

INFLUÊNCIA DA PORCENTAGEM DE MAGNÉSIO E DO SUPERAQUECIMENTO NA MICROESTRUTURA DE LIGAS ALUMÍNIO- MAGNÉSIO SOLIDIFICADAS UNIDIRECIONALMENTE*

Eduardo Reis de Oliveria¹
Fernando Tadeu de Araújo Filho²
Diego Ferreira de Lima³
Estefano Aparecido Vieira⁴
José Aniceto Monteiro Gomes⁵
Aline Karla Barbosa da Silva⁶
Claudio Alves de Siqueira Filho⁷

Resumo

O alumínio por suas excelentes características físico químicas é empregado na indústria civil, automotiva, naval e aeroespacial. As características mecânicas dos sistemas solidificados dependem do arranjo microestrutural, mais especificamente do tamanho de grão, espaçamentos celulares ou dendríticos, das heterogeneidades de composição química, do tamanho, forma, distribuição das inclusões e das porosidades. A fusão de metais e, conseqüentemente, a solidificação, são etapas importantes na obtenção dos metais. Neste estudo iremos investigar a solidificação vertical ascendente em regime transiente do sistema Al-Mg. Esta análise investigou experimentalmente o efeito das composições e dos superaquecimentos nas microestruturas solidificadas. Durante a fabricação dos lingotes, foram mapeadas a solidificação de cada liga. As microestruturas obtidas evidenciaram um aspecto essencialmente dendrítico, verificados através da microscopia óptica. É estabelecido no trabalho uma comparação entre os espaçamentos dendríticos primário (EDP ou λ_1) e secundário (EDS ou λ_2) em relação a adição de 1, 3 e 5% de Mg e com patamares de superaquecimento (ΔT_v) variando em 20, 40 e 60°C. A variação do superaquecimento e da composição química dos lingotes teve influência nos espaçamentos dendríticos, verificados nas medições transversais e longitudinais dos lingotes. Para cada posição analisada foram obtidas uma média dos valores e o respectivo intervalo de dispersão.

Palavras-chave: Ligas binárias do sistema Al-Mg; Solidificação unidirecional transiente ascendente; Microestrutura e Superaquecimento.

INFLUENCE OF MAGNESIUM PERCENTAGE AND OVERHEATING IN THE MICROSTRUCTURE OF ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOYS UNIDIRECTIONALLY SOLIDIFIED

Abstract

Aluminum for its excellent physical and chemical characteristics is used in civil, automotive, naval and aerospace industries. The mechanical characteristics of the solidified systems depend on the microstructural arrangement, specifically grain size, cellular or dendritic spacing, heterogeneities of chemical composition, size, shape, distribution of inclusions and porosities. The melting of metal sand, consequently, solidification, are important steps in obtaining the metals. In this study we will investigate the transient ascending vertical solidification of the Al-Mg system. This analysis investigated experimentally the effect of the compositions and the superheats in the solidified microstructures. During the manufacturing of the ingots, the solidification of each alloy was mapped. The obtained microstructures evidenced essentially dendritic aspect, verified by optical microscopy. A comparison between the primary dendritic (EDP or λ_1) and secondary (EDS or λ_2) dendritic spacing in relation to the addition of 1, 3 and 5% Mg and with overheating (ΔT_v) levels varying at 20, 40 and 60°C. The variation of the superheating and the chemical composition of the ingots had influence in the dendritic spacing, verified in the transverse and longitudinal measurements of the ingots. For each position analyzed an average of the values and the respective dispersion interval.

Keywords: Binary alloys of the Al-Mg system; Ascending transient unidirectional solidification; Microstructure and Overheating.

¹ Eng. Metalúrgico, Mestre, Doutorando, PPGEM, Univ. Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, PA, Brasil.

- ² *Graduando em Engenharia de Materiais, Graduando, DEMAT, UFPA, João Pessoa, Paraíba, Brasil.*
- ³ *Engenheiro de Materiais, Mestre, Doutorando, PPGEM, UFPA, João Pessoa, Paraíba, Brasil.*
- ⁴ *Eng. Metalúrgico, Doutor, Professor, PPGEMM, Instituto Federal Do Espírito Santo (IFES), Vitoria, ES, Brasil.*
- ⁵ *Engenheiro Metalúrgico, Mestre, Professor, PPGEMM, IFES, Vitoria, Espírito Santo, Brasil.*
- ⁶ *Engenheira de Alimentos, Mestranda, PPGEM, UFPA, João Pessoa, Paraíba, Brasil.*
- ⁷ *Engenheiro Mecânico, Doutor, Professor, PPGEM, UFPA, João Pessoa, Paraíba, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é o metal não ferroso mais consumido no mundo. Atualmente, pesquisadores vêm trabalhando com objetivo de melhorar as propriedades mecânicas das ligas de alumínio desta forma, novas ligas têm sido desenvolvidas, cada uma com uma combinação apropriada de propriedades adequadas a uma aplicação específica.

No caso das ligas é fato conhecido que a resistência mecânica, dureza, resistência à corrosão, dentre outros aspectos, são dependentes da composição química, dos métodos de fundição, da taxa de solidificação, dos patamares de superaquecimento dos tratamentos térmicos e conseqüentemente da estrutura formada após a solidificação. A obtenção de estruturas de solidificação compatíveis com as propriedades mecânicas exigidas é o objetivo fundamental dos estudos realizados no campo da solidificação de metais e um dos mais importantes da metalurgia física em nossos dias, pois sabe-se que o posterior desempenho das peças obtidas é significativamente influenciado pela estrutura bruta constituída imediatamente após a solidificação. Em relação a microestrutura, os espaçamentos dendríticos primários (EDP ou λ_1) e secundários (EDS ou λ_2) são dados importantes para as características mecânicas do material. A literatura relata que os espaçamentos Microestruturais diminuem com o aumento da velocidade da isoterma *Liquidus* (V_L) e com a taxa de resfriamento (\dot{T}) segundo Hunt [1]. Desta forma, sistemas de solidificação que favoreçam tais condições, ou seja, que promovam a formação de microestruturas refinadas contribuem para a obtenção de produtos de melhor resistência mecânica Cruz [2] e Reis [3]. Estes fatores são prerrogativas para o planejamento do processo de fundição que irá influenciar nas propriedades mecânicas finais do produto. A solidificação dos metais pode ser realizada em regime estacionário ou transitório de calor (Bouchard e Kirkaldy [4]). Os estudos utilizando sistemas de solidificação de ligas com configuração unidirecional em condições transientes de extração de calor estão cada vez mais sendo pesquisados por diversos autores Cheung, [5]; Meneghini e Tomesani, [6], com objetivo de se obter microestruturas desejadas. Existem muitas investigações relacionadas com a transferência de calor sob estas condições que por sua vez mostram a importância de se desenvolver ferramentas que permitam prever a troca térmica em função das variáveis envolvidas nos processos de fundição e solidificação (Spinelli et al, [7]). Nas ligas Al-Mg, o magnésio confere um elevado nível de ductilidade assim como melhora a resistência a corrosão e soldabilidade. Assim, neste trabalho foi realizado um estudo da influência da adição de 1, 3 e 5% de Mg e com superaquecimentos variando nos patamares de 20, 40 e 60°C no sistema binário Al-Mg com objetivo de analisar às microestruturas objetivando os espaçamentos interdendríticos obtidos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Elaboração das ligas

Inicialmente, as ligas foram obtidas a partir da fusão do alumínio a 760°C com adição de 1, 3 e 5% de Magnésio, na tabela 1 é apresentada a composição química dos lingotes obtidos que basicamente são constituídos de alumínio, magnésio e impurezas dentro dos limites estabelecidos para ligas comerciais.

Tabela 1 – Análise Química da composição das ligas Al – Mg (% em massa)

LIGA	Al	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Si	Cr
Al-1%Mg	98,7	0,0521	0,0002	0,0051	1,07	0,0045	0,0350	0,0016
Al-3%Mg	96,7	0,0581	0,0005	0,0064	3,09	0,0063	0,0444	0,0024
Al-5%Mg	94,6	0,0609	0,0008	0,0073	5,06	0,0076	0,0476	0,0036

2.2 Elaboração dos lingotes.

Após a fusão das ligas, estas foram vazadas numa lingoteira bipartida de aço 1020 posicionada dentro de um forno de Solidificação Direcional (SD) ascendente e refrigerado a água conforme mostra esquematicamente a Figura 1. Durante o resfriamento as temperaturas dos lingotes foram monitoradas por 5 termopares do tipo K conectados a um registrador de temperaturas com interface on-line a um computador, onde os dados foram armazenados. Os termopares foram posicionados a 5, 10, 35, 50 e 70 mm da base refrigerada da lingoteira.

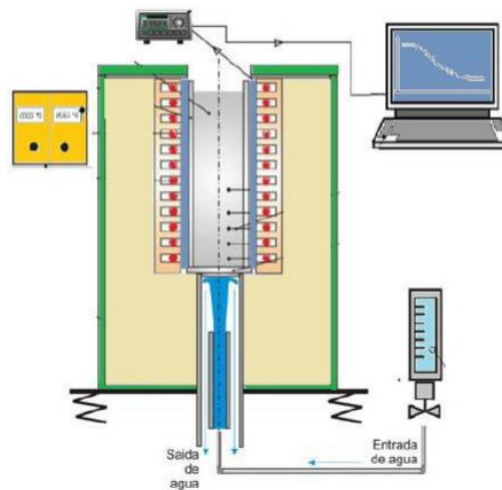


Figura 1: Dispositivo de solidificação unidirecional ascendente. Dantas[8]

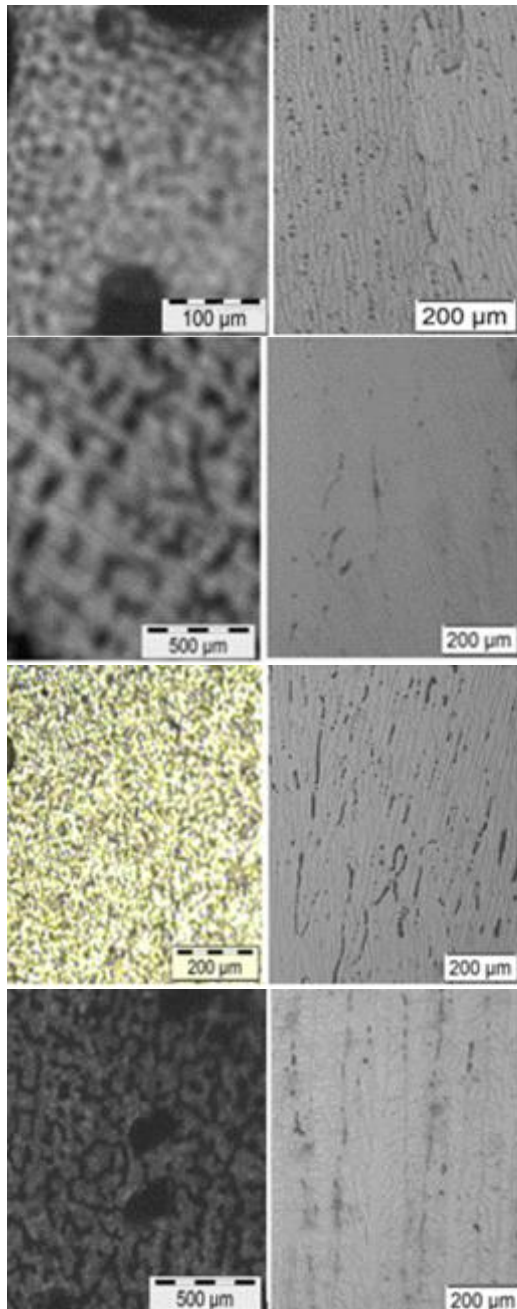
2.4 Análise microestrutural.

Os lingotes obtidos foram seccionados longitudinalmente, sendo uma das partes seccionados nas alturas dos termopares, obtendo assim as amostras para o preparo metalográfico, as amostras foram lixadas na seguinte sequência, (200, 400, 600 e 1200 *mesh*), e posteriormente polidas com pasta de diamante de 1 micron. Após serem polidas receberam ataque químico de uma solução aquosa com a seguinte composição: 10 ml HF, 15 ml HNO₃, e 75 ml H₂O (Solução de Kroll) durante 60 segundos. O resultado do ataque químico consistiu na revelação da microestrutura. As medições do espaçamento dendrítico primário (EDP ou λ_1) foram realizadas sobre as amostras transversais dos lingotes, utilizando o método triângulo (Gunduz e Çadirlli [9]) e os espaçamentos dendríticos secundários (EDP ou λ_2) foram realizados sobre as amostras longitudinais dos lingotes, utilizando o método da intercepção. Foram realizadas, pelo menos, 20 medições para cada posição analisada em seguida obtida a média dos valores e o respectivo intervalo de dispersão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização microestrutural.

As microestruturas resultantes do processo de solidificação apresentaram morfologia dendrítica. As microestruturas foram caracterizadas no sentido transversal (λ_1), espaçamentos dendríticos primário e longitudinal (λ_2), espaçamentos dendríticos secundários à direção da extração de calor, permitindo investigar, a influência da composição química e do superaquecimento nos espaçamentos dendríticos. O resultado da revelação das microestruturas para as posições 5 e 70mm são evidenciadas nas Figuras 2, 3 e 4 para as ligas Al-1%Mg, Al-3%Mg e Al-5%Mg e com superaquecimentos de 20, 40 e 60°C para essas ligas.



$$P = 5\text{mm};$$

$$\dot{T} = 2,81^\circ\text{C/s};$$

$$V_L = 0,48 \text{ mm/s};$$

$$\lambda_1 = 64,18 \mu\text{m};$$

$$\lambda_2 = 19,4 \mu\text{m}.$$

a)

$$P = 70\text{mm};$$

$$\dot{T} = 0,51^\circ\text{C/s};$$

$$V_L = 0,25 \text{ mm/s};$$

$$\lambda_1 = 264,85 \mu\text{m};$$

$$\lambda_2 = 43,12 \mu\text{m}.$$

b)

$$P = 5\text{mm};$$

$$\dot{T} = 2,81^\circ\text{C/s};$$

$$V_L = 0,44 \text{ mm/s};$$

$$\lambda_1 = 65,15 \mu\text{m};$$

$$\lambda_2 = 25,4 \mu\text{m}.$$

c)

$$P = 70\text{mm};$$

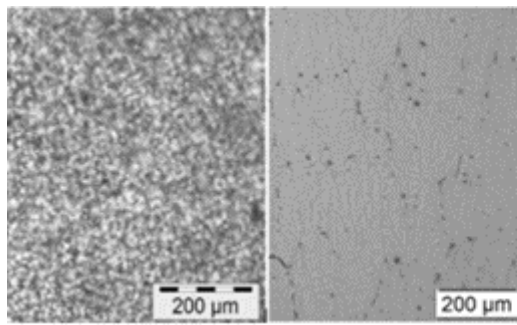
$$\dot{T} = 0,50^\circ\text{C/s};$$

$$V_L = 0,30 \text{ mm/s};$$

$$\lambda_1 = 267,01 \mu\text{m};$$

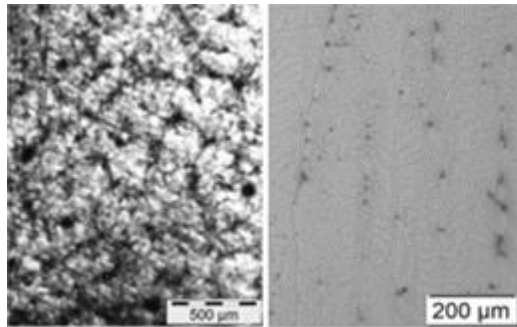
$$\lambda_2 = 44,28 \mu\text{m}.$$

d)



e)

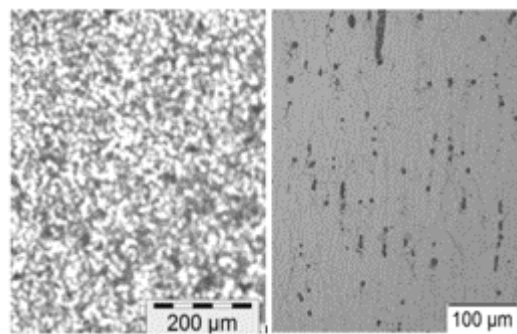
$P = 5\text{mm};$
 $\dot{T} = 2,81^\circ\text{C/s};$
 $V_L = 0,36\text{ mm/s};$
 $\lambda_1 = 66,81\ \mu\text{m};$
 $\lambda_2 = 23,7\ \mu\text{m}.$



f)

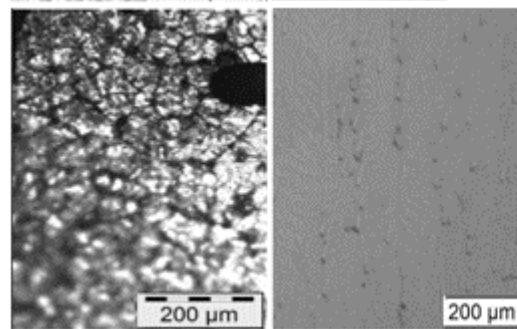
$P = 70\text{mm};$
 $\dot{T} = 0,50^\circ\text{C/s};$
 $V_L = 0,24\text{ mm/s};$
 $\lambda_1 = 269,19\ \mu\text{m};$
 $\lambda_2 = 45,1\ \mu\text{m}.$

Figura 2: Microestruturas dendríticas evidenciando as ramificações primárias (esquerda) e secundárias (direita) da liga Al-1%Mg com: (a) e (b) $\Delta T_V = 20^\circ\text{C}$; (c); (d) $\Delta T_V = 40^\circ\text{C}$; (e) e (f) $\Delta T_V = 60^\circ\text{C}$.



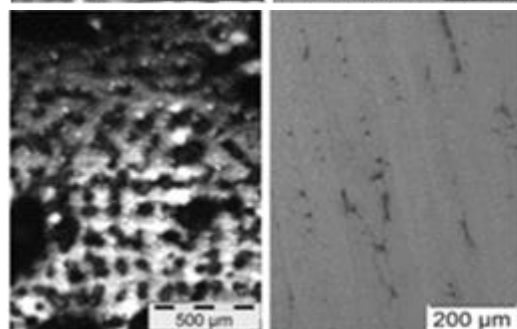
a)

$P = 5\text{mm};$
 $\dot{T} = 2,81^\circ\text{C/s};$
 $V_L = 0,48\text{ mm/s};$
 $\lambda_1 = 60,35\ \mu\text{m};$
 $\lambda_2 = 26,01\ \mu\text{m}.$



b)

$P = 70\text{mm};$
 $\dot{T} = 0,51^\circ\text{C/s};$
 $V_L = 0,25\text{ mm/s};$
 $\lambda_1 = 258,22\ \mu\text{m};$
 $\lambda_2 = 41,91\ \mu\text{m}.$



c)

$P = 5\text{mm};$
 $\dot{T} = 2,81^\circ\text{C/s};$
 $V_L = 0,44\text{ mm/s};$
 $\lambda_1 = 65,51\ \mu\text{m};$
 $\lambda_2 = 27,4\ \mu\text{m}.$

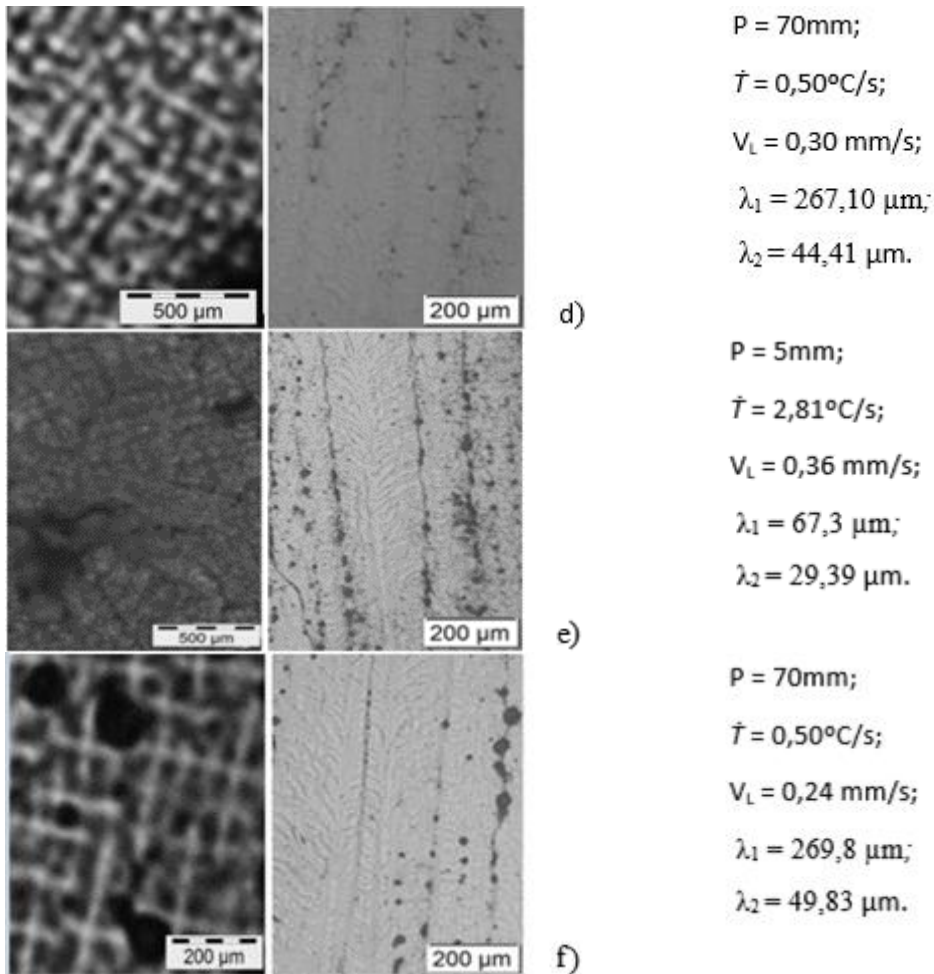
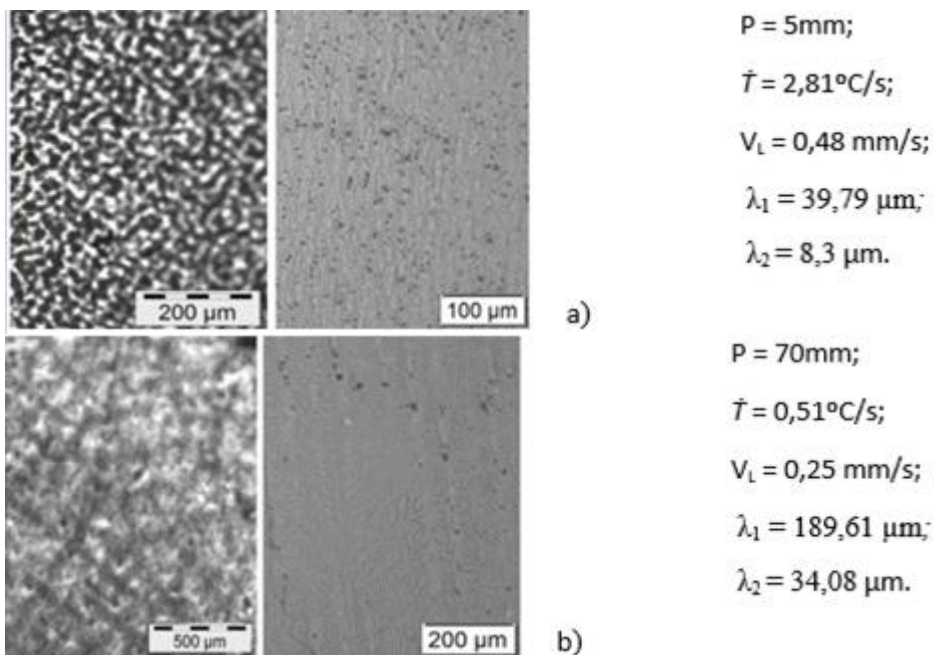


Figura 3: Microestruturas dendríticas evidenciando as ramificações primárias (esquerda) e secundárias (direita) da liga Al-3%Mg com: (a) e (b) $\Delta T_v = 20^\circ\text{C}$; (c); (d) $\Delta T_v = 40^\circ\text{C}$; (e) e (f) $\Delta T_v = 60^\circ\text{C}$,



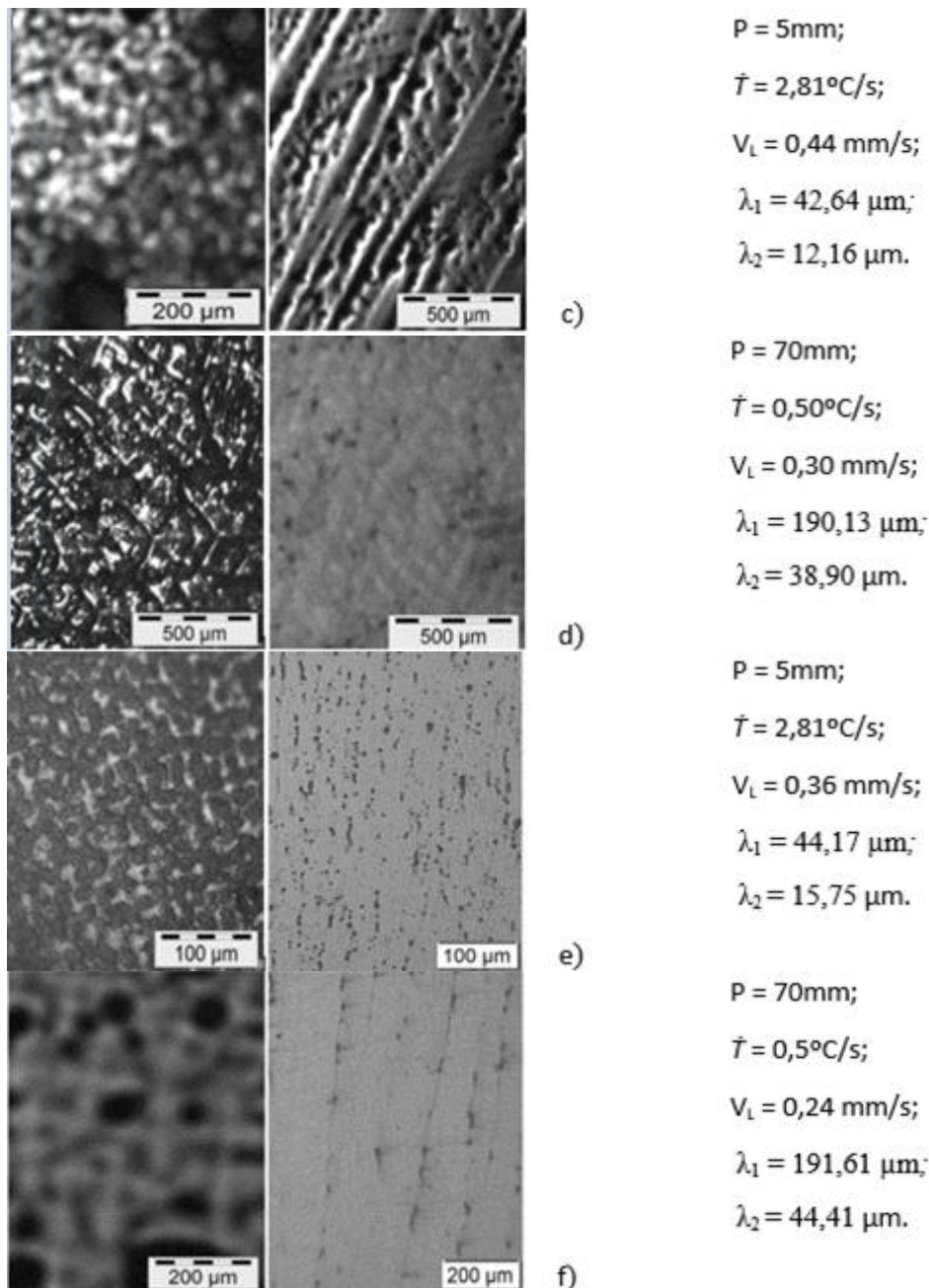


Figura 4: Microestruturas dendríticas evidenciando as ramificações primárias (esquerda) e secundárias (direita) da liga Al-5%Mg com: (a) e (b) $\Delta T_V = 20^\circ\text{C}$; (c); (d) $\Delta T_V = 40^\circ\text{C}$; (e) e (f) $\Delta T_V = 60^\circ\text{C}$.

Em relação ao (EDP ou λ_1) e (EDS ou λ_2), observa-se um crescimento dos espaçamentos dendríticos primários e secundários à medida que aumentou as posições, ou seja, há ocorrência de dendritas mais refinadas próximas à base do lingote ou seja na posição 5mm, e mais grosseira na posição 70 mm. Nota-se na revelação das microestruturas a presença de duas fases: dendrítica (partes claras) e interdendrítica (parte escura). Esse comportamento é típico para experimentos realizados em dispositivo de solidificação Unidirecional refrigerado a água, e essa tendência foi largamente observada em resultados provenientes de experimentos realizados em trabalhos como nos de Cruz [2], Siqueira [10] e Brito [11].

3.2 Crescimento do espaçamento Dendrítico Primário (EDP ou λ_1) em função da posição no Lingote.

As microestruturas reveladas no plano transversal ao fluxo de calor permitiram a caracterização da matriz dendrítica (EDP ou λ_1). As Figuras 5: a, b e c; apresentam os valores médios obtidos pelas medições dos espaçamentos dendríticos primário (λ_1) em função da posição relativa à base refrigerada para as três ligas analisadas do sistema binário Al-Mg, com Mg variando em 1, 3 e 5% de Mg, com superaquecimentos de 20, 40 e 60°C respectivamente. Essas mesmas figuras apresentam as equações experimentais, que correlaciona os EDP em função da posição de cada termopar relativo a interface metal/molde, obtendo-se a lei experimental.

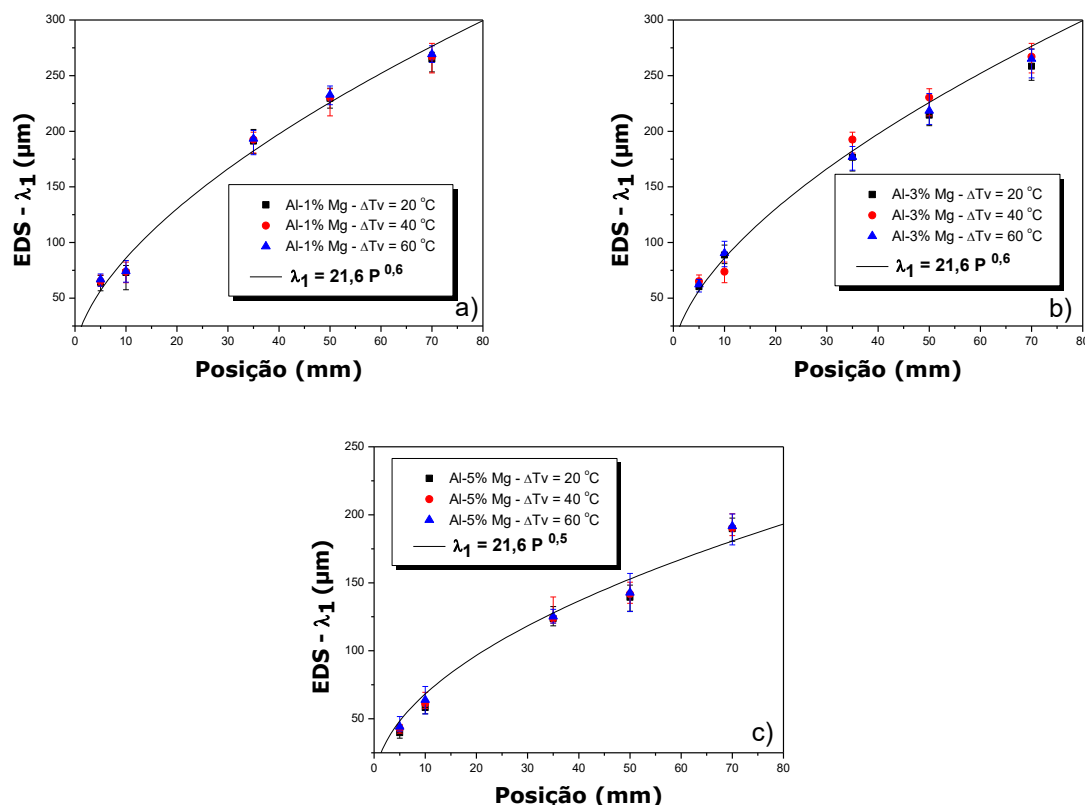


Figura 5: Espaçamento dendrítico secundário em função da posição dos termopares partir da base refrigerada, para as ligas Al-Mg; (a) Al-1%Mg; b) Al-3% Mg e c) Al-5%Mg, com os patamares de superaquecimento em 20, 40 e 60°C respectivamente.

As análises dos dados obtidos para os espaçamentos dendríticos primários indicam que o acréscimo de magnésio tende a diminuir a distância dos espaçamentos primários. Está é uma indicação que o magnésio, atuou como agente nucleante na liga. Em relação a elevação do superaquecimento, não foi observado uma tendência constante para ou λ_1 como pode-se observar nos gráficos.

3.3 Crescimento do espaçamento dendrítico secundário (EDS ou λ_2) em função da posição no Lingote.

Foram realizadas medições dos espaçamentos dendríticos secundários (EDS), em posições específicas partir da base refrigerada. (Os resultados são apresentados

nas Figuras 6: a), b) e c). Essas figuras apresentam também as equações experimentais, que correlacionam a EDS com as posições dos termopares, de onde se obteve as leis experimentais.

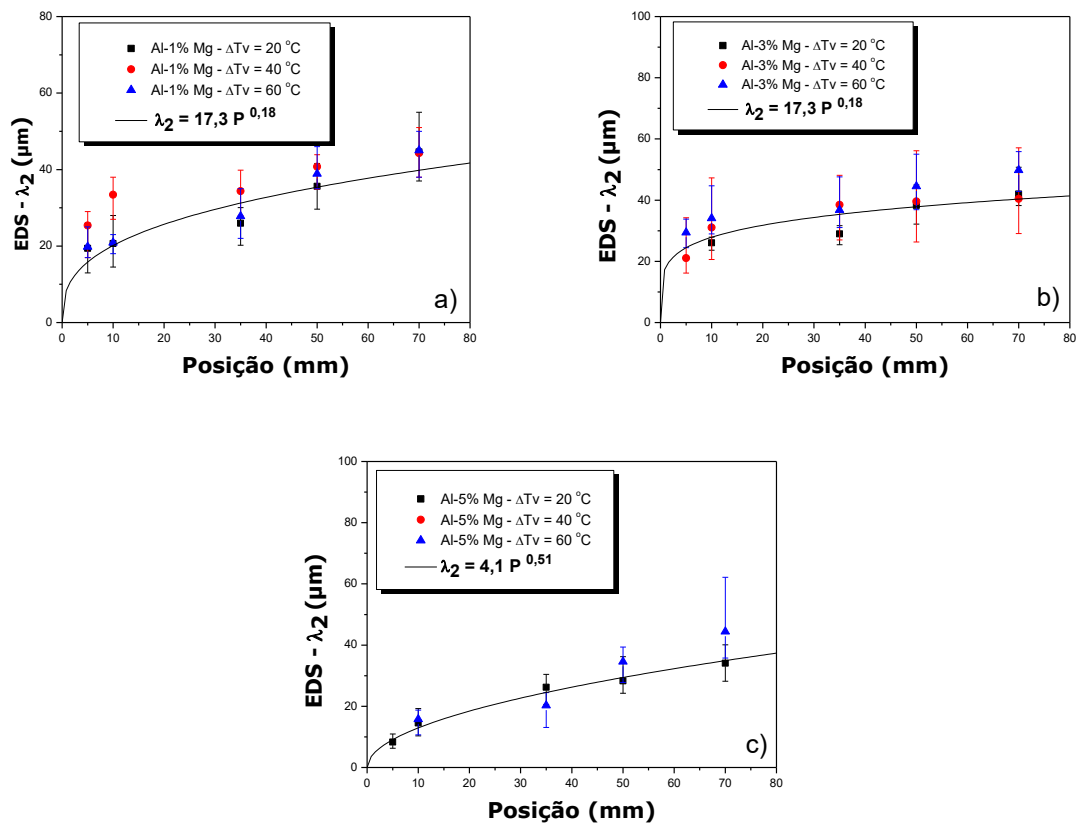


Figura 6: Espaçamento dendrítico secundário em função da posição dos Termopares partir da base refrigerada, para as ligas Al-Mg; (a) Al-1%Mg; b) Al-3% Mg e c) Al-5%Mg, com os patamares de Superaquecimento em 20, 40 e 60°C respectivamente.

A mesma influência foi observada para os espaçamentos dendríticos secundários, ou seja, quanto maior o teor de magnésio nas ligas estudadas, menor foram os espaçamentos dendrítico secundário obtidos. Os superaquecimentos também não revelaram uma tendência constante para os espaçamentos dendríticos secundários nas ligas estudadas.

4. CONCLUSÃO

- Quanto mais distante da interface metal/molde maiores foram os valores de (EDP ou λ_1) e (EDS ou λ_2).
- O aumento do teor de Mg nas ligas causou uma diminuição nos espaçamentos dendríticos primários, sendo a equação EDP em função da Posição para 1 e 3% de Mg expressa por uma única lei experimental para todos superaquecimentos, representada pela equação - $\lambda_1 = 21(P)^{0,8}$. E para $\Delta T_v = 5\%$ pela equação- $\lambda_1 = 21(P)^{0,6}$
- O aumento do teor de Mg nas ligas causou uma diminuição também nos λ_2 , sendo a equação EDS em função da Posição expressa pela mesma equação experimental para 1 e 3% de Mg, dada por: - $\lambda_2 = 17,2(P)^{0,18}$. Para teor de 5% de Mg pela equação - $\lambda_2 = 4,1(P)^{0,61}$;
- Com a diminuição dos EDP e do EDS em função do aumento de magnésio nas ligas, verificou-se que o magnésio agiu como elemento nucleante.

- Em relação a variação no superaquecimento não foi observado uma tendência constante para nos espaçamentos dendríticos primários e secundários para as ligas estudadas. Constatando que o gradiente térmico não é determinante para os espaçamentos dendrítico primário e secundário para o sistema Al-Mg diluído.

REFERÊNCIAS

- [1] HUNT, J.D.; LU, S.Z.: Numerical modeling of cellular array growth: spacing and structure predictions, *Metallurgical Materials Transactions*, v. 27A, n. 3, (1996), 611-623.
- [2] CRUZ, K.A.S., CHEUNG, N., GARCIA, A., "Parâmetros térmicos, macroestrutura e microestrutura na solidificação direcional da liga Al-20%Sn", *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, v. 4, n. 4, pp. 21-26, Abr. 2008
- [3] REIS, B.P., FRANÇA, R.P., SPIM, J.A., et al, "The effects of dendritic arm spacing (as-cast) and aging time (solution heat-treated) of Al-Cu alloy on hardness", *Journal of Alloys and Compounds*, v. 549, pp. 324-335, Feb. 2013.
- [4] BOUCHARD, D., KIRKALDY, J.S., "Prediction of dendrite arm spacing in unsteady-and-steady-state heat flow of unidirectionally solidified binary alloys", *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 28B, pp. 651-663, Aug. 1997
- [5] CHEUNG, N.; FERREIRA, I. L.; PARIONA, M.M.; QUARESMA, J. M. V.; GARCIA, A.: Melt characteristics and solidification growth direction with respect to Gravity affecting the interfacial heat transfer coefficient of chill castings, *Materials and Design*, v. 30, (2009), 3592–3601.
- [6] MENEGHINI, A.; TOMESANI, L.: Chill material and size effects on HTC evolution in sand casting of aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 162–163, (2005), 534-539.
- [7] SPINELLI, J.E., ROSA, D.M., FERREIRA, I.L., et al, "Influence of melt convection on dendritic spacing of down ward unsteady-state directionally solidified Al-Cu alloys", *Materials Science and Engineering A*, v. 383, pp. 271-282, Oct. 2004
- [8] DANTAS, P.P. Caracterização de Ligas Hipoeutéticas de Al-Ni Solidificadas Unidirecionalmente. Brasília, DF. Dissertação. 2014.
- [9] GÜNDÜZ, M., ÇADIRLI, E., "Directional solidification of aluminum-copper alloys", *Materials Science and Engineering A*, v. 327, pp. 167-185, Apr. 2002.
- [10] SIQUEIRA FILHO, C. A., *Influência de Parâmetros Térmicos de Solidificação na Transição Colunar/Equiaxial [Tese de Doutorado]*. Campinas: Universidade de Campinas; 2002.
- [11] BRITO C. C.; LAMEIRA, C.P.T; SANTOS, S. M.; SIQUEIRA, C. A, *Correlação entre Variáveis Térmicas, Microestrutura e Propriedades Mecânicas da liga A356 Solidificada Unidirecionalmente*, VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010.
- [12] BRITO, C. C., *Parâmetros Térmicos e Microestruturais na Solidificação de ligas Al-Mg e Al-Mg-Si e correlação com a Resistência Mecânica e Corrosão [Tese de Doutorado]* Campinas. Universidade de Campinas; 2016.