



EFEITO DAS VARIÁVEIS TÉRMICAS DE SOLIDIFICAÇÃO NA MODIFICAÇÃO ESTRUTURAL DA LIGA A356 SOLIDIFICADAS UNIDIRECIONALMENTE¹

Cleyson de Paulo Torres Lameira²
Cristopher Cardoso de Brito³
Marcio Silva dos Santos⁴
Cláudio Siqueira Filho⁵

Resumo

Foi desenvolvida no presente trabalho uma sequência de experimentos para analisar a solidificação unidirecional vertical em condições transitórias de fluxo de calor da liga A356. Abordagens experimentais são desenvolvidas para a determinação quantitativa de variáveis térmicas de solidificação tais como: velocidades de deslocamento das isotermas liquidus e taxas de resfriamento à frente das isotermas liquidus. A análise das macroestruturas obtidas mostra que a transição colunar/equiaxial (TCE) sofreu influência do superaquecimento ocorrendo em posições diferentes a partir da interface metal/molde para liga examinada experimentalmente. As variáveis térmicas de solidificação são muito similares na TCE, não sendo possível identificar um critério de transição macroestrutural baseado em apenas uma variável em particular. O trabalho analisa também a dependência dos espaçamentos dendríticos em relação às variáveis térmicas de solidificação e ao superaquecimento.

Palavras-chave: Liga A356; Solidificação direcional; TCE; Microestrutura.

EFFECT OF THERMAL SOLIDIFICATION VARIABLES IN A356 ALLOY UNIDIRECTINAL SOLIDIFICATION

Abstract

It was developed in this work a sequence of experiments to analyze the vertical unidirectional solidification Transient heat flow alloy A356. Experimental approaches are developed for the quantitative determination of solidification thermal variables such as Tip growth rate and Cooling Rate. The analysis of macrostructures obtained shows that the columnar / equiaxed transition (CET) has influence from overheating occurring positions different from the interface metal / mold alloy experimentally examined. The solidification thermal variables are very similar in CET, it is not possible to identify a macro-structural transition criterion based on only one variable in particular. The work also examines the dependence of the spacing dendritic in relation to the solidification thermal variables and the overheating .

Key words: A356 alloy; Directional solidification; CET; Microstructure.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Aluno de Graduação, Universidade Federal do Pará – UFPA. cleysonlameira@hotmail.com

³ Aluno de Graduação, Universidade Federal do Pará – UFPA. christopher_engmat@yahoo.com.br

⁴ Aluno de Graduação, Universidade Federal do Pará – UFPA. marcioson@hotmail.com

⁵ Professor Doutor, Universidade Federal da Paraíba – UFPB. siqueira@ct.ufpb.br

1 INTRODUÇÃO

As ligas Alumínio Silício podem ser consideradas as mais importantes entre as ligas fundidas de alumínio, principalmente por sua alta fluidez, baixa contração nos fundidos, elevada resistência à corrosão, boa soldabilidade, fácil brasagem e seu baixo coeficiente de expansão térmica.⁽¹⁾ As ligas de alumínio com 5%-20% de Si (em porcentagem em peso) são as mais comuns e as mais usadas na indústria. A característica marcante destas ligas é que elas consistem de uma fase primária, de alumínio ou de silício e de uma estrutura eutética composta por esses 2 elementos. As ligas hipoeutéticas são formadas por uma fase primária de alumínio com morfologia dendrítica constituídas por ramos secundários, terciários e até de maior ordem. Os vazios entre esses ramos dendríticos são preenchidos por fases intermetálicas e por uma estrutura eutética.⁽²⁾ A estrutura eutética no estado não-modificado exibe a fase Si com morfologia acicular na forma de grandes plaquetas.

A estrutura que se forma imediatamente após a solidificação determina as propriedades do produto final. Em geral, a macroestrutura de solidificação pode apresentar três zonas distintas: zona coquilhada, zona colunar e zona equiaxial. As três zonas podem não estar presentes em um mesmo caso; entretanto, quando um metal fundido contém grãos colunares e equiaxiais, a transição entre as duas morfologias dá-se em uma faixa estreita, com as zonas colunar e equiaxial completamente distintas. A determinação do ponto onde ocorre a Transição Colunar Equiaxial (TCE) é importante para planejamento do processo que irá gerar as propriedades mecânicas finais do produto.⁽²⁾

Ligas solidificadas rapidamente caracterizam-se por apresentar estruturas refinadas, homogêneas sem segregações, fases em estado metaestável ou amorfo, o que as torna materiais interessantes com excelentes combinações de propriedades físicas e mecânicas.⁽³⁾

Entre as ligas comerciais do sistema Al-Si, destaca-se a liga A356 (Al-7Si-(0,3-0,5)Mg), sendo utilizada em muitas aplicações da engenharia elétrica, marinha, automotiva e aeroespacial. O atrativo de suas características ocorre por ela apresentar baixas quantidades de impurezas e de fases intermetálicas, além de sua boa fluidez no estado líquido, elevada relação resistência/peso e baixo custo.⁽⁴⁾

O objetivo do presente trabalho é analisar a influência do superaquecimento (ΔT_V) nas variáveis térmicas de solidificação (Taxa de Resfriamento [\dot{T}], Velocidade Isoterma *Liquidus* [V_L]) e na modificação estrutural da liga A356.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Material

A liga A356 foi obtida a partir da fusão do alumínio a 760 °C. Após a fusão do alumínio, o silício e posteriormente o magnésio são adicionados, e o cadinho é levado novamente para o forno para completa difusão do Si e do Mg. É feita uma limpeza do banho para a retirada da escoria. A Tabela 1 mostra a composição química da liga segundo o padrão ASTM.

Tabela 1 – Composição Química da liga A356 ⁽³⁾

Constituintes	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
Composição	7,0	0,2	0,2	0,2	0,5	-	0,1

2.2 Parâmetros do Processo

Após a fusão do material a liga foi vazada numa lingoteira de aço Inox posicionada dentro do forno de solidificação direcional ascendente refrigerado a água, Figura 2. A T_L da liga AA356 igual a 615°C ⁽⁴⁾ os parâmetros destas pesquisas foram baseados na variação do superaquecimento (ΔT_V), e foram utilizados três diferentes valores:

- 5% da $T_L = 645,6^\circ\text{C}$
- 10% da $T_L = 676,5^\circ\text{C}$.

Foram monitoradas as curvas de extração de calor através de termopares do tipo K conectados a um registrador de temperaturas com interface on-line a um computador onde os dados são armazenados.

Posteriormente foram feitas as análises da taxa de resfriamento, velocidade da isoterma *liquidus* e gradiente de temperatura. Os termopares foram posicionados a 3 mm, 5 mm, 7 mm, 15 mm, 30 mm e 50 mm da base da lingoteira.

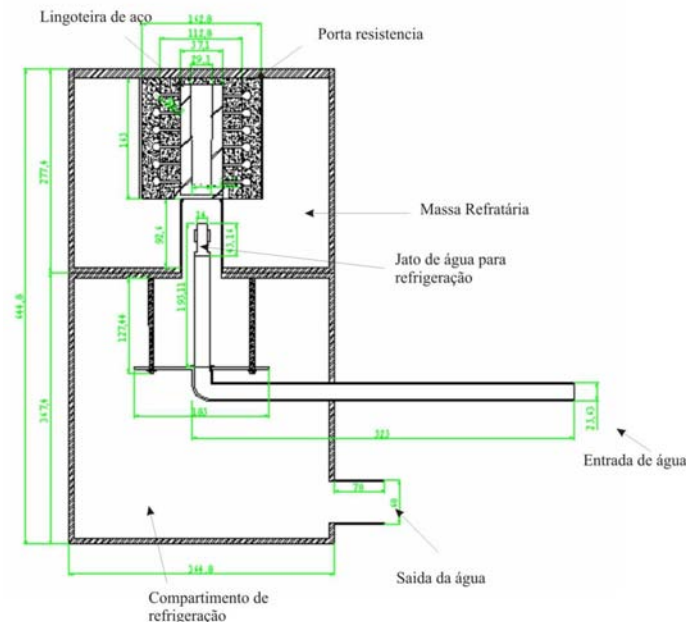


Figura 2. Desenho esquemático do forno de solidificação unidirecional.

2.3 Análise Macroestrutural e Microestrutura

A análise macroestrutural foi realizada a partir do seccionamento do lingote na direção longitudinal em relação ao centro. A macroestrutura foi obtida através de ataque químico com o reagente de Tucker^(5,6) (45 ml HCl, 15 ml HNO₃, 15 ml HF e 25 ml de H₂O).

A microestrutura foi revelada através da técnica de eletropolimento e ataque eletrolítico usando uma solução eletrolítica MEPER (solução de ácido perclorido diluído em metanol). A voltagem para polimento e ataque foi de 20V amperagem de 1,5A e tempo de aplicação de 12 s a 15 s. As microestruturas foram capturadas e analisadas através de microscopia ótica.



3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Curvas de Resfriamento

Considerando a liga analisada, para cada superaquecimento foram obtidos os mapeamentos de temperaturas para quatro posições dos termopares no metal a partir da interface metal/molde.

A Figura 3 mostra as curvas de resfriamento, respectivamente, para superaquecimento de $\Delta T_V=5\%T_L$ e $\Delta T_V=10\%T_L$. As posições dos termopares durante os ensaios experimentais foram definidas visando ao máximo obedecerem às possibilidades unidirecionais de extração de calor, bem como a importância dos instantes iniciais do processo de solidificação. Verificou-se que um aumento de 30°C no superaquecimento foi suficiente para modificar o padrão da extração de calor.

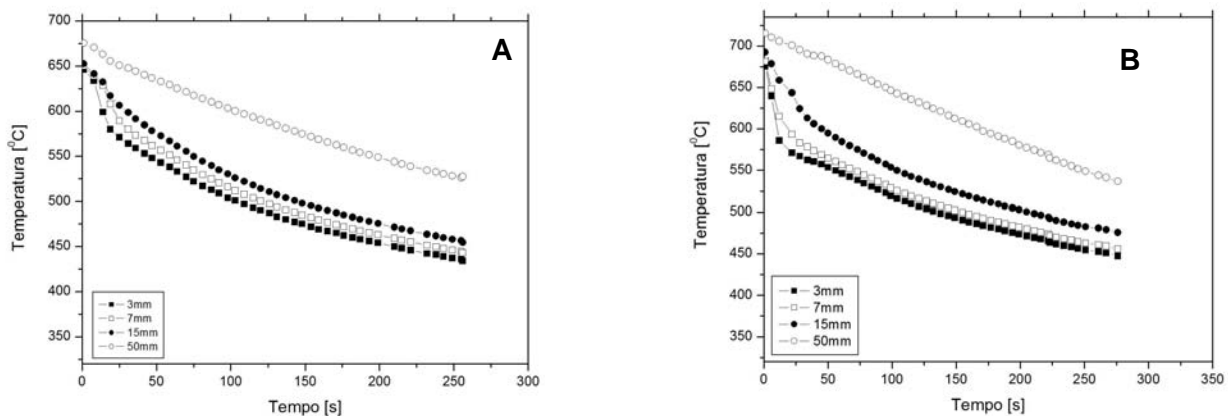


Figura 3. Perfis térmicos experimentais para a liga A356 com superaquecimento de: a) 5% da T_L e b) 10% da T_L .

3.2 Variáveis Térmicas de Solidificação

A partir das curvas de resfriamento foi possível estabelecer a relação Posição/Tempo para cada superaquecimento. Os resultados experimentais apresentados são obtidos a partir das interseções das retas de cada temperatura *liquidus* (T_L) com as curvas de resfriamento para cada posição dos termopares. A Figura 4 apresenta os resultados experimentais segundo a expressão $[P = f(t)]$.⁽⁷⁾

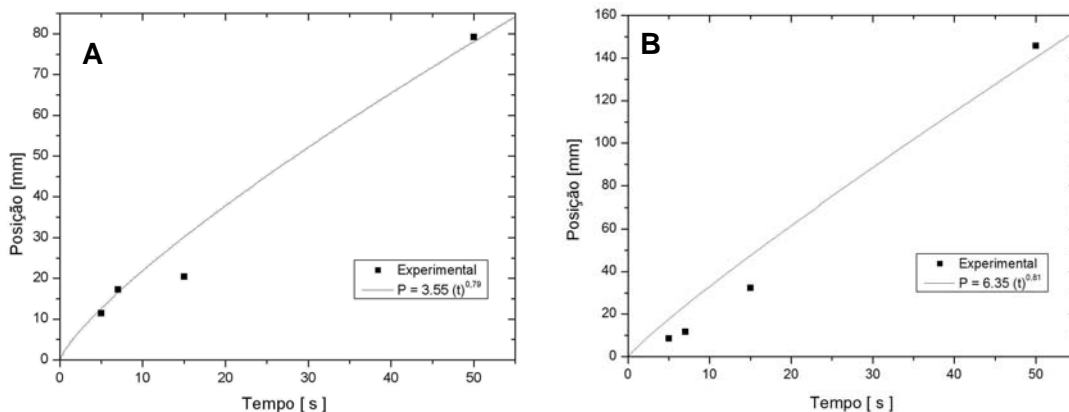
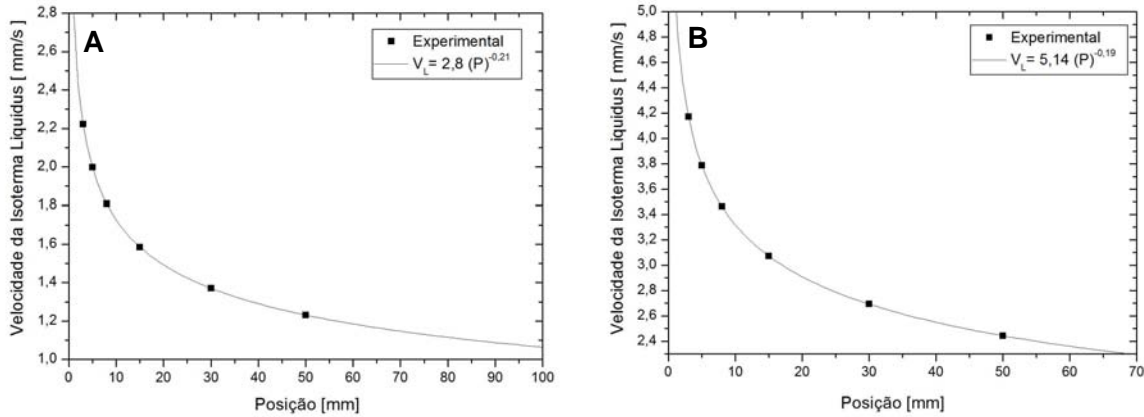


Figura 4. Gráfico Posição/Tempo para a liga A356 com superaquecimento de: a) 5% da T_L e b) 10% da T_L .

As velocidades da isoterma liquidus (V_L) experimentais para todos os casos analisados, são determinadas por meio da derivada da função $P = f(t)$ obtida experimentalmente. Na interface metal/molde a velocidade da isoterma *Liquidus* para os superaquecimentos de 5% da T_L e 10% da T_L respectivamente foram de 2,22 mm/s e 4,17 mm/s, aumentando cerca de 85% na V_L . Observou-se ainda que a V_L diminuiu para as posições mais afastadas da base refrigerada.



A Figura 6 apresenta valores do gradiente térmico no líquido, onde se observa que, à medida que se elevam os valores do superaquecimento o gradiente térmico no líquido tende a diminuir. Isto ocorre devido ao aumento da resistência térmica metal/fluido que diminui a extração de calor por condução através da frente de solidificação.

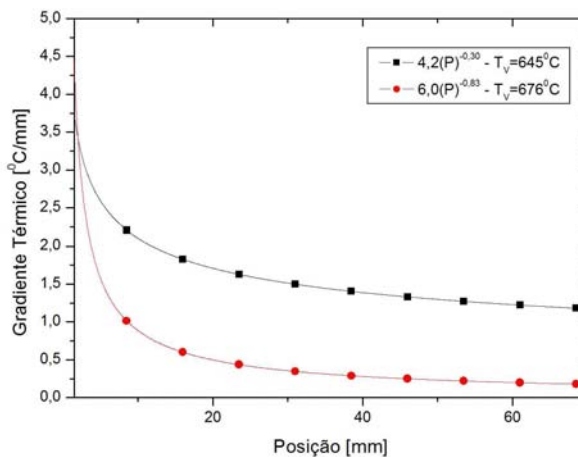


Figura 6. Gráfico do Gradiente Térmico X Posição.

A Figura 7 mostra as curvas experimentais que representam a taxa de resfriamento como função da posição solidificada em molde de aço inoxidável. Observou-se neste caso, a evolução da taxa de resfriamento à frente da isoterma *liquidus* durante a solidificação para os superaquecimentos analisados, entretanto notou-se uma mudança no comportamento da \dot{T} . Para 30°C de superaquecimento na interface metal/molde a \dot{T} foi de 6,36°C/s e na TCE foi de 1,24 °C/s, nas mes mas condições e para 61°C obteve-se respectivamente 8,46°C/s e 0,32°C/s, mostrando dessa forma um inversão na taxa de resfriamento à medida que liga foi solidificando.

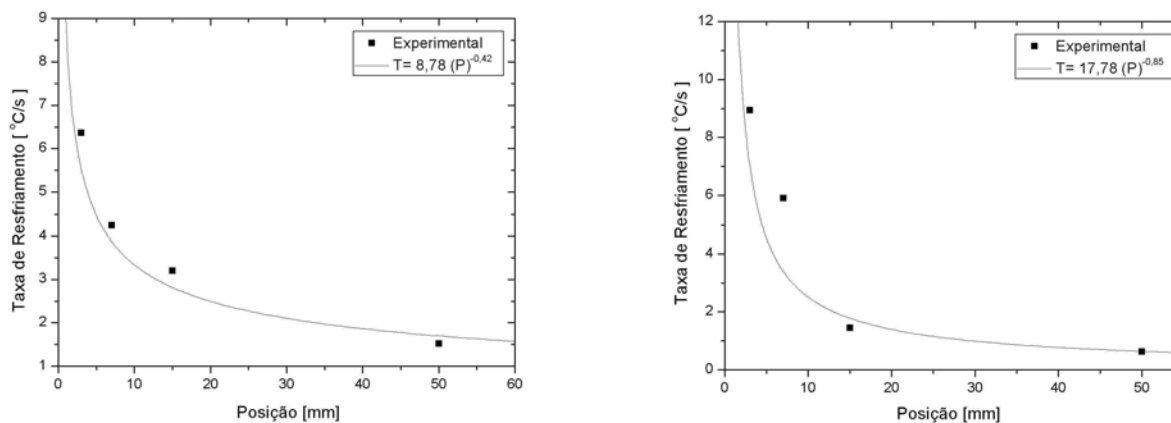


Figura 7. Gráfico Taxa de Resfriamento X Posição para a liga A356 com superaquecimento de: a) 5% da T_L e b) 10% da T_L .

A Tabela 2 mostra os valores de cada parâmetro térmico em função do superaquecimento associados ao ponto onde ocorreu a TCE.

Tabela 2 - Parâmetros Térmicos Associados à TCE para Liga A356

Liga A356 (Superaquecimento)	Posição TCE [mm]	Velocidade Isoterma <i>Liquidus</i> (V_L) [mm/s]	Gradiente de Temperatura (G_L) [°C/m]	Taxa de Resfriamento (\dot{T}) [°C/s]
$\Delta T_V = 5\% T_L = 645\text{ °C}$	113	1,06	1,17	1,24
$\Delta T_V = 10\% T_L = 676\text{ °C}$	103	2,09	0,15	0,32

3.3 Macroestruturas

Alguns fatores que influenciam na TCE para ligas binárias são ^(7,8): superaquecimentos crescentes, capacidade de resfriamento na interface metal/molde, taxa de resfriamento, teor de soluto.

Como o demonstrado na Tabela 2, um superaquecimento de 30°C e 61°C gerou no ponto onde ocorreu a TCE uma taxa de resfriamento respectivamente de 1,24°C/s e 0,32°C/s diminuindo dessa forma o crescimento da zona colunar de 113mm para $\Delta T_V = 30\text{ °C}$ e 103 mm para $\Delta T_V = 61\text{ °C}$.

Analisando a Figura 8 observa-se que a TCE ocorre essencialmente em um plano horizontal e que se distancia da interface metal/molde com taxas de resfriamento crescentes na interface metal/molde e decrescentes na interface metal/liquido à medida que se aumentou o valor do superaquecimento usado experimentalmente. A Figura 6 mostrou que o aumento do ΔT_V modificou o comportamento do Gradiente térmico a frente da interface metal/liquido, onde se pôde observar que, à medida que a frente de solidificação avançava a resistividade térmica do liquido aumentava, impossibilitando uma extração de calor eficiente.

Todas as variáveis térmicas analisadas apresentaram resultados singulares em função do superaquecimento, dessa maneira não é possível identificar uma determinada variável térmica como responsável isolada pela ocorrência da TCE.

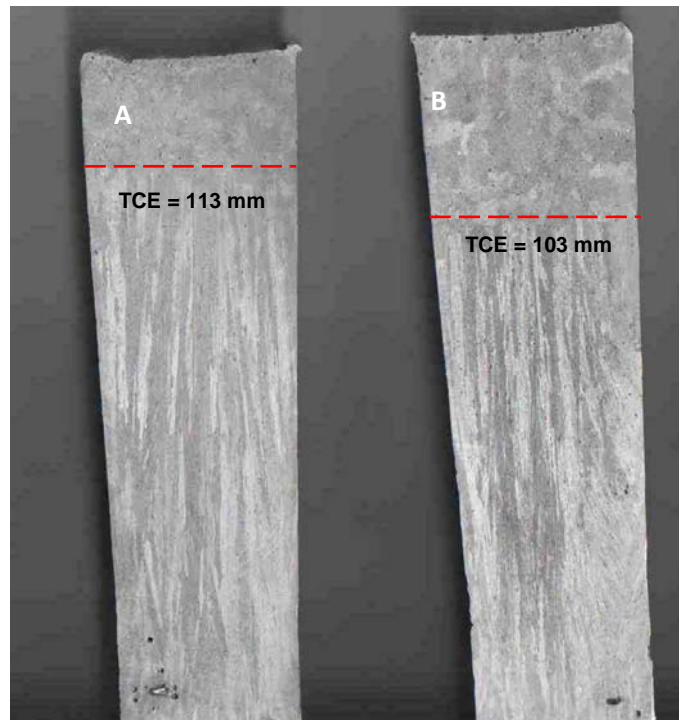


Figura 8. Macroestruturas da liga A356 a) 5% da T_L e b) 10% da T_L .

3.3 Microestruturas

Os tipos de microestruturas presentes em uma liga estão fortemente relacionados com a forma da interface entre o sólido e o líquido (S/L) durante o processo de solidificação. Pode-se passar da forma plana dos metais puros para estruturas celulares e dendríticas, em decorrência de alterações nos parâmetros térmicos do sistema metal/molde durante a solidificação. As dendritas constituem-se em formações monocristalinas que possuem direções de máximo crescimento bem definidas e que se desdobram em ramificações primárias, secundárias e terciárias com espaçamentos regulares.

Os espaçamentos dendríticos exercem uma influência significativa sobre as propriedades mecânicas de ligas em seu estado bruto de solidificação. Nesse sentido, a determinação correta dos parâmetros que controlam esses espaçamentos durante a solidificação é fundamental. Os braços dendríticos secundários formam-se nas proximidades das pontas das dendritas e com poucas ramificações uniformemente espaçadas. Entretanto, esses espaçamentos aumentam à medida que se aproximam da raiz da dendrita.

As Figuras 9 e 10 mostram as microestruturas que foram obtidas para as posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 15 mm, 30 mm, e 50 mm a partir da interface metal/molde. Observou-se uma morfologia dendrítica com ramos primários e secundários bem definidos, e também alguns braços dendríticos terciários. A proposta deste artigo visa o cálculo do Espaçamento Dendrítico Secundário (EDS).

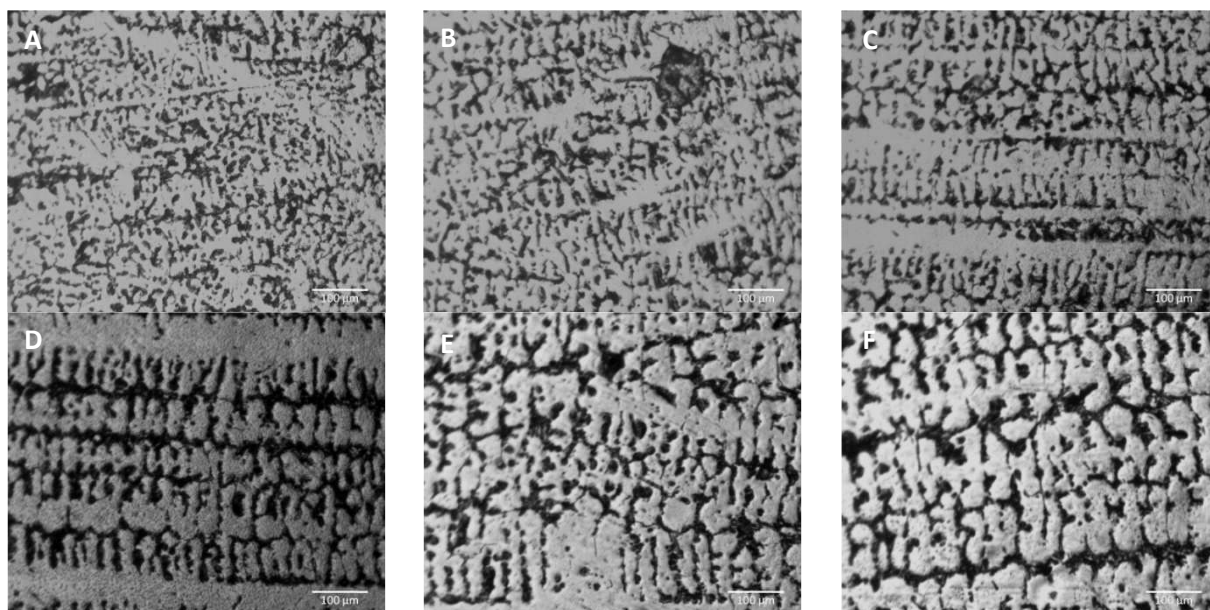


Figura 9. Micrografia da liga A356 para $\Delta T_V=5\%T_L$: (a) EDS = 21,63 μm ; (b) EDS = 25,19 μm ; (c) EDS = 28,79 μm , (d) EDS = 37,07 μm , (e) EDS = 41,93 μm e (f) EDS = 53,7 2 μm .

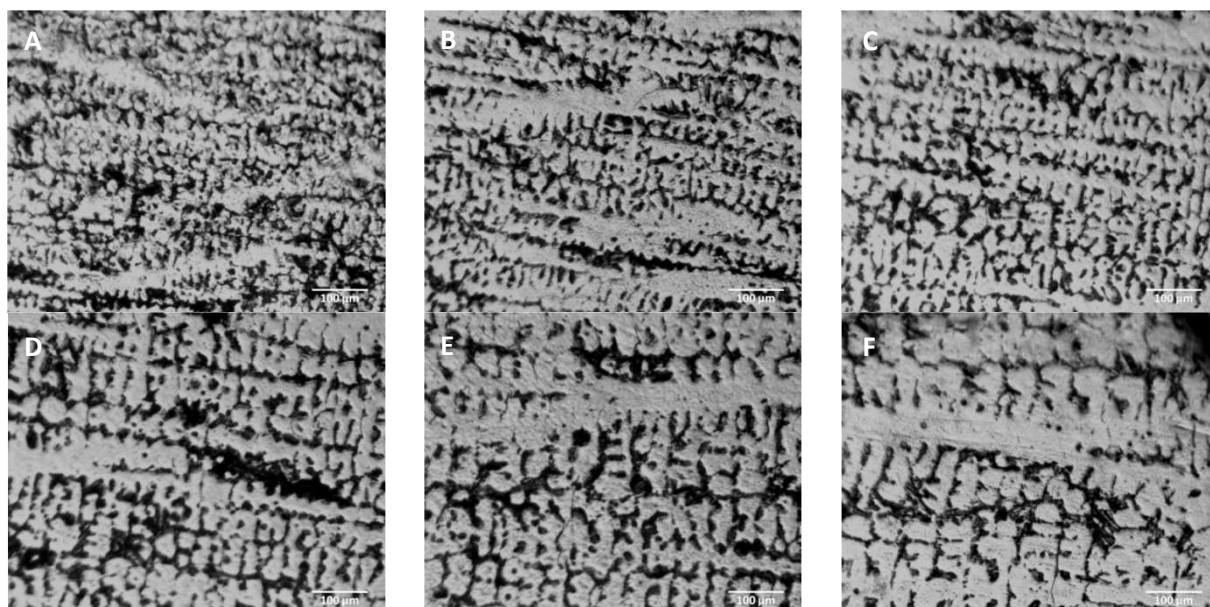


Figura 10. Micrografia da liga A356 para $\Delta T_V=10\%T_L$: (a) EDS = 24,9 μm ; (b) EDS = 27,8 μm ; (c) EDS = 29,84 μm , (d) EDS = 35,88 μm , (e) EDS = 43,95 μm e (f) EDS = 49,4 μm

Na condição de extração de calor unidirecional ascendente vertical à medida que a frente de solidificação se distancia da interface metal/molde a taxa de resfriamento diminui⁽⁹⁾ ocasionando um aumento no valor do EDS, entretanto, verificou-se que a partir da posição 30 mm da base refrigerada a resistividade térmica do líquido a frente de solidificação sofreu uma mudança no comportamento, como se observou na análise do gradiente térmico da Figura 6, gerando menores valores de EDS para 61°C de superaquecimento. Na Figuras 11 verificou-se que esse comportamento se aplica à liga A356 para $\Delta T_V= 30^\circ\text{C}$ e 61°C e percebeu-se que um superaquecimento maior parece não influenciar muito nos valores espaçamento dendritico secundário.

A Figura 11 mostra o Gráfico da EDS para as duas condições de superaquecimentos analisadas.

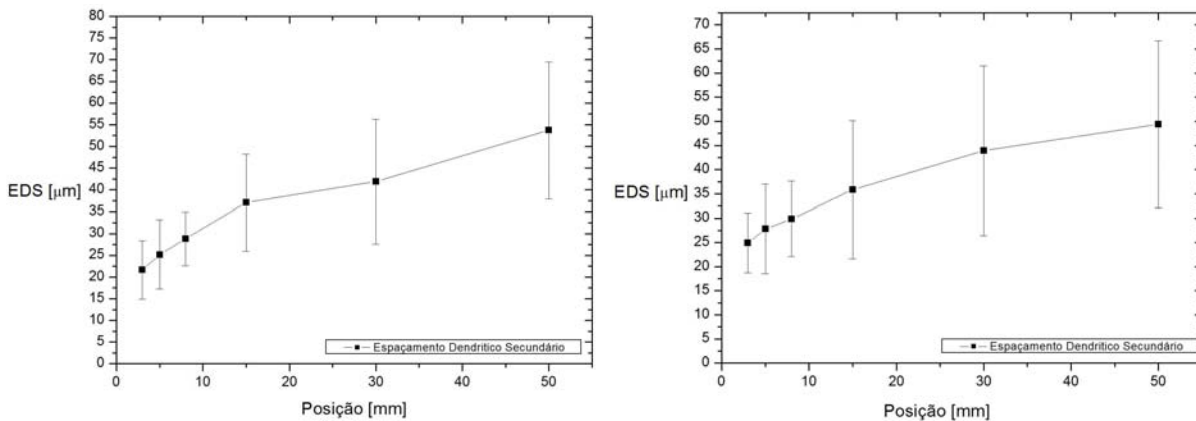


Figura 11. EDS da liga A356 com superaquecimento de: a) 5% da T_L e b) 10% da T_L .

4 CONCLUSÕES

A partir do trabalho realizado pode-se concluir que:

- O superaquecimento exerceu influencia direta nas variáveis térmicas de solidificação de forma que à medida que se elevou o valor de ΔT_V a taxa de resfriamento tende a aumentar, mostrando um melhor ângulo de molhamento do metal com a chapa molde conseqüentemente melhorando a extração de calor na interface metal/molde. A resistividade térmica do liquido diminui o gradiente térmico da liga para maiores valores de superaquecimentos diminuindo dessa maneira a taxa de resfriamento na interface solido/liquido. A velocidade da isoterma *liquidus* evolui 85% na interface metal/molde em função do superaquecimento.
- Quanto à macroestrutura observou-se que a TCE ocorre em uma seção acima do centro do lingote levando-se em conta os valores de superaquecimentos utilizados. Para 30 °C de superaquecimento a TCE ocorreu a 113mm da base da lingoteira e para 61 °C a mesma ocorreu a 103mm. O decréscimo da zona colunar não é possível de se identificar analisando uma determinada variável térmica em virtude da singularidade de seus resultados.
- Correlacionando o espaçamento dendritico secundário com a taxa de resfriamento verifica-se que à medida que diminui a extração calor o espaçamento dos braços dendriticos secundários aumentam, entretanto, a 30mm da base refrigerada a resistividade térmica do liquido a frente de solidificação sofreu uma mudança no comportamento, gerando menores valores de EDS para 61°C de superaquecimento.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Federal do Pará (UFPA) e CNPq, pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 KORI, S. A.; MURTY, B. S.; CHAKRABORTY, M. Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy and its modification with strontium. *Materials Science and Engineering*, v. A283, p. 94-104, 2000.
- 2 GARCIA, Amauri. *Influência das variáveis térmicas de solidificação na formação da macroestrutura e da microestrutura e correlação com propriedades decorrentes*. *Revista Projeções*, v. 23, p. 13-32, jan./dez. 2005.
- 3 BRAY, Jack W. *Aluminum Mill and Engineered Wrought Products*. ASM Handbook, vol 2, "Selection Non Ferrous", 9^o edition. pp. 124-14, 1988.
- 4 GARCIA, Amauri. *Solidificação: fundamentos e aplicações*, Campinas, SP. 2001.
- 5 MARTINS, Juliana de Paula e PADILHA, Ângelo Fernando. *Caracterização da liga comercial de alumínio 3003 produzida por fundição contínua de chapas (twin roll caster) – microestrutura*. *Revista Escola de Minas Metalurgia e Materiais*. Ouro Preto, MG. 2006.
- 6 SENA, Hélio Cleidson de Oliveira; QUARESMA, José Maria do Vale. *ANÁLISE DE SOLUÇÕES ÁCIDAS PARA A CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE MICRO E MACROGRAFIA NA LIGA DE Al-0,6%Mg-0,5%Si (6101)*. *Revista Científica da UFPA* Vol. 3. Belém, PA. 2002.
- 7 SIQUEIRA, Claudio Alves. *Influência de Parâmetros Térmicos de Solidificação na Transição Colunar/Equiaxial*. Tese de Doutorado. Unicamp. Campinas, SP. 2002.
- 8 Siqueira, C. A; Cheung, N; Garcia, A. *The columnar to equiaxed transition during solidification of Sn-Pb alloys*. *Journal of Alloys and Compounds* 351 (2003) 126-134. 2003.
- 9 PERES, Manoel Diniz. *Desenvolvimento da Macroestrutura e da Microestrutura na Solidificação Unidirecional Transitória de Ligas Al-Si*. Tese de Doutorado. Unicamp. Campinas, SP. 2005.