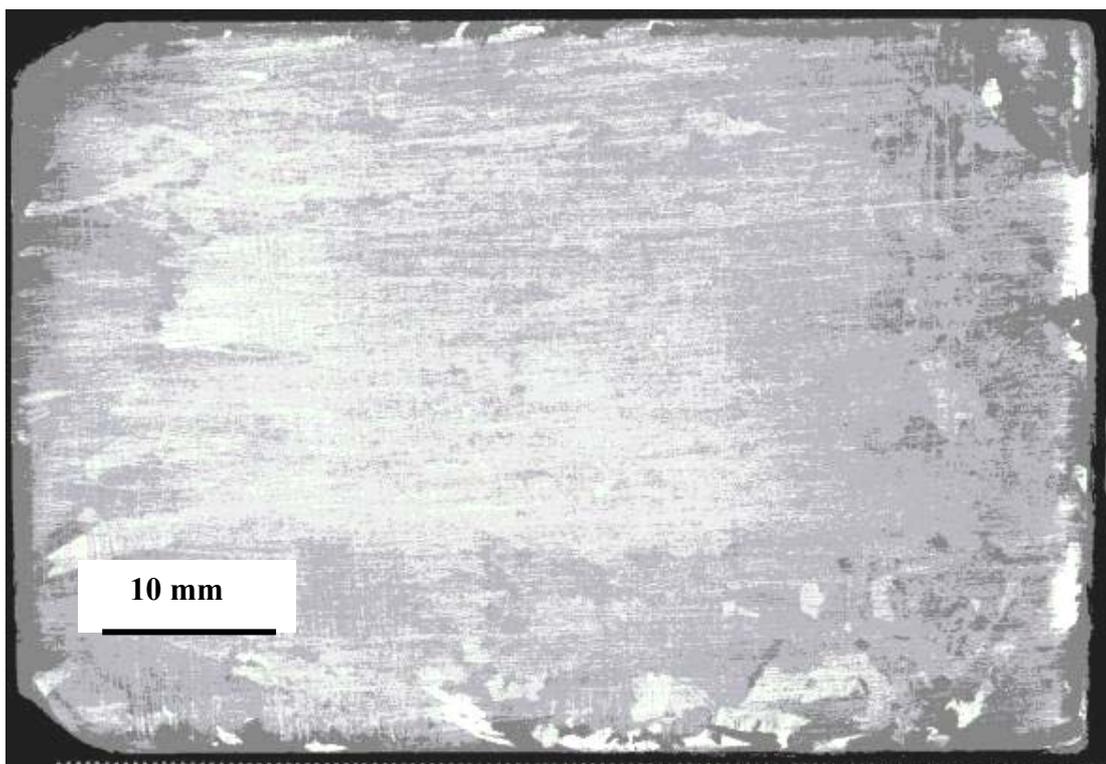


Figura 4.9: Macroestrutura de solidificação da liga Sn-5%Pb.

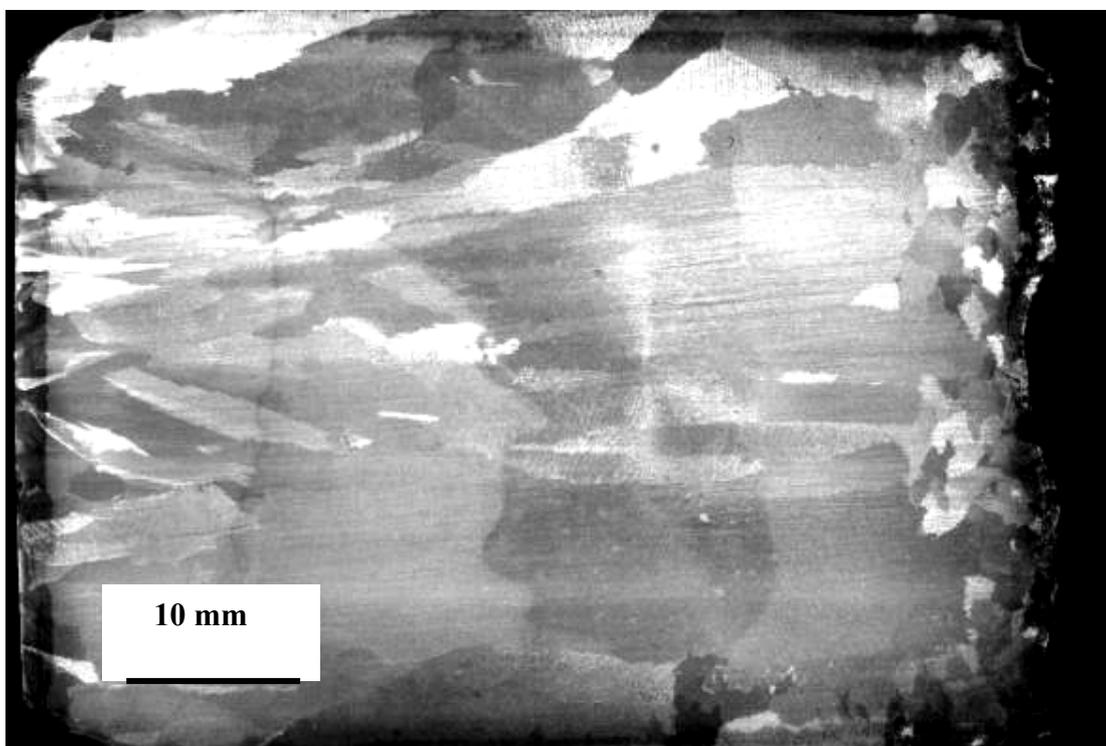
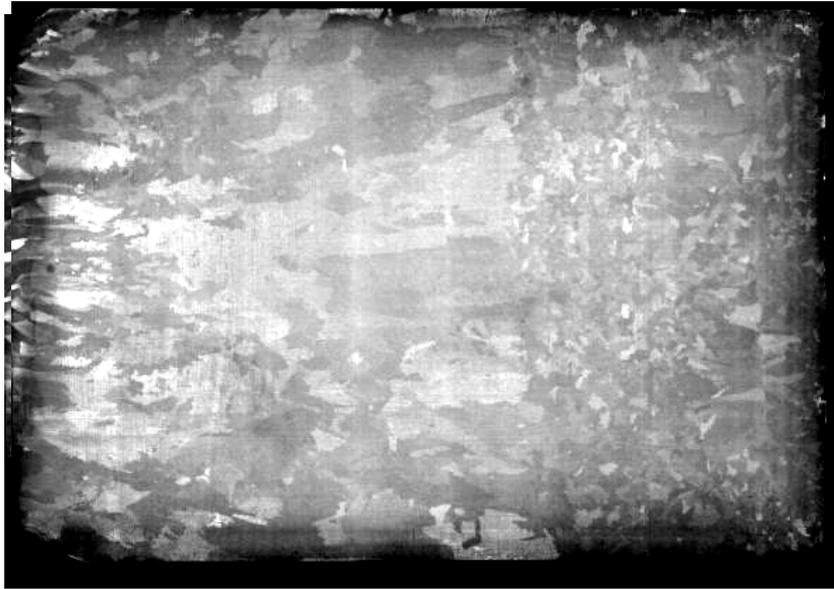


Figura 4.10: Macroestrutura de solidificação da liga Sn-15%Pb.



10 mm

Figura 4.11: Macroestrutura de solidificação da liga Sn- 20%

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho com relação ao projeto, construção e aferição de um dispositivo para a análise do processo de solidificação unidirecional horizontal refrigerada à água, permitem que sejam extraídas as seguintes conclusões:

- O dispositivo projetado e construído, para a solidificação unidirecional horizontal refrigerada à água, foi capaz de representar satisfatoriamente a solidificação em regime transitório de extração de calor, sob os efeitos proporcionados pela convecção solutal durante a mudança de fase líquido/sólido.
- O estudo de ligas de dois diferentes tipos de sistemas binários, através do confronto entre os perfis térmicos obtidos experimentalmente no dispositivo construído e aqueles gerados pelo modelo numérico de Ferreira (2004), mostraram uma boa concordância teórico-experimental, indicando a aplicabilidade do modelo matemático às condições de solidificação analisadas.
- Os resultados experimentais encontrados neste trabalho apresentam-se coerentes com aqueles apresentados sobre o assunto na literatura (Siqueira 2002; Rocha 2003; Sá 2005), ou seja, as curvas obtidas para os coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde, para o caso das ligas analisadas, mostram que a convecção natural proporcionada pelo aumento do teor de soluto promove uma diminuição nos valores dos coeficientes em questão.

- Os tempos totais de solidificação, devido o efeito do h_i , apresentaram-se menores para maiores coeficientes de extração de calor.
- O perfil do coeficiente de transferência de calor obtido por Rocha (2003) para a liga Sn-15%Pb apresenta um comportamento semelhante àquele deste trabalho, no entanto, os valores de h_i do referido autor ao longo do processo, com exceção do instante inicial, são mais elevados devido a configuração do dispositivo utilizado ser vertical com solidificação ascendente, o que proporciona um maior contato térmico metal/câmara de refrigeração. Por outro lado, com relação ao perfil obtido por Spinelli (2005) observa-se que os valores de h_i são menores no instante inicial do processo, em relação aos encontrados neste trabalho, devido à configuração do sistema ser vertical descendente que, ao contrário do sistema utilizado por Rocha, promove um menor contato térmico do metal com a parede refrigerada.
- Tendo em vista a evidencia do crescimento unidirecional dos grãos colunares revelados pelas macroestruturas resultantes; pode-se afirmar que o dispositivo de solidificação construído se encontra aferido oportunizando assim o desenvolvimento de estudos que visem correlacionar parâmetros térmicos e estruturais da solidificação.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados encontrados neste trabalho, utilizando-se o dispositivo para solidificação unidirecional horizontal refrigerado à água, podem ser sugeridas as seguintes linhas de estudo para serem desenvolvidas como trabalhos futuros:

- Caracterização metalográfica e quantificação de espaçamentos dendríticos primários, secundários e terciários para ligas não ferrosas através da solidificação unidirecional horizontal refrigerada à água em regime transitório de extração de calor sujeita à ação de convecção natural.
- Desenvolver estudos que relacionam parâmetros térmicos com parâmetros estruturais durante o processo de solidificação na transição colunar equiaxial (TCE).
- Desenvolver estudos que correlacionam espaçamentos celulares e dendríticos para sistemas de ligas não-ferrosas.
- Analisar a transição celular/dendrítica (TCD) em sistemas de ligas não ferrosas analisando a influência tanto da convecção forçada, promovida durante a mudança de fase sólido/líquido, como da convecção natural provocada por diferenças de temperaturas ou por rejeição de soluto;
- Investigar a influência da convecção natural devido o efeito do soluto nos espaçamentos interdendríticos e nas propriedades mecânicas de ligas não ferrosas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Artigos Técnicos / Científicos

Andrade, S. R; Noronha M; Melo, M. L; Santos, R. G.; Pavanello, R.; **"Simulação da formação da microestrutura durante a solidificação unidirecional da liga Al-4,5%Cu"**, 11/2001, Científico Nacional, XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM2001, Vol. 2, pp.74-83, Uberlândia, MG, Brasil, 2001.

Blanco, M; Barelli N; Benedetti A. V; Flor, S. W. A; **"Desenvolvimento de um dispositivo para obtenção de monocristais de ligas à base de cobre"**; Química Nova v.26 n.5, São Paulo, set./out. 2003

Ferreira, I. L.; Santos, C. A.; Voller, V. R.; Garcia, A. **Analytical, numerical and experimental analysis of inverse macrosegregation during upward unidirectional solidification of Al-Cu alloys**. Metallurgical and Materials Transactions B, v.35B, p. 285-297, 2004.

Fortes, M. A.**História da Ciência dos Materiais em Portugal**. II Centenário da Academia das Ciências de Lisboa, 1994,pp 1-3.

Garcia, A; Prates M. **Mathematical model for the unidirectional solidification of metals I: cooled molds**, Metallurgical Transactions, v. 98, 1978, pp. 449-453.

Garcia, A; Prates M. **Mathematical model for the unidirectional solidification of metals II: massive molds**, Metallurgical Transactions, v. 108, 1979, pp. 85-92.

Garcia, A; Prates M. **Mathematical heat transfer model for the analysis of solidification of binary alloys**. In : Mult-Phase Flow and Heat Transfer III-Part B: Applications, Elsevier Science Publishers, 1984, pp. 541-603.

Garcia, A; Clyne, T. W. **A versatile technique for characterization of metal/mold heat transfer and correlation with thermal and structural effects**, In : Solidification Technology in the Foundry and Casthouse, The Metals Society, 1983, pp. 33-39.

Hunt J. D. & Lu, S. Z. **Numerical modeling of cellular array growth: spacing and structure predictions**, Metallurgical and Materials Transaction A, v 27A, 1996 pp. 611 – 623.

Kurz W. and Fisher J. **Dendrite growth at the limite of stability: Tip radins and spacing**, Acta Metallurgia, v. 29, 1981, pp. 11-20.

Melo, M. L. N. M; Madiuto, P. F; Davelli, C. R; Massak, M. V, “**Projeto e construção de um dispositivo para obtenção de solidificação direcional de ligas ferrosas**”; XXXV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação de Metais da ABM, 2004; Salvador, Brasil.

Okamoto, T. and kishitate, K. **Dendritic structure in unidirectionally solidified aluminum, tin, and zinc base binary alloys**, Journal of Crystal Growth, v 29, 1975, pp 137 – 146.

Osório W. R. ; Garcia A. **Modeling dendrite struture and mechanical properties of Zn-Al alloys as a function of solidification condition**, Materials Science Engineering A, v. 325, 2002, pp. 103-111.

Peres, M. D.; Siqueira, C. A.; Garcia, A. **Macrostructural and microstructural development in Al-Si alloys directionally solidified under unsteady-state conditions**. Journal of Alloys and Compounds, v. 381, p. 168-181, 2004.

Quaresma, J. M. V; Osório, W. R. R; Santos, C. A; Garcia, A. **Determinação das propriedades mecânicas como função do espaçamento dendrítico secundário em ligas Zn-Al, solidificadas unidirecionalmente**, Departamento de Materiais, Unicamp, SP, Brasil.

Quaresma, J. .M. V; Santos, C..A; Spim, Jr, Garcia, A. **Medidas dos Coeficientes de Transferência de Calor Metal/Molde na Solidificação de Metais e Ligas**. Anais do VII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas -ENCIT, v. 1, pp. 615-620, 1998.

Quaresma, J. .M. V; Santos, C..A; Garcia, A. **Transferência Correlacion between uesteady-state solidification conditions, dendrite spacings and mechanical properties**, Metallurgical and Materials Transactions, v. 31 A, 2000, pp. 3167-3178.

Quaresma, J. M. V; Osório, W. R. R; Santos, C. A; Garcia, A. **Determinação das propriedades mecânicas como função do espaçamento dendrítico secundário em ligas Zn-Al, solidificadas unidirecionalmente**, Departamento de Materiais, Unicamp, SP, Brasil.

Rocha, O. F. L.; Siqueira, C. A.; Garcia, A. **Theoretical-experimental analysis of the cellular/dendritic transition during unidirectional solidification**. Materials Research, v. 5, n. 3, p.391-397, 2002.

Rocha, O. F. L.; Siqueira, C.; Garcia, A. **Cellular spacings in unsteady-state directionally solidified Sn-Pb alloys**. Materials Science and Engineering A, v. 361, p. 111-118, 2003.

Rocha, O. L.; Siqueira C. A.; Garcia, A. **Cellular/dendritic transition during unsteady-state unidirectional solidification of Sn-Pb alloys**. Materials Science Engineering A, v. 347, nº 1-2, p. 59 - 69, 2003.

Rocha, O. L.; Siqueira C. A.; Garcia, A. **Heat flow parameters affecting dendrite spacings during unsteady state solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys**. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 34A, p. 995 - 1006, 2003.

Sá, F.; Rocha, O.L.; Siqueira, C.A.; Garcia, A. **The effect of solidification variables on tertiary dendrite arm spacing in unsteady-state directional solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys**. Materials Science Engineering A, v. 373, pp. 131-138, 2004.

Santos, R.G; Palmieri, W; Melo, M.L.N.M; **Utilização do Método de Elementos Finitos para a Simulação da Solidificação da Liga Al-4,5% Cu**", VI Seminário de Tecnologia da Indústria do Alumínio, 1, 341-354, (1997).

Santos, R. G; Andrade, S.R.; Noronha M; Melo, M. L; Pavanello, R; **"Simulação das curvas de resfriamento e da microestrutura resultante da solidificação unidirecional da liga Al-4,5%Cu"**, 08/2001, Científico Nacional, 14 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Vol. 1, pp.35101-35112, São Pedro, SP, Brasil, 2001

Santos, R. G; Andrade, S.R.; **"Simulação de processos de solidificação de ligas metálicas utilizando método de elementos finitos"**, 07/2001, Científico Nacional, 55 Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Vol. 1, pp.2524-2533, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001

Siqueira, C. A; Cheung, N.; Garcia, A. **Solidification thermal parameters affecting the columnar- equiaxed transition**. Metallurgical and Materials Transaction A, v. 33, p. 2107-2118, 2002.

Spinelli J.E; Ferreira I.L., Garcia A.; **Influence of melt convection on the columnar to equiaxed transition and microstructure of downward unsteady-state directionally solidified Sn-Pb alloys.** Journal of Alloys and Compounds, v 384, pp 217-226, 2004A.

Spinelli J.E; Rosa, D. M., Ferreira I.L., Garcia A.; **Influence of melt convection on dendritic spacings of downward unsteady-state directionally solidified Sn-Cu alloys.** Materials Science and Engineering A, v 383/2, pp 271-282, 2004B.

Spinelli J.E; Peres, M. D., Garcia A.; **Thermosolutal convective effects on dendritic array spacings in downward transient directional solidification of Al-Si alloys.** Journal of Alloys and Compounds, in press, 2005.

Spinelli, E. **The Influence of Melt Convection on Dendritic Spacing of Downward Unsteady-State Directionally Solidified Sn-Pb Alloys.** Materials Research, v. 9, n. 1, p.51-57, 2006.

Sharp R. M. and Hellowell A. **The microscopy and composition of quenched solid-liquid interface,** Journal of Crystal Growth, v 5, 1969, pp 155 – 161.

Spitthe, J. A. ; Lloyd, D. M. **Dendrite arm spacing in hypoeutectic Pb – Sb alloys directionally solidified under steady and non-steady conditions,** Proc. International Conference on solidification and Casting of Metals, 1979, pp 15 – 20.

Trivedi, R; Lius.; Mazumder P. ; Simsek, E. **Microstructure development in, the directionally solidified Al-4%wt% Cu alloy system,** Science and Technology of Advanced Materials, v 2, 2001, pp. 309-320.

Livros

CHALMERS, B. **Principles of Solidification,** Mcgraw - Hill, New York, 1964.

FLEMINGS, M. C. **Solidification Processing,** Mcgraw - Hill, New York, 1974.

GARCIA, A; PRATES, M. **Mathematical model for the unidirectional solidification of metals II: cooled molds**, Metallurgical Transactions, 1978.

GARCIA, A, **Solidificação: Fundamentos e Aplicações** – Campinas, SP : Editora da Unicamp, 2001.

PLATES, M; DAVIES G. J, **Solidificação e Fundição de Metais e Suas Ligas** – Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1978.

SANTOS, R. G, **Transformações de Fases em Materiais Metálicos** – Campinas, SP : Editora da Unicamp, 2006.

Dissertações

GOULART, P. R. **Variáveis Térmicas de Solidificação, Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Ligas Hipoeutéticas Al-Si**. Dissertação de Mestrado, Unicamp, Campinas, 2005.

OSÓRIO, W. R. R. **Correlação Entre Parâmetros da Solidificação, Microestrutura e propriedades Mecânicas de Liga Zn-Al**. Dissertação de Mestrado, Unicamp, Campinas, 2000.

ROCHA, O.F. L. **Influência do superaquecimento e da vazão de um gás inerte na formação da macroestrutura de solidificação do alumínio e do eutético Al-33Cu**. Belém, PA. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, 1998.

SANTOS, C.A. **Influência das taxas direcionais de resfriamento na evolução da solidificação em sistemas metal/molde**. Dissertação de Mestrado, Unicamp, Campinas, 1997.

Teses

FERREIRA, I. L. **Análises Numérica, Analítica e Experimental da Macrossegregação Inversa na Solidificação.** Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004, Tese de Doutorado.;

OSÓRIO, W. R. R. **Análise da Influência dos Parâmetros Estruturais da Solidificação de Metais e Ligas na Resistência à Corrosão.** Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, 2004.

PERES, M. D. **Desenvolvimento da macroestrutura e microestrutura na solidificação unidirecional transitória de ligas Al-Si.** Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, 2005.

QUARESMA, J. M. V. **Correlação entre condições de solidificação, microestrutura e resistência mecânica.** Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, 1999

ROCHA, Otávio Fernandes Lima da. **Análise Teórico-Experimental da Transição Celular/Dendrítica e da Evolução da Morfologia Dendrítica na Solidificação Unidirecional em Condições de Fluxo de Calor Transitório.** Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, 2003.

SIQUEIRA, C. A. **Influência de parâmetros de solidificação na transição colunar/equiaxial.** Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, 2002.

SPINELLI, J. E. **Influência da convecção no líquido nas variáveis térmicas e estruturas na solidificação descendente de ligas Sn – Pb.** Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, 2005.

SÁ, Fernando Antonio. **Influência das Variáveis de Solidificação Transitória no Surgimento e Evolução dos Espaçamentos Dendríticos Terciários.** Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, 2004.