

# PREVISÃO DO ESPAÇAMENTO DENDRÍTICO SECUNDÁRIO EM UMA LIGA Al-Si-Cu ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO DE SOLIDIFICAÇÃO<sup>1</sup>

Edison Marcelo Serbino<sup>2</sup>

Reinaldo José de 3

Joern Schmidt<sup>4</sup>

## Resumo

O presente trabalho verificou um método numérico para previsão do espaçamento dendrítico secundário (SDAS – *secondary distance arm spacing*) ou  $\lambda_2$  em corpos de prova fundidos em coquilha, em uma liga de alumínio normalmente utilizada para a fabricação dos cabeçotes de motores à explosão na indústria automotiva, conforme DIN EN 1706 AC- $\text{AlSi6Cu4}$ , semelhante a liga AA319. Os resultados obtidos servirão de base para a realização de estudos, para a fabricação de peças em série, com geometrias mais complexas e condições de refrigeração distintas em cada região. O SDAS é considerado mais importante para este tipo de peça em particular, do que os braços primários, terciários ou os de maior grau, devido a sua forte influência nas propriedades mecânicas deste material, em âmbito de severas cargas/esforços termomecânicos aplicados durante o serviço. Atualmente, o controle do SDAS neste tipo de peça tornou-se mais crítico, devido à necessidade da garantia da resistência a choques térmicos e à fadiga, gerada pelos projetos globalizados de peças utilizadas em diferentes veículos com diversos tipos de combustíveis, cuja temperatura de combustão pode variar significativamente. Para o caso particular deste seguimento de mercado, a simulação apresenta importância estratégica, pois o tempo de lançamento de novos veículos está sempre em diminuição, influenciando diretamente a competitividade. Assim, conhecer as limitações de aplicação do produto e dos seus processos de fundição é importante para a correta especificação das exigências em projeto, portanto a metodologia para realizar a simulação deve estar alinhada com o máximo de elementos de contorno do processo de fundição, para gerar resultados consistentes. A metodologia experimental utilizada foi baseada na análise microestrutural ótica e a numérica foi fundamentada nas leis de transferência do calor, que determinaram uma taxa de solidificação local, influenciando diretamente o SDAS, resultando em uma boa concordância, em nível de aplicabilidade, entre resultados teóricos e experimentais.

**Palavras-chave:** Alumínio; Espaçamento dendrítico; Simulação da solidificação.

## PREDICTING OF SECONDARY DENDRITE ARM SPACING OF Al-Si-Cu ALLOY BY USING THE SIMULATION MODELING

### Abstract

The present work verified a numerical method for predicting of the secondary dendrite arm spacing (SDAS) or  $\lambda_2$ , in casting samples, by aluminum alloy normally used for the manufacture of the cylinder head of explosion engines the automotive industry, as DIN EN 1706 AC- $\text{AlSi6Cu4}$ , similar to alloy AA319. The gotten results will serve of experimental base for the accomplishment of studies, for the manufacture of normal parts serial, with more complex geometrics and distinct conditions of refrigeration in each region. The SDAS is considered more important for this part in particular, of that the primary arms, tertiary or of bigger degree, had its strong influence in the mechanical properties of this material, in applied thermo mechanics shipment scope severe during the service. Currently, the control of the SDAS in this type of part became more critical, due to necessity of the guarantee of the resistance the thermal shocks and to the fatigue, generated for the globalizes projects of parts used in different vehicles with diverse types of fuels, whose temperature of combustion can vary significantly. For the particular case of this pursuing of market, the simulation presents strategically importance, therefore the time of launching of new vehicles is always in reduction, influencing directly the competitiveness. Thus, to know the limitations of application of the product and its processes of casting is important for the correct specification of the requirements in project, therefore the methodology to carry through the simulation, it must be lined up with the maximum of contour elements, to generate resulted consistent. The used experimental methodology was based on the microstructural analysis optics and the numerical one was based on the laws of heat transference, that they had determined the local tax of solidification, influencing directly the SDAS, resulting in a good agreement, in applicability level, between theoretical and experimental results.

**Key words:** Aluminum; Dendrite arm spacing; Simulation of the solidification

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M.E.; Centro Tecnológico de Materiais; Volkswagen do Brasil Ltda., São Bernardo do Campo, SP.

<sup>3</sup> Membro da ABM; Técnico Metalurgista; Magma Engenharia do Brasil Ltda., São Paulo, SP.

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista; Magma Engenharia do Brasil Ltda., São Paulo, SP.

# 1 INTRODUÇÃO

A alta competitividade entre fabricantes de veículos automotores, gerou uma necessidade estratégica em diminuir o tempo de lançamento dos novos veículos. Estes produtos devem estar alinhados com as exigências dos clientes e também com as legislações do mercado, principalmente com relação à segurança veicular e emissões gasosas. Assim, para viabilizar o projeto de peças que se enquadram neste cenário, o auxílio de simuladores por modelos numéricos é fundamental. No caso deste trabalho, a importância de um modelo consistente para a previsão do SDAS, é baseada na necessidade de estabelecer, de forma rápida, parâmetros tecno-economicamente viáveis em peças com geometria complexa, a serem projetados para aplicação em veículos com severo gradiente termomecânico.

Os atuais simuladores, em geral, realizam o modelamento da transferência de calor, fluxo do fluido ou combinação entre ambos, eventualmente acrescentando transformação microestrutural, através de métodos numéricos. A macroestrutura em forma dendrítica de solidificação é característica de todas as ligas de alumínio fundidas em processos comerciais, apresentando uma grande variação morfológica, que depende do sistema global em solidificação. Os fatores mais importantes para a formação do SDAS é a taxa de solidificação, e conseqüentemente as variáveis térmicas, influenciando na separação entre os braços das dendritas e a presença de partículas de segunda fase, óxidos ou presença de gás, que segregam entre os braços aumentando este espaçamento. Ainda, eventuais correntes de convecção no metal líquido e a pressão atmosférica aplicado no banho, podem alterar dinamicamente este cenário. Também é importante salientar que a utilização incorreta de sistemas de refrigeração para obtenção do SDAS desejado, pode induzir os defeitos de fundição como juntas frias e micro trincas.

## 1.1 Teorias para Equacionamento do Crescimento Dendrítico Secundário

A compreensão da teoria do crescimento dendrítico é dificultada pela complexidade do problema, pois apenas uma parcela dos fenômenos envolvidos é totalmente conhecida e compreendida. Este fenômeno pode ser explicado a partir do superesfriamento constitucional, fundamentado no perfil térmico à frente da interface sólido/líquido, gerado pela remoção do calor latente liberado nesta região e na distribuição de soluto na interface do líquido. Assim a formação dendrítica pode ser gerada a partir de dois mecanismos distintos, correlacionados ao método de remoção do calor latente. Quando a solidificação ocorre a partir de líquidos com baixo gradiente de temperatura interfacial, a dissipação do calor latente é realizada através do líquido mais resfriado à frente da interface, gerando crescimento equiaxial, por outro lado, se o gradiente é elevado, o calor latente é transferido para o sólido, gerando crescimento direcional. Neste cenário termodinâmico, a interface de solidificação pode apresentar instabilidades morfológicas, alterando da forma plana para a celular e eventualmente, para a morfologia dendrítica.

Na literatura existem diversos modelos empíricos e poucos teóricos que permitem relacionar parâmetros da microestrutura dendrítica com parâmetros do processo de solidificação. A primeira publicação, de caráter empírico, sobre a solidificação dendrítica em diversas ligas de alumínio, ocorreu na metade do século passado, onde Alexander e Rhines<sup>(1)</sup> relataram que as distâncias entre braços dendríticos adjacentes diminuíam conforme também diminuía o tempo de solidificação. A relação entre DAS e tempo local de solidificação, para uma liga de

Al-Cu foi através da equação (1), sendo  $\theta$  = tempo de solidificação em s, e SDAS em  $\mu\text{m}$ .

$$SDAS = 7,5\theta^{0,39} \quad (1)$$

Apesar das limitações desta equação, necessitando das constantes para cada liga, ela foi utilizada para ajustar muitos dados do diagrama binário Al-Cu.

Outro modelo, obtido através de dados experimentais, porém com ligas Al-Si hipoeutéticos, foi o de Grugel,<sup>(2)</sup> cuja conclusão foi semelhante ao anteriormente citado, sendo ( $t_{sl}$ ) o tempo local de solidificação, calculado pela equação (2).

$$SDAS = 10(t_{sl})^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

Os modelos de caráter teóricos e mais completos surgiram na década seguinte aos primeiros modelos empíricos, onde um dos primeiros foi publicado por Kattamis et al.,<sup>(3)</sup> sugerindo que os braços dendríticos de menor raio de curvatura são refundidos durante a solidificação, resultando no engrossamento dos ramos dendríticos de maior raio, assim abordagens de SDAS deveriam conter uma análise que considerasse estes espaçamentos próximos e distantes da interface da dendrita. Um modelo teórico consistente, que correlaciona o SDAS com parâmetros do processo de solidificação, com base no Kattamis et al.,<sup>(3)</sup> é o de Feurer,<sup>(4)</sup> onde o SDAS é também calculado em função do tempo local de solidificação, através da equação (3), acrescido da composição e natureza da liga, sendo,  $\bar{M}$  o parâmetro de engrossamento, calculado pela equação (4).

$$SDAS = 4,36(\bar{M}t_{sl})^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$\bar{M} = \frac{2\sigma_{sl}T_1D_1 \ln\left(\frac{C_E}{C_0}\right)}{Hm(1-k_0)(C_E - C_0)} \quad (4)$$

Onde,  $\sigma_{sl}$ , é a tensão sólido/líquido,  $T_1$  a temperatura liquidus,  $D_1$  a difusividade do soluto no líquido,  $C_E$  a composição eutética,  $C_0$  composição nominal da liga,  $H$  é o calor latente de fusão,  $m$  é a inclinação da curva liquidus e  $K_0$  o coeficiente de distribuição de soluto.

Atualmente, outro método teórico bastante difundido é de Campo de Fase, que originalmente foi desenvolvido para a solidificação de metais puros e adaptado para ligas, conforme demonstrado no estudo de Warren e Boettinger,<sup>(5)</sup> que além dos termos tradicionalmente envolvidos para a resolução da complexidade do sistema sólido/líquido que apresentam variações geométricas de curvatura e velocidade de solidificação, também abordam a influência a tensão superficial na interface e a anisotropia cristalina.

Outros modelos com maior complexidade com o objetivo de abordar a totalidades dos fenômenos envolvidos na solidificação de ligas, certamente surgirão ainda nesta década, porém a aplicabilidade ou custo/benefício para a indústria deve ser analisado.

## 1.2 Métodos para Simulação da Transferência do Calor

Os processos de fundição de peças são bastante complexos para o estabelecimento de um modelo de transferência de calor, devido às condições de contorno, que são o enchimento do molde, transformações de fase, variação das propriedades termo físicas do metal/molde, principalmente em relação à sua resistência térmica, bem como sua complexidade geométrica.

Uma técnica muito utilizada para análise térmica do sistema metal/molde, é baseada no método de diferenças finitas,<sup>(6)</sup> que reescreve a equação básica de condução do calor,<sup>(5)</sup> dividindo o sistema em estudo em pequenos volumes ou nós, com dimensões  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  e  $\Delta z$ , acrescida do calor latente liberado durante a transformação de fases, no caso de ligas, ou seja, metal não puro.

$$\frac{\rho c}{K} \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

Nesta equação fundamental,  $\rho$  é a densidade,  $c$  o calor específico,  $K$  é condutibilidade térmica,  $T$  é a temperatura,  $t$  é o tempo e  $(x, y, z)$  é a dimensão espacial. Considerando que a temperatura global destes pequenos volumes é a mesma temperatura de seu núcleo, pode-se realizar um balanço térmico individual em cada elemento durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , facilitando a imposição das condições iniciais e de contorno do equacionamento.

Para realização da simulação numérica é necessário definir um sistema metal/molde, baseado na temperatura destes elementos de volume, através do cenário encontrado em cada região deste sistema, associando aos mesmos suas respectivas propriedades termo físicas.

## 1.3 Influência do Teor de Soluto no SDAS e nas Propriedades Mecânicas

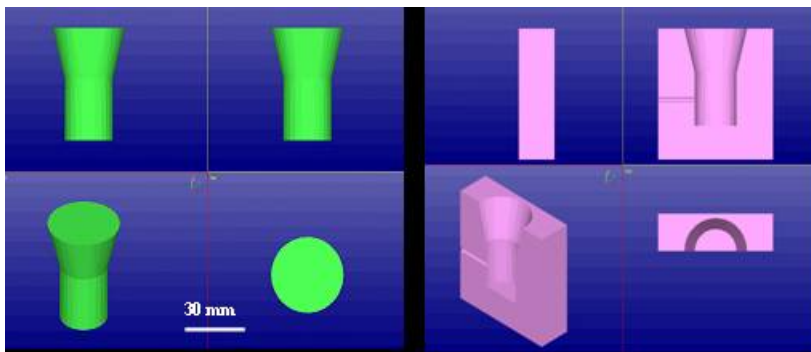
Na literatura existe um consenso em relação à influência do teor de soluto no SDAS, porém há alguma controvérsia nos braços primários, devido principalmente a resultados em materiais orgânicos. Neste caso, os espaçamentos dendríticos são aumentados com o respectivo aumento do teor de soluto. Entretanto, para ligas de Al-Cu, Sharp e Hellawel,<sup>(7)</sup> mostraram que os espaçamentos dendríticos primários são independentes do teor de soluto. Esta independência, também foi verificada em trabalhos recentes,<sup>(8-9)</sup> para braços terciários em Al-Si hipoeutético, incluindo variáveis como correntes de convecção.

Existem diversos estudos<sup>(10-12)</sup> sobre a influência do SDAS nas principais propriedades mecânicas de ligas de alumínio hipoeutéticas com aplicação semelhante à liga analisada neste trabalho, incluindo variações de tipos de molde, tratamentos térmicos e temperaturas de vazamento. De modo geral, com exceções em casos muito particulares, existe uma melhoria das propriedades mecânicas com a diminuição ou refino do espaçamento dendrítico.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Processo de Fundição

Foi realizado o experimento, fundindo três corridas da liga mencionada, identificadas como corridas 1 a 3, em forno de cadinho a gás, efetuado vazamento em uma coquilha de testes, ilustrada na Figura 1. As temperaturas de vazamento e da coquilha bem como os tempos de vazamento foram monitoradas.



**Figura 1.** Ilustração do corpo de prova (esquerda) e respectiva coquilha (direita).

A fusão dos lingotes foi feita em forno a gás, com cadinho de carbetto de silício com capacidade de 13 kg, com temperaturas de fusão entre  $790 \pm 10^\circ\text{C}$ , controladas com termopar de imersão direto no banho líquido e registrador de temperaturas digital, calibrado por rede credenciada. Antes do vazamento, o metal líquido sofreu um tratamento de desgaseificação, adicionando-se por imersão no banho, uma pastilha de sal a base de nitrogênio, por um tempo de 5 minutos, na temperatura de vazamento ( $790 \pm 10^\circ\text{C}$ ) e posterior limpeza superficial do banho.

Foram realizadas três corridas seqüenciais, a primeira com 13 (treze) peças e as duas posteriores com 15 (quinze) peças cada uma.

### 2.3 Análise Química e Metalográfica

A análise química das três corridas foi realizada nos corpos de prova, através de Espectrômetro Ótico calibrado com padrão primário apropriado para a liga estudada.

A análise metalográfica foi realizada, através de corte longitudinal dos corpos de prova, em máquina com disco abrasivo, preparadas com lixamento grosseiro e fino, com granulometria decrescente, desde a lixa de granulometria 120 até 1200 *mesh* e posterior polimento final em pano com pasta de diamante  $1 \mu\text{m}$ . O ataque químico para revelação microestrutural foi HF 0,5 % durante 10 segundos. Através de análise microestrutural, exemplificada na figura 3 e 4, com analisador de imagem, o SDAS médio foi determinado em regiões que permitiram a medição de dendritas com o mínimo de cinco braços adjacentes, com no mínimo 10 dendritas, através da equação (6).

$$\bar{x}_{SDASi} = \frac{x_i}{m_i} \quad (6)$$

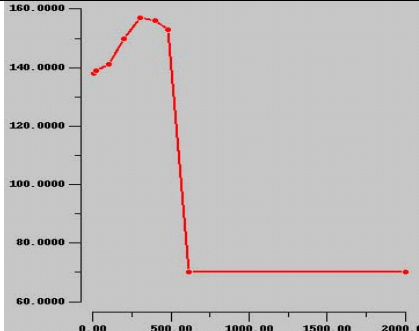
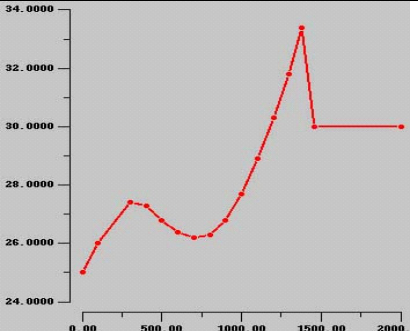
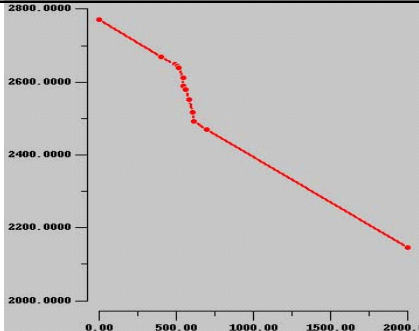
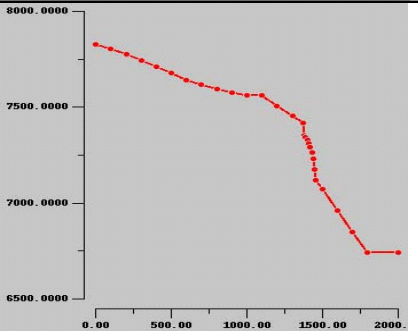
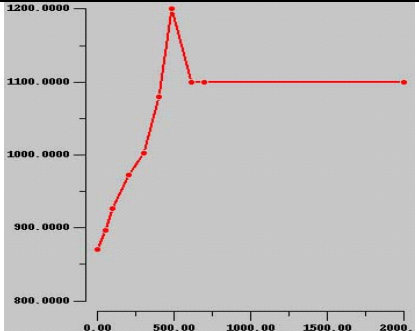
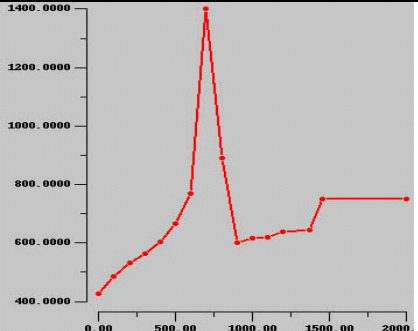
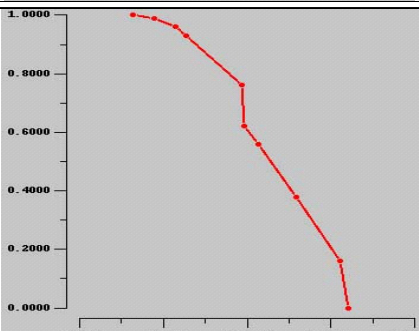
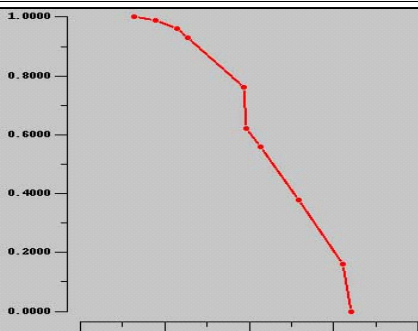
Sendo,  $x_i$  (comprimento da medição)

$m_i \geq 5$  (número mínimo de braços de dendrita por dendrita)

## 2.4. Simulação do Processo de Fundição

Utilizou-se o software de simulação de fundição MAGMASOFT<sup>®</sup>, que considera o equacionamento do crescimento dendrítico e de transferência de calor, baseados nas equações (2 e 5), respectivamente. Os dados termofísicos presentes no banco de dados do software estão demonstrados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Dados termofísicos, valores das abscissas em °C.

Valores das ordenadas	Liga Fundida AlSi6Cu4	Molde Aço H13
Calor Latente de Fusão (kJ/kg)	415	278
Condutividade térmica (W/mK)		
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )		
Calor específico (J/kgK)		
Curva de fração sólida		

Baseado nos resultados de solidificação foi realizado a avaliação de SDAS levando em consideração parâmetros específicos para a liga AlSi6Cu4. Assim, a equação de avaliação, fundamentada na equação (2), foi reescrita conforme a equação (7).

$$SDAS = 7,1(t_{SL})^{1/3} \quad (7)$$

### 3 RESULTADOS e DISCUSSÃO

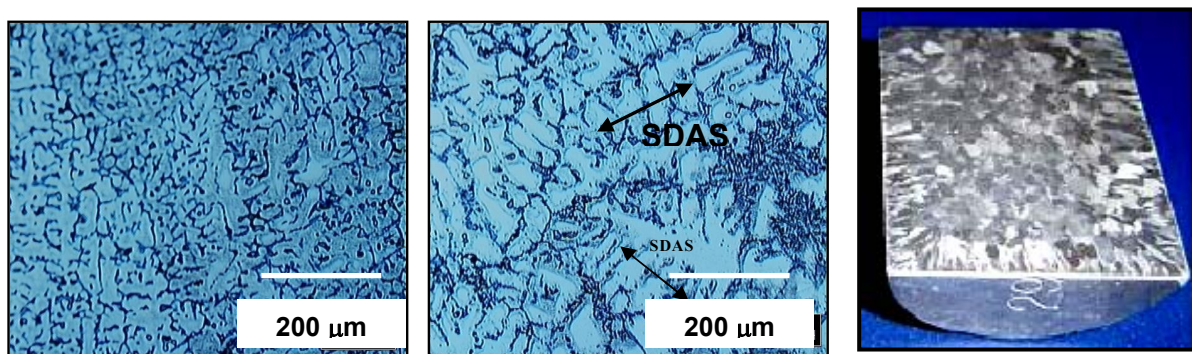
#### 3.1 Análise Química e Metalográfica

A determinação da composição química, conforme mostrado na Tabela 2, indica que a liga pode ser codificada como DIN EN 1706 AC-AlSi6Cu4.

**Tabela 2.** Composição química das corridas

Elemento (% em massa)	Corrida			Elemento (% em massa)	Corrida		
	1	2	3		1	2	3
Si	5,575	5,216	5,324	Cr	0,012	0,016	0,016
Cu	2,941	3,259	3,406	V	0,009	0,012	0,011
Ni	0,039	0,051	0,051	Sn	0,032	0,046	0,043
Mg	0,121	0,095	0,115	Cd	0,001	0,001	0,001
Fe	0,573	0,645	0,618	Co	0,008	0,008	0,008
Ca	0,005	0,002	0,003	Sr	0,001	0,001	0,001
Zn	0,522	0,551	0,544	Zr	0,002	0,003	0,003
Ti	0,102	0,123	0,122	Mn	0,268	0,313	0,304
Pb	0,069	0,079	0,093	Al	89,745	89,579	89,427

A análise micrográfica e macrográfica, conforme demonstrado na figura 3, mostra estruturas típicas para a liga em questão, fundida sob as condições descritas neste trabalho, com a indicação de SDAS em uma das dendritas.

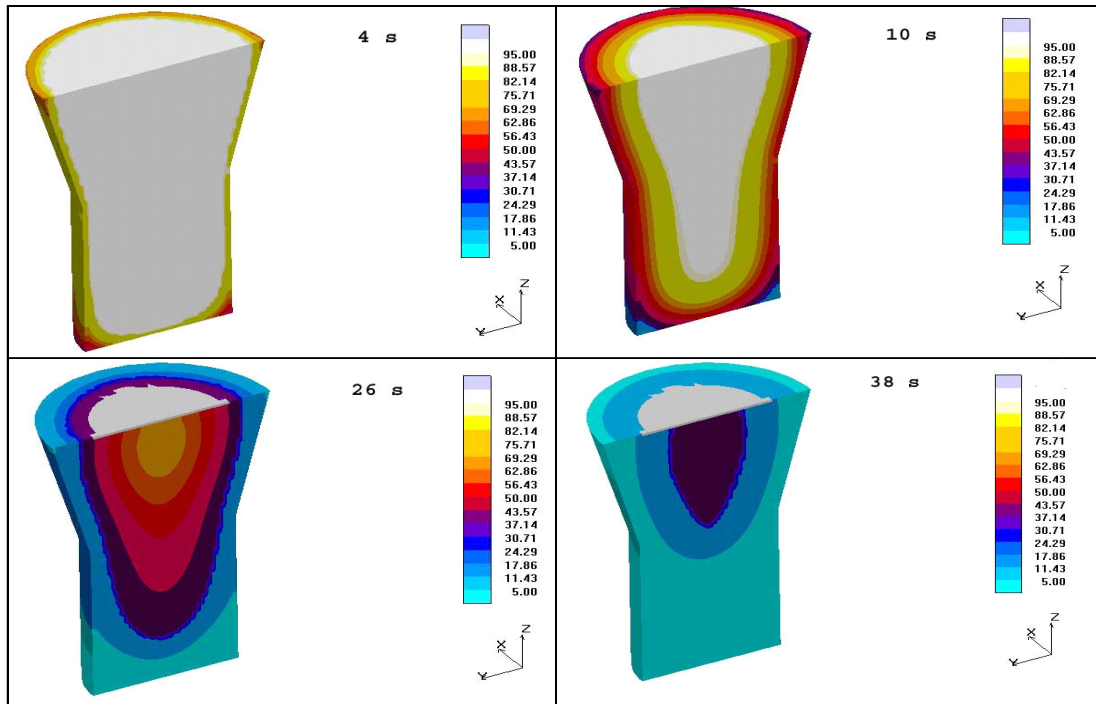


**Figura 3.** Microestruturas típicas da superfície (esquerda) e núcleo (direita) do corpo de prova ao lado, revelado macrograficamente. Apresenta estrutura dendrítica e exemplo de medida do SDAS.

A análise macrográfica, mostrada na figura 3 indica a direção e sentido da transferência de calor, com sua respectiva influência na formação de zonas colunares e equiaxiais, também típicas para o sistema de solidificação em estudo. Somente é visualizado o corpo de prova, sem a região superior, considerado como massalote.

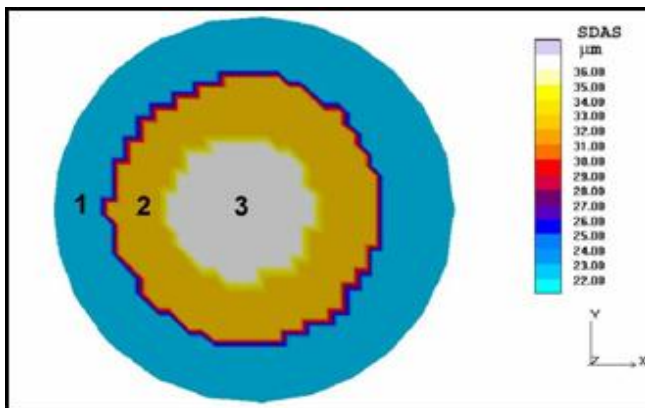
### 3.2 Simulação do Processo de Fundição

A Figura 4 apresenta a fração líquida em cada região, demonstra o avanço da frente de solidificação, antes da abertura da coquilha. Nota-se a coincidência da direção e sentido da solidificação com a análise macrográfica da Figura 3.



**Figura 4.** Imagens da fração líquida em %, durante a solidificação do corpo de prova. Apresenta o avanço da frente de solidificação em diversos instantes

A Figura 5 demonstra o resultado do SDAS previsto pela simulação, em um corte transversal através do corpo de prova, indicando as áreas de captura dos resultados para comparação com os resultados práticos. A Tabela 3 apresenta uma comparação dos resultados experimentais com os resultados simulados, conforme regiões indicadas nas Figuras 3 e 5.



Região	Medido (μm)	Simulado (μm)
1	23,2 ± 2,2	22 - 25
2	29,4 ± 2,4	30 - 32
3	37,4 ± 2,1	34 - 36

**Figura 5.** Resultado de previsão de SDAS pela simulação com corte horizontal através do corpo de prova, associado aos valores medidos nos corpos de prova.



Os resultados mostram que os valores práticos e teóricos divergem na média, porém estão contidos dentro dos valores de desvio padrão, demonstrando que o método pode ser aplicado em nível de engenharia, para este caso em particular.

#### 4 CONCLUSÃO

Foi estabelecida a correlação entre parâmetros térmicos e espaçamentos dendríticos secundários, demonstrando que o aumento do tempo local de solidificação gera aumento destes espaçamentos.

A análise do processo de fundição, baseado na simulação da transferência de calor durante a solidificação, conforme método numérico por volumes finitos e equacionamento através do crescimento dendrítico, utilizado no *software* empregado neste trabalho, apresentou boa concordância com os experimentos práticos.

#### REFERÊNCIAS

- 1 ALEXANDER B.H.; RHINES, F.N.; **Dendrite crystallization of alloys**, Trans. AIME, vol 188, 1950, p. 1267-1273.
- 2 GRUGEL, R. N.; **Secondary and tertiary dendrite arm spacing relationships in directionally solidified Al-Si alloys**, *Journal of Materials Science*, v.28, p.677-683, 1993.
- 3 KATTAMIS, T.Z.; COUGLIN, J.C.; FLEMINGS, M.C.; **Influencing of Coarsening on Dendrite Arm Spacing of Aluminum-Copper Alloys**; Trans. AIME, v.239, p1504, 1967.
- 4 FEURER, U, **Proceedings of the Symposium on Quality Control of Engineering alloys**, Delft, p.131, 1977
- 5 WARREN, J. A.; BOETTINGER, W. J.; **Prediction of dendritic Growth and Microsegregation Patterns in a Binary alloy Using the Phase-Field Method**; *Acta Metallurgica Materialia*, vol. 43, p.689-690, 1995.
- 6 EHLKE, R. D.; **Heat Flow Analyses for Solidification and Cooling –State of the Art, Proceedings of Modeling and Control of casting and Welding Process IV**, Palm Coast, p.3-14, 1988.
- 7 SHARP R. M.; HELLAWELL A.; **The microscopy and composition of quenched solid-liquid interfaces**; *Journal of Crystal Growth*, v.5, n.3, p. 155-161, 1969;
- 8 SÁ, F.A.; ROCHA, O.F.L.; SIQUEIRAC.; GARCIA, A.; **The effect of solidification variables on tertiary dendrite arm spacing in unsteady-state directional solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys**; *Materials Science and Engineering*; v.373, p.131-138, 2004.
- 9 ROSA, D. M.; SPINELLI J. E.; GARCIA A.; **Influência das taxas de resfriamento e das correntes convectivas na evolução dos espaçamentos dendríticos terciários de ligas Al-Si**; XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais; p.244-253, 2005.
- 10 OSWALT K.J.; MISRA M.S. ; **Dendrite arm spacing (DAS): a non destructive test to evaluate tensile properties of premium quality aluminum alloy (Al-Si-Mg) castings** ; *AFS Transactions*, vol.88, 1980, p.845-862.
- 11 Radhakrishna K; Seshan S.; SESHADRI M.R.; **Dendrite arm spacing in aluminum alloy castings**; *AFS Transactions*, vol.88, 1980, p.695-702.
- 12 FLEMINGS M.C.; KATTAMIS T.Z.; BARDES B.P.ATO, K.; **Dendrite arm spacing in aluminum alloys**; *AFS Transactions*, vol.99, 1991, p.501 -506.