



Influência da taxa de resfriamento na transição colunar/equiaxial de ligas do sistema Al-Mg

Eduardo Oliveira¹, Estefano Vieira¹, Claudio Siqueira Filho²

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES/ES – CP:29020780, Vitória-ES, e-mail:eduardo@ifes.edu.br; e-mail:estefanovieira@ifes.edu.br.

² Universidade Federal da Paraíba – Centro de Tecnologia – Departamento de Engenharia de Materiais – UFPB/CT/DEMAT, CP: 58051-085, João Pessoa-PB, e-mail: siqueira@ct.ufpb.br

(Recebido em 18/03/2019; revisado em 02/05/2019; aceito em 30/03/2020)
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

O controle dos processos de solidificação de metais e ligas permite maximizar as propriedades mecânicas de um componente mecânico aplicado diretamente em projetos de engenharia. As ligas de Al-Mg são importantes para aplicações de engenharia nas indústrias automotiva, aeronáutica e na fabricação de componentes marítimos. Os parâmetros: taxa de resfriamento e extração de calor, temperatura de vazamento do metal líquido e composição da liga, podem influenciar a macroestrutura final do material. O objetivo deste trabalho é analisar a influência de parâmetros térmicos como: velocidade da isoterma líquida (VL) e taxa de resfriamento (TR) na Transição Colunar/Equiaxial de ligas do sistema Al-Mg, com variação de Mg de 1, 3 e 5%, solidificadas unidirecionalmente. Os resultados mostram que a transição colunar/equiaxial (TCE) ocorre há uma taxa de resfriamento em torno de 0,25 K/s observou-se que a variação da concentração de soluto nas ligas estudadas parece não ter influência significativa.

Palavras-chave: Transição Colunar/Equiaxial, Solidificação Unidirecional, Ligas Al-Mg, Taxa Resfriamento.

Abstract:

The control of the solidification processes of metals and alloys allows to maximize the mechanical properties of a mechanical component directly applied in engineering projects. Al-Mg alloys are important for engineering applications in the automotive, aeronautical and marine component manufacturing industries. The parameters: cooling rate and heat extraction, liquid metal casting temperature and alloy composition, can influence the final macrostructure of the material. The objective of this work is to analyze the influence of thermal parameters such as: liquidus isotherm velocity (VL) and cooling rate (TR) in the Al-Mg alloy columnar/equiaxed Transition, with a Mg variation of 1, 3 and 5 %, unidirectionally solidified. The results show that the columnar/equiaxed transition (TCE) occurs at a cooling rate around 0.25 K/s, it was observed that the variation of the solute concentration in the alloys studied does not seem to have a significant influence.

Keywords: Columnar/Equiaxed Transition, Unidirectional Solidification, Al-Mg Alloys, Cooling Rate.

1. Introdução

Devido às suas excelentes propriedades físico-químicas e alta reciclabilidade, o alumínio tem uma ampla variedade de usos, tornando-o o metal não-ferroso mais amplamente utilizado no mundo. O alumínio fundido dissolve-se com outros metais e, quando sólido, pode conter alguns elementos em solução sólida, o que faz com que o metal fique mais rígido.

O principal objetivo das ligas de alumínio é melhorar suas propriedades, sem prejuízo das demais, desta forma, novas ligas são desenvolvidas, cada uma com a combinação adequada de propriedades para uma aplicação específica. As ligas de Al-Mg são aquelas com a melhor combinação de resistência mecânica, resistência à corrosão e ductilidade

usadas em aplicações onde resistência mecânica razoável com excelente resistência à corrosão é necessária. Ligas de Al-Mg variando entre 3 e 5% são amplamente utilizadas na indústria naval na fabricação de vários componentes de navios nas ligas de Al-Mg, o magnésio confere um alto nível de ductilidade, bem como melhora a resistência à corrosão e soldabilidade.

A obtenção de estruturas de solidificação compatíveis com as propriedades mecânicas exigidas é o objetivo básico dos estudos realizados no campo da solidificação de metais e um dos mais importantes da metalurgia física, já que se sabe que o desempenho posterior das peças obtidas é significativamente influenciado pela macroestrutura constituída imediatamente após a solidificação. Sabe-se que a resistência mecânica, a dureza e a resistência à corrosão

*Email: siqueira@ct.ufpb.br (C. A. Siqueira Filho)

dependem, entre outros aspectos, da composição química, dos processos de fundição, da taxa de solidificação e, conseqüentemente, da macroestrutura formada após a solidificação [4,5].

Em geral, a macroestrutura dos lingotes fundidos consiste em três zonas diferentes: a zona fria, colunar e equiaxial. As três zonas podem não estar presentes ao mesmo tempo, no entanto, quando um produto contém grãos colunares e equiaxiais, a transição entre as duas morfologias ocorre em um intervalo estreito ou em uma determinada posição. A determinação da posição em que ocorre a transição colunar/equiaxial (TCE) é importante para determinar as propriedades mecânicas finais do produto.

A origem de cada um deles tem sido objeto de intensa investigação experimental e teórica. Uma forma estrutural mais complexa é composta por duas estruturais, isto é, por transição colunar/equiaxial (TCE). A previsão dessa transição é de grande interesse na programação de propriedades mecânicas de produtos fundidos. Estudos publicados sugerem que a TCE é influenciado pelos seguintes fatores: sistema e composição da liga, material do molde e temperatura, superaquecimento, coeficiente de transferência de calor

interfacial e fluxo convectivo [1-16]. Várias investigações experimentais foram relatadas na literatura que sugerem que a TCE ocorre quando os parâmetros térmicos de solidificação, como velocidade da interface metal/líquido (V_L), e taxa de resfriamento (TR) atingem valores críticos [7,17].

O objetivo principal deste estudo é analisar a influência de parâmetros térmicos: taxa de crescimento (V_L) e taxa de resfriamento (TR) na transição colunar / equiaxial de ligas diluídas de Al-1%Mg, Al-3%Mg e Al-5%Mg solidificadas unidirecionalmente e em regime transitório de extração de calor.

2. Materiais e Métodos

O dispositivo de solidificação utilizado para realização das sequencias experimentais é esquematicamente mostrado na Figura 1. Ele foi projetado de tal forma que o calor do metal líquido fosse extraído apenas através de um sistema refrigerado a água localizada na base da lingoteira, as paredes laterais do molde permanecem isoladas e sem perda de calor, promovendo assim a solidificação unidirecional ascendente.

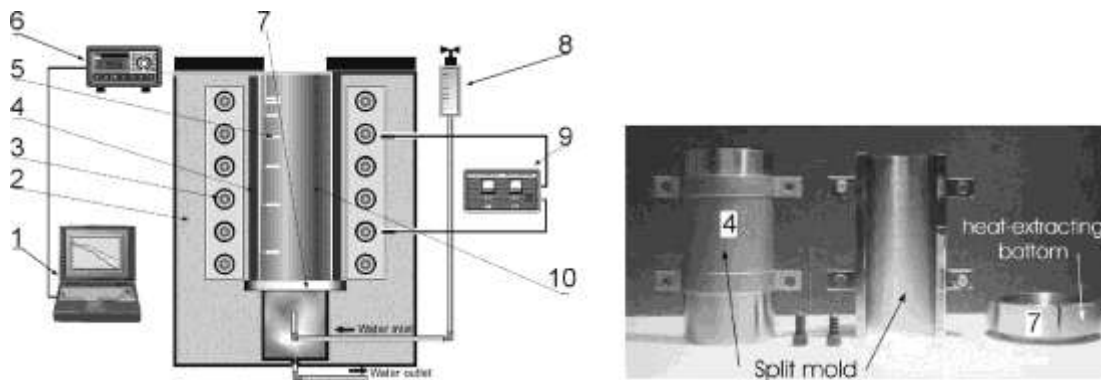


Figura 1: Representação esquemática do dispositivo de solidificação unidirecional ascendente. (1) computador e software para aquisição de dados térmicos, (2) Material refratário, (3) resistências elétricas, (4) Molde metálicos, (5) termopares, (6) Datalogger, (7) Chapa molde, (8) Rotômetro, (9) controlador de temperatura e (10) metal líquido⁵.

Utilizou-se o molde de aço inoxidável AISI 310 com diâmetro interno de 45 mm, altura de 155 mm e espessura de 10 mm e uma chapa molde da base de aço carbono AISI 1020. As superfícies laterais internas foram cobertas com camadas de alumina para evitar a troca de calor lateral, bem como o topo da lingoteira foi isolada por material refratário para evitar perdas de calor para o meio ambiente. A condição de contato térmico na interface metal / molde foi padronizada

com a superfície de extração de calor sendo polida [9,5,8,18]. Os experimentos foram realizados com ligas hipoeutéicas Al-1% Mg, Al-3% Mg e Al-5% Mg.

As composições químicas dos metais utilizados na elaboração das mesmas são apresentadas na Tabela 1, as amostras foram submetidas à análise química no Espectrômetro de Emissão Óptica Modelo Hitachi (FOUNDRY-MASTER Pro).

Tabela 1. Composição das ligas Al – Mg.

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

As ligas foram fundidas em forno tipo mufla (Marca Jung) e em seguida foram vazadas na lingoteira do dispositivo da Figura 1, onde o mesmo possui resistências elétricas laterais divididas em duas zonas de aquecimento para uma completa homogeneização do calor durante a solidificação, quando o superaquecimento desejado é alcançado as resistências são desligadas e em seguida o sistema de refrigeração a água é acionado. Durante o processo de solidificação, a temperatura do fluido refrigerante permaneceu constante em torno de 28 °C. Medições contínuas de temperatura durante todo o processo de solidificação unidirecional foram feitas e monitoradas através de um conjunto de termopares tipo K de aço com diâmetro externo de 1,6 mm e posicionados a 5, 10, 35, 50 e 70 mm da base refrigerada. Os resultados da análise térmica experimental

foram utilizados para determinar o deslocamento da isoterma liquidus, isto é, gráfico da posição da interface metal/ molde como uma função do tempo correspondente à passagem frontal do líquido por cada termopar.

Os lingotes obtidos para cada composição de liga assumidas neste trabalho foram seccionados em plano médio-longitudinal, mecanicamente polidos com papéis abrasivos e atacados quimicamente com uma solução ácida composta por 70 ml de H₂O, 10 ml de HCl, 15 ml de HNO₃ e 5 ml de HF para revelar as macroestruturas como observado na Figura 2. O ataque químico foi realizado para confirmar a direcionalidade da solidificação, a morfologia estrutural e, especialmente, a verificação da transição colunar/equiaxial. A posição da TCE ficou claramente delineada e a distância a partir da chapa molde resfriada foi medida.

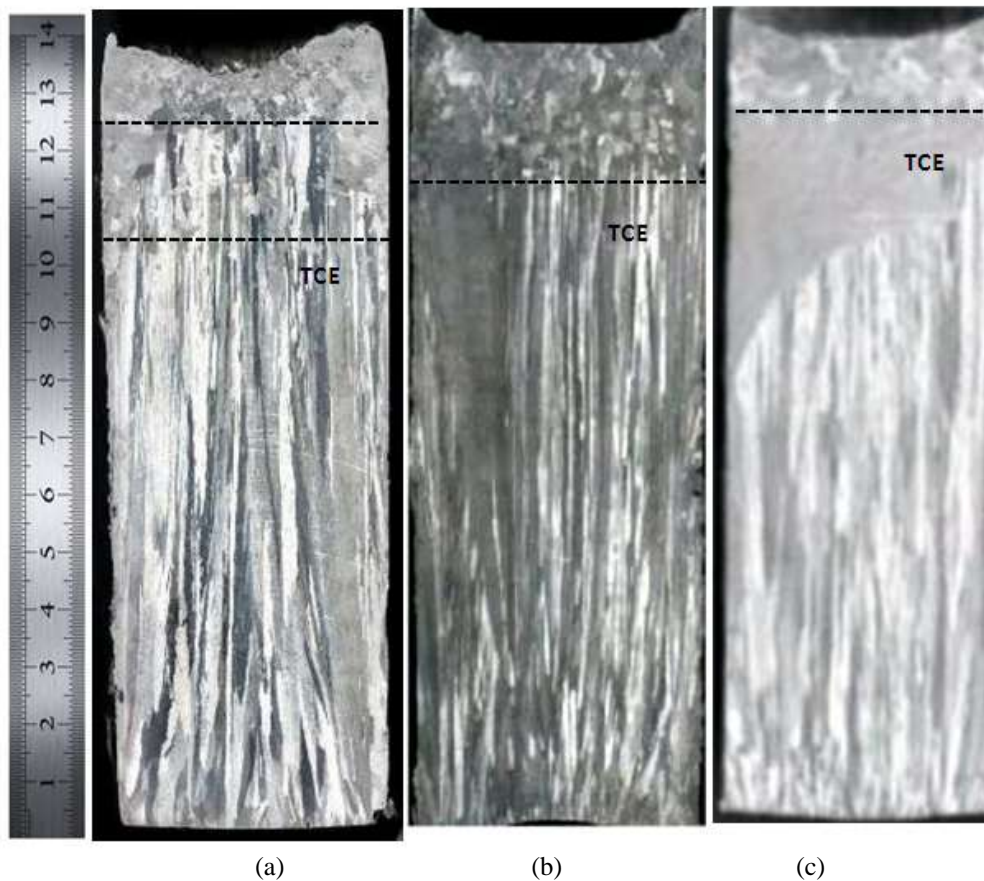


Figura 2. Macroestruturas das ligas: (a) Al-1%Mg, (b) Al-3.%Mg e (c) Al-5%Mg.

3. Resultados e Discussão

As macroestruturas das ligas investigadas, solidificadas unidirecionalmente, segundo condições assumidas neste trabalho são mostradas na Figura 2.

Observa-se que a transição colunar/equiaxial ocorreu, respectivamente, a 115-125, 115 e 125 mm da interface metal/molde, ou seja, o aumento da concentração de soluto nas ligas estudadas não parece significativamente influenciar

a posição experimental desta transição estrutural, o que confirma os resultados obtidos por Gandin (2000) [16] ao analisar a solidificação direcional de ligas de Al-Si por meio de um método teórico-experimental baseado na equação de fluxo de calor unidimensional. A principal característica da TCE apresentada pelas macroestruturas abaixo é que ela ocorre essencialmente em um plano horizontal paralelo à interface metal/molde, no entanto, para a liga Al-1%Mg esta TCE parece ocorrer em uma faixa estreita, isso pode ser

assumido pela ação combinada das condições térmicas e de convecção, causadas pelos movimentos de superaquecimento e soluto (Mg) na frente de solidificação [24].

Curvas de resfriamento experimentais para os termopares localizados em posições específicas nas peças fundidas foram obtidas para as ligas estudadas e são mostradas na Figura 3.

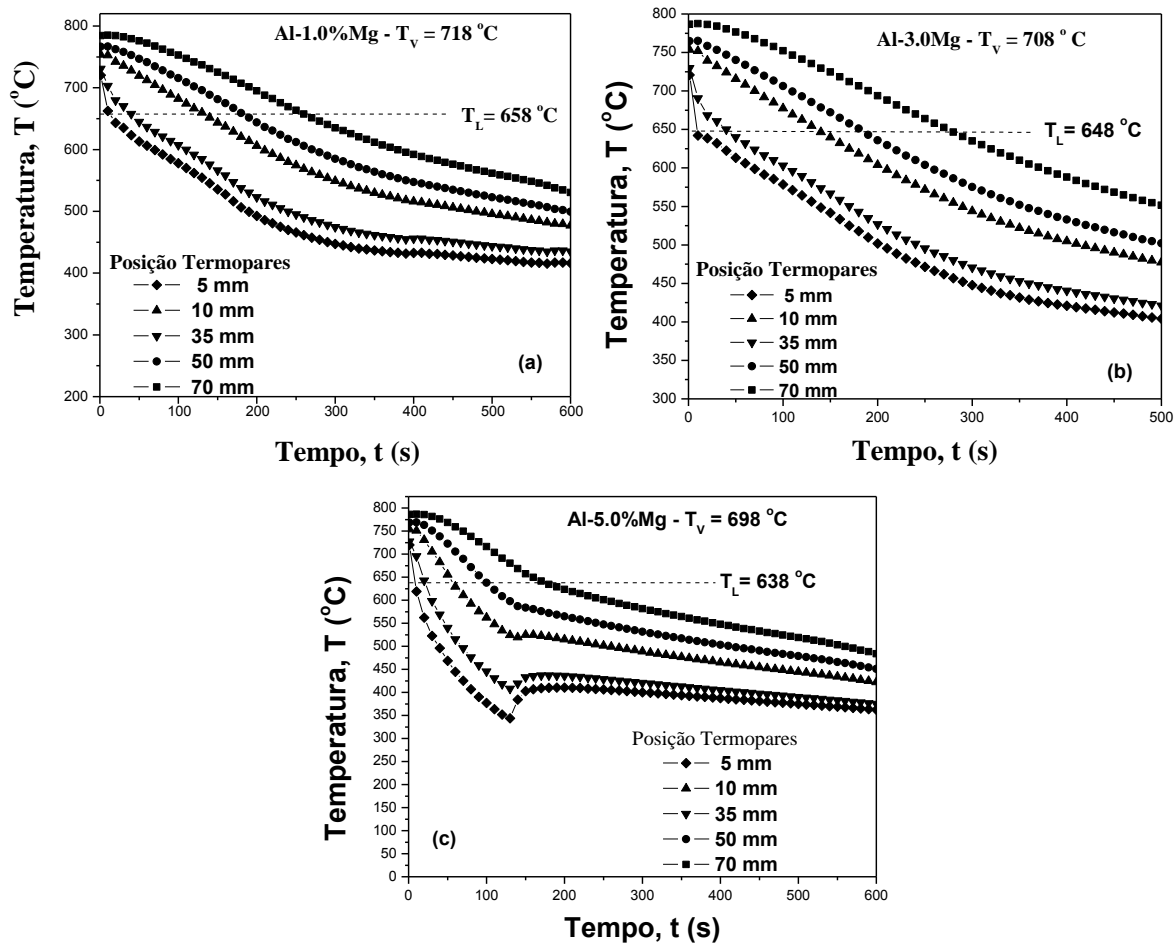


Figura 3. Curvas de resfriamento (a) Al-1%Mg, (b) Al-3%Mg e (c) Al-5%Mg.

Os resultados da análise térmica experimental foram utilizados para calcular o deslocamento da isoterma liquidus da interface metal / molde em função do tempo, que corresponde à passagem da linha liquida através de cada termopar [5,7,24], bem como na determinação das variáveis

térmicas de solidificação VL, GL e TR, tanto em função do tempo para cada posição durante a solidificação.

Assim, com base nesses pontos experimentais das curvas de resfriamento foram gerados gráficos da posição em função do tempo para cada termopar, cujos resultados são apresentados na Figura 4. A derivada dessas funções em

relação ao tempo permitiu que os respectivos valores experimentais fossem obtidos para o velocidade da isoterma liquidus (VL) [9,10,24] Os resultados obtidos para a velocidade são mostrados na Figura 5.

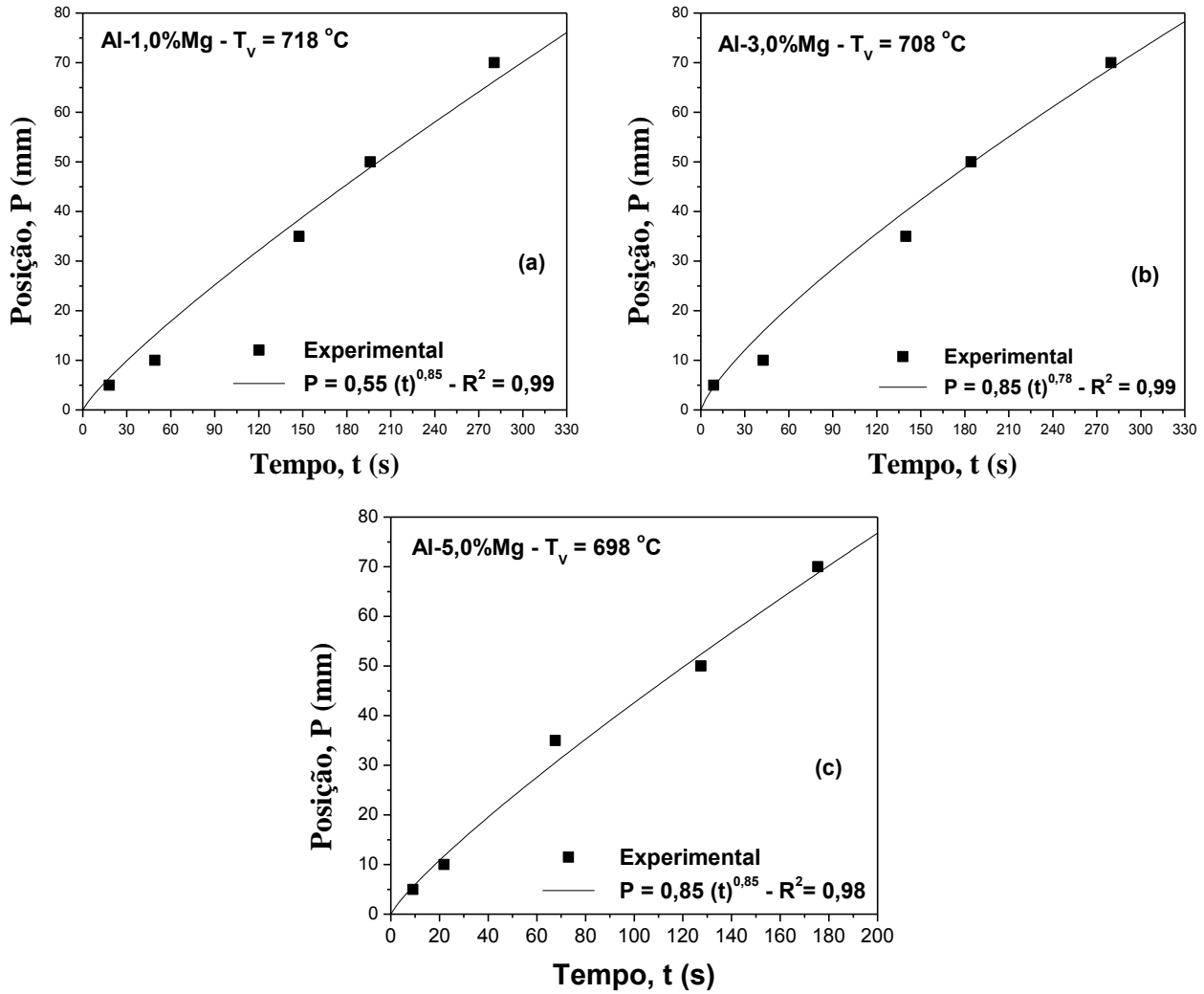


Figura 4. Posição Experimental da isoterma liquidus em função do tempo, (a) Al-1,0%Mg; (b) Al-3,0%Mg e (c) Al-5,0wt.%Mg.

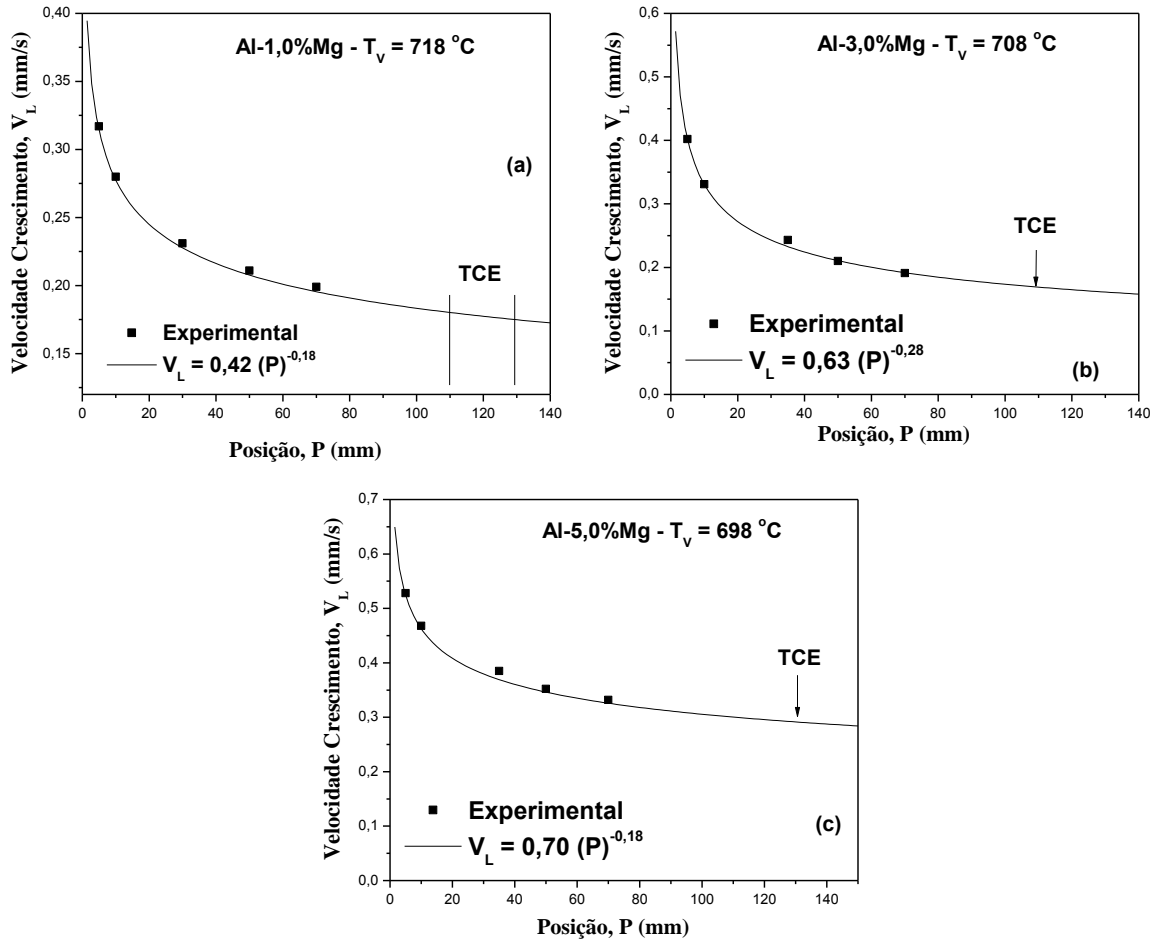


Figura 5 – Velocidade de crescimento em função da posição, (a) Al-1,0%Mg; (b) Al-3,0%Mg e (c) Al-5,0%Mg.

Por outro lado, os valores das taxas de resfriamento (TR) foram determinados considerando os dados experimentais de análise térmica obtida após a passagem da frente líquida por cada termopar. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 6. Finalmente, os gradientes térmicos (GL) para cada liga estudada foram determinados através de relações analíticas entre as respectivas taxas de resfriamento e taxa de crescimento, $TR = GL.VL$ [9]. Os resultados experimentais da posição da transição colunar-equiaxial das ligas investigadas em função dos correspondentes parâmetros térmicos obtidos neste trabalho e em trabalhos da literatura, bem como suas comparações são apresentados na Tabela 2.

Os resultados obtidos na Figura 6 mostram que a TCE ocorreu para taxas de resfriamento entre 0,24 a 0,316 K / s, no entanto, para qualquer uma das três composições de liga

examinadas, o aumento do conteúdo de soluto na liga parece não afetar a posição da TCE.

Observar-se que, para os casos estudados, o comprimento da zona colunar parece não ter sido influenciado pelo aumento do teor de soluto nas ligas estudadas. Existe uma semelhança das variáveis térmicas envolvidas durante a transição colunar-equiaxial, sendo assim possível identificar um único critério para esses casos no que diz respeito à ocorrência de TCE. Isto é baseado nas taxas de resfriamento observadas, que foram propostas por Siqueira [24,25] e Spinelli [26] ao investigar a solidificação direcional de ligas Sn-Pb nos sistemas ascendentes e descendentes verticais.

Assim, os resultados experimentais apresentados na Tabela 2 sugerem que, para o caso de ligas Al-Mg diluídas, a TCE ocorrendo sob condições de extração de calor surge quando uma taxa crítica de resfriamento é alcançada em torno de 0,25 K / s.

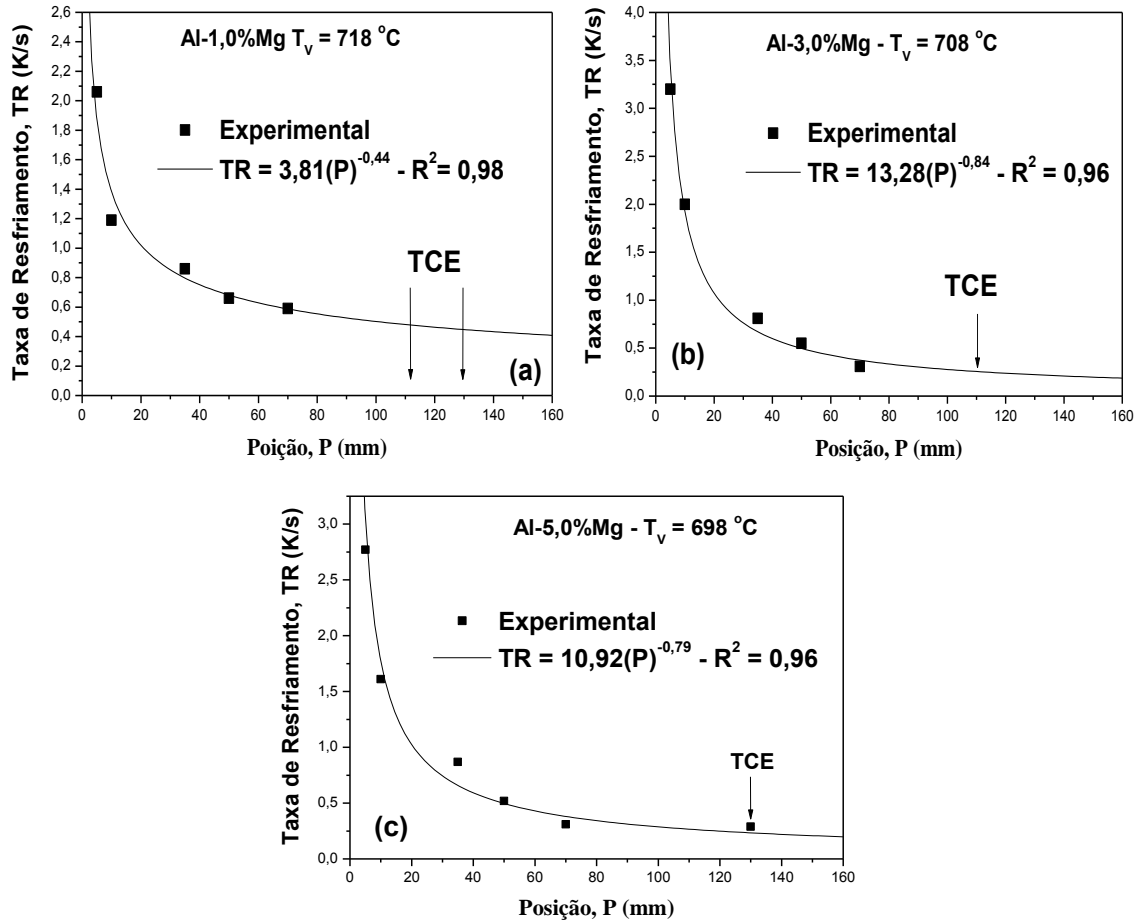


Figura 6 – Taxa de resfriamento em função da posição, (a) Al-1,0%Mg; (b) Al-3,0%Mg e (c) Al-5,0%Mg.

Tabela 2. Parâmetros térmicos de solidificação associados com a posição da TCE obtidos na literatura e comparados neste trabalho para diferentes sistemas e ligas.

Ligas	Parâmetros térmicos de Solidificação (Valores ocorre a TCE)	Solidificação Direcional	Ref.
Al-3wt.%Si	$V_L = 0,50$ mm/s, $G_L = 0,32$ K/mm e $TR = 0,16$ K/s	Ascendente	
Al-7wt.%Si	$V_L = 0,45$ mm/s, $G_L = 0,33$ K/mm e $TR = 0,15$ K/s		
Al-2wt.%Cu	$V_L = 0,48$ mm/s, $G_L = 0,39$ K/mm e $TR = 0,19$ K/s	Ascendente	
Al-5wt.%Cu	$V_L = 0,52$ mm/s, $G_L = 0,37$ K/mm e $TR = 0,17$ K/s		
Al-1wt.%Mg	$V_L = 0,18$ mm/s, $G_L = 1,9$ K/mm e $TR = 0,32$ e $0,34$ K/s	Ascendente	Neste Trabalho
Al-3wt.%Mg	$V_L = 0,17$ mm/s, $G_L = 1,5$ K/mm e $TR = 0,25$ K/s		
Al-5wt.%Mg	$V_L = 0,29$ mm/s, $G_L = 0,81$ K/mm e $TR = 0,24$ K/s		
Sn-Pb	$V_L = 0,189$ mm/s, $G_L = 1,63$ K/mm e $TR = 0,030$ K/s	Descendente	21
Sn-Pb	$V_L = 0,09$ mm/s, $G_L = 0,37$ K/mm e $TR = 0,047$ K/s	Horizontal	18
Al-Si-Cu	$TR = 1,17$ K/s	Ascendente	24
Al-Si	$V_L = 0,19$ a $0,26$ mm/s, $G_L = 0,35$ a $0,64$ K/mm e $TR = 1,68$ a $3,25$ K/s	Horizontal	26

4. Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho permitem obter as seguintes conclusões sobre os parâmetros térmicos de solidificação e a transição colunar-equiaxial observada nas ligas diluídas Al-Mg solidificadas unidirecionalmente:

1. Para as ligas investigadas neste trabalho, o TCE ocorre essencialmente em um plano horizontal paralelo ao molde inferior, com exceção de Al-1%Mg, onde um intervalo pode ser observado;

2. O aumento na concentração de soluto nas ligas estudadas não parece influenciar significativamente a posição experimental da TCE;

3. A convecção em função da variação de soluto na liga estimula a formação de grãos equiaxiais e, conseqüentemente, a ocorrência de TCE, através da quebra de ramos dendríticos dos grãos colunares que são então liberados para a região líquida localizada na frente da interface de solidificação onde encontram condições de crescimento ;

4. A comparação dos resultados obtidos neste trabalho com estudos previamente desenvolvidos em relação à ocorrência de TCE em ligas Al-Si, Al-Sn, Al-Si-Cu e Al-Cu solidificadas unidirecionalmente no sistema vertical ascendente, descendente e horizontal, de acordo com as mesmas condições assumidas neste trabalho, indica que o critério proposto na literatura baseado em uma taxa crítica de resfriamento pode ser aplicado ao presente estudo [12,17,19,22,23].

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba – PPGEM, ao Instituto Federal do Espírito Santo - IFES e a CAPES.

Referências

- [1] Brito, C. C. ; Lameira, C.P.T; Santos, S. M.; Siqueira, C. A.; Correlation between Thermal Variables, Microstructure and Mechanical Properties of A356 Alloy Unidirectionally, VI National Congress of Mechanical Engineering, 2010.
- [2] 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*. 2009; 30: 3592–3601. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.02.025>.
- [3] Gafur, M.A.; Nasrul Haque, M.; Narayan Prabhu, K.; Effect of chill thickness and superheat on casting/chill interfacial heat transfer during solidification of commercially pure aluminum, *Journal of Materials Processing Technology*. 2003; 133: 257-265. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00459-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00459-4).
- [4] Króí, M; Tanski, T.; Snopinski, P.; Tomiczek, B. Structure and properties of aluminium-magnesium casting alloys after heat treatment. *Journal of Thermal Analysis and Calometry*. 2017; 127: 299-308. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5845-4>.
- [5] Rosa, D. M.; Spinelli, J. E.; Osório, W. R.; Garcia, A. Effects of cell size and macrosegregation on the corrosion behavior of a dilute Pb-Sb alloys. *Journal Of Power Sources*. 2006; 162:696-705. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.07.016>.
- [6] Meneghini, A.; Tomesani, L.: Chill material and size effects on HTC evolution in sand casting of aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology*. 2005; 162: 534-539. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.114>.
- [7] Rocha, O. F. L., Siqueira, C., Garcia, A.; Cellular spacings in unsteady-state directionally solidified Sn-Pb alloys. *Materials Science And Engineering A*. 2003; 361: 111-118. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00518-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00518-5).
- [8] Spinelli, J. E.; Cheung, N.; Goular, P.R.; Quaresma, M.V; Garcia, A.; Design of mechanical properties of Al-alloys chill castings based on the metal/mold interfacial heat transfer coefficient, *International Journal of Thermal Sciences*.2012; 51: 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.08.014>.
- [9] Siqueira, C. A. Influence of Thermal Parameters of Solidification on Columnar/ Equiaxed Transition. Doctoral thesis. Unicamp. Campinas, SP. 2002.8.
- [10] Ares, A.E. and Schvezov, C.E., Solidification Parameters During the Columnar-to-Equiaxed Transition in Lead-Tin Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2001; 31A: 1611-1625. <https://doi.org/10.1007/s11661-000-0171-6>.
- [11] Badillo, A. and Beckermann, C., Phase-Field Simulation of the Columnar-to-Equiaxed Transition in Alloy Solidification. *Acta Materialia*. 2016; 54: 2015-2026. <https://doi:10.1088/1742-6596/327/1/012004>.
- [12] Canté, M.V., Cruz, K.S., Spinelli, J.E., Cheung, N. and Garcia, A., Experimental Analysis of the Columnar-to-Equiaxed Transition in Directionally Solidified Al–Ni and Al–Sn Alloys. *Materials Letters*. 2017; 61: 2135-2138. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.08.032>.
- [13] Dong, H.B. and Lee, P.D., Simulation of the Columnar-to-Equiaxed Transition in Directionally Solidified Al–Cu Alloys. *Acta Materialia*. 2005; 53: 659-668. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392014005000015>.
- [14] Flood, S.C. and Hunt, J.D., Columnar and Equiaxed Growth I. A Model of a Columnar Front with a Temperature Dependent Velocity. *Journal of Crystal Growth*. 1987; 82: 543-551.

- [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(87\)90346-0](https://doi.org/10.1016/0022-0248(87)90346-0).
- [15] Flood, S.C. and Hunt, J.D., Columnar and Equiaxed Growth II. Equiaxed Growth Ahead of a Columnar Front. *Journal of Crystal Growth*. 1987; 82: 552-560. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(87\)90347-2](https://doi.org/10.1016/0022-0248(87)90347-2).
- [16] Gandin, Ch.-A., From Constrained to Unconstrained Growth During Directional Solidification, *Acta Materialia*. 2000; 48: 2483-2501. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00070-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00070-7).
- [17] Peres, M.D., Siqueira, C.A. and Garcia, A., Macrostructural and Microstructural Development in Al-Si Alloys Directionally Solidified Under Unsteady-State Conditions. *Journal of Alloys and Compounds*. 2004; 381: 168–181. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.03.107>.
- [18] Silva, J.N., Moutinho, D.J., Moreira, A.L., Ferreira, I.L. and Rocha, O.L., The Columnar to Equiaxed Transition During the Horizontal Directional Solidification of Sn-Pb Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009; 478: 358–366. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.11.026>.
- [19] Siqueira, C.A., Cheung, N. and Garcia, A., Solidification Thermal Parameters Affecting the Columnar-to-Equiaxed Transition. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2002; 33A: 2107-2118. <https://doi.org/10.1007/s11661-002-0042-4>.
- [20] Siqueira, C.A., Cheung, N. and Garcia, A., The Columnar to Equiaxed Transition During Solidification of Sn-Pb Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2003; 351: 126-134. <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672015680237>.
- [21] Spinelli, J.E., Ferreira, I.L. and Garcia, A., Influence of Melt Convection on the Columnar to Equiaxed Transition and Microstructure of Downward Unsteady-State Directionally Solidified Sn-Pb Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2004; 384: 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.04.098>.
- [22] Sturz, L., Drevermann, A., Pickmann, C., and Zimmermann, G., Influence of Grain Refinement on the Columnar-to-Equiaxed Transition in Binary Al Alloys. *Materials Science and Engineering A*. 2005; 413: 379–383. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.199>.
- [23] Ziv, I. and Weinberg, F., The Columnar-to-Equiaxed Transition in Al 3Pct Cu. *Metallurgical Transactions*. 1989; 20B: 731-734. <https://doi.org/10.1007/BF02655931>.
- [24] Rocha O. L, Gomes L. G, Moutinho D. J, Ferreira I. L, Garcia A. The columnar to equiaxed transition in the directional solidification of aluminum based multicomponent alloys. *Revista Escola de Minas*. 2015; 68:85-90. <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672015680237>.
- [25] Osorio, W. R.; Rosa, D. M.; Garcia, A. Microstructural influence of Pb-0.85wt%Sb casting alloy on its electrochemical behavior. *Revista Matéria*. 2008; 13: 246-257. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-70762008000200002>.
- [26] Carvalho DB, Moreira AL, Moutinho DJ, Filho JM, Rocha OL, Spinelli JE. The columnar to equiaxed transition of horizontal unsteady-state directionally solidified Al-Si alloys. *Materials Research*. 2013; 17(2):498-510. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392014005000015>.