

### 3. REFERÊNCIAS

- Bailey, A. R. & Samuels, L. E., 1971, “Foundry Metallography, Metallurgical Services Betchworth”, England, pp. 26-29.
- Birch, J., 1990, “New Alloys for Zinc Castings”, *Materials & Design*, vol.11, pp. 83-87.
- Bouchard, D. & Kirkaldy, J.S., 1997, “Prediction of Dendrite Arm Spacings in Unsteady-and Steady-State Heat Flow of Unidirectionally Solidified Binary Alloys”, *Metallurgical and Materials Transactions B*, v.28B, pp.651-663.
- Flemings, M.C., 1974, “Solidification Processing”, McGraw-Hill, New York.
- Garcia, A. & Prates, M., 1978, “Mathematical Model for the Unidirectional Solidification of Metals I: Cooled Molds”, *Metallurgical Transactions*, v.98, pp.449-453.
- Garcia, A. Clyne, T.W. & Prates, M., 1979, “Mathematical Model for the Unidirectional Solidification of Metals II : Massive Molds”, *Metallurgical Transactions*, v.108, pp.85-92.
- Hawkins, D. T. & Hultheren, A., 1973 “Diagrams of Binary Alloys Systems”, In: *Metals Handbook / Metallography, Structure and Phase Diagrams*, Vol.8, American Society for Metals (ASM)/ ASM Handbook Committee, pp. 264-265.
- Osório, W.R.R., 2000 “Correlação entre Microestrutura, Parâmetros Térmicos de Solidificação e Propriedades Mecânicas, Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP/FEM/DEMA, Campinas, SP, Brasil, 171p.
- Osório, W.R.R.; et alii.; 1998, “Estrutura Dendrítica e Parâmetros Térmicos na Solidificação de Ligas de Zn-Al”; *Anais do 13º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Curitiba.
- Osório, W.R.R.; et alii.; 2000, “Determinação das Propriedades Mecânicas como Função do Espaçamento Dendrítico em Ligas Zn-Al, Solidificadas Unidirecionalmente”; Submetido ao 55º Congresso da Associação Brasileira de Metais/ABM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Prasad, B.K.; Patwardhan, A.K.; Yegneswaran, A.H., 1996, “Microstructure-Property Characterization of Some Zn-Al Alloys: Effects of Heat Treatment Parameters”, *Zeitschrift für Metallkunde*, V.12, pp. 967-971.
- Quaresma, J.M.V, 1999, “Correlação entre Condições de Solidificação, Microestrutura e Resistência Mecânica”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP/FEM/DEMA, Campinas, SP, Brasil, 220p.
- Quaresma, J.M.V.; Santos, C.A.; Spim Jr., J.A. & Garcia, A., 1998, “Medidas dos Coeficientes de Transferência de Calor Metal/Molde na Solidificação de Metais e Ligas”, *Anais do VII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas -ENCIT*, v. 1, pp. 615-620.
- Quaresma, J.M.V.; Santos, C.A.; Spim Jr., J.A. & Garcia, A., 1998, “Transferência de Calor na Interface Metal/Molde na Fundição de Metais”, *Anais do V Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste- V CEM-NNE 98*, v. IV, pp.9-16.
- Santos, C. A., 1997, “Influências das Taxas Direcionais de Resfriamento na Evolução da Solidificação em Sistemas Metal/Molde”, Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP-FEM-DEMA, Campinas, SP, Brasil.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, ao PICD/CNPq-UFGA, à FAEP-UNICAMP e à FAPESP pelos apoios técnicos e financeiro para realização do presente trabalho.

$$\lambda_2 = 2\pi g_2 \left[ \frac{4\sigma_{SL}}{C_0(1-k_0)^2 L} \left( \frac{D_{L,S}}{V_{L,S}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

onde:

$\sigma_{SL}$  = energia livre de superfície [ J / m<sup>2</sup> ];

$C_0$  = composição da liga em estudo [ % ];

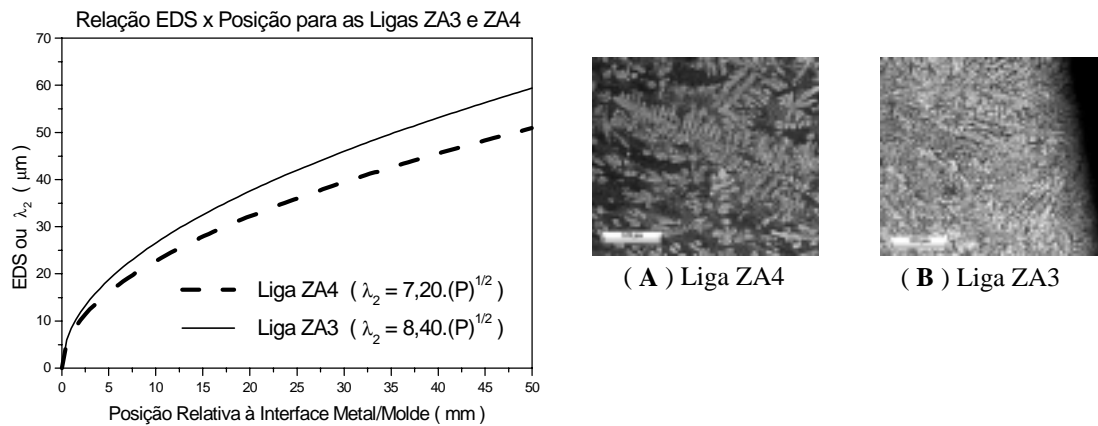
$k_0$  = coeficiente de partição de soluto [ ];

$L$  = calor latente de fusão do material [ J / kg ];

$D_{L,S}$  = difusividade térmica do soluto no líquido ou sólido [ m<sup>2</sup> / s ];

$V_{L,S}$  = velocidade da isoterma liquidus ou solidus [ mm/s ].

Na Figura 5 é mostrada a relação experimental entre os valores de espaçamentos dendríticos secundários (EDS) das liga ZA3 e ZA4, em função da distância relativa à interface metal/molde. Pode-se notar que, para as posições iniciais, os valores de EDS para as duas composições químicas são muito próximos, com valores pouco menores para a liga Zn-4%Al, fruto da maior velocidade da isoterma liquidus e do maior coeficiente  $h_i$  que a mesma apresenta nos instantes iniciais ( Quaresma, 1999 ,Osório et alii, 2000 ).



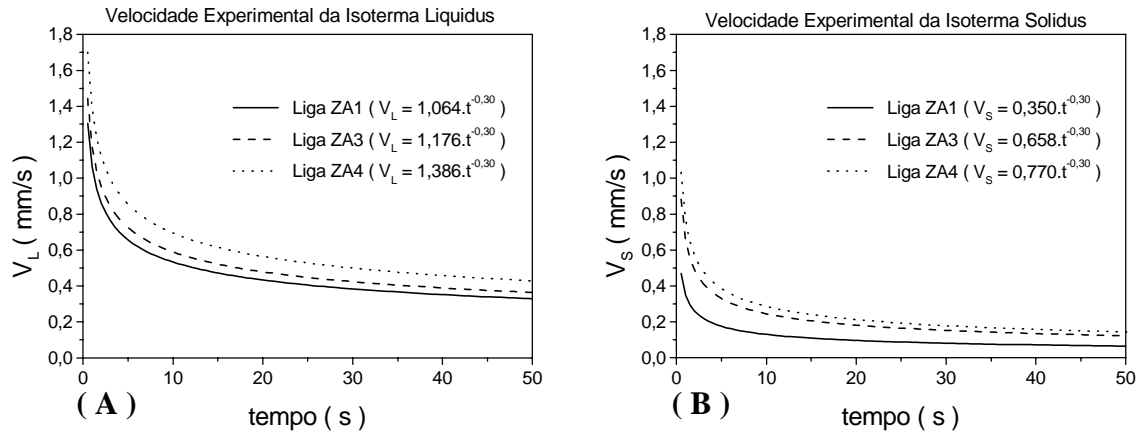
**Figura 5** - Comparação entre as equações experimentais de  $\lambda_2$  em função da Posição para as ligas ZA3 e ZA4 e respectivas micrografias das ligas ZA4 ( A ) e ZA3 ( B ) à 1mm da interface metal/molde ( Reagente de Palmerston ).

## 5. CONCLUSÕES

**5.1** – Das análises das microestruturas das ligas estudadas, possibilitou revelar que os espaçamentos dendríticos secundários diminuem com o aumento do teor de soluto, como pode ser observado com o auxílio das equações experimentais obtidas ( $\lambda_2 = f(\text{Posição})$ );

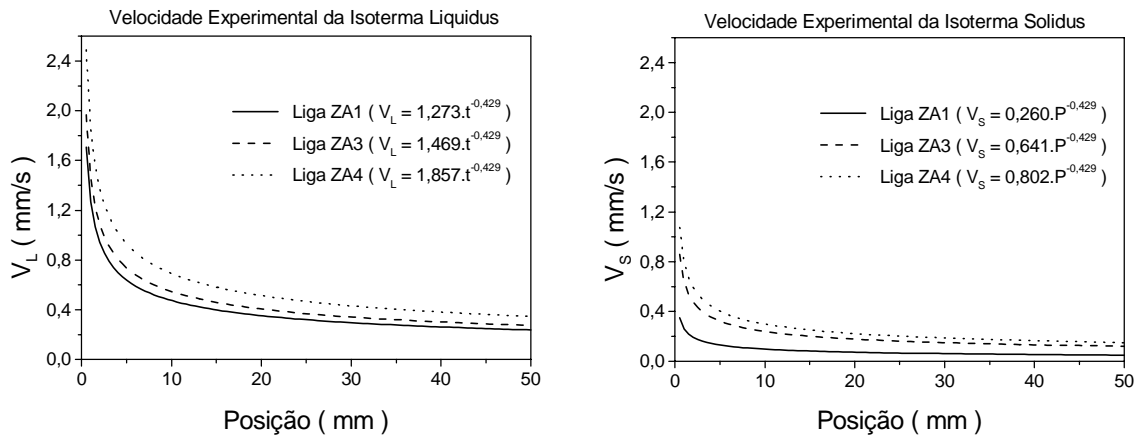
**5.2** – As velocidades experimentais, as quais são parâmetros dependentes dos coeficientes de transferência de calor metal/molde ( $h_i$ ), influem na formação e refino das microestruturas resultantes, pois para maiores velocidades associadas a maiores coeficientes de transferência de calor, tem-se microestruturas mais refinadas que refletem em melhorias nas propriedades mecânicas.

Na Figura 3 observa-se tanto o perfil, quanto as equações das velocidades das isothermas solidus e liquidus oriundas da derivação das equações da posição em função do tempo, mencionadas anteriormente.



**Figura 3** – Velocidade experimental da isoterma liquidus (A) e isoterma solidus (B) em função do tempo para ligas Zn-Al de diferentes teores de Alumínio.

As velocidades das isothermas também foram obtidas em função das posições em estudo, como pode ser visto na Figura 4 abaixo:



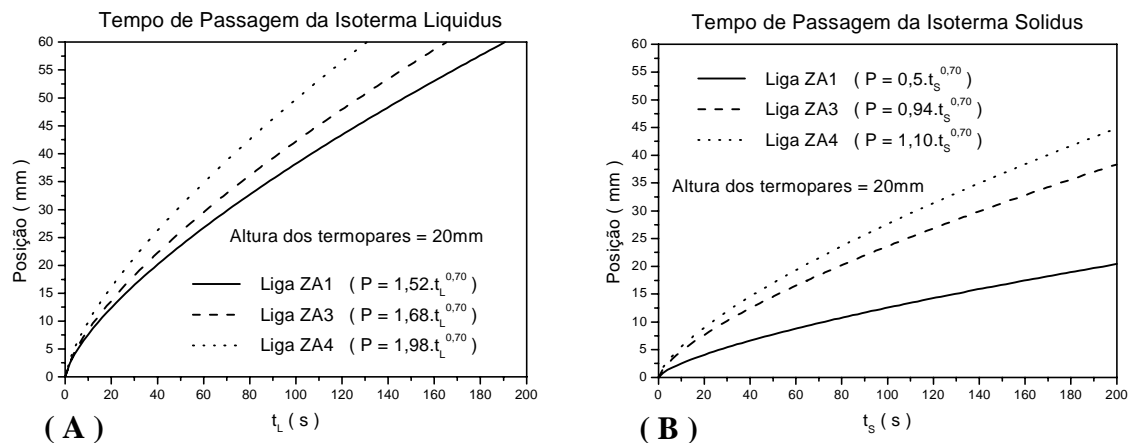
**Figura 4** – Velocidade experimental da isoterma liquidus (A) e isoterma solidus (B) em função do tempo para ligas Zn-Al de diferentes teores de Alumínio.

A partir das expressões de  $V = f(P)$ , apresentadas na Figura 4, podem ser determinados valores teóricos dos espaçamentos dendríticos secundários ( $\lambda_2$  ou EDS) ao aplicar-se a equação de Bouchard & Kirkaldy (1997). Esses autores sugerem um fator de calibração,  $g_2$ , variando entre 4,0 e 11,0 na Equação (6).

A partir do lingote solidificado, foram extraídas amostras que devidamente preparadas e atacadas quimicamente, serviram para as análises metalográficas ( Bailey et al,1971 ; Osório et alii, 1998) e execução das medidas dos espaçamentos dendríticos secundários ao longo da peça.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para as determinações experimentais das velocidades das isothermas solidus e liquidus, primeiramente foi necessário conhecer os tempos de passagem das isothermas solidus e liquidus nas posições monitoradas, conforme Figura 2.



**Figura 2** - Tempo de passagem da isoterma liquidus (A) e isoterma solidus (B) em função da posição para ligas Zn-Al de diferentes teores de Alumínio.

Obteve-se leis que permitem a estimativa dos tempos de passagem das isothermas para as ligas estudadas, em função das posições estudadas. Essas leis são representadas por equações no formato exponencial, do tipo :

$$P = C \cdot (t_{S:L})^n \quad (4)$$

onde: P = posição específica em estudo [ mm ];  
 C = valor constante para cada liga, resultante de coeficientes da equação;  
 $t_{S:L}$  = tempo de passagem da isoterma liquidus ou solidus numa posição [s];  
 n = expoente com valor sempre menor que 1.

As equações experimentais de  $P = f ( t )$ , foram derivadas em função do tempo, obtendo-se as velocidades experimentais das isothermas solidus e liquidus :

$$V_{S:L} = C \cdot (t)^{-n} \quad (5)$$

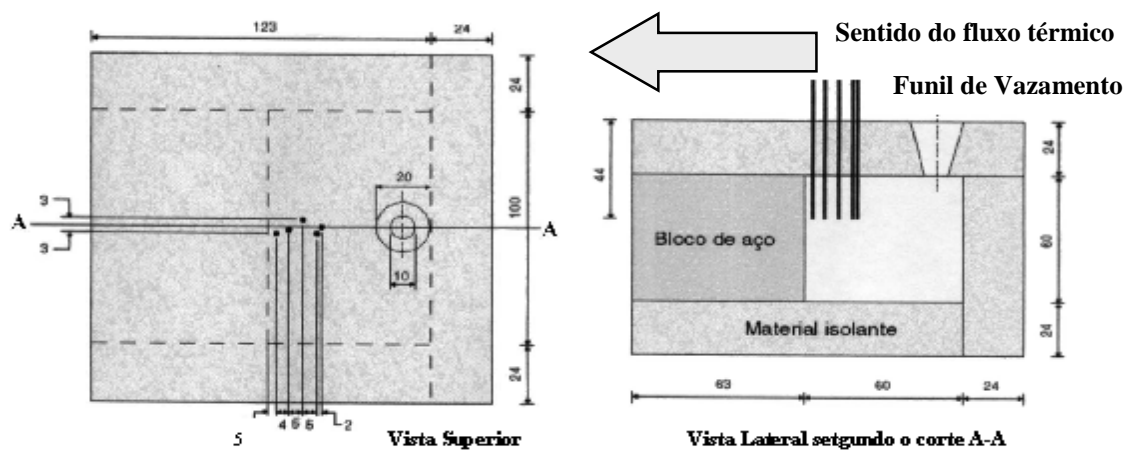
onde:  $V_{S:L}$  = velocidade da isoterma característica [ mm/s ];  
 C = valor constante para cada liga, resultante de coeficientes da equação;  
 t = tempo de passagem da isoterma característica numa posição [s];  
 n = expoente com valor sempre negativo.

As Equações (2) e (3), possibilitam a análise da dependência dos parâmetros,  $V$  e  $G$ , em função das propriedades termofísicas do metal e molde, da temperatura de vazamento e do coeficiente de transferência de calor na interface Metal/Molde ( $h_i$ ), que também é dependente das propriedades termofísicas Metal/Molde e das condições operacionais. Esse coeficiente é variável na maioria das situações práticas, durante o processo de solidificação e determinado experimentalmente (Santos, 1997 ; Quaresma,1999, Osório,2000).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos, foi necessário o desenvolvimento e a utilização de um aparato esquematizado na Figura 1, constituído em um molde de geometria regular, onde uma das paredes é confeccionada em aço carbono, material condutor que funciona como um absorvedor da carga térmica do sistema. As outras paredes são compostas de um material isolante (cerâmico à base de sílica), proporcionando assim um fluxo de calor unidimensional, ou melhor, uma solidificação unidirecional do metal fundido.

Através de termopares estrategicamente posicionados, monitorou-se toda a evolução do processo, obtendo curvas do tipo temperatura - tempo, as quais serviram para a determinação do tempo de passagem das isoterms características nas posições monitoradas. As ligas foram fundidas em cadinhos de carbetos de silício, revestidos internamente por uma massa refratária, sílica-aluminosa, para evitar qualquer tipo de contaminação que eventualmente pudesse afetar nas composições das ligas e talvez até mesmo nos resultados dos estudos pretendidos. As evoluções térmicas dos experimentos foram monitorizadas por um conjunto de termopares, tipo K e J, conectados a um registrador de dados digital, da ALMEMO/AHLBORN 2290-8, que armazenou todos os dados térmicos dos experimentos realizados e depois importados para um aplicativo gráfico para leitura e interpretação.



**Figura 1** - Representação esquemática do aparato experimental para obtenção do histórico térmicos das ligas solidificadas.

No instante iminente ao vazamento das ligas, foi adotado um superaquecimento na ordem de 10% acima da temperatura liquidus de cada liga, foi também verificado se o molde estava a temperatura ambiente e apresentando as paredes em condições de emissividade semelhantes a todos os outros vazamentos. Isso faz parte de uma sistemática que permite repetibilidade dos fenômenos estudados.

diretamente na microsegregação e na ancoragem de inclusões, modificando as propriedades mecânicas do material (Quaresma, 1999; Osório, 2000). Estabelecer uma relação que possibilite uma programação da microestrutura e das propriedades mecânicas que sejam equivalentes àquelas obtidas por outros processos, também acarretará em uma redução parcial ou total de outros processos que geralmente elevam o custo final de um produto, o que é indesejável, principalmente perante a atual conjuntura econômica e competitividade imposta pelo processo evolutivo da globalização.

O interesse no estudo das ligas do sistema bimetálico, Zinco-Alumínio, está na boa resistência à abrasão, resistência à corrosão, boa fundibilidade, apresentando baixo ponto de fusão, que leva a um baixo custo no processo de fundição ( Prasad et alii,1996 ). Nos processos de fundição dessas ligas, permite-se processar geometrias complexas com boa precisão dimensional, reduzindo ou eliminando totalmente as operações de usinagem, como é o caso de fundição sobre pressão, resultando num método economicamente atrativo de produção de uma variedade de componentes ( Birch,1990 ).

## 2. PARÂMETROS TÉRMICOS E CONDIÇÕES DE SOLIDIFICAÇÃO

Na literatura apresenta-se diversos trabalhos (Tunca et al,1988; Bouchard et al,1997; Quaresma et alii,1998; Osório et alii, 1998) que têm a relação entre, ora microestrutura, ora as propriedades mecânicas com as condições de resfriamento impostas aos sistemas de solidificação de metais e ligas, ou mais especificadamente com as taxas de resfriamento, que dependem de parâmetros térmicos, que por sua vez estão relacionados com parâmetros operacionais. A taxa de resfriamento na interface sólido/líquido ou zona pastosa/líquido pode ser determinada pela Equação (1), dada por:

$$\dot{T} = G.V \quad (1)$$

Nessa equação percebe-se a dependência direta da taxa de resfriamento em relação a taxa de crescimento ( $V$ ) e o gradiente térmico ( $G$ ), que influenciam na microestrutura final do produto, no controle da microsegregação e também na melhoria da qualidade interna do material. A velocidade de deslocamento da interface pode após utilização de artifícios e rearranjos matemáticos (Garcia et alii, 1979; Quaresma,1999), ser expressa por:

$$V = (2.\alpha.S + \beta)^{-1} \quad (2)$$

Por sua vez, o gradiente térmico pode ser expresso pela equação:

$$G = \frac{(T_V - T_L).m.\phi_2}{\sqrt{\pi}.[1 - \text{erf}(m.\phi_2)]\exp(m^2.\phi_2^2)}.4.\alpha.V \quad (3)$$

onde :  $\alpha$  = constante particular do modelo que depende das propriedades termofísicas do metal/molde e temperatura de vazamento [ ];

$S$  = caracteriza o deslocamento da isoterma característica [ m ];

$\beta$  = constante também particular do modelo, dependente do coeficiente ( $h_i$ ) [ ];

$T_V$  = temperatura de vazamento do metal [ K ];

$T_L$  = temperatura liquidus do metal [ K ];

$m$  = constante do material [ ];e

$\phi_2$  = constante de solidificação [ ].

# DETERMINAÇÃO ANÁLITICA E EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS TÉRMICOS NA SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS ZN-AL, NO INTUITO DE MELHORIAS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

**Wislei Riuper Ramos Osório**  
**Carlos Alexandre dos Santos**  
**José Maria do Vale Quaresma**  
**Amauri Garcia**

Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica,  
Departamento de Materiais, 13970-, Campinas, SP, Brasil. E-mail: [wislei@fem.unicamp.br](mailto:wislei@fem.unicamp.br)

## Resumo

A literatura apresenta um vasto conjunto de trabalhos experimentais abordando a solidificação e a correspondente microestrutura formada para uma série de ligas de importância para a tecnologia de fundição. Entretanto verificou-se que algumas ligas do sistema Zn-Al, também de importância para a indústria de fundição, não têm sido investigadas no que diz respeito à dependência de sua formação microestrutural com as condições de solidificação. O objetivo nesse trabalho foi correlacionar parâmetros térmicos da cinética de solidificação, tais como taxa de resfriamento e coeficiente de transferência de calor, com a microestrutura resultante, obtida na solidificação unidirecional das ligas Zn-1%Al, Zn-3%Al e Zn-4%Al, em molde de aço. Essa correlação permite uma previsão dos parâmetros dendríticos e do nível de resistência mecânica, em função do controle das variáveis de solidificação impostas pelo sistema metal/molde.

**Palavras Chave:** Parâmetros Térmicos da Solidificação, Microestrutura e Liga Zinco-Alumínio.

## 1. INTRODUÇÃO

Dependendo do modo ao qual se arranja os átomos, pode-se obter uma diversidade de estruturas. Na solidificação, entende-se esse arranjo atômico, como sendo os parâmetros operacionais e térmicos, influenciando na formação da estrutura resultante. Como parâmetros operacionais, cita-se a temperatura de vazamento, material do molde e os coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde e molde/ambiente ( Santos, 1997; Quaresma, 1999 ; Osório, 2000 ). Como tradutores dos parâmetros térmicos, cita-se a velocidade de solidificação, gradiente térmico e taxa local de resfriamento. Esse último pode ser correlacionado com a velocidade de deslocamento de isothermas características e gradientes térmicos que estão diretamente relacionados com os parâmetros operacionais (Garcia et alii,1979; Osório,2000). Uma vez observada essa estreita correlação entre o comportamento térmico do sistema metal/molde e a estrutura resultante, particularmente o tamanho de grão e espaçamentos interdendríticos, poder-se-á programar as propriedades mecânicas do material, em função das condições de solidificação impostas, dependendo do nível de resistência mecânica a que se pretenda alcançar. No que diz respeito às características estruturais, os espaçamentos interdendríticos têm maior nível de suscetibilidade às alterações nas taxa de resfriamento que o tamanho de grão. Este segundo é muito mais dependente do histórico térmico do metal, ou seja, da presença ou não de refinadores de grão no banho líquido, do superaquecimento, dentre outros fatores. Contudo, analisando de maneira mais microscópica, nota-se que os espaçamentos interdendríticos, têm maior influência sobre as propriedades mecânicas que o tamanho de grão. Os espaçamentos interdendríticos formados, afetam