



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO – MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

MARCELO GONÇALVES MARTINS

**DETERMINAÇÃO DO CALOR ESPECÍFICO DE LIGAS AICu
PRODUZIDAS EM UM DISPOSITIVO DE SOLIDIFICAÇÃO
UNIDIRECIONAL VERTICAL ASCENDENTE**

Belém - PA
novembro / 2008

MARCELO GONÇALVES MARTINS

**DETERMINAÇÃO DO CALOR ESPECÍFICO DE LIGAS AlCu
PRODUZIDAS EM UM DISPOSITIVO DE SOLIDIFICAÇÃO
UNIDIRECIONAL VERTICAL ASCENDENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, área de Materiais e Processos de Fabricação, da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: **Prof. Dr. Fernando Antonio de Sá**

**Belém - PA
novembro / 2008**

MARCELO GONÇALVES MARTINS

**DETERMINAÇÃO DO CALOR ESPECÍFICO DE LIGAS Al-Cu
PRODUZIDAS EM UM DISPOSITIVO DE SOLIDIFICAÇÃO
UNIDIRECIONAL VERTICAL ASCENDENTE**

Dissertação submetida para a obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Mecânica
no Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal do Pará.

Belém-PA, 24 de novembro de 2008

BANCA EXAMINADORA:

Orientador, Prof. Dr. Fernando Antonio de Sá,
Universidade Federal do Pará

Membro Externo, Prof. Dr. Antônio Maia de Jesus Chaves Neto,
Universidade Federal do Pará

Membro Interno, Prof. Dr. Antonio Luciano Seabra Moreira,
Universidade Federal do Pará

*...A vida está nos mostrando
aquilo que estamos criando com
nosso poder de crer...*

Luiz Antonio Gasparetto

AGRADECIMENTOS

A Deus, senhor de toda sabedoria e bondade, início e fim de todo conhecimento.

Aos meus pais Claudionor dos Santos Martins e Vilma Maria Gonçalves Martins, pelos ensinamentos de vida e pelo apoio incessante em todos os passos da minha caminhada, bem como a todos os meus familiares, pela maneira como sempre depositaram em mim suas confianças.

À minha companheira Ayline Danielle Pereira Souto por ter cumprido ao meu lado mais esta jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Antônio de Sá pela oportunidade, amizade, incansável apoio e entusiasmo.

Ao Senhor Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, Prof. Dr. Manoel Fernandes Martins Nogueira, pela disponibilidade e boa-vontade em todos os momentos necessário.

Aos meus amigos do Grupo Amazônico de Pesquisa em Engenharia de Materiais e Meio Ambiente – GAPEMM: Admir de Nazaré de Lima Ribeiro, Élio Rayol do Santos, Giselle Barata Costa, Francisco Xavier Lima da Silva, Letícia Pereira Lira, Héilton e Poan pela ajuda na conclusão desta jornada.

À Prof^a. Dra. Carmem Gilda pelo apóio dado no trabalho desenvolvido pelo grupo GAPEMM.

Ao Prof. Dr. Sanclayton Geraldo Carneiro Moreira, do Curso de Pós-Graduação em Física, pela cordialidade com que recebeu o grupo GAPEMM para desenvolvimento de experimentos que possibilitaram essa linha de pesquisa.

Ao técnico José Edmundo, pelo auxílio nas mais diversas tarefas.

Ao mestrando em Física, Ezequiel de Andrade Belo, pela ajuda nos experimentos de trabalhos desenvolvidos pelo grupo.

À Universidade Federal do Pará (UFPA) por toda colaboração para a realização desse trabalho.

A todos que de alguma maneira contribuíram a conclusão desta jornada.

RESUMO

O conhecimento das propriedades termofísicas é de fundamental importância para o estudo de ligas metálicas obtidas por solidificação, uma vez que esta se relaciona de forma direta com o coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde. Assim, o Grupo de Pesquisa em Metalurgia e de Meio Ambiente – GAPEMM da Universidade Federal do Pará desenvolve uma linha de pesquisa que propõe um conjunto de técnicas e procedimentos que visa determiná-las. Por outro lado, sabe-se que existe uma correlação significativa entre processo, estrutura e propriedades de um material obtido por solidificação, visto que a distribuição de soluto em uma liga metálica ocorre de maneira não uniforme. A maneira como ocorre solidificação e a quantificação das variáveis envolvidas no processo têm influência fundamental nas propriedades do material. O presente trabalho utilizou ligas Al-Cu (Al-2%Cu, Al-5%Cu e Al-8%Cu) obtidas por solidificação unidirecional vertical ascendente, realizado através de um dispositivo projetado, construído e aferido pelo GAPEMM. Através destas, pretende-se fazer um estudo do calor específico à medida que a frente de solidificação se afasta da chapa molde bem como com o aumento do teor de soluto. Para isso, foi utilizada uma técnica conhecida na literatura como Lei de Resfriamento de Newton, a qual possibilita através das curvas de temperatura x tempo determinar as temperaturas necessárias para o cálculo do calor específico.

Palavras-chave: solidificação unidirecional, calor específico, Lei de Resfriamento de Newton, condições transitórias de extração de calor.

ABSTRACT

The knowledge of the properties of the thermophysics is extremely important to the study of the metallic alloys obtained from the solidification, once this one it is directly related to the heat transfer coefficient at the metal / mold interface. Thus, the researchers group of metallurgy and environment – GAPEMM of Federal University of Pará develops a line of research that proposes to develop techniques and procedures which has as main objective to determine them. On the other side, it is known that there is a significant correlation among process, structure, and properties obtained from a material during solidification. Since the distribution of solute in a metallic alloy occurs in a heterogeneous way. The way the solidification happens and the quantification of the varieties involved in the process has fundamental influence in the properties of the material. The present study used alloys Al-Cu (Al-2%Cu, Al-5%Cu e Al-8%Cu) obtained from a process upward directional solidification, made through one dispositive planned, constructed and calibrated by gapemm. Through these researches, there's the intention to study the specific heat as it gets away the plate mold as well as the raise of the solute content. To do this, it was used a technique known in the literature as the Newton's law cooling, which makes it possible through the curves of temperature x time to determine the necessary temperatures that will allow the calculation of the specific heat.

Key words: unidirectional solidification, specific heat, Newton's law cooling, transition unsteady-state heat transfer.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	17
1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Considerações Iniciais.....	17
1.2 Objetivos e Contribuições	19
1.3 Justificativa	20
CAPÍTULO 2	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICAS	21
2.1 – Ligas metálicas	21
2.2 – Diagrama do sistema Al-Cu	22
2.3 – Sistema de Liga Al-Cu	23
2.4 – Princípios de transferência de calor.....	27
2.4.1 – Condução Térmica.....	27
2.4.2 – Convecção Térmica	32
2.4.3 – Radiação Térmica	32
2.5 – SOLIDIFICAÇÃO	33
2.5.1 – Obtenção de uma peça solidificada	33
2.5.2 – Mecanismo de transferência de calor na solidificação	35
2.5.3 – Transferência Newtoniana	36
2.6 – VARIÁVEIS TÉRMICAS	38
2.7 – MACROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO.....	39
2.8 – PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS	41
2.9 – LEI DE RESFRIAMENTO DE NEWTON.....	43
CAPÍTULO 3	45
3.1 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1.1 – Procedimento metodológico para a determinação do calor específico ...	51
CAPÍTULO 4	62
4.1 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
4.1.1 – Relação entre o calor específico e as variáveis térmicas do processo de solidificação.....	67
4.1.2 – Relação gráfica entre o calor específico e a Taxa de resfriamento.....	69

4.1.3 – Relação gráfica entre o calor específico e a velocidade da isoterna liquidus.....	70
4.1.4 – Relação gráfica entre o calor específico e o gradiente de temperatura junto a isoterna liquidus	71
CAPÍTULO 5	75
5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
5.1 – Conclusões	75
5.2 – Sugestões para trabalhos futuros	76
CAPÍTULO 6	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXO A – Análise de desvio das medidas.....	83
ANEXO B – Fotos dos equipamentos utilizados	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama de fases do sistema Al-Cu (METALS HANDBOOK, 1992) ...	25
Figura 2.2 – Diagrama Parcial do sistema Al-Cu (METALS HANDBOOK, 1992) Através da análise do diagrama Al-Cu	26
Figura 2.3 – Duas placas condutoras, de diferentes materiais, justapostas em série. (TIPLER, 1995).....	30
Figura 2.4 – Associação em paralelo de condutores.....	31
Figura 2.5 – Esquema de solidificação unidirecional do sistema metal/molde.....	34
Figura 2.6 – Modos de transferência de calor atuantes no sistema metal/molde (SANTOS, 2007).	35
Figura 2.7 – Modos de transferência de calor atuantes na interface metal/molde e modelo equivalente de Newton.(GARCIA 2007)..	37
Figura 2.8 – Macroestruturas em ligas solidificadas na forma vertical ascendente (GARCIA, 2007).	40
Figura 2.9 – Lingote de Alumínio obtido num dispositivo de solidificação unidirecional vertical ascendente.	40
Figura 3.1 – Posições monitoradas em relação a chapa molde.....	45
Figura 3.2 – Dispositivo de Solidificação Unidirecional Vertical Ascendente para Ligas Metálicas desenvolvido pelo GAPEMM.	46
Figura 3.3 – Dispositivo em funcionamento no GAPEMM (RIBEIRO, 2007).....	46
Figura 3.4 – Representação em corte do dispositivo de solidificação produzido pelo GAPEMM. (RIBEIRO, 2007).	47
Figura 3.5 – Macroestruturas das ligas Al-2%Cu, Al-5%Cu e Al-8%Cu com chapa molde resfriada à água. (RIBEIRO, 2007; SANTOS 2007)	48
Figura 3.6 – Aparato experimental utilizado por Santos no laboratório de Física dos materiais (SANTOS, 2007).....	49
Figura 3.7 – Representação de um Picnômetro similar ao utilizado por Silva	50
Figura 3.8 – Fluxograma descritivo do processo para obtenção do calor específico do recipiente e para ligas de Al-Cu	52
Figura 3.9 – Invólucro de vidro utilizado no experimento.	53
Figura 3.10 – Representação da curva Txt online.....	55

Figura 3.11 – Bancada experimental utilizada para obtenção das curvas de resfriamento.	57
Figura 3.12 – Representação esquemática da bancada experimental.....	57
Figura 3.13 – Resfriamento da água obedecendo um decaimento exponencial (Wilton P. Silva, Jurgen W. Precker, Cleide M. D. P. S. e Silva, Diogo D. P. S. e Silva e Cleiton D. P. S. e Silva., 2003).....	58
Figura 3.14 – Representação da curva resfriamento com a introdução da amostra (MATTOS e GASPAR, 2003)	58
Figura 3.15 – Obtenção da temperatura inicial da água e temperatura de equilíbrio após a introdução da amostra (MATTOS e GASPAR, 2003).....	59
Figura 3.16 – Representação da curva temperatura x tempo monitorada on-line para obtenção do calor específico do recipiente..	60
Figura 3.17 – Representação da curva temperatura x tempo monitorada on-line para obtenção do calor específico do Al-2%Cu.....	60
Figura 3.18 – Representação da curva temperatura x tempo monitorada on-line para obtenção do calor específico do Al-5%Cu.....	61
Figura 3.19 – Representação da curva temperatura x tempo monitorada on-line para obtenção do calor específico do Al-8%Cu.....	61
Figura 4.1 – Representação do calor específico em função das posições com suas respectivas equações experimentais.	66
Figura 4.2 – Comparação do calor específico com as posições e com os teores de soluto.....	66
Figura 4.3 – Comportamento do calor específico em função da taxa de resfriamento para a liga de Al-2%Cu.	69
Figura 4.4 – Comportamento do calor específico em função da taxa de resfriamento para a liga de Al-5%Cu..	69
Figura 4.5 – Comportamento do calor específico em função da taxa de resfriamento para a liga de Al-8%Cu.	70
Figura 4.6 – Comportamento do calor específico em função da velocidade junto a isoterma liquidus para a liga de Al-2%Cu.....	70
Figura 4.7 – Comportamento do calor específico em função da velocidade junto a isoterma liquidus para a liga de Al-5%Cu.....	71
Figura 4.8 – Comportamento do calor específico em função da velocidade junto a isoterma liquidus para a liga de Al-8%Cu.....	72

Figura 4.9 – Comportamento do calor específico em função do Gradiente de temperatura junto a isoterma liquidus para a liga de Al-2%Cu.....	72
Figura 4.10 – Comportamento do calor específico em função do Gradiente de temperatura junto a isoterma liquidus para a liga de Al-5%Cu.....	73
Figura 4.11 – Comportamento do calor específico em função do Gradiente de temperatura junto a isoterma liquidus para a liga de Al-8%Cu.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Propriedades dos termopares	55
Tabela 4.1 – Valores das grandezas tomados para obtenção do calor específico do recipiente.....	62
Tabela 4.2 – Desvio das medidas do calor específico do recipiente	63
Tabela 4.3 – Comparação dos calores específicos nas posições medidas bem como suas composições.....	64
Tabela 4.4 – Desvio das medidas calor específico da liga Al2%Cu	64
Tabela 4.5 – Desvio das medidas calor específico da liga Al5%Cu	64
Tabela 4.6 – Desvio das medidas calor específico da liga Al8%Cu	65
Tabela 4.7 – Calores específicos encontrados na literatura.....	65

NOMENCLATURA

Letras latinas

A:	Área de secção transversal	[m ²];
C :	capacidade calorífica	[cal/°C];
C _{am} :	calor específico da amostra	[cal/g°C];
C _{ag} :	calor específico da água	[cal/g°C];
C _{rec} :	calor específico do recipiente	[cal/g°C];
C _{Liga} :	calor específico da Liga a ser estudada	[cal/g°C];
ds :	derivada do espaço solidificado	[m];
dQ :	diferencial do calor	[cal];
dt :	derivada do tempo	[s];
e:	espessura	[m];
f(x,t) :	função da posição e tempo	
f(s) :	função da espessura solidificada	
G :	gradiente térmico	[K/m]
G _L :	gradiente térmico junto a isoterma liquidus	[K/m];
h :	Coeficiente de transferência de calor.	[W/m ² K]
h _c :	Coeficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² K]
h _i :	Coeficiente de transferência de calor material/molde	[W/m ² K]
I :	Corrente térmica	
k :	condutividade térmica	[W/mK]
K _g :	Condutividade térmica de um gás	[W/m.K]
m :	massa das amostras	[g];
m ₁ :	massa do picnômetro cheio com água destilada	[g];
m ₂ :	massa do picnômetro cheio com água destilada acrescida da massa da amostra a ser estudada	[g];
m ₃ :	massa do picnômetro com a colocação da amostra em seu interior.	[g];
m _{am} :	massa da amostra	[g];
m _{ag} :	massa da água inserida no recipiente	[g];
m _{rec} :	massa do recipiente	[g];

P :	Potência irradiada	[W]
Q :	Quantidade de calor	[cal];
q_c :	fluxo de calor por convecção	
q_N :	fluxo de calor do material para o molde	
R :	resistência térmica	
R_{eq}	resistência térmica equivalente	
R_f :	fator R	
S :	área do orifício da cavidade	[m ²]
t :	Tempo	[s];
T :	Temperatura	[°C];
T_S :	Temperatura da superfície do sólido	[°C];
T_0 :	Temperatura uniforme do fluido a uma certa distância da superfície	[°C];
T_{is} :	Temperatura da superfície do material	[°C];
T_{im} :	Temperatura da superfície do molde	[°C];
T_α :	Temperatura do meio ambiente	[°C];
T_m :	Temperatura do material colocado no recipiente (liga)	[°C];
T_{eq} :	Temperatura de equilíbrio térmico	[°C];
T_{0am} e	Temperatura inicial da amostra	[°C];
T_{0Al} :		
T_{0ag} :	Temperatura inicial da água	[°C];
T_{0Liga} :	Temperatura inicial da liga	[°C];
T_1 :	Temperatura da fonte quente	[°C];
T_2 :	Temperatura da fonte fria	[°C];
$\dot{\tau}$:	Taxa de resfriamento	[°C/s];
v :	velocidade de solidificação	[m/s]
V_L :	velocidade de deslocamento da isoterma liquidus	[m/s]
V :	Volume do corpo	[m ³];

Letras Gregas

α :	Difusividade térmica	[m ² /s];
ΔQ :	Varição da quantidade de calor	[cal];
Δt :	Intervalo de tempo	[s];
Δx :	Varição do comprimento	[m];
ε :	Emissividade do material	
ρ :	Massa específica	[kg/m ³];
σ :	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/m ² .K ⁴];
$\nabla^2 T$:	Laplaciano da Temperatura	
∂T :	Derivada parcial da temperatura	
∂t :	Derivada parcial do tempo	

ABREVIATÖES

Cal = calorias

ASTM = American Society for Testing and Materials;

GAPeMM = Grupo de Pesquisa em Metalurgia e de Meio Ambiente;

UFPA = Universidade Federal do Pará.

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A solidificação de metais tem sido um processo, estudado por um longo período empiricamente, porém apenas há algumas décadas sistematizaram-se seu estudo. A fusão de metais, seguida de vazamento, em um molde de geometria pré-determinada, técnica conhecida como fundição, foi o primeiro processo de fabricação de peças desenvolvida pelo homem, de maneira empírica, há mais de 5000 anos a.C.(CAMPOS, 1978).

A solidificação de metais pode ser considerada como um processo de transferência de calor em regime transitório ou estacionário. Por isso, faz-se necessário a compreensão dos processos de transferência de calor que ocorre durante a solidificação nas interfaces ambiente/molde, metal/molde e sólido/líquido (GARCIA, 2008).

A maneira como ocorre a solidificação e a quantificação das variáveis envolvidas no processo têm influência fundamental nas propriedades do material, pois o processo determina a estrutura e esta determina as propriedades de uma peça solidificada. As propriedades são, portanto, determinadas pelo processo. Em nível atômico, a estrutura é a distribuição espacial dos átomos nas três dimensões. Nos casos das estruturas cristalinas dos metais e ligas, materiais cerâmicos e polímeros evidenciam-se, portanto, na distribuição espacial dos átomos nas redes tridimensionais, e além do nível atômico pode-se apreciá-la sob dois outros aspectos, ou seja, na forma da microestrutura e da macroestrutura sendo que as mesmas influenciam de maneira significativa todos os aspectos do comportamento dos materiais e por isso devem ser submetidas a controle (SÁ, 2004). Ao vazar-se um metal em um molde a transferência de energia que ocorre é controlada por algumas variáveis térmicas, criando-se neste instante, uma fronteira de separação entre as fases líquidas e sólidas. O tratamento formal da transferência de calor durante a solidificação apresenta considerável complexidade como consequência da

geração contínua de calor latente, e da forma de deslocamento da fronteira sólida/liquida (S/L) (MAXWELL; HELLAWELL, 1975; CROSS et al, 1998).

No entanto, hoje há várias técnicas de solidificação, entre estas, utiliza-se no GAPEMM a técnica conhecida como solidificação unidirecional vertical ascendente a qual é bastante difundida nas áreas de materiais e processos de fabricação, em geral opta-se por este método devido à peculiaridade dos produtos obtidos e pela simplicidade matemática considerando unidirecional. Para isso, foi projetado, construído e aferido pelo grupo GAPEMM/UFPA um dispositivo que atende a essas condições o qual foi tema de dissertação de mestrado de Ribeiro (RIBEIRO, 2007) e neste foram fabricadas ligas de Al-Cu com teores de 2%, 5% e 8% a fim de estudarmos suas propriedades termofísicas, haja vista que quando é realizado o estudo das mesmas, em geral, se desejam conhecer, sua condutividade térmica e elétrica, a densidade e o calor específico.

Uma vez estabelecida esta linha de pesquisa foram inicialmente desenvolvidos dois trabalhos de dissertação neste sentido: A determinação da difusividade térmica (SANTOS, 2007) e a obtenção da densidade (SILVA, 2008). Dando continuidade ao processo este trabalho propõe uma técnica para se obter os calores específicos das ligas por intermédio das curvas de resfriamento tomando como fundamento o principio geral das trocas de calor e a Lei de Resfriamento de Newton.

1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

Tendo em consideração que o conhecimento das propriedades termofísicas dos materiais é de fundamental importância para sua caracterização e aplicação bem como o conhecimento de que o processo de solidificação determina as propriedades de um material planejou-se o desenvolvimento de um trabalho teórico-experimental com os seguintes objetivos:

1.2.1. Determinar o calor específico de ligas Al-Cu usando o princípio das trocas de calor com o auxílio das curvas experimentais monitoradas on-line utilizando a idéia da Lei de Resfriamento de Newton.

1.2.2 Mostrar o comportamento do calor específico à medida que se afasta da chapa molde, ou seja, em relação ao elemento utilizado para a extração de calor.

1.2.3. Comparar os valores obtidos do calor específico em cada posição variando sua composição.

1.2.4 Comparar os resultados encontrados para o calor específico com aqueles dados na literatura.

1.2.5 Correlacionar o calor específico das ligas de AlCu com as variáveis térmicas do processo de solidificação (velocidade da linha líquidus, taxa de resfriamento e gradiente de temperatura).

1.3 JUSTIFICATIVA

Na atualidade se faz necessário o estudo científico da solidificação para o controle das propriedades de materiais metálicos, bem como a necessidade do conhecimento de outras ciências como a Física e a Química para compreensão dos fenômenos que ocorrem durante a mesma. As propriedades termofísicas, como o calor específico no estado sólido, são de fundamental importância para caracterizar as ligas metálicas, de vez que a literatura apresenta apenas alguns valores tabelados para as grandezas físicas das diversas ligas obtidas comercialmente. Percebe-se então que existe carência da divulgação de técnicas e rotinas para obtenção destas propriedades, bem como de sua correlação com o processo de solidificação. Este trabalho se faz necessário devido contribuir na linha de pesquisa desenvolvida pelo GAPEMM que busca estudar as variáveis térmicas em um dispositivo de solidificação unidirecional vertical ascendente, desenvolvendo metodologias para que se possam obter as propriedades termofísicas de ligas metálicas através de trabalhos seqüenciais que já foram e estão sendo desenvolvidos pelo grupo e relacioná-las com as variáveis do processo de solidificação. Um exemplo da necessidade do conhecimento das propriedades termofísicas pode ser notado quando se pretende obter o coeficiente de transferência de calor metal/molde (h_i) pelo método do confronto dos perfis térmicos teórico/experimental.

Capítulo 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LIGAS METÁLICAS

Uma liga metálica é uma combinação de elementos químicos, com propriedades metálicas, que contém ao menos um elemento metálico. Exemplos das ligas são: aço (ferro e carbono), latão (cobre e zinco), bronze (cobre e estanho) e duralumínio (alumínio e cobre). Ligas projetadas especialmente para aplicações altamente exigentes, como em turbinas a jato, podem conter mais de dez elementos combinados. Podemos classificar as ligas como binárias ternárias, quaternárias, se o número de componentes for, respectivamente, 2, 3 e 4. Do ponto de vista da composição química e estrutural uma liga é formada por componentes e fases (MOORE, 1976)

Os metais puros possuem inúmeras propriedades que os tornam importantes sob o ponto de vista de aplicação industrial. Os processos metalúrgicos geralmente produzem os metais com uma quantidade de substâncias estranhas que varia, em geral, de menos de 0,01% até cerca de 2% em peso. Essas substâncias estranhas ou “impurezas”, freqüentemente difíceis de serem removidas durante a fabricação, afetam mais ou menos as propriedades dos metais (SANTOS, 2007).

As ligas constituem, pois, uma combinação de duas ou mais variedades de átomos, resultando numa substância que apresenta alterações às vezes muito profundas, tanto nas propriedades físicas, químicas, em relação aos elementos correspondentes.

O número de possíveis combinações de apenas dois componentes, dos quais um deve ser sempre metal, é muito grande. Por outro lado, para cada composição específica de uma liga, busca-se determinar as modificações estruturais que podem ocorrer às diversas temperaturas, a partir de sua temperatura de fusão. Um diagrama relativamente simples permite descrever esses fenômenos em função dos

teores dos elementos presentes. Esses diagramas são denominados diagramas de equilíbrio de constituição ou diagramas de fase (RHINES, 1956).

Considerando-se as ligas binárias, como possíveis combinações entre elementos metálicos e elementos metálicos e não-metálicos, é muito extenso o número de diagramas de equilíbrio que podem ser traçados. Entretanto, muitos deles possuem uma significativa correspondência entre si, de modo que para o estudo dos princípios básicos que norteiam a constituição das ligas podem ser agrupados em apenas alguns tipos baseados em certas características comuns.

Se a influência dos constituintes da liga nas propriedades do metal é mínima ou nula, diz-se comumente que o metal é “comercialmente puro”. Na prática, então, um metal puro não necessita ser 100% elemento metálico, mas sim, pode ter sua pureza variando entre 99,0 e 99,999% de elemento metálico (SANTOS, 2007).

Alguns metais como cobre, zinco e chumbo etc podem, por exemplo, ser produzidos com uma pureza próxima ou superior a 99,99%.

Nas ligas, entretanto, elementos estranhos são intencionalmente adicionados ao metal, com o fim de melhorar as propriedades usuais ou obter certas propriedades específicas.

2.2 DIAGRAMA DO SISTEMA Al-Cu

É nos países com elevado grau de industrialização que se concentra a maior parte das variadas aplicações do alumínio. A maior parte da produção mundial destina-se às indústrias aeronáutica e automobilística.

Outra importante área de aplicação do alumínio é a fabricação do arame, tanto usando o metal puro como ligas. Com o alumínio são fabricados cabos de transmissão de eletricidade, através de processos de trefilação. Por medida de segurança esses fios são freqüentemente recobertos por uma capa isolante flexível, geralmente de borracha. Também é empregado, devido a sua grande condutibilidade térmica e elétrica em condutores para eletrotécnica, condensadores e refletores.

O alumínio não é tóxico, sendo extensivamente utilizado em recipientes e embalagens para alimentos. Sua aplicação também é bastante acentuada na indústria elétrica devido as suas boas propriedades no transporte de energia e como elemento estrutural quando ligado.

De acordo com o peso dos elementos que constituem a crosta terrestre, o alumínio ocupa o terceiro lugar, representando cerca de oito por cento em peso do total. Esse metal faz parte da composição de grande número de rochas e pedras preciosas; entre as primeiras cabe mencionar, graças a seu interesse mineralógico ou metalúrgico, os feldspatos, as micas, a turmalina, a bauxita e a criolita.

As ligas de Al-Cu estão de acordo com padrões estabelecidos pela regra de Hume-Rothery. Nestas ligas algumas propriedades aumentam progressivamente com a adição de cobre, tais como a resistência mecânica e a dureza, porém somente até o percentual de 12% sendo que acima deste percentual a liga torna-se quebradiça (SANTOS, 2007).

A resistência à corrosão é uma propriedade característica do alumínio, porém é prejudicada pela adição de cobre.

Os tratamentos térmicos recomendados para o aumento de dureza e resistência mecânica das ligas Al-Cu são a solubilização seguido de envelhecimento (precipitação).

2.3 SISTEMA DE LIGA Al-Cu

Como foi exposto anteriormente o grupo GAPEMM da UFPA desenvolve experimentos com ligas binárias obtidas através do processo de solidificação dentre as quais estão inclusas ligas do sistema Al-Cu. A seguir realizaremos uma breve exposição do desenvolvimento experimental para determinar algumas propriedades destas ligas obtidas por este grupo.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6834, para o alumínio e suas ligas trabalháveis do grupo 2000, a variação do teor de cobre é de 0,7% a 6,8%, logo as ligas Al-2%Cu e Al-5%Cu são ligas que fazem parte do grupo 2000. Essas ligas da série 2000 são tratáveis termicamente (endurecimento por

precipitação) e podem sofrer conformação. Os teores de cobre de 3% e 6,5% estão dentro do domínio de solubilidade do cobre no alumínio, porém o teor de cobre de 8% está além da solubilidade máxima do cobre no alumínio. Esse teor de 8% de cobre não se encontra nas ligas de alumínio para fundição do grupo 2000, contudo o mesmo é estudado para efeitos comparativos.

O diagrama do sistema Al-Cu, está indicado na Figura 2.1. A Figura 2.2 destaca a área deste diagrama em que as ligas utilizadas neste trabalho estão inseridas.

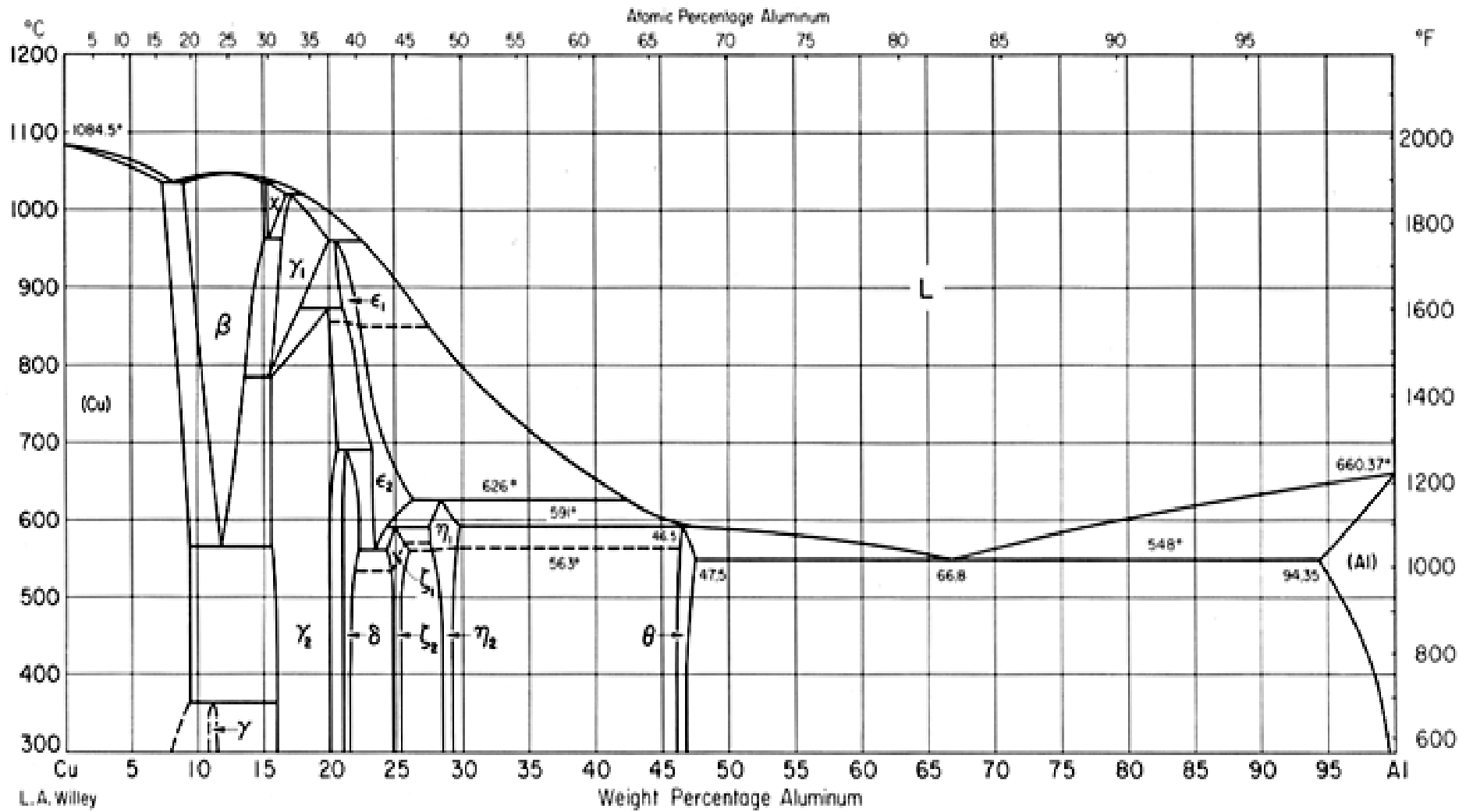


Figura 2.1 – Diagrama de fases do sistema Al-Cu (METALS HANDBOOK, 1992)

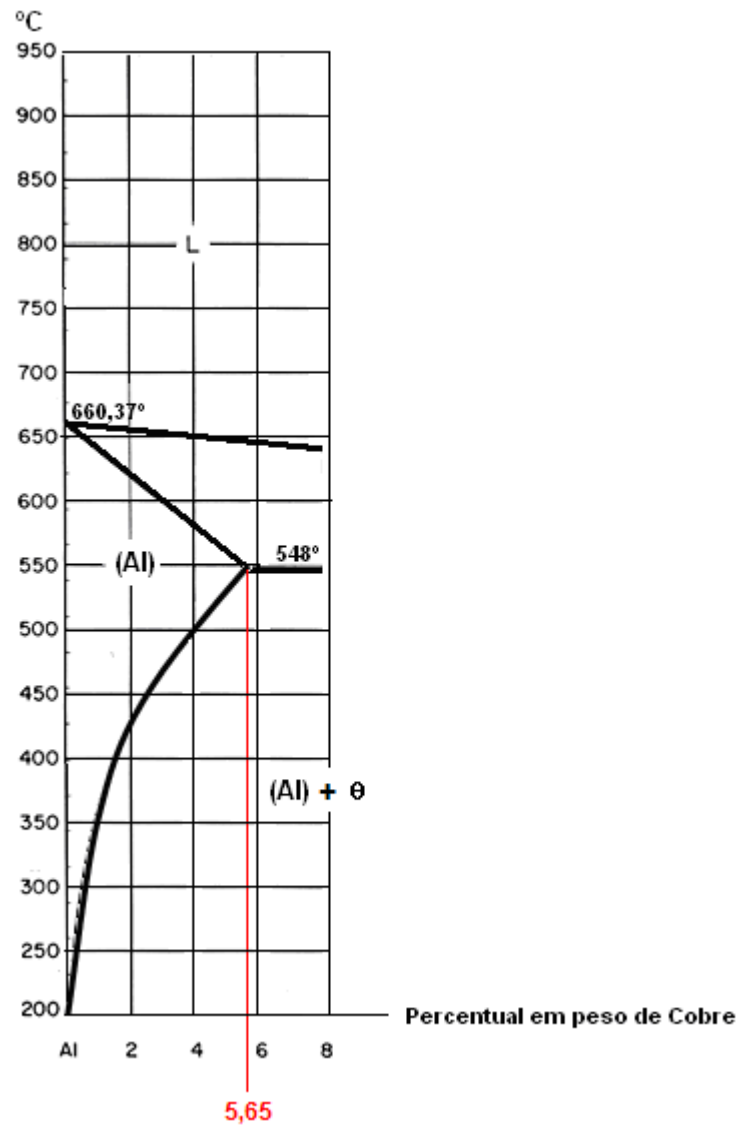


Figura 2.2 – Diagrama parcial do sistema Al-Cu (METALS HANDBOOK, 1992) Através da análise do diagrama Al-Cu percebe-se que suas ligas são solúveis, sendo essa solubilidade dependente da temperatura e da composição.

2.4 Princípios de transferência de calor

Sabemos que o calor se transmite espontaneamente do sistema de maior temperatura para o sistema de menor temperatura e com isso conhecemos seus efeitos sobre o sistema, como as variações de temperatura, dilatações e mudança de estado físico.

No entanto, é importante conhecermos como a energia é transmitida de um ponto para outro dentro de um sistema, ou de um sistema para outro, ou seja, como ocorre a transmissão de calor.

A transmissão de calor entre dois pontos de um sistema, ou entre sistemas, pode ocorrer por três processos distintos: **condução**, **convecção** e **irradiação**. Neste tópico descreveremos cada um desses processos separadamente.

2.4.1 Condução térmica

Na transmissão de calor por condução, a energia se transfere de partícula para partícula (átomos, moléculas ou íons), através do material constituinte do corpo. A partícula, ao receber energia, aumenta seu grau de agitação, e esse aumento no grau de agitação se transmite para as partículas vizinhas (HALLYDAY, RESNICK e WALKER, 1996).

Vale ressaltar que a rapidez com que o calor se conduz através de uma barra é uma característica que depende do material constituinte da barra. Por exemplo, o calor é conduzido mais eficientemente pelo aço do que pelo vidro. Dizemos então que o aço é um **bom condutor de calor** e que o vidro é **mau condutor de calor** ou **bom isolante térmico**.

Vamos estabelecer agora a lei que rege a condução térmica em regime estacionário, conhecida como **Lei de Fourier da Condução Térmica**.

O regime estacionário é estabelecido quando as extremidades do meio onde ocorre a condução térmica são mantidas em temperaturas constantes apesar da transmissão de energia (ANDRADE, E. T.; COUTO, S. M.; QUEIROZ, D. M.; PEIXOTO, A. B., 2004).

De acordo com a Lei de Fourier, o fluxo de calor através da barra é: (a) diretamente proporcional à área de secção transversal S da barra; (b) diretamente proporcional à diferença de temperatura ($\Delta T = T_2 - T_1$) entre suas extremidades; (c) inversamente proporcional ao comprimento ΔL da barra ou a espessura de uma placa Δx . combinando (b) e (c), vemos que ΔQ é proporcional a $\Delta T/\Delta x$, que é chamado de *gradiente de temperatura* (NUSSENZVEIG, 1981).

Agrupando esses resultados, vemos que ΔQ é proporcional a $A\Delta t(\Delta T/\Delta x)$, ou seja, para a condução de calor através de uma espessura infinitésima dx de um meio durante um tempo dt ,

$$\frac{dQ}{dt} = -k.A.\frac{dT}{dx} , \quad (2.1)$$

onde k é uma constante de proporcionalidade característica do meio condutor, que se chama de *condutividade térmica* do material ($k > 0$), O valor desse coeficiente é elevado para bons condutores de calor e baixo para os chamados isolantes térmicos (NUSSENZVEIG, 1981).

Os metais, que conduzem bem a eletricidade, também são bons condutores de calor, o que não é coincidência: segundo a *Lei de Wiedemann e Franz*, a condutividade térmica de um metal é proporcional a sua condutividade elétrica (NUSSENZVEIG, 1981).

Na Eq. (2.1) o sinal negativo exprime o fato de que o calor flui de temperaturas mais altas para temperaturas mais baixas: assim, se o gradiente de temperatura dT/dx é negativo, o fluxo térmico dQ/dt é positivo.

Ainda podemos exprimir a Eq. (2.1) da seguinte forma:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = k.A.\frac{\Delta T}{\Delta x} , \quad (2.2)$$

onde denominamos $\Delta Q/\Delta t$ de corrente térmica e representaremos por I . Logo a Eq.(2.2) pode ser escrita da forma:

$$I = k.A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.3)$$

Da Eq. (2.3) podemos exprimir a diferença de temperatura, obtendo:

$$\Delta T = I \frac{\Delta x}{k.A} \quad (2.4)$$

ou

$$\Delta T = I.R \quad (2.5)$$

onde $\Delta x/k.A$ é a **resistência térmica** R :

$$R = \frac{\Delta x}{k.A} \quad (2.6)$$

Em muitos problemas térmicos de carácter prático há interesse no fluxo de calor através de dois ou mais condutores (ou isolantes) em série. Por exemplo, podemos querer saber o efeito da adição de material isolante, com certa espessura e determinada condutividade térmica, ao espaço entre duas chapas divisórias. A Figura 2.3 mostra duas placas condutoras de calor, com a mesma área mesma da secção reta, mas constituídas de materiais diferentes, com espessuras diferentes. Seja T_1 a temperatura da face quente, T_2 a da interface das duas placas e T_3 a da face fria. Nas condições de fluxo térmico em estado permanente, a corrente térmica deve ser a mesma através das duas placas. É o que se conclui da conservação da energia; num estado permanente, a energia que entra numa chapa deve ser igual à que sai desta chapa. Se R_1 e R_2 forem as resistências térmicas das duas chapas, temos pela Eq. (2.5) para cada uma delas (TIPLER,1995):

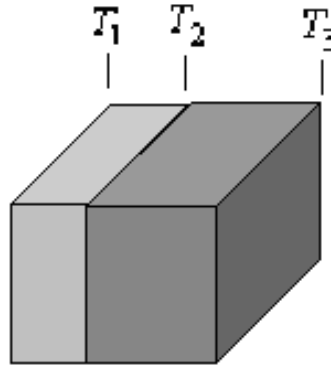


Figura 2.3 – Duas placas condutoras, de diferentes materiais, justapostas em série. (TIPLER,1995).

$$T_1 - T_2 = I.R_1 \quad (2.7)$$

e

$$T_2 - T_3 = I.R_2 \quad (2.8)$$

Subtraindo a Eq. (2.7) da Eq. (2.8), temos:

$$\Delta T = T_1 - T_3 = (R_1 + R_2)I = R_{eq}.I \quad , \quad (2.9)$$

onde R_{eq} é a resistência equivalente. Assim, no caso da resistência em série, a resistência equivalente é igual a soma das resistências individuais:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots \quad (2.10)$$

Este resultado pode ser aplicado a qualquer número de resistência em série

Nas indústrias a resistência térmica é chamada de **fator R**, que designaremos por R_f . O fator R é simplesmente a espessura do material dividida pela sua condutividade térmica:

$$R_f = \frac{\Delta x}{k} = RA \quad (2.11)$$

Se tivermos uma condução paralela de condutores, ou seja, os condutores estão superpostos de modo que a transferência ocorra de forma paralela, conforme mostra a Figura 2.4. Nesta situação a diferença de temperatura é a mesma para cada um destes caminhos, mas a corrente térmica diferente. A corrente total é soma das correntes térmicas de cada caminho independente (TIPLER,1995), ou paralelo:

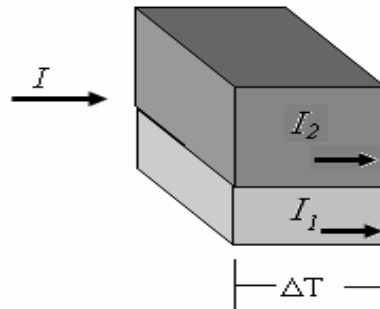


Figura 2.4 – Associação em paralelo de condutores.

$$I_{total} = I_1 + I_2 + \dots = \frac{\Delta T}{R_1} + \frac{\Delta T}{R_2} + \dots \quad , \quad (2.12)$$

ou

$$I_{total} = \frac{\Delta T}{R_{eq}} \quad , \quad (2.13)$$

onde a resistência térmica equivalente é dada por

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \quad . \quad (2.14)$$

Como o modelo adotado faz referência ao modelo elétrico seria de se esperar um resultado do tipo mostrado na equação (2.14).

2.4.2 Convecção térmica

Já o mecanismo de transmissão de calor por convecção ocorre sempre que um corpo é colocado num fluido a uma temperatura mais alta ou mais baixa do que a do corpo. Em consequência dessa diferença de temperatura, ocorre troca de calor entre o fluido e o corpo o que causa a diferença de densidade das camadas fluidas na vizinhança da superfície de contato. Essa diferença de densidade, então induz o surgimento das correntes de convecção.

Se o movimento do fluido for causado unicamente por diferenças de densidade resultantes de diferenças de temperatura, o mecanismo de transmissão de calor é chamado **convecção natural**. Caso contrário tem-se a **convecção forçada** (PENTEADO, 1998). A quantificação do fluxo convectivo é feita através de expressões do tipo:

$$q_c = h_c (T_s - T_0) \quad , \quad (2.15)$$

onde T_s é a temperatura da superfície do sólido, T_0 é a temperatura uniforme do fluido a uma certa distância da superfície e h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção medido em W/m^2K .

2.4.3 Radiação térmica

A radiação transfere calor de um ponto para outro através de ondas eletromagnéticas. A radiação térmica é emitida por um corpo aquecido, e, ao ser absorvida por outro corpo, pode aquecê-lo, convertendo-se em calor (PENTEADO, 1998). O fluxo de calor nessas condições pode ser quantificado com o auxílio da Lei de *Stefan-Boltzmann*, que representamos por:

$$P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4 \quad , \quad (2.16)$$

onde P é a potência total irradiada, ε é a emissividade total, σ é uma constante de proporcionalidade que vale $5,7 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$, S é a área do orifício da cavidade e finalmente T é a temperatura absoluta (BEJAN, 1999).

2.5 SOLIDIFICAÇÃO

A solidificação de um material é fundamentalmente um processo de transferência de calor em regime transitório ou estacionário (GARCIA, 2007). O calor latente de fusão, primeiramente dispendido para fundir o material, é liberado na interface sólido/líquido enquanto ocorre esta mudança de fase. A rapidez com que o fluxo é extraído e transferido através do material relaciona-se de forma direta com a velocidade com que este se solidifica e com gradientes térmicos do sistema, os quais tem interferência na qualidade final do produto a ser obtido por este processo. (GARCIA, 2007).

2.5.1 Obtenção de uma peça solidificada

Para compreendermos a aplicação da transferência de calor na solidificação dos metais é necessário o entendimento dos aparatos utilizados para obtenção de uma peça obtida por esta mudança de fase. Vale ressaltar que seu maior campo de aplicação está na fundição de metais, sendo que seu objetivo principal é dar forma desejada de maneira que o material no estado líquido é vazado dentro da cavidade de um molde tomando a forma do mesmo segundo o princípio de *Arquimedes*. O molde encarrega-se de retirar calor do líquido e deste modo provocando sua mudança de fase. (QUARESMA, 1999; GARCIA, 2001; ROCHA, 2003).

Desta forma se faz necessária à análise do processo de propagação de calor que ocorre durante o fenômeno, tendo em vista que a mesma é uma poderosa ferramenta de controle e dimensionamento de sistemas metal/molde. A *Figura 2.5* mostra um esquema de solidificação.

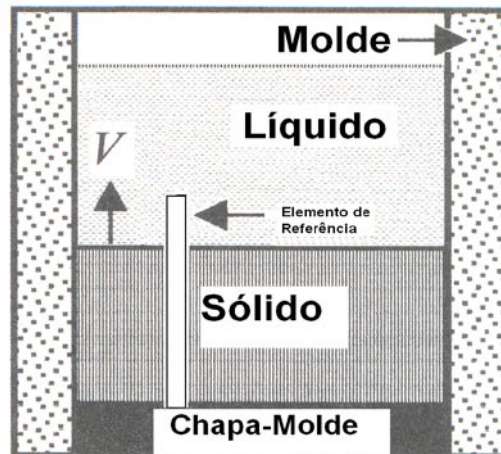


Figura 2.5 – Esquema de solidificação unidirecional do sistema metal/molde (SANTOS, 2007).

Para compreendermos melhor a transferência de calor na solidificação, analisaremos o que acontecerá em um elemento de referência extraído do sistema estudado. O mesmo é definido de forma que o comportamento térmico seja típico do sistema como um todo. A viabilidade da análise também dependerá de algumas hipóteses simplificadoras com o objetivo de atenuar a complexidade matemática, mas que não comprometam a confiabilidade dos resultados obtidos.

Quando se estuda transferência de calor na solidificação de um metal, dois objetivos estão em foco, os quais são:

- Determinar a distribuição de temperatura, ou perfil térmico, do sistema analisado, isto é, determinar a relação entre temperatura, espaço e tempo;

$$T = f(x,t), \quad (2.17)$$

- Determinar a cinética de solidificação do metal, isto é, determinar o tempo necessário para solidificar uma determinada porção do metal.

$$T = f(s), \quad (2.18)$$

onde s é a espessura do metal solidificado.

Da Eq. (2.18) pode ser deduzida a velocidade de solidificação do metal, ou seja, a velocidade com a qual a interface sólido/líquido avança no seio do metal líquido, segundo a função

$$v = \frac{ds}{dt} = f(s). \quad (2.19)$$

2.5.2 Mecanismos de transferência de calor na solidificação

O elemento de referência extraído do sistema metal/molde apresentado na Figura 2.5, é detalhado na Figura 2.6, evidenciando todos os modos de transferência de calor que podem ocorrer ao longo da solidificação unidirecional, considerando-se as seguintes situações:

- Condução térmica de calor no metal e através da chapa-molde;
- Transferência Newtoniana de calor, ou seja, convecção, radiação e condução de calor na camada de ar formada devido ao contato imperfeito entre o metal e o molde (GAP), provocado pela contração do metal durante a solidificação e/ou ocorrência de imperfeições na superfície interna do molde;

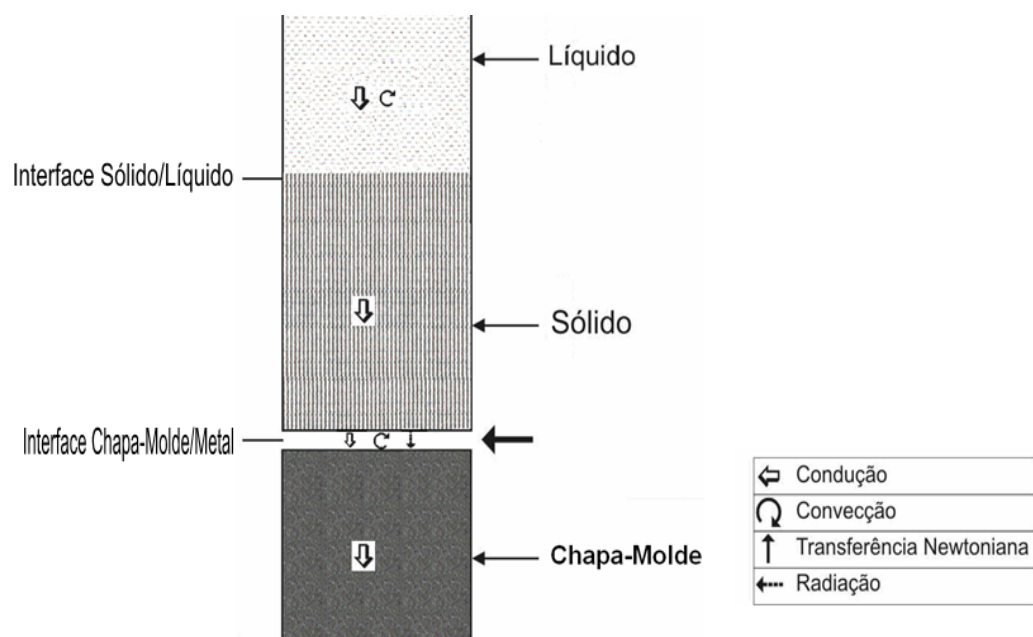


Figura 2.6 – Modos de transferência de calor atuantes no sistema metal/molde (SANTOS, 2007).

Em algumas situações, pode-se eventualmente desprezar algum desses modos de transferência de calor no computo global da energia térmica transferida. Por exemplo, a hipotética aplicação de moldes semi-infinitos no processo de solidificação, através de coquilhas de grande espessura, faria com que não houvesse troca de calor com o meio ambiente, devido à elevada capacidade de absorção de calor pela mesma. Estes não são, entretanto, utilizados na indústria de fundição por envolverem grandes massas de material na sua confecção e pela conseqüente inviabilidade econômica. Por outro lado, há moldes refrigerados que mantêm sua temperatura externa constante pela ação de um fluido de refrigeração, enquanto que existem também, moldes do tipo refratário que apresentam uma baixa absorção de calor. Segundo GARCIA (GARCIA, 2007), estes tipos permitem simplificações na análise do fluxo de calor global durante a solidificação.

2.5.3 Transferência Newtoniana

Como a solidificação é um processo que confere forma a um produto a partir do material no estado líquido, é preciso dispor de um recipiente que permita gerar a geometria desejada e que, ao mesmo tempo, retire o calor liberado pela transformação líquido/sólido. Na indústria de transformação de metais, esses recipientes são os moldes ou lingoteiras. O material líquido, ao ser vazado, entra em contato com as paredes internas do molde e nessa fronteira metal/molde existirá uma resistência térmica de contato. Essa resistência é decorrente de vários fatores, tais como: a afinidade físico-química entre material do molde e material a ser solidificado não é perfeita e, como conseqüência, o molhamento da parede interna do molde pelo líquido não é completo; a rugosidade interna do molde conferida pela usinagem de acabamento gera uma microgeometria superficial que propicia o surgimento de poucos pontos de contato intercalados por regiões de separação física material/molde, conforme ilustra a Figura 2.7 a); a utilização de lubrificantes para facilitar a desmoldagem provoca um aumento na separação física entre o material sólido e o molde, além de outros fatores de influência. Nessas condições, a transferência de calor na junção material/molde se dá por condução pelos pontos de contato e através dos gases aprisionados pelos espaços criados, e também por

convecção e radiação entre as duas superfícies separadas (GARCIA, 2007), conforme esquema da Figura 2.7a).

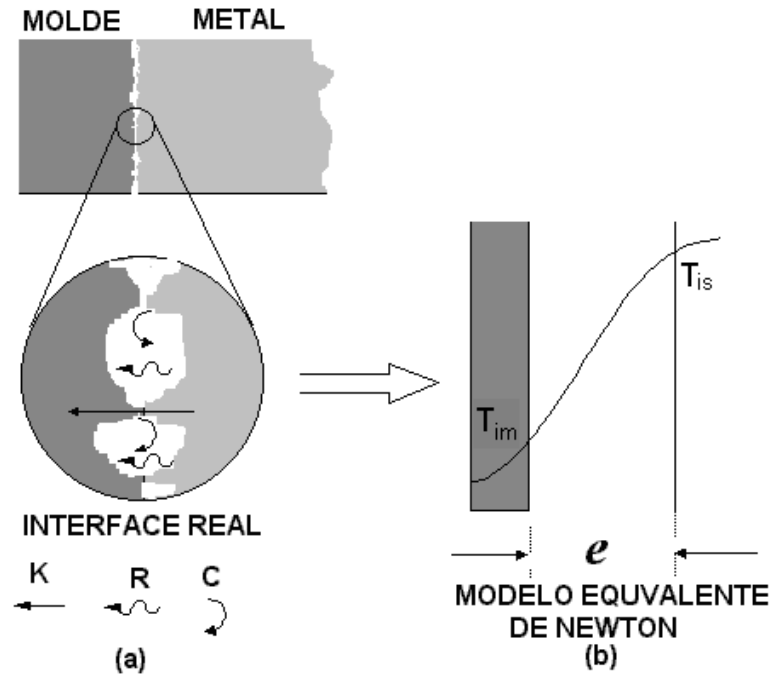


Figura 2.7 – Modos de transferência de calor atuantes na interface metal/molde e modelo equivalente de Newton: K- condução; C- convecção; e R- radiação.(GARCIA 2007).

Para simplificar o tratamento da troca de calor entre duas superfícies em contato, Newton admitiu que essas superfícies fossem perfeitamente planas e paralelas separadas por uma distância e , sendo esse espaço de separação preenchido por um determinado gás (Figura 2.7 b). Nessas condições, o fluxo de calor do material para o molde, nessa interface, será dado por:

$$q_N = \frac{K^g}{e}(T_{is} - T_{im}) , \quad (2.20)$$

ou

$$q_N = h_i(T_{is} - T_{im}) , \quad (2.21)$$

onde T_{is} é a temperatura da superfície do material, T_{im} é a temperatura da superfície do molde e h_i é o coeficiente de transferência de calor material/ dado por W/m^2K .

2.6 VARIÁVEIS TÉRMICAS

A fase inicial do processo de solidificação e as fases de refino e produção dos metais puros e de suas respectivas ligas são cruciais no processo de produção de materiais metálicos, pois a ocorrência de defeitos resultará em prejuízos significativos nas operações posteriores de fabricação, além de afetar diretamente na qualidade e nas propriedades do material solidificado e, conseqüentemente, de seus produtos finais. Do ponto de vista metalúrgico, é importante o estudo da solidificação de metais e ligas em sistemas metal/molde, onde o molde confere forma à peça produzida e transfere calor do metal para o meio que o dissipará.

Estudos recentes têm mostrado que há variáveis significativas para o controle da solidificação tais como:

1) A velocidade da isoterma líquidus (V_L) representa a rapidez com que a frente de solidificação avança ao longo do material. A forma utilizada nos trabalhos de SANTOS (2007) e SILVA (2008) a fim de se determiná-la, foi distribuir os termopares em posições bem definidas na lingoteira em relação chapa molde e ao vaziar o material líquido monitorar o exato momento em que a isoterma líquidus fora atingida. Analiticamente é representada pela Eq. (2.19), mostrada anteriormente.

2) Uma vez conhecida às temperaturas das isotermas liquidus sua taxa de resfriamento junto esta (\dot{T}) indicará a forma de como o calor está sendo extraído em uma posição pré-definida em termos da temperatura em função tempo. É possível representá-la por

$$\dot{T} = \frac{dT}{dt} \quad (2.22)$$

3) Já o gradiente térmico à frente da interface sólido/líquido (G_L), indicará como a temperatura está distribuída na unidade de comprimento. E podemos defini-lo num caso unidimensional da forma

$$G_L = \frac{dT}{dx}. \quad (2.23)$$

Ainda podemos escrever a Eq.(2.22) na forma

$$\dot{T} = \frac{dT}{dx} \frac{dx}{dt} , \quad (2.24)$$

obtendo assim a relação entre as variáveis térmicas discutidas anteriormente, em uma única equação

$$\dot{T} = G_L \cdot V_L . \quad (2.25)$$

2.7 MACROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO

Durante a solidificação de peças fundidas ou de lingotes, a macroestrutura de solidificação pode se apresentar na forma de grãos totalmente colunares ou equiaxiais, dependendo da composição química da liga e das condições de solidificação. Uma forma estrutural mais complexa, típica de solidificação em moldes de maiores difusividades de calor como moldes metálicos e refrigerados, é composta por duas zonas estruturais. Essa forma mista de solidificação ocorre quando os grãos equiaxiais encontram condições de nuclear e crescer no líquido, a frente da fronteira colunar de crescimento, provocando a transição colunar/equiaxial (TCE) (CHALMERS, 1964; DAVIES, 1973; FLEMINGS, 1974; OHNO, 1976; KURZ, 1992).

GARCIA (2001) e ZIV (1989) afirmam de forma qualitativa que a TCE geralmente é antecipada à medida que a concentração de soluto da liga cresce, a temperatura de vazamento diminui e correntes de convecção no metal líquido ficam mais intensas. Uma investigação mais aprofundada dos mecanismos físicos envolvidos pode ser observada por propriedades térmicas do material. O crescimento colunar é condicionado pelo movimento das isoterms *liquidus* e *solidus* e o crescimento equiaxial à frente da fronteira colunar altera o perfil térmico no líquido em função da liberação de calor latente (SIQUEIRA, 2002). Na Figura 2.8, temos um exemplo onde se observa claramente em ligas Sn-20%Pb e Sn-30%Pb a transição colunar/equiaxial. A Figura 2.9 mostra um lingote de alumínio puro com predominância de grãos colunares e unidirecionais obtido no dispositivo de solidificação unidirecional ascendente construído pelo grupo GAPEMM, mostrando com isso que a extração de calor é predominantemente pela chapa molde, ou seja, o fluxo de calor é vertical descendente.

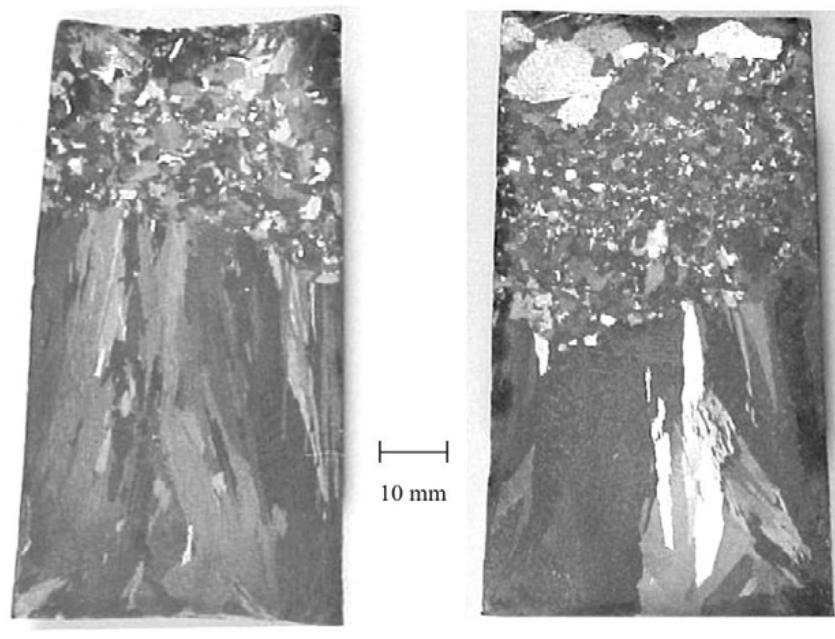


Figura 2.8 – Macroestruturas em ligas solidificadas na forma vertical ascendente (GARCIA, 2007).

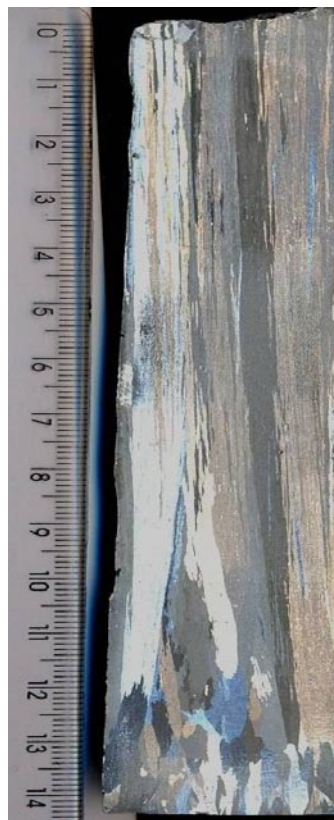


Figura 2.9 – Lingote de Alumínio obtido num dispositivo de solidificação unidirecional vertical ascendente.

2.8 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

O estudo das propriedades térmicas adquiri à cada dia maior importância na caracterização dos diversos materiais utilizados pelo homem. Este estudo se torna imprescindível, à medida que a quantidade e complexidade dos materiais aumentam, bem como os tipos de utilização encontrados para os mesmos. Estas propriedades são observadas quando a energia térmica, isto é, o calor, é fornecido ou removido do material. Podemos destacar algumas destas propriedades como, por exemplo, a condutividade térmica, que é a capacidade que o material tem de transferir calor, ou seja, de conduzir o calor. As alterações de dimensão, devidas às mudanças de temperatura, são estimadas através da expansão térmica.

A difusividade térmica na solidificação se faz necessário pois relaciona as habilidades de conduzir e armazenar energia de um material e é geralmente expressa em m^2/s . Observa-se que materiais com alto valor de difusividade térmica respondem rapidamente às mudanças térmicas em seu ambiente, enquanto materiais de pequenos valores de difusividade respondem mais lentamente, demorando a alcançar um novo estado de equilíbrio (INCROPERA, 1996). Além do mais, a mesma pode ser correlacionada com a condutividade térmica (k) e calor específico (c) e a densidade (ρ), como mostra a equação (2.22) para a condução de calor, para um sistema de coordenadas cartesianas. É conveniente utilizar a difusividade térmica em situações em que a transferência de calor ocorre em regime transitório (ANDRADE, 2004). A mesma também está diretamente relacionada com a efusividade térmica a qual indica a capacidade de absorção de calor pelo material (GARCIA, 2007) e representado pela Eq.(2.22)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad . \quad (2.26)$$

Na equação acima, o fator:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad , \quad (2.27)$$

é denominado difusividade térmica. Se fizermos

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \nabla^2 \quad , \quad (2.28)$$

que é denominado operador Laplaciano em coordenadas cartesianas a equação acima pode ser escrita como

$$\nabla^2 T + \frac{q_g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad . \quad (2.29)$$

Esta última forma de escrever a equação da condução de calor é preferível, pois embora ela tenha sido deduzida para o sistema cartesiano de coordenadas, a forma apresentada é mais geral, pois independe do sistema de coordenadas. Caso haja interesse em usar outros sistemas de coordenadas, basta substituir o Laplaciano na geometria do sistema de interesse.

No estudo de Termodinâmica, um conceito útil para quantificar certa quantidade de calor transferida a um sistema é o conceito de calor específico que pode ser definido como a quantidade de calor que deve ser transferida 1g de uma substância para que sua temperatura seja elevada em 1^oC. Conforme se sabe, essa quantidade de calor varia de substância para substância e, então o calor específico é um parâmetro que caracteriza uma dada substância.

Um outro conceito relevante é o da condutividade térmica que caracteriza a maior ou menor facilidade de condução do calor por parte dos materiais quando submetido a uma diferença de temperatura, podendo ser expresso em W/mK.

A densidade determinada por FRANCISCO SILVA (SILVA, 2008) que está sendo discutida neste trabalho é a volumétrica definida pela razão da massa pelo volume e geralmente é dada em kg/m³, a densidade indica o grau de compactação dos átomos dando origem a uma determinada massa e formando um volume.

2.9 LEI DE RESFRIAMENTO DE NEWTON

Quando a diferença de temperaturas entre um corpo e seu ambiente não é muito grande, o calor é transferido na unidade de tempo do meio para o corpo ou do corpo para o meio onde ele pode ser transmitido por condução, convecção e radiação e é proporcional à diferença de temperatura entre o corpo e os meios externos, isto é:

$$\frac{\delta Q}{dt} = -h.S(T - T_\alpha) \quad , \quad (2.30)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor e S é a área de secção transversal do corpo.

Na Eq. (2.30) o sinal negativo exprime o fato de que o calor flui de temperaturas mais altas para temperaturas mais baixas. Assim, se o gradiente de temperatura dT/dx é negativo, o fluxo térmico dQ/dt é positivo.

Se a temperatura do corpo é maior que a temperatura do meio ambiente T_α , o corpo perde calor de uma quantidade de calor δQ num intervalo de tempo compreendido entre t e $t+dt$, diminuindo sua temperatura T em dT .

$$\delta Q = m.c.dT \quad , \quad (2.31)$$

onde $m=\rho V$ é a massa do corpo, ρ é a densidade do corpo, V é o volume do corpo e c é calor específico.

A Eq. (2.30) nos permite relacioná-la com a Eq. (2.31) obtendo a variação da temperatura em função do tempo representado por

$$\rho V c \frac{dT}{dt} = -\beta.S(T - T_\alpha) \quad , \quad (2.32)$$

ou então

$$\frac{dT}{(T - T_\alpha)} = -k dt \quad , \quad (2.33)$$

sendo

$$k = \frac{\beta S}{\rho V c} \text{ ou } k = \frac{\beta S}{mc}. \quad (2.34)$$

Integrando a Eq. (2.33) com a condição em que no instante $t = 0$ a temperatura será T_0 , obtemos:

$$\int_{T_0}^T \frac{dT}{(T - T_\alpha)} = -k \int_0^t dt. \quad (2.35)$$

Resultando na Eq. (2.36)

$$\ln(T - T_\alpha) = -kt + \ln(T_0 - T_\alpha), \quad (2.36)$$

Agrupando a Eq (2.36) e exprimindo a temperatura em função do tempo, tem-se:

$$T = T_\alpha + (T_0 - T_\alpha)\exp(-kt). \quad (2.37)$$

Que representa a Lei de Resfriamento de Newton. Logo fica explicito que a curva de resfriamento ($T_x t$) é uma função exponencial decrescente elevada a $(-kt)$. Isto implica na possibilidade de utilizar técnicas para medição do calor específico de um corpo que dispensam o uso de calorímetro, partindo-se do pressuposto de que o sistema vai perder calor continuamente para o meio ambiente. Para utilizar-se destas técnicas é necessário conhecer “como” o sistema perde calor para o meio ambiente antes e após a imersão do corpo a ser investigado. (WILTON Pereira da Silva, JURGEN W. P., CLEIDE M. D. P. S. e SILVA, DIOGO D. P. S. e SILVA e CLEITON D. P. S. e SILVA, 2003).

Capítulo 3

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Para se atingir o objetivo proposto neste trabalho, inicialmente foi desenvolvido o projeto de construção e aferição de um dispositivo de solidificação unidirecional vertical ascendente apresentado como dissertação de mestrado por ADMIR RIBEIRO (RIBEIRO, 2007), no qual foram obtidas as ligas Al-2%Cu, Al-5%Cu e Al-8%Cu monitoradas termicamente nas posições 5mm, 10mm, 15mm, 30mm e 50mm em relação à chapa molde (ver Figura 3.1), obtendo-se assim as variáveis térmicas do processo de solidificação. As Figuras 3.2, 3.3 e 3.4 mostram detalhes do dispositivo e a Figura 3.5 mostra as macroestruturas das ligas produzidas. Vale ressaltar que o referido dispositivo foi projetado utilizando como referência sistemas similares já construídos, destacando-se, dentre eles, os do Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), utilizado pelo grupo de estudos em materiais por Garcia (GARCIA, 2007).

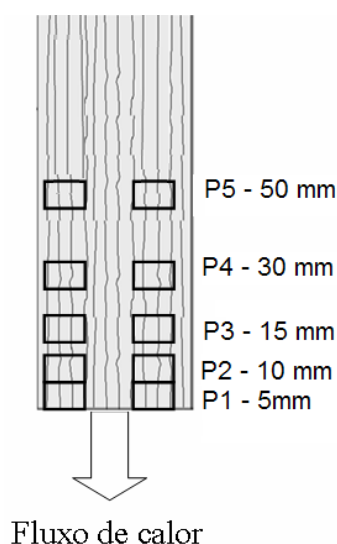


Figura 3.1 – Posições monitoradas em relação à chapa molde.

A Figura 3.2 mostra as fotos do dispositivo utilizado para a fabricação das ligas antes de seu funcionamento, destacando alguns elementos primordiais. Já a Figura 3.3 mostra uma foto do forno em seu pleno processo de trabalho.

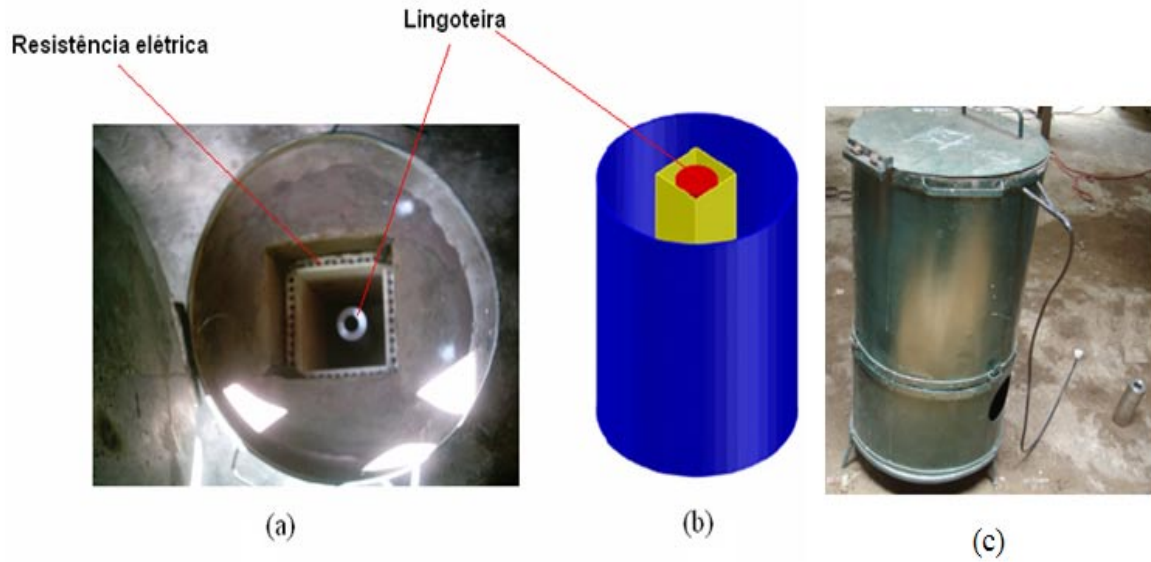


Figura 3.2 – Dispositivo de Solidificação Unidirecional Vertical Ascendente para Ligas Metálicas desenvolvido pelo GAPEMM.



Figura 3.3 – Mostra o dispositivo em funcionamento no GAPEMM (RIBEIRO,2007).

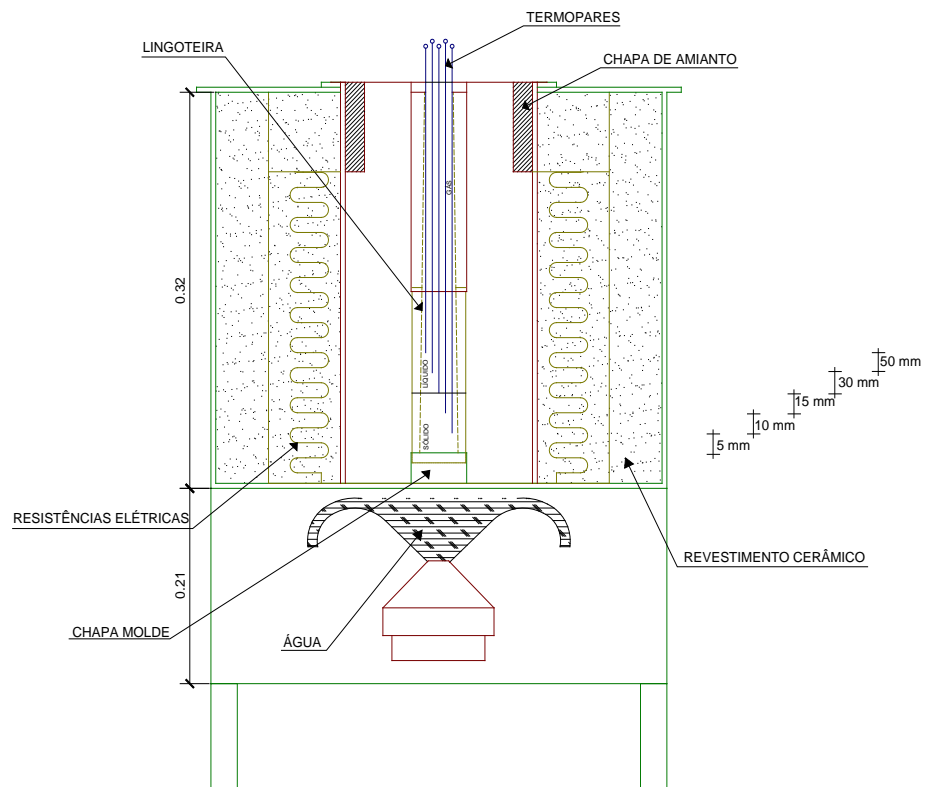


Figura 3.4 – Representação em corte do dispositivo de solidificação produzido pelo GAPEMM.
(RIBEIRO, 2007).

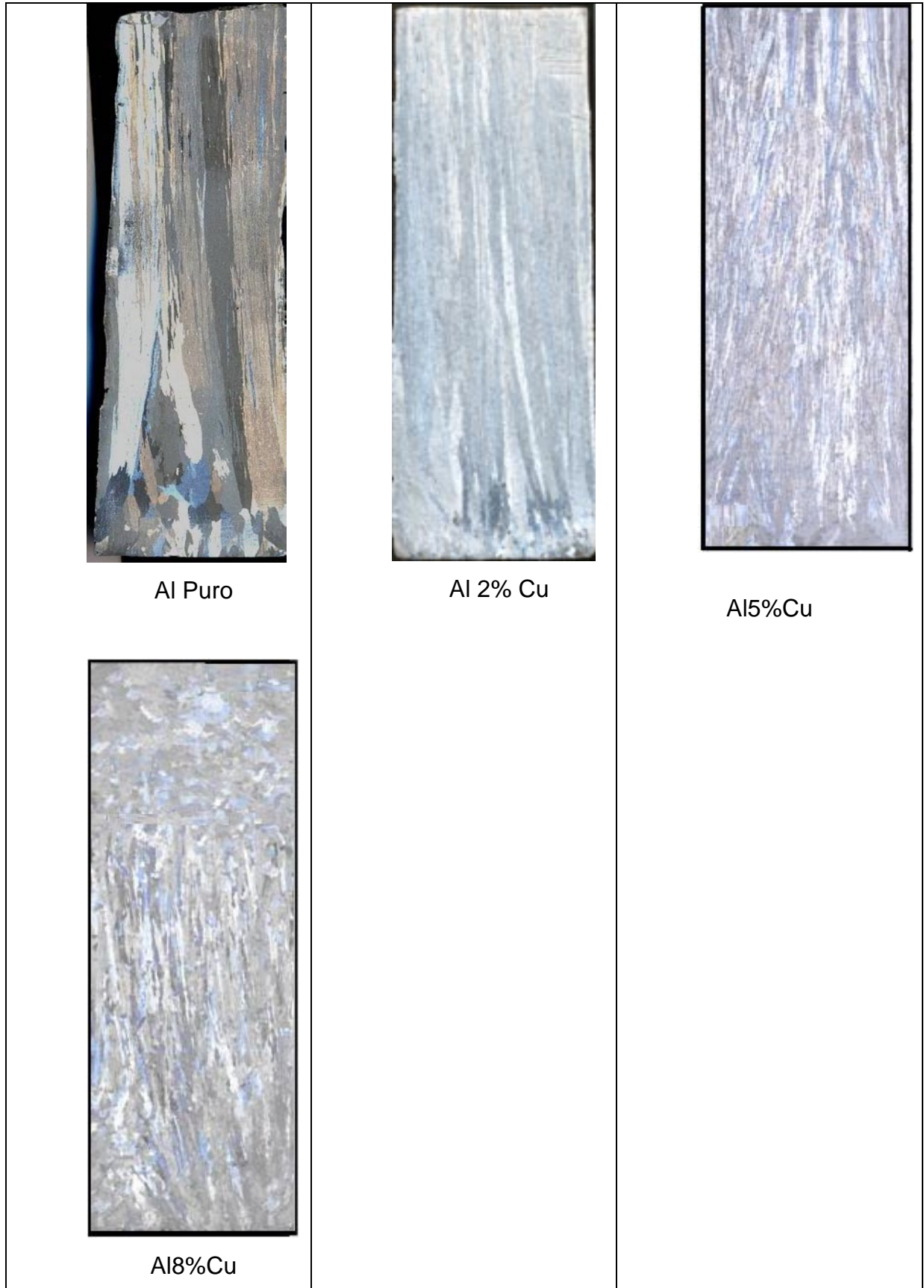


Figura 3.5 – Macroestruturas das ligas Al-2%Cu, Al-5%Cu e Al-8%Cu com chapa molde resfriada à água. (RIBEIRO, 2007; SANTOS 2007).

A partir do trabalho de Ribeiro (2007) iniciou-se uma linha de pesquisa objetivando-se a determinação experimental das propriedades termofísicas das ligas obtidas, devido sua importância para a caracterização de novos materiais.

O ponto inicial para esta realização foi a medida da difusividade térmica nas posições monitoradas termicamente, conforme dito anteriormente e sua correlação com as variáveis térmicas do processo (SANTOS, 2007), o qual se utilizou da técnica conhecida como espectroscopia fotopirelétrica. A mesma consiste em incidir luz sobre uma amostra, podendo esta ser completa ou parcialmente absorvida pelo material. Em qualquer uma das situações, o calor é produzido, gerando ondas térmicas que se propagam pela amostra. Estas ondas térmicas, diferentemente das outras técnicas, são detectadas diretamente por um sensor de calor (sensor pirelétrico) colocado em contato com a amostra, que as converte em tensão através do efeito pirelétrico (PEREIRA, 1999; COSTA, 1999; OLENKA, 2003; PITTOIS, VAN ROIE, GLORIEUX, e THOEN, 2004). A Figura 3.6 mostra a representação esquemática do aparato experimental utilizado por Santos.

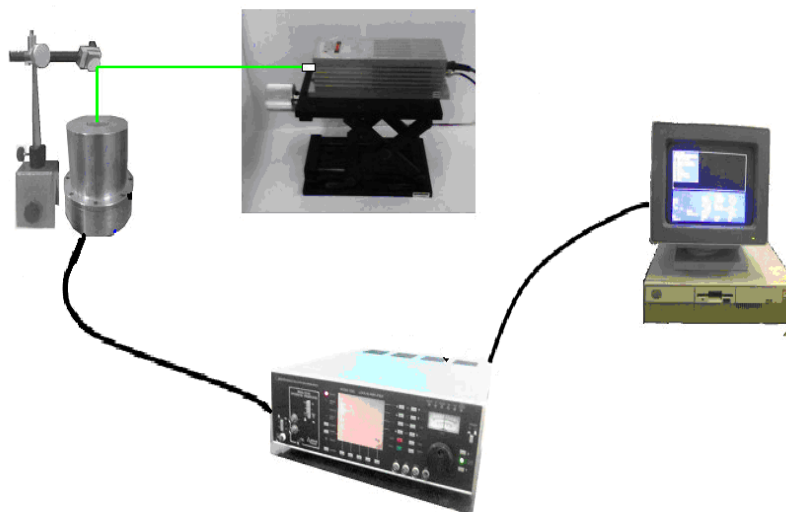


Figura 3.6 – Aparato experimental utilizado por Santos no laboratório de Física dos Materiais (SANTOS, 2007).

Posteriormente, referente às mesmas ligas e nas mesmas posições, foi realizado um trabalho que culminou com a determinação da densidade volumétrica e sua correlação com as variáveis térmicas (SILVA, 2008), utilizando para isso um

picnômetro cujo princípio de funcionamento baseia-se no método de deslocamento de líquidos e seguiram-se as seguintes etapas: Inicialmente, mediu-se a massa do picnômetro com água, a qual se chamou m_1 . Em seguida, fez o mesmo para a massa do picnômetro na mesma situação, porém, acrescida da massa da amostra a ser estudada, ambas colocadas no prato da balança, uma ao lado da outra. Essa massa foi chamada de m_2 . A terceira medida realizada foi da massa do picnômetro com a colocação da amostra em seu interior, medida esta que foi chamada de m_3 (RUSSEL, 1981; MAHAN, MYERS 2003; HAWKES, 2004; BACCAN, 2004; SILVA, 2008).

Estas medidas foram utilizadas para o cálculo da densidade relativa, conforme a Equação 3.1:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_3}, \quad (3.1)$$

onde, ρ = densidade relativa; m_1 = massa do picnômetro preenchido com água destilada; m_2 = massa do picnômetro preenchida com água destilada, acrescida da massa da amostra a ser estudada, ambas colocadas no prato da balança, uma ao lado da outra; m_3 = massa do picnômetro com a colocação da amostra em seu interior. A Figura 3.7 mostra um desenho de um picnômetro similar ao utilizado.

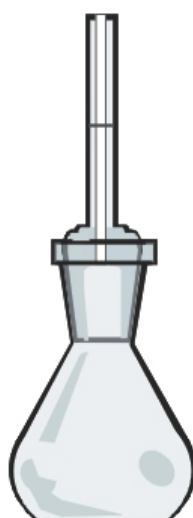


Figura 3.7 – Representação de um picnômetro similar ao utilizado por Silva (SILVA, 2008).

3.1.1 Procedimento metodológico para a determinação do calor específico

Nesta pesquisa foi obedecida uma seqüência de trabalhos dividida em embasamento teórico, realização dos experimentos e análise dos resultados.

- **Embasamento Teórico:** Nesta fase do trabalho foi realizado o levantamento bibliográfico, efetuando-se a pesquisa de material como, por exemplo, teses, livros, artigos técnicos e científicos, bem como outros textos cujos conteúdos auxiliaram em sua realização.

- **Realização dos Experimentos:** Esta atividade dividiu-se em duas etapas. A primeira etapa consistiu no preparo do material, e a segunda, onde foram efetuadas as medidas experimentais que possibilitaram o cálculo do calor específico do material. Os experimentos foram realizados no laboratório do grupo GAPEMM na Faculdade de Engenharia Mecânica.

As análises experimentais foram desenvolvidas como descrito anteriormente, nas ligas já mencionadas e nas mesmas posições utilizadas nos trabalhos de ADIMIR RIBEIRO (RIBEIRO, 2007), ELIO SANTOS (SANTOS, 2007) e FRANCISCO SILVA (SILVA, 2008), sendo que a análise dos resultados obtidos seguiu o planejamento que é mostrado na Figura 3.8.

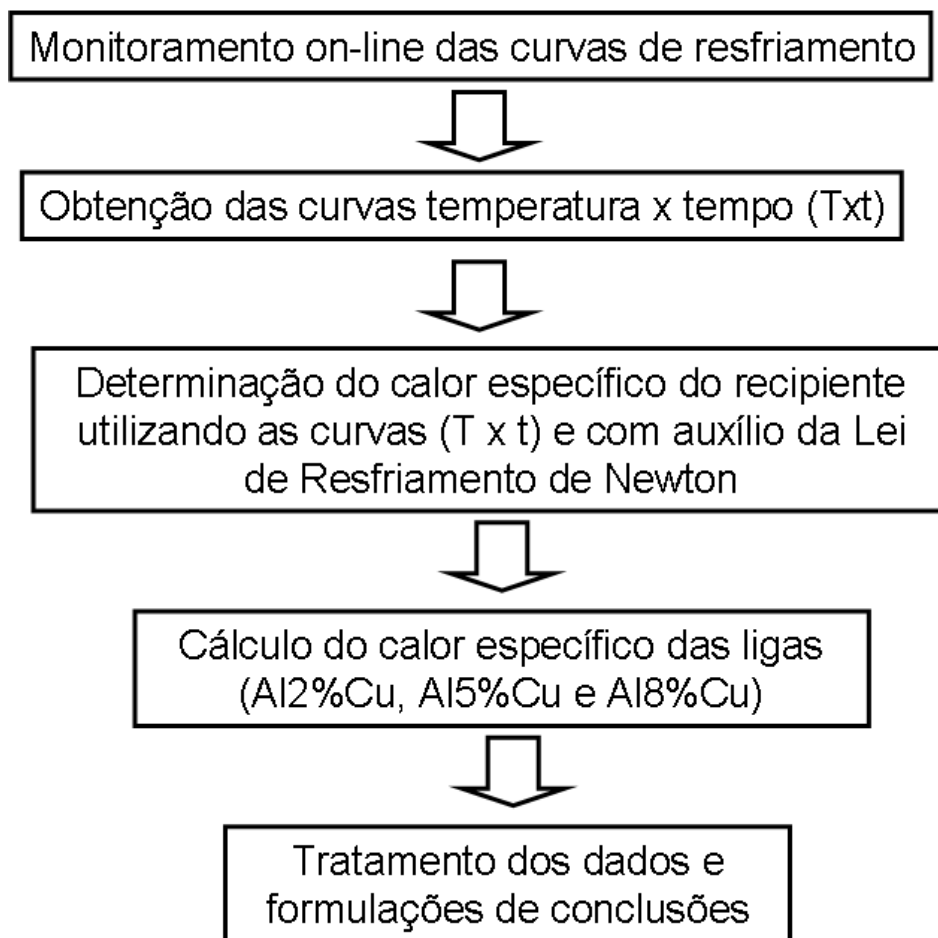


Figura 3.8 – Fluxograma descritivo do processo para obtenção do calor específico do recipiente e das ligas Al-Cu.

Foi confeccionado um recipiente cilíndrico utilizando-se um lingote de alumínio comercialmente puro cujas dimensões foram 1,25 mm de espessura e 30,25 mm de profundidade e um invólucro cúbico de vidro de 15 cm de aresta o qual teve como objetivo isolar o meio onde ocorreram as trocas de calor e através disto dificultar as trocas de calor com o meio ambiente (ver Figura 3.9).

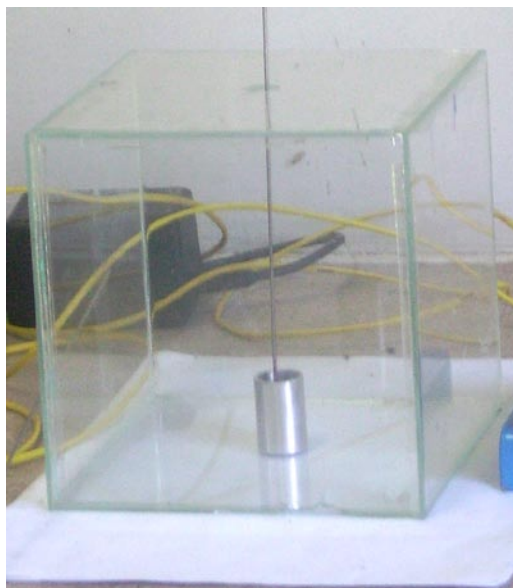


Figura 3.9 – Invólucro de vidro utilizado no experimento.

O ponto inicial da etapa experimental foi obter o calor específico do recipiente, pois a forma como se desejava determinar os calores específicos das ligas era função do mesmo. Para isto, foi retirada uma amostra de 6g do mesmo lingote do qual foi confeccionado, sendo esta inserida no referido recipiente, que contém uma determinada quantidade de água a uma dada temperatura. De posse desses dados aplicou-se o princípio das trocas de calor (EISBERG e LERNER, 1982; HALLYDAY, RESNICK e WALKER, 1996; PENTEADO, 1998; WELTNER, K. e MIRANDA, 1998) como descrito abaixo:

$$Q_{ag} + Q_{rec} + Q_{am} = 0 \quad , \quad (3.2)$$

onde Q_{ag} , Q_{rec} e Q_{am} , são as quantidades de calor da água, do recipiente e da amostra, respectivamente.

Substituindo os valores dos mesmos em (3.2), tem-se:

$$m_{am} \cdot c_{am} \cdot (T_{eq} - T_{0am}) + m_{ag} \cdot c_{ag} \cdot (T_{eq} - T_{0ag}) + m_{rec} \cdot c_{rec} \cdot (T_{eq} - T_{0ag}) = 0 \quad , \quad (3.3)$$

onde, m_{am} , m_{ag} e m_{rec} , são respectivamente as massas da amostra, da água inserida no recipiente e do recipiente, já c_{am} , c_{ag} e c_{rec} , são respectivamente os calores específicos da amostra, da água e do recipiente e por último T_{eq} , T_{0am} e T_{0ag} , são

respectivamente as temperaturas de equilíbrio térmico, inicial da amostra e inicial da água.

Como o material da amostra é o mesmo do recipiente visto que ambos são de alumínio comercialmente puro, podemos isolar o calor específico e obter a expressão a seguir:

$$c_{Al} = \frac{m_{ag} \cdot c_{ag} \cdot (T_{0ag} - T_{eq})}{m_{am} \cdot (T_{eq} - T_{0Al}) - m_{rec} \cdot (T_{0ag} - T_{eq})} \quad (3.4)$$

As massas foram obtidas pela medição direta através de uma balança eletrônica de precisão com três casas decimais (Ver Anexo B), já o calor específico da água foi admitido constante e igual a 1 cal/g°C para todo o processo de aquecimento e resfriamento.

Com relação às temperaturas utilizou-se um sistema de aquisição de dados para registro dos perfis térmicos, marca ALMEMO (Ver Anexo B), que apresenta uma configuração que permite a leitura e adquire de forma direta os dados de temperatura, através de cinco canais de entrada e dois de saída, fato que possibilita o monitoramento e controle da mesma.

O AMR-Software, marca ALMEMO Data-Control foi o software usado para o monitoramento, registro e armazenamento de todos os dados obtidos durante o experimento. A Figura 3.10 mostra uma tela do referido software a qual evidencia uma queda acentuada de temperatura, isto se deve ao momento em que a amostra é introduzida no interior do recipiente para trocar calor com o sistema (recipiente e água), e após entrar em equilíbrio térmico seu resfriamento é mais lento.

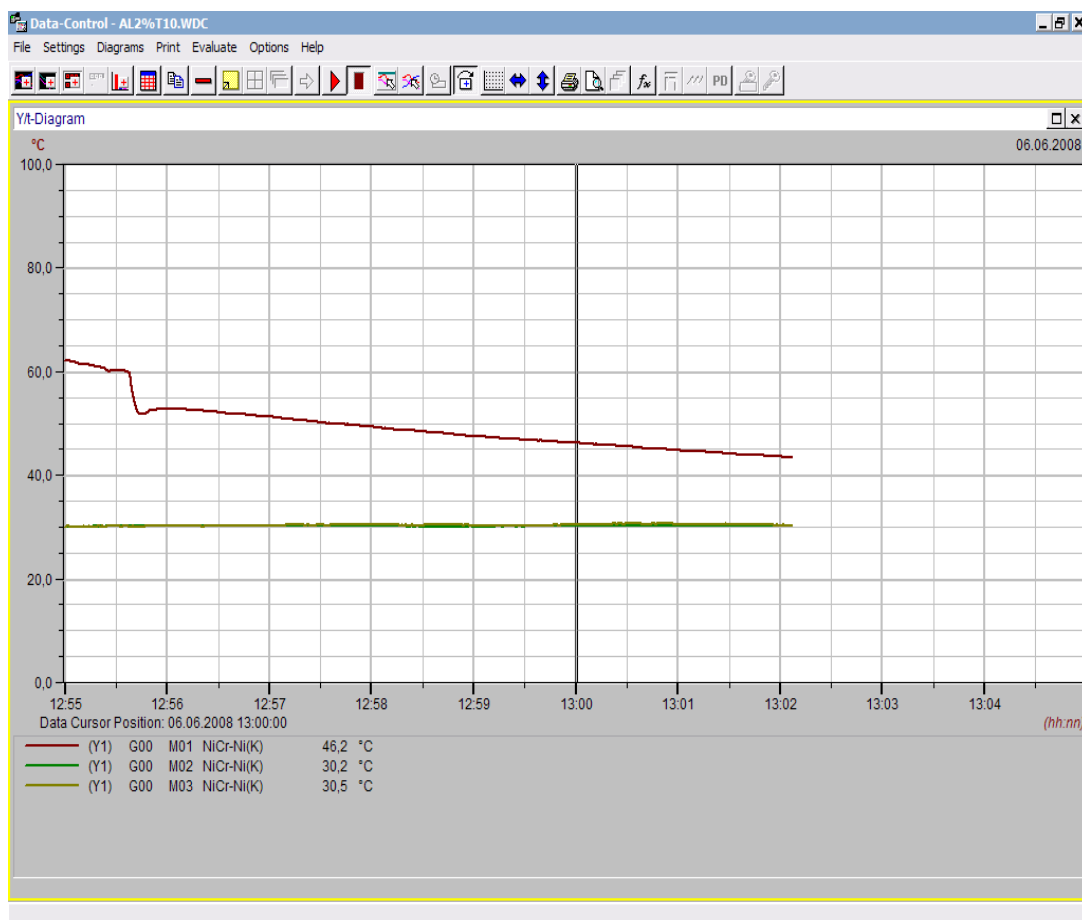


Figura 3.10 – Representação da curva Txt online.

Os termopares utilizados neste trabalho são tipo K (Ver Anexo B) os quais são classificados por letras pela I.S.A. (Instrument Society of America) e sua adoção como padrão americano dá-se através da norma ANSI C96 – 1994, possuem diâmetro da bainha de aço inoxidável de 1,5 mm com suas características sendo apresentadas na Tabela 3.1 e para obtermos sinais de temperaturas, estes foram conectados em um sistema aquisição de dados.

Tabela 3.1 – Propriedades dos termopares

Tipo	K
Material	Chromel (+) – Alumel(-)
Faixa de utilização	0,000 – 50, 990 mV / 0 – 1260 °C
Potência termoelétrica	4,04 mV / 100°C

A massa do recipiente foi obtida através da medida direta em uma balança eletrônica (Bioprecisa - JA3003N). Quanto à massa de água obteve-se a mesma conforme procedimento abaixo:

- Inicialmente colocou-se 4 ml de água destilada no interior do recipiente e levou-se a um forno mufla (Ver foto no Anexo B) para aquecer o sistema até por volta de 70°C. Atingida a temperatura, foi retirado e colocado novamente na balança onde permaneceu em torno de 5 segundos, sendo finalmente a massa de água calculada pela diferença entre a massa do recipiente com água e ele vazio.

Posteriormente, colocou-se o recipiente no interior de um envoltório de vidro objetivando minimizar as trocas de calor com o meio ambiente. Foram utilizados três termopares sendo, um dentro do recipiente com água monitorando a temperatura diretamente do sistema, outro fixo na parede externa de vidro para indicar a ocorrência de perda de calor para o ambiente e o último para registrar as temperaturas iniciais das amostras trabalhadas o qual também indicava a temperatura do meio além de servir de efeito comparativo com o segundo termopar.

Uma vez no interior do invólucro de vidro, o recipiente perde calor para o meio e quando atinge 60°C a amostra é introduzida no recipiente com água. A partir daí o novo sistema passa a trocar calor até que se estabeleça o equilíbrio térmico entre eles, sendo todo o processo monitorado on-line.

Com o auxílio das curvas de resfriamento on-line obtiveram-se os seguintes valores de temperatura:

- T_{0ag} e T_{0am} (temperatura inicial da água e do recipiente) determinadas no momento em que a amostra é inserida.
- T_{eq} (temperatura de equilíbrio térmico) esta obtida a partir do momento em que a curva passa a ter o mesmo comportamento que possuía antes da amostra ser inserida no recipiente (ver Figuras 3.11 e 3.12).
- T_{0Al} (temperatura inicial da amostra) esta monitorada por um dos canais de registro térmico fora do sistema de trocas de calor direta com o recipiente conforme pode ser observado nas Figuras 3.11 e 3.12.

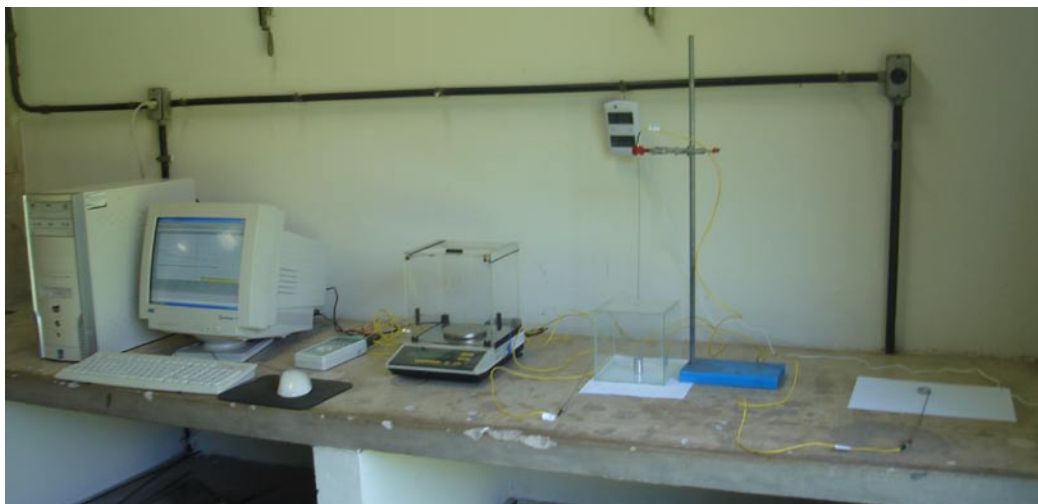


Figura 3.11 – Bancada experimental utilizada para obtenção das curvas de resfriamento

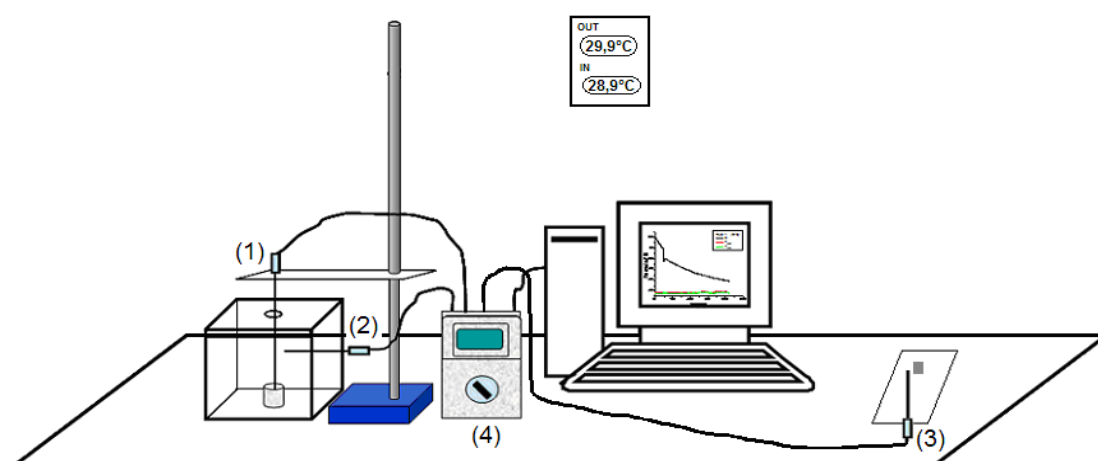


Figura 3.12 – Na representação esquemática da montagem experimental foram destacados os termopares (1), (2) e (3). Sendo (1) utilizado para medir as temperaturas: inicial da água, inicial do recipiente e de equilíbrio, em (2) registrava-se a ocorrência de calor para o meio externo, já em (3) além de monitorar a temperatura ambiente serviu para registrar a temperatura inicial da amostra. Sendo os dados de (1), (2) e (3) armazenado no ALMEMO (4) sistema de aquisição de dados.

As Figuras 3.13, 3.14 e 3.15 mostram um modelo de curvas de resfriamento obtidas na literatura para a determinação do calor específico do alumínio.

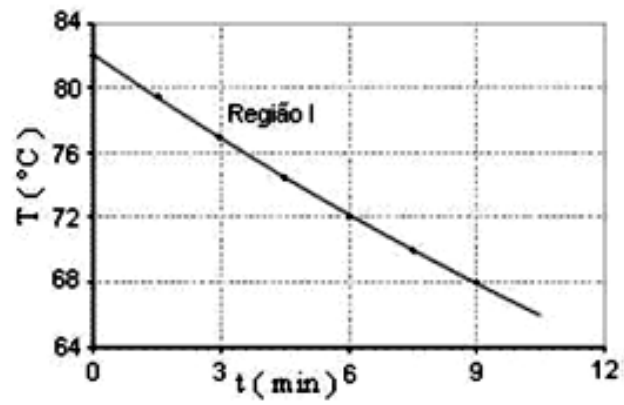


Figura 3.13 – Resfriamento da água obedecendo um decaimento exponencial (Wilton P. Silva, Jurgen W. Precker, Cleide M. D. P. S. e Silva, Diogo D. P. S. e Silva e Cleiton D. P. S. e Silva., 2003).

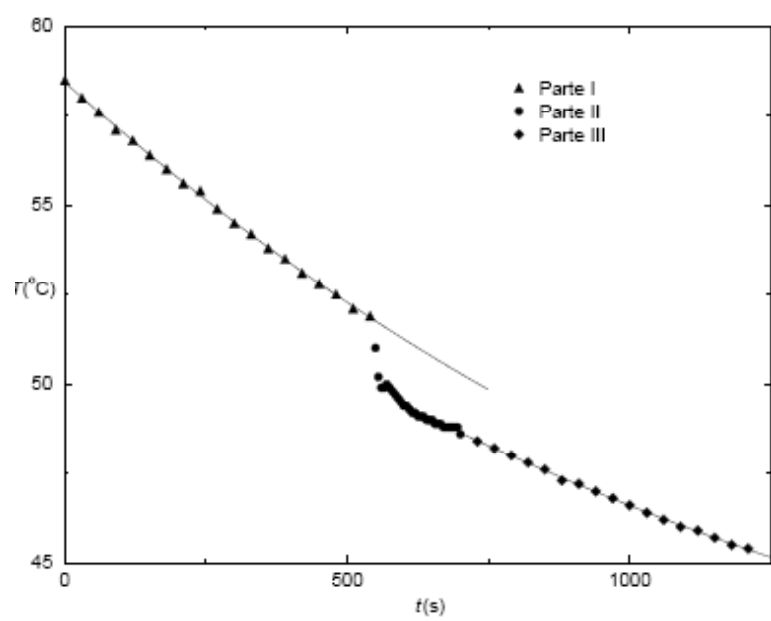


Figura 3.14 – Resfriamento com a introdução da amostra de alumínio (MATTOS e GASPAR, 2003)

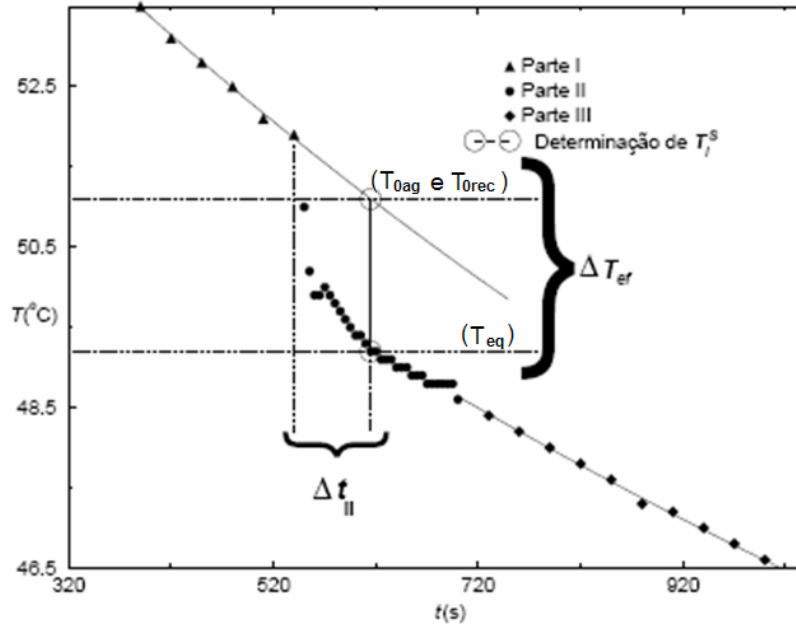


Figura.3.15 – Obtenção da temperatura inicial da água e temperatura de equilíbrio após a introdução da amostra (MATTOS e GASPAR, 2003).

Seguindo a mesma metodologia desenvolvida pelos autores citados nas Figuras 3.16, 3.17 e 3.18, obtiveram-se curvas de resfriamento sendo apresentadas apenas quatro (ver Figuras 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19) de um total 85 (sendo 10 para o recipiente e 75 para as ligas) adquiridas. As Figuras 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19 mostram as curvas obtidas para a determinação do calor específico do recipiente de alumínio e para as ligas.

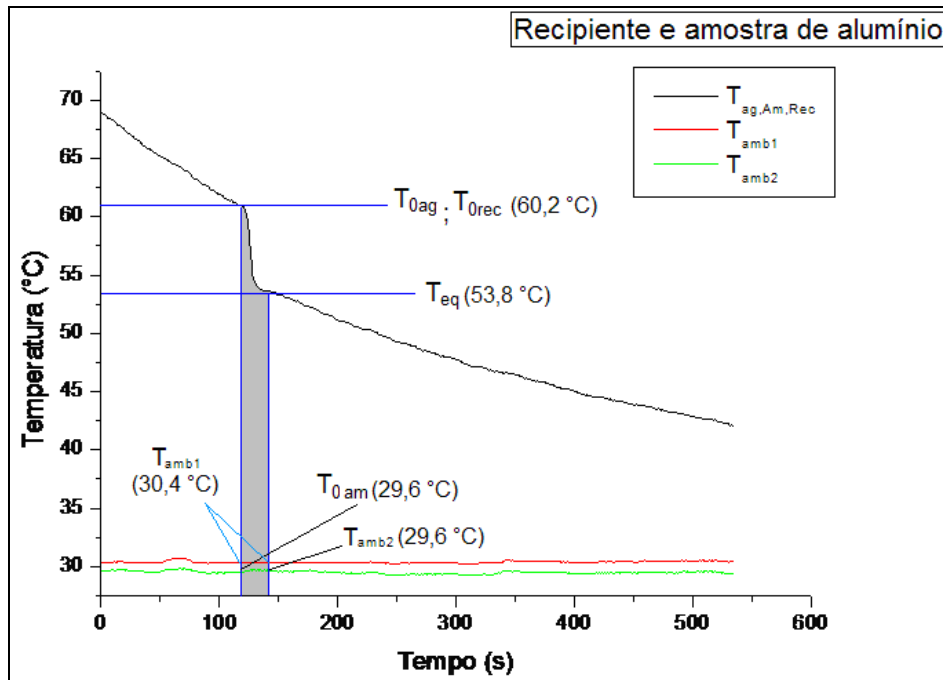


Figura 3.16 – Representação da curva temperatura x tempo monitorada on-line para obtenção do calor específico do recipiente.

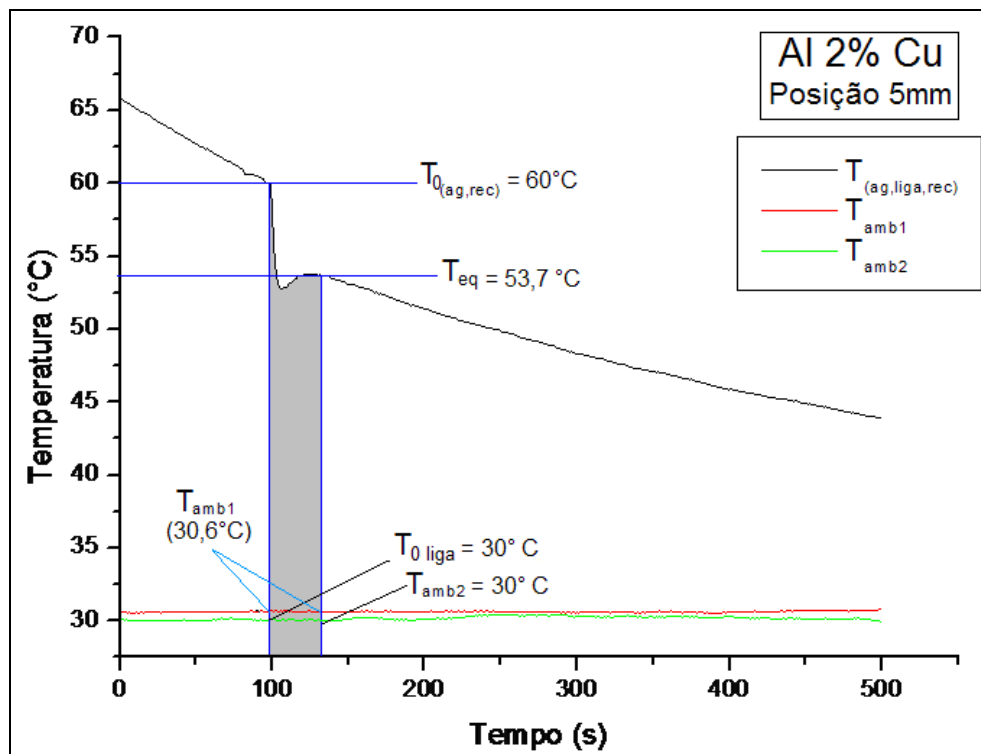


Figura 3.17 – Representação da curva temperatura x tempo monitorada on-line para obtenção do calor específico da liga Al-2%Cu.

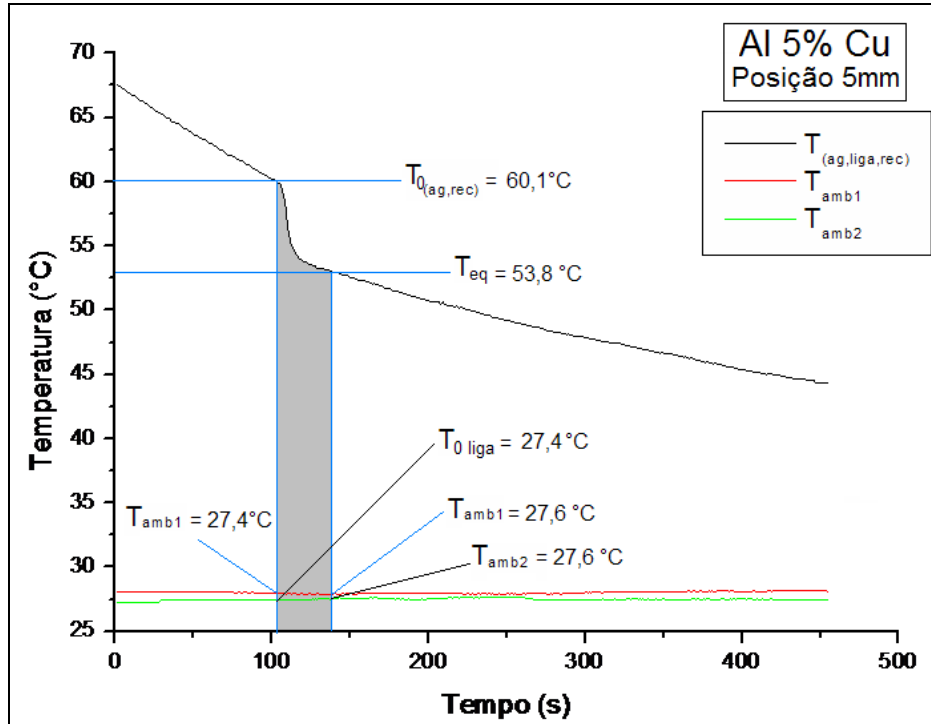


Figura 3.18 – Representação da curva temperatura x tempo monitorada on-line para obtenção do calor específico da liga Al-5%Cu.

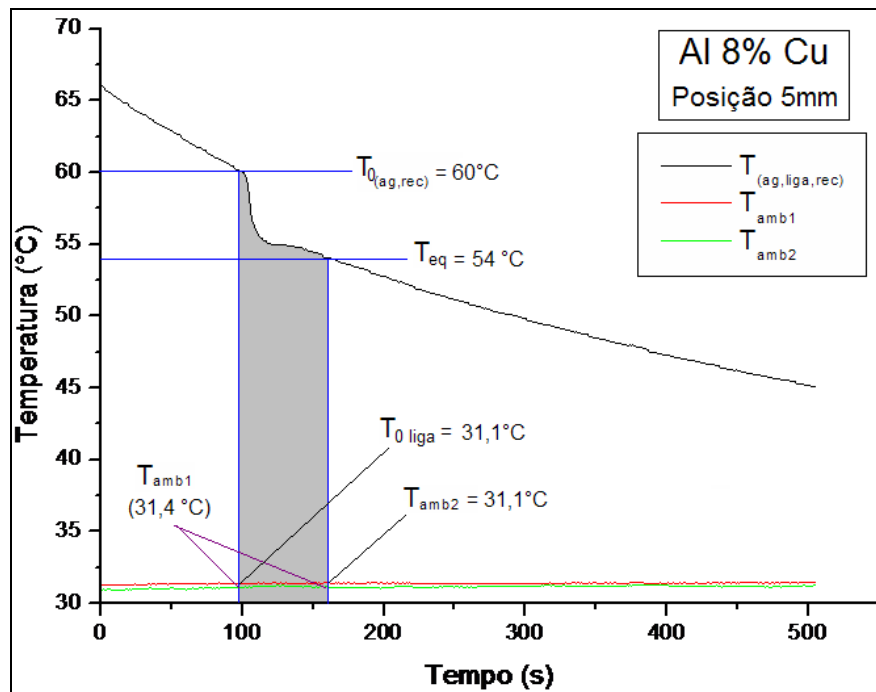


Figura 3.19 – Representação da curva temperatura x tempo monitorada on-line para obtenção do calor específico da liga Al-8%Cu.

Capítulo 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os procedimentos experimentais foram desenvolvidos como descrito anteriormente, para Al comercialmente puro (recipiente) e ligas Al-2%Cu, Al-5%Cu e Al-8%Cu, sendo que a análise dos resultados obtidos seguiu o planejamento mostrado a seguir:

- Realizou-se testes a 50°C, 60°C e 70°C para as temperaturas iniciais da água, em quais os melhores resultados conseguidos na curva de calibração foram para 60°C, uma vez admitido como melhor valor de temperatura. Repetiu-se cinco vezes todos os procedimentos para a obtenção do calor específico das ligas extraíndo-se assim os valores médios para esta grandeza. A Tabela 4.1 mostra os valores tomados para a determinação do calor específico do recipiente.

Tabela 4.1 – Valores das grandezas adotadas para obtenção do calor específico do recipiente.

m_{rec} (g)	m_{am} (g)	m_{ag} (g)	$T_{0\text{ag}}$ (°C)	$T_{0\text{liga}}$ (°C)	T_{eq} (°C)
8,476	6	3.694	60.3	30,4	54,7

Com base na tabela 4.1 e com auxílio da Eq.(3.4) obteve-se o valor para o calor específico do recipiente dado por:

$$c = 0,207 \text{ cal/g}^\circ\text{C} \quad . \quad (4.1)$$

O resultado expresso em (4.1) demonstra é o valor médio de dez medidas realizadas com o auxílio das curvas experimentais T_{xt} monitoradas on-line bem como pela Eq. (3.4). A Tabela 4.2 mostra o valor médio e os desvios calculados para o calor específico do recipiente, sendo este dado em cal/g°C.

Tabela 4.2 – Desvio das medidas obtidas para o calor específico do recipiente

Valor médio	0,207 cal/g°C
Desvio médio das leituras	±0,017
Desvio padrão das leituras	±0,012
Desvio padrão do valor médio	±0,00379

A mesma metodologia discutida anteriormente será utilizada agora para se determinar os calores específicos das ligas Al-xCu (sendo $x= 2\%$, 5% e 8%), a qual será demonstrada partindo novamente do princípio geral das trocas de calor levando em conta o calor específico do recipiente obtido pelo resultado dado em (4.1) onde

$$Q_{ag} + Q_{rec} + Q_{Liga} = 0 \quad , \quad (4.2)$$

onde Q_{Liga} é a quantidade de calor para as ligas em estudo. Substituindo as relações de Q , temos:

$$m_{Liga} \cdot c_{Liga} \cdot (T_{eq} - T_{0Liga}) + m_{ag} \cdot c_{ag} \cdot (T_{eq} - T_{0ag}) + m_{rec} \cdot c_{rec} \cdot (T_{eq} - T_{0ag}) = 0 \quad , \quad (4.3)$$

Com isso, podemos obter a equação para o calor específico das ligas utilizadas, através de:

$$c_{Liga} = \frac{m_{ag} \cdot c_{ag} \cdot (T_{0ag} - T_{eq}) + m_{rec} \cdot c_{rec} \cdot (T_{0ag} - T_{eq})}{m_{Liga} \cdot (T_{eq} - T_{0Liga})} \quad , \quad (4.4)$$

onde m_{Liga} , T_{0Liga} e c_{Liga} são respectivamente a massa, a temperatura inicial e o calor específico, todos referentes as ligas estudadas.

Durante o processo de fabricação das ligas, ou seja, obtenção dos lingotes, foram monitoradas termicamente cinco posições (5mm, 10mm, 15mm, 30mm e 50mm) em relação à chapa molde, ou seja, em relação a perda de calor para o ambiente dos quais foram retiradas as amostras das referidas posições objetivando o determinação do calor específico.

O valor médio do calor específico para cada liga é a média aritmética de cinco medidas (LIKACHEV, CRUZ e MESA, 2000) do mesmo em cada posição, obtendo assim um total de 75 medições. A Tabela 4.3 mostra os valores obtidos para os calores específicos em cada posição e composição estudada os quais foram obtidos por intermédio da equação (4.4).

Tabela 4.3 – Comparação dos calores específicos nas posições medidas bem como suas composições

	Al-2%Cu	Al-5%Cu	Al-8%Cu
Posição (mm)	c (cal/g°C)	c (cal/g°C)	c (cal/g°C)
5	0,265	0,262	0,257
10	0,267	0,263	0,259
15	0,270	0,265	0,260
30	0,280	0,268	0,263
50	0,291	0,271	0,268

Tabela 4.4 – Desvio das medidas para a liga Al-2%Cu.

Al2%Cu	Posição (5mm)	Posição (10mm)	Posição (15mm)	Posição (30mm)	Posição (50mm)
Valor médio	0,265 cal/g°C	0,267 cal/g°C	0,270 cal/g°C	0,280 cal/g°C	0,291 cal/g°C
Desvio médio	± 0,0012	± 0,0002	± 0,0018	± 0,008	± 0,0036
Desvio padrão das leituras	± 0,006	± 0,0015	± 0,0153	± 0,0222	± 0,0328
Desvio padrão do valor médio	± 0,0026	± 0,00045	± 0,0068	± 0,0099	± 0,0147

Tabela 4.5 – Desvio das medidas para a liga Al-5%Cu.

Al5%Cu	Posição (5mm)	Posição (10mm)	Posição (15mm)	Posição (30mm)	Posição (50mm)
Valor médio	0,262 cal/g°C	0,263 cal/g°C	0,265 cal/g°C	0,268 cal/g°C	0,271 cal/g°C
Desvio médio	± 0,0046	± 0,0026	± 0,0018	± 0,0018	± 0,004
Desvio padrão das leituras	± 0,0277	± 0,0111	± 0,0093	± 0,0078	± 0,0036
Desvio padrão do valor médio	± 0,0124	± 0,005	± 0,0041	± 0,0035	± 0,0016

Tabela 4.6 – Desvio das medidas para a liga Al-8%Cu.

Al8%Cu	Posição (5mm)	Posição (10mm)	Posição (15mm)	Posição (30mm)	Posição (50mm)
Valor médio	0,257 cal/g°C	0,259 cal/g°C	0,260 cal/g°C	0,263 cal/g°C	0,268 cal/g°C
Desvio médio	± 0,0002	± 0,0008	± 0,0026	± 0,0102	± 0,0052
Desvio padrão das leituras	± 0,0075	± 0,0018	± 0,0355	± 0,0118	± 0,0091
Desvio padrão do valor médio	± 0,0033	± 0,0008	± 0,0158	± 0,0053	± 0,0041

Para fins de comparação encontramos alguns valores de calores específicos na literatura referentes às ligas trabalhadas os quais são mostrados na Tabela 4.7 com o seu respectivo autor:

Tabela 4.7 – Calores específicos encontrados na literatura.

Al-2%Cu	c (J/kg.K)	c (cal/g°C)
(QUARESMA, SANTOS E GARCIA, 2000), (SANTOS, QUARESMA E GARCIA, 2001), (SIQUEIRA, 2002), (IVALDO, 2004) E (SOFTWARE GÊNESIS, 2006).	1121,20	0,2682
Al-5%Cu	c (J/kg.K)	c (cal/g°C)
(QUARESMA, 1999) E (ROCHA, 2003)	1090	0,2607
(SIQUEIRA, 2002)	1117,58	0,2673
(IVALDO, 2004) E (SOFTWARE GENESIS, 2006)	1114,8	0,2667
Al-8%Cu	c (J/kg.K)	c (cal/g°C)
(QUARESMA, 1999) E (ROCHA, 2003)	1087	0,26004
(QUARESMA, SANTOS E GARCIA, 2000); (SANTOS, QUARESMA E GARCIA, 2001); (SIQUEIRA, 2002), (IVALDO, 2004) E (SOFTWARE GÊNESIS, 2006).	1114,88	0,2667

De posse dos valores dos calores específicos descritos anteriormente na Tabela 4.3 foram traçados os gráficos conforme Figura 4.1 e 4.2.

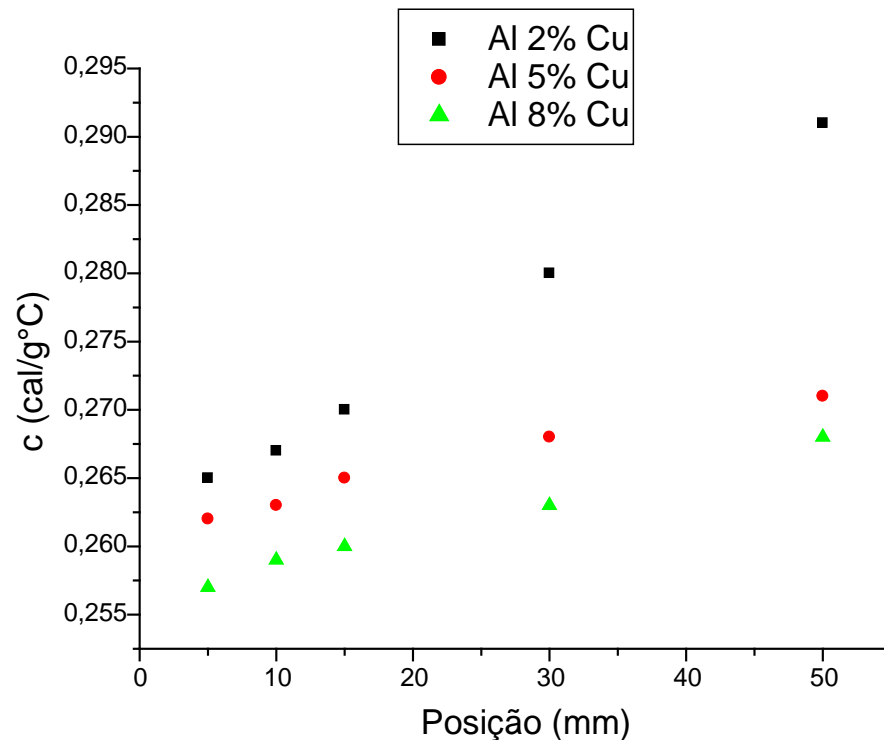


Figura 4.1 – Representação do calor específico em função da posição.

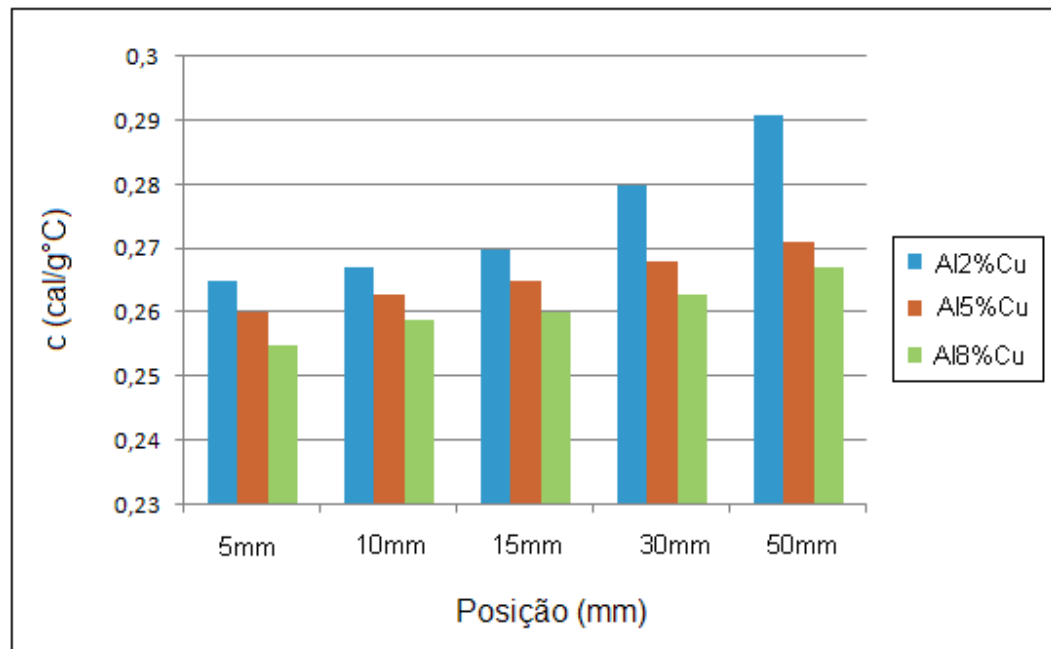


Figura 4.2 – Comparação do calor específico em função da posição e com teores de soluto.

Observa-se através dos gráficos mostrados nas Figuras 4.1 e 4.2 que o calor específico aumenta com o afastamento da chapa molde e diminui com o aumento do teor do soluto. Supõe-se que este comportamento se deve à influência do gradiente

térmico que apresenta valores maiores em posições mais próximas a base refrigerada visto que o mesmo se relaciona de maneira inversa com o calor específico.

4.1.1 Relação entre o calor específico e as variáveis térmicas do processo de solidificação

Uma primeira relação entre o calor específico e as variáveis térmicas do processo de solidificação (taxa de resfriamento, \dot{T} ; Gradiente de temperatura junto à isoterma líquidus, G_L , e a velocidade junto a isoterma líquidus, V_L) pode ser obtida partindo da equação de Fourier em regime transitório de calor e sem a produção interna de calor a qual é escrita conforme mostra a Eq. (4.5).

$$K \nabla^2 T = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (4.5)$$

em que K é a condutividade térmica do meio; $\nabla^2 T$, o laplaciano da temperatura; C , a capacidade calorífica; e ρ , a densidade do meio.

Sabendo-se que a capacidade calorífica é dada por

$$C = m.c. \quad (4.6)$$

Admitindo uma extração de calor unidirecional e substituindo a Eq.(4.6) na Eq. (4.5), tem-se:

$$k \frac{dT}{dx} = \rho mc \frac{dT}{dt}, \quad (4.7)$$

substituindo a Eq. (2.22) em (4.7), temos

$$k \frac{dT}{dx} = \rho mc \dot{T} \quad (4.8)$$

Isolando c , obtém-se:

$$c = \frac{k}{m\rho\dot{T}} \frac{dT}{dx} \quad (4.9)$$

A Eq. (4.9) representa uma equação diferencial para o calor específico, a qual ainda pode ser escrita da seguinte forma.

$$c = \frac{k}{m\rho G_L V_L} \frac{dT}{dx} \quad (4.10)$$

As relações que descrevem o calor específico com as variáveis térmicas do processo de solidificação, em regime transitório de calor, mostram-se inversamente proporcionais as mesmas.

Neste trabalho, faz-se uma correlação do comportamento do calor específico das ligas com as variáveis térmicas do processo de solidificação obtidas experimentalmente por (SANTOS, 2007) e (SILVA, 2008).

4.1.2 Relação gráfica entre o calor específico e a taxa de resfriamento

Com os valores das variáveis térmicas obtidas em trabalhos de SANTOS (2007) e SILVA (2008) para as mesmas ligas e posições em qual se obteve o calor específico fez-se então uma primeira relação gráfica deste com a taxa de resfriamento tendo como resultado os diagramas mostrados nas Figuras 4.3, 4.4, e 4.5.

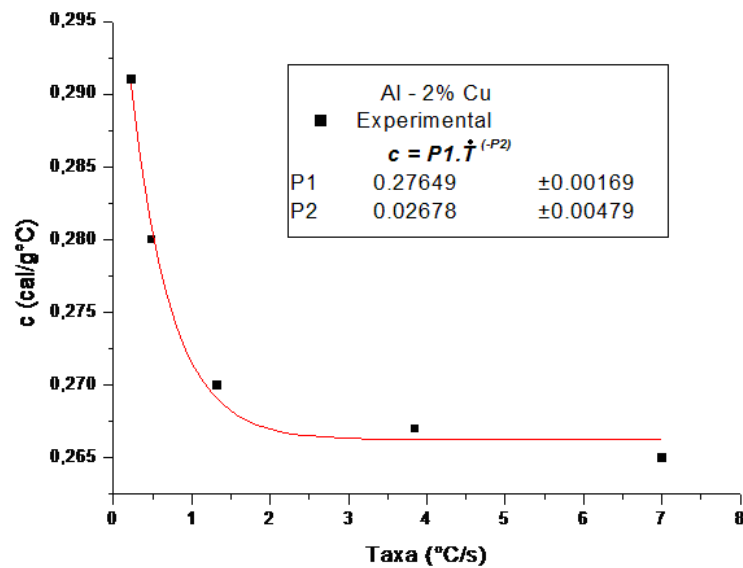


Figura 4.3 – Comportamento do calor específico em função da taxa de resfriamento para a liga Al-2%Cu.

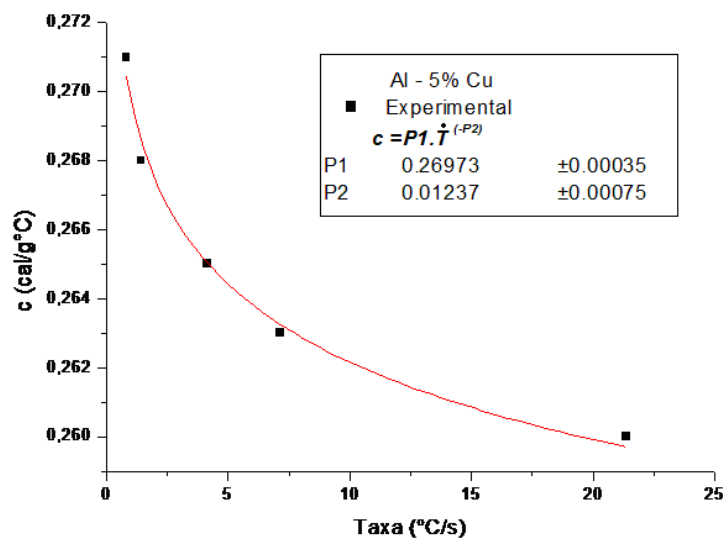


Figura 4.4 – Comportamento do calor específico em função da taxa de resfriamento para a liga Al-5%Cu.

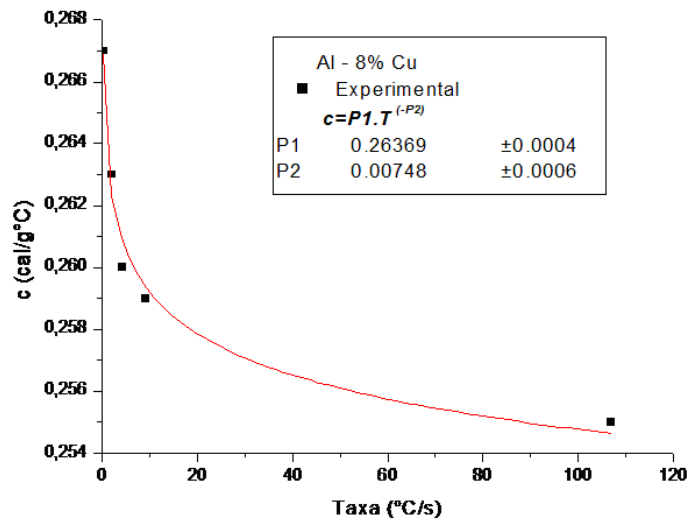


Figura 4.5 – Comportamento do calor específico em função da taxa de resfriamento para a liga Al-8%Cu.

4.1.3 Relação gráfica entre o calor específico e a velocidade da Isoterma líquidus

De posse dos valores das velocidades da isoterma liquidus obtidas conforme dito anteriormente fez-se então a relação deste com os calores específicos tendo como resultado os gráficos das Figuras 4.6, 4.7 e 4.8.

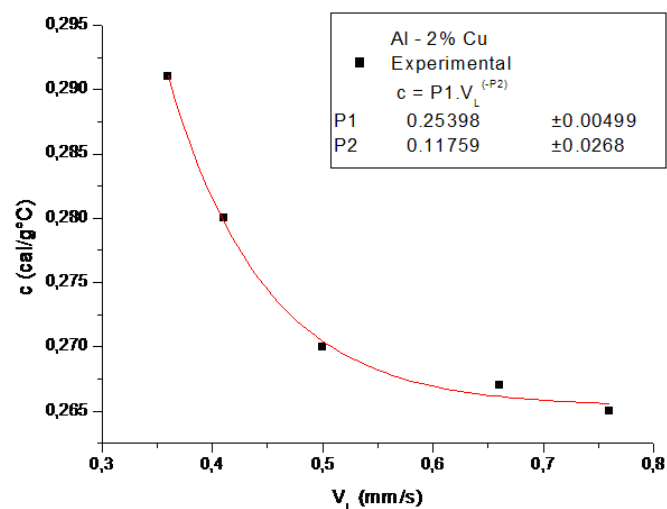


Figura 4.6 – Comportamento do calor específico em função da velocidade junto a isoterma líquidus para a liga Al-2%Cu.

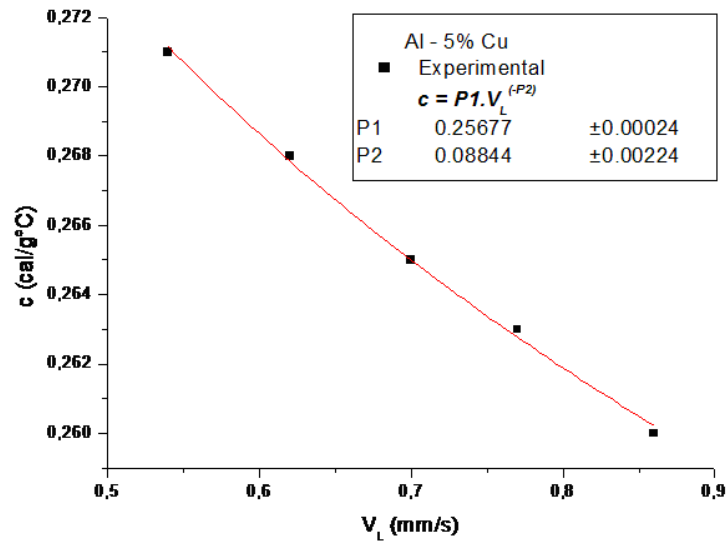


Figura 4.7 – Comportamento do calor específico em função da velocidade junto a isoterma liquidus para a liga Al-5%Cu.

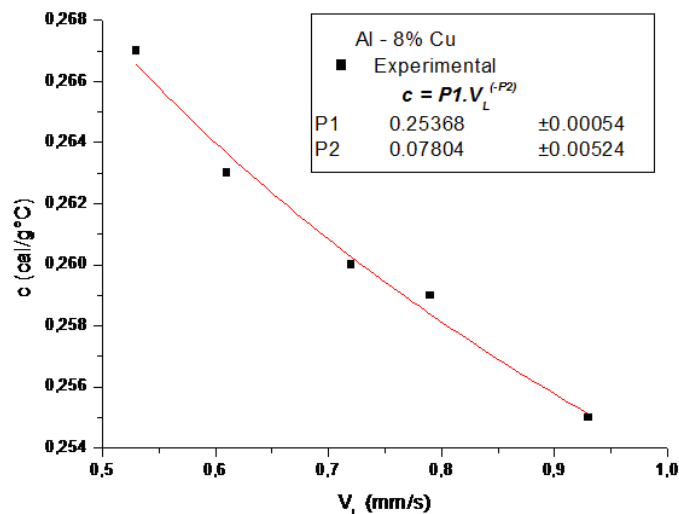


Figura 4.8 – Comportamento do calor específico em função da velocidade junto a isoterma liquidus para a liga Al-8%Cu.

4.1.4 Relação gráfica entre o calor específico e o gradiente de temperatura junto a isoterma líquidus

Com os valores dos gradientes junto à isoterma líquidus obtidas em trabalhos anteriores para as mesmas ligas e posições em quais foram realizadas as medidas de calor específico. De posse destes valores fez-se a relação entre as duas grandezas obtendo como resultado os gráficos das Figuras 4.9, 4.10 e 4.11.

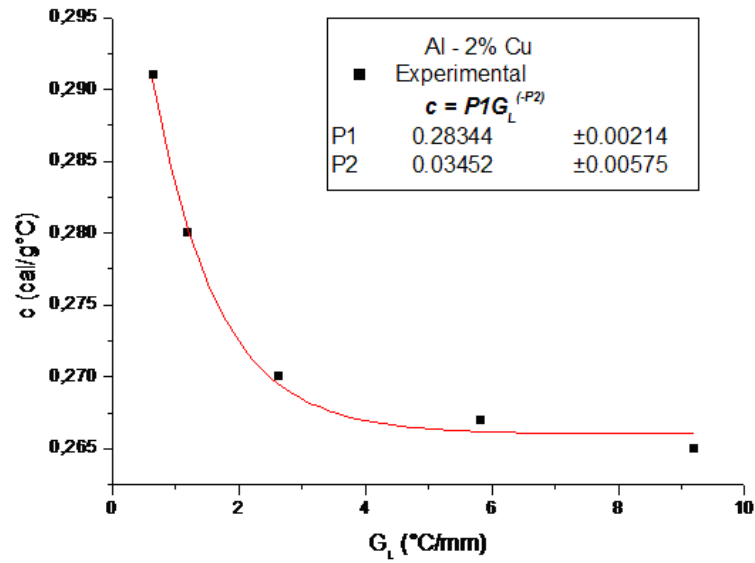


Figura 4.9 – Comportamento do calor específico em função do Gradiente de temperatura junto a isoterma liquidus para a liga Al-2%Cu.

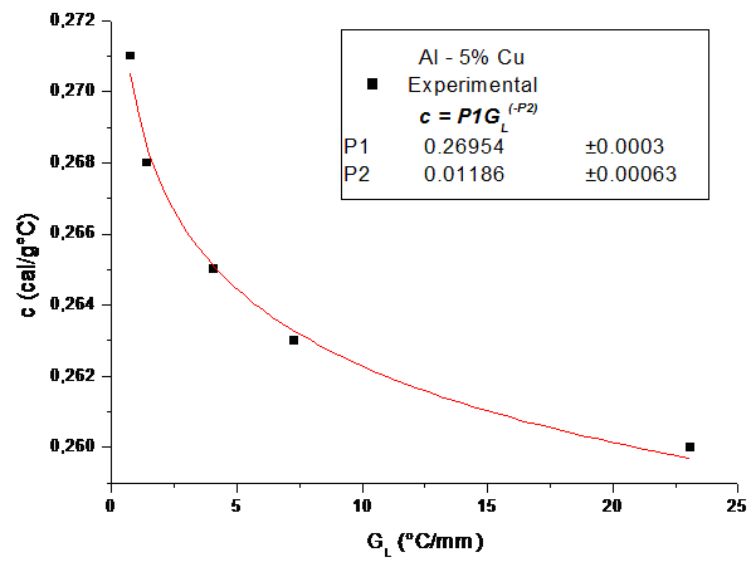


Figura 4.10 – Comportamento do calor específico em função do Gradiente de temperatura junto a isoterma liquidus para a liga Al-5%Cu.

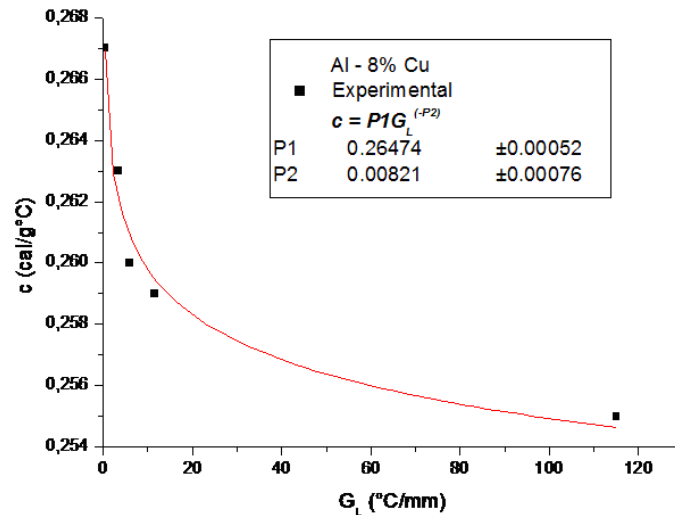


Figura 4.11 – Comportamento do calor específico em função do Gradiente de temperatura junto a isoterma liquidus para a liga Al-8%Cu.

As figuras descritas anteriormente mostraram uma tendência decrescente do calor específico em função das variáveis térmicas, concordando com o modelo analítico descrito em (4.9) e (4.10), mesmo que as curvas de tendência mostrem uma possível solução através das equações experimentais, porém as melhores concordâncias entre os resultados analíticos e experimentais dependem de ajustes convenientes da constante A1.

Em contrapartida, as Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 mostram os comportamentos dos calores específicos com o aumento do teor de soluto e em função as variáveis térmicas.

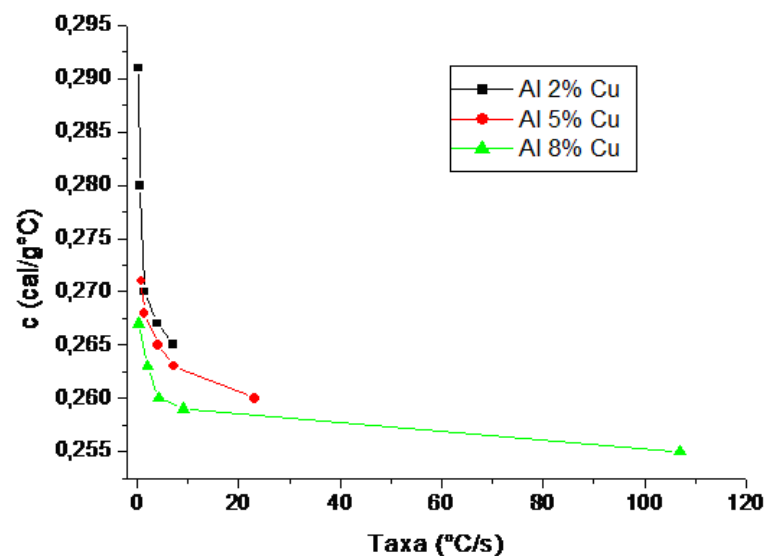


Figura 4.12 – Comparação dos comportamentos dos calores específicos em função de suas taxas de resfriamento para ligas Al-Cu.

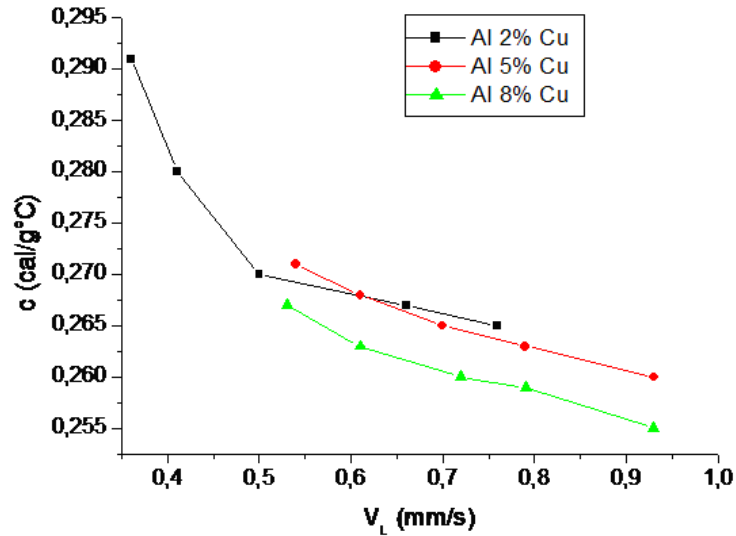


Figura 4.13 – Comparação dos comportamentos dos calores específicos em função de suas velocidades de suas isotermas liquidus para ligas Al-Cu.

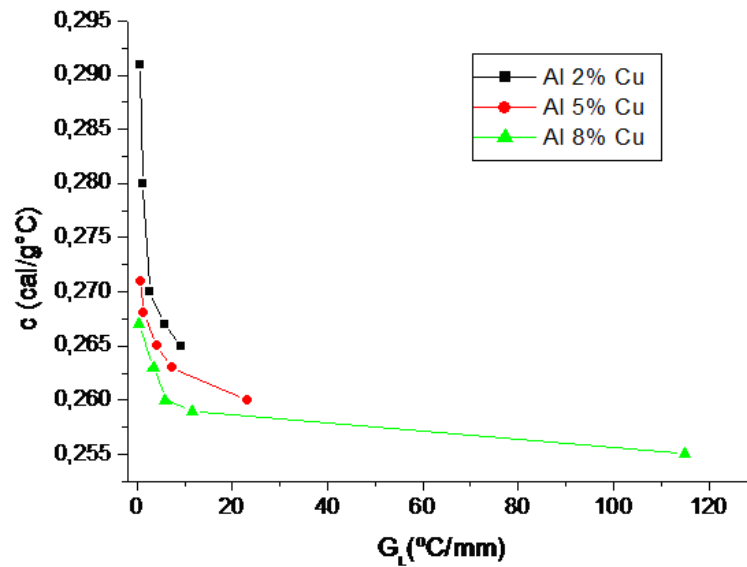


Figura 4.14 – Comparação dos comportamentos dos calores específicos em função de seus gradientes de suas isoterma liquidus para ligas Al-Cu.

Observando-se as Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 nota-se que o calor específico aumenta à medida que diminui os valores das variáveis térmicas e mantém o mesmo comportamento com o aumento do teor de soluto.

Capítulo 5

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

a) A utilização do princípio geral das trocas de calor com o auxílio das curvas experimentais monitoradas bem como a Lei de Resfriamento de Newton mostraram-se eficazes na determinação do calor específico tanto do recipiente como das ligas Al-Cu, esta técnica permitiu obter valores muito próximos dos referenciados na literatura, conforme mostra tabela 4.7, além minimizar a margem de desvios o que permite garantir um bom intervalo de confiança, como pode ser conferido nas tabelas 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6.

b) Observou-se através dos gráficos mostrados nas Figuras 4.1 e 4.2 que o calor específico aumenta com o afastamento da chapa molde. Baseado na Figura (4.14) supõem-se que este comportamento se deve à influência do gradiente térmico que apresenta valores maiores em posições mais próximas a base refrigerada o qual parece obedecer ao modelo analítico da equação 4.9.

c) Verifica-se uma diminuição do calor específico, com o aumento do teor de cobre. Isto supostamente ocorre porque à medida que se aumenta o teor de soluto maior a dificuldade de solubilidade. Pode-se observar que para liga Al-8%Cu obtém-se o menor valor de calor específico, visto que a mesma ultrapassou o limite de solubilidade que é de 5.65%.

d) Com base nos gráficos experimentais (4.12), (4.13) e (4.14) os quais compara os comportamentos dos calores específicos em função das variáveis térmicas para os três teores de ligas trabalhadas, podemos evidenciar uma diminuição do calor específico das mesmas com o aumento dos valores das variáveis térmicas, os quais implicam numa certa concordância com o modelo analítico descrito nas equações (4.9) e (4.10).

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no presente trabalho, sugerem-se as seguintes linhas de pesquisa a serem desenvolvidas em trabalhos futuros:

- a)** Determinação da condutividade térmica das ligas Al2%Cu, Al5%Cu e Al8%Cu, como complemento da caracterização do material solidificado no forno de solidificação unidirecional vertical ascendente.
- b)** Determinação do calor específico das ligas Al2%Cu, Al5%Cu e Al8%Cu solidificados em sistemas de solidificação vertical descendentes e horizontais, para comparações com os valores de calores específicos conseguidos neste trabalho.
- c)** Determinação do calor específico utilizando o mesmo dispositivo para ligas do sistema AlCu com teores de solutos diferentes dos estudados para efeito de comparação e sua correlação com as variáveis térmicas do processo.
- d)** Determinação do calor específico para outras ligas utilizando o mesmo procedimento empregado neste trabalho.

Capítulo 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, E. T.; COUTO, S. M.; QUEIROZ, D. M.; PEIXOTO, A. B.; Determinação de propriedades térmicas de grãos de milho, **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 3, p. 488-498, maio/junho, 2004.

ASM SPECIALTY HANDBOOK. **Aluminum and Aluminum Alloys**, v.4 ed. United States of America: ASM International, 1998.

BACCAN, N.; de Andrade, J.C.; GODINHO, O.E.S. e BARONE, J.S., **Química Analítica Quantitativa Elementar**, 3ª ed., 2a. reimpressão, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 2004, p.292.

BEJAN, A.: **Transferência de calor**. Trad. Euryle de Jesus Zerbini e Ricardo Santili Simões. São Paulo; Editora: Edgard Blücher Ltda, 1999.

CAMPOS FILHO, M. P. e DAVIES, G. J.: **A Solidificação e fundição de metais e suas ligas** – Rio de Janeiro: LTC; São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1978.

CAMPOS FILHO, M. P.: **A estrutura dos materiais**. 2ª. edição, Campinas, SP: Editora da Unicamp, 1991.

CHALMERS, B.; **Principles of Solidification**, New York: John Wiley & Sons, 1964.

COSTA, A. C. R.; Um Novo Método para Medir a Difusividade Térmica. **XXII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada**, São Lourenço, 1999. Resumos da Sociedade Brasileira de Física. São Paulo: Gráfica Paym, 1999, v. XXII, p. 309.

DAVIES, G. J.; **Solidification and casting**, London: Applied Science Publishers, 1973.

EISBERG, R. M. e LERNER, L. S., *Física Fundamentos e Aplicações*, Ed. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, SP, Vol. 2, 1ª Edição, 1982.

FLEMINGS, M. C.; **Solidification processing**, New York: McGraw-Hill, 1974

GARCIA, A. **Solificação: Fundamentos e Aplicações**, Campinas, São Paulo: Editora da Unicamp. 2ª ed., 2007.

GARCIA, A. **Influência das variáveis térmicas de solidificação na formação da macroestrutura e da microestrutura e correlação com propriedades decorrentes**. *Projeções*, v. 23, p. 13-32, jan./dez. 2005

HALLYDAY, D.; RESNICK, R. WALKER, R. Trad. José Paulo soares de Azevedo Jearl. **Fundamentos da Física** - vol. 2. Ed LTC editora. 6ª edição, 1996.

HAWKES, S. J., **The Concept of Density**, *J. Chem. Educ.*, 2004, 81: 14-15.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P.; **Fundamentals of heat and mass transfer**. New York: John Wiley & Sons, 1996.

IVALDO, L. F.; Carlos, A. S.; Vaughan, R. V. **Analytical Numerical, and Experimental Analysis of Inverse Macrosegregation during Upward Unidirectional Solidification of Al-Cu Alloys**. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v.35B, pp. 285-297, 2004.

KURZ, W.; FISHER, D. J.; **Fundamentals of solidification**, Switzerland: TransTech Publications, 1992.

LIKNAMEV, V.P.; CRUZ, M.T.F. da; MESA, J. **Quantas Medidas são Necessárias para o Conhecimento de Uma Grandeza Física?**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol. 22, nº 4, Dezembro, 2000.

MAHAN, B. M.; MYERS, R. J.; **Química: Um Curso Universitário**. Edgard Blücher LTDA, 2003.

MATTOS, C. GASPAR, A. **Uma Medida de Calor Específico Sem Calorímetro.** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 25, no. 1, Março, 2003.

MATTOS, C. R. e GASPAR, A., **Introducing specific heat through cooling curves**, *Phys. Teach.*, **40(7)**, 415. 2002.

METALS HANDBOOK; **Alloy phase diagrams**, v. 3. ed. United States of America: ASM International 1992, p. 238.

NUSSENZVEIG, M. H.: **Um curso de Física Básica** -vol. 2. São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1981.

OHNO, A.; **The solidification of metals**, Tokyo, Japan: Chijin Shokan Co. Ltd, 1976.

OLENKA, L. **Utilização de Técnicas Fototérmicas na Determinação de Propriedades Ópticas e Térmicas de Polímeros Impregnados.** Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Maringá, 2003.

PEREIRA, J. R.; **Detecção fotopirelétrica em materiais líquidos e pastosos.** 1999. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

PENTEADO, P. C. M.: **Física, Conceitos e aplicações** – vol 2. – São Paulo. Ed. Moderna, 1998. 1ª edição.

PITTOIS, S., VAN ROIE, B., GLORIEUX, C. and THOEN, J. **Thermal conductivity, thermal effusivity, and specific heat capacity near the lower critical point of the binary liquid mixture n-butoxyethanol–water.** *Journal of Chemical Physics*, vol. 121, nº 4, 2004.

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

RIBEIRO, A. N. L.; **Projeto, construção e aferição de um forno de solidificação unidirecional vertical ascendente.** 2007. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará.

ROCHA, O. L.; Siqueira, C. A.; Garcia, A. **Theoretical-Experimental Analysis of Cellular and Primary Dendritic Spacings during Unidirectional Solidification of Sn-Pb Alloys.** Materials Research, v. 5, pp 391 – 397, 2002.

ROCHA, O. L.; Siqueira, C. A.; Garcia, A. **Cellular/dendritic transition during unsteady-state unidirectional solidification of Sn-Pb alloys.** Materials Science and Engineering A, v. 347, pp 59 – 69, 2003.

ROCHA, O. L.; Siqueira, C. A.; Garcia, A. **Heat Flow Parameter Affecting Dendrite Spacings during Unsteady-State Solidification of Sn-Pb and Al-Cu Alloys.** Metallurgical and Materials Transactions A, v.34 A, pp. 995-1006, 2003.

ROCHA, O. F. L.; **Análise Teórico-Experimental da Transição Celular/Dendrítica e da Evolução da Morfologia Dendrítica na Solidificação Unidirecional em Condições de Fluxo de Calor Transitório.** 2003. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

RUSSEL, J. B., **Química Geral**, Editora McGraw-Hill, São Paulo, 1981, pp.193-194.

SÁ, E. S. DE (Org). **Manual de normalização:** trabalhos técnicos, científicos e culturais. 4. ed. Petrópolis: Vozes, 1998.

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

SÁ, F. A.; **Influência das variáveis de solidificação transitória no surgimento e evolução dos espaçamentos dendríticos terciários,** 2004. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

SANTOS, C. A.; Quaresma, J. M. V.; Garcia, A. **Determination of transient interfacial heat transfer coefficients in chill mold casting.** Journal of Alloys and Compounds, v. 319, pp 174-186, 2001.

SANTOS, E. R. **Estudo das variáveis térmicas na solidificação e difusividade de alumínio e ligas Al-Cu,** 2007. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

SANTOS, C. A.; QUARESMA, J. M. V.; GARCIA, A.; **Journal of Alloys and Compounds,** v. 319, p. 174, 2001.

SILVA, Wilton Pereira da; PRECKER, Jurgen W.; SILVA, Cleide M. D. P, SILVA, Diogo D. P. S.; SILVA, Cleiton D. P. S. **Medida de Calor Específico e Lei de Resfriamento de Newton: Um Refinamento na Análise dos Dados Experimentais.** Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol. 25, nº 4, Dezembro, 2003.

SILVA, F. X. L.; **Estudo de Variáveis Térmicas e Densidade do Alumínio Comercialmente Puro e Ligas de Al-Cu Obtidos por Solidificação Direcional.** 2008. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará.

SIQUEIRA, C. A.; Cheung Noé; Garcia, A. **Solidification Thermal Parameters Affecting the Columnar-to-Equiaxed Transition.** Metallurgical and Materials Transactions A, v.33 A, pp. 2107-2118, 2002.

SIQUEIRA FILHO, C. A. **Influência de Parâmetros Térmicos de Solidificação na Transição Colunar/ Equiaxial.** Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, 2002.

SMITH, W. F.; **Princípios de ciência e engenharia de materiais.** Portugal: Mcgraw-Hill, 1998.

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.

TIPLER, P. e WELLYN, L.: **Física Moderna.** Trad. Ronaldo Sérgio de Biasi, Rio de Janeiro; ed. LTC, 2001. 3ª edição.

TIPLER, P. **Física.** vol 2. Trad. Horácio Macedo, Rio de Janeiro;. ed. LTC, 1995. 3ª edição.

VAN VLACK, Lawrence Hall: **Princípios de ciências dos materiais.** Trad. Luiz Paulo Camargo Ferrão; editora Edgard Blücher Ltda, 1970.

WELTNER, K. e MIRANDA, P., **O Caldeirão como Calorímetro em Classe,** *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **20** (3), 1998.

ZIV, I.; WEINBERG, F.; **Metallurgical Transactions**, v. 20B, p. 731, 1989.

ANEXO A

A.1. Desvio de medidas e desvio padrão das leituras experimentais

A.1.1 Desvio de medidas e desvio padrão das leituras experimentais

O desvio de medidas é representado por δV_i o qual é definido pela diferença entre o valor de cada medida obtida experimentalmente e de forma independente simbolizado por V_i e o seu valor médio das medidas que é representado por \bar{V} .

$$\delta V_i = V_i - \bar{V} \quad \text{A.1}$$

A. 1.2 Desvio médio das medidas experimentais

Como não conhecemos o valor verdadeiro da grandeza, podemos executar várias medidas independentes dessa grandeza e calcular o valor médio \bar{V} das leituras, tomando esse valor como o melhor valor para a grandeza. Como o valor médio é somente o melhor valor estimado, e não o verdadeiro, devemos expressar o resultado final da medida através de um intervalo de confiança centrado em \bar{V} . Com tal objetivo, podemos, de início tentar calcular o valor médio $\overline{\delta V}$ e, através dele, definir a amplitude do intervalo de confiança da medida. Como temos N desvios individuais, o desvio médio deve ser dado por:

$$\overline{\delta V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta V_i \quad \text{A.2}$$

A.1.3 Desvio padrão das leituras experimentais

O desvio padrão das leituras é definido por:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\delta V_i)^2} \quad \text{A.3}$$

O intervalo de confiança em torno de V_i é representado por:

$$(\bar{V} - \sigma_v) \leq V_i \leq (\bar{V} + \sigma_v) \quad \text{A.4}$$

Ou

$$V_i = (\bar{V} \pm \sigma_v) . \quad \text{A.5}$$

Leitura V_i qualquer: intervalo de confiança dado pelo desvio padrão das leituras

A.1.4. Desvio padrão do valor médio

O desvio padrão do valor médio é definido pela relação abaixo:

$$\sigma_{V_m} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (\delta V_i)^2} \quad \text{A.6}$$

ANEXO B

B.1 Fotos dos equipamento utilizados

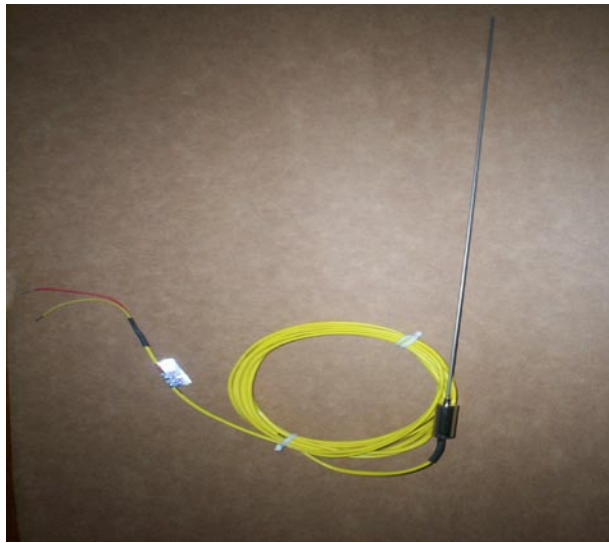
B.1.1 Balança eletrônica



B.1.2 Sistema de aquisição de dados - ALMEMO



B.1.3 Termopar tipo K



B.1.4 Forno Mufla

