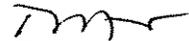


ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR SUZIMARA ROSSILHO
DE ANDRADE E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 10/09/1999


ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Simulação de Solidificação de Ligas Metálicas
Utilizando Método de Elementos Finitos**

**Autor : Suzimara Rossilho de Andrade
Orientador: Rezende Gomes dos Santos**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Simulação de Solidificação de Ligas Metálicas Utilizando Método de Elementos Finitos

Autor : Suzimara Rossilho de Andrade

Orientador: Rezende Gomes dos Santos

Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

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

Campinas, 1999

S.P. - Brasil



99.22.31/6

UNIDADE	BC		
N.º CHAMADA:			
V.	Ex.		
TOMBO BC/	39657		
PROC.	229/99		
C	<input type="checkbox"/>	D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R 5.11,00		
DATA	07-12-99		
N.º CPD			

CM-00137463-B

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

An24s Andrade, Suzimara Rossilho de
 Simulação de solidificação de ligas metálicas
 utilizando método de elementos finitos / Suzimara
 Rossilho de Andrade.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

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

 1. Simulação (Computadores). 2. Solidificação. 3.
 Ligas (Metalurgia). I. Santos, Rezende Gomes dos. II.
 Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Mecânica. III. Título.

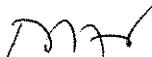
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Simulação de Solidificação de Ligas Metálicas
Utilizando Método de Elementos Finitos**

Autor : Suzimara Rossilho de Andrade

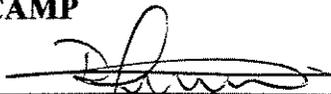
Orientador: Rezende Gomes dos Santos



**Prof. Dr. Rezende Gomes dos Santos, Presidente
UNICAMP**



**Prof. Dr. Paulo Roberto Mei
UNICAMP**



**Prof. Dr. Ricardo Fuoco
IPT - USP**

Campinas, 10 de Setembro de 1999

Agradecimentos

Gostaria de registrar aqui meus sinceros agradecimentos.

Ao prof. Rezende pela orientação e apoio.

Ao Prof. Renato Pavanello pelos esclarecimentos quanto a utilização do Ansys.

Aos amigos Miriam, João e Élvio pelo apoio e sugestões. Em especial, à Miriam, cujo auxílio e colaboração foram preciosos.

Ao Wisley e ao Bigorna pela ajuda na parte experimental.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Aos meus pais por tudo,

Obrigada.

À Dona Toninha

RESUMO

ANDRADE, Suzimara Rossilho , Simulação de Solidificação de Ligas Metálicas Utilizando Método de Elementos Finitos, Campinas : Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999, Dissertação de Mestrado.

Neste trabalho analisa-se a aplicação do Método de Elementos Finitos na simulação do processo de solidificação de peças metálicas. O software, de aplicação genérica, ANSY'S, é utilizado como ferramenta para resolução dos problemas. O ANSY'S é um programa que utiliza o Método de Elementos Finitos para a resolução de problemas mecânicos, e esse trabalho explora a sua aplicação na área térmica, mais especificamente, nos processos de transformação de fase. Simulações do processo de solidificação, de diferentes ligas, são desenvolvidas, variando-se as formas e materiais dos moldes, e, considerando-se diferentes condições de extração de calor. As curvas de resfriamento obtidas numericamente, para o metal e o molde, durante a solidificação, são comparadas com resultados experimentais. As ligas cujos processos de solidificação são analisados são Al4,5%Cu e Zn2%Al. Um molde cilíndrico metálico com fluxo de calor radial, uma placa de cobre refrigerada a água para extração de calor unidirecional e um molde triangular de areia são utilizados nos trabalhos experimentais. Após a análise dos resultados são também apresentadas outras simulações com algumas variações em relação às já citadas com o objetivo de melhor demonstrar as possibilidades de aplicação do programa ANSY'S, salientando sua capacidade de pré e pós - processamento.

Palavras Chave

- Simulação (Computadores), Solidificação, Ligas (Metalurgia).

ABSTRACT

ANDRADE, Suzimara Rossilho, Simulação de Solidificação de Ligas Metálicas Utilizando Método de Elementos Finitos, Campinas : Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999, Dissertação de Mestrado.

The application of the Finite Element Method, in the solidification modeling, have been studied in this work. The software, of generic application, ANSY'S, is used in this work to solve solidification problems. ANSY'S is a program based on Finite Elements Method used, initially, to treat mechanical problems, and this work explores its application in the thermal area, more specifically, in processes involving phase transformation. Numerical modeling of the solidification processes, of different alloys, in molds with different geometry and materials and different heat extraction conditions have been developed. The theoretical thermal curves obtained for the alloys and the molds, during the solidification, have been compared with experimental results. The solidification of Al4,5%Cu and Zn2%Al have been analyzed. A metallic cylindrical mold with radial heat flow , a water cooled copper plate with unidirecional heat flow and a triangular sand mold have been used in the experimental works. Some other simulations have been carried out in order to show the possibilities of application of the ANSY'S program, pointing out its preprocessing and postprocessing capabilities.

Key words

- Numerical modeling , Solidification, Metallic alloys.

Índice

Lista de figuras	i
Nomenclatura	ii
1 Introdução	1
1.1 - Importância do Estudo da Solidificação	1
1.2 - Análise Matemática do Processo de solidificação	2
1.3 - Objetivos	3
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 - Introdução	4
2.2 - Métodos Numéricos de Simulação do Processo de Solidificação	4
2.3 - Considerações Gerais dos Principais Trabalhos Pesquisados	9
3 Ansys	18
3.1 - Introdução	18
3.2 - Simulação Térmica Utilizando o Ansys	19
3.3 - Pré e Pós Processamento de Dados	22
3.4 - Condições de Contorno e Simplificações Adotadas	24
4 Características dos Sistemas Simulados	26
4.1 - Descrição dos Modelos	26
5 Materiais e Métodos	30
5.1 - Materiais e Métodos Utilizados nas Experiências	30
5.2 - Análise das Constantes e Propriedades Físicas Adotadas nos Modelos Numéricos	33
6 Resultados e Discussões	35
6.1 - Curvas Experimentais e Simuladas	35
6.2 - Análise dos Resultados Apresentados	43

6.3 - Exemplos de Aplicação do Ansys na Análise do Processo de Solidificação	47
7 Conclusões	59
Sugestões para Futuros Trabalhos	61
Referências Bibliográficas	62
Apêndice	66

Lista de figuras

5.1- Esquema da solidificação unidirecional da liga Al-4,5%Cu	31
5.2 : Solidificação com extração radial de calor , corte perpendicular ao eixo cilíndrico	32
5.3 : Esquema da solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde de areia	33
6.1 : Solidificação unidirecional da liga Al-4,5%Cu ($h_i = cte$)	37
6.2 : Solidificação unidirecional da liga Al-4,5%Cu	37
6.3 : Solidificação radial da liga Zn-2%Al ($h_i = cte$)	39
6.4 : Solidificação radial da liga Zn-2%Al (2mm da borda do molde)	40
6.5 : Solidificação radial da liga Zn-2%Al (15mm da borda do molde)	40
6.6 : Solidificação radial da liga Zn-2%Al (centro do molde)	41
6.7 : Solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde de areia (centro da peça)	42
6.8 : Solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde de areia (canto da peça)	42
6.9 : Solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde de areia, nas três posições consideradas	43
6.10 : Solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde triangular de aço	46
6.11 : Solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde cilíndrico de areia	47
6.12: Simulação da solidificação unidirecional da liga Al-4,5%Cu	51
6.13: Simulação da solidificação da liga Zn-2%Al	52
6.14: Simulação da solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde triangular de areia	53
6.15: Simulação da solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde triangular de aço	55
6.16: Simulação da solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde cilíndrico de areia	56
6.17: Simulação da solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde irregular de aço	57

Nomenclatura

Letras Latinas

C_p - calor específico	[J/ kgK]
g - fração volumétrica de líquido	--
H - entalpia	[J/m ²]
hc - coeficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² K]
h_i - coeficiente Newtoniano de transferência de calor	[W/m ² K]
k - condutibilidade térmica	[W/mK]
L - calor latente de fusão	[J/kg]
N - densidade de grãos	[n/m ²]
P_a - pressão atmosférica	[N/m ²]
P_g - pressão do gás calculada pela lei de Siervet	[N/m ²]
P_s - pressão da tensão superficial	[N/m ²]
q - fluxo de calor	[J/s]
Q - taxa de geração de calor	[J/s]
r - raio	[m]
R - raio da célula eutética em crescimento	[m]
S - tensão superficial do metal líquido	[N/m]
T - temperatura	[°C]
v - velocidade de preenchimento	[m/s]
x, y, z - posições do sistema cartesiano	[m]

Letras gregas

ε - emissividade

ρ - densidade

σ - constante de Stefan-Boltzman = $5,669 \cdot 10^{-8}$

--

[kg/m³]

[W/m²K⁴]

Subscritos

c - convecção

f - fusão

im - parede interior do molde

is - material metálico solidificado

l - líquido

m - parede externa do molde

o - meio externo envolvente

r - radiação

ref - referência

s - sólido

Siglas

MEF - Método de Elementos Finitos

MDF - Método de Diferenças Finitas

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Importância do Estudo da Solidificação.

Os processos de solidificação têm aplicação em diversos campos da engenharia, como : produção de gelo, congelamento de alimentos e, na área de metalurgia, solidificação de metais e ligas em processos de fundição e nos processos de soldagem por fusão.

A solidificação de metais e ligas envolvida nos processos de fundição pode ser definida como um processo de extração de calor em regime transiente, com mudança de fase, no qual uma certa quantidade de energia térmica deve ser 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 durante o processo depende, basicamente, das propriedades térmicas do metal, das características do molde, das condições da interface metal/molde e das características do meio que vai absorver o calor (*Santos,R.G.,1995*).

Os principais parâmetros envolvidos no processo de transferência de calor durante a solidificação são as velocidades, conseqüentemente, os tempos de solidificação e os perfis térmicos no metal e no molde. Durante o processo de solidificação é que ocorre a formação da estrutura bruta da peça metálica, e essa estrutura influencia diretamente as suas propriedades mecânicas . A estrutura final da peça deve propiciar o melhor comportamento mecânico possível, em função de sua utilização. Sendo, essas propriedades, fortemente influenciadas pelo processo

de solidificação é de grande importância o estudo de todos os fatores envolvidos na transição do estado líquido para o estado sólido.

1.2 - Análise Matemática do Processo de Solidificação.

A análise matemática do processo de solidificação é bastante complexa, envolvendo equações diferenciais com condições de contorno não lineares, para as quais soluções analíticas exatas são raras e limitadas.

Os métodos numéricos têm adquirido uma importância crescente nos últimos anos associada ao intenso desenvolvimento da área computacional. 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 que descrevem a transferência de calor, por equações aproximadas de diferenças finitas. Essas equações são, então, resolvidas passo a passo para pequenos intervalos de tempo e a temperatura em um determinado ponto é calculada levando-se em conta a temperatura neste ponto e pontos adjacentes no instante anterior. O método de elementos finitos é semelhante, sendo a peça dividida em pequenos volumes (análise tridimensional) ou áreas (análise bidimensional) e analisa-se, separadamente, cada elemento do sistema e a sua influência sobre os elementos vizinhos (*Prattes, M., Davies, G.J., 1978*).

Basicamente, um modelo matemático deve tratar de três aspectos relativos ao fenômeno da solidificação : a transferência de calor no metal (líquido e sólido) e no molde, a liberação de calor latente durante a mudança de fase e a transferência de calor nas interfaces do metal com o molde, do metal com o meio ambiente e do molde com o meio ambiente. Quanto maior o rigor matemático aplicado no equacionamento e solução do problema, em cada um de seus aspectos, maior precisão terão os resultados (*Garcia, A., 1996*).

1.3 - Objetivos

O Método de Elementos Finitos (MEF) tem sido largamente utilizado na resolução de problemas mecânicos, inclusive na área térmica.

O objetivo desse trabalho é desenvolver simulações numéricas do processo de solidificação de metais e ligas utilizando o software de aplicação genérica ANSYS que resolve, numericamente, variados problemas mecânicos pelo método de elementos finitos.

O ANSYS utiliza o método de elementos finitos na resolução de problemas das áreas estrutural, magnética, térmica e mecânica de fluidos. Esse trabalho explora sua aplicação na área térmica, mais especificamente, nos processos de transformação de fase que ocorrem durante a solidificação de ligas metálicas. O programa é de grande utilidade na simulação da solidificação de peças com geometria mais complexas, possibilitando tratamentos bidimensionais e tridimensionais e também por apresentar facilidades de pré e pós processamento dos dados.

São desenvolvidas simulações da evolução térmica ocorrida, no metal e no molde, durante a solidificação de diferentes ligas, variando-se os formatos e materiais dos moldes e considerando-se condições de extração de calor variadas. Os resultados teóricos são, então, comparados com resultados obtidos experimentalmente.

A facilidade de desenvolvimento gráfico de peças complicadas e a possibilidade de mudar, facilmente, uma ou mais condições de contorno no mesmo problema, justificam o interesse pelo ANSYS.

O ANSYS também oferece a possibilidade de visualizar a evolução térmica durante a solidificação de uma peça através de um desenho colorido e uma relação entre cores e intervalos de temperaturas, de cada ponto, em cada instante de interesse. Utilizando essa ferramenta podemos identificar as frentes de solidificação e prever possíveis lugares de formação de poros devidos à contração do metal solidificado (rechupes). Esse tipo de apresentação dos resultados também é explorada nesse trabalho com o objetivo de ilustrar as possibilidades de aproveitamento das facilidades que o programa Ansys pode oferecer ao usuário.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 - Introdução

Esse capítulo contém uma descrição dos modos transferência de calor que podem atuar durante o processo de solidificação dos metais , a teoria relacionada a eles, os mecanismos responsáveis pela formação da microestrutura dos materiais e uma breve descrição dos métodos de análise microscópica de caracterização de amostras.

Trabalhos realizados na área de aplicação de métodos numéricos no estudo do processo de solidificação de metais e ligas são citados e analisados. Os trabalhos resumem a evolução ocorrida nos últimos anos quanto ao estudo do processo de solidificação englobando a teoria relacionada às transformações de fase e aos parâmetros de solidificação e os métodos numéricos de resolução.

Os métodos numéricos de resolução do problema da solidificação citados aqui são o Método de Diferenças Finitas (MDF) e o Método de Elementos Finitos (MEF). O Capítulo contém uma descrição dos trabalhos e uma análise dos métodos quanto à sua precisão e as facilidades e dificuldades encontradas por seus autores.

2.2 - Métodos Numéricos de Simulação do processo de solidificação.

2.2.1 - Equacionamento do processo de solidificação.

O processo de solidificação de um metal pode ser considerado, fundamentalmente, como um processo de transferência de calor em regime transiente. A solidificação inicia-se quando o metal líquido encontra-se em condições termodinâmicas favoráveis à ocorrência da mudança de fase. O calor latente de fusão, anteriormente utilizado na fundição do metal, é liberado na interface sólido/líquido e dali é transportado ao meio que envolve o molde para que o processo de solidificação tenha continuidade (*Özisk, M.N., 1980*).

Os dois aspectos básicos que devem ser analisados são :

- o aspecto metalúrgico ligado à composição química do material metálico e aos seus pontos de transformação.
- o aspecto térmico relativo à história térmica do material metálico, aos modos pelo qual o calor é transferido e a distribuição de temperaturas no interior da peça a cada instante do processo.

Esses aspectos determinarão a estrutura final do metal solidificado e, conseqüentemente, suas propriedades.

A velocidade de solidificação é um parâmetro condicionante da microestrutura e das propriedades do produto metálico solidificado, sendo, portanto, muito importante o conhecimento da cinética de solidificação. A velocidade de solidificação é controlada pela capacidade de transporte de calor que o sistema metal/molde apresenta, o que torna essencial o conhecimento das características físicas dos materiais envolvidos (*Özisk, M.N., 1980*).

Durante a solidificação, os mecanismos de transferência de calor atuantes são : condução e convecção de calor no metal líquido, condução na camada de metal solidificada, transferência Newtoniana na interface metal/molde devida à contração do metal após a transformação de fase, condução de calor nas paredes do molde, convecção, condução e radiação na interface do meio com o molde e do molde com o metal.

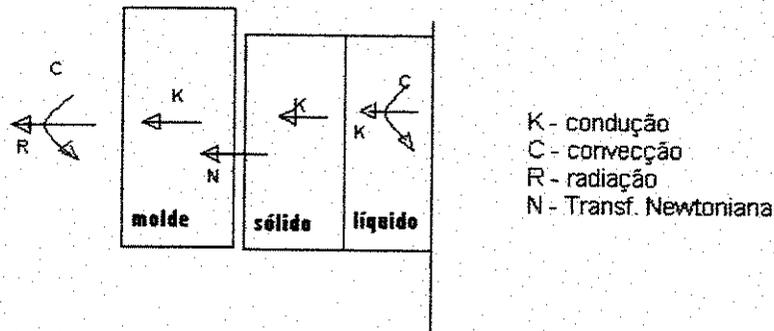


Figura 2.1 : representação esquemática dos modos de transferência de calor.

A condução térmica é a forma de transferência de calor mais presente no processo de solidificação, pois rege a transmissão de calor dentro do molde e no metal já solidificado. A equação que governa a condução de calor pode ser expressa por :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (2.1)$$

onde :

k = condutibilidade térmica [W/K.m] ,

ρ = densidade [kg/m³] ,

c_p = calor específico [kJ/kg.K] ,

A transferência de calor entre uma superfície sólida aquecida e o meio que a envolve é , em geral, realizada por condução térmica, convecção e radiação. Quando o contato térmico, na interface metal/molde, não é perfeito devido a contração do metal líquido após a transformação de fase, o processo de transferência de calor pode ser encarado como sendo unicamente realizado através de um filme fino gasoso que preenche o espaço, denominado *GAP*, entre as superfícies. A formulação proposta é :

$$q_N = h_i (T_b - T_{im}), \quad (2.2)$$

onde :

h_i = coeficiente Newtoniano de transferência de calor (determinado, na maioria das vezes, experimentalmente) [W/K.m²],

T_{is} = temperatura do material metálico solidificado,

T_{im} = temperatura da parede interior do molde,

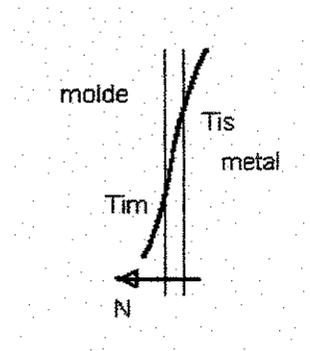


Figura 2.2 : Transferência Newtoniana de calor.

No mecanismo de convecção, a taxa de transporte de calor entre um sólido e um meio fluido que o envolve, pode também ser avaliada pela equação de Newton, onde o coeficiente Newtoniano (h_i) de transferência de calor é substituído pelo coeficiente convectivo (h_c), que é uma função do fluxo de fluido do meio envolvente, das propriedades termofísicas do meio e do arranjo geométrico do sistema (*Garcia, A, 1996*). A forma da equação é :

$$q_c = h_c.(T_m - T_0), \quad (2.3)$$

onde :

h_c = coeficiente convectivo de transferência de calor [W/K.m²],

T_m = temperatura da parede externa do molde ,

T_0 = temperatura do meio externo .

A equação do mecanismo de radiação que rege a transferência de calor entre uma superfície e o meio que a envolve é dada por (*Garcia, A, 1996*) :

$$q_r = \sigma.\varepsilon.(T_m^4 - T_0^4), \quad (2.4)$$

onde :

σ = constante de Stefan-Boltzman ;

ε = emissividade .

2.2.2 - Métodos Numéricos de Resolução

Os principais métodos numéricos de resolução do problema da solidificação de metais e ligas são o Método de Diferenças Finitas e o Método de Elementos Finitos. Antes de iniciar uma descrição de trabalhos já realizados nessa área é necessário introduzir alguns conceitos básicos dos métodos .

No método de diferenças finitas a peça é dividida em malhas, sendo que após cada intervalo de tempo determina-se a temperatura em cada malha levando-se em conta a temperatura neste ponto e nos pontos adjacentes no instante anterior. Para que o resultado das equações diferenciais, utilizadas nesse método, convirja para o resultado exato, vários critérios de convergência devem ser observados. De um modo geral, quanto menor o tamanho da malha e do intervalo de tempo, melhor será o resultado.

O método de Elementos Finitos foi utilizado pela primeira vez por pesquisadores da área de mecânica estrutural para resolução de problemas com geometria complexa. Dividiu-se os corpos em pequenos volumes chamados de elementos finitos e estudou-se a atuação de uma força sobre cada um desses elementos e a interação entre eles. Inicialmente, o método foi largamente utilizado na resolução de problemas estruturais e , então, estendeu-se sua utilização em outras áreas como a térmica, mecânica de fluidos e magnetismo resultando em soluções de problemas que até então eram intratáveis numericamente (*Dhatt,G., Touzot,G., 1984*).

Muitos livros sobre o MEF começaram a ser publicados a partir de 1967. Autores como Zienkiewicz 1977, Gallager 1971, Rockey 1979, Absi and Imbert 1979, foram difundidos mundialmente, e durante esse mesmo período, numerosos periódicos tiveram várias páginas dedicadas a esse método.

A manipulação do método é bem complicada exigindo como pré requisito conhecimentos em disciplinas variadas. Por exemplo (*Dhatt and Touzot, 1984*) :

- conhecimento profundo dos princípios físicos envolvidos no problema;
- teoria de interpolação e aproximação por subdomínio;
- princípios do método de residuais ponderados;

- álgebra matricial ;
- métodos numéricos de integração, soluções lineares e não lineares de equações algébricas;
- linguagens de programação computacional envolvendo enorme quantidade de dados.

Sendo raro um conhecimento tão abrangente de assuntos, é comum a utilização de softwares adaptados à utilização desse método para resolução de problemas nas variadas áreas de aplicação.

Nesse trabalho utiliza-se o programa ANSY'S, como instrumento matemático. Uma descrição detalhada desse software e das suas aplicações, e uma apresentação dos problemas encontrados e as adaptações necessárias ao nosso trabalho são encontradas no capítulo 3.

2.3 - Considerações Gerais dos Principais Trabalhos Pesquisados.

Os trabalhos sobre métodos numéricos aplicados à transferência de calor começaram a surgir a partir dos métodos gráficos de Schmidt. Em 1945, Dusimberre desenvolveu um dos primeiros trabalhos para resolução do problema de condução de calor. Ele utilizou o método de diferenças finitas na análise do fluxo de calor unidirecional em uma placa plana e supôs um intervalo de tempo pequeno suficiente para que o erro introduzido, por não se considerar o efeito causado por malhas não adjacentes à malha em questão, fosse desprezível, e, o comprimento da malha fosse pequeno o suficiente para se considerar a sua temperatura uniforme. Neste trabalho, definiu-se um módulo de controle da convergência e estabilidade dos resultados que é diretamente proporcional a relação do quadrado do comprimento (x) da malha e o intervalo de tempo (Δt), sendo que a mesma deva ser maior ou igual a 2 para que o método seja estável e convergente.

$$\frac{x^2}{\Delta t} \geq 2, \quad (2.5)$$

Inicialmente os trabalhos apresentaram várias simplificações de condições de solidificação. Eyres, N.R. em 1946, adotou uma única temperatura de solidificação do aço,

adicionando o calor latente ao calor específico nesta temperatura. Também negligenciou a variação da densidade com a temperatura, correntes convectivas no líquido foram desprezadas e o contato metal/molde foi considerado perfeito, desprezando-se a contração do metal que provoca a formação de um espaço vazio, *GAP*, entre o metal e o molde. Essas considerações levaram a um distanciamento entre resultados numéricos e experimentais, principalmente devido à utilização de uma temperatura constante de solidificação.

Trabalhos posteriores adotaram considerações mais próximas à realidade. No caso de ligas, verificou-se a ocorrência da região pastosa separando as regiões sólida e líquida, constatou-se que as interfaces líquido/pastoso e pastoso/sólido se relacionam diretamente com as temperaturas de início (T_l) e fim (T_s) da solidificação de uma determinada liga. A modelagem matemática, incluindo o comportamento dessas interfaces tem sido bastante explorada nos últimos anos, como por exemplo no trabalho de Poulidakos e Cao 1989, que concentra seu interesse na modelagem do fenômeno de transporte de massa e calor dentro da região formada por líquido e dendritas durante a solidificação de uma liga binária. Como resultado, o trabalho mostra a influência que parâmetros como, temperatura inicial da liga, propriedades físicas dos materiais, calor latente de fusão e contração, têm sobre a formação e crescimento da zona pastosa.

Poulidakos e Cao também citam outros trabalhos nessa área, como o de O' Callaghan et al 1982, que usou um modelo, levando em consideração a zona pastosa, para estudar a transferência de massa e calor durante a solidificação de uma solução eutética binária com as paredes do molde a temperaturas abaixo da temperatura eutética (T_e) da solução e verificou que as velocidades das interfaces sólido/pastoso e pastoso/líquido eram idênticas.

O processo de formação do *GAP* de ar na interface metal/molde e o mecanismo de transferência de calor através do filme fino que se forma também passou a ser investigado. A resistência térmica devido a esse *GAP* é uma importante parte do mecanismo de transferência de calor. Modelos físicos sobre a sua formação devido à contração sofrida pelo metal durante o processo de solidificação foram surgindo e a precisão dos resultados das simulações, a partir da consideração de um coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde foram ficando cada vez melhores. Em 1976, Sully, estudou o coeficiente de transferência de calor nesta

interface a partir da utilização de um modelo matemático juntamente com resultados experimentais utilizando vários conjuntos metal/molde de diferentes materiais e geometria. No trabalho, Sully afirma que o coeficiente de transferência de calor (h_i) estudado é variável com o tempo e considerá-lo constante pode causar grande imprecisão de resultados. O autor conclui, também, que antes do aparecimento do *GAP*, o fluxo de calor na interface metal/molde ocorre por condução e após o surgimento dele se dá por convecção. Verificou também que as diferentes geometrias do sistema metal/molde influenciam decisivamente o valor de h_i , sendo que os materiais do metal e do molde exercem influência menor.

No início da solidificação, o coeficiente Newtoniano de transferência de calor (h_i) depende da afinidade físico-química do metal com o molde, do superaquecimento do metal líquido e das condições de acabamento da superfície de contato do molde, tendendo a ser elevado também por causa da pressão metalostática do líquido sobre a fina camada que já foi solidificada. No decorrer do processo de solidificação, esse coeficiente vai diminuindo devido à contração do metal que supera a pressão metalostática e promove o aparecimento e crescimento do *GAP* de ar (*Osório, W.R.R., Quaresma, J.M.V., Neto, M.F., Garcia, A., 1998*).

Ho, K e Pelhke, R.D. em 1984, propuseram a determinação do coeficiente de transferência de calor, na interface metal/molde, a partir do conhecimento da evolução temporal da temperatura em ambos os lados da interface. Os autores utilizaram um método de diferenças finitas implícito similar ao método de Meyer 1973, Shansumdar e Sparrow 1975, incluindo, a esse método, superaquecimento do líquido e propriedades dos materiais variáveis com a temperatura. Concluíram que o coeficiente Newtoniano pode ser estimado pela superposição do valor da condução térmica no gás e a radiação calculada via aproximação quasi-estática.

A modelagem do processo de solidificação requer, portanto, um profundo conhecimento das discontinuidades do fluxo de calor nas interfaces que separam as fases sólida, líquida e pastosa e também na interface metal/molde. Em outro trabalho, Ho e Pelhke compararam os métodos de elementos finitos (MEF) e diferenças finitas (MDF) aplicados a geometrias irregulares (que é o caso desse trabalho). Nos dois primeiros exemplos do trabalho, avaliou-se a precisão e a estabilidade de cada um. Analisando-se a precisão dos métodos quanto à previsão dos perfis de temperatura e o tempo de solidificação de uma peça, os autores concluíram,

primeiramente, que, quanto maior o número de malhas utilizado, maior a precisão de ambos e que, o MEF é mais preciso na fase de solidificação propriamente dita, enquanto que o MDF se adequa bem à fase em que a temperatura está abaixo da temperatura de fusão.

A maioria dos métodos de domínio fixo usa a formulação da entalpia, a qual incorpora o calor latente e o específico como forma de governar a equação de fluxo de calor e eliminar a necessidade de conhecer explicitamente a localização das interfaces sólido/pastoso e pastoso/líquido. Outra vantagem de se utilizar métodos de domínios fixos é que eles permitem a modelagem do problema da transformação de fase através de modificações simples de métodos numéricos e softwares já existentes. Um modelo numérico de elementos finitos utilizando o método da entalpia (*Swaminathan, C.R. e Voller, V.R., 1992*) foi aplicado, recentemente, a alguns problemas de solidificação. Nesse método, os efeitos de convecção devidos às mudanças de densidade no líquido e nas fronteiras entre as fases que compõem o sistema em solidificação são desprezados, uma equação que descreve apropriadamente a região pastosa é :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2.6)$$

onde k é uma condutibilidade média dada por :

$$k = (1 - g)k_s + gk_l \quad (2.7)$$

e, analogamente, a entalpia H é dada por :

$$H = (1 - g)H_s + H_l \quad (2.8)$$

sendo g a fração volumétrica de líquido e os subscritos l e s se referem a fase líquida e sólida.

A entalpia, na região pastosa, é considerada como sendo função apenas da temperatura e, em sistemas onde o calor específico também é função apenas da temperatura e o calor latente de fusão é constante, ela pode ser escrita como :

$$H = (1 - g) \int_{T_{ref}}^T \rho c_s dT + g \int_{T_{ref}}^T \rho c_l dT + gpL \quad (2.9)$$

onde L é o calor latente de fusão [J/kg] e T_{ref} é uma temperatura arbitrária de referência.

Em seu trabalho, Swaminathan e Voller, demonstraram a versatilidade do método aplicando-o em cinco modelos de solidificação e comparando os resultados com dados experimentais. O método tem um grande domínio de aplicação, entretanto, não é apropriado no

caso onde o super resfriamento é relevante (*Stefanescu,D.M. and Kanetkar,C.S.,1987, Rappaz,M.,1989, Gottsc,D.D. and Dantzik,J.A.,1991*), e na resolução da solidificação de ligas com mais de dois componentes onde ocorre uma significativa macrossegregação de soluto.

O método da entalpia aplicado ao modelo numérico de elementos finitos para resolução de problemas de mudança de fase é o método utilizado pelo programa ANSYS e está mais detalhadamente apresentado no capítulo 3.

Felicelli, Heinrich e Poirier 1998 utilizaram o método de elementos finitos no estudo da solidificação unidirecional de ligas ternárias e quaternárias. Simulações anteriores para previsão de macrossegregação consideravam , somente, convecção na zona pastosa (*Mehrabian,R e Flemings,M.C.,1970, Maples,A.L. e Poirier,D.R.,1984*), Mc Fadden et all,1984 e Heinrich, 1988, incorporaram, às formulações, convecção no líquido devido à rejeição de soluto na interface sólido/líquido. A extensão desse modelo aplicado a ligas com mais de dois componentes requer uma visão computacional diferente da usada para ligas binárias, pois, o conhecimento da temperatura na zona pastosa não indica uma única composição do líquido interdendrítico, além do que os padrões de convecção e segregação de ligas ternárias e quaternárias não são os mesmos observados em ligas binárias. O trabalho conclui que a convecção de soluto afeta consideravelmente o processo de solidificação no caso de ligas com mais de dois componentes.

Para melhorar os resultados das simulações e tratar mais precisamente o complexo problema da solidificação, Ruan, Liu, e Richmond 1993, propõem um modelo de elementos finitos de malhas adaptativas para o caso de ligas metálicas. Nesse modelo, funções de interpolação são definidas e as malhas se movem com o tempo para se adaptarem ao movimento da interface sólido/líquido. A localização da interface em solidificação e a sua velocidade são calculadas como parte do pós-processamento e são as variáveis explícitas principais do problema de transformação de fase. A diferença entre o problema da solidificação de um metal puro e uma liga, é que a solidificação de uma liga requer o conhecimento da fração de sólido durante o período de transformação de fase e as posições e temperaturas das interfaces sólido/pastoso e pastoso/líquido tem que ser calculadas simultaneamente. Conhecido o movimento, os domínios sólido e líquido são ajustados para uma nova posição da interface em cada intervalo de tempo e tanto a malha fixa como a aproximação adaptada podem ser usadas na simulação numérica. O

método não considera difusão de massa e é de grande importância o conhecimento da relação entre a fração sólida e a temperatura na zona pastosa, sendo, no caso de ligas binárias, essa fração calculada, por exemplo, pela equação de Scheil e pela regra da alavanca. O método, verificou-se, é de grande precisão e os programas de elementos finitos, já existentes, podem ser adaptados facilmente a ele.

Com o avanço dos métodos numéricos e modelagem computacional da solidificação, nos últimos anos, o interesse na utilidade desses métodos na previsão do aparecimento de microporosidades também tem aumentado. Assim como o processo de solidificação, as variáveis que controlam a formação de microporosidades podem ser relacionadas com o gradiente térmico, a taxa de solidificação, a taxa de resfriamento e o tempo de solidificação. Baseadas nisso, várias aproximações tem surgido nessa área. Inicialmente, utilizou-se um critério empírico com base em dados experimentais (*Bishop, H.F. e Pellini, W.S., 1950*), e, então foi formulado um critério semi-empírico, baseado em parâmetros térmicos, por Niyama et al, 1982 e Lee et al, 1990. Tem ficado claro, ultimamente que a formação de poros é resultado, geralmente, de uma combinação entre a presença de gases e efeitos de contração.

A solidificação unidirecional da liga Al-4,5%Cu, é examinada (*Melo, M.L.N.M., Rizzo, E.M.S., Santos, R.G., 1997*) levando-se em consideração a movimentação gasosa e a contração do material metálico durante de solidificação. O modelo matemático utiliza o método da entalpia para simular a solidificação unidirecional da liga a partir de uma placa de cobre refrigerada, desprezando-se a convecção no líquido e tratando apenas a condução no metal sólido. O trabalho apresenta a suposição de que a microporosidade se forma quando :

$$\Delta P + P_G = P_A + P_M + P_s, \quad (2.10)$$

onde

ΔP = queda de pressão calculada pela equação de Darcy (*Piwonka, T.S. e Flemings, Mc., 1996*);

P_G = pressão do gás calculada pela lei de Sievert;

P_A = pressão atmosférica;

P_M = pressão metalostática ;

$P_s = 2s/r$ = pressão da tensão superficial, onde r é o raio do poro e s é a tensão superficial do metal líquido.

O modelo se mostrou eficiente na previsão das condições de formação de poros sendo possível estimar sua posição e tamanho a partir de equações de espaçamento dendrítico primário e secundário. O trabalho também mostra a evolução temporal do coeficiente de transferência de calor (h_i) para esse caso.

Uma revisão fenomenológica do problema da solidificação está no trabalho de Upadhyya e Paul, 1994. Ele mostra que o desenvolvimento nesta área tem sido rápido e que uma constante verificação dos estudos em andamento é necessária. Hoje em dia já encontramos vários softwares que analisam o comportamento de peças bem complexas durante a sua solidificação. Os autores mostram os passos seguidos pelos programas disponíveis e nos dão uma idéia das aproximações necessárias ao seu funcionamento. Após serem feitas as aproximações e reportadas as condições de contorno do problema proposto, o contínuo mecanismo de transferência de calor, massa e momento é resolvido pelo programa. Então, obtemos uma história do resfriamento do modelo. Após essa fase podemos obter, também, informações sobre a microestrutura da peça. Ainda, usando algumas informações adicionais, é possível prever alguns defeitos (como porosidade e macrossegregação) devido a um conjunto de condições do processo de solidificação utilizado. A simulação do desenvolvimento de tensões internas tem sido uma área de grande desafio. Alguns algoritmos e técnicas têm sido desenvolvidos para tratar desses processos mais complexos. Técnicas especiais para determinação das características da transferência de calor nas interfaces também vêm sendo largamente pesquisadas. Os autores nos mostram, então, algumas técnicas bastante utilizadas atualmente:

- Técnica do balanço de energia: nesse método um preciso perfil da distribuição da velocidade durante o preenchimento do molde é muito importante. A história térmica do material metálico e do molde é obtida através da resolução da equação de balanço de energia:

$$c_p \cdot \rho \frac{dT}{dt} = -c_p \rho v \nabla T - \nabla \cdot q + \dot{Q} \quad (2.11)$$

onde q é o fluxo de calor, v é a velocidade do preenchimento e Q é a taxa de geração de calor. A condição de contorno mais usada para o comportamento da interface entre o molde e o meio que o envolve expressa a perda de calor nessa interface através do coeficiente de transferência de calor (h_c) já discutido anteriormente. A equação de balanço para essa condição é:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=interface} = h_c (T_m - T_0) \quad (2.12)$$

A partir dessas equações é que surgiram, primeiramente, o método de diferenças finitas e, posteriormente, estendeu - se a formulação para o método de elementos finitos.

- Método do calor específico : é uma aproximação clássica onde o calor latente é transformado em formas sólidas em um especificado intervalo de temperatura :

$$C_p = C_p - \frac{L}{\rho} \frac{df_s}{dT} \quad (2.13)$$

onde L é o calor latente e df_s/dT é taxa de fração sólida transformada por variação da temperatura., obtida pelo diagrama de fase. Alternativamente, pode-se usar a equação de Scheil para expressar a evolução da fração de sólido :

$$f_s = 1 - \left[\frac{T_f - T}{T_f - T_l} \right]^{k-1} \quad (2.14)$$

onde T_f é a temperatura de fusão do metal puro, T_l é a temperatura liquidus, T é a temperatura do metal líquido e k é o coeficiente de partição da liga. Esse método tem limitações no que diz respeito a informações sobre a microestrutura, tal como tamanho de grão.

- Método do calor latente : já discutido anteriormente.
- Solidificação eutética : em geral assume-se que nesse caso o sistema solidifica-se equiaxialmente. Por exemplo, na solidificação do ferro fundido pode-se assumir que cada núcleo de grafite desenvolve-se dentro de uma colônia eutética com dimensões aproximadas e em todas as direções. Assumindo que a nucleação é instantânea, e que as células crescem esféricamente, a taxa de evolução da fase sólida em cada sistema eutético pode ser expressa pela equação de Johnson-Mehl :

$$\frac{df}{dt} = (1-f)4\pi R^2 N \frac{dR}{dt} \quad (2.15)$$

onde R é o raio da célula eutética em crescimento e N é a densidade de grãos, usualmente uma função da taxa de resfriamento, e pode ser expressa como :

$$N = a + b \frac{dT}{dt} \quad (2.16)$$

sendo a e b obtidos experimentalmente para cada sistema.

Esses foram os principais trabalhos lidos e discutidos para que fosse possível uma melhor compreensão do complexo problema da solidificação e assimilação dos conceitos necessários para desenvolver uma análise matemática do processo. A partir dessas leituras foi possível julgar a importância de cada parâmetro considerado, quais as possíveis simplificações a adotar-se e, conseqüentemente, avaliar as possíveis fontes de erros em cada caso.

Capítulo 3

ANSYS

3.1- Introdução

O programa de análise numérica pelo método de elementos finitos Ansys é um instrumento utilizado na engenharia na resolução de problemas variados como por exemplo :

- construir modelos ou transferir modelos de estruturas, produtos e componentes feitos em CAD;
- aplicar outras condições de contorno e performance nos modelos ;
- estudar respostas físicas tais como níveis de tensão, distribuição de temperatura ou de impacto de campos magnéticos;
- otimizar o processo de criação de um projeto no sentido de reduzir custos;
- simular testes mecânicos em protótipos quando não se deseja ou não é possível realizar testes experimentais (em aplicações biomédicas, por exemplo) (*Ansys Manual Guide, 1996*)

Simulações térmicas têm um importante papel em um vasto campo de pesquisa na área da engenharia e em alguns casos, essa análise requer um complemento no campo da análise de tensões internas causadas por expansão térmica ou contrações. O Ansys também pode ser utilizado nesses casos.

A análise térmica desenvolvida pelo Ansys calcula a distribuição de temperatura e quantidades térmicas relacionadas em um sistema ou componente. As quantidades térmicas típicas de interesse são :

- distribuição de temperatura ;
- quantidade de calor ganha ou perdida ;
- gradientes térmicos;
- fluxos de calor .

No caso desse trabalho utilizaremos o programa na simulação da evolução térmica de um material metálico em solidificação em sistemas metal/molde com diferentes características.

A base para a análise térmica no Ansys é a equação de balanço de calor obtida a partir do princípio da conservação de energia (*Ansys Theory Reference, 1996*). A simulação pelo método de elementos finitos calcula as temperaturas nodais e a partir dessas obtém as outras quantidades térmicas.

O programa trabalha com os três principais modos de transferência de calor : condução, convecção e radiação. Além dos modos de transferência de calor pode-se simular efeitos como transformações de fase (que é o caso desse trabalho) e geração interna de energia (devido ao efeito Joule, por exemplo).

O Ansys pode realizar a análise térmica tanto em regime transiente como em regime estacionário. Esse trabalho trata o processo de solidificação como um processo de regime transiente.

3.2- Simulação térmica utilizando o Ansys.

A base para a análise térmica, no Ansys, é a equação de balanço de calor obtida do princípio de conservação de energia (*Ansys Theory Reference, 1996*) :

$$\rho.c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = \ddot{q} \quad (3.1)$$

onde : ρ = densidade
 c_p = calor específico

T = temperatura

t = tempo

$$\{L\} = \left(\frac{\partial}{\partial X}, \frac{\partial}{\partial Y}, \frac{\partial}{\partial Z} \right) = \text{vetor operador}$$

$$\{v\} = (V_x, V_y, V_z) = \text{vetor velocidade para transporte de calor}$$

{q} = vetor fluxo de calor

...

\bar{q} = quantidade de calor gerado por unidade de volume.

Então, a lei de Fourier é usada para relacionar o vetor fluxo de calor ao gradiente térmico:

$$\{q\} = -[D]\{L\}T \quad (3.2)$$

onde

$$[D] = \begin{pmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{pmatrix} = \text{matriz condutibilidade}$$

Combinando as equações (3.1) e (3.2), temos :

$$\rho.c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{V\}^T \{L\}T \right) = \{L\}^T ([D]\{L\}T) + \bar{q} \quad (3.3)$$

Esta equação pode ser escrita na forma :

$$\begin{aligned} \rho.c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \\ \bar{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Estamos assumindo todos os efeitos no sistema cartesiano.

Se especificarmos convecção agindo numa superfície, a equação aplicada será a equação de transferência de calor proposta por Newton :

$$\{q\}^T \{\eta\} = -h_c (T_0 - T_m) \quad (3.5)$$

onde: $\{\eta\}$ = vetor normal a superfície,
 h_c = coeficiente de transferência de calor por convecção,
 T_0 = temperatura do fluido adjacente ao molde,
 T_m = temperatura na superfície do molde.

O sinal negativo na equação se deve ao fato do fluxo de calor ser inverso à direção do vetor $\{\eta\}$.

Combinando as equações 3.2 e 3.5 temos :

$$\{\eta\}^T [D] \{L\} T = h_c (T_0 - T) \quad (3.6)$$

Considerando um intervalo virtual de temperatura , combinando as equações 3.3 e 3.6 e integrando sobre um elemento de volume, obtemos, após algumas manipulações :

$$\int_{vol} \left(\rho c \delta T \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T (\delta T) ([D] \{L\} T) \right) d(vol) = \int_{S_1} \delta T q^* d(S_2) + \int_{S_3} \delta T h_c (T_0 - T) d(S_3) + \int_{vol} \delta T \bar{q} d(vol) \quad (3.7)$$

onde :

vol = volume do elemento

δT = temperatura virtual possível (= $\delta T(x,y,z)$).

3.3 - Pré e Pós processamento dos dados .

O programa possui três passos básicos e distintos :

- construir o modelo
- aplicar as condições de contorno adequadas e obter a solução
- verificar os resultados.

3.3.1- Pré processamento.

A construção do modelo de elementos finitos é a primeira e mais demorada parte do processo. O pré processamento de dados engloba a escolha do tipo de análise, tipo de elemento a ser utilizado, as constantes reais do problema, as propriedades físicas dos materiais e a geometria do modelo.

O Ansys possui mais que 100 tipos diferentes de elementos para serem escolhidos. O tipo de elemento determina o grau de liberdade do problema, a disciplina a que se refere (estrutural, térmica, magnética, mecânica de fluidos etc.) , define se o modelo será bi ou tridimensional, qual tipo de simetria será considerado, etc. O elemento utilizado nas simulações é o *Plane 77*, esse elemento possui apenas um grau de liberdade, a temperatura. É um elemento bidimensional que pode ser usado tanto para análises térmicas em regime transiente quanto em regime estacionário e pode gerar dois tipos de simetria : uma "tipo espelho" a partir de um eixo escolhido e outra rotacional em torno de um eixo.

As constantes reais do problema dependem do tipo de elemento escolhido, como por exemplo, um elemento estrutural tem como constantes reais a área, o momento de inércia, o peso, etc. Nem todos os elementos requerem constantes reais; o *Plane 77* é um deles.

A maioria dos elementos requer propriedades físicas dos materiais que eles estão representando dependendo de sua aplicação. Essas propriedades podem ser lineares ou não-lineares, isotrópicas ou anisotrópicas, constantes ou dependentes da temperatura. Dentro de uma mesma análise pode-se ter vários conjuntos de propriedades que definem os múltiplos materiais que podem compor o modelo. As propriedades relevantes na análise térmica são :

condutibilidade térmica, densidade, calor específico e entalpia.

Durante o procedimento de definição das propriedades dos materiais, os conjuntos de propriedades são numerados e vão ser relacionados, posteriormente, aos seus respectivos elementos dentro da geometria do modelo a ser construído. No caso de propriedades lineares dependentes da temperatura, constrói-se uma tabela de temperaturas e depois relaciona-se a cada valor de temperatura o valor correspondente da propriedade relevante. Se o número de valores atribuídos às propriedades for diferente do número de valores de temperatura o programa desprezará um dos valores. Após a definição desses valores pode-se visualizar o gráfico da propriedade versus a temperatura para a verificação e retificação de possíveis erros. Durante a resolução do problema o Ansys leva em consideração as propriedades dependentes da temperatura enquanto as matrizes (eq. 3.1) são formuladas. Primeiro ele calcula a temperatura no centro de cada elemento e determina o valor da propriedade correspondente por interpolação linear da tabela propriedade versus temperatura , e então usa esse valor como elemento de matriz para o próximo cálculo; se a temperatura calculada está fora do intervalo estipulado, o programa considera um dos valores extremos atribuídos às propriedades de acordo com a situação.

Definidas as propriedades, o próximo passo é gerar um modelo de elementos finitos que se adequa à geometria do modelo a simular. Descreve-se a forma geométrica do seu modelo e instrui o Ansys para automaticamente dividi-lo em elementos e nós, controlando-se o tamanho e formas desejadas .

Especificar as condições de contorno e os intervalos de tempo são as próximas tarefas. Inicialmente, no caso da análise térmica, o tipo de análise é escolhido entre transiente e estacionário. Aplica-se , então, as condições iniciais e de contorno do problema , que nesse caso, englobam temperatura inicial do material metálico e do molde, valor do coeficiente de transferência de calor por convecção e indicação das regiões onde ocorre esse tipo de fluxo (interface molde/meio envolvente) e temperatura do meio que envolve o sistema. Finalmente, se escolhe o intervalo de tempo utilizado nos cálculos e o tempo total de simulação e o programa está pronto para iniciar a solução do problema.

3.3.2 - Pós processamento.

Tendo sido calculada a solução, há dois tipos de pós processadores de dados para utilização. No primeiro tipo, POST1, (*General Postprocessor*) os resultados são verificados em um determinado momento sobre o sistema inteiro ou em uma parte escolhida. No caso da análise térmica, o modelo é apresentado colorido e as cores são relacionadas a intervalos de temperaturas em um determinado momento.

A outra opção de verificação dos dados, POST26, (*Timehist Postprocessor*) retorna os resultados obtidos durante todo o intervalo de tempo da análise em pontos previamente escolhidos pelo usuário. Na análise térmica o resultado é a curva de temperatura obtida durante a solidificação do material metálico, em qualquer ponto do sistema analisado. Esse resultado pode ser obtido em forma de gráficos ou tabelas que podem ser copiados e analisados em algum outro programa desejado.

Ambas opções de pós processamento apresentam uma estimativa de erros e também possibilitam ao usuário realizar manipulações matemáticas dos dados .

3.4- Condições de contorno e simplificações adotadas.

Todos os problemas analisados nesse trabalho foram tratados, basicamente, da mesma maneira. Nesse item encontra-se a descrição dos passos seguidos, de acordo com o sistema de pré e pós processamento já apresentados, em cada um dos casos de interesse.

Em todos os casos, como já citado, o mesmo tipo de elemento foi utilizado, *Plane 77*, sendo diferente, entretanto, o tipo de simetria proposto. Outra semelhança entre os modelos, é que todos foram tratados bidimensionalmente e utilizaram a mesma adaptação descrita a seguir para que os resultados apresentados fossem os mais próximos possíveis aos experimentais.

No processo real de solidificação , o contato térmico entre a interface metal/molde, devido a contração do metal, não é perfeito e, de acordo com a proposição de Newton, o processo de transferência de calor pode ser encarado como sendo unicamente realizado por transferência Newtoniana através de um filme fino gasoso que preenche o espaço entre as superfícies, como já foi explicitado na parte teórica.

Essa contração do metal, e conseqüentemente, esse processo de transferência de calor não são considerados pelo Ansys, que considera contato perfeito entre os metais e transferência de calor apenas por condução, sendo a convecção tratada apenas na interface entre o molde e o meio que o envolve.

Para contornar esse problema, foi introduzido entre o metal e o molde um terceiro material, ou pode-se dizer um segmento do molde, de espessura muito pequena, cujo coeficiente de transferência de calor Newtoniano é transformado em condutividade térmica relacionando-se as equações de condução e convecção :

- Eq. de condução : $q = \frac{k}{\Delta x}(T_1 - T_2) ;$ (3.8)

- Eq. de convecção : $q = h_i(T_1 - T_2) ;$ (3.9)

Obtendo-se:

$$\frac{k}{\Delta x} = h \quad \text{e,} \quad k = h \Delta x . \quad (3.10)$$

Para cada caso, o coeficiente de transferência h_i é transformado em condutibilidade térmica, pela equação acima, que é atribuída como uma das propriedades do material que compõem o pequeno espaço, entre o material e o molde, criado em cada modelo.

Capítulo 4

Características dos sistemas simulados

4.1- Descrição dos modelos.

Um esquema das características de cada passo do pré processamento da simulação está descrita para cada caso.

- 1) Solidificação unidirecional de um cilindro com fluxo de calor realizado pela base através de uma coquilha de cobre refrigerada à água :

Material metálico : Al4,5%Cu.

Propriedades relevantes : entalpia e condutibilidade térmica da liga dependentes da temperatura ; densidade, calor específico e condutibilidade do *GAP* simulado entre a liga e a coquilha.

Simetria e geometria do modelo criado : adotou-se simetria de rotação ao redor de um eixo, sendo que a geometria criada era um retângulo de mesmo comprimento do cilindro a simular (250mm) e largura igual ao seu raio (20mm).

GAP simulado : 1mm da base foi definido como tendo as propriedades desejadas para simulação do fluxo de calor Newtoniano.

Elementos : O *GAP* foi dividido em elementos de lados iguais a 1mm e restante do modelo em elementos de lados com aproximadamente 3mm.

Condições iniciais : Temperatura inicial da liga igual à temperatura de vazamento registrada na experiência, temperatura da coquilha refrigerada à água aproximadamente igual à temperatura ambiente e constante durante todo o intervalo de solidificação.

Condições de contorno : Paredes laterais e superior do molde isoladas e fluxo de calor apenas em direção à coquilha, não havendo sido considerada a troca de calor por convecção da coquilha com a água, apenas considerando que a temperatura da coquilha não se alterava.

Intervalos de tempos definidos : 900s de tempo total de simulação da evolução térmica e registro da temperatura a cada 2s aproximadamente.

2) Solidificação de um cilindro metálico com fluxo de calor radial e molde de aço.

Material metálico : Zn2%Al.

Molde : aço médio - carbono .

Propriedades relevantes : entalpia e condutibilidade da liga Zn2%Al linearmente dependentes da temperatura ; densidade, calor específico e condutibilidade do molde, sendo adotados valores constantes por se considerar desprezível, para essas propriedades a variação de temperatura do molde; densidade, calor específico constantes e condutibilidade térmica definida inicialmente como constante e, depois como dependente da temperatura como está explicado no capítulo 5.

Simetria e geometria do modelo criado : foi adotado um eixo de simetria, não sendo considerada rotação em torno dele e sim simetria do tipo "espelho". A geometria criada representa uma semi circunferência (corte perpendicular ao eixo cilíndrico) com dimensão equivalente a do sistema metal/molde real, com 1mm de acréscimo para a simulação do *GAP*. A parte interna com 3mm de raio é definida com as propriedades da liga, o arco externo com 5mm de espessura é definido com as propriedades do molde e um arco intermediário de 1mm é definido com as propriedades desejadas para o *GAP*, considera-se comprimento do cilindro infinito.

Elementos : o *GAP* foi dividido em elementos de dimensões iguais à 1mm e o restante em elementos com dimensões de 3mm.

Condições iniciais : Temperatura inicial da liga igual à temperatura de vazamento registrada na experiência e temperatura do molde igual a temperatura ambiente registrada.

Condições de contorno : Fluxo de calor exclusivamente radial com convecção registrada constante entre a parede externa do molde e o ar .

Intervalos de tempos definidos : 400s de tempo total de simulação da evolução térmica e registro da temperatura a cada 2s aproximadamente.

3) Solidificação de uma liga metálica em molde de areia com forma triangular.

Material metálico : Al4,5%Cu.

Propriedades relevantes : entalpia e condutibilidade térmica da liga dependentes da temperatura ; densidade, calor específico e condutibilidade constantes para o molde de areia e o GAP.

Simetria e geometria : não foi adotado nenhum eixo de simetria nesse caso, sendo que a geometria criada foi de um corte perpendicular à altura do molde, representada por um triângulo de dimensões aproximadas ao sistema metal/molde real, com 1mm novamente de acréscimo para simulação do GAP. A parte interna do triângulo com dimensões de 8mm de lados foi definida com as propriedades da liga, a casca triangular ao redor da liga foi definida semelhantemente ao caso anterior , sendo 1mm de espessura correspondente ao GAP e 5mm de espessura correspondente ao molde de areia, novamente a altura é considerada infinita.

Elementos : o GAP foi dividido em elementos de dimensões iguais à 1mm e o restante em elementos com dimensões de 3mm.

Condições iniciais : Temperatura inicial da liga igual à temperatura de vazamento registrada na experiência e temperatura do molde igual a 50°C.

Condições de contorno : faces inferior e superior do molde isoladas, fluxo de calor do metal em direção às paredes do molde triangular, convecção entre todas as paredes de areia e o ar.

Intervalos de tempos definidos : 700s de tempo total de simulação da evolução térmica e registro da temperatura a cada 2s aproximadamente.

Em todos os casos os resultados foram arquivados em forma de tabelas que representavam a evolução térmica de pontos, do material metálico, que eram escolhidos de acordo com a disposição dos termopares utilizados nas experiências de onde provêm os resultados utilizados nas análises comparativas. Também foram escolhidos alguns instantes durante a solidificação para visualização das zonas de temperaturas dentro do modelo inteiro para verificação das frentes de solidificação e possíveis lugares de formação de poros.

Capítulo 5

Materiais e Métodos.

5.1- Materiais e métodos utilizados nas experiências.

Os dados experimentais para análise de resultados da simulação unidirecional da liga Al4,5%Cu foram os apresentados por Miriam L.M.N. Melo em sua tese de doutorado. A montagem do sistema metal/molde consistiu em uma casca cerâmica com 250mm de altura e 40mm diâmetro interno colocada sobre uma coquilha de cobre refrigerada à água (Figura 5.1).

Para garantia de fluxo unidirecional, a casca cerâmica foi pré-aquecida a uma temperatura de cerca de 700⁰C a partir de resistências provenientes de um forno que foi desligado no início do vazamento para não interferir no sistema de aquisição de dados.

O sistema de aquisição de dados era computadorizado e composto de um conjunto de placas condicionadoras de sinais, placa conversora de sinais analógico/digital (AD) e aplicativo Aqdados de aquisição e tratamento dos dados.

As placas condicionadoras coletavam e amplificavam o sinal de tensão enviados pelos termopares tipo K e enviava para a placa conversora (AD). A placa possui 16 canais para termopares sendo o primeiro, destinado a coletar a temperatura ambiente. Os sinais de tensão coletados eram digitalizados pela placa AD que foi conectada a um micro PC AT 486 no qual estava instalado o aplicativo Aqdados de aquisição e tratamento de dados. Este sistema já havia sido utilizado antes para outra ligas (*Rizzo, 1994; Amstalden, 1995*).

As curvas térmicas foram registradas para vários pontos do cilindro e da casca cerâmica a partir da base até a altura de 173mm. Os dados utilizados nesse trabalho são as curvas térmicas registradas apenas para a liga em um dos vazamentos realizados.

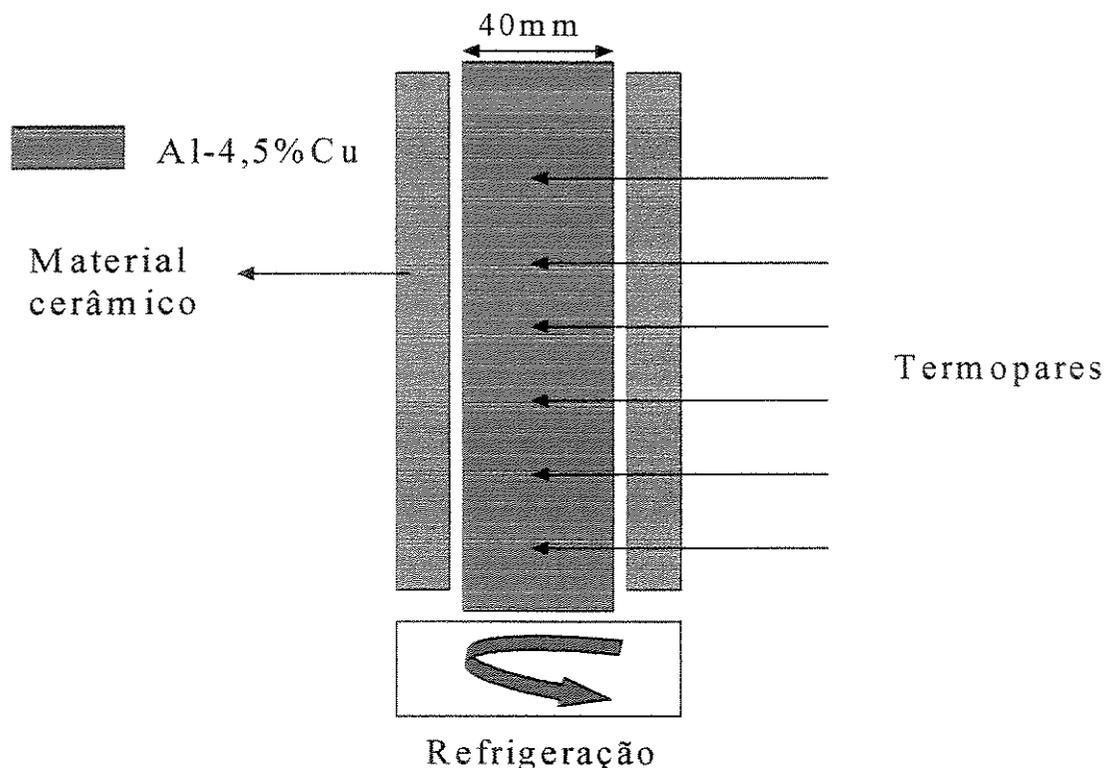


Figura 5.1 : Esquema da solidificação unidirecional da liga Al-4,5%Cu.

Os outros experimentos foram realizados no laboratório de solidificação do Departamento de Engenharia de Materiais da UNICAMP durante a realização do trabalho que resultou nessa dissertação.

A liga Zn2%Al foi solidificada utilizando - se um molde cilíndrico de aço - carbono, material condutor que funciona como absorvedor de calor do sistema. Para garantir a predominância do fluxo de calor radial, as bases inferior e superior do molde foram isoladas por material refrat a base de sílica.

O molde apresenta uma pequena conicidade para facilitar o procedimento de desmoldagem. O diâmetro médio interno do molde é de 60mm, externo de 160mm e 180mm de altura .

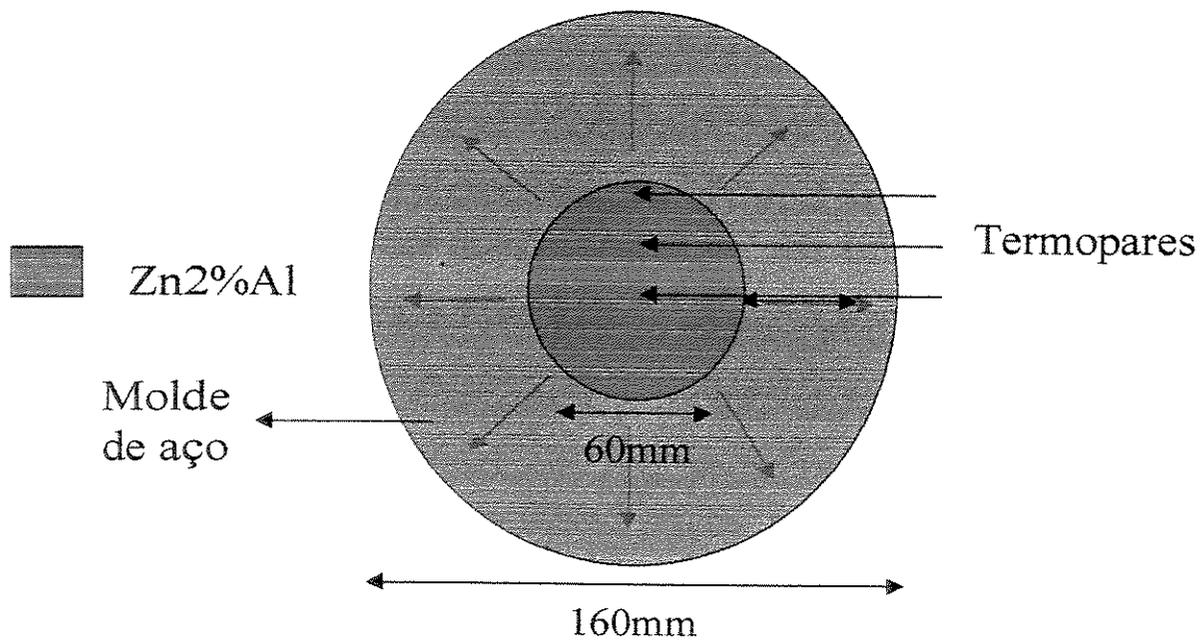


Figura 5.2 : Solidificação com extração radial de calor , corte perpendicular ao eixo cilíndrico .

O ensaio constituiu na obtenção dos perfis de temperatura em três pontos do material metálico, sendo que os termopares foram posicionados em um mesmo plano perpendicular ao eixo do molde e em posições diferentes em relação ao centro (figura 5.2). A liga foi fundida em um cadinho de carbetto de silício, revestido internamente por uma pintura de material refratário para evitar algum tipo de contaminação, e vazada a uma temperatura aproximadamente 15% maior que a temperatura líquidus. As curvas foram registradas por termopares tipo K conectados a um registrador de dados digital, da ALMEMO/AHLBORN, modelo 2290-8, que armazenou os dados que depois foram descarregados em um micro, lidos e manipulados pelo programa Origin 5.0.

Utilizou-se, novamente, a liga Al-4.5%Cu no terceiro caso analisado. Nesse caso, a liga foi solidificada em um molde triangular de areia com resina de cura a frio.

O registrador da ALMECO/AHLBORN, com os termopares tipo K também foram utilizados nesse experimento. O molde consistia em um triângulo equilátero com paredes de espessura de 50mm e com paredes internas de 80mm (figura 5.3).

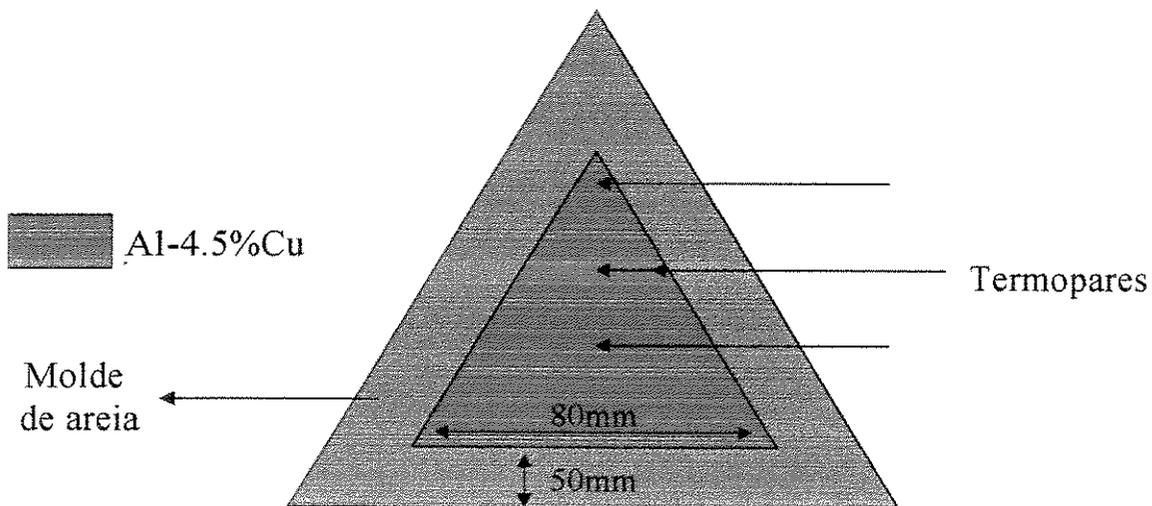


Figura 5.3 : Esquema da solidificação da liga Al-4.5%Cu em molde de areia.

A liga foi fundida, também, em um cadinho de carbetto de silício recoberto por massa refratária. Antes do vazamento o molde foi aquecido a uma temperatura de aproximadamente 150°C para evaporação de água que poderia causar acidentes decorrente do contato com o alumínio líquido. Durante o vazamento, a temperatura do molde era de aproximadamente 50°C, e a liga foi vazada a uma temperatura cerca de 10% superior a temperatura líquidus (T_1).

As propriedades físicas dos materiais utilizados nos experimentos estão descritas no Apêndice.

5.2- Análise das constantes e propriedades físicas adotadas nos modelos numéricos.

As propriedades físicas, já comentadas, relevantes para os modelos numéricos desenvolvidos no trabalho são a densidade, o calor específico, a condutibilidade e a entalpia no caso dos materiais metálicos que sofrem mudanças de fase .

Nos casos analisados, os moldes não apresentaram mudanças significativas de temperatura que causassem diferenças nos valores das propriedades físicas de seus materiais que também não passaram por processos de transformação de fase. Sendo assim, as propriedades

densidade, calor específico e condutibilidade foram consideradas propriedades isotrópicas constantes, cujos valores foram retirados da literatura disponível e estão descritos no Apêndice.

Deve-se ressaltar, entretanto que há uma dificuldade maior em se definir os valores das propriedades do molde de areia do que os do molde de aço, já que os valores variam muito com a composição.

As ligas Al4,5%Cu e Zn2%Al que foram solidificadas e sofreram processos de transformação de fase necessitam de mais atenção no tratamento numérico. O programa utiliza o método da entalpia nos casos de transformação de fase, então, necessita-se conhecer a evolução temporal dessa variável e os pontos de transformação das ligas (T_s e T_l). Os valores de entalpia são calculados a partir dos valores de calor específico e densidade das ligas a partir das fórmulas:

$$H(T) = \int_{T_{ref}}^T c_s \cdot \rho_s \cdot dT \quad (5.1)$$

e

$$H(T) = \int c_l \cdot \rho_l \cdot dT + L_f \cdot \rho_l \quad (5.2)$$

onde os índices s e l referem-se as fases sólida e líquida do material metálico, e as propriedades calor específico (c) e densidade (ρ) variam com a temperatura e estado da liga.

Os valores dos coeficientes de transferência de calor entre as interfaces metal/molde (h_i) e molde/meio envolvente (h_e) foram estimados a partir de valores encontrados em literatura anterior referentes a sistemas metal/molde semelhantes.

Capítulo 6

Resultados e discussões

6.1 - Curvas experimentais e simuladas.

Estão apresentadas a seguir as curvas comparativas de solidificação teóricas e experimentais a serem analisadas neste trabalho. Todas as curvas registradas durante as experiências estão expostas conjuntamente com suas respectivas curvas teóricas. Todos os valores dos coeficientes de transferência de calor Newtoniano (h_i) e coeficientes de transferência de calor por convecção (h_c) adotados nas simulações também estão relacionados aqui.

Uma análise comparativa e discussões sobre os resultados que estão apresentados a seguir são encontradas no item 6.2, juntamente com a apresentação de novas simulações, que foram realizadas com o objetivo de ajudar na análise de erros e reforçar as qualidades do programa Ansys quanto as facilidades de adaptação dos programas já desenvolvidos.

O primeiro caso analisado é a simulação do processo de solidificação unidirecional da liga Al-4,5%Cu. Para solidificação unidirecional vertical, o molde foi pré aquecido a uma temperatura de 700°C e utilizou-se uma coquilha de cobre refrigerada a água na parte inferior da montagem. A temperatura de vazamento (T_v) foi de 750°C, sendo o superaquecimento próximo de 15% do valor da temperatura líquidus (T_l) da liga. Os perfis de temperatura foram obtidos com a colocação de termopares tipo K em diferentes posições no metal, a partir da interface metal/coquilha.

A simulação é feita a partir de um corte transversal do cilindro com as dimensões já apresentadas , considerando-se isolamento perfeito nas laterais e fluxo de calor vertical unidirecional realizado por condução, no metal, e transferência Newtoniana na interface metal/coquilha. No trabalho (*Melo.M.L.M.N., 1996*) encontramos valores do coeficiente de transferência de calor (h_i) calculados em função do tempo de solidificação.

Inicialmente utilizou-se, na simulação, um valor médio desse coeficiente h_i igual a $1800\text{W/m}^2\text{K}$. Os valores da simulação para esse valor de coeficiente de transferência de calor não se ajustaram às curvas experimentais como pode ser observado na figura 6.1. Foram, então, utilizados os valores do coeficiente variando com o tempo (*Melo.M.L.M.N., 1996*). Para a utilização dos valores variáveis desse coeficiente, no programa Ansys, eles foram transformados em valores dependentes da temperatura à partir do gráficos de perfil térmico do termopar localizado mais próximo à interface metal/coquilha e, então, relacionados, com a condutibilidade como já explicado anteriormente no Capítulo 4. A variação adotada do coeficiente de calor com a temperatura está na tabela 6.1 e os novos resultados obtidos, bem mais próximos dos resultados experimentais, estão na figura 6.2.

Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	h_i ($\text{W/m}^2\text{K}$)
250	1000
350	1100
418	1750
450	2300
730	4000

Tabela 6.1 : Variação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde durante a solidificação unidirecional da liga Al-4,5%Cu.

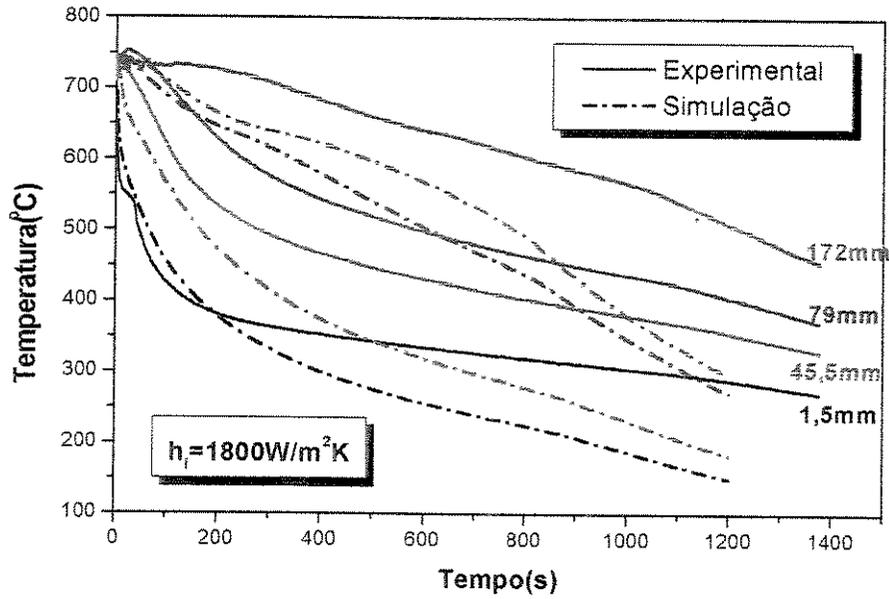


Figura 6.1 : Resultados experimentais e simulados para solidificação unidirecional da liga Al-4,5%Cu, utilizando-se, na simulação, valor constante para o coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde (h_i).

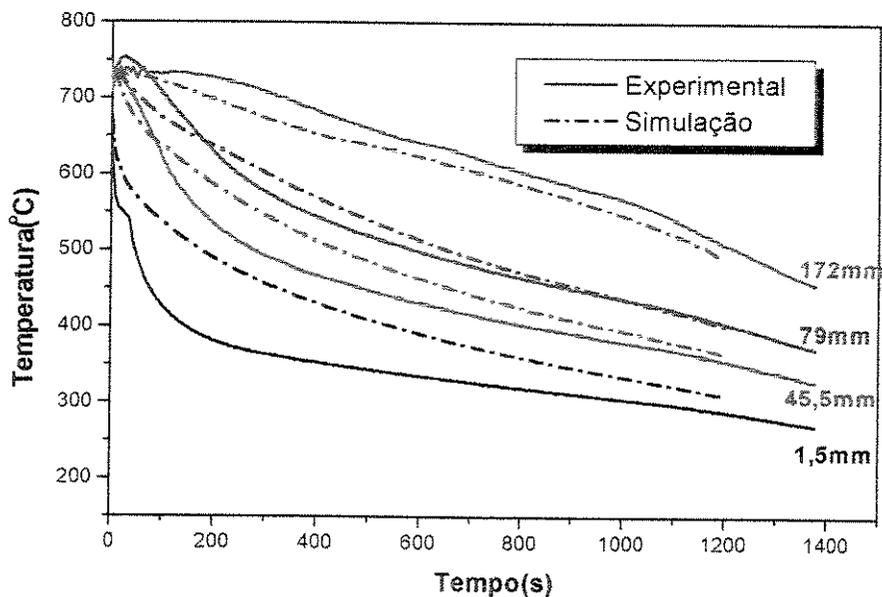


Figura 6.2 : Resultados experimentais e simulados para solidificação unidirecional da liga Al-4,5%Cu, utilizando-se, na simulação, valores variáveis do coeficiente de transferência de calor Newtoniano (h_i).

O problema da solidificação de um metal em molde cilíndrico com fluxo de calor radial, também foi simulado. A liga utilizada foi Zn-2%Al, os valores de entalpia foram calculados a partir dos valores de calor específico nas fases sólida e líquida como já foi descrito. Além dos valores de entalpia e das propriedades termofísicas do material metálico em solidificação, também temos que considerar, nesse caso, os valores da densidade, condutibilidade e calor específico do molde metálico (aço-carbono) utilizado, pois, além da transferência de calor por condução no metal em solidificação, ocorre transporte de calor por transferência Newtoniana na interface metal/molde, condução no molde e convecção na interface molde/ar.

Durante a experiência, monitorou-se a evolução térmica da liga em solidificação através de termopares posicionados a uma mesma altura do cilindro em três posições diferentes em relação ao centro (figura 5.2). Os termopares utilizados e o sistema de aquisição de dados estão descritos em *Materiais e Métodos*.

O superaquecimento adotado foi da ordem de 10% acima da temperatura líquidus da liga, sendo que a temperatura de vazamento (T_v) foi de 443°C, e adotou-se a temperatura inicial do molde como sendo a temperatura ambiente (26°C).

A simulação, nesse caso, é feita a partir de um corte perpendicular ao eixo do cilindro e os modos de transferência de calor que regem esse problema são : condução no metal, transferência Newtoniana no *GAP* de ar formado na interface metal/molde, condução no molde e convecção na interface molde/ar.

Como no caso anterior utilizou-se, primeiramente, um coeficiente de transferência de calor Newtoniano médio para sistemas com essa geometria e comparou-se os resultados experimentais e simulados como pode se observar na figura 6.3. Os resultados desta simulação, como no caso anterior, não são satisfatórios quando comparados aos resultados experimentais.

Posteriormente, utilizou-se valores de h_i variáveis com a temperatura, cujos valores estão na tabela 6.2, obtendo-se, então resultados mais coerentes quando comparados aos experimentais, o que demonstra, novamente, a importância desse parâmetro para a simulação numérica . As

novas curvas teóricas obtidas estão comparadas com suas respectivas curvas experimentais nas figuras 6.4, 6,5 e 6,6.

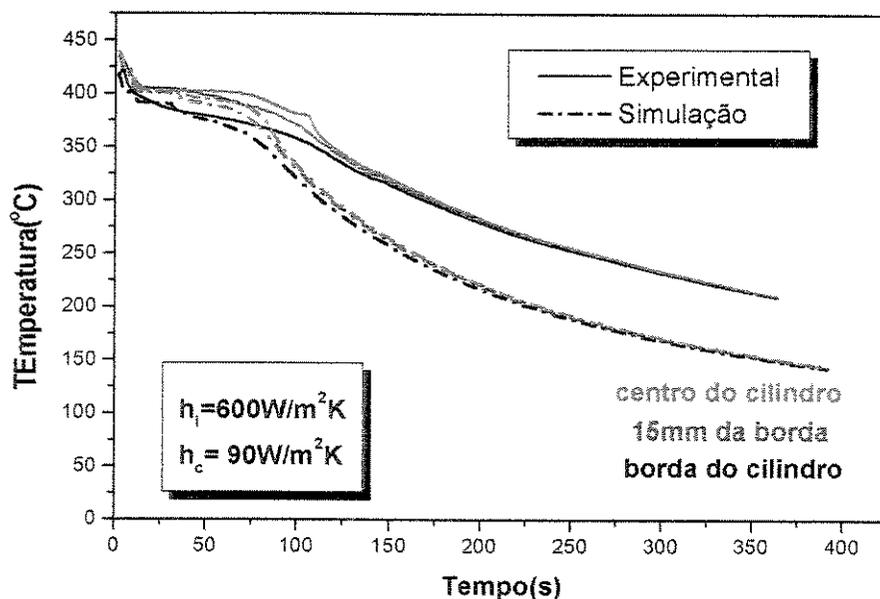


Figura 6.3: Curvas simulada e experimental da solidificação radial de um lingote cilíndrico de 60mm de diâmetro da liga Zn2Al, considerando-se h_i constante.

Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	h_i ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
120	500
250	500
382	900
402	1000
443	2000

Tabela 6.2 : Variação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde durante a solidificação da liga Zn-2%Al em molde cilíndrico de aço com extração de calor radial.

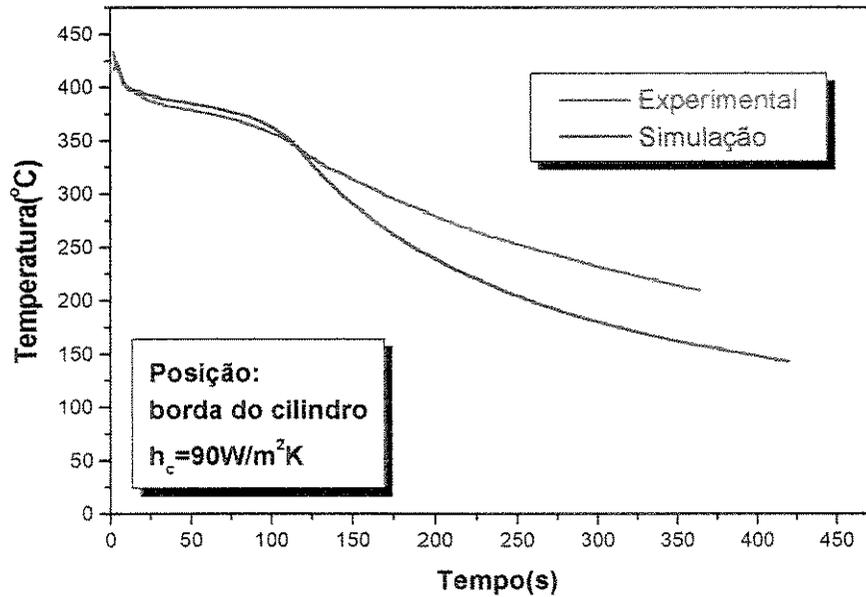


Figura 6.4: Curvas simulada e experimental da solidificação radial de um lingote cilíndrico de 60mm de diâmetro da liga Zn-2%Al, considerando-se h_i variável no tempo. Posição : 2mm da borda do molde.

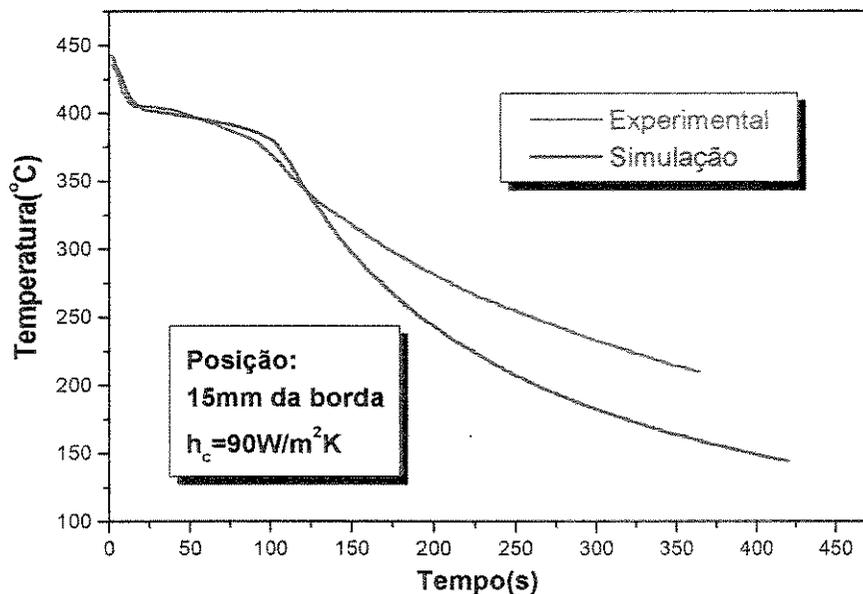


Figura 6.5 : Curvas simulada e experimental da solidificação radial de um lingote cilíndrico da liga Zn-2%Al, considerando-se h_i variável no tempo. Posição : 15mm da borda do molde.

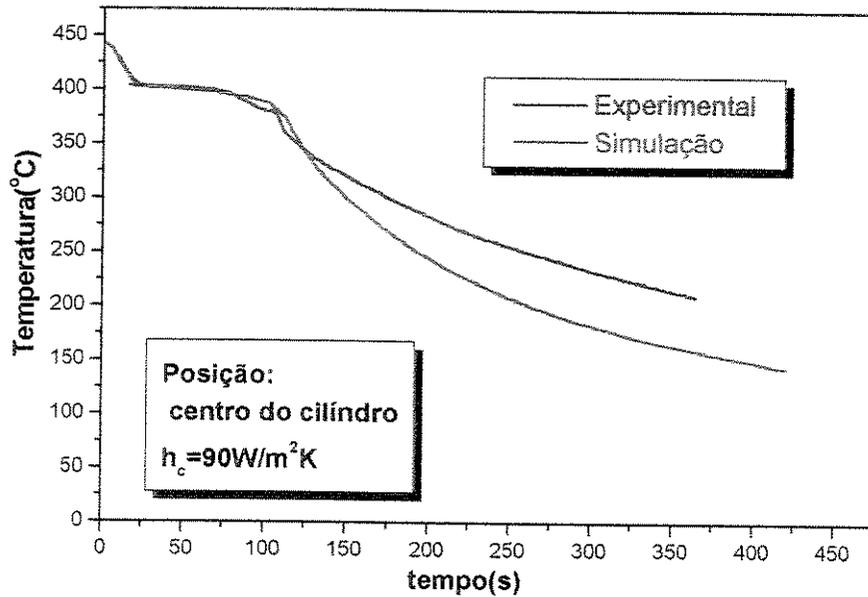


Figura 6.6 : Curvas simulada e experimental da solidificação radial de um lingote cilíndrico da liga Zn-2%Al, considerando-se h_i variável no tempo. Posição : centro do molde.

Outra simulação realizada foi da solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde de areia com secção transversal triangular (fig. 5.3).Nesse caso o calor era extraído pelas paredes do molde de areia, sendo que as faces superior e inferior foram, novamente, isoladas com material refratário.

A simulação foi realizada a partir de um corte da secção triangular transversal do sistema metal/molde e as curvas térmicas experimentais registradas por termopares localizados em um mesmo plano, em diferentes posições do metal.

As propriedades da liga são as mesmas já utilizadas no caso de fluxo de calor unidirecional, sendo diferente o valor do coeficiente, h_i , de transferência de calor na interface metal/molde , pois se trata de um arranjo diferente em relação ao material do molde e à geometria. No modelo numérico utilizou-se um valor constante de coeficiente de calor Newtoniano obtendo-se resultados satisfatórios, apresentados nas figuras 6.7 e 6.8 , não sendo necessário criar um modelo com coeficiente (h_i) variável .

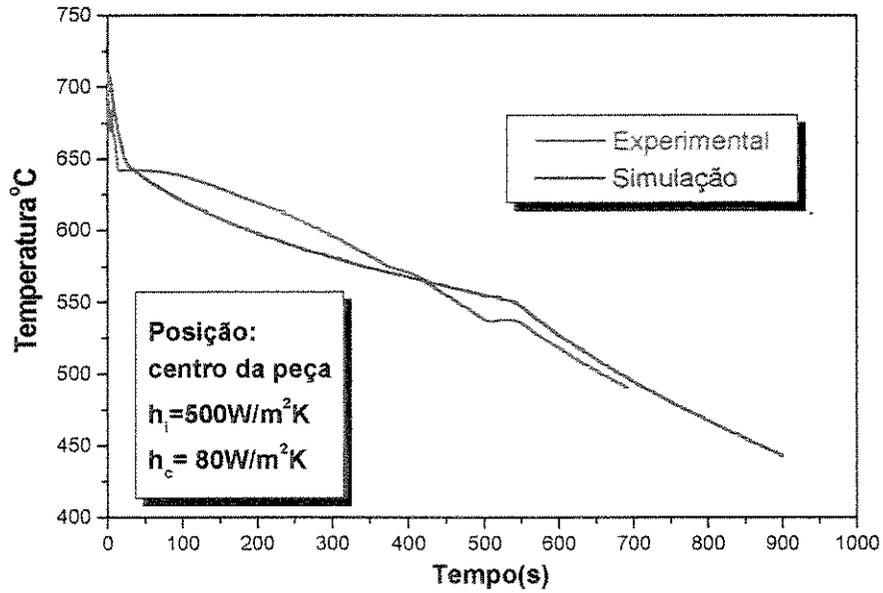


Figura 6.7 : Curvas experimental e simulada da solidificação de uma peça triangular de Al-4,5%Cu em molde de areia com resina de cura a frio. Posição: centro da peça.

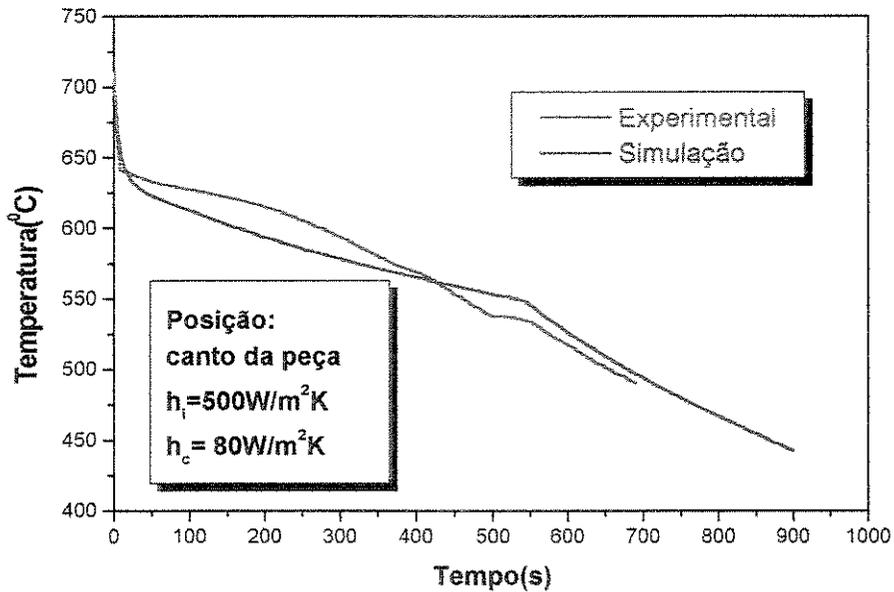


Figura 6.8 : Curvas experimental e simulada da solidificação de uma peça triangular de Al-4,5%Cu em molde de areia com resina de cura a frio. Posição: canto da peça.

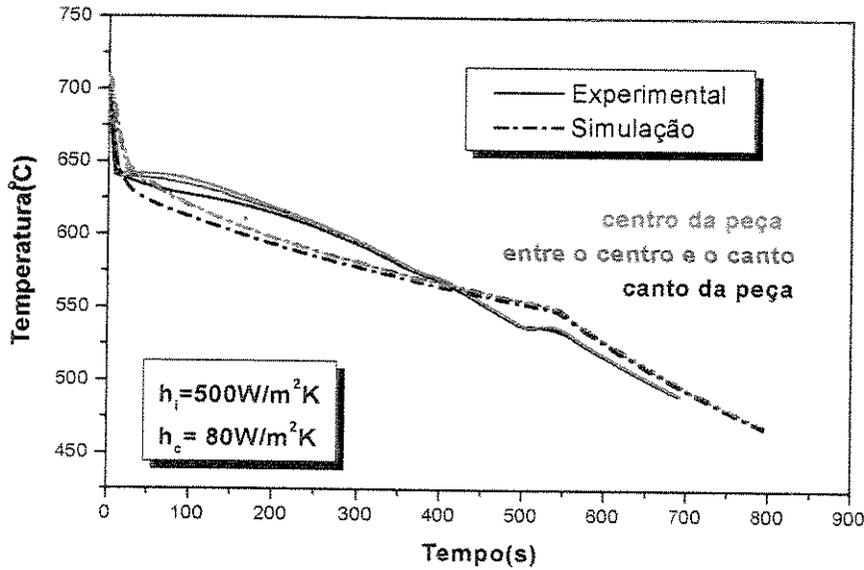


Figura 6.9 : Curvas experimentais e simuladas da solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde triangular de areia, nas três posições consideradas.

Na montagem experimental foram utilizados 3 termopares como mostra a figura 5.3, entretanto, apenas dois gráficos comparativos das curvas experimentais e simuladas estão representados (figuras 6.7 e 6.8). Isso se deve ao fato dos 4 perfis térmicos registrados serem muito próximos como mostra a figura 6.9, onde estão representados, conjuntamente, todos os perfis experimentais e as respectivas curvas simuladas. Nas figuras 6.7 e 6.8 estão representados, portanto, os dois perfis térmicos mais distintos.

Esses são os sistemas metal/molde simulados e suas curvas térmicas teóricas e experimentais. As propriedades dos materiais utilizados são apresentadas no Apêndice e os discussões dos resultados estão apresentadas a seguir.

6.2- Análise dos resultados apresentados.

O primeiro parâmetro a ser discutido é o coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde (h_i) que tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores, visto que, dele depende significativamente os resultados das análises teóricas do processo de solidificação.

Verificamos uma discrepância muito grande entre os resultados teóricos e experimentais das curvas apresentadas nas figuras 6.1 e 6.3. Esses resultados representam as curvas térmicas de duas experiências distintas onde as simulações foram realizadas utilizando-se um valor constante para o coeficiente Newtoniano de transferência de calor, o que não ocorre na realidade. Sabe-se que no início da solidificação há um bom contato entre o metal e a parede do molde e que esse contato diminui no decorrer da solidificação em decorrência da contração que sofre o metal durante o processo, ocorrendo a formação do *GAP* de ar e, a eficiência do transporte de calor nessa interface vai diminuindo com o aumento do tamanho desse *GAP*. As curvas simuladas foram, então, recalculadas adotando-se valores variáveis para esse parâmetro. Os valores dos coeficientes foram estimados a partir de trabalhos anteriores referentes a sistemas metal/molde idênticos ou semelhantes (Melo, M.L.M.N., 1996, Osório, W.R.R., Quaresma, J.M.V., Neto, M.F., Garcia, A., 1998). Após a correção dos valores de h_i obtivemos, como era esperado, curvas simuladas com resultados bem mais próximos aos experimentais (figuras 6.2, 6.4, 6.5 e 6.6).

Mesmo após o ajuste do coeficiente de transferência de calor Newtoniano, que passou a variar com a temperatura, ainda encontramos algumas diferenças entre os resultados teóricos e os experimentais. As diferenças entre os valores de temperatura em um mesmo instante, no caso da solidificação unidirecional da liga Al-4,5%Cu e da solidificação do Zn-2%Al, chegam a 20%. Esses maiores índices ocorrem sempre a temperaturas abaixo da temperatura sólido (T_s) da liga, ou seja, durante o resfriamento do material já solidificado.

A curva teórica referente à simulação da solidificação da liga Zn-2%Al apresenta valores muito próximos aos experimentais durante o período de solidificação, e vai se distanciando da curva experimental durante o resfriamento do material já solidificado. Vários fatores têm influência sobre o resultado teórico, como por exemplo as propriedades do material metálico utilizado, as condições de contorno adotadas pelo modelo numérico, as propriedades do molde e os coeficiente de transferência de calor nas interfaces metal/molde e molde/meio envolvente.

As propriedades dos materiais metálicos, tanto no estado líquido como no sólido, são dependentes da temperatura e os valores nem sempre são totalmente conhecidos. Nesses dois estados encontram-se valores diferentes das propriedades termofísicas em diferentes fontes de informação, isso pode causar erros nos resultados teóricos, pois o grau de precisão dos dados

físicos utilizados em qualquer modelamento matemático é de grande importância, influenciando os resultados muito significativamente.

As condições de contorno adotadas podem, também, ser uma fonte de erro. No caso da solidificação da liga Zn-2%Al, o molde era cilíndrico e as bases superior e inferior foram isoladas com material refratário para garantir a predominância de fluxo de calor através da parede do molde. Na simulação consideramos o molde de tamanho infinito para garantirmos fluxo radial de calor e não o isolamento por material cerâmico. Outra condição de contorno adotada que pode não estar representando totalmente a realidade é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o molde e o meio. Esse coeficiente é adotado como sendo constante, entretanto pode sofrer variações devido a um possível aumento da temperatura ambiente ao redor do molde que, no caso da simulação, não se altera.

No caso da solidificação unidirecional da liga Al-4,5%Cu, os parâmetros já citados também devem ser levados em consideração como possíveis fontes de erro da modelagem. No caso das condições de contorno, por exemplo, consideramos um meio qualquer com temperatura constante como fonte extratora de calor na base do molde, e não exatamente um fluxo de água. Isso pode explicar as maiores diferenças de comportamento das curvas estarem nas quais representam pontos próximos à interface, onde o fluxo de água exerceria maior influência nos resultados. Em posições próximas à interface também deve-se levar em conta o erro experimental, pois o vazamento pode provocar um deslocamento dos termopares que, nessa posição, podem afetar, de maneira relativamente maior que em outras posições, os dados registrados.

Na figura 6.9 estão as curvas, teóricas e experimentais, da solidificação em molde de areia da liga Al-4,5%Cu. No caso da solidificação em molde de areia os valores obtidos com a simulação diferem, no máximo, em 5% dos valores experimentais.

Os resultados são referentes a três pontos distintos da liga em solidificação, entretanto tanto as curvas experimentais quanto teóricas apresentam valores muito semelhantes para diferentes posições do material metálico em solidificação. Inicialmente, considerou-se a possibilidade de ter havido algum erro nas medidas experimentais, mas quando verificou-se que a

simulação também apresentava curvas semelhantes para as diferentes posições decidimos investigar o molde como sendo a possível causa desse fenômeno.

Primeiramente investigamos o material do molde realizando uma simulação da solidificação da mesma liga, Al-4,5%Cu, em um molde triangular com as mesmas dimensões já utilizadas, trocando-se o material do molde para aço. Os resultados dessa simulação estão na figura 6.10, e são, de fato, bem distintos dos resultados apresentados para molde de areia.

Com a mudança do material do molde, além da diminuição significativa do tempo de solidificação da liga, nota-se também maiores diferenças no comportamento das curvas dos diferentes pontos analisados.

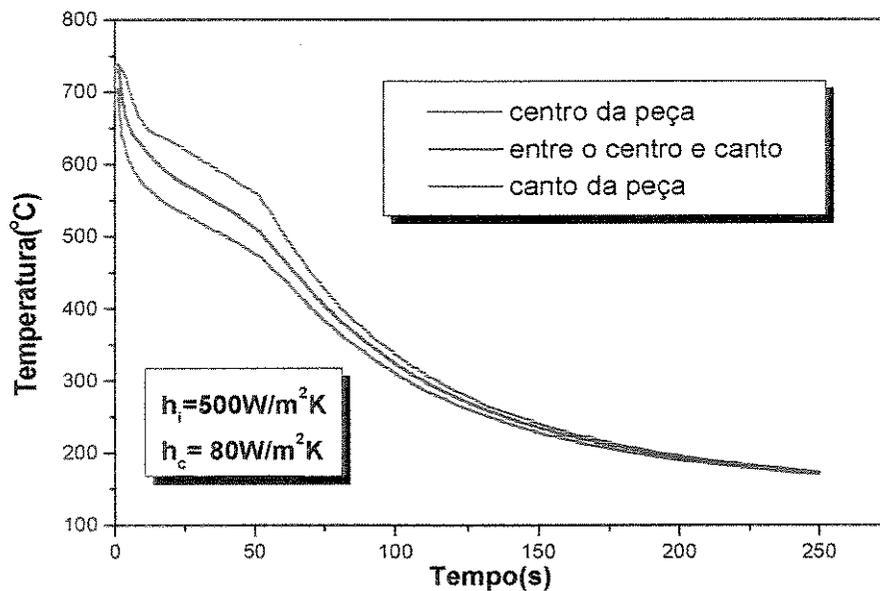


Figura 6.10 : Simulação da solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde triangular de aço.

Para verificarmos o quanto a forma do molde triangular afeta os resultados também realizamos uma simulação da solidificação da mesma liga em molde cilíndrico de areia. Considerou-se, na simulação, um molde cilíndrico com as mesmas dimensões e com as mesmas condições de contorno da simulação da solidificação da liga Zn-2%Al (fig. 5.2). O comportamento das curvas voltou a ser o mesmo observado no molde triangular de areia onde a solidificação ocorre praticamente no mesmo instante em todas as posições da peça. Os resultados

apresentados da figura 6.9 se referem às curvas da evolução térmica da liga em solidificação em três diferentes posições : centro do cilindro, a 15mm e a 1mm da interface metal / molde.

O calor se propaga muito lentamente no molde de areia e isso pode causar um equilíbrio de temperatura no material em solidificação antes que ocorra mudança de fase, sendo assim a mudança de estado líquido para sólido pode acontecer ao mesmo tempo ou em tempos muito próximos em qualquer ponto do material. O fato das diferenças entre os valores teóricos e experimentais serem os menores obtidos entre os três casos apresentados pode ser devido, também, ao fato do calor se propagar lentamente.

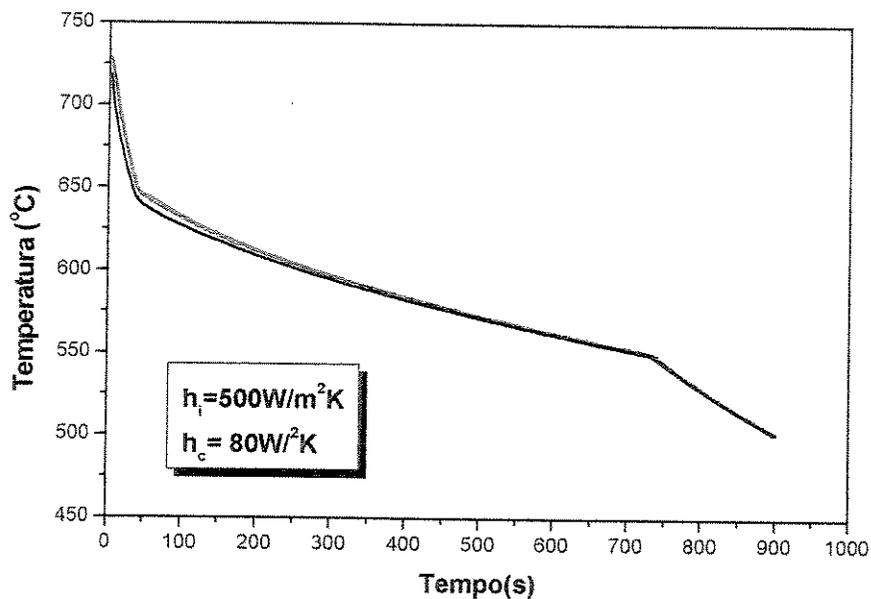


Figura 6.11 : Simulação da solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde cilíndrico de areia, resultados das três posições apresentadas para molde cilíndrico de aço (fig. 6.3).

6.3 - Exemplos de aplicação do Ansys na análise do processo de solidificação.

O programa Ansys oferece algumas vantagens de pós-processamento dos dados obtidos durante a simulação como, por exemplo, fácil manipulação, exportando-os para qualquer programa gráfico, possibilidade de obtenção dos dados tanto em forma de gráficos como em tabelas e, também pode-se ter uma visão completa de uma secção definida durante a modelagem

dividida em intervalos de temperatura, em qualquer instante, com esses intervalos representados por cores diferentes.

No caso de ligas metálicas, durante o processo de solidificação em geral não se verifica uma interface definida entre a região líquida e a sólida como ocorre no caso de metais puros. O que ocorre é o aparecimento de uma região onde sólido e líquido coexistem, devido ao crescimento dendrítico da fase sólida ocasionado pela rejeição de soluto ou de impurezas, que provoca o super-resfriamento. Essa região onde há dendritas em meio à fase líquida é denominada zona pastosa e as interfaces líquido/pastoso e pastoso/sólido movem-se com velocidades diferentes e variáveis.

No caso da obtenção da representação esquemática de uma peça onde intervalos de temperatura são relacionados com diferentes cores, o programador pode pré estabelecer qual o intervalo de temperatura que cada uma das cores deve representar. Assim obtém-se uma imagem onde podem ser localizadas as regiões onde há metal líquido, onde há zona pastosa e qual a porção solidificada a cada instante, e também, a temperatura em cada ponto do molde. Pode-se também, através da evolução das cores dentro da peça obter na tela uma representação em animação do processo de solidificação e resfriamento da peça.

Esse tipo de visualização permite verificar quais as últimas regiões a solidificar no interior da peça e assim prever possíveis locais de formação de poros, e até mesmo, estimar suas dimensões utilizando o coeficiente de contração do metal.

Outra vantagem dessa capacidade de pós processamento de dados é a possibilidade de uma análise das diferenças entre os processos de solidificação de uma mesma peça em moldes de diferentes materiais, ou ainda as diferenças entre os processos de solidificação de ligas diferentes em um mesmo molde. Ou seja, avaliar a sensibilidade do processo de solidificação em relação aos vários parâmetros e propriedades físicas relevantes.

Neste ítem as figuras obtidas após as simulações são utilizadas para continuar a discussão dos resultados obtidos e, também, para ilustrar, de forma mais explícita, essa possibilidade de pós

processamento dos dados que é uma das vantagens que o programa Ansys oferece frente a outros modos de modelagem matemática do processo de solidificação.

Durante a programação de cada processo de solidificação simulado, foram determinados intervalos de temperatura que possibilitasse a visualização das diferentes regiões que caracterizam um material metálico em solidificação, ou seja, região totalmente líquida, região pastosa e região totalmente sólida. Regiões com temperatura acima da temperatura líquidus (metal líquido), estão representadas pela cor cinza, regiões com temperatura entre a temperatura líquidus e a temperatura sólidus (zona pastosa) estão representadas pela cor vermelha. As regiões com temperaturas abaixo da temperatura sólidus (metal sólido) e o molde estão representados de acordo com as escalas de cores com variação contínua apresentadas nas figuras 6.12, 6.13, 6.14, 6.15, 6.16 e 6.17. Esse procedimento foi adotado principalmente com o objetivo de se monitorar as interfaces sólido/pastoso e pastoso/líquido em cada caso.

Durante a solidificação da liga Al-4,5%Cu observa-se que a peça sofre um processo de solidificação unidirecional devido a utilização de uma coquilha de cobre refrigerada, em uma das extremidades para extração de calor (fig. 5.1). Um material refratário é utilizado para isolar lateralmente o material metálico e impedir o fluxo de calor em outras direções. O fluxo de calor unidirecional é caracterizado pelas interfaces, entre as regiões líquido/pastoso e pastoso/sólido, que se apresentam de forma plana e bem definida como pode ser observado na figura 6.12. Observa-se também, nessa figura, que as velocidades de avanço dessas interfaces são diferentes, sendo a velocidade da interface líquido/pastoso maior que a da interface pastoso/sólido. Isto caracteriza um aumento da extensão da zona pastosa durante o processo de solidificação, o que está relacionado com o grande intervalo de temperatura de solidificação da liga.

No processo de solidificação da liga Zn-2%Al em molde cilíndrico de aço, com extração de calor radial (fig.5.2), observa-se, pela figura 6.13(b) que, após o intervalo de tempo de 50s, praticamente todo o metal se encontra dentro do intervalo de temperatura que caracteriza, no caso dessa liga, a zona pastosa, antes do aparecimento de uma região completamente solidificada. Isso ocorre, provavelmente, porque a geometria cilíndrica, o pequeno raio da peça e o material do molde (aço) propiciam uma rápida extração de calor do metal facilitando a formação da estrutura dendrítica. O avanço da frente de solidificação é em forma de casca cilíndrica, uniforme e o

centro do cilindro, sendo a última parte a solidificar, apresenta maior probabilidade de ocorrência de porosidade. No processo de solidificação em molde cilíndrico a velocidade de avanço da interface líquido/pastoso também se apresenta maior que a velocidade da interface pastoso/sólido, pelas mesmas razões citadas no caso anterior. Pelas figuras 6.13 vemos que em 50s toda a região líquida já se transformou em zona pastosa, enquanto que essa região pastosa demora 80s para solidificar completamente.

Durante o processo de solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde triangular de areia (fig. 5.3) também se observa a ocorrência de zona pastosa em quase toda a extensão da peça antes do aparecimento da região solidificada. Em aproximadamente 50s todo o metal se encontra dentro do intervalo de temperatura da zona pastosa, mas apenas 400s após o vazamento é que se observa o aparecimento da fase sólida. Isso é explicado pela baixa eficiência de extração de calor do molde de areia que faz com que a temperatura no metal caia muito lentamente. Nesse caso, o processo de solidificação termina 10 min após o vazamento.

Outro fenômeno observado no processo de solidificação em molde de areia é que ocorre, antes da mudança de fase, praticamente uma equalização da temperatura em quase toda extensão da peça. As figuras 6.14 (f) e (g) mostram uma grande quantidade de metal se solidificando num intervalo de tempo muito curto, esse comportamento também pode ser observado na figura 6.9 onde pode-se observar que as curvas da evolução térmica, de diferentes pontos da peça, são muito semelhantes.

O comportamento citado acima, inicialmente, provocou algumas dúvidas quanto a validade dos resultados. Utilizou-se, então, o programa para executar a simulação da solidificação da mesma liga, trocando-se apenas o material do molde de areia para aço. Os resultados podem ser observados na figura 6.15. Pode-se observar que a solidificação aconteceu de maneira bem mais rápida. O avanço das frentes de solidificação, e conseqüentemente a forma da região pastosa restante também se mostraram diferentes nos dois casos, assim como a forma de aquecimento dos moldes. É interessante observar as interfaces líquido/pastoso e pastoso/sólido que tendem à forma circular (fig. 6.15) a medida que o processo de solidificação evolui.

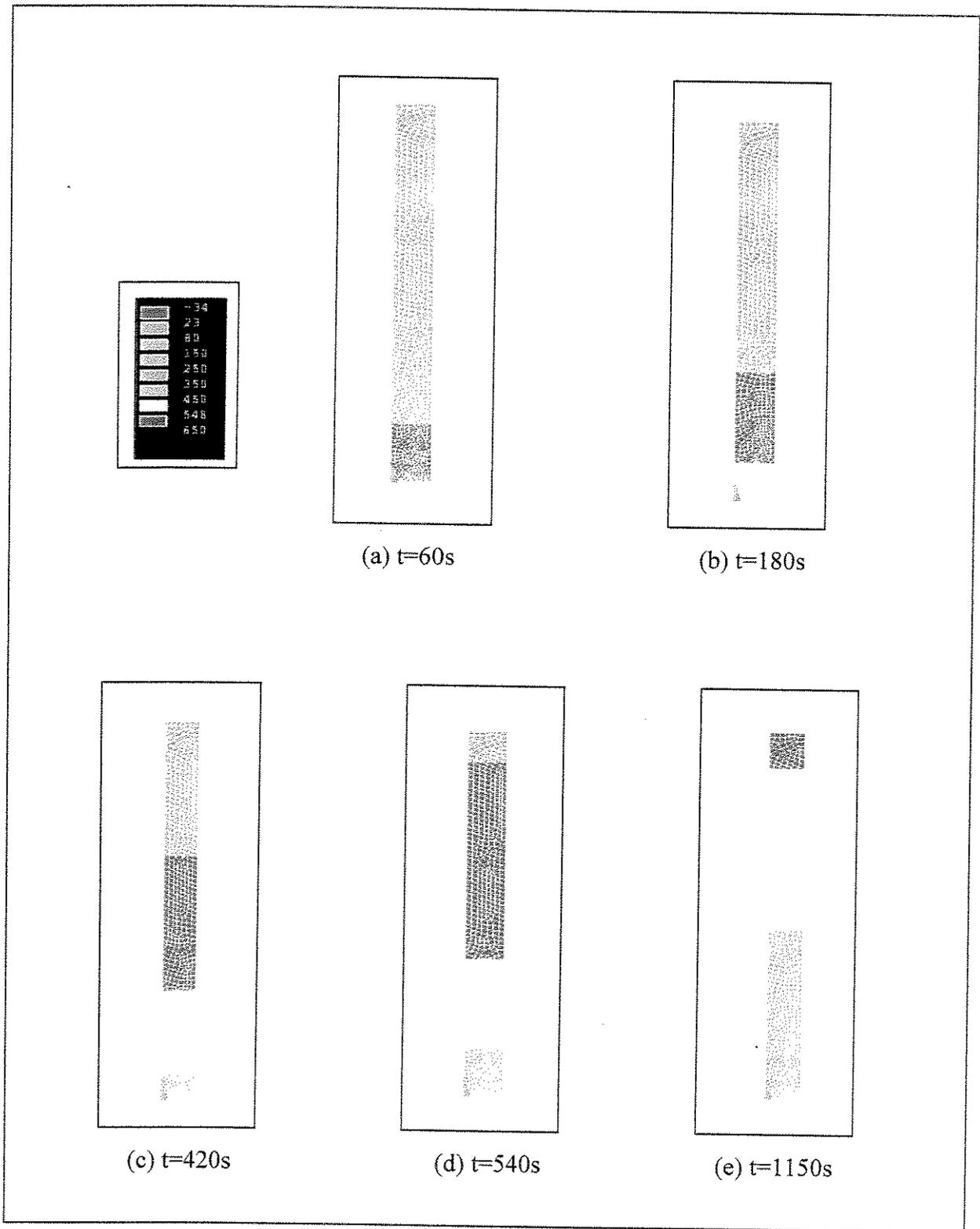


Figura 6.12: Simulação da solidificação unidirecional da liga Al-4,5%Cu em coquilha refrigerada à água.

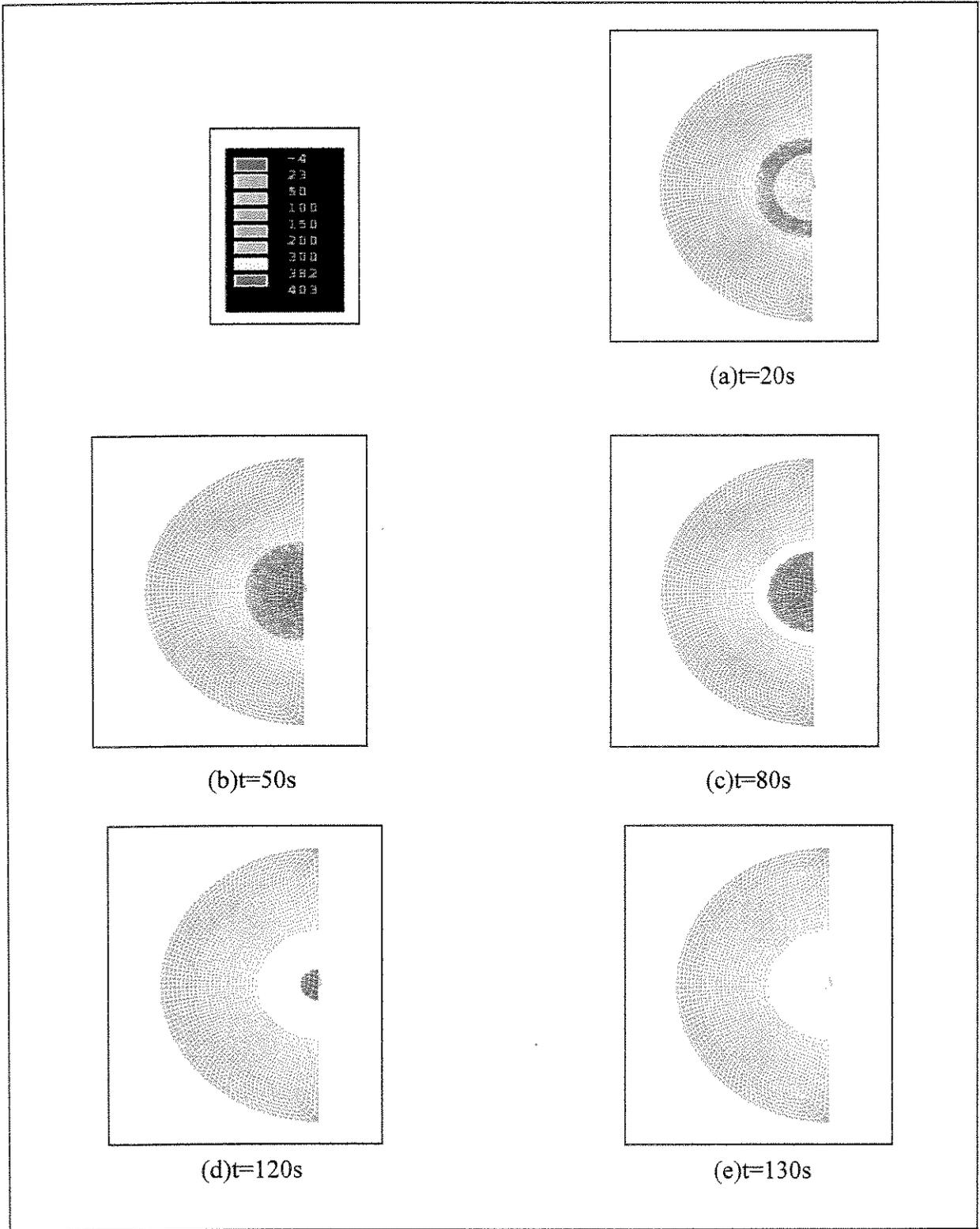


Figura 6.13: Simulação da solidificação da liga Zn-2%Al em molde cilíndrico de aço com extração de calor radial.

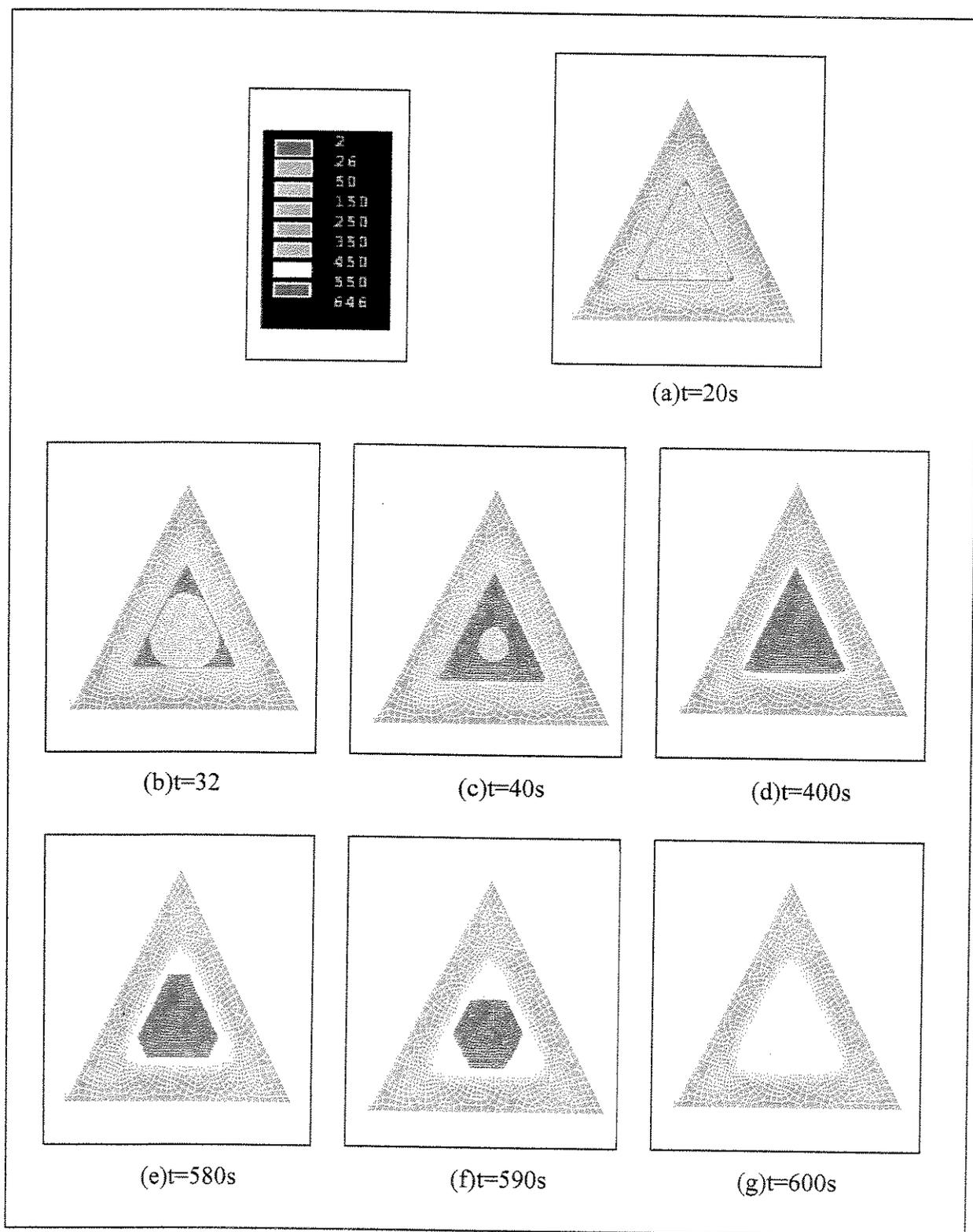


Figura 6.14: Simulação da solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde triangular de areia.

Outro teste realizado foi a simulação do processo de solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde cilíndrico de areia considerando-se extração de calor radial e as mesmas dimensões apresentadas na figura 5.2. As mesmas características do molde triangular de areia foram observadas : o material metálico sofreu solidificação bem lenta, com a zona pastosa atingindo quase toda a extensão da peça e o metal passando pelo mesmo processo de equalização de temperatura apresentado no caso do molde triangular de areia.

O resultado da aplicação do modelo em molde cilíndrico de areia pode também ser comparado com o resultado da simulação do modelo em molde cilíndrico de aço. Analisando as figuras 6.13(d) e (e) e as figuras 6.16 (d) e (e) fica bem explícita a diferença entre a evolução dos dois processos de solidificação. A diferença entre as velocidades de avanço da interface pastoso/sólido pode resultar em uma diferença entre as regiões de provável ocorrência de porosidades nas peças solidificadas em diferentes moldes. No caso do molde de aço, nos últimos 10s do processo de solidificação, a última região de zona pastosa presente antes da solidificação total (fig.6.13d) se apresenta bem menor que essa mesma região presente nos últimos 10s da solidificação em molde areia (fig. 6.16d). Isso pode indicar uma maior concentração de macroporosidades devido ao efeito de contração (rechupes), em um pequena área central da peça, no caso do molde de aço, e, uma maior área afetada por microporosidades interdendríticas no caso do processo em molde de areia.

Foi realizada também uma simulação da solidificação da liga Al-4,5%Cu em um molde com forma bem irregular para demonstrar o que pode ser aproveitado, pelo programador, quanto as facilidades, de construção de modelos e visualização dos resultados, oferecidas pelo Ansys. A forma escolhida está apresentada nas figuras 6.17. O material escolhido para o molde foi o aço.

Na figura 6.17, observa-se, inicialmente, o avanço de uma frente de solidificação junto ao canto direito da peça onde a seção da área com material metálico é menor. Outra frente de solidificação localizada na parte superior é observada 30s após o vazamento o que caracteriza duas frentes de solidificação distintas separadas por uma porção de zona pastosa, entretanto em $t=40s$ não se observa mais a separação das frentes de solidificação, sendo que passa a existir apenas um frente em forma circular que predomina até o final da solidificação em $t=48s$ onde se localiza perfeitamente a última região solidificada.

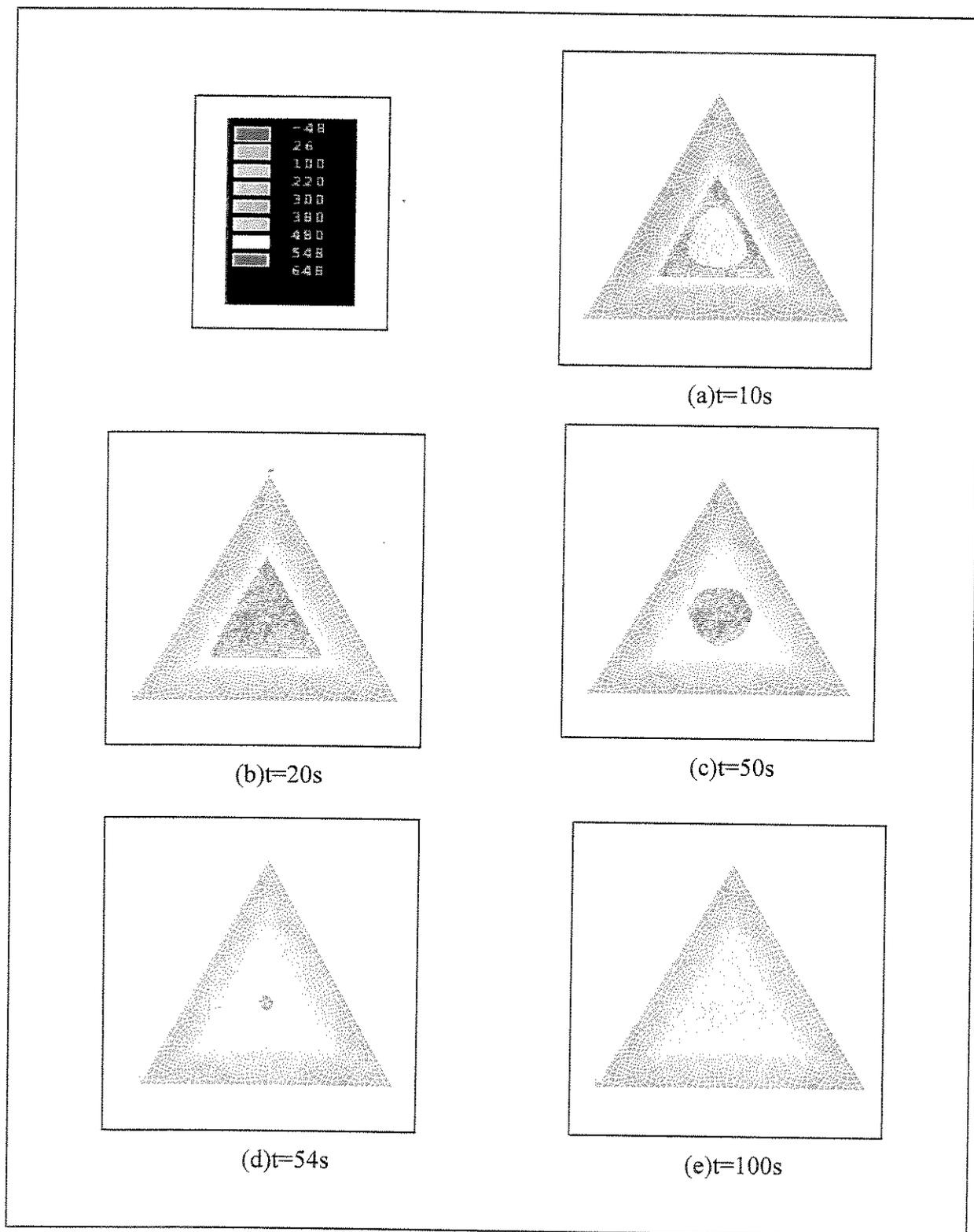


Figura 6.15: Simulação da solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde triangular de aço.

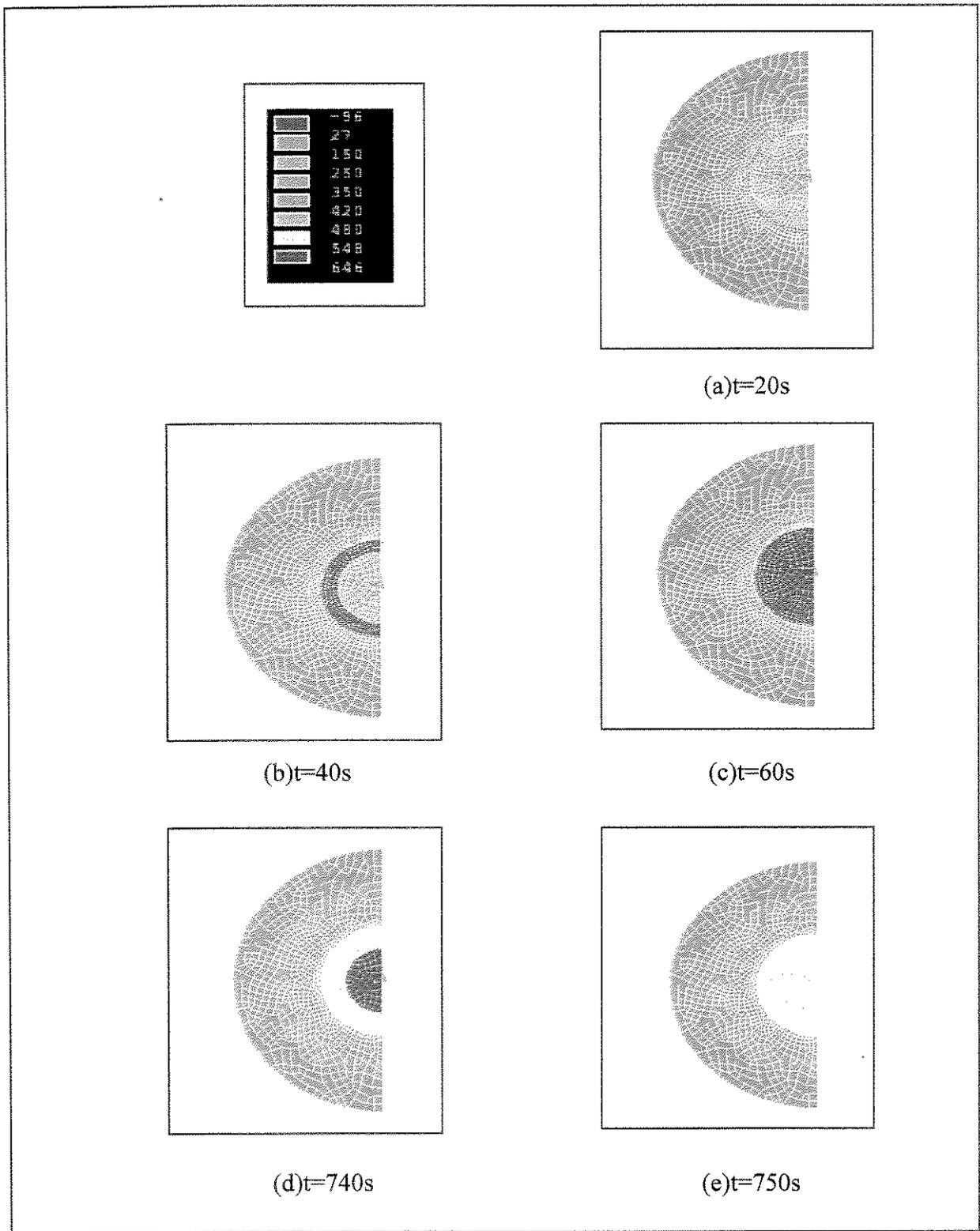


Figura 6.16: Simulação da solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde cilíndrico de areia com extração de calor radial.

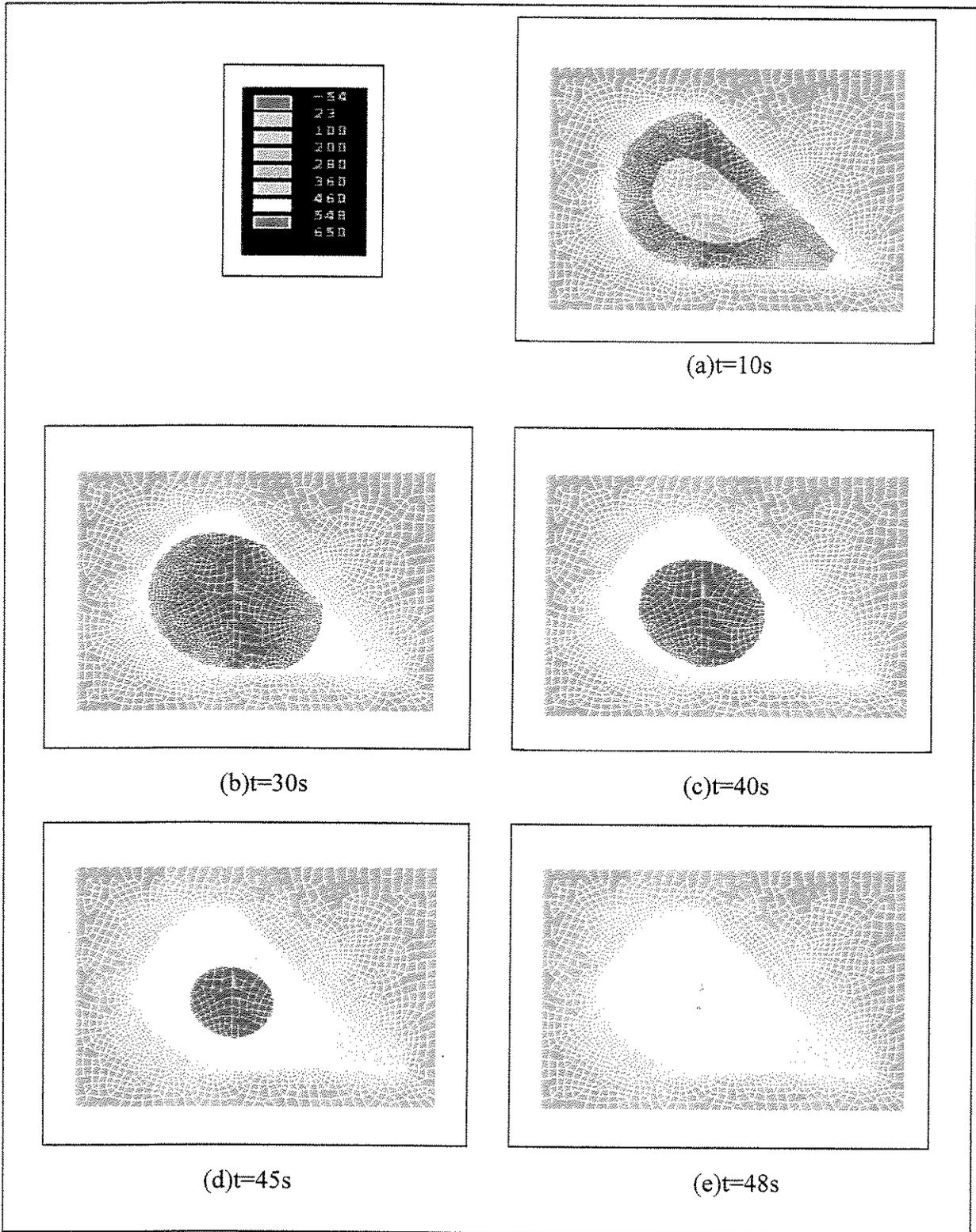


Figura 6.17: Simulação da solidificação da liga Al-4,5%Cu em molde de formato irregular de aço

Os resultados das simulações expostos dessa maneira, juntamente com as curvas da evolução térmica são de grande utilidade para análise do processo de solidificação facilitando a obtenção de várias informações importantes decorrentes do processo: possíveis regiões de formação de poros, velocidade de deslocamento das interfaces líquido/pastoso e pastoso/sólido e o tempo total e local de solidificação. Essas informações podem indicar o tipo de microestrutura provável e, se for o caso, fornecer dados para o cálculo dos espaçamentos interdendríticos primários e secundários a partir de equações encontradas na literatura.

Capítulo 7

Conclusões

A partir dos resultados apresentados no presente trabalho pode-se tirar várias conclusões sobre a utilidade do programa Ansys na simulação de processos de solidificação e viabilidade da utilização dos dados obtidos para análise de parâmetros decorrentes das curvas térmicas resultantes desses processos.

Comparando-se os resultados experimentais com os resultados das simulações realizadas com o Ansys conclui-se que o programa pode efetuar, com uma boa margem de segurança, a modelagem de processos de solidificação de ligas metálicas. Apesar de alguns resultados apresentarem algumas diferenças entre as curvas teóricas e experimentais, nota-se que não houve comprometimento dos resultados até o final da solidificação, sendo que os maiores erros ocorrem somente durante o período de resfriamento da liga como já foi discutido no Capítulo 6.

Além dos confiáveis resultados teóricos obtidos na simulação de processos de solidificação das ligas metálicas, o programa apresenta vantagens relacionadas com pré e pós-processamento que tornam conveniente sua utilização. Como vantagens de pré-processamento pode-se citar as facilidades de programação quanto a definição da geometria desejada e a capacidade de tratamento bidimensional e tridimensional dos problemas a serem analisados. Quanto ao pós-processamento dos dados, foram apresentados os resultados que relacionam intervalos de temperatura, de uma secção da peça, a cores, em qualquer instante definido durante o processo de solidificação, sendo que a partir dessa exposição de resultados pode-se, facilmente, determinar algumas variáveis do processo de solidificação como : tempo total de solidificação,

velocidade de avanço das interfaces líquido/pastoso e pastoso/sólido, últimas regiões a solidificar e regiões de possível formação de porosidade.

A adaptação utilizada para reproduzir o efeito do *GAP* de ar formado na interface metal/molde, se mostrou eficiente e, portanto, pode-se considerar que o programa Ansys pode ser utilizado também na estimativa de valores do coeficiente de transferência de calor Newtoniano. A partir de propriedades físicas bem definidas de ligas metálicas e resultados experimentais de processos de solidificação, o programa pode avaliar, se necessário, esse coeficiente a partir do ajuste de curvas teóricas a curvas de solidificação obtidas experimentalmente.

Finalmente, conclui-se que, o programa apresentou bons resultados nos casos analisados e os resultados das simulações podem ser, portanto, utilizados nos cálculos de vários parâmetros importantes que determinam as propriedades de uma peça que passou por um processo de fundição, como por exemplo, localização e dimensão de poros, os tempos de solidificação local e conseqüentemente as distâncias entre os espaçamentos interdendríticos. E, ainda, considerando-se a possibilidade de tratamento tridimensional e as facilidades de construção dos modelos, pode-se utilizar o programa na otimização de processos de fundição quanto a forma de vazamento, grau ideal de superaquecimento, material do molde utilizado, projeto de alimentadores etc.

Sugestões para futuros trabalhos.

- Utilização dos parâmetros térmicos, relacionados com o processo de solidificação, obtidos através da simulação realizada pelo Ansys, na determinação de espaçamentos dendríticos primários e secundários, utilizando diferentes equações disponíveis na literatura para diferentes ligas e comparação dos resultados teóricos com resultados experimentais obtidos na análise microestrutural das peças e ligas tratadas neste trabalho para estabelecer quais as equações mais convenientes para cada um dos casos.
- Modelagem da solidificação de peças industriais, utilizando-se tratamento tridimensional, para previsão da microestrutura e da forma, local e dimensão de porosidades com o objetivo de otimização dos processos através de propostas de alteração de canais alimentadores, material dos moldes, massalotes, temperatura de vazamento etc.
- Aprofundamento dos conhecimentos sobre a programação no Ansys para verificação das possibilidades de adaptação do programa para torná-lo mais abrangente.
- Estudo da possibilidade da utilização das equações de dinâmica de fluidos, juntamente com as equações de análise térmica na simulação do processo de solidificação, para análise dos efeitos que a convecção no líquido pode causar neste processo.

Referências Bibliográficas

- Absi, E., *Méthod de Calcul Numérique en Élasticite*, Paris : Eyrolles, 1978.
- Amstalden, J. F., *Análise da formação de coquilhamento inverso e do número de nódulos de grafita durante a solidificação de ferros fundidos nodulares hipoeutéticos*. Campinas : Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 1995. 112p. Dissertação (Mestrado).
- Ansys Manual Guide*, 8.ed., New York : SAS IP, Inc., 1998. Cap. 1: Ansys Thermal Analysis Guide, Cap. 4 : Ansys Elements Reference, Cap. 6: Ansys Theory Reference.
- Birch, J., Castings Manager, Zinc Development Association, New Alloys for Zinc Casting, *Materials & Design*, vol. 11, 1990.
- Bishop, H. F., Pellini, W. S., The contribution of riser and chill edge effects to soundness of cast steel plates, *AFS Transactions* , 58, p. 185-187, 1950.
- Chang, S., Shangguan, D., Stefanescu, D.M., Modeling of the liquid/solid and eutetoid phase transformation in spheroidal graphit cast iron, *Metall. Trans. A*, vol. 21^A, p. 1333-1344, 1990.
- Dhatt, G. , Touzot, G., Cantin, G., *The Finit Element Method Displayed*, New York : John Wiley & Sons, 1985, 509p.
- Dusimberre, G. M. , Numerical methods for transient heat flow, *Transaction of the ASME*, p. 703-712, 1945.
- Eyres, N. R., *Phil. Transactions Royal Society*, Vol. 240 (A), p. 1-57, 1946.
- Felicelli. S. D., Heinrich, J. C., Poirier, D. R., Finite element analysisi of directional solidification of multicomponent alloys, *Int. Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 27, p. 207-227, 1998.
- Gallagher, R. H., *Introducion aux Elements finits*, Paris : Pluralis, 1976.
- Garcia, A., *Solidificação dos metais*, Apostila de curso, Faculdade de engenharia Mecânica, UNICAMP, 1997.

- Goettsch, D. D., Dantzig, J. A., *Materials Processing in the computer Age*, V. R. Voller, M. S. Stachowics and B. G. Thomas eds., TMS, Warrendale, PA, P. 139-144, 1991.
- Heinrich, J. C., Numerical simulation of thermosolutal instability during direction solidification of a binary alloy, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 69, p. 659- 671, 1988.
- Ho, K., Pehlke, R. D., Mechanism of heat transfer at metal-molde interface, *AFS Transaction*, vol. 61, 587-598, 1984.
- Imbert, J. F., *Analyse des Structures par Éléments finis*, Paris : Cepadues Ed., 1979.
- Lee, Y. W., Chang, E., Chieu, C. F., Modeling of feeding-behavior of solidifying Al-7Si-0.3Mg alloy plate casting, *Metall. Trans B.*, vol 21, p. 715-722, 1990.
- Maples, A. L., Poirier, D. R., Convection in the two-phase zone of solidifying alloys, *Metall. Trans. B*, vol. 15, p. 163-172, 1984.
- McFadden, G. B., Rehm, R. G., Coriel, S. R., Chuck, W., Morrish, K. A., Thermoosolutal convection during directional solidification, *Metall. Trans A.*, vol. 15, p. 2125-2137, 1984.
- Mehrabian, R. , Flemings, M. C., Macrossegregation in ternary alloys, *Metall. Trans.*, vol. 1, p. 455-464, 1970.
- Melo, Mírian L. N. Motta, *Análise numérico/experimental da formação de microporosidades durante a solidificação de ligas de alumínio*. Campinas : Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 1996. 253p. Tese (Doutorado).
- Melo, M. L. N. M., Rizzo, E. M. S., Santos, R. G., Numerical method for analysis of microporosity formation in aluminium alloy castings, *Materials Science Forum*, vol. 242, p. 83-88, 1997.
- Meyer, G. H., Multidimensional Stefan problems, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, vol. 10, p. 522-538, 1973.
- Niyama, E., Uchida, T., Morikawa, M., Saito, S., A method of shrinkage prediction and its application to steel casting practice, *AFS Cast Metal Research Journal* , vol. 7, p. 52-63, 1982.
- O'Callaghan, M. G., Gravalho, E. G., Huggins, C. E., An analysis of heat and solute transport during solidification of an aqueous binary solution, *Int. J. Heat Transfer*, vol. 25, p. 553-573, 1982.
- Osório, W. R. R., Quaresma, J. M. V., Neto, M. F., Garcia, A., Estrutura dendrítica e parâmetros térmicos na solidificação de ligas Zn-Al , em : CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Curitiba, 1999.

- Özsisik, M. N., *Heat conduction*, 2.ed., New York : Wiley, 1980, Cap. 10: Phase-change problems, p. 397-438.
- Palmieri, Wagner, *Simulação da solidificação de lingotes cilíndricos de aço médio-carbono através de método numérico*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 1990. 144p. Dissertação (Mestrado).
- Pehlke, R. D., et al, *Summary of Thermal Properties for Casting Alloys and Mold Materials*, Michigan : University of Michigan, 1982.
- Poirier, D. R., Ueum, K., Maples, A. L., A thermodynamic prediction for microporosity formation in aluminium-rich Al-Cu alloys, *Metall. Trans.*, vol.18A, p. 1979-1987, 1987.
- Prates, M., Davies, G. J., *Solidificação e fundição de metais e suas ligas*, São Paulo : LTC/EDUSP, 1978.
- Piwonka, T. S., Flemings, M. C., *Trans. Metall. Soc. AIME*, vol. 236, p. 1157, 1966.
- Poulikakos, D., Cao, W. Z., Solidification of a binary alloy from a cold wire or pipe: modeling of the mixed-phase region, *Numerical Heat Transfer A*, vol. 15, p. 197-219, 1989.
- Rappaz, M., Modeling of microstructure formation in solidification, *Int. Mater. Review*, vol. 34, p. 93-123, 1989.
- Rizzo, E. M. S., *Análise numérica e experimental da solidificação de aço rápido M2 no processo de fundição de precisão*. Campinas : Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 1994. 186p. Dissertação (Mestrado).
- Rockey, K. C., Evans, H. R., Griffiths, D. W., Nethcot, D. A., *Elements finis*, Paris : Eirrolles, 1979.
- Ruan, Y., Liu, J. C., Richmond, O., A deforming finite element method for analysis of alloy solidification problems, *Finite elements in Analysis and Design*, vol. 12, p. 49-63, 1993.
- Sahn, P. R., Hansen, P. N., *Numerical simulation and Modeling of Casting and Solidification Processes for Foundry and Casthouse*, Aachen, Ed. CIATF, 1984.
- Santos, R. G., *Transformação de Fase* , Apostila de curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 1997.
- Shamsundar, N., Sparrow, E. M., Analysis of multidimensional conduction phase change via the enthalpy model, *Journal of Heat Transfer*, vol 97, p. 333-340, 1975.
- Stefanescu, D. M., Kanetkar, C. S., Modeling of the Solidification of cast-iron. *Trans. Am. Foundrymen's soc.*, vol 95, p. 139-144, 1987.
- Sully, L. J. D., The thermal interface between castings and chill molds, *AFS Trans.*, p. 735-744, 1976.

- Swaminathan, C. R., Voller, V. R., A general enthalpy method for modeling solidification processes, *Metall. Trans. B*, vol. 23B, p. 651-664, 1992.
- Upadhy, G., Paul, A. J., Solidification Modeling: a phenomenological review, *AFS transactions*, vol. 75, p. 69-80, 1994.
- Voller, V. R., Swaminathan, C. R., General source-based method for solidification phase-change, *Numerical Heat Transfer B*, vol.19, p. 658-664, 1991.
- Zienkiewics, O. C., *La Method des Elements Finitis*, Paris : Pluralis, 1976.

Apêndice

1 - Propriedades Termofísicas da liga Al - 4,5%Cu.

Propriedade	Valor	Referência
Densidade no estado sólido [kg/m ³]	2600	<i>Poirier et al., 1987</i>
Densidade no estado líquido [kg/m ³]	2450	<i>Poirier et al., 1987</i>
Calor específico no estado sólido [J/kg K]	1100	<i>Sahn e Hansen, 1984</i>
Calor específico no estado líquido [J/kg K]	900	<i>Sahn e Hansen, 1984</i>
Temperatura Líquidus [°C]	646	<i>Swaminathan, 1994</i>
Temperatura Sólidus [°C]	548	<i>Swaminathan, 1994</i>
Condutibilidade Térmica [W/mK]	200 - 548 °C 100 - 646 °C	<i>Voller e Sundarraj, 1995</i>
Calor Latente [J/kg]	390000	<i>Swaminathan, 1994</i>

2 - Propriedades Termofísicas da liga Zn-2%Cu.

Propriedade	Valor	Referência
Densidade no estado sólido [kg/m ³]	6820	<i>Pehlke et al, 1982</i>
Densidade no estado líquido [kg/m ³]	6400	<i>Pehlke et al, 1982</i>
Calor específico no estado sólido [J/kg K]	489	<i>Pehlke et al, 1982</i>
Calor específico no estado líquido [J/kg K]	525	<i>Pehlke et al, 1982</i>
Temperatura Líquidus [°C]	402	
Temperatura Sólidus [°C]	382	
Condutibilidade Térmica [W/mK]	114 - 382 °C 84 - 402 °C	<i>Birch, 1990</i>
Calor Latente [J/kg]	112200	<i>Birch, 1990</i>

3 - Propriedades termofísicas utilizadas para o molde de areia :

Propriedade	Valor	Referência
Densidade [kg/m ³]	1500	<i>Chang et al, 1992</i>
Calor específico [J/kg K]	1100	<i>Chang et al, 1992</i>
Condutibilidade Térmica [W/mK]	0,7	<i>Chang et al, 1992</i>

3 - Propriedades termofísicas utilizadas para o molde de aço :

Propriedade	Valor	Referência
Densidade [kg/m ³]	7800	<i>Pehlke et al, 1982</i>
Calor específico [J/kg K]	682	<i>Pehlke et al, 1982</i>
Condutibilidade Térmica [W/mK]	30	<i>Pehlke et al, 1982</i>