



ESTUDO DA EVOLUÇÃO DA SOLIDIFICAÇÃO NA LIGA Al-Mg-Si ESTABELECENDO CORRELAÇÕES ENTRE TAXA DE RESFRIAMENTO (\dot{T}) E ESPAÇAMENTO DENDRÍTICO SECUNDÁRIO (λ_2)¹

Emmanuelle Sá Freitas²
Oscarina da Silva Passos²
Thiago Augusto Pacheco Tavares³
Emerson David Cavalcante Santos³
José Maria do Vale Quaresma⁴

Resumo

O objetivo deste trabalho é estudar a evolução da solidificação unidirecional horizontal em condições transitórias de extração de calor na liga Al-0,6%Mg-(0,4 e 0,8)%Si, não refinada, modificada com teores de (0,05 e 0,3)%Cu. E, desta forma, estabelecer a correlação entre a variável térmica do processo – taxa de resfriamento (\dot{T}), com as características estruturais – espaçamento dendrítico secundário (λ_2). Para determinação das Curvas de Solidificação realizou-se o mapeamento das temperaturas em pontos previamente escolhidos no molde e no metal ao longo da solidificação. Posteriormente, com o auxílio destas curvas, foi possível determinar (\dot{T}). Em seguida realizou-se a metalografia para caracterização da evolução da estrutura de solidificação a fim de correlacionar (\dot{T}) com (λ_2). A partir dos resultados é possível observar que os parâmetros térmicos de solidificação influenciaram diretamente no processo de geração da estrutura, visto que a (\dot{T}) em decorrência dos diferentes teores de cobre e silício, fizeram com que os materiais apresentassem um diferente contato do metal com molde e tendo como consequência uma mudança de estrutura do material solidificado, confirmado através das leituras micrográficas (EDS).

Palavras-chave: Liga 6201; Solidificação unidirecional; Taxa de resfriamento; Espaçamento dendrítico secundário.

STUDY OF SOLIDIFICATION'S EVOLUTION IN Al-Mg-Si ALLOY ESTABLISHING CORRELATIONS BETWEEN COOLING RATE (\dot{T}) AND SECONDARY DENDRITIC SPACEMENT (λ_2)

Abstract

The objective in this work is study the unidirectional horizontal solidification's evolution in heat extraction transitory conditions in non-refined Al-0,6%Mg-(0,4 e 0,8)%Si alloy, modified with (0,05 e 0,3)%Cu content. By this way, was established a correlation between process's thermal variable – chilling rate (\dot{T}), with structural characteristics – secondary dendrit spacing (λ_2). A temperature mapping in previously chosen points in mold and in the metal along the solidification was realized to determinate the Solidification Curves. Subsequently, by aid of these curves, was possible to determine (\dot{T}). After that, the metallography was realized for solidification structure evolution's characterization to correlate (\dot{T}) with (λ_2). Analyzing the results, was observed that solidification's thermal parameters have affected directly in structure generation process, copper and silicon show different chemical contents. By this way, these materials shown different contact between metal and mold and. Consequently, the solidified material's change its structure, confirmed through micrographic reading (EDS).

Key words: 6201 alloy; Unidirectional solification; Rate of cooling; Secondary dendritic spacing.

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

² Mestras em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará.

³ Mestrados em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará.

⁴ Professor Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará.

1 INTRODUÇÃO

O consumo de alumínio no mercado mundial tem crescido constantemente, por aliar boa trabalhabilidade com resistência mecânica. Dentre as ligas de alumínio mais utilizadas, são as da série 6000 que vêm sendo consideradas como das mais promissoras em relação ao uso industrial, e em especial as ligas 6101 e 6201 que têm aplicabilidade muito intensa na fabricação de fios e cabos para transmissão e distribuição de energia elétrica. Esse trabalho objetiva estudar a evolução da solidificação nas ligas da série 6000 (Al-0,6%Mg-(0,4 e 0,8)%Si, não refinada, modificada com teores de (0,05 e 0,3)%Cu), estabelecendo correlações entre as variáveis térmicas do processo com as características estruturais microestruturas da solidificação resultantes.

Do ponto de vista da fundição de metais, onde a solidificação dos metais encontra maior campo de aplicação, os principais parâmetros afetados pelo processo de transferência de calor durante a solidificação são as velocidades de solidificação

$[V_L]$, a taxa de resfriamento $[\dot{T}]$ e o coeficiente de transferência de calor $[h_i]$. O conhecimento de tais parâmetros é importante para o controle da estrutura final da peça, que influi diretamente nas propriedades, já que eles afetam, por exemplo, no caso de ligas metálicas, a redistribuição de soluto e, portanto, a morfologia da interface sólido/líquido, que está diretamente ligada a formação da estrutura final. Uma boa parte dos trabalhos que envolvem o mecanismo de solidificação de metais em moldes tem sido fundamentada na estrutura de solidificação.⁽¹⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a determinação das correlações desejadas foram preparadas as ligas e posteriormente foram retirados os corpos de prova, a partir do vazamento do metal fundido em uma câmara de vazamento, ilustrado na Figura 1, que serve para produzir um sistema de fluxo de calor unidirecional no interior do metal, tomando como referência a interface metal/molde. Sua capacidade volumétrica é de aproximadamente 0,4 L e a massa de metal que se utilizou foi de 1.200g. Neste dispositivo, foram executados quatro (04) vazamentos, monitorados por termopares estrategicamente posicionados para registro da história térmica da solidificação.

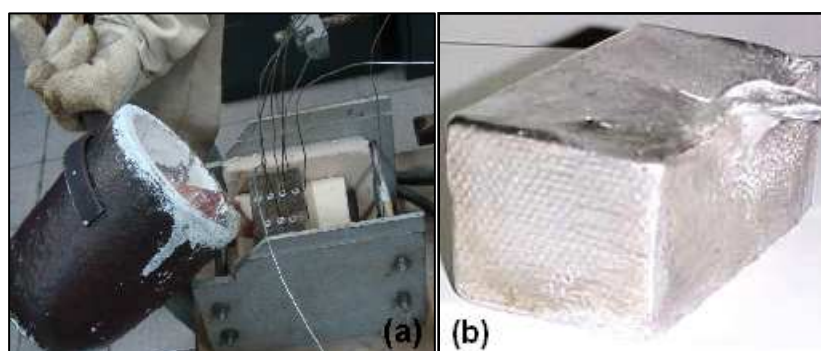


Figura 1. (a) Vazamento da liga e posicionamento dos termopares (7,5 mm; 15,0 mm; 22,5 mm; 30,0 mm; 37,5 mm e 45,0 mm) na câmara. (b) Lingote obtido no processo.

A análise metalográfica foi realizada na face do corpo de prova que está no mesmo plano da leitura térmica dos termopares. Esta análise será obtida, primeiramente, pelo lixamento do corpo de prova até a superfície ficar sem imperfeições e,



posteriormente, o polimento com alumina de granulometria de 0,1 μm buscando a especularidade da superfície. Com a superfície polida, aplica-se um reagente químico, que para as ligas da série 6000 o mais aconselhado é o reagente POLTON, para revelar a estrutura de solidificação do material. Com um microscópio óptico LEICA foram obtidas imagens microscópicas para a análise do EDS (λ_2) com o auxílio do software MOTIC, o λ_2 foi mapeado ao longo do lingote, a partir da face em contato com o molde até a extremidade final solidificada. A medição foi realizada de forma sistemática e repetitiva, foram feitas sete (07) medidas em cada posição dos termopares [7,5; 15; 22,5; 30; 37,5 e 45] mm extraído um valor médio para cada posição.

A técnica utilizada para a medição do λ_2 nas posições específicas dos termopares foi uma adaptação de Schievenbusch⁽²⁾ em solidificação unidirecional, conforme ilustra a Figura 2.

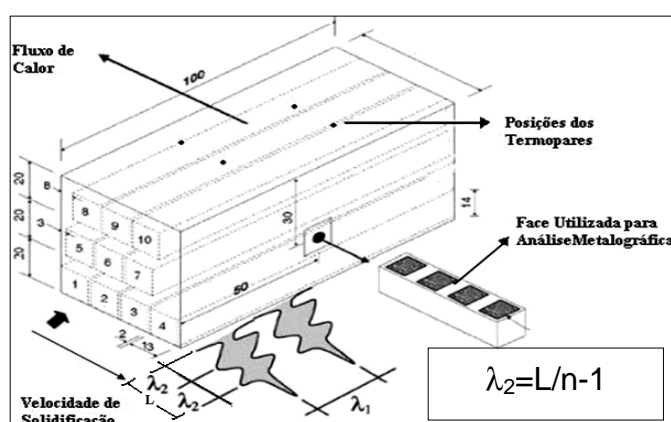


Figura 2. Arranjo esquemático do lingote obtido após o vazamento na lingoteira unidirecional ilustrando a direção do fluxo de calor, a posição de retirada dos corpos prova para caracterização metalográfica e as posições dos termopares.^(3,4)

3 RESULTADOS

Na Tabela 1 encontram-se relacionadas às identificações simbólicas utilizadas para cada liga assim como as composições químicas das ligas estudadas neste trabalho.

Tabela 1: Composição química das ligas estudadas

Identificação das ligas	(Porcentagem em Massa)							
	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	outros
Al-0,4%Si-0,05%Cu	98,60	0,3655	0,2821	0,0466	0,6893	0,0018	0,0009	0,0138
Al-0,4%Si-0,30%Cu	98,48	0,3602	0,1578	0,2544	0,5762	0,0060	0,0203	0,1451
Al-0,8%Si-0,05%Cu	98,28	0,7944	0,2720	0,0423	0,5869	0,0019	0,0010	0,0215
Al-0,8%Si-0,30%Cu	98,01	0,7924	0,2640	0,2603	0,6511	0,0016	0,0005	0,0201

Neste trabalho os vazamentos foram executados buscando-se a obtenção de perfis térmicos, os quais mostraram a variação térmica durante a solidificação de cada liga. As curvas de resfriamento contidas no gráfico da Figura 3 representam o registro térmico do processo de solidificação para a liga Al-0,4%Si-0,05%Cu.

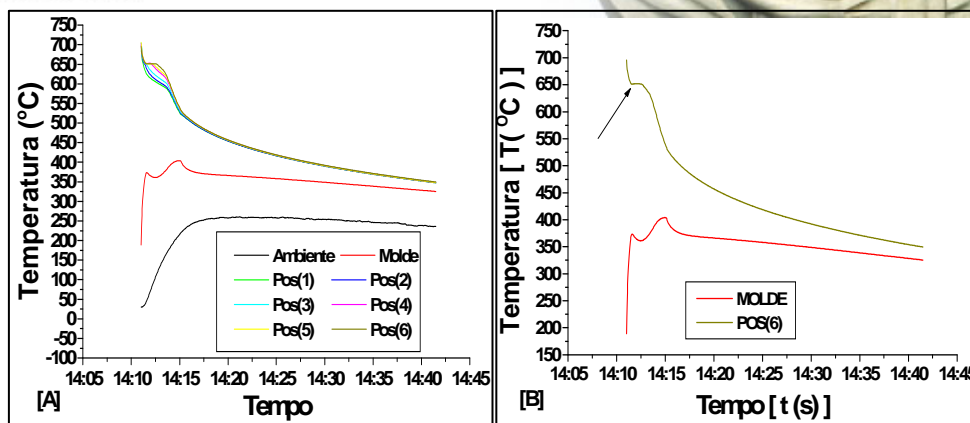


Figura 3. (a) Curva de resfriamento experimental da liga Al-0,4%Si-0,05%Cu; (b) Registro térmico para a posição a 45mm da Interface M/M.

Obtidas as curvas de resfriamento é possível obter-se os valores que relacionam a posição do termopar e o tempo de passagem da isoterma liquidus, como ilustrado na Figura 3(b) pela seta para a posição a 45 mm da interface M/M e, desta forma consegue-se obter as equações experimentais $P = f(t)$. A Tabela 2 relaciona os valores assim obtidos para todas as ligas.

Tabela 2 – Relação posição com tempo de passagem da isoterma liquidus

Posição [mm]	7,5	15	22,5	30	37,5	45
Ligas	Tempo [s]					
0,4%Si0,3%Cu	2,2	8,9	14,2	25,8	36,4	56
0,4%Si0,05%Cu	3,1	5,4	21,6	34,3	47,8	63,8
0,8%Si0,3%Cu	1,8	3,6	5,4	12,6	25,2	41
0,8%Si0,05%Cu	2,2	4,6	7,4	16,5	32,4	49,6

Com estes resultados foram plotadas curvas experimentais da posição da isoterma liquidus pelo tempo para cada liga. A Figura 4(a) mostra exemplo da equação obtida para a curva que descreve a evolução do perfil de deslocamento da isoterma liquidus para a liga Al-08%Si-0,05%Cu. Na Figura 4(b), encontram-se reunidas todas as curvas com suas respectivas equações experimentais, a partir das quais é possível obter-se as equações experimentais para a velocidade de deslocamento da isoterma liquidus em função da posição, como pode ser visto na Figura 5(a).

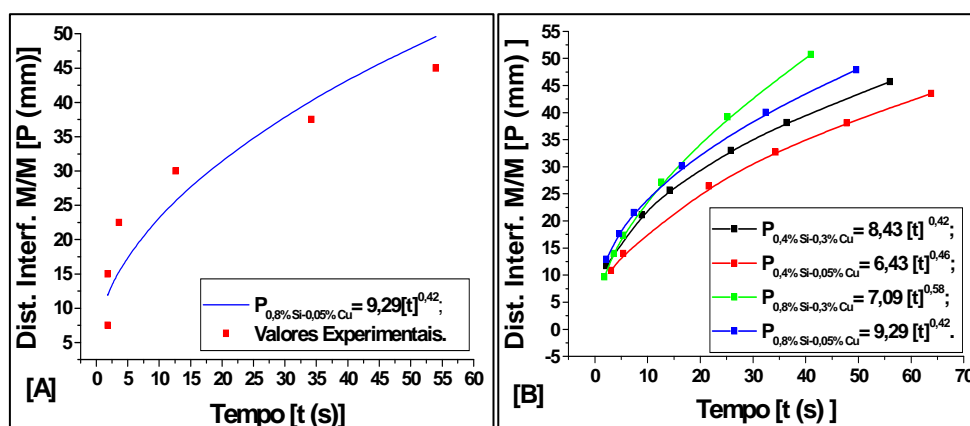


Figura 4. (a) Curva experimental da posição da isoterma liquidus; (b) Velocidades das isotermas das ligas estudadas.

Com o auxílio das curvas de resfriamentos das ligas em estudo, e de modo semelhante ao adotado para a determinação das equações experimentais $P = f(t)$ podem ser determinadas às equações experimentais para a taxa de resfriamento. Neste procedimento foi utilizada a metodologia de Okamoto,⁽⁵⁾ considerando-se os dados de cada posição dos termopares, obtidos experimentalmente a partir da intersecção da reta de cada temperatura liquidus (TL), com as curvas de resfriamento para cada posição dos termopares. Desta forma coleta-se pares de valores $[P;t]$ imediatamente antes e depois da passagem da isoterma liquidus em cada termopar e que serão aplicados na Equação 1.

$$\bar{T} = \left[\frac{\Delta T}{\Delta t} \right] = \left| \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1} \right| \quad 1$$

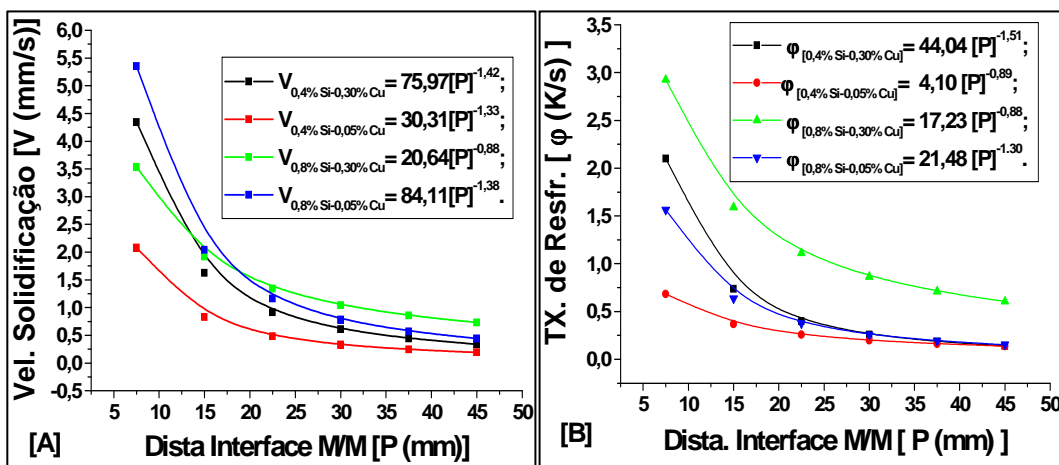


Figura 5. (a) Curvas de Velocidade de Solidificação; (b) Curvas da taxa de resfriamento.

A correspondência de comportamento observada nos dois conjuntos de curvas da Figura 5, está associada à dependência analítica disciplinada pela Equação 2.

$$\bar{T} = C[V_L]^2 \quad 2$$

Na qual, **C** é uma constante fortemente dependente dos parâmetros térmicos – Densidade, Condutividade e Calor Latente de Fusão; V_L , é a Velocidade de Solidificação obtida em função da Distância da Interface M/M.

Os elementos Silício e Cobre possuem comportamentos completamente opostos quando associados ao Alumínio, enquanto o Si proporciona aumentar a fluidez^(6,7), o Cobre aumenta a viscosidade,^(8,9) desta forma sugere-se analisar os perfis das curvas de velocidade e das taxas, tendo-se como referência os teores de Si. Pode-se esperar que maiores teores de Si proporcionem melhor molhabilidade do molde por elevar a fluidez da liga principalmente nas temperaturas de vazamento utilizadas para as ligas de alumínio. Este fato está evidenciado pelas posições mais elevadas das curvas contidas na Figura 6(b) se comparadas com as curvas contidas na Figura 6(a). Por isso os valores para as velocidades iniciam maiores. As Curvas para 0,4%Si apresentam uma forte interferência do Cobre. A liga com o teor 0,3%Cu, parece molhar melhor o molde provocando “gap de ar” menor aquecendo o molde e diminuindo a capacidade de resfriar, daí a queda mais intensa da curva a exemplo do que se verifica para a liga 0,8%Si-0,05Cu mais fluida, na Figura 6B.

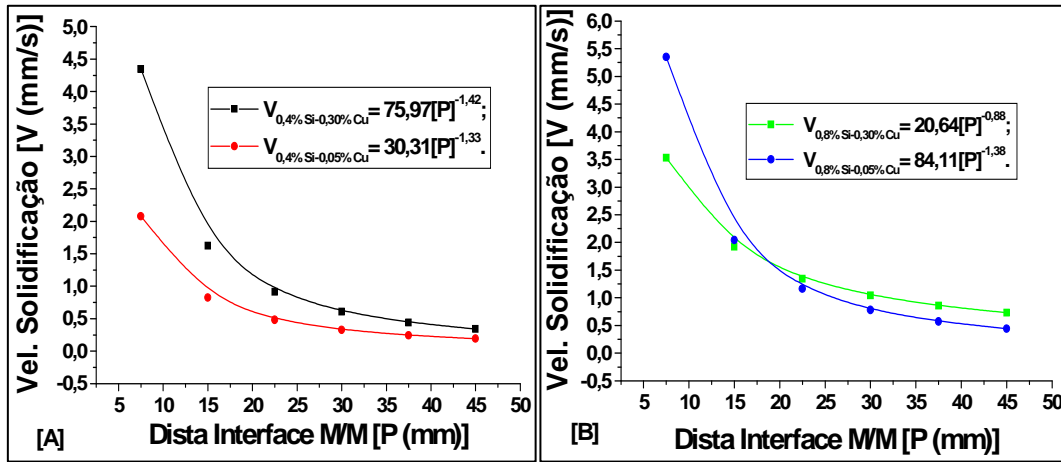


Figura 6. Curvas de Velocidade de Solidificação: (a) Ligas Al-0,4%Si-[0,05 e 0,3]%Cu; (b) Ligas Al-0,8%Si-[0,05 e 0,3]%Cu.

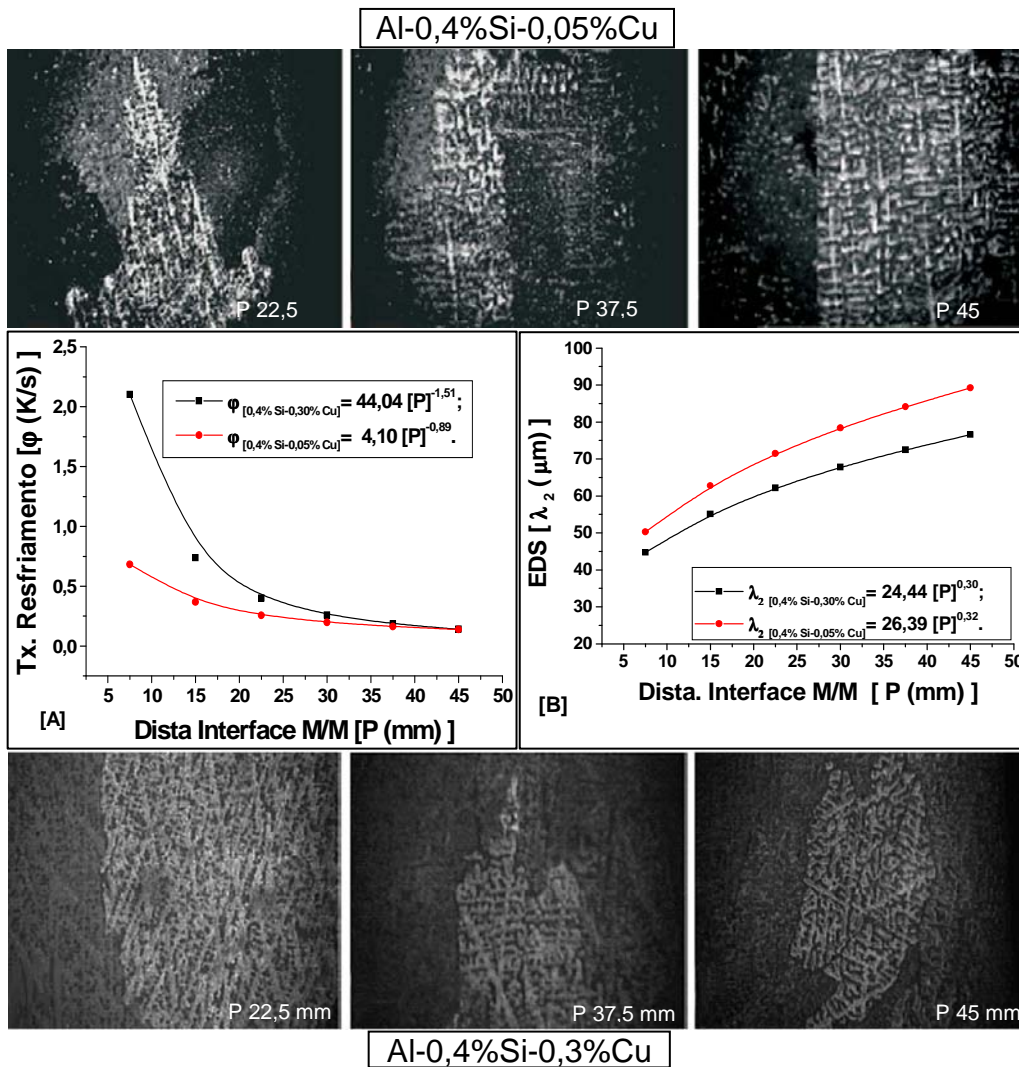


Figura 7. Fotos Micrograficas associadas a (a) Taxa de Resfriamento; (b) Espaçamento Dendrítico secundário para as Ligas Al-0,4%Si-[0,05 e 0,3]%Si.

A análise metalográfica dos corpos de provas está apoiada na medição dos Espaçamentos Dendríticos Secundários [EDS]. Os resultados obtidos permitiram plotar os gráficos que se encontram nas Figuras 7 e 8.

A evolução da estrutura formada fica melhor analisada quando associada às Taxas de Resfriamento envolvidas no processo de solidificação. Apesar das equações terem sido obtidas experimentalmente, deve-se ter em mente que existe uma correlação matemática entre a velocidade de solidificação e a taxa de solidificação que deve ser obedecida.

As curvas que são apresentadas nos gráficos das Figuras 7 e 8 mostram que os maiores $[\lambda_2]$ estão associados as menores taxas de resfriamento que, por sua vez, correspondem aos menores teores de cobre. É provável que esta característica estrutural esteja associada a melhor molhabilidade que a menor presença de cobre nas ligas irá proporcionar ao contato metal molde.

Na Figura 7 as fotos micrograficas, acima dos gráficos, são relativas à liga Al-0,4%Si-0,05%Cu e abaixo dos gráficos, são relativas à liga Al-0,4%Si-0,30%Cu, nos dois casos foram coletadas nas posições (22,5; 37,5; 45)mm em relação à interface M/M.

Da mesma forma, na Figura 8, as fotos micrograficas acima dos gráficos são relacionadas à liga Al-0,8%Si-0,05%Cu e abaixo dos gráficos relacionadas à liga Al-0,8%Si-0,30%Cu.

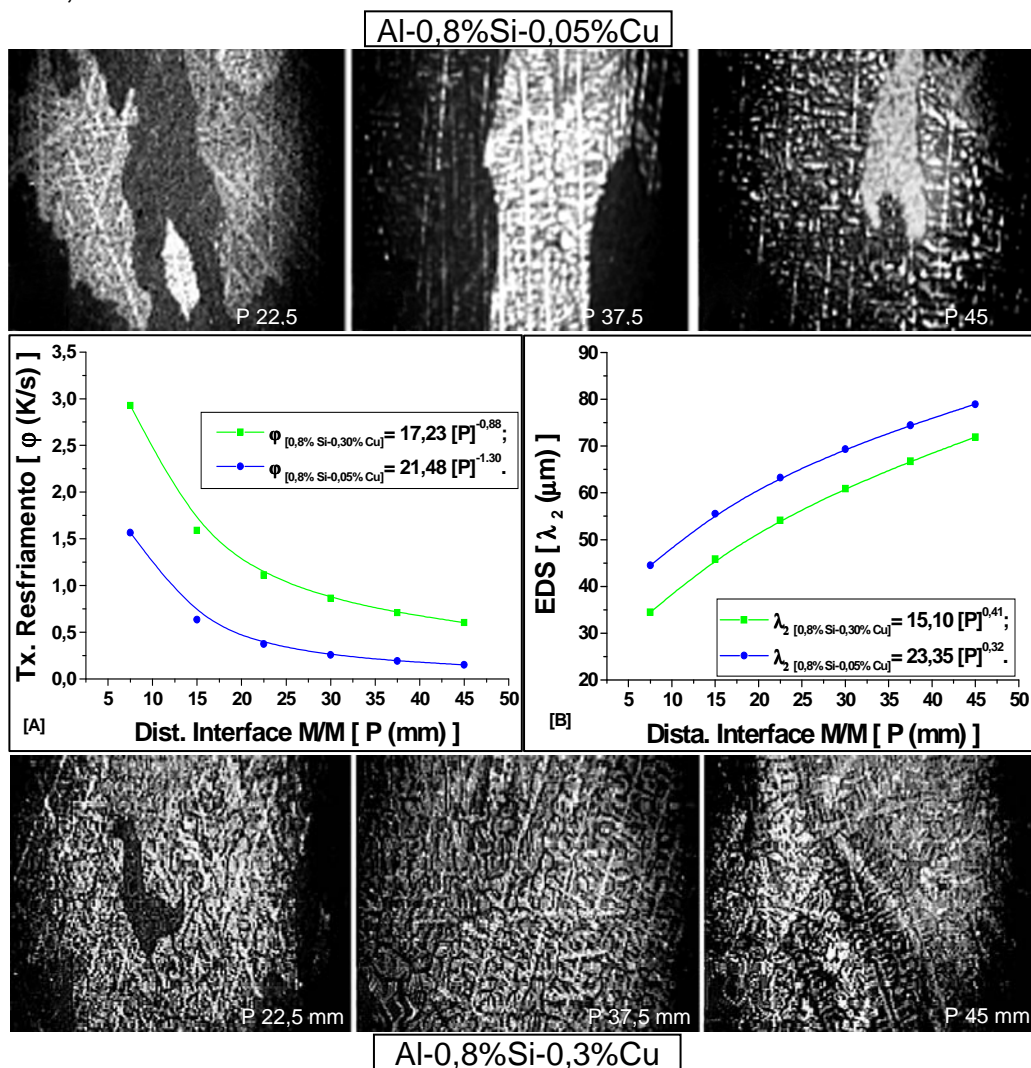


Figura 8. Fotos Micrograficas associadas a (a) taxa de Resfriamento; (b) Espaçamento Dendrítico secundário para as Ligas Al-0,8%Si-[0,05 e 0,3]%Si.

4 CONCLUSÃO

Em decorrência dos diferentes teores de cobre e silício estudados e verificando que os elementos de liga influenciam diretamente na forma de contato do metal com o molde, pode ser concluir que:

As ligas com Al-0,8%Si-0,3%Cu e 0,8%Si-0,05%Cu tendem a apresentar maior fluidez e maior molhabilidade devido ao teor de 0,8%Si. A liga com 0,05%Cu molha ainda melhor o molde por apresentar maior fluidez, o que gera menor taxa de resfriamento e conseqüentemente maior EDS.

As ligas com Al-0,4%Si-0,3%Cu e Al-0,4%Si-0,05%Cu, tendem a apresentar menor fluidez, devido à presença de 0,4%Si, molhando menos o molde que as ligas com 0,8%Si. A liga com 0,3%Cu apresenta menor fluidez, gerando maior taxa de resfriamento e conseqüentemente menor EDS.

REFERÊNCIAS

- 1 SANTOS, R.G.: “Transformações de Fases em materiais metálicos”. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2006.
- 2 SCHIEVENBUSCH, A.; Zimmermann, G.; Mathes, M.: “Comparison of different analysis techniques to determine the cellular and dendritic spacing Materials Science and Engineering”. A, 173 (1), pp.85-88, Dec 1993.
- 3 QUARESMA, J. M. V. – “Correlação entre Condições de Solidificação, Microestrutura e Resistência Mecânica” – Tese de Doutorado - UNICAMP – FEM; 1999.
- 4 OSÓRIO, W. R. R.: “Correlação entre parâmetros da solidificação, microestrutura e propriedades mecânicas de ligas Zn-Al”, Dissertação de Mestrado, Unicamp, Campinas, 2000.
- 5 OKAMOTO T.; Kishitake K.: “Dendritic structure in unidirectionally solidified aluminum, tin, and zinc base binary alloys”. Journal of Crystal Growth, v. 129, p. 137-146, 1975.
- 6 WANG, L.; MAKLOUF, M; APELIAN, D. Aluminum die casting alloys: alloy composition, microstructure, and properties-performance relationships. International Materials Reviews. v.40, n.6, p.221-237, 1995.
- 7 QUARESMA, José Maria do Vale; CHEUNG, Noé; GARCIA, Amauri. The effect of solidification thermal variables on surface quality of Al-Cu ingots, Journal of Alloys and Compounds, 428, 2007, pp.130–138.
- 8 KIM, J. M.; LOPER, D. R. Jr.: A influência da solidificação sobre a fluidez das ligas de alumínio-silício, Fundição e Serviços, n° 75, março, 1999, pp.14-28.
- 9 VERRAN, O.G.: Método alternativo para medição do índice de fluidez de ligas de Al em coquilhas, Fundição e Serviços, n° 134, fevereiro, 2004, pp.70-79.