

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Análise da Solidificação Sob Fluxo de Calor
Radial Cilíndrico**

Autor: **Marco Antonio Eid**

Orientador: Prof. Dr. Rezende Gomes dos Santos

16/2007

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Análise da Solidificação Sob Fluxo de Calor Radial Cilíndrico

Autor: **Marco Antonio Eid**

Orientador: Rezende Gomes dos Santos

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2007
Brasil - SP

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Ei26a Eid, Marco Antonio
 Análise da solidificação sob fluxo de calor radial
 cilíndrico / Marco Antonio Eid. --Campinas, SP: [s.n.],
 2007.

 Orientador: Rezende Gomes dos Santos
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

 1. Solidificação. 2. Calor – Condução. 3. Calor –
 Transmissão. 4. Alumínio - Metalurgia. 5. Ligas de
 alumínio - cobre. 6. Ligas de alumínio. I. Santos,
 Rezende Gomes dos. II. Universidade Estadual de
 Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
 Título.

Título em Inglês: Analysis of the solidification under radial heat flow

Palavras-chave em Inglês: Solidification, Radial heat flow, Heat transfer coefficient,
Aluminum alloy

Área de concentração: Matérias e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Rubens Caram Junior, João Batista Fogagnolo

Data da defesa: 22/02/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

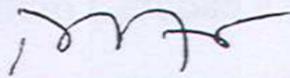
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Análise da Solidificação Sob Fluxo de Calor Radial Cilíndrico

Autor: Marco Antonio Eid

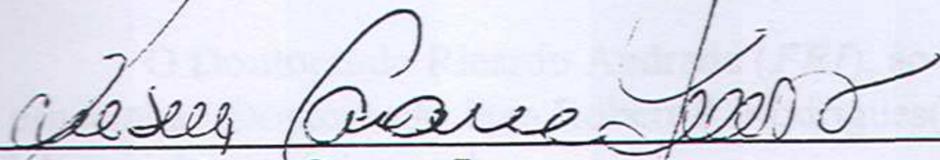
Orientador: Prof. Dr. Rezende Gomes dos Santos

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



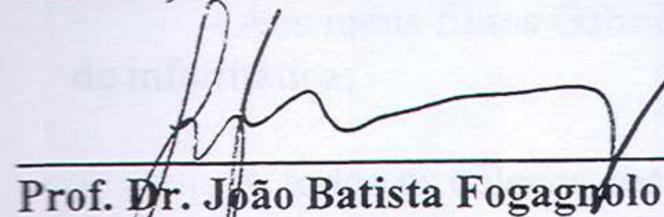
Prof. Dr. Rezende Gomes dos Santos, Presidente.

Instituição: Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof. Dr. Rubens Caram Jr.

Instituição: Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof. Dr. João Batista Fogagnolo

Instituição: Universidade São Francisco

Campinas, 22 de fevereiro de 2007

Agradecimentos

O autor manifesta os agradecimentos às seguintes pessoas pela colaboração na execução deste trabalho:

- Ao Prof.Dr.Rezende Gomes dos Santos pela oportunidade, apoio e orientação,
- Ao Mestre Jorge Kolososki (*Faculdade de Engenharia Industrial FEI*) pelo incentivo, indicações e amizade;
- A Prof.^a Dr.^a Miriam Melo (*Faculdade São Francisco*) pela sua colaboração fundamental na realização deste trabalho;
- Aos técnicos e funcionários da Unicamp, entre eles, Ana Carolina Capellini, Claudinete Leal , Emílio Cardoso e José Daniel;
- Aos colegas do grupo de pesquisa em solidificação da FEM, sob orientação do Prof. Dr.Rezende:

O Doutorando Ricardo Andrade (*FEI*), ao Mestre Tonnyfran Souza (*UEMA*), e em especial ao Doutorando Jean Robert P. Rodrigues(*UEMA*), pelas colaborações nos ensaios em laboratório e pela amizade,
- Aos meus filhos Gabriel Sarmiento Eid e Vitor Sarmiento Eid, meus técnicos particulares de informática;
- A todos os colegas dos vários cursos, e em especial ao amigo Mestrando Luis Fernando Torres(*Faculdade São Francisco*).

O autor agradece também a instituição *UNICAMP*, um dos orgulhos do povo Paulista e a *Faculdade de Engenharia Industrial (FEI)*, onde o autor obteve sua graduação.

Resumo

Eid, Marco Antonio, *Análise da Solidificação sob Fluxo de Calor Radial Cilíndrico*.

Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007.89 p tese (mestrado).

Apesar da importância tecnológica da solidificação de ligas metálicas sob fluxo de calor radial, relativamente poucos estudos estão sendo feitos nessa área. Neste trabalho, a solidificação da liga Al 4,5%Cu em molde de aço radial cilíndrico é analisada e comparada com a solidificação direcional em molde resfriado. Inicialmente a variação de temperatura em diferentes posições no metal e no molde foi medida durante a solidificação usando um sistema de aquisição de dados. Essas variações de temperatura foram introduzidas em um método numérico para determinar a variação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde pelo método inverso. Os resultados para a solidificação unidirecional e radial foram comparados mostrando que o coeficiente de transferência de calor para o fluxo de calor radial é menor. A variação dos espaçamentos dendritos secundários foram medidos através de um microscópio óptico. Comparações entre os resultados mostraram maiores espaçamentos para fluxo de calor radial. Comparações entre variações e temperaturas calculadas numéricas e experimentalmente comprovaram que o método numérico descreve satisfatoriamente o processo de solidificação radial.

Palavras Chaves: Solidificação, Fluxo de calor radial, coeficiente de transferência de calor, ligas alumínio.

Abstract

Eid, Marco Antonio. “Analysis of the solidification under radial heat flow”, Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007, 85p, Dissertação (Mestrado).

In spite of technological importance of solidification of metallic alloys under radial heat flow, relatively few studies have been carried out in this area. In this work the solidification of Al 4.5 wt% Cu cylinders against a steel massive mold is analyzed and compared with unidirectional solidification against a cooled mold. Initially temperature variations at different positions in the casting and in the mold were measured during solidification using a data acquisition system. These temperature variations were introduced in a numerical method in order to determine the variation of heat transfer coefficient at metal/mold interface by inverse method. The results for unidirectional and radial solidification were compared showing that the heat transfer coefficient is smaller for radial heat flux. The primary and secondary dendrite arm spacing variations were measured through optical microscopy. Experimental results for temperature variations were applied to estimate thermal parameters of the solidification process. Comparisons carried out between experimental and numerical data showed that the numerical method describes well the solidification processes under radial heat flux.

Keywords: Solidification; radial heat flow; heat transfer coefficient; aluminum alloy

Índice

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas e Equações	xii
Nomenclatura	xiii
Capítulo 1: Introdução	01
1.1 Considerações gerais	01
1.2 A solidificação	04
1.3 Objetivos do trabalho	05
Capítulo 2: Revisão bibliográfica	06
2.1 Solidificação	06
2.2 Transferência de calor no processo de solidificação	08
2.3 Evolução do calor latente durante a solidificação	11
2.4 Formação do Gap de ar na interface metal/molde	12
2.5 Determinação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde	13
2.6 Solidificação unidirecional	15
2.7 Fluxo de calor radial	18
2.8 Parâmetros estruturais	22
2.8.1 Formação da macroestrutura	23
2.8.2 Formação da microestrutura	25
2.9 Permeabilidade	26
Capítulo 3: Materiais e Métodos	30
3.1 Procedimentos experimentais	30
3.2 Preparação da liga	31

3.2.1	Caracterização	33
3.3	Dispositivo radial cilíndrico	33
3.4	Sistema de aquisição de dados	35
3.5	Vazamento da liga no dispositivo radial cilíndrico	36
3.6	Análise metalográfica	38
3.6.1	Macroestrutura	38
3.6.2	Microestrutura	39
3.6.3	Determinação dos espaçamentos dendríticos	40
3.6.4	Determinação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde	41
3.6.4	Determinação do mapeamento do teor de cobre	42
Capítulo 4: Resultados e discussões		43
4.1	Macrografias	44
4.2	Curvas de resfriamento	45
4.3	Coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde	46
4.3.1	Análise das curvas de resfriamento experimental e numérica	48
4.4	Parâmetros de solidificação	49
4.4.1	Variação da velocidade da posição da isoterma liquidus em função do tempo	49
4.4.2	Tempo local de solidificação	51
4.4.3	Gradiente térmico no líquido em frente à isoterma liquidus	52
4.4.4	Taxa de resfriamento	53
4.5	Microestrutura	55
4.6	Permeabilidade	58
4.7	Análise da concentração em peso de cobre (MEV)	61
Capítulo 5: Conclusões e sugestões para próximos trabalhos		65
5.1	Conclusões	65
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	66
Referências bibliográficas		67

Lista de Figuras

2.1	Mecanismos de transferência de calor no sistema metal/molde [Garcia, 2001]	10
2.2	Modelo esquemático da interface metal/molde mostrando a formação do gap de ar [Garcia, 2001]	13
2.3	Macrografia da liga AA5052 Vazadas pelo Processo de Solidificação Unidirecional, para diferentes graus de superaquecimento [Sousa, 2006]	17
2.4	Sistema metal/molde com fluxo de calor radial – adaptado [Santos, 2006]	19
2.5	Sistema metal/molde virtual com espessuras adicionais de metal e de molde [Garcia e Prates, 1998]	20
2.6	Esquema do aparato experimental para solidificação radial ascendente [Santos, 1985]	21
2.7	Esquema da estrutura de um lingote com extração de calor radial indicando as zonas: coquilhada, colunar e equiaxial [Santos, 2006]	23
2.8	Representação esquemática do crescimento de grãos na região coquilhada e do surgimento de grãos colunares a partir de grãos coquilhados com orientação Favorável [Garcia, 2001]	24
2.9	Representação dos espaçamentos dendríticos primários, secundários e terciários [Garcia, 2001]	25
2.10	Representação esquemática dos fluxos de metal líquido paralelo e normal aos ramos dendríticos primários.	29
2.11	Seção de área do canal interdendrítico sob fluxo paralelo ao ramo dendrítico primário e Seção de área do canal interdendrítico sob fluxo normal ao ramo dendrítico primário.	29
3.1	Forno de resistência elétrica utilizado para fundir a liga	32
3.2	Detalhe interno do forno mostrando a resistência elétrica	32
3.3	Esquema do dispositivo para solidificação em molde de aço radial cilíndrico, visto de frente(b) e visto de cima (a), ligado a vários termopares e ao sistema de aquisição de dados acoplados a um microcomputador	34
3.4	Dispositivo radial cilíndrico acoplado a termopares e sistema de aquisição de dados	35
3.5	Sistema de aquisição: (a) módulos condicionadores de 16 canais; e (b) computador com placa de aquisição.	36

3.6	Dispositivo utilizado durante experimento; Molde de aço radial cilíndrico, cadinho e termopares	36
3.7	Injeção de Gás no metal líquido e controle de temperatura; lança de gás e medidor de temperatura	37
3.8	Esquema de corte do lingote para macrografia	38
3.9	Esquema dos cortes das amostras para análise microestrutural	39
3.10	Esquema mostrando os espaçamentos dendríticos primários e secundários [Santos, 2004]	40
4.1	Macroestrutura obtida da solidificação sob fluxo de calor radial cilíndrico da liga Al 4,5%Cu. Secção transversal	44
4.2	Curva de Resfriamento experimental, para diferentes posições no metal líquido e no molde radial cilíndrico, obtidos com termopares tipo K e sistema de aquisição de temperaturas computadorizado.	45
4.3	Variação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/coquilha sob fluxo de calor unidirecional e o coeficiente de transferência de calor para metal/molde sob fluxo de calor radial	47
4.4	Curvas de resfriamento experimentais e numéricas	48
4.5	Comportamento da velocidade de avanço da <i>isoterma liquidus</i>	50
4.6	Comportamento do tempo local de solidificação em função da posição	51
4.7	Comportamento da variação dos Gradientes Térmicos em função da posição	53
4.8	Comportamento de variação da Taxa de Resfriamento em função da posição	54
4.9	Microestruturas sob fluxo de calor radial da liga Al -4,5%Cu;(a) Próximo à parede do molde, zona coquilhada;(b) A 15 mm da interface metal/molde, zona colunar;(c) Distante 25 mm da interface metal/molde, zona colunar;(d) Centro do molde, zona equiaxial central	55
4.10	Variação dos espaçamentos dendríticos primários em função da distância da interface metal/molde, para fluxo de calor radial(a)	56
4.11	Variação dos espaçamentos dendríticos secundários em função da distância da interface metal/molde, experimental e pela equação de Bower	57
4.12	Curvas da permeabilidade dos canais interdendríticos da zona colunar, para liga Al-4,5% Cu sob fluxo de calor radial cilíndrico	59
4.13	Relação entre os espaçamentos secundário e primário	60
4.14	(a) Micrografia, zona colunar e distante 14 mm da interface: (b) Gráficos da análise do MEV nos pontos 1, 2, 3 e 4	61
4.15	(a) Imagem da micrografia na zona colunar distante 25 mm da interface; (b) Gráfico da análise dos pontos 1, 2, 3 e 4 em um MEV	62
4.16	(a) Micrografia, zona equiaxial, a 36 mm da interface; (b) Gráfico da análise do MEV (pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6)	63
4.17	(a e b) Teor de cobre em função das distâncias da interface	64

Lista de Tabelas e Equações¹

2.1	Permeabilidade paralela	31
2.2	Permeabilidade normal	31
2.3	Tortuosidade geral	31
2.3	Tortuosidade paralela	31
2.4	Tortuosidade normal	31
3.1	Composição química obtida para a liga Al 4,5%Cu utilizada no experimento	37
3.2	Propriedades da liga Al 4,5% Cu	46
4.1	Variação do coeficiente de transferência de calor com o tempo (h_i)	53
4.2	Variação do coeficiente de transferência de calor da interface metal/molde (h_i)	53
4.3	Variação da velocidade de avanço da isoterma liquidus (v_L)	55
4.4	Tempo local de solidificação (t_L)	57
4.5	Gradiente de temperatura em frente à isoterma <i>liquidus</i> (G_i)	58
4.6	Taxa de resfriamento (\dot{T})	60
4.7	Espaçamento dendrítico secundário	63

Nomenclatura

Letras Latinas

k_p	Permeabilidade paralela	$[m^2]$
d	Densidade	$[g/cm^3]$
k_n	Permeabilidade normal	$[m^2]$
f	Fração do líquido	cm^3
τ	Tortuosidade	Adm.
t_l	Tempo local de solidificação	$[s]$
G	Gradiente de temperatura	$[K/mm]$
t_{ss}	Tempo local de solidificação da isoterma solidus	$[s]$
t_{sl}	Tempo local de solidificação da isoterma liquidus	$[s]$
G_l	Gradiente de temperatura em frente à isoterma liquidus	$[K/mm]$
G_T	Gradiente de temperatura	$[K/m]$
h_i	Coefficiente de transferência de calor	$[W/mm^2 K]$
k	Condutividade térmica	$[W/m K]$
L	Calor latente	$[kJ/kg^{-1}]$
V	Volume	$[mm^3]$
T	Temperatura absoluta	$[K]$

\dot{T}	Taxa de resfriamento	[K/s]
T_{fA}	Temperatura de fusão	[K]
T_l	Temperatura liquidus	[K]
T_s	Temperatura solidus	[K]
v	Velocidade	[mm/s]

Letras Gregas

λ_1	Espaçamento dendrítico primário	μm
λ_2	Espaçamento dendrítico secundário	μm

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

O aumento da disputa do mercado de fundição pelas indústrias está obrigando a redução de custos e melhorias na qualidade dos produtos. Com o auxílio de modelos matemáticos, simulando as condições reais, pode se evitar perdas consideráveis de energia, mão de obra e materiais. A solidificação de metais é um processo complexo que envolve transferência de calor e massa em regime transiente, além de fluxo de metal líquido. Apesar da complexidade da formulação matemática do processo, tem se observado um aumento na utilização de programas numéricos computacionais para a simulação de aspectos da solidificação, com o objetivo de prever a evolução das temperaturas e os parâmetros térmicos e microestruturais.

O Alumínio é o mais recente elemento metálico utilizado em grande escala pela indústria sendo utilizado há aproximadamente 120 anos. Isto ocorreu devido à dificuldade em obtê-lo a baixo custo e em grandes quantidades, mesmo sendo um dos elementos metálicos mais abundantes, com cerca de 8% da crosta terrestre.

A produção mundial em 1900 era de 7000 t, e após 50 anos atingia a marca de dois milhões de toneladas e atualmente a sua produção é cerca de 22 milhões de toneladas/ ano. A reserva do Brasil está em torno de 2,7 bilhões de toneladas (11 % das reservas mundiais) atrás de Guine e Austrália [ABAL, 2004].

As principais características do metal Alumínio são: a baixa densidade, $2,7 \text{ g/cm}^3$, e a elevada resistência à corrosão em ambientes de atmosfera adversas, em meios líquidos aquosos e em alguns produtos químicos inorgânicos e orgânicos, sem exigir tratamento superficial de proteção. Esta característica é resultado de uma película de óxido fina e invisível e de elevada dureza que se forma na superfície do alumínio, e que quando exposta a atmosfera, protege o metal de oxidações posteriores [Bresciani, 1997], [ABAL, 2004].

O Alumínio comercialmente puro tem uma resistência à tração de aproximadamente 90 MPa, sua utilização como material estrutural nesta condição é muito limitada. Através do trabalho mecânico a frio a sua resistência pode dobrar. Também a adição de elementos de liga (silício, cobre, manganês, cromo, zinco, ferro, etc.) aumenta muito sua resistência à tração, que em associação com trabalho a frio e tratamentos térmicos, pode chegar a valores em torno de 700 MPa.

A sucata de alumínio é totalmente reciclável. No processo de obtenção do alumínio líquido primário, é fundamental a adição de sucatas de alumínio selecionadas que ajudam no resfriamento deste material e ajustam à temperatura de vazamento. Quando a sucata é utilizada numa usina de redução de alumina, pode-se dizer que seu consumo de energia é negativo, pois se utiliza da energia do alumínio primário, no estado líquido, para fundi-la novamente. Cerca de 20 % do alumínio utilizado pelas indústrias é oriundo de reciclagem.

Outra característica importante é a elevada condutibilidade elétrica sendo por isso muito utilizado como condutor de eletricidade. A condutibilidade elétrica de um condutor é cerca de 60% IACS (International Annealed Copper Standard). Observa-se que, não obstante a menor condutibilidade do alumínio em comparação com a do cobre (100%IACS), o condutor de alumínio, com a mesma resistividade do cobre, pesa somente a metade [ABAL, 2004].

A alta condutibilidade térmica do alumínio torna-o um dos metais mais importantes na fabricação de utensílios domésticos. Essa característica é um importante meio de transferência de energia térmica, tanto no aquecimento, como no resfriamento. Assim, os trocadores ou dissipadores de calor em alumínio são comuns nas indústrias alimentícia, química, petrolífera, aeronáutica etc. O alumínio é também um excelente refletor de energia radiante devido ao grande

alcance dos comprimentos de onda desde os raios ultravioletas, através dos espectros visíveis, até os raios infravermelhos e ondas de calor, tanto quanto ondas eletromagnéticas de rádio e radar. O alumínio tem uma refletividade acima de 80%, a qual permite ampla utilização em luminárias, já as coberturas de alumínio refletem uma alta porcentagem do calor do sol, tanto que edificações cobertas com esse material são menos quentes no verão [ABAL, 2004].

O Alumínio não é magnético, sendo frequentemente utilizado como proteção em equipamentos eletrônicos. Também, não produz faíscas, sendo dessa forma bastante utilizado na estocagem de substâncias inflamáveis ou explosivos [ABAL, 2004].

As características citadas anteriormente dão ao alumínio uma extrema versatilidade. Na maioria das aplicações, duas ou mais destas características entram em jogo, como por exemplo: baixo peso combinado com resistência mecânica em aeronaves, vagões ferroviários, caminhões e outros equipamentos de transporte. A alta resistência à corrosão e a elevada condutibilidade térmica são importantes em equipamentos para a indústria química e petrolífera, propriedades que combinam com a atoxidade necessária em equipamentos de produção alimentícia[ABAL, 2004].

Algumas ligas de alumínio são menos resistentes a corrosão do que outras, principalmente as ligas de elevada resistência mecânica, tais como as ligas à base de Al-Cu e Al-Zn-Mg. Estas ligas devem ser protegidas através do revestimento das superfícies com pinturas.

Em particular, as ligas à base de alumínio-cobre (Al-Cu), apresentam as seguintes características:

- Al-Cu: Alta resistência mecânica,
- Al-Cu: com Ni e Mn: Alta resistência mecânica em temperaturas elevadas,
- Al-Cu-Mg: Alta conformabilidade plástica,

- Al-Cu-Mn: Alta usinabilidade.

Para o desenvolvimento de novas ligas de Alumínio e do processo de fundição, torna-se importante o estudo do processo de solidificação dessas ligas.

1.2. A Solidificação

A solidificação pode ser entendida como um processo de transferência de calor em regime transiente com transformação de fase que pode ocorrer por três mecanismos básicos: condução, convecção e radiação. Durante o processo de solidificação, todos os modos de transferência de calor podem ocorrer simultaneamente.

O vazamento do metal líquido em moldes normalmente ocorre a uma temperatura acima da temperatura de transformação líquido/sólido para que o metal preencha todo o molde antes do início da solidificação. Esse superaquecimento e o calor latente, liberado na interface sólido/líquido, são transferidos para o meio ambiente através do metal solidificado, da interface metal/molde e das paredes do molde [Garcia, 2001], [Santos, 2006].

O estudo da solidificação unidirecional tem sido objeto de um grande número de trabalhos e publicações internacionais nos últimos anos, com o objetivo de analisar a influência dos parâmetros de solidificação na formação de estruturas e na geração de defeitos em ligas metálicas. A grande vantagem do estudo da solidificação unidirecional é a possibilidade de se medir com maior facilidade parâmetros importantes do processo de solidificação, tais como: velocidades de avanço das isotermas *solidus* e *liquidus*, gradientes de temperatura, tempos locais de solidificação e as taxas de resfriamento, e a partir destes obter as relações com os parâmetros microestruturais, tais como espaçamentos dendríticos primário e secundário, que podem ser medidos com precisão em uma estrutura solidificada unidirecionalmente. A formação de defeitos, como as microporosidades formadas entre os ramos dendríticos, também pode ser estudada [Garcia, 2001].

Apesar da importância tecnológica da solidificação sob fluxo de calor radial cilíndrico, poucos estudos têm sido elaborados nesta área. Nesse trabalho com a utilização de experimentos

em laboratório e o auxílio de modelos matemáticos, simulando as condições reais, esse processo foi analisado visando à determinação de seus principais parâmetros térmicos e microestruturais e da variação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde.

1.3. Objetivos do Trabalho

Tendo em vista o citado anteriormente os objetivos desse trabalho estão relacionados com uma análise experimental de uma liga de Al 4,5%Cu utilizando o processo de solidificação sob fluxo de calor radial cilíndrico e com a determinação da variação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde, através da utilização de um modelo matemático desenvolvido.

Foi escolhida a liga Al 4,5% Cu por ser uma liga de grande utilização prática e por ter as propriedades termofísicas conhecidas.

Para atingir esses objetivos foram obtidas experimentalmente, durante a solidificação, as curvas de variação de temperatura em diferentes pontos no sistema metal/molde e a partir desses resultados determinados os parâmetros de solidificação e a variação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Solidificação

A solidificação pode ser definida como um processo de extração de calor em regime transiente, com mudança de fase, no qual certa quantidade de energia térmica é transferida através do molde, da fase líquida para o meio ambiente para possibilitar a nucleação e o crescimento da fase sólida. A eficiência da extração de calor depende das propriedades térmicas do metal, das características do molde, das condições da interface metal/molde e das características do meio absorvedor de calor.

A análise da transferência de calor na solidificação tem como objetivos a determinação da distribuição de temperaturas no sistema metal/molde e a determinação da cinética de solidificação.

Do ponto de vista da fundição de metais os principais parâmetros afetados pelo processo de transferência de calor durante a solidificação são as velocidades e conseqüentemente os tempos de solidificação e os perfis térmicos no metal e no molde. O conhecimento de tais parâmetros é importante para o controle da microestrutura final da peça, que influi diretamente nas propriedades, já que os mesmos afetam a morfologia da interface sólido/líquido, e no caso de ligas metálicas, a redistribuição de soluto. Também são importantes para se estabelecer tempos de

desmoldagem em processos convencionais de fundição e para controlar a espessura solidificada em diferentes etapas dos processos de lingotamento contínuo.

Nos processos de fundição de metais, o metal líquido deve, inicialmente, perder calor até atingir a temperatura de início de solidificação quando começa a ser liberado o calor latente. Essas parcelas de energia, na forma de calor, devem ser inicialmente transportadas através do metal líquido e posteriormente, quando iniciar a solidificação, através da camada solidificada, vencer a resistência térmica na interface de separação entre o metal e o molde, serem conduzidas através das paredes do molde e finalmente serem absorvidas pelo meio ambiente. Estes transportes de energia ocorrem em meios diferentes e envolvem os três mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação ocorrendo em regime transiente. No caso de metais puros, a interface sólido/líquido desloca-se com velocidade variável durante o processo e para ligas metálicas, devido à possibilidade de rejeição do soluto e a conseqüente ocorrência de crescimento dendrítico, não se pode afirmar que surja uma interface definida já que haverá a coexistência de sólido e líquido em uma região finita cuja fronteira de separação com a região totalmente sólida e totalmente líquida movem-se com velocidades diferentes e também variáveis.

A análise matemática do processo de solidificação, que leva à determinação dos parâmetros citados acima é, portanto, bastante complexa já que envolve diferentes mecanismos de transferência de calor em regime transiente, a existência de fronteiras móveis e, conseqüentemente, equações diferenciais com condições de contorno não lineares, para as quais soluções analíticas exatas são raras e limitadas.

De um modo geral a análise teórica do problema da solidificação pode ser realizada utilizando métodos analíticos e métodos numéricos.

Os métodos analíticos exatos são aqueles que buscam obter soluções analíticas exatas para as equações diferenciais que descrevem as trocas de calor durante o processo de solidificação. Esse método restringi-se ao caso mais simples da condução unidirecional de calor, considerando uma série de simplificações de ordem física e condições de contorno.

Os métodos numéricos têm adquirido uma importância crescente nos últimos anos associada ao intenso desenvolvimento observado na área de computação. Esses métodos podem basear-se, por exemplo, na divisão do sistema metal/molde em pequenos intervalos de modo a se estabelecer uma malha e na substituição das equações diferenciais que descrevem a transferência de calor por equações aproximadas denominadas de diferenças finitas. Esses métodos permitem que se analise o problema da solidificação em condições mais próximas dos casos observados na prática, levando em conta condições de contorno mais reais e variações das propriedades físicas do sistema metal/molde com a temperatura.

Evidentemente todos os métodos têm suas qualidades e suas limitações dependendo da abordagem do problema. Assim, os métodos analíticos exatos são interessantes para uma análise ideal do fenômeno de solidificação que permita a determinação da variação dos parâmetros do processo com as características do sistema metal/molde. Já os métodos numéricos podem ser aplicados na análise de casos reais específicos permitindo a obtenção de soluções mais abrangentes e precisas [Santos, 2006].

2.2 Transferência de Calor no Processo de Solidificação

Em um sistema de solidificação o calor é transferido através de três mecanismos básicos: condução, convecção e radiação.

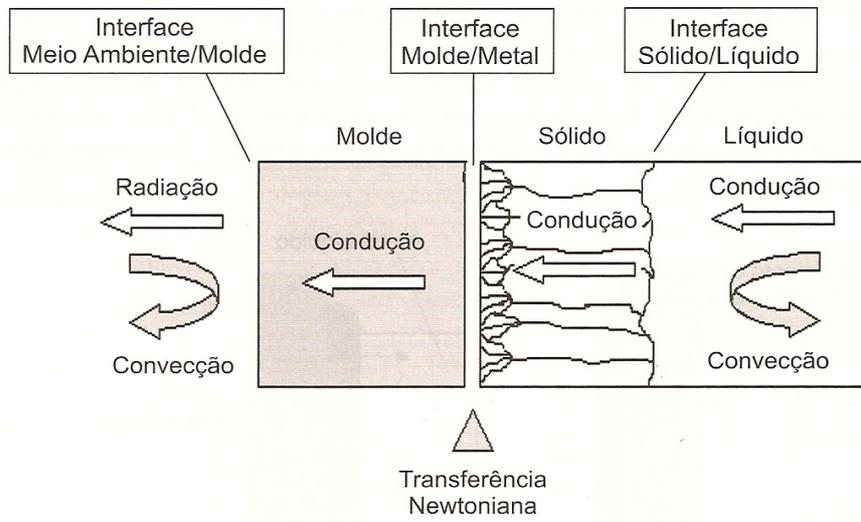
A condução ocorre quando o calor é transferido através de um meio, seja constituído por um sólido ou por um líquido, devido à diferença de temperatura. A convecção é um mecanismo de transferência de calor associado ao movimento de um fluido, ela ocorre quando uma superfície, a uma determinada temperatura, está em contato com um fluido a temperatura mais baixa ou quando em um meio fluido há um gradiente de temperatura. Já a radiação térmica é um mecanismo de transferência de calor baseado na emissão de energia, sob a forma de ondas eletromagnéticas, por uma superfície a uma determinada temperatura e pode ser transferida até no vácuo.

Considerando o caso geral de um metal puro no estado líquido, inicialmente a uma temperatura acima da temperatura de fusão, superaquecido, vazado em um molde com espessura

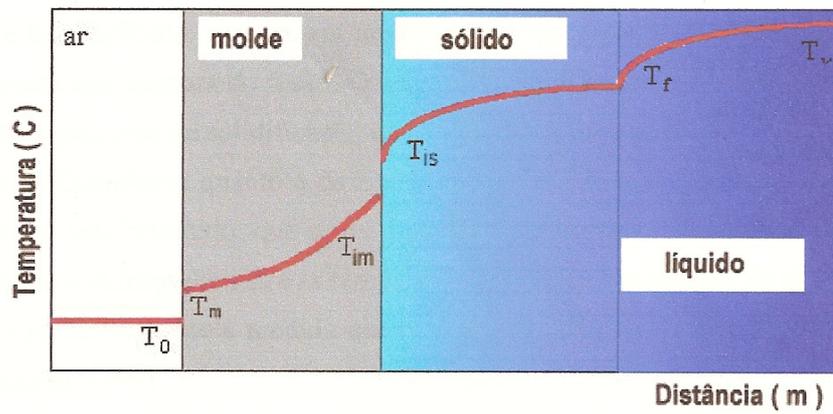
de parede pequena quando comparada ao volume de metal, os mecanismos de transferência de calor envolvidos na extração de calor são os seguintes:

- Convecção e condução no metal líquido, enquanto subsistir o superaquecimento;
- Condução na camada de metal solidificado;
- Na interface metal/molde devido à contração do metal e as imperfeições na superfície interna do molde, o calor será transferido através dos mecanismos de condução, convecção e radiação, em geral englobados na chamada transferência Newtoniana de calor;
- Condução através das paredes do molde;
- Convecção, radiação e condução da superfície externa molde para o meio ambiente [Santos, 1985]; [Garcia, 2001].

A figura 2.1a apresenta os mecanismos de transferência de calor no sistema metal/molde, inclusive mostrando onde ocorre a Transferência Newtoniana. A figura 2.1b mostra um elemento de volume representativo do sistema metal/molde mostrando diferentes fases com gradientes térmicos desde a temperatura de vazamento até a temperatura ambiente, onde T_o é a temperatura ambiente, T_m é a temperatura do molde, T_{im} é a temperatura interna do molde, T_{is} é a temperatura interna do sólido, T_f é a temperatura de fusão e T_v é a temperatura de vazamento.



(a)



(b)

Figura 2.1—(a) Mecanismos de transferência de calor no sistema metal/molde; (b) Elemento de volume representativo do sistema metal/molde [Garcia, 2001].

2.3 Evolução do Calor Latente Durante a Solidificação

Durante a solidificação uma quantidade de calor latente é liberada na interface sólido/líquido, em metais puros, ou na zona pastosa, no caso de ligas metálicas. O processo de liberação de calor latente, no metal puro, ocorre em uma fronteira que separa a fase sólida da fase líquida na temperatura de fusão. Nas ligas, tem-se um intervalo de solidificação entre as temperaturas liquidus e solidus, de modo que o calor latente é liberado gradativamente à medida que a fração de sólido é formada.

Muitos trabalhos têm sido realizados na tentativa de modelar a liberação de calor latente durante a solidificação, entre eles podemos citar o método do calor equivalente [Ruddle, 1957] e o método da entalpia [Garcia, 2001].

Um dos métodos usados para considerar a liberação de calor latente, principalmente para metais puros, é substituí-lo por uma quantidade de calor específico equivalente. O temperatura necessária para eliminar uma quantidade de calor latente equivalente [Garcia, 2001].

Outro método mais abrangente podendo ser utilizado para metais puros ou para ligas é o da entalpia, esse método é baseado na modificação da equação da conservação de energia, relativa ao processo, para determinação da entalpia em vez da temperatura. Para tanto deve se dispor de valores que correlacionam a entalpia com a temperatura, o que exige o conhecimento da variação do calor específico com a temperatura e a variação da fração sólido com a temperatura [Rappaz e Stefanescu, 1988].

Nos últimos anos muitos trabalhos têm sido desenvolvidos visando o estudo da liberação do calor latente na solidificação. Entre eles podemos citar Sharma e seus colaboradores que desenvolveram um método numérico para determinação do calor específico equivalente e compararam com resultados de outros autores [Sharma, et al 2000].

2.4 Formação de gap de ar na interface metal molde

O processo de extração de calor durante a solidificação dos metais, apresenta-se como um complexo mecanismo microscópico, onde ressaltamos o contato imperfeito entre o metal e a parede do molde [Griffith, 1999]. No início do processo, o contato entre o metal e o molde pode ser considerado muito bom, por depender da fluidez do metal e da pressão metalostática que ajuda a manter esse contato térmico. Na medida em que o processo progride uma fina camada de metal solidifica-se em contato com a parede do molde, e inicia-se um movimento do metal provocado pela contração volumétrica, provocando a formação de um gap de ar na interface metal/molde consequentemente diminuindo o coeficiente de transferência de calor [Garcia, 2001]. Além do fenômeno de contração do metal, as características físicas e químicas do metal e do molde, e a expansão do molde durante a solidificação, são mecanismos que levam a formação do gap de ar formado entre o metal e o molde que alteram ainda mais o contato térmico [Souza et al, 2005].

Em função da importância do contato imperfeito na interface metal/molde que afeta significativamente o processo de solidificação, uma série de trabalhos têm sido desenvolvidos nessa área. Haddad e seus colaboradores desenvolveram um modelo numérico, diferenças finitas, para determinar a velocidade de formação e a espessura do gap de ar, durante o processo de transferência de calor [Haddad et al 2001].

Loulou e seus colaboradores analisaram a variação da resistência de contato devido ao gap de ar durante os primeiros estágios de um processo de solidificação. Estudaram para este fim a influência das variáveis do processo como a rugosidade da superfície do molde, metal característico do fundido, superaquecimento do metal e o lubrificante [Loulou et al. 2000].

A figura 2.2 mostra um modelo esquemático da interface metal/molde irregular aonde ocorre à formação do gap de ar. K, R e C são os mecanismos de Condução, Radiação e Convecção, respectivamente.

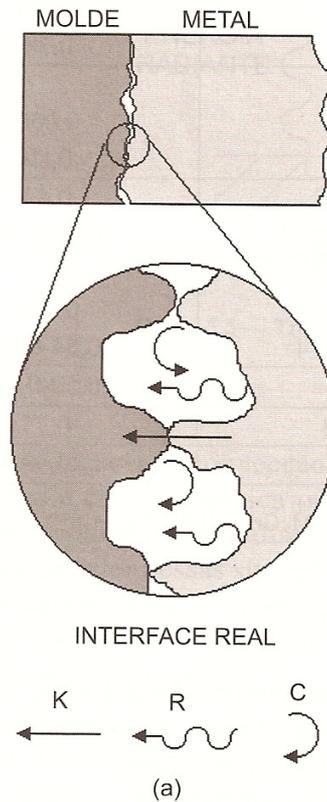


Figura 2.2—Modelo esquemático da interface metal/molde mostrando a formação do gap de ar [Garcia, 2001].

2.5 Determinação do Coeficiente de Transferência de Calor na Interface Metal/Molde

Como já citado, um dos aspectos mais importantes a serem analisados durante a solidificação é o surgimento de um gap de ar na interface metal/molde, devido a vários fatores. Este gap de ar irá provocar um rápido decréscimo no coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde. Como a estrutura e as propriedades da peça fundida dependem das condições térmicas, o coeficiente de transferência de calor tem sido alvo de estudos de um grande número de pesquisadores. Um dos métodos aplicados para determinar o coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde, que não pode ser obtido diretamente, é o que

utiliza dados experimentais das variações de temperatura introduzidos em modelo numérico, que descreve o processo. Nesse método, denominado método inverso, a temperatura calculada para a interface é comparada com a temperatura experimental a cada interação no tempo, e através de interações sucessivas, determina-se o valor numérico do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde. Através da repetição do processo para todo o intervalo de tempo necessário para a solidificação obtém-se como resultado desse ajuste de temperaturas experimentais e calculadas, um perfil da variação do coeficiente de transferência de calor com o tempo [Melo et al, 2000].

Neste trabalho foi utilizado um método numérico desenvolvido por Santos, Rizzo e Melo, para a solidificação radial cilíndrica.

Na literatura encontramos uma grande quantidade de pesquisadores utilizando métodos computacionais para estudar a solidificação dos metais, entre eles podemos citar: [Garcia, et al], [Santos, et al], [Fortin, et al], [Shijie, et al], [Wu, et al], [Ferreira, et al], [Spim, et al], [Melo, et al], [Loulou, et al], [Santos, et al], [Bouchard, et al] e [Turchin, et al].

Dada à importância do estudo do coeficiente de transferência de calor uma série de trabalhos tem sido realizada e a seguir alguns serão comentados resumidamente.

Dos estudos citados podemos destacar o de Melo e colaboradores, que utilizando um modelo numérico, obtiveram valores da variação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde e os resultados obtidos demonstraram ótima concordância com os valores experimentais [Melo et al, 2000, 2004,2005].

Lau e seus colaboradores, utilizando a simulação computacional obtiveram valores do coeficiente de transferência de calor no processo de solidificação de ferro fundido em um molde metálico. Concluíram que o coeficiente de transferência de calor encontrado cai rapidamente no início do processo e depois aumenta com a solidificação após um curto período de tempo em fase constante [Lau et al, 1998].

Santos e colaboradores estudaram o coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde em regime transiente, durante o processo de solidificação horizontal e vertical de ligas de Al-Cu e Sn-Pb. Os resultados permitiram estabelecer expressões em função do tempo para diferentes composições de ligas, material fundido, espessura do molde e superaquecimento [Santos et al, 2000, 2003].

Rizzo e colaboradores, estudando um processo de fundição de precisão utilizando modelo numérico, fizeram uma análise de algumas metodologias utilizadas na determinação do coeficiente de transferência de calor e sua aplicação no caso de fundição de precisão. Constataram uma melhor concordância entre os perfis de temperatura obtidos numericamente e os experimentais, quando utilizado um coeficiente de transferência de calor variando com o tempo, obtido através do método de comparação de perfis térmicos numérico-experimentais. Concluindo que a utilização de um valor constante para o coeficiente de transferência de calor não é conveniente [Rizzo, Melo e Santos, 1993].

Spim utilizou o método numérico para avaliar o coeficiente de transferência de calor nas zonas de resfriamento que utilizam sprays nos lingotamentos contínuos [Spim, 1995].

2.6 Solidificação Unidirecional

Uma revisão bibliográfica mostra que nos últimos anos os estudos experimentais desenvolvidos utilizando o processo de solidificação unidirecional com o objetivo de analisar a influência dos parâmetros de solidificação na formação de estruturas e na geração de defeitos em ligas metálicas tem sido objeto de um grande número de trabalhos e publicações internacionais. A grande vantagem do estudo da solidificação unidirecional é a possibilidade de se medir com maior facilidade parâmetros importantes do processo de solidificação, tais como: velocidades de avanço das isothermas *solidus* e *liquidus*, gradientes de temperatura, tempos locais de solidificação e taxas de resfriamento, e a partir destes obter as relações com os parâmetros estruturais, tais como espaçamentos dendríticos primário e secundário, que podem ser medidos com precisão em uma estrutura solidificada unidirecionalmente. A formação de defeitos, como as microporosidades formadas entre os ramos dendríticos, também pode ser estudada.

Melo e colaboradores, desenvolveram, através de resultados experimentais e numéricos, um modelo para prever os espaçamentos dendríticos primários e secundários em função de parâmetros térmicos. Em seu trabalho, constatou-se que na previsão de microporosidades é necessário caracterizar precisamente a estrutura dendrítica formada durante todo o processo de solidificação, então sendo necessário calcular a permeabilidade e também estimar o raio da bolha de gás para então determinar a pressão exercida devido à tensão superficial do gás/metálico. Depois foram comparados resultados numéricos e experimentais da liga Al 4,5%Cu que permitiram a previsão dos espaçamentos interdendríticos durante a solidificação unidirecional. Utilizando um sistema de solidificação unidirecional, propuseram um método para prever a posição, a quantidade e o tamanho das microporosidades formadas da contração e gases dissolvidos, da liga Al 4,5% Cu [Melo, Rizzo e Santos, 2005].

Osório e Garcia analisaram a solidificação unidirecional de ligas de Zn-Al e apresentaram as equações analíticas para determinar a posição das isoterms solidus e liquidus durante a solidificação e correlacionar os limites de resistência e escoamento para parâmetros relativos ao processo de solidificação [Osório, Garcia, 2000].

Rocha, Siqueira e Garcia, estudaram a transição morfológica celular para dendrítica durante a solidificação unidirecional em regime transiente de ligas Sn-Pb foram medidas as variações dos parâmetros térmicos durante o processo e sua influencia na formação de microestrutura. As medidas foram comparadas com modelos teóricos [Rocha, Siqueira e Garcia, 2002].

Su, Overfelt e Jemian analisaram a solidificação unidirecional da ligas Al 4,5%Cu usando um forno Bridgman, que permite a solidificação em regime permanente. Os autores durante as experiências impuseram variações súbitas nas velocidades de avanço da zona pastosa (deslocamentos das isoterms solidus e liquidus), provocando uma situação transiente, e analisaram o ajuste dos parâmetros de solidificação para atingir uma nova situação permanente. Os autores concluíram que os espaçamentos interdendríticos ajustam-se ao novo regime tão rapidamente quando as velocidades de avanço da zona pastosa, mas os perfis de concentração de soluto ajustam-se mais lentamente. Os resultados mostraram também que as equações

encontradas na literatura para determinação dos espaçamentos interdendríticos permitem a determinação satisfatória dos mesmos [Su, Overfelt e Jemian, 1998].

Sousa desenvolveu uma análise comparativa do processo de solidificação da liga de alumínio AA5052 a partir de diferentes graus de superaquecimento. Dos resultados de seu trabalho, concluiu que para a liga AA5052 solidificada unidirecionalmente com diferentes graus de aquecimento, o aumento do superaquecimento provoca um aumento da zona colunar, conforme figura 2.3, afetando também todos os parâmetros térmicos e microestruturais [Sousa, 2005].



Figura 2.3 Macrografia da liga AA5052 vazadas pelo processo de solidificação unidirecional, para diferentes graus de superaquecimento [Sousa, 2006].

Garcia e colaboradores têm publicado vários trabalhos de ligas metálicas que envolvem a solidificação unidirecional [Sá et al., 2003], [Osório e Garcia, 2001, 2002], [Spinelli, Peres e Garcia, 2005], [Ferreira, Santos e Voller, 2004], [Spinelli et al, 2004], [Siqueira, Cheung e Garcia, 2003], [Osório et al., 2003], [Ferreira, Garcia e Nestler, 2004], [Peres et al, 2004], [Santos, Quaresma e Garcia, 2001], [Rocha, Siqueira e Garcia, 2003], [Spinelli, Ferreira e Garcia, 2003], [Ferreira, Spinelli, Pires e Garcia, 2005], [Spim, Santos, Ierardi e Garcia, 1997], [Spim e Garcia, 2000], [Quaresma, Santos e Garcia, 2000] .

Santos e colaboradores também têm publicado vários trabalhos de ligas metálicas que envolvem a solidificação unidirecional [Melo e Santos, 2006], [Santos e Melo 2005], [Santos, Rizzo e Melo, 1997, 2004, 2005], [Santos e Moreira, 1984], [Santos e Garcia, 1983], [Santos e Prates 1982], [Souza, Melo e Santos, 2005].

2.7 Fluxo de Calor Radial

No caso da solidificação sob fluxo de calor radial cilíndrico, figura 2.4, apesar da importância tecnológica, poucos trabalhos têm sido elaborados nesta área. A análise teórica e experimental da solidificação em moldes cilíndricos é complexa, devido ao fluxo de calor divergente que provoca uma frente de solidificação circular que converge para um ponto central.

No desenvolvimento da pesquisa bibliográfica, sobre o assunto, alguns trabalhos foram encontrados. Um método bastante interessante é o de Tao, 1967, para o estudo da solidificação de cilindros e esferas em moldes refrigerados considerando um coeficiente de transferência de calor constante na interface metal/molde. Tao apresentou os resultados da posição da interface sólido/líquido em função do tempo e dos perfis de temperatura no sólido, em função nos números de Biot e Stefan, na forma de gráficos e tabelas.

Em 1982 Milanez, desenvolveu um método para o estudo da solidificação em sistema metal/molde com geometria esférica, considerando o molde refrigerado.

Santos e Prates, 1982, desenvolveram estudos teóricos e experimentais sobre o processo de solidificação de Pb e Al em um dispositivo cilíndrico, desenvolvido e construído para simular a solidificação radial de metais em molde cilíndricos refrigerados.

Em 1985, Santos apresentou um método analítico para o estudo da solidificação em sistemas em que o fluxo de calor é radial, obtido a partir do equacionamento desenvolvido para o sistema com fluxo de calor unidirecional, desenvolvido por Garcia e Prates [Garcia e Prates, 1978a], conforme mostrado na figura 2.5, onde podemos observar a adição da camada virtual. Esse modelo substitui a resistência térmica na interface metal/molde por espessuras adicionais de metal e molde, substituindo o sistema metal/molde real por um virtual.

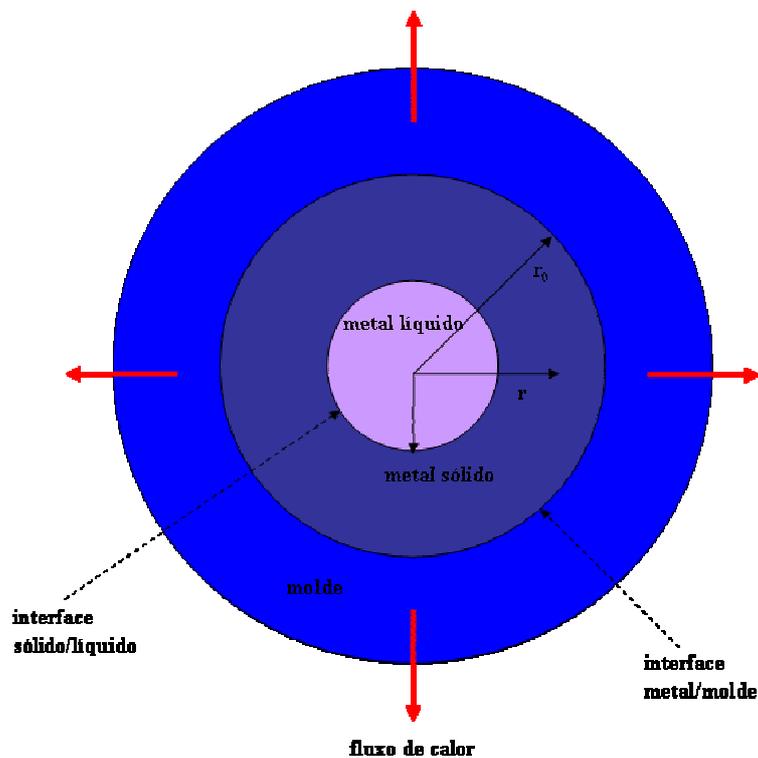


Figura 2.4—Sistema metal/molde com fluxo de calor radial cilíndrico para metal puro-adaptado [Santos, 1998].

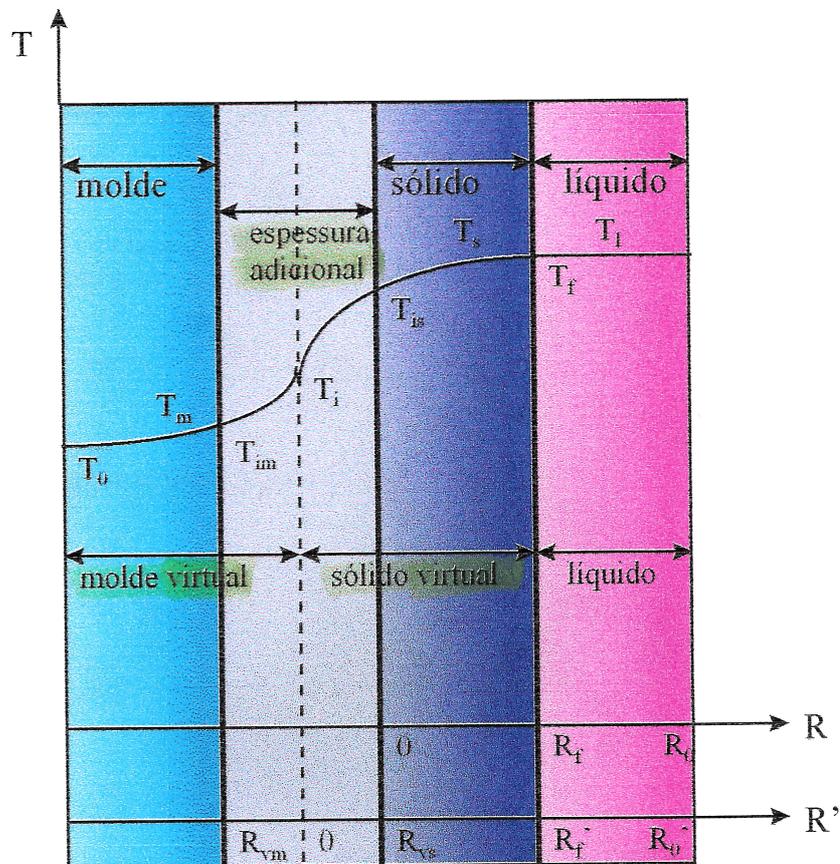


Figura 2.5—Sistema metal/molde virtual com espessuras adicionais de metal e de molde [Garcia e Prates, 1998].

A conversão de um sistema para outro é feita a partir do desenvolvimento de fatores geométricos na equação diferencial da condução unidirecional de calor. A equação modificada é resolvida utilizando-se a solução exata conhecida, baseado na função erro, e são obtidas as equações que permitem a análise da cinética e da variação de temperaturas durante o processo de solidificação. Utilizando um aparato experimental, conforme figura 2.6, para solidificação radial ascendente, a fim de comparar os resultados obtidos com o uso das equações com resultados experimentais e obtidos através de métodos numéricos para comprovar a validade das mesmas. Finalmente, as equações foram aplicadas para verificar as diferenças observadas nos parâmetros de solidificação de metais em moldes com geometria em que o fluxo de calor é unidirecional

(placas planas) e naqueles que o fluxo de calor é radial (cilindros e esferas) chegando as seguintes conclusões:

- Os sistemas radiais apresentam tempos totais de solidificação menores que o unidirecional devido aos fluxos de calor radiais mais eficientes. E entre os sistemas radiais, o esférico apresenta um tempo de solidificação menor que o cilíndrico.
- Tanto o sistema unidirecional como os radiais apresentam a mesma velocidade inicial de solidificação, mas enquanto no unidirecional a velocidade cai continuamente até o final do processo, nos radiais a mesma atinge um valor mínimo após o que inverte o comportamento e começa a crescer tendendo, teoricamente, a um valor infinito no instante final da solidificação.

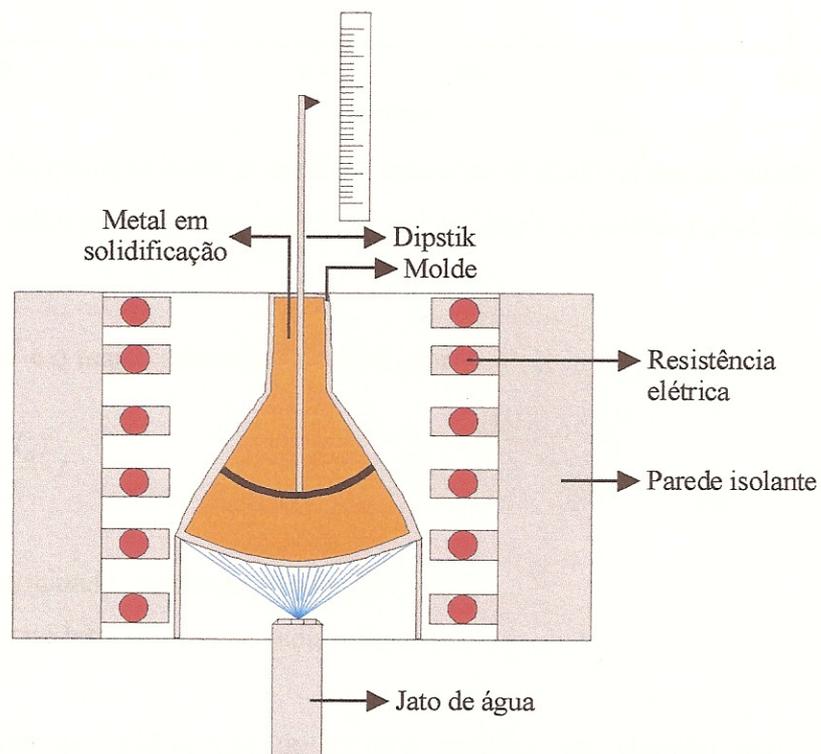


Figura 2.6—Esquema do aparato experimental para solidificação radial ascendente [Santos, 1985].

Dando prosseguimento ao trabalho de Santos, Kyan em 1992 complementou os estudos para as ligas binárias, com o objetivo de determinar a variação da permeabilidade dos canais interdendríticos na formação de microporosidade [Santos,1998, 2006].

Em 1989 Wu e outros estudaram através de método numérico a solidificação em um cilindro vertical para duas condições de fronteira [Wu, Pruhomme e Nguyen, 1989]

Fortin e outros estudando um modelo radial, através de um método experimental desenvolvido tornando possível obter as condições iniciais e os limites práticos, para obter o coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde durante uma solidificação radial e unidirecional [Fortin, Lou Chez e Samuel, 1993].

Fortin e outros, também estudaram a evolução de transferência de calor em solidificação radial de alumínio puro [Fortin et al, 1994].

Souza, Nôe e Garcia estudaram as variáveis térmicas e o espaçamento secundário durante solidificação horizontal de cilíndricos de várias ligas Sn-Pb, onde a análise microestrutural mostrou que os espaçamentos dendríticos secundários diminuíram com o aumento do teor de soluto [Souza et al, 2005].

2.8 Parâmetros Estruturais

As propriedades e características de um material fundido são dependentes de sua estrutura interna, que é consequência dos fenômenos envolvidos na solidificação do líquido durante o seu resfriamento. Em sólidos metálicos a estrutura interna é constituída por arranjos cristalinos de átomos no nível submicroscópico, por diferentes fases no nível microscópico e por grãos cristalinos em um nível macroscópico.

2.8.1 Formação da Macroestrutura

A macroestrutura pode apresentar uma ou mais zonas estruturais: Zona coquilhada, Zona Colunar e Zona Equiaxial, conforme o esquema apresentado na figura 2.7. A zona coquilhada é constituída de grãos de pequenas dimensões, com crescimento equiaxial e orientação cristalográfica aleatória, situada junto às paredes do molde. A zona colunar é constituída de grãos alongados, com crescimento no sentido do fluxo de calor, situados numa região intermediária entre a periferia e o centro da peça. A zona equiaxial constituída de grãos equiaxiais de média dimensão está situada no centro da peça.

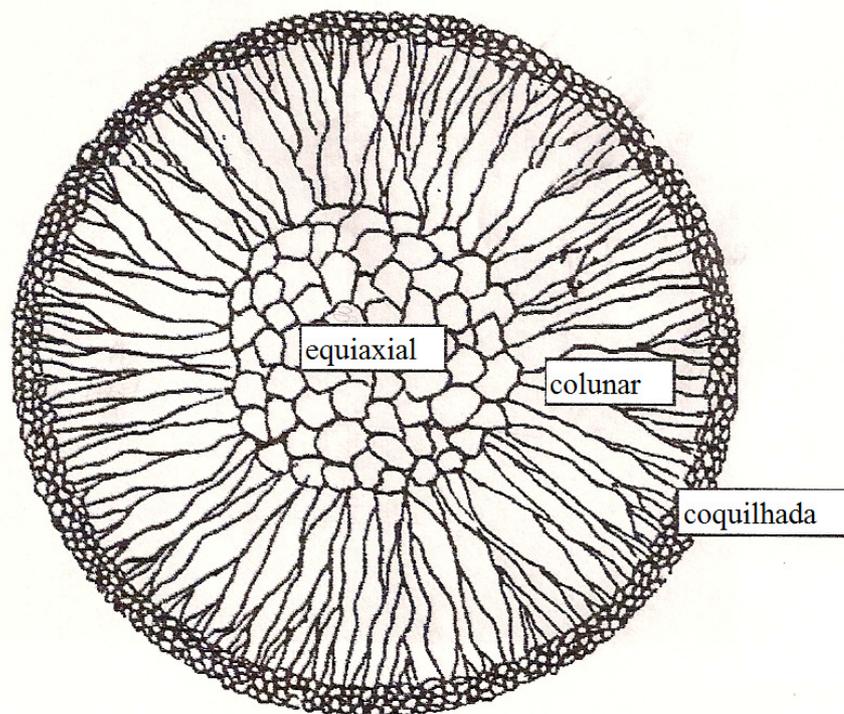


Figura 2.7—Esquema da estrutura de um lingote com extração de calor radial indicando as zonas: coquilhada, colunar e equiaxial [Santos, 1998].

Quando o metal líquido é vazado em uma lingoteira, a parte que entra em contato com as paredes frias da lingoteira é rapidamente super-resfriada, nessa fina camada de líquido super-resfriado, ocorre uma intensa nucleação de grãos cristalinos de orientação aleatória, essa camada de pequenos grãos finamente dispersos é denominada zona coquilhada. Já o crescimento da zona colunar vai depender de alguns fatores tais como a orientação dos grãos surgidos no contato metal/molde, pois a orientação cristalográfica dos grãos favorece seu crescimento no sentido do fluxo de calor; da temperatura de vazamento já que as altas temperaturas de vazamento dificultam o coquilhamento dissolvendo todos os núcleos formados e da turbulência no líquido que favorece a formação da zona equiaxial devido à quebra de cristais já formados. A figura 2.8 representa esquematicamente o crescimento de grãos na região coquilhada e colunar, onde podemos observar a orientação favorável ao crescimento da zona colunar [Flemings, 1974] e [Garcia, 2001].

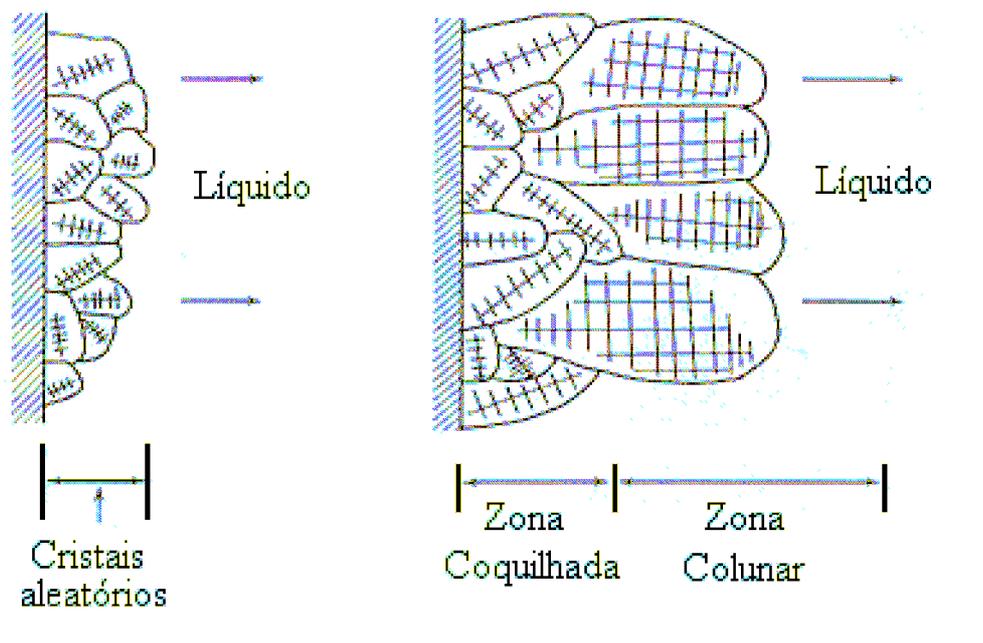


Figura 2.8—Representação esquemática do crescimento de grãos na região coquilhada e do surgimento de grãos colunares a partir de grãos coquilhados com orientação favorável. [Garcia, 2001].

2.8.2 Formação da Microestrutura

Quando mais de um tipo de átomo está presente no líquido, o crescimento do sólido ou, a adição de átomos à superfície sólido/líquido formada pode sofrer interferência ao seu prosseguimento devido à diferença de solubilidade de átomos estranhos no metal líquido, em relação à sua solubilidade no metal sólido. Assim na solidificação de uma liga o soluto tende a ser rejeitado para o líquido. A presença de átomos de soluto tem fundamental papel na morfologia de crescimento e na microestrutura final dos fundidos, podendo surgir um gradiente de composição no líquido e como consequência a temperatura de início solidificação dependerá da distância da interface, o que juntamente com o perfil real de temperatura no líquido pode provocar a ocorrência de um fenômeno chamado super-resfriamento constitucional. A presença do super-resfriamento constitucional possibilita o crescimento e a estabilização de ramificações sólidas, uma vez que sua extremidade estará submetida a uma maior velocidade de crescimento que sua base. A interface deixa então de ser plana para apresentar protuberâncias, resultando numa estrutura ramificada, denominada estrutura dendrítica [Flemings, 1974]. A figura 2.9 apresenta um esquema representativo dos espaçamentos dendríticos primários, secundários e terciários.

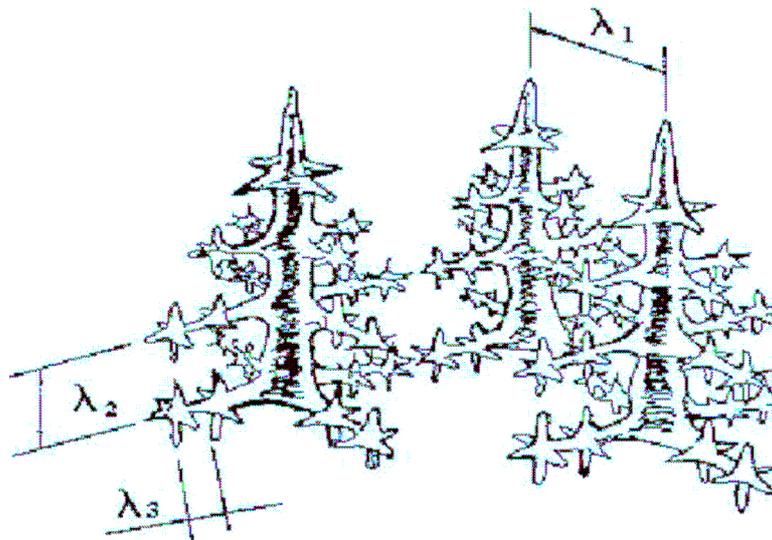


Figura 2.9—Representação dos espaçamentos dendríticos primários, secundários e terciários [Garcia, 2001].

A formação da microestrutura tem sido objeto de vários estudos de muitos pesquisadores entre eles Melo em 2005 estudou os efeitos do espaçamento dendrítico secundário na formação de microporosidades na liga Al-Cu, onde a variação do espaçamento dendrítico durante a solidificação foi determinada usando as variações de temperatura, a velocidade de avanço da ponta da dendrita, o tempo local de solidificação e os gradientes térmicos da frente dendrítica obtidos através de modelo numérico [Melo et al 2005].

Andrade estudou a influência da geometria e do material do molde nos parâmetros estruturais durante a solidificação de ligas de alumínio cobre [Andrade, 2003].

Eskin e outros desenvolveram estudos experimentais sobre a formação da estrutura da liga alumínio/cobre para diferentes graus de aquecimento [Eskin et al, 2005].

Turchin e outros desenvolveram estudos sobre o efeito do fluxo de calor na macro e microestrutura durante a solidificação de um liga de Al 4.5%Cu [Turchin et al, 2005].

Vários outros pesquisadores, através da solidificação de metais, estudaram as microestruturas resultantes de solidificações unidirecionais e radiais, sob as mais variadas geometrias, condições térmicas e composições químicas [Adirli et al, 2000], [Gündüz et al, 2001], [Fornaro et al, 2005], [Santos et al, 2004], e [Založnik et al, 2005].

2.9 Permeabilidade

A permeabilidade dos canais interdendríticos é uma grandeza associada à facilidade com que o fluxo de metal líquido pode percorrer os canais interdendríticos, sendo um parâmetro importante para a análise da formação de microporosidades. Os primeiros trabalhos realizados para determinação da permeabilidade de canais interdendríticos foram baseados em experiências de solidificação controlada em que a velocidade de avanço da frente de solidificação é constante. Nesses casos a permeabilidade parece depender apenas da fração de líquido e do espaçamento interdendrítico primário, que é constante, desprezando-se o efeito do espaçamento secundário.

Santos em 2004 propôs um método heurístico para estimar a variação da permeabilidade dos canais interdendríticos durante a solidificação de ligas metálicas em função dos espaçamentos interdendríticos primários e secundários e da fração de líquido, aplicado para fluxo de metal líquido paralelo e normal ao espaçamento dendrítico primário. Comparações entre a permeabilidade calculada e os dados experimentais obtidos por diferentes autores permitiram concluir que o modelo proposto por Santos descreve satisfatoriamente a variação da permeabilidade dos canais interdendríticos com espaçamentos primários e secundários e fração de líquido, durante solidificação, sob fluxos de líquidos paralelos e normais para espaçamentos dendríticos primários na zona pastosa colunar dendrítica. A figura 2.10 apresenta esquematicamente os fluxos paralelo e normal aos ramos dendríticos primários. A aplicação do modelo indica que sob um fluxo de metal líquido paralelo ao espaçamento dendrítico primário, para a mesma área de seção transversal, a permeabilidade decresce quando a relação entre os espaçamentos secundário e primário aumenta. Os resultados também indicam que sob fluxo normal ao espaçamento dendrítico primário, a influencia dessa relação é menos significativa, mas a permeabilidade é menos favorável para pequenas frações de líquidos se a relação decresce [Santos e Melo, 2004].

A permeabilidade dos canais interdendríticos sob fluxo paralelo aos espaçamentos dendríticos primários é obtida por:

$$K_p = \frac{f^2 \cdot \lambda_1^2}{8\pi \cdot \tau^3} \quad (2.1)$$

E a permeabilidade dos canais interdendríticos sob fluxo normal aos espaçamentos dendríticos primário, na equação abaixo:

$$K_n = \frac{f^2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}{8\pi \cdot \tau^3} \quad (2.2)$$

onde f é a fração volumétrica de líquido; λ_1 é o espaçamento dendrítico primário; λ_2 é o espaçamento dendrítico secundário; e τ é a tortuosidade dos canais interdendríticos, equação 2.3,

que leva em conta o fato de que os canais não são lisos e retos. Um comprimento efetivo L_e do canal é definido por $L_e = L \cdot \tau$, e onde L é o comprimento do canal e portanto:

$$\tau = L_e / L \quad (2.3)$$

Para fluxo paralelo o valor da tortuosidade, desenvolvido por Santos, é representado pela equação 2.4 e para o fluxo normal pela equação 2.5,

$$\tau = 1 + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^f + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{f^2} + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{f^3} \quad (2.4)$$

$$\tau = 1 + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^f + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{f^2} \quad (2.5)$$

Como pode ser observado na figura 2.11b e na equação 2.1, sob fluxo paralelo ao espaçamento dendrítico primário, a área dos canais interdendríticos depende somente dos espaçamentos dendríticos primários. Mas a tortuosidade dos canais é afetada pelos espaçamentos secundários. Isto é coerente com os resultados experimentais obtidos por Murakami [Murakami et al, 1984]. Na figura 2.11b e na equação 2.2 observamos que sob fluxo normal ao espaçamento dendrítico primário, a área dos canais interdendríticos dependem dos espaçamentos primário e secundário o que também é coerente com os resultados de Murakami e Poirier [Murakami et al, 1984] ,[Poirier, 1987].

Melo e seus colaboradores utilizando um método numérico, estudaram a variação dos espaçamentos dendríticos e seus efeitos sobre a formação de microporosidades sob fluxo de calor unidirecional para liga Al 4,5%Cu. Os autores concluíram que para a previsão das microporosidades é necessário caracterizar precisamente a estrutura dendrítica formada durante a solidificação e calcular a permeabilidade dos canais interdendríticos, o que foi feito utilizando as equações 2.1 e 2.4 [Melo et al 2005].

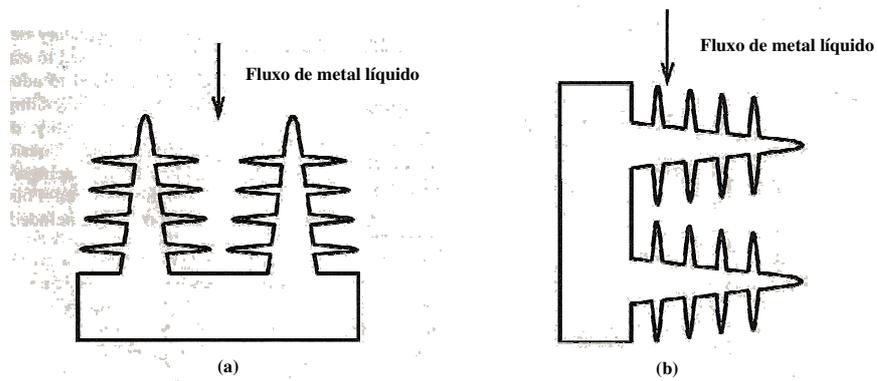


Figura 2.10 - Representação esquemática dos fluxos de metal líquido (a) paralelo e (b) normal aos ramos dendríticos primários.

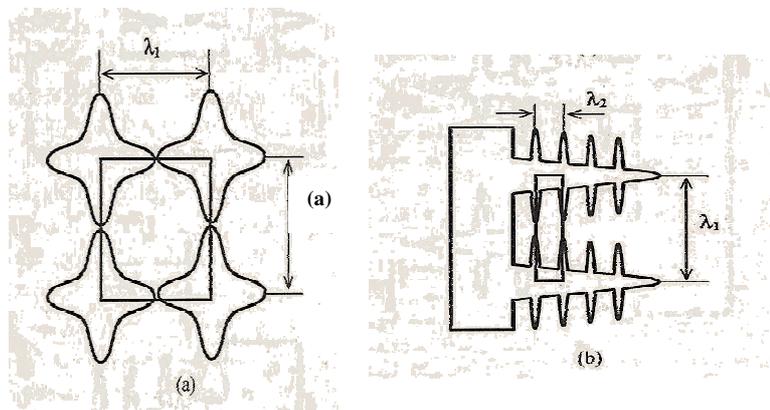


Figura 2.11 - (a) Seção de área do canal interdendrítico sob fluxo paralelo ao ramo dendrítico primário; (b) Seção de área do canal interdendrítico sob fluxo normal ao ramo dendrítico primário.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1. Procedimentos experimentais

Na parte experimental deste trabalho foram respeitadas as seguintes etapas:

- Fabricação da liga;
- Fusão da liga e vazamento em dispositivo de solidificação radial cilíndrico;
- Obtenção das variações de temperatura em diferentes posições dos termopares utilizando um sistema de aquisição de dados e termopares tipo K.
- Determinação dos parâmetros térmicos da solidificação : Gradiente Térmico; Velocidade de Avanço das Isotermas; Tempo Local de Solidificação e Taxa de Resfriamento.
- Caracterização e quantificação dos parâmetros estruturais representados pela macroestrutura e pelos espaçamentos dendríticos secundários e primários representados pelas microestruturas,
- Determinação do coeficiente de transferência de calor através de modelo numérico.

3.2. Preparação da Liga

Foi fundida em um cadinho uma mistura de 4,5% de Cobre eletrolítico em Alumínio puro, conforme cálculo de carga pela quantidade em peso de cada elemento da liga. Amostras foram retiradas para análise, em laboratório, da composição química. As primeiras ligas obtidas foram descartadas por conterem impurezas e/ou outros elementos presentes no Alumínio, que ocasionaram refino de grão. Também foram descartadas algumas ligas por não conterem a porcentagem correta desejada dos elementos da liga.

Para fusão e preparação da liga em diferentes temperaturas de vazamento na execução da parte experimental, foi utilizado um forno elétrico, cujas características serão apresentadas a seguir, cuja carcaça do forno é feita com aço 1010 (chapa 14) de espessura 1,90 mm, sendo sua geometria cilíndrica com 680 mm de diâmetro externo, parte útil interna octogonal com 130 mm de aresta e altura de 450 mm. A parte isolante, de fora para dentro, é revestida com 3 camadas de manta cerâmica de 1 polegada de espessura e densidade de 128 kg/m^3 , e tijolo refratário com 42% de alumina de baixa densidade com dimensões iguais $229 \times 114 \times 63 \text{ mm}^3$, que cortado ao meio no sentido transversal e furado pudesse formar uma concavidade para que a resistência elétrica fosse encaixada. Foram assentadas seis camadas de tijolo, utilizando concreto refratário. Na soleira do forno foi utilizado tijolo refratário de alta densidade, diferentemente da parede interna, que além da resistência térmica, deve ter alta resistência ao desgaste e suportar choques mecânicos durante a entrada e saída do cadinho. A resistência elétrica para o aquecimento do forno utiliza o fio de níquel-cromo Kanthal Al, com diâmetro de 2,6 mm e resistividade de $0,2705 \text{ ohm} \cdot \text{m}$, com 35 m de fio gerando uma potência máxima de 5,1 kW e para o controle da potência foi utilizado um VARIAC com as características:

- Voltagem 220 V
- Corrente máxima 30 A
- Potência máxima 6,6 KVA

Para o controle da temperatura, o forno possui um painel com mostrador digital. A Figura 3.1 mostra uma vista geral do forno e a Figura 3.2 mostra um detalhe da montagem da resistência elétrica.



Figura 3.1—Forno de resistência elétrica utilizado para fundir a liga.



Figura 3.2—Detalhe interno do forno mostrando a resistência elétrica.

3.2.1. Caracterização

Após a obtenção da liga utilizou-se na análise da composição química da liga o método de fluorescência de raios-X com o equipamento Rigaku modelo RIX 3100. A espectrometria de fluorescência de Raios X (XRF) é um método instrumental não-destrutivo para análises elementares quantitativas e qualitativas baseado na medida dos comprimentos de onda e intensidades das linhas espectrais emitidas pela excitação secundária dos elementos. Para se conhecer os valores dos elementos presentes na liga fabricada foi utilizado o método semi-quantitativo (SQ) do princípio dos parâmetros fundamentais (FP), onde as leituras de intensidade obtidas pelo equipamento eram comparadas com valores pré-estabelecidos na base de dados do mesmo. Os resultados para a composição química estão na Tabela 3.1.

Al 4,5% Cu					
Símbolo	Al	Cu	Fe	Si	Outros
% em peso	95,16	4,58	0,13	0,09	0,04

Tabela 3.1—Composição química obtida para a liga Al 4,5%Cu utilizada no experimento.

3.3. Dispositivo Radial Cilíndrico

O dispositivo radial cilindro utilizado para a solidificação da liga, além do forno elétrico e do cadinho, tinha os seguintes equipamentos: Termopares, Sistema de aquisição de dados e botijão com gás argônio. A figura 3.3 demonstra a colocação dos termopares no molde radial cilíndrico que estão acoplados ao sistema de aquisição de dados.

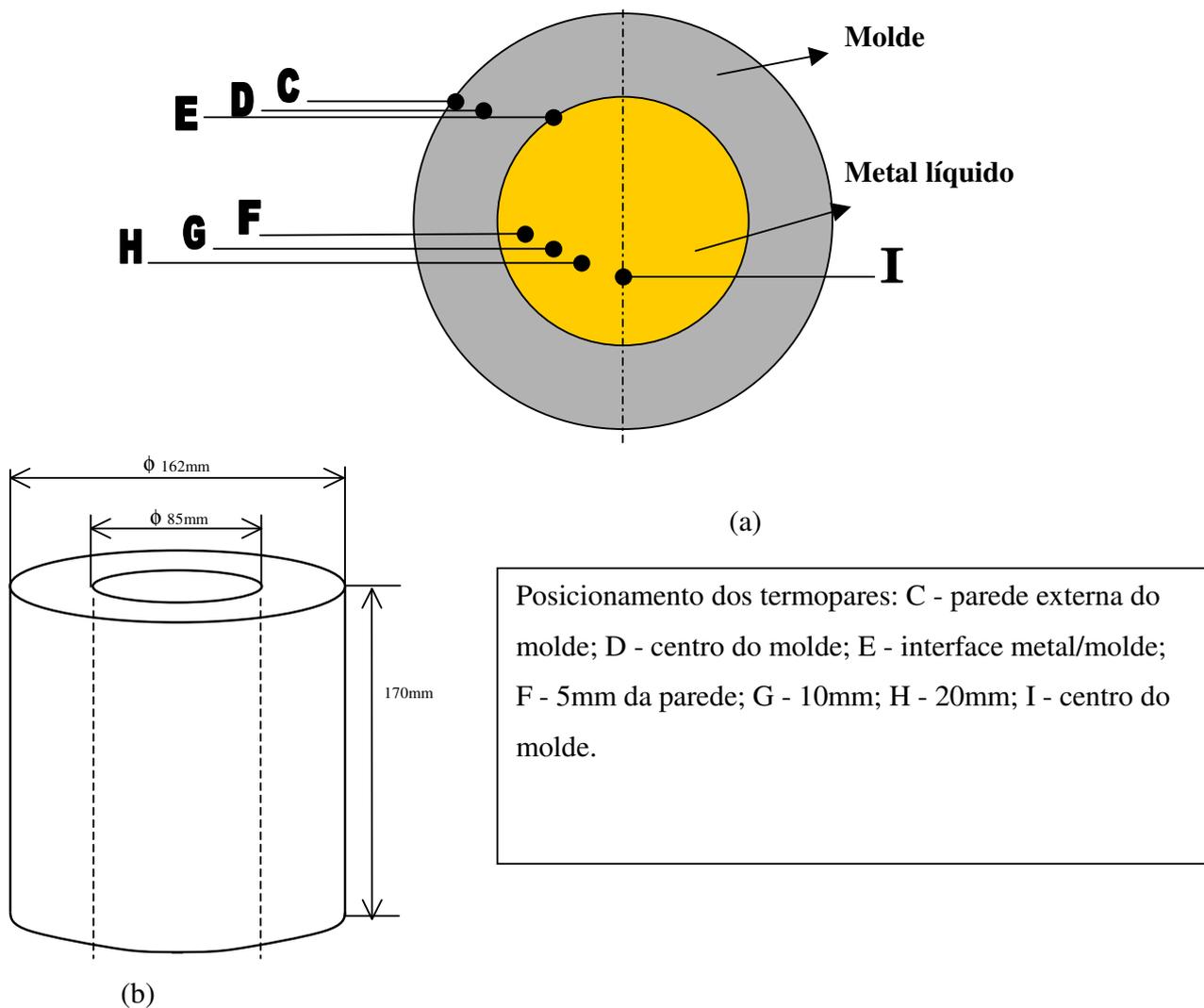


Figura 3.3—Esquema do dispositivo para solidificação em molde de aço radial cilíndrico, visto de frente (b) e visto de cima (a), ligado a vários termopares e ao sistema de aquisição de dados acoplados a um microcomputador.

Para a medição da variação da temperatura durante os ensaios, foram utilizados termopares do tipo K (cromel/alumel) conectados em um sistema de aquisição de dados. Suas características são as seguintes:

- diâmetro da bainha - 1,5 mm
- tipo de junção de medição - isolada

- material da bainha - aço inox 310
- material do rabicho – pvc
- terminal de ligação – tipo agulha
- calibração tipo K, simples (Standard)

3.4. Sistema de aquisição de dados

Para determinação das temperaturas experimentais foi utilizado o sistema de aquisição de dados que é constituído de um microcomputador e placas de aquisição de dados. A aquisição dos dados e o controle do processo foram realizados através de um sistema de 12 bits de resolução, acoplado a um microcomputador, dotado de 32 canais de leitura sendo 16 para termopares tipo K, 16 para termopares tipo S e taxa de aquisição de 10 Hz por canal, sendo o primeiro canal de cada placa reservado para medir a temperatura do ambiente (junta fria), e os demais para a leitura das variações de temperatura no metal e no molde. As figuras 3.4 e 3.5 apresentam os termopares acoplados ao molde cilíndrico e o sistema de aquisição de dados, respectivamente.



Figura 3.4—Dispositivo radial cilíndrico acoplado a termopares e sistema de aquisição de dados.

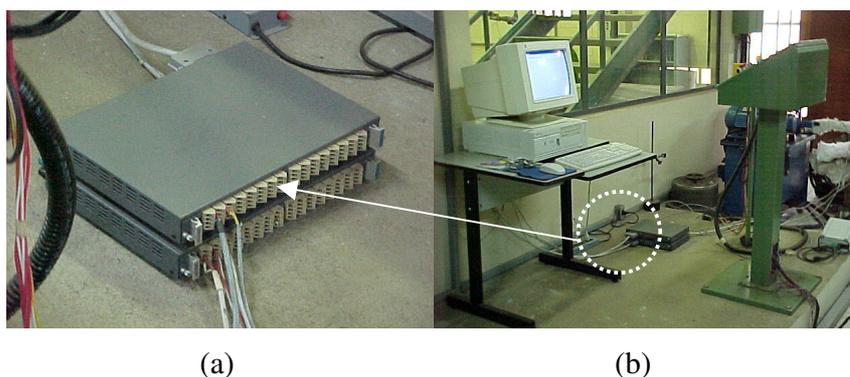


Figura 3.5. Sistema de aquisição: (a) módulos condicionadores de 16 canais; e (b) computador com placa de aquisição.

3.5. Vazamento da Liga no Dispositivo Radial Cilíndrico

Após a fabricação da liga, e sua composição devidamente analisada, o dispositivo experimental radial cilíndrico foi montado, depois, a liga foi colocada no cadinho, e em seguida, no forno de resistência elétrica. Após a fusão, que consumiu 3 horas aproximadamente, a temperatura passou a ser monitorada até que atingisse um valor no mínimo 20 % superior à temperatura de fusão da liga, a fim de garantir as etapas posteriores antes do vazamento. Em seguida o cadinho foi retirado do forno, foi injetado gás argônio no metal líquido, ligado o sistema de aquisição de dados e o metal líquido foi vazado no dispositivo radial cilíndrico, conforme figura 3.6.



Figura 3.6 - Dispositivo utilizado durante experimento; Molde de aço radial cilíndrico, cadinho e termopares.

No decorrer da experiência foi injetado gás inerte com o objetivo de retirar gases retidos no banho, conforme figura 3.7 Também foram tomadas algumas precauções para otimização do processo entre elas: mínimo de agitação no banho durante a fusão, superaquecimento suficiente para garantir que a solidificação tivesse início após preenchimento completo do molde.



Figura 3.7—Injeção de gás argônio no metal líquido e controle de temperatura; lança de gás e medidor de temperatura.

3.6. Análise Metalográfica

3.6.1. Macroestrutura

Depois de desmoldado, o lingote obtido foi cortado transversalmente, conforme representa a figura 3.8.

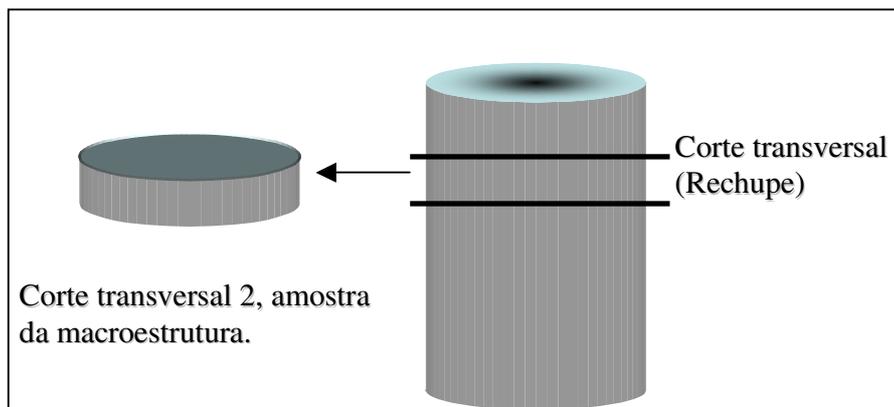


Figura 3.8—Esquema de corte do lingote para macrografia.

Em seguida a amostra foi lixada em lixadeira manual, usando lixas de carbetto de silício e óxido de alumínio. A seqüência utilizada foi de grana: 100, 220, 320, 400 e 600, 800 e 1200. Para avaliar a macroestrutura foi realizado um ataque químico, na seção transversal do lingote, para permitir o exame visual. No ataque da liga foi utilizado um reagente constituído de 15 ml HF, 4,5 ml HNO₃, 9 ml HCl e 271,5 ml de H₂O.

Após o lixamento, a amostra foi lavada e secada e em seguida com um bastão com uma porção de algodão embebido pelo reagente, foi passado sobre a parte lixada durante tempo suficiente para promover uma reação de oxidação de toda a superfície da amostra. Depois a peça foi lavada novamente com água corrente, limpa com chumaço de algodão para a retirada de oxido e remoção de eventuais manchas escuras. Finalmente borrifamos com álcool e secamos a amostra. Este operação foi realizada várias vezes até que se atingisse a revelação desejada.

3.6.2. Microestrutura

Para a análise das microestruturas do lingote fundido, uma amostra foi seccionada em várias posições da amostra transversal nos sentidos: longitudinal e transversal, conforme figura 3.9, posteriormente embutidos em resina plástica. Em seguida as amostras foram lixadas, usando lixas de carbeto de silício e óxido de alumínio. A seqüência utilizada foi de grana: 100, 220, 320, 400 e 600, 800 e 1200. Após cada lixamento as amostras eram colocadas no equipamento de ultra-som por 2 minutos, e em seguida submetidas ao polimento mecânico nas politrizes. Os polimentos foram realizados em duas etapas: iniciando-se com pasta de diamante de 6 μm , utilizando como lubrificante álcool e terminando com pasta de diamante de 1 μm com o mesmo lubrificante. As amostras eram então atacadas com um reagente constituído de 15 ml HF, 4,5 ml HNO₃, 9 ml HCl e 271,5 ml de H₂O. As amostras foram mergulhadas no reagente por 15 segundos, lavadas em água corrente, borrifadas com álcool etílico e secadas em secador. Todo o processo, lixamentos, polimentos e ataques químicos foram repetidos várias vezes até que se atingisse a qualidade necessária para a visualização no microscópio ótico. Em seguida as amostras foram analisadas e foram medidos os espaçamentos.

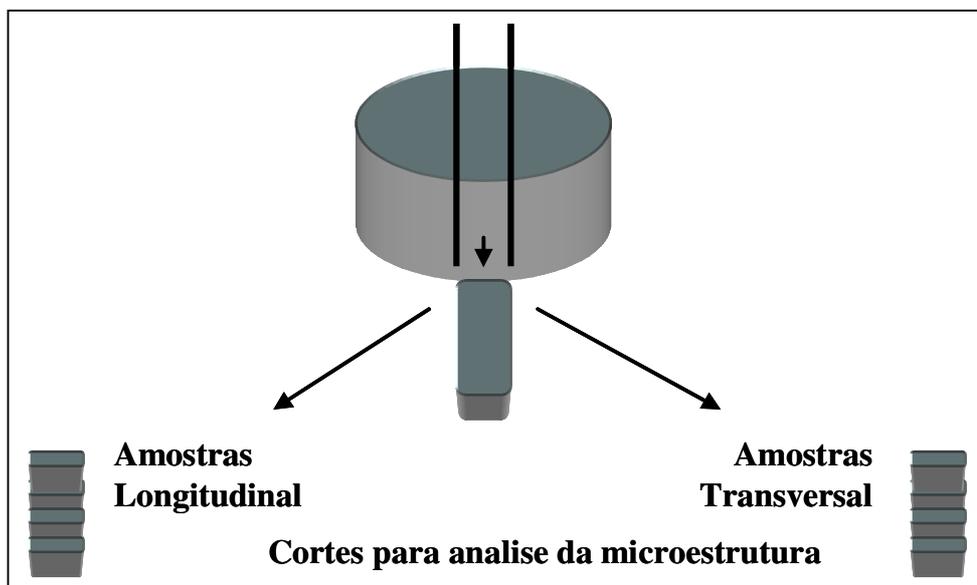


Figura 3.9—Esquema dos cortes das amostras para análise microestrutural.

3.6.3. Determinação dos Espaçamentos Dendríticos

Para a medição dos espaçamentos dendríticos nas várias amostras a partir da interface metal/molde até a região da zona colunar, as amostras foram analisadas no microscópio óptico Neophot – 32, utilizando o método indicado por [Gündüz, e Çadirli]. As medidas foram realizadas utilizando-se o software Q500 MC da Leika Cambridge Ltda., interconectado ao microscópio. Para o espaçamento dendríticos secundário utilizou-se a média das distâncias entre os ramos secundários, medida na seção longitudinal de uma dendrita primária. Para o espaçamento dendrítico primário a média das distâncias entre os ramos primários, medida também na seção longitudinal e transversal.

A figura 3.10 representa os espaçamentos dendríticos primários e secundários.

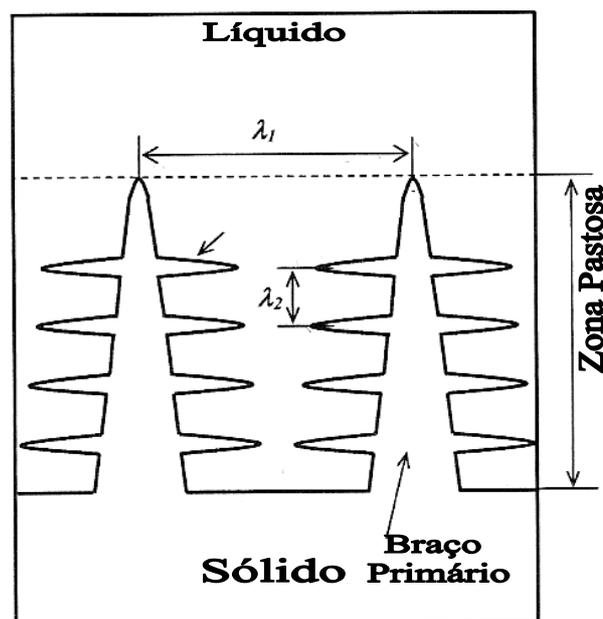


Figura 3.10—Esquema mostrando os espaçamentos dendríticos primários (λ_1) e secundários (λ_2) [Santos, 2004].

3.6.4. Determinação do Coeficiente de Transferência de Calor metal/molde

No presente trabalho foi aplicado um modelo numérico para fluxo de calor radial cilíndrico desenvolvido por Santos, Melo e Rizzo à partir de modelo proposto para a solidificação unidirecional.

O modelo matemático é baseado na solução da equação diferencial de condução de calor com mudança de fase, segundo um sistema de coordenadas cilíndricas, conforme citado no capítulo 2.

Para as simulações matemáticas, deste trabalho, Melo utilizou as propriedades termofísicas da liga Al 4,5%Cu, conforme a tabela:

Propriedade	Valor	Unidade	Referência
Temperatura liquidus	646	°C	Voller e Swaminathan, 1991
Temperatura eutética	548	°C	Kubo e Pelhke, 1985
Condutividade térmica	200 (548°C)	(W/mK)	Voller e Sundarraj, 1995
	100 (645°C)		
Calor específico	0,9 (548°C)	(kJ/kgK)	Voller e Sundarraj, 1995
	1,1 (645°C)		
Calor latente de fusão	385000	(J/kg)	Swaminathan e Voller 1992
Densidade	2610	kg/m ³	Poirier et al., 1987

Tabela 3.2—Propriedades da liga Al 4,5% Cu.

3.6.5. Determinação do mapeamento do teor de cobre

Com o objetivo de fazer um mapeamento do teor de soluto (cobre) entre as extremidades da seção transversal dos ramos dendríticos, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV), acoplado a um equipamento de EDS, para verificar se havia variação do mesmo ao longo da peça.

Capítulo 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são analisados os resultados obtidos para solidificação sob fluxo de calor radial cilíndrico para liga Al-4,5%Cu.

- Macroestrutura obtida no processo;
- Curvas de resfriamento durante a solidificação no dispositivo radial cilíndrico, para as várias posições, obtido através do sistema de aquisição de dados;
- Variação do coeficiente de transferência de calor metal/molde, através do modelo numérico;
- Comparação entre resultados de variações de temperatura, para as várias posições, obtidas experimentalmente e numericamente;
- Parâmetros térmicos característicos do processo de solidificação;
- Parâmetros característicos da microestrutura dendrítica;
- Permeabilidade nos canais interdendríticos;
- Teor de cobre no MEV(EDS).

4.1. Macrografias

A figura 4.1 apresenta a macrografia obtida na solidificação sob fluxo de calor radial cilíndrica da liga Al 4,5%Cu. Observamos, na macrografia, a direcionalidade da estrutura colunar radial em grande parte da amostra, o que demonstra que o fluxo de calor é predominantemente radial. No entanto, é possível notar também que na região central do lingote ocorre a formação de uma região equiaxial decorrente da troca de calor na parte superior do molde, que está em contato com o ar, com o ambiente, e assim propiciando o surgimento de novos núcleos e portanto a formação da estrutura equiaxial. Esses grãos equiaxiais podem também ser consequência de ramos dendríticos destacados elevados para a região central.

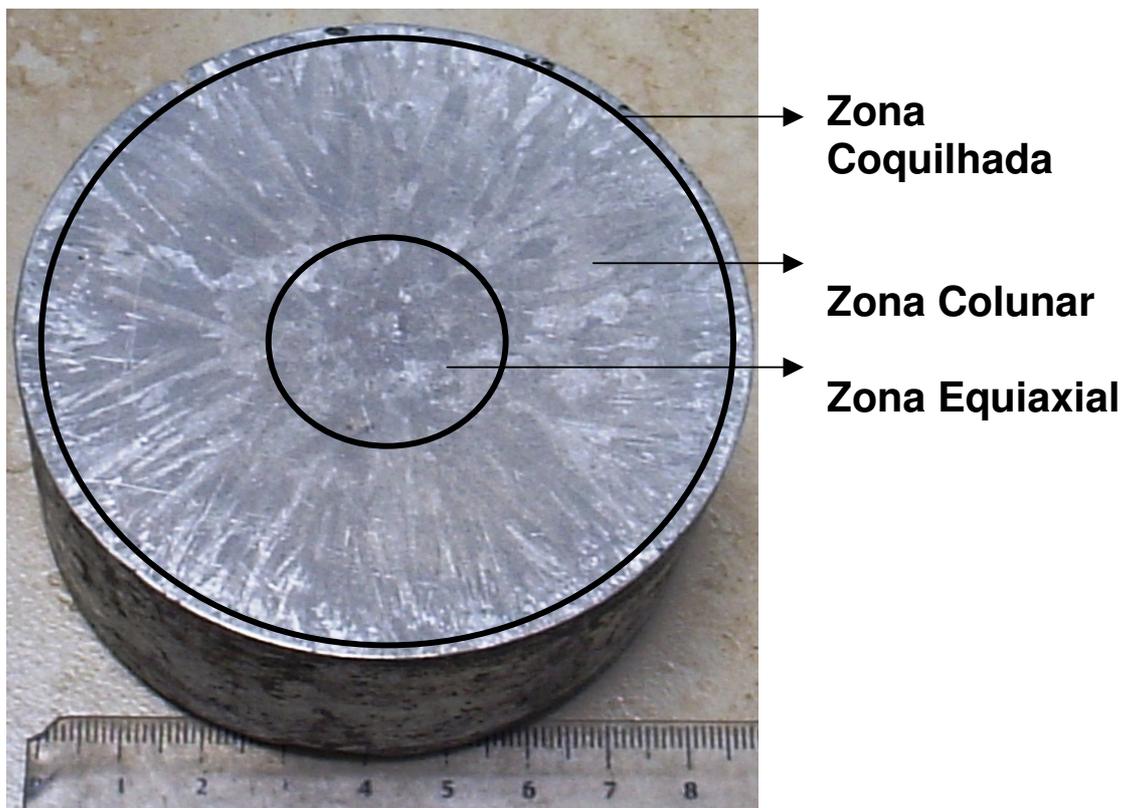


Figura 4.1- Macroestrutura obtida da solidificação sob fluxo de calor radial cilíndrico da liga Al 4,5%Cu. Secção transversal.

4.2. Curvas de Resfriamento

Foram utilizados oito termopares em diferentes posições, desde a parede do molde até o metal líquido, conforme figura 3.4 do capítulo 3, e um sistema de aquisição de dados acoplado a um computador, para se obter as curvas de variações de temperatura em função do tempo nas diferentes posições. A liga Al-4,5%Cu foi vazada na temperatura de 800°C, aproximadamente, com superaquecimento mínimo de 15%, a fim de garantir o total preenchimento do molde. A figura 4.2 apresenta a curva de resfriamento em função do tempo e a legenda dos termopares utilizados.

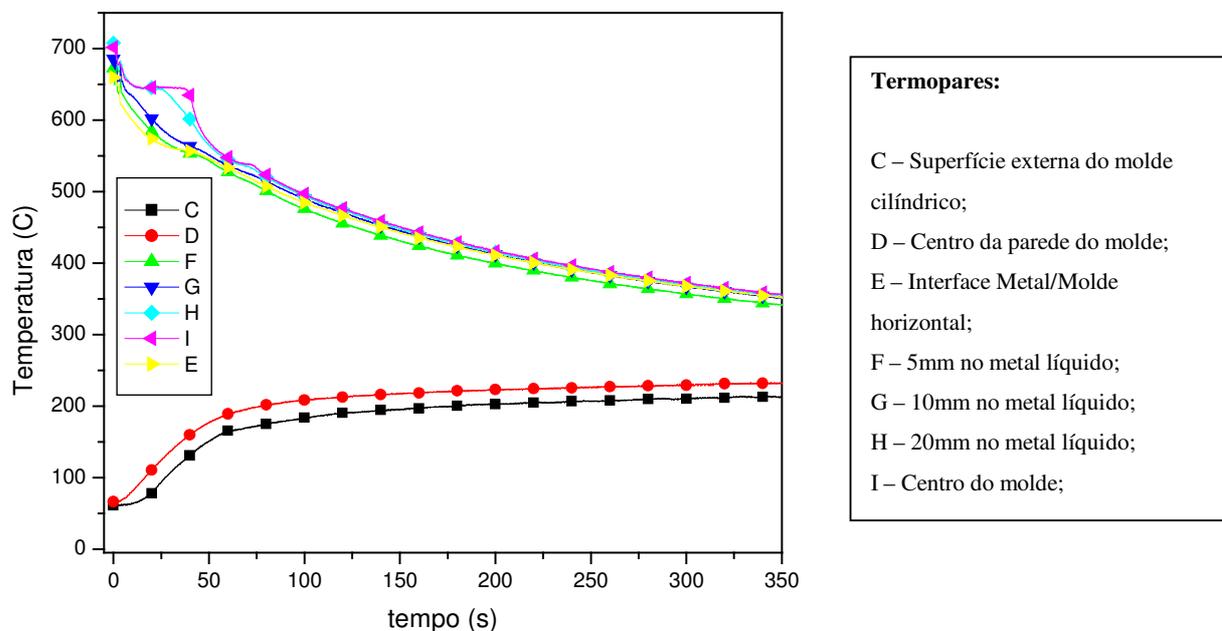


Figura 4.2—Curva de Resfriamento experimental, para diferentes posições no metal líquido e no molde radial cilíndrico, obtidos com termopares tipo K e sistema de aquisição de temperaturas computadorizado.

Na figura 4.2 as duas curvas inferiores apresentam os resultados obtidos para a superfície externa do molde e na metade da espessura do mesmo. Como pode ser observado cresce até os primeiros 60 segundos, depois se estabiliza em valores próximos de 200 segundos, permitindo

um gradiente de temperatura entre o metal e o ambiente.

Na parte superior da figura são apresentados os valores de temperatura nas várias posições do metal que solidifica. Pode se observar que apesar da liga conter 4,5% de cobre, e apresentar temperatura solidus de 560°C, o fim da solidificação ocorre na temperatura eutética (548°C), devido à rejeição de soluto nos canais interdendríticos.

Pode-se também observar, através do resultado obtido com o termopar posicionado no centro da peça (termopar I), que o superaquecimento no metal líquido é dissipado rapidamente após um intervalo de tempo em torno de 15 a 40 segundos. O tempo total de solidificação foi de 60 segundos aproximadamente.

4.3. Coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde

Como o coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde é um parâmetro que influi diretamente na estrutura final do fundido, é importante conhecer sua forma de variação e como tratá-la. A determinação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde foi feita utilizando os dados experimentais de temperatura em diferentes posições no metal e no molde, introduzidos em um modelo numérico que simula o processo de solidificação em molde cilíndrico. Para tanto, como já citado anteriormente, foi utilizado um modelo desenvolvido por Melo, Rizzo e Santos.

A figura 4.3 apresenta os resultados obtidos, para a variação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde, por Melo para este trabalho. Pode-se observar que a variação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde sob fluxo de calor radial cilíndrico é inicialmente alto e decresce rapidamente com o tempo atingindo o valor de aproximadamente 300 W/m²k e se estabiliza como consequência do gap de ar que surge devido à contração do metal solidificado.

Apenas para efeito de comparação, juntamente com os resultados obtidos para solidificação radial, são apresentados os resultados obtidos por Melo, 1991, em sua tese de doutorado, para a solidificação unidirecional, da mesma liga, em molde refrigerado. Os

resultados, comparativos, indicam que os valores dos coeficientes de transferência de calor, obtidos por molde refrigerado são bem maiores, estabilizando em valores em torno de 3000W/m²K [Melo, 1991].

Essa diferença pode ser explicada em parte, pelo fato de que na solidificação unidirecional vertical, há um deslocamento da parede lateral, fazendo com que, devido a ação da gravidade e da pressão metalostática, a camada solidificada encoste na superfície do molde refrigerado (coquilha), aumentando o contato e portanto diminuindo a resistência ao fluxo de calor aumentando o coeficiente de transferência de calor.

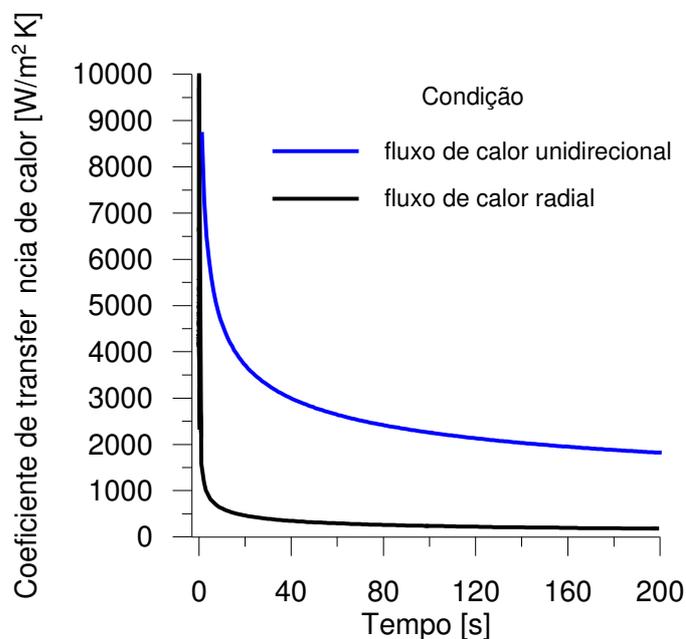


Figura 4.3—Variação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/coquilha sob fluxo de calor unidirecional e o coeficiente de transferência de calor para metal/molde sob fluxo de calor radial, calculados por método numérico.

A variação do coeficiente de transferência de calor com o tempo, em geral, pode ser colocado na seguinte forma:

$$h = a.t^{-n} \tag{4.1}$$

onde t é o tempo [s]; a e n são constantes dependentes do sistema metal/molde e das condições de solidificação, obtidas no experimento.

Baseado nos resultados experimentais, deste trabalho, a equação que descreve a variação do coeficiente de transferência de calor da interface metal/molde para fluxo de calor radial cilíndrico é dada por:

$$h = 1677 \cdot t^{-0,485} \quad (4.2)$$

4.3.1. Análise das Curvas de Resfriamento Experimental e Numérica

Uma vez determinada a variação do coeficiente de transferência de calor em função do tempo, os valores foram usados para determinar, a partir de método numérico, as curvas de variação de temperaturas nos diversos pontos no metal que se solidifica. Na figura 4.4, as curvas obtidas numericamente são comparadas com as curvas experimentais. A boa concordância observada indica que os valores do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde são consistentes, permitindo uma simulação coerente do processo de solidificação através do método numérico.

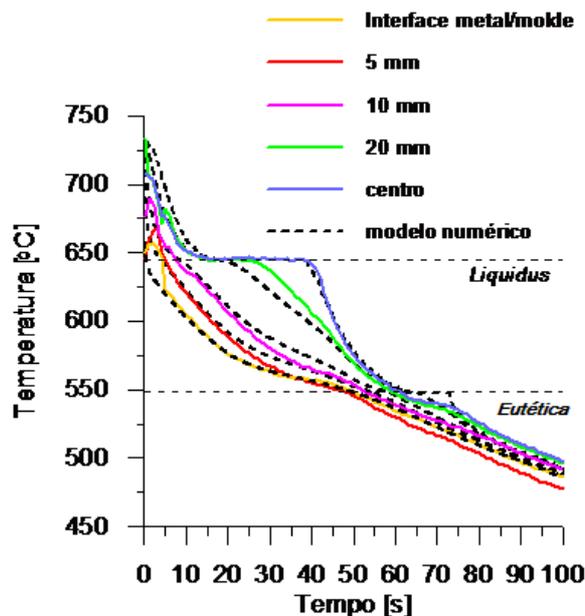


Figura 4.4—Curvas de resfriamento experimentais e numéricas.

Obs. No termopar posicionado na interface metal/molde, devido a problemas experimentais, não foi obtida a curva completa de solidificação.

4.4. Parâmetros de Solidificação

A determinação das curvas de resfriamento é extremamente importante na medida em que a partir das mesmas podem ser determinados vários parâmetros relativos ao processo de solidificação. A partir das informações obtidas através dos dados processados durante os ensaios foram estabelecidas as seguintes correlações:

- Variação da velocidade da isoterma liquidus em função da posição;
- Tempo local de solidificação em função da posição;
- Gradiente térmico no líquido junto à isoterma liquidus em função da posição;
- Variação da taxa de resfriamento em função da posição;

Neste trabalho são analisados principalmente os valores dos parâmetros de solidificação na região com estrutura colunar, já que a região equiaxial central é afetada por outras variáveis que tornam mais complexa a determinação desses parâmetros.

4.4.1. Variação da Velocidade da Posição da Isoterma Liquidus em função do tempo

A partir das curvas de resfriamento correspondentes a cada um dos termopares pode ser obtida a curva de variação da velocidade de avanço da isoterma liquidus em função da posição. Para tanto se marca um intervalo de tempo (t') para o qual a isoterma liquidus passou na posição correspondente a um determinado termopar e o intervalo de tempo (t'') para o qual ela passou na posição correspondente ao termopar seguinte. Da relação entre a diferença das distâncias dos termopares e a diferença das temperaturas correspondentes obtém-se a velocidade de avanço,

ou seja:

$$v_L = \frac{\Delta x}{t'' - t'} \quad (4.3)$$

A figura 4.5 apresenta a variação do inverso da velocidade de avanço da isoterma liquidus em função da posição no metal. A utilização do inverso da velocidade é mais conveniente porque teoricamente no instante final da solidificação a velocidade tenderia ao infinito [Santos e Garcia,1998].

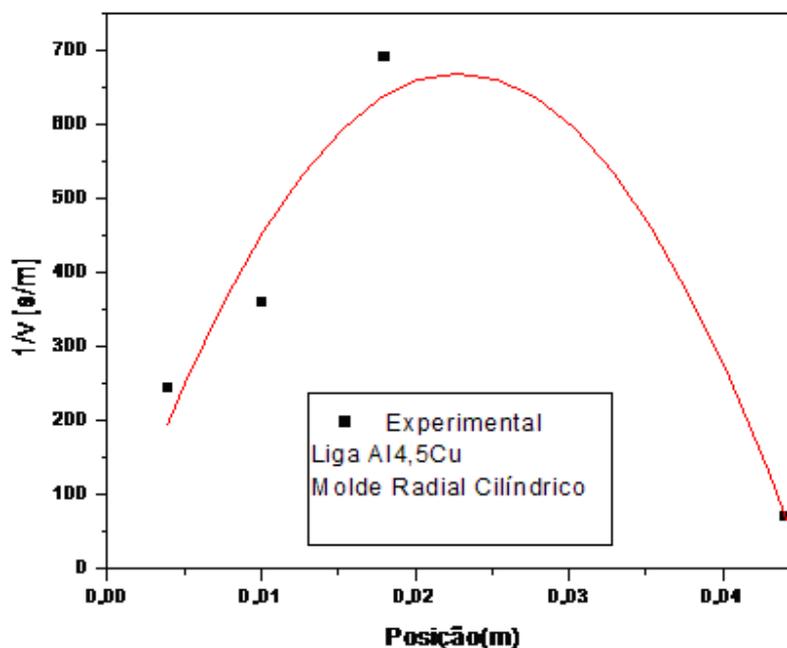


Figura 4.5—Comportamento da velocidade de avanço da *isoterma liquidus*.

Uma análise da curva obtida permitiu concluir que a velocidade de avanço da isoterma é inicialmente alta, decresce com a velocidade de solidificação, mas em seguida apresenta uma reversão no seu comportamento, aumentando de novo e alcançando um valor alto ao término da solidificação. Isto ocorre devido à diminuição drástica do volume de metal líquido ao final do processo em geometria cilíndrica [Santos, 1985].

Esse comportamento é coerente com os resultados obtidos por Santos em 1985, através de seu modelo analítico. Segundo o autor esse aumento significativo da velocidade, que teoricamente tende ao infinito no instante final, é consequência da redução drástica do metal

líquido no final do processo tendendo a uma linha no caso de geometria cilíndrica, e da alta eficiência da extração de calor nessa geometria através da camada de metal já solidificada [Santos, 1985].

4.4.2. Tempo Local de Solidificação

Definido como a diferença entre o tempo de passagem da isoterma *solidus* (t_{SS}) e o tempo de passagem da isoterma *liquidus* (t_{SL}) por um determinado ponto da peça em solidificação.

$$t_L = t_{SS} - t_{SL} \quad (4.4)$$

A figura 4.6 apresenta a variação do tempo local de solidificação em função da posição obtida experimentalmente.

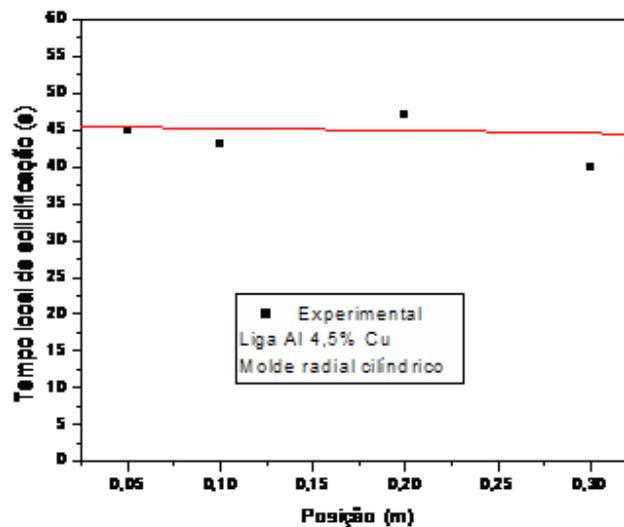


Figura 4.6—Comportamento do tempo local de solidificação em função da posição.

Observa-se que para o fluxo de calor radial o tempo local de solidificação não varia significativamente na zona colunar, apresentando um decréscimo na região equiaxial.

Em geral, os resultados obtidos através da solidificação unidirecional indicam que o tempo local cresce continuamente com a evolução da solidificação. O que provavelmente acontece na solidificação radial é que a aceleração do processo a partir de certo instante, resultante da alta eficiência da extração de calor e da diminuição acelerada do volume de líquido remanescente, afeta diretamente o tempo local de solidificação, podendo provocar uma diminuição do mesmo.

4.4.3. Gradiente térmico no líquido em frente à isoterma liquidus

O gradiente de temperatura em frente à isoterma *liquidus* (G_l), que correspondente à posição das pontas das dendritas, (G_l) é obtido através da seguinte relação:

$$G_l = \frac{T' - T_{liq}}{\Delta x} \quad (4.5)$$

onde T_{liq} é a temperatura liquidus correspondente à posição de um determinado termopar, T' é a temperatura correspondente à posição do termopar seguinte e Δx é a distância entre eles.

A figura 4.7 apresenta a variação do gradiente de temperatura em função da posição obtido experimentalmente e pelo método numérico.

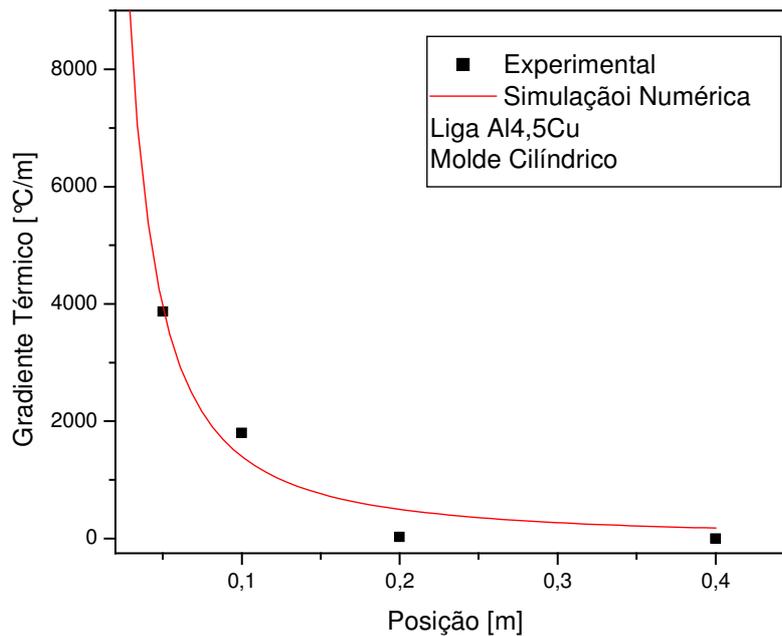


Figura 4.7—Comportamento da variação dos Gradientes Térmicos em função da posição.

O Gradiente Térmico na posição da isoterma liquidus decresce rapidamente devido à eficiência da retirada de calor na geometria cilíndrica. Quando comparamos o valor experimental e o obtido pelo método numérico, observamos que a boa concordância indica que a variação do coeficiente de transferência de calor metal/molde calculado pelo método numérico, é confiável e permite que utilizemos simulações de solidificação.

4.4.4. Taxa de Resfriamento

A taxa de resfriamento (\dot{T}) é definida como a inclinação da curva de resfriamento no momento em que a temperatura liquidus é alcançada em um determinado ponto, podendo ser obtida pela relação:

$$\dot{T} = G_L \cdot V_L \quad (4.6)$$

onde: G_L representa o gradiente de temperatura junto à isoterma liquidus e V_L a velocidade de deslocamento desta isoterma.

A figura 4.8 mostra a variação da taxa de resfriamento obtida experimentalmente.

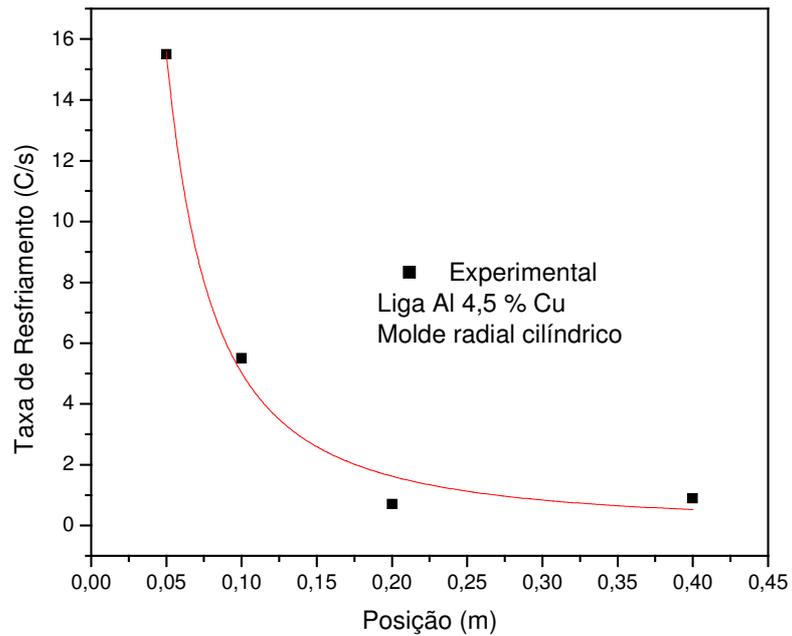


Figura 4.8—Comportamento de variação da Taxa de Resfriamento em função da posição.

Como pode ser observada, a taxa de resfriamento apresenta uma queda acentuada durante o processo.

4.5. Microestrutura

A figura 4.9 apresenta micrografias para diferentes posições, a partir da interface metal/molde.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.9—Microestruturas sob fluxo de calor radial da liga Al -4,5%Cu;(a) Próximo à parede do molde, zona coquilhada;(b) A 15 mm da interface metal/molde, zona colunar;(c) Distante 25 mm da interface metal/molde, zona colunar;(d) Centro do molde, zona equiaxial central.

A figura 4.9(a) refere-se à microestrutura dendrítica da zona coquilhada da peça, onde se observa não haver uma direcionalidade definida dos grãos. As figuras 4.9 (b e c) foram obtidas na região colunar da peça onde se observa dendritas com crescimento bem definido. Na figura 4.9(d) nota-se que a microestrutura no centro da peça já caracterizada por uma estrutura equiaxial também sem direcionamento dendrítico definido.

Na figura 4.10 e 4.11 são apresentadas às medidas experimentais da variação dos espaçamentos dendríticos primários e secundários em função da distância da interface metal/molde, restrita a região com estrutura colunar.

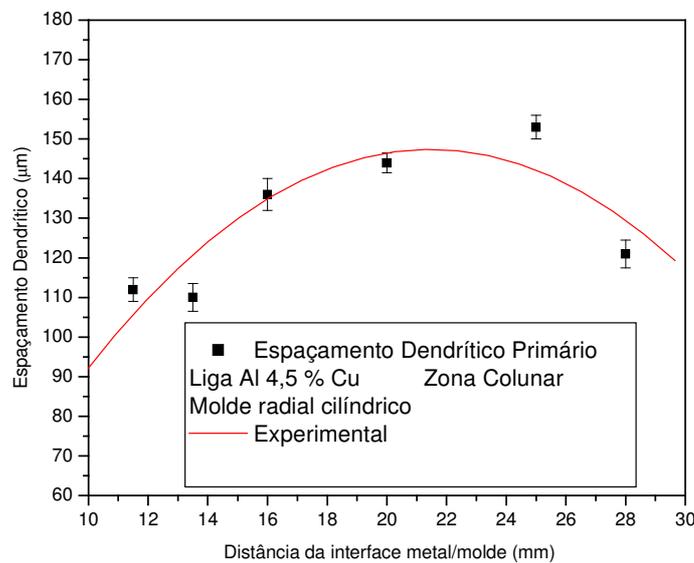


Figura 4.10—Variação dos espaçamentos dendríticos primários em função da distância da interface metal/molde na zona colunar.

Na figura 4.10 nota-se que inicialmente há um acréscimo do espaçamento dendrítico primário com a evolução da solidificação até uma determinada posição, após o que ele sofre uma reversão de comportamento apresentando uma diminuição. Esses resultados são coerentes com a variação da velocidade de avanço da isoterma liquidus que afeta diretamente o espaçamento dendrítico primário e que também apresenta uma reversão de comportamento.

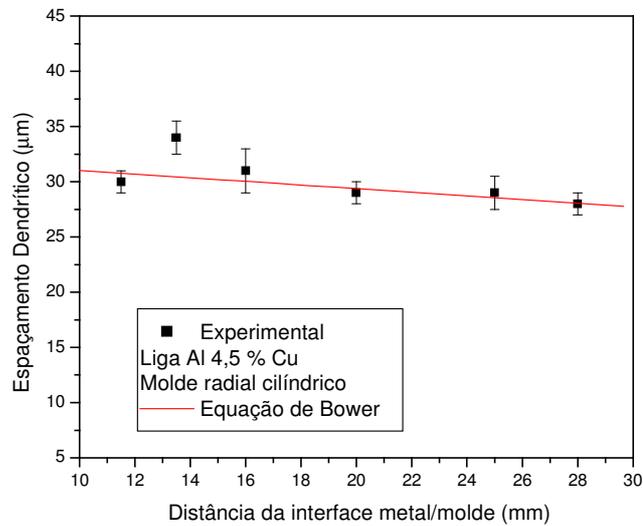


Figura 4.11—Variação dos espaçamentos dendríticos secundários em função da distância da interface metal/molde, experimental e pela equação de Bower.

A partir dos resultados observados nota-se que o espaçamento dendrítico secundário não apresenta uma variação significativa na região colunar. Esse comportamento é coerente com o resultado obtido para o tempo local de solidificação que também tem uma variação significativa na região colunar. Como o espaçamento dendrítico secundário depende diretamente do tempo local de solidificação, ele não deve também apresentar variação significativa nessa região.

Os valores dos espaçamentos dendríticos secundários pela equação Bower foram obtidos pela relação entre os espaçamentos secundários e o tempo local de solidificação, ou seja:

$$\lambda_2 = Kt_l^a \quad (4.7)$$

onde K e a são constantes com valores correspondentes respectivamente a 7,5 e 0,39[Garcia,2001].

A partir dos resultados obtidos nota-se que o espaçamento dendrítico secundário obtido através da equação de Bower quando comparado, figura 4.11, com os dados obtidos experimentalmente não apresenta variações significativas.

4.6. Permeabilidade

A partir dos resultados obtidos para os espaçamentos dendríticos primário e secundário foram determinadas as variações da permeabilidade em função da fração volumétrica de metal líquido, para diferentes posições na região com estrutura colunar. Para a determinação da permeabilidade dos canais interdendríticos foram utilizadas as equações 2.2 e 2.4 propostas por Santos, para permeabilidade sob fluxo normal aos ramos dendríticos primários.

A figura 4.12 apresenta os resultados obtidos para avaliação da permeabilidade em função da fração de líquido em diferentes posições na zona colunar.

Na figura 4.13 é possível observar que a permeabilidade dos canais interdendríticos na zona colunar aumenta com a distância da interface metal/molde até uma distância de 25 mm próxima do final da zona colunar, e em seguida apresenta uma queda até o final da zona colunar (distante aproximadamente 28mm). Isto pode ser explicado através da relação entre os espaçamentos primário (λ_1) e secundário (λ_2). Das curvas das figuras 4.10 e 4.11 pode-se notar que o espaçamento secundário não apresenta uma variação muito grande, mas o espaçamento primário apresenta uma inversão de comportamento, ou seja, cresce inicialmente com a distância da interface metal/molde diminuindo no final da zona colunar. De acordo com as equações 2.2 e 2.4 nota-se que a redução do espaçamento primário provoca a diminuição da permeabilidade. A variação da relação entre os espaçamentos secundário e primário apresentada na figura 4.14.

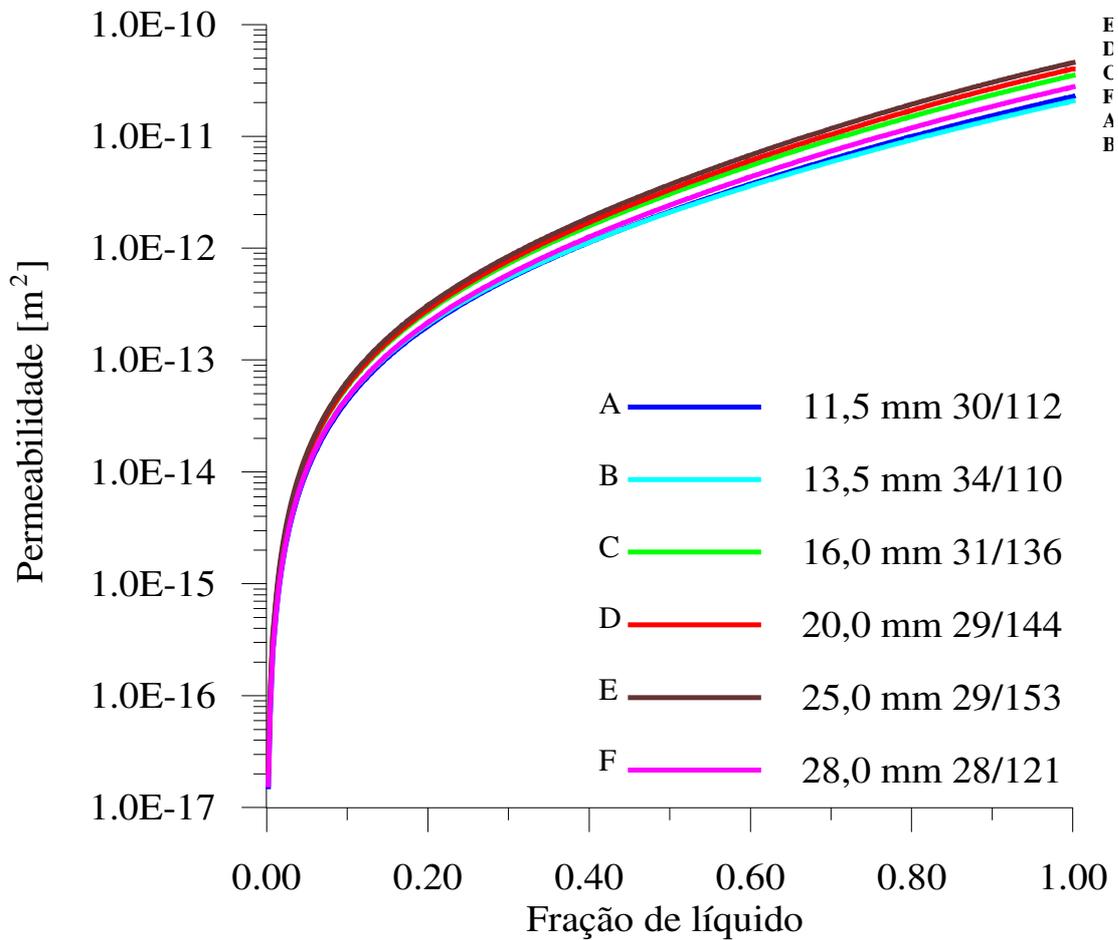


Figura 4.12—Curvas da permeabilidade dos canais interdendríticos da zona colunar, para liga Al 4,5% Cu sob fluxo de calor radial cilíndrico.

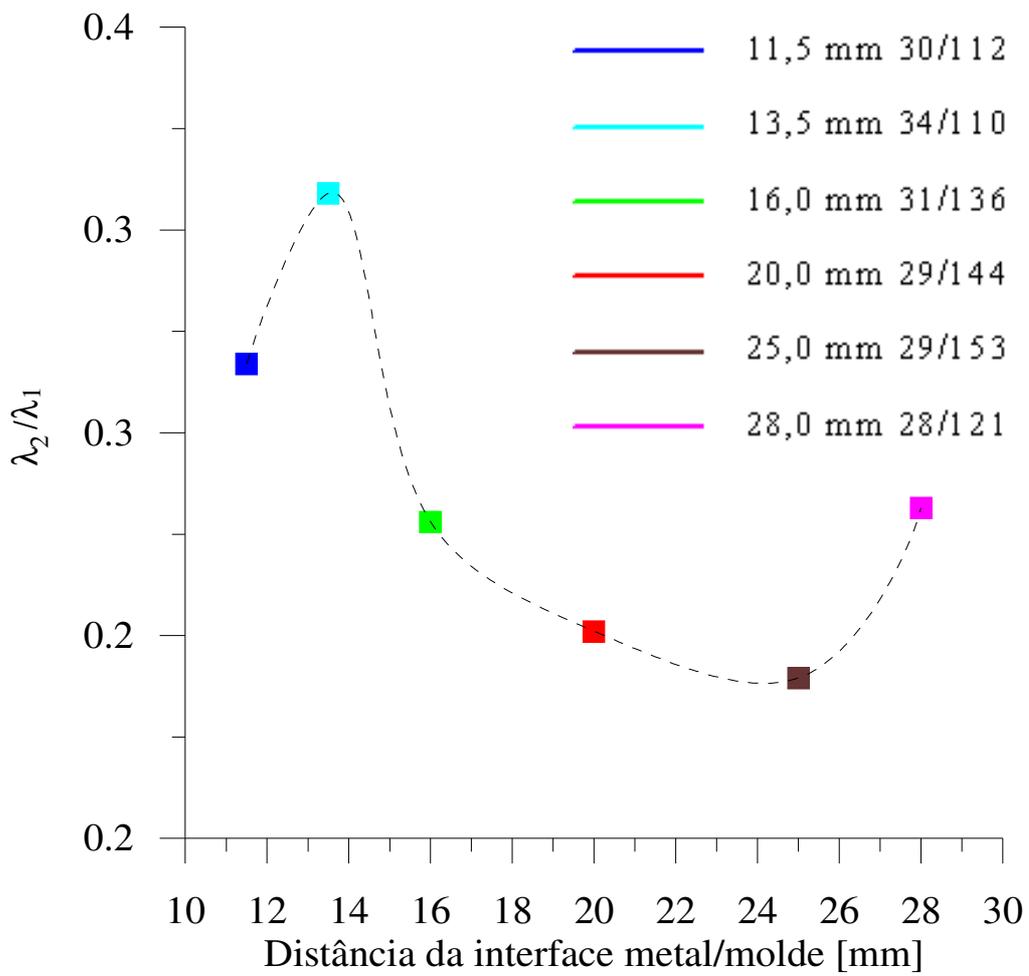


Figura 4.13—Relação entre os espaçamentos secundário e primário.

4.7. Análise da concentração em peso de cobre (MEV)

A seguir serão apresentados resultados obtidos para o teor de cobre em diferentes distâncias da interface metal/molde.

Na figura 4.14 é representado a imagem (a) da micrografia, na zona colunar no centro dos ramos primários e no centro dos espaçamentos interdendríticos, e os gráficos (b) da análise do MEV.

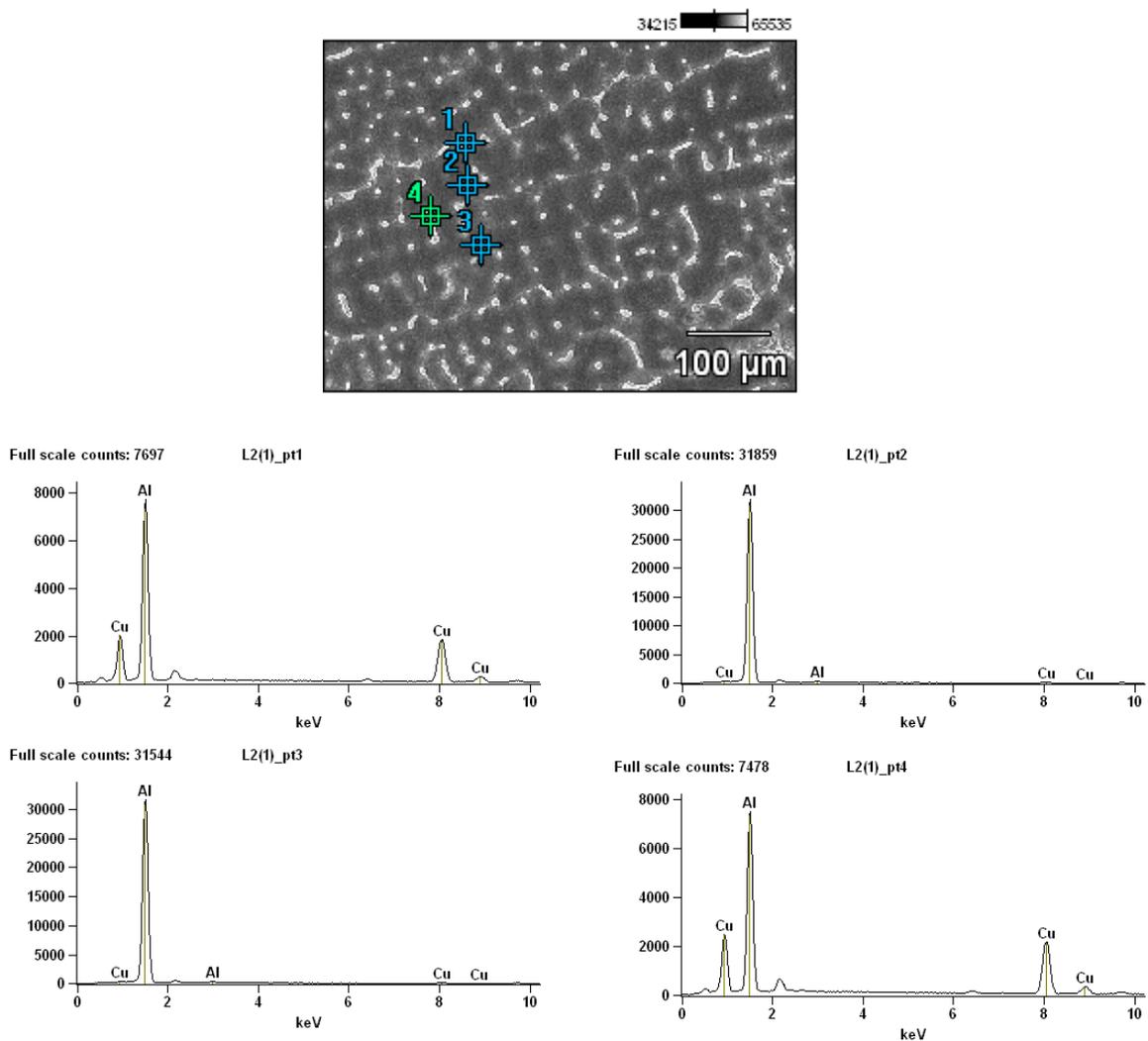


Figura 4.14—(a) Micrografia, zona colunar e distante 14mm da interface; (b) Gráficos da análise do MEV nos pontos 1,2,3 e 4.

Na figura 4.15 é representado a imagem (a) da micrografia, na zona colunar no centro dos ramos primários e no centro dos espaçamentos interdendríticos, e os gráficos (b) da análise do MEV.

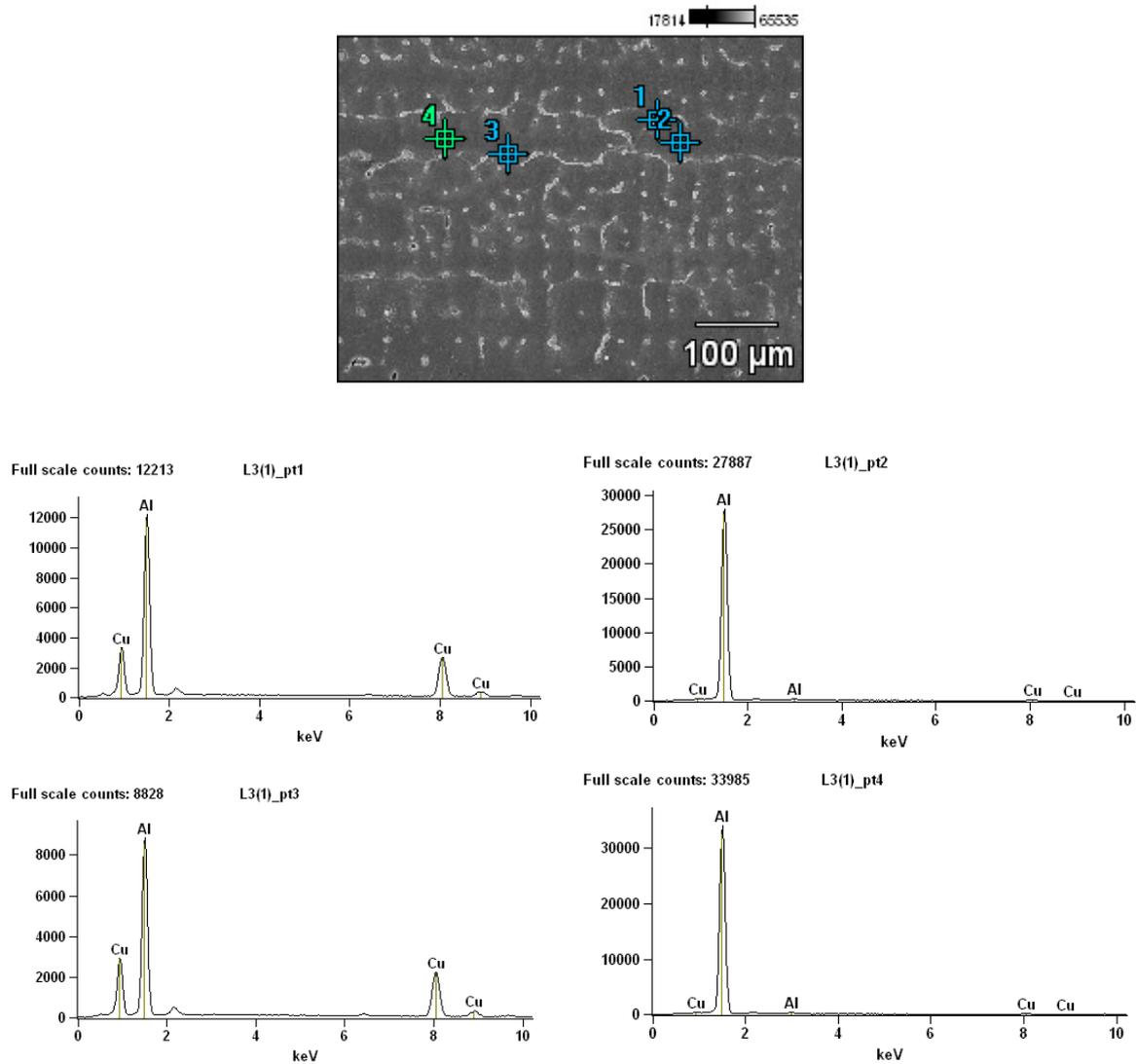


Figura 4.15—(a) Imagem da micrografia na zona colunar distante 25 mm da interface; (b) Gráfico da análise dos pontos 1, 2, 3 e 4 em um MEV.

Na figura 4.16 é representado a imagem (a) da micrografia, na zona colunar no centro dos ramos primários e no centro dos espaçamentos interdendríticos e os gráficos (b) da análise do MEV.

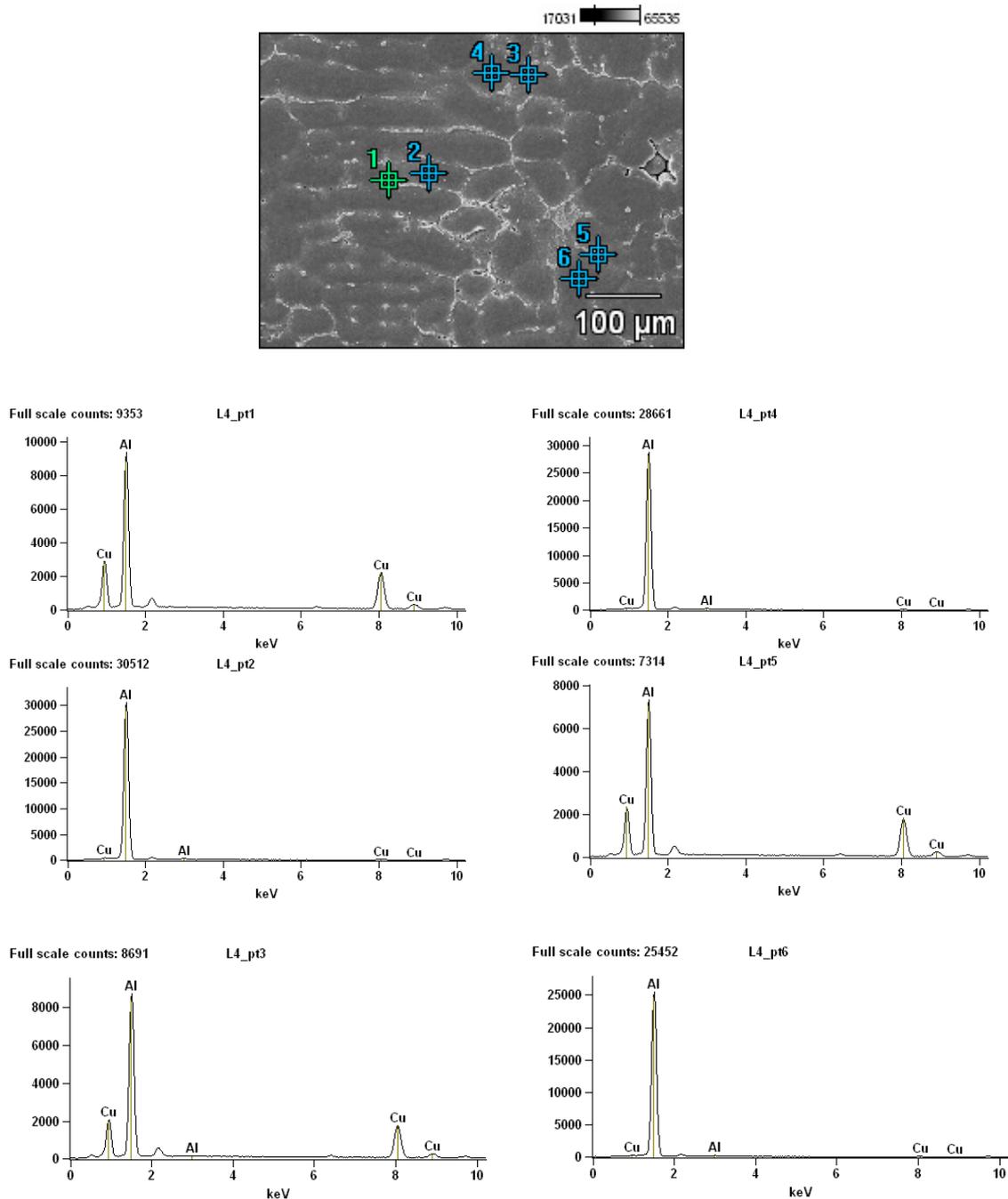


Figura 4.16—(a) Micrografia, zona equiaxial, a 36 mm da interface; (b) Gráfico da análise do MEV (pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6).

A seguir são apresentadas os gráficos do mapeamento do teor de soluto (Cobre) referente às microestruturas da zona colunar e equiaxial central da solidificação sob fluxo de calor radial cilíndrico da liga Al 4,5%Cu.

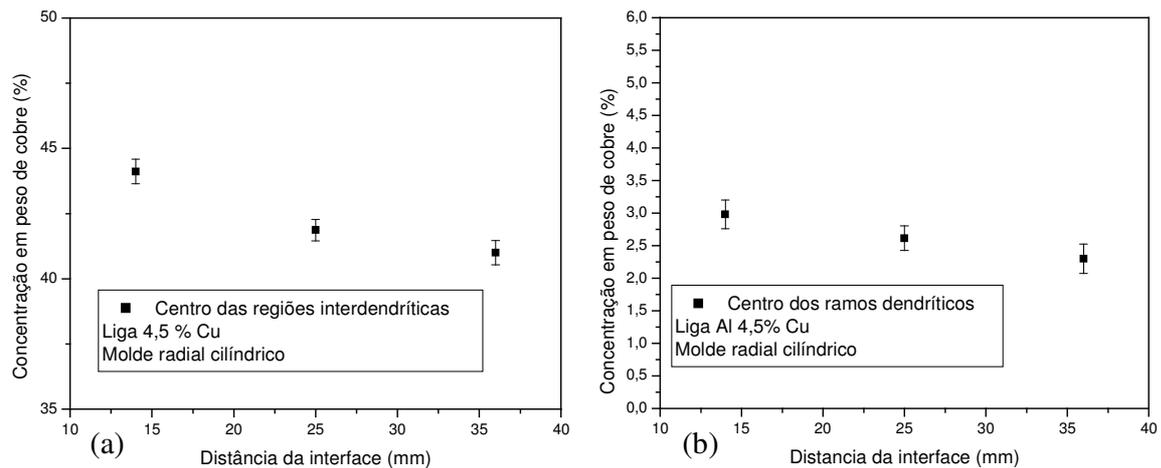


Figura 4.17—(a e b) Teor de cobre em função das distâncias da interface.

Na figura 4.17 são apresentados os resultados do teor de cobre em diferentes distâncias da interface metal/molde.

Conforme pode ser visto na figura, aparentemente há um decréscimo no teor de cobre com a distância da interface metal/molde. No centro dos espaçamentos interdendríticos o teor de cobre deve tender à composição eutética (33%), dando origem a uma estrutura eutética composta de uma fase rica em alumínio, com 5,65% de cobre, e uma fase rica em cobre com 52,5% de cobre. Como o ataque químico para revelar a microestrutura ataca preferencialmente à fase rica em alumínio, os resultados obtidos possivelmente são afetados por isso, não apresentando uma análise precisa.

Capítulo 5

5. Conclusão de trabalho

5.1. Conclusões

Os resultados experimentais e os teóricos obtidos com o modelo numérico, relativos à solidificação radial cilíndrica, permitem que sejam extraídas as seguintes conclusões:

- 1) O coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde para solidificação radial apresentou, como esperado, valores bem menores que os obtidos sob fluxo unidirecional, pois os efeitos da contração volumétrica do metal, no caso da solidificação radial, não são compensados pelo aumento do contato entre o metal e o molde causado pelo efeito gravitacional no caso da solidificação radial.
- 2) Os parâmetros térmicos e estruturais estudados apresentaram-se coerentes com modelo analítico proposto por Santos em 1985, que indica que na geometria cilíndrica a eficiência de retirada de calor é maior, quando comparada com a solidificação unidirecional.
- 3) A variação da velocidade de avanço da isoterma liquidus com a distância da interface metal/molde apresentam uma inversão de comportamento, caindo inicialmente e aumentando no final do processo de solidificação.
- 4) O tempo local de solidificação não apresentou variação significativa na extensão da zona colunar, durante o processo de solidificação.

- 5) O gradiente térmico e a taxa de resfriamento decrescem rapidamente com a evolução da solidificação.
- 6) A variação do espaçamento dendrítico primário com a distância da interface metal/molde na zona colunar sofre uma inversão de comportamento coerente com a variação da velocidade de avanço da isoterma liquidus.
- 7) O espaçamento dendrítico secundário não apresenta uma variação significativa na extensão da zona colunar.
- 8) A permeabilidade dos canais interdendríticos cresce inicialmente com a distância da interface metal/molde e apresenta um decréscimo no final da zona colunar devido às influências dos espaçamentos dendríticos primário e secundário.
- 9) Os teores de cobre no líquido remanescente aparentemente apresentam um decréscimo da interface metal/molde até o centro da peça devido à rejeição de soluto e ao ataque químico.
- 10) As comparações entre os resultados experimentais e os obtidos através do método numérico mostram boa concordância indicando a precisão deste último.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

- I. Analisar o processo de solidificação de ligas metálicas em moldes cilíndricos refrigerados;
- II. Analisar o processo de solidificação sob fluxo de calor radial de outras ligas e metais puros;
- III. Realizar uma análise comparativa da solidificação de ligas metálicas sob fluxo de calor radial e unidirecional, nas mesmas condições.

Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **Metals Handbook: properties and selection of metals**, 8th edition, Ohio, United States of America, 1961, 1300 p

Andrade, R. B. **Análise das influências da geometria e do material do molde na formação da microestrutura de ligas Alumínio-Cobre**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2003, 86 p. Dissertação (Mestrado).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO- ABAL. **Guia técnico do Alumínio: Laminação**, 2^a ed. São Paulo, SP, 2004, 176 p.

Bresciani Filho, E. **Seleção de metais não ferrosos**, Editora Unicamp, 2.ed., 1997.

Chakraborty, S., Dutta, P. **An analytical solution for conduction-dominated unidirectional solidification of binary mixtures**. Applied Mathematical Modelling, v. 26, 2002, p. 545-561
Coutinho, B. C. **Materiais Metálicos para Engenharia**. Belo Horizonte, MG: Fundação Cristiano Ottoni, 1992, 405 p.

Domingos, M. A. M. **Análise da solidificação unidirecional de ligas com diferentes difusividades térmicas**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2004, 66 p. Dissertação (Mestrado).

Ferreira, I. L. et al. **Theoretical and experimental analysis of inverse segregation during unidirectional solidification of an Al-6.2 wt.% Cu alloy.** Scripta Materialia, v. 49, 2003, p. 339-344.

Ferreira, I. L. et al. **Analytical, numerical, and experimental analysis of inverse macrosegregation during upward unidirectional solidification of Al-Cu alloys.** Metallurgical and materials transactions, v. 35, 2004, p. 285-298

Ferreira, I. L., Garcia, A., Nestler, B. **On macrosegregation in ternary Al-Cu-Si alloys: numerical and experimental analysis.** Scripta Materialia, v. 50, 2004, p. 407-411.

Flemings, M.C. **Solidification processing**, 1st ed. New York, NY: Ed. McGraw-Hill, 1974, 364p.

Fortin, G., Louchez, P.R., Samuel, F.H., **Evolution of the heat transfer during the radial solidification of pure aluminium,** Universite du Quebec, Cah. Inf. Tech. Rev. Metall. Vol. 91, no.5, pp. 771-780, May 1994.

Fortin, G., Louchez, P.R., Samuel, F.H., **Experimental method for obtaining a mold by unidirectional and radial solidification.** Universite du Quebec, Cah. Inf. Tech. Rev. Metall., pp. 265-292, May 1993.

Garcia, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações.** Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2001, 399 p.

- Griffiths, W.D. **The heat-transfer coefficient during the unidirectional solidification of an Al-Si alloy casting**, Metallurgical and Materials Transactions B, v. 30B, 1999, p. 473-482.
- Gündüz, M.; Çadirli, E. **Directional solidification of aluminium-copper alloys**. Materials Science & Engineering A, v. 327, 2001, p. 167-185.
- Haddad, O.M., M. Al-Nimr, and M. Silieti. The effect of the gas-gap formation due to shrinkage on the rate of heat transfer during solidification. Numerical heat transfer, part. A, cap.40 pp. 887-900, 2001.
- Hale, S. W.; Keyhani, M.; Frankel, J. I. **Design and control of interfacial temperature gradients in solidification**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 43, 2000, p. 3795-3810.
- Hyun, S. K., Nakajima, H. **Anisotropic Compressive Properties of Porous Copper by Unidirectional Solidification**. Materials Science & Engineering A, v. 340 [1-2], 2003, p. 258-264.
- Kiyan, C. **Desenvolvimento de um método analítico aprox. Para análise da formação de microporosidades em peças fundidas**, (tese doutorado) UNICAMP, 1992.
- Kuznetsov, A. V., Xiong, M. **Dependence of microporosity formation on the direction of solidification**. Int. Comm. Heat and Mass Transfer, v. 29, 2002, p. 25-34.

- Lau, F., Lee, W.B., Xiong, S.M., Liu, B.C. **A study of the interfacial heat transfer between na iron casting and a metallic mould**, 1998.
- Lin, X. et al. **History-dependent selection of primary cellular/dendritic spacing during unidirectional solidification in aluminum alloys**. Acta Materialia, v. 47, 1999, p. 3271-3280.
- Lin, X. et al. **Self-consistent modeling of morphology evolution during unidirectional solidification**. Science and Technology of Advanced Materials, v. 2, 2001, p. 293-296.
- Liu, Y. et al. **Primary cellular/dendritic spacing selection in rapidly solidified peritectic alloy**. Materials Letters, v. 59, 2005, p. 2915-2919.
- Liu, D. R. et al. **Stochastic modeling of columnar-to-equiaxed transition in Ti-(45–48 at%) Al alloy ingots**. Materials Science & Engineering A, v. 415, 2006, p. 184-194.
- Loulou, T., Artyukhin, E.A., Bardon, J.P. **Estimation of thermal contact resistance during the first stages of metal solidification process: I- experiment principle and modelisation**, Internation journal of heat mass transfer, v.42, 1999, pp.2119-2127.
- Loulou, T., Artyukhin, E.A., Bardon, J.P. **Estimation of thermal contact resistance during the first stages of metal solidification process: I- experiment principle and modelisation**, Internation journal of heat mass transfer, v.42, 1999, pp.2129-2142.

- Ma, D. et al. **Unidirectional solidification of Zn-rich Zn-Cu peritectic alloys – II Microstructural length scales**. Acta Materialia, v. 48, 2000, p. 1741-1751.
- Ma, D. et al. **Unidirectional solidification of Zn-rich Zn-2.17wt%Cu hypo-peritectic alloy**. Science and Technology of Advanced Materials, v. 2, 2001, p. 127-130.
- Maeda, J. et al. **Unidirectional solidification of Y-Ba-Cu-O/Ag superconducting rods**. Physica C, v. 322, 1999, p. 151-162.
- Melo, M. L. N. M. **Análise numérico/experimental da formação de microporosidades durante a solidificação de ligas de alumínio**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996, 255 p. Tese (Doutorado).
- Melo, M. L. N. M., Santos, C.A., Penhalber, C.A., **Determinação numérico/experimental do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde durante a solidificação do aço inoxidável AISI 304**. Universidade São Francisco, Itatiba, 2000.
- Melo, M. L. N. M., Rizzo, E. M. S., Santos, R. G. **Predicting dendrite arm spacing and their effect on microporosity formation in directionally solidified Al-Cu alloy**. Journal of Materials Science, v. 40, 2005, p. 1599-1609.
- Melo, M. L. N. M., Rizzo, E. M. S., Santos, R. G. **Numerical model to predict the position, amount and size of microporosity formation in Al-Cu alloys by dissolved gas and solidification shrinkage**. Materials Science & Engineering A, v. 374, 2004, p. 351-361.

- Melo, M. L. N. M., Rizzo, E. M. S., Santos, R. G. **Predicting dendrite arm spacing and their effect on microporosity formation in directionally solidified Al-Cu alloy.** Journal of Materials Science 40, p. 1599-1609.
- Ohno, A. **Solidificação dos metais.** São Paulo, SP: Livraria Ciência e Tecnologia Editora, 1988, 185 p.
- Osório, W. R., Garcia, A. **Modeling dendritic structure and mechanical properties of Zn-Al alloys as a function of solidification conditions.** Materials Science & Engineering A, v. 325, 2002, p. 103-111.
- Osório, W. R., et al. **Mechanical properties as a function of thermal parameters and microstructure of Zn-Al castings.** Journal of Materials Processing Technology, v. 143-144, 2003, p. 703-709.
- Peres, M. D., Siqueira, C. A., Garcia, A. **Macrostructural and microstructural development in Al-Si alloys directionally solidified under unsteady-state conditions.** Journal of Alloys and Compounds, v. 381, 2004, p. 168-181.
- Piwonka, T. S., Flemings, M. C. **Pore formation in solidification.** Transactions of the Metallurgical Society of AIME, v. 236, 1966, p. 1157-1165.
- Quaresma, J.M.V. **Correlação entre condições de solidificação, microestrutura e resistência mecânica,** (doutorado), UNICAMP, 1999.

Rappaz, M., Stefanescu, D. M., Modeling of microstructural evolution – **Metals Handbook**, Vol. 15, pp. 883-891; ASM, Ohio, USA, 1988.

Rizzo M. S. E., Melo, M.L.N.M., Santos, R.G., **Análise numérico/experimental de um processo de fundição de precisão**, 1 workshop brasileiro de fundição de precisão Vol.2, 1993

Rocha, O. L., Siqueira, C. A., Garcia, A. **Cellular/dendritic transition during unsteady-state unidirectional solidification of Sn-Pb alloys**. Materials Science & Engineering A, v. 347, 2003, p. 59-69.

Ruddle, R. W. *The solidification of castings*. London: The Institute of Metals, 1957.

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

Santos, C. A., et al **Metal-Mold Heat transfer during horizontal and vertical unsteady-state solidification of Al-Cu and Sn-Pb alloys**. Inverse problems in science and engineering V.12, No. 3, 2004, pp. 279-296

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

Santos, R. G. **Solidificação sob condições de fluxo de calor radial**. Tese de livre docência, Campinas, 1985.

Santos, R. G. **Transformação de Fases em Materiais Metálicos**, Editora Unicamp, 2006.

Santos, R. G., Melo, M.L.N.M. **Permeability of interdendritic channels**. 2004, Materials Science and Engineering A. 391 151-158 p.

Santos, R. G. **Apostila de Modelagem do Processo de Solidificação de Metais e Ligas**. 1998, 118 p.

Sharma, D.G.R., Krishnan, M., Ravindran, C., *Determination of the rate of latent heat liberation in binary alloys*; **Materials characterization** cap.44, pp. 309-320, 2000.

Shijie, L., Yafang, H., **A study of the heat parameters during bidirectional solidification**, Science and Technology of Adv. Materials 2 pp. 281-284, 1999.

Siqueira, C. A., Cheung, N., Garcia, A. **The columnar to equiaxed transition during solidification of Sn-Pb alloys**. Journal of Alloys and Compounds, v. 351, 2003, p. 126-134.

Spinelli, J. E., et al. **Influence of melt convection on dendritic spacings of downward unsteady-state directionally solidified Al-Cu alloys**. Materials Science & Engineering A, v. 383, 2004, p. 271-282.

- Spinelli, J. E., Ferreira, I. L., Garcia, A. **Influence of melt convection on the columnar to equiaxed transition and microstructure of downward unsteady-state directionally solidified Sn-Pb alloys.** Journal of Alloys and Compounds, v. 384, 2004, p. 217-226.
- Spinelli, J. E., Peres, M. D., Garcia, A. **Thermosolutal convective effects on dendritic array spacings in downward transient directional solidification of Al-Si alloys.** Journal of Alloys and Compounds, v. 403, 2005, p. 228-238.
- Spim, J.A. Jr., **Aplicação da modelagem matemática na definição integral da solidificação para projeto ou reprogramação de sistema de fundição,** (tese doutorado), UNICAMP 1996.
- Spim, J.A. Jr., Garcia, A., **Numerical Analysis of solidification of complex shaped body: coupling of mesh elements of different geometries,** 2000.
- Sousa, T. X. A. **Overheating influence in the solidification parameters and microstructure formation of aluminum 5052 alloy.** In: COBEM, XVII, 2005, Ouro Preto, MG.
- Sousa, T. X. A. **Análise do Efeito do Superaquecimento na Solidificação Unidirecional da Liga AA5052, 2005** Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.(Dissertação (Mestrado)).
- Souza, E.N. **Desenvolvimento de um equipamento de lingotamento contínuo horizontal para metais não-ferrosos,** Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 1997.

- Souza, E.N.; Cheung, N.; Santos, C.A.; Garcia, A. **The variation of the metal/molde heat transfer coefficient along the cross section of cylindrical shaped casting**, Proceedings of the inverse problems: Design and Optimization Symposium, R.J., 2004, in press.
- Su, R.-J., Overfelt, R. A., Jemian, W. A. **Microstructural and compositional transients during accelerated directional solidification of Al-4.5 Pct Cu**. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 29A, 1998, p. 2375-2381.
- Su, R.-J., Overfelt, R. A., Jemian, W. A. **Transient effects in the directional solidification of Al-Cu alloys**, Journal crystal growth, 1997, pp.625-634.
- Walker, J. L. **Physical Chemistry of Process Metallurgy**. G. R. Pierre, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, United States of America, 1961, p. 845.
- Winegard, W. C. **An introduction to the solidification of metals**. Bungay, Suffolk, Great Britain: Rychard Clay and Company, Ltd., 1964, 98 p.
- Wu, K. Y., Prud'homme, M., Nguyen, T.H., **numerical study of melting around a vertical cylinder for two boundary condition**, Internacional Journal of heat and mass, V.32. I.10, 1989, pp. 1927-1938.