

Um Estudo Experimental da Adição de Estanho em Alumínio na Formação da Macro/Microestrutura na Solidificação Unidirecional Ascendente em Condições Transientes de Extração de Calor

Thamara Cristina Santos de Oliveira da Silva, tha_cris@yahoo.com¹

Thiago Alves de Souza, eng.metalthiago@hotmail.com¹

Alexandre Furtado Ferreira, furtado@metal.eeimvr.uff.br¹

Janayna Jasmin Passos, janajp_2005@hotmail.com¹

Wysllan Jefferson Lima Garção, wysllan.lima@ifrrj.edu.br¹

Wemberson Bittencourt Chrisóstimo, wembersonbc@uol.com.br¹

Roberto Carlos Sales, rcsallesvr@gmail.com¹

¹Universidade Federal Fluminense, Rua Doze, Vila Santa Cecília, Volta Redonda, RJ,

Resumo: As ligas Al-Sn são largamente empregadas onde a resistência ao desgaste é um requisito. Para tanto, o desenvolvimento de materiais que atendam a estas necessidades é cada vez maior. O presente trabalho tem o propósito avaliar o efeito da adição de estanho no alumínio na formação da macro/microestrutura formada no processo de solidificação unidirecional em regime transiente de extração de calor. O objetivo é realizar um estudo comparativo da macro e da microestrutura do alumínio puro e da liga com adição de 10% de estanho (em peso). Serão avaliados inicialmente os parâmetros térmicos do alumínio puro e posteriormente com a adição de estanho. Parâmetros tais como tempo de passagem da isoterma liquidus, intervalo de solidificação, velocidade do isoterma, taxa de resfriamento e gradiente térmico serão determinados experimentalmente. Espera-se que a adição do estanho modifique as variáveis térmicas, bem como a macro/microestrutura formada, e, como consequência, alteração nas propriedades do material..

Palavras-chave: alumínio, estanho, solidificação, regime transiente

1. INTRODUÇÃO

A solidificação é um processo que se inicia quando o material no estado líquido atinge condições termodinamicamente favoráveis para sua transformação para o estado sólido, onde existe um gradiente de temperatura entre o material e o meio que absorve o calor. Durante a transformação, uma quantidade de calor é liberada, chamada calor latente, o qual é removido através dos mecanismos de transferência de calor.

É de fundamental importância, a compreensão da relação entre as variáveis de solidificação e a estrutura formada para o desenvolvimento de métodos melhores de solidificação. Este é um complexo processo que envolve calor e transporte de soluto que tem forte influência na formação da macroestrutura (Okayasu e Takeuchi, 2015).

O controle das variáveis térmicas de solidificação é essencial, pois as características do produto final são determinadas por estas variáveis: temperatura de vazamento, velocidade de solidificação (V_L), gradiente térmico a frente da interface sólido/líquido (G_L), taxa de resfriamento (T), que tem influência direta no tamanho de grão, por exemplo, e a concentração e redistribuição de soluto (K_o), que interagem por intermédio do super-resfriamento constitucional. Além disso, o molde desempenha um papel importante, que é dar forma ao produto e extrair calor do metal para o ambiente. (Garcia, 2007, Rocha, 2003).

O alumínio é um metal bastante utilizado em aplicações de engenharia, devido a suas propriedades e características, garantindo sua viabilidade. Ele é um dos três metais mais utilizados para este fim. Este metal possui boa conformabilidade e pode ser produzido em uma série de formas diferentes: trabalhadas ou fundidas. (Davis, 1993).

As ligas Al-Sn são utilizadas em aplicações onde a resistência ao desgaste e a fadiga são itens exigidos, como por exemplo, na fabricação de buchas e mancais. A fabricação destas ligas não é simples e é obtida através de sua fundição. (Pathak e Mohan, 2001). Embora as ligas Al-Sn sejam bastante empregadas em aplicações de engenharia, estudos para seu desenvolvimento ainda são raros (Cruz, 2008). Destacam-se alguns a seguir.

Canté *et.al.* (Canté, 2007) avaliaram a transição colunar-equiaxial durante a solidificação unidirecional das ligas hipoeutéticas Al-Si e Al-Sn e concluíram que existe uma restrita faixa de taxa de resfriamento crítico que define a CET nas ligas de alumínio fundidas.

Cruz et. al. (Cruz, 2008) avaliaram ligas Al-Sn com diferentes teores de Sn a fim de verificar a influência das variáveis térmicas no espaçamento interdendrítico e chegaram a várias conclusões, dentre elas que espaçamento dendrítico primário λ_1 não aumentou com o aumento do teor de soluto conforme era previsto pelo modelo de Okamoto e Kishitake, um dos modelos utilizados para comparação neste estudo. Já o espaçamento dendrítico secundário diminuiu com o aumento do teor de Sn e de maneira geral, o espaçamento dos braços secundários se aproximou do modelo Bouchard-Kirkaldy.

Propõe-se com este trabalho, avaliar o efeito da adição do estanho no alumínio na macroestrutura, microestrutura e espaçamento interdendrítico da liga formada através de um processo de solidificação unidirecional ascendente com extração de calor em regime transiente. A metodologia consiste em avaliar inicialmente os parâmetros do alumínio puro solidificado e, posteriormente, com a adição do estanho. O monitoramento do processo de solidificação será realizado através das curvas de resfriamento geradas. Os parâmetros térmicos, velocidade da isoterma *liquidus*, taxa de resfriamento e gradiente térmico serão determinados experimentalmente.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. O Alumínio

O alumínio e suas ligas é um dos materiais mais versáteis que existe, devido a suas combinações (únicas) de propriedades. São econômicos, dúcteis e leves e possuem excelente condutividade térmica e elétrica. O alumínio possui densidade de 2,7 g/cm³ e boa resistência à corrosão. Como são leves, são bastante vantajosos na construção de aviões e veículos espaciais.

O processamento do alumínio começa com o beneficiamento da bauxita, onde a alumina (Al₂O₃) é retirada que, por sua vez, através do processo de redução, é transformada em alumínio. A produção é constituída por uma série de reações químicas.

O maior desafio das indústrias é melhorar as propriedades mecânicas do alumínio sem prejudicar outras e tais melhorias são feitas através de adição de elementos de liga e/ou tratamentos térmicos. (Davis, 1993).

De acordo com a Aluminium Association (Davis, 1993), essas ligas de alumínio são divididas em duas classes: as trabalháveis e as fundidas, que por sua vez, são divididas em várias famílias, de 1xxx a 9xxx, de acordo com o tratamento térmico realizado, se for o caso, e o elemento de liga.

No caso das ligas para fundição, a representação é feita da seguinte forma: o primeiro dígito representa o principal elemento de liga o segundo e terceiros dígitos se referem ao teor de (alumínio) e o último, a composição das peças fundidas.

As ligas Al-Sn são da classe 8xxx, não trabalháveis. Possuem teor de estanho da ordem de 0,09% em peso (a solubilidade sólida do Sn no Al é baixa, como pode ser visto no diagrama de fases, mostrado na Fig. 1 e pequenas quantidades de cobre e níquel para melhora da sua resistência.

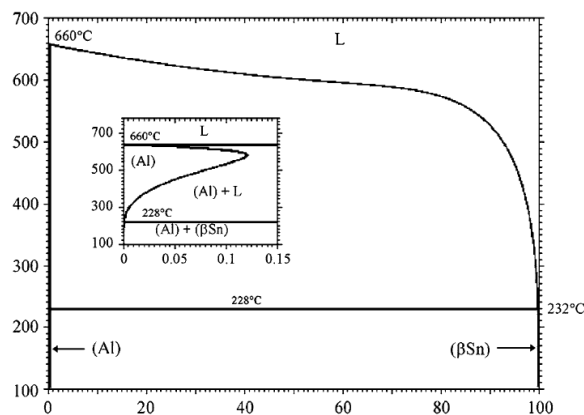


Figura 1 - Diagrama de Fases Al-Sn (ASM Handbooks).

As ligas fundidas Al-Sn são conhecidas por possuírem ótimas características tribológicas e por isso são bastante utilizadas em aplicações de engenharia, especialmente em pistões de motor e cilindros.

Para que estas características sejam atingidas, adicionam-se quantidades de Sn superiores a 0,09% em peso para provocar formação de precipitados na matriz de Alumínio. São estes precipitados os responsáveis pelas características tribológicas da liga, pois estes funcionam como lubrificante sólido (Valizadeh, 2013).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho foi realizado em duas etapas. A primeira somente com o alumínio puro e a segunda, a liga Al-10%Sn. A fusão do material foi realizada através de um forno tipo Mufla, modelo LF7013, fabricado pela empresa Fornos Jung LTDA, instalado no Laboratório de Solidificação da EEIMVR-UFF, conforme mostrado na Fig. 2(a). O processo de lingotamento foi realizado no forno de solidificação direcional vertical ascendente, modelo FSD1200V, fabricado pela

ForteLab, instalado no Laboratório de Solidificação da EEIMVR/UFF (Fig. 2 (b)), utilizando-se uma lingoteira bipartida de aço. O material previamente fundido foi colocado em um cadinho de aço no interior do dispositivo aquecido por resistência elétrica, a uma temperatura próxima da temperatura de fusão. Estabeleceu-se a temperatura de vazamento por 10% da temperatura de fusão. A refrigeração do cadinho ocorre na parte inferior do dispositivo. As temperaturas serão monitoradas através dos termopares localizados nas seguintes posições a partir da base refrigerada: 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 35 mm, 45 mm, 60 mm e 85 mm, que serão conectados através de um cabo em um registrador de dados e as temperaturas registradas automaticamente. O processo de fusão e solidificação da liga serão feitos de maneira análoga.

Para a análise da macroestrutura, o lingote será cortado em sua seção longitudinal, a fim de verificar se a estrutura resultante é coquilhada, equiaxial ou colunar. A amostra será lixada e atacada por uma solução composta de 5 ml HF, 30 ml HNO₃, 60 ml HCl e 5 ml H₂O. A outra metade do lingote será seccionada transversalmente, em cada posição do termopar, para análise da microestrutura. (Júnior, 2017).

A microestrutura do material, para análise do espaçamento interdendrítico será realizado através de microscopia ótica. O tamanho de grão será obtido pela técnica dos interceptos (ASTM).

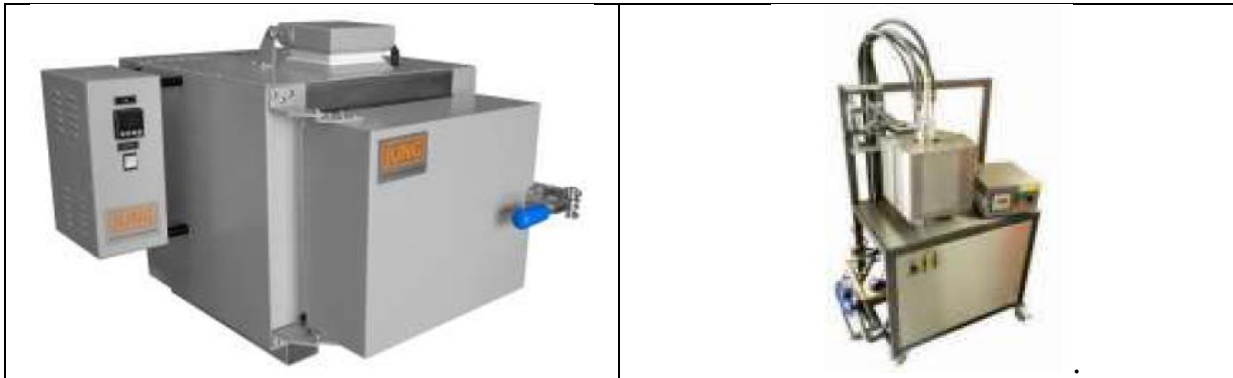


Figura 2 – Equipamentos. (a) Forno tipo Mufla (b) dispositivo de solidificação unidirecional vertical

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 -Curvas de Resfriamento

As Figs. 3 (a) e 3 (b) mostram, respectivamente, a curva de resfriamento do alumínio puro e a liga Al-10%. Pela curva de resfriamento, nota-se que a adição do estanho provocou uma diminuição na temperatura de transformação.

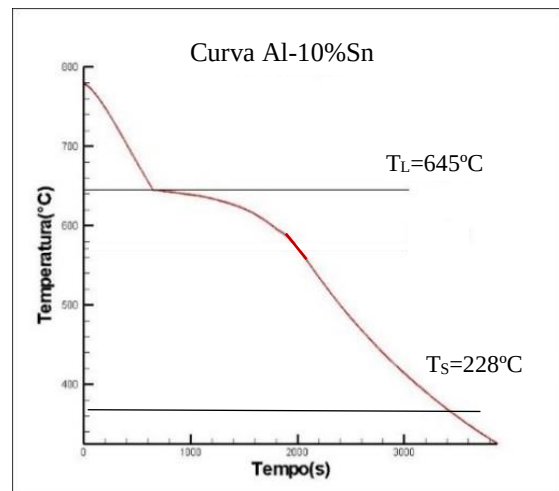
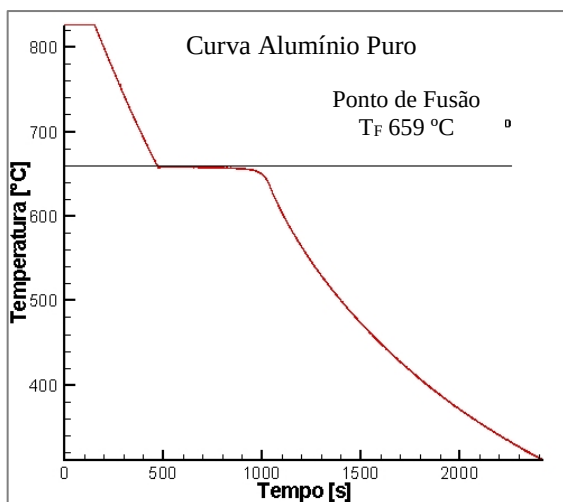


Figura 3 – (a) Curva de resfriamento do alumínio puro; (b) curva de resfriamento da liga Al-10%Sn obtidas experimentalmente.

A Fig.4 mostra a curva de resfriamento obtida através do software ThermoCalc.

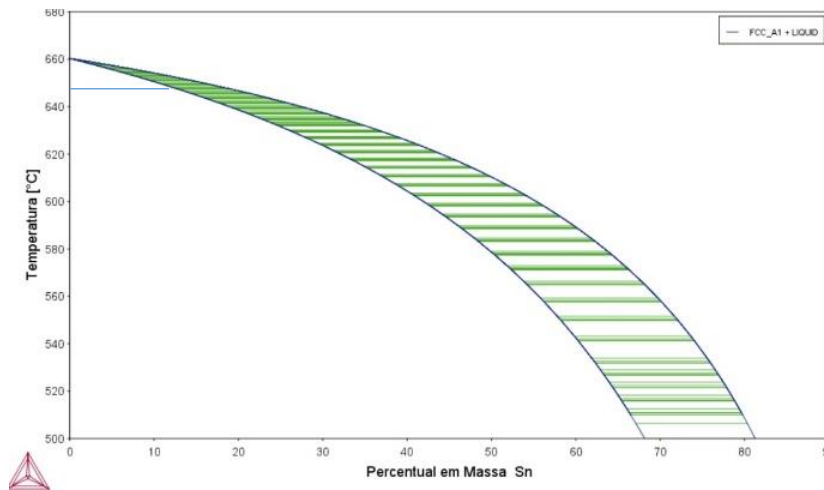


Figura 4 - Curva de resfriamento lento da liga Al-10%Sn obtida através do ThermoCalc.

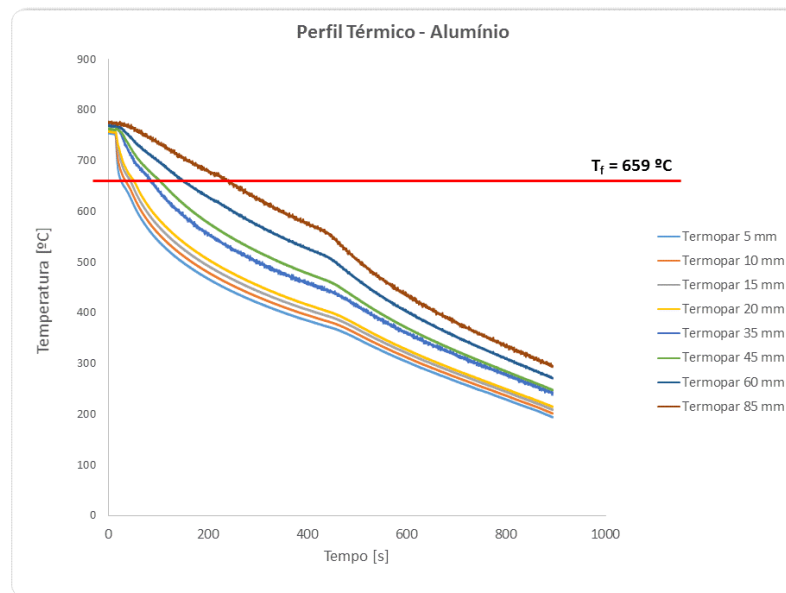


Figura 5 - Curva experimental de resfriamento do alumínio puro. $T_F = 659\text{ °C}$.

A Fig. 5 mostra as curvas de resfriamento do alumínio puro registrada para cada termopar ao longo do lingote. Dessa forma, foi possível realizar o rastreamento da posição da extração de calor. Estes valores foram utilizados para a determinação dos parâmetros térmicos de solidificação: taxa de resfriamento ($\dot{T}$), velocidade de solidificação (V_L) e gradiente térmico (G_L).

4.2 – Variáveis Térmicas

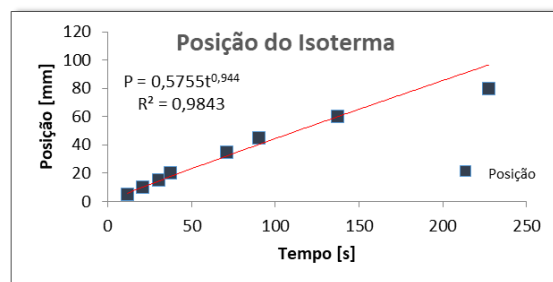


Figura 6 – Posição da Isoterma – Al puro.

A partir da equação da curva da posição, derivando a função $P = f(t)$, ou seja, $V_L = dP/dt$, é possível determinar a velocidade de solidificação, em função do tempo, conforme mostrado na Figura 7(a). As Fig. 7 (b) mostra a velocidade

de solidificação em função da posição do termopar. Estes valores foram extraídos da relação entre a função da posição $P = f(t)$ e a velocidade em função do tempo $V = dP / dt$, respectivamente.

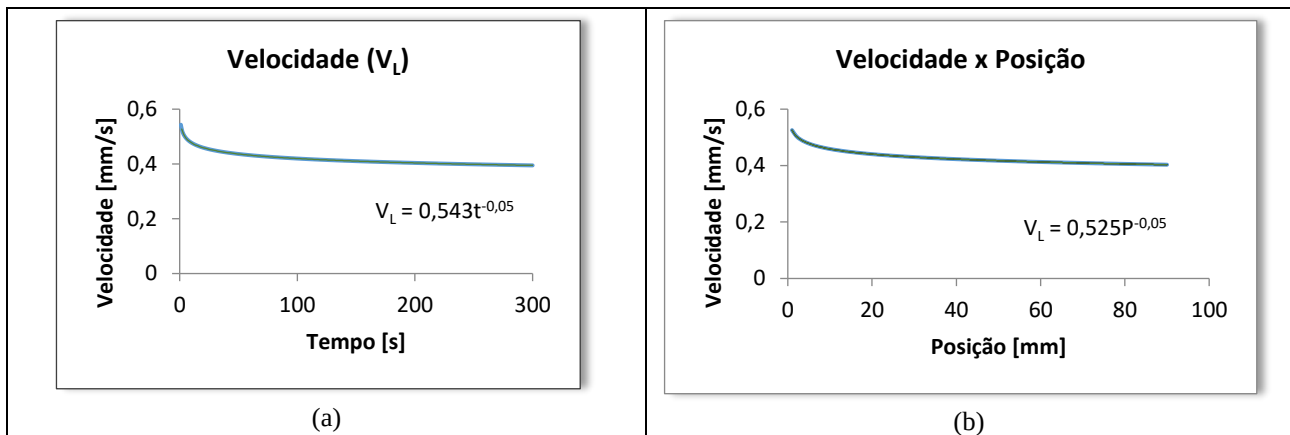


Figura 7 - velocidade do isoterma em função (a) do tempo e (b) da posição do termopar.

A taxa de resfriamento é dada pela razão entre a variação da temperatura e a variação do tempo imediatamente antes e depois da $T_{liquidus}$ durante o processo de solidificação e é dada pela Eq. (1).

$$\dot{T} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (1)$$

O gradiente térmico, que indica a variação da temperatura no isoterma *liquidus* foi obtido através da Eq. 2

$$G_L = \frac{\dot{T}}{V_L} \quad (2)$$

A taxa de resfriamento e o gradiente térmico estão representados nas Figs. 8(a) e 8(b).

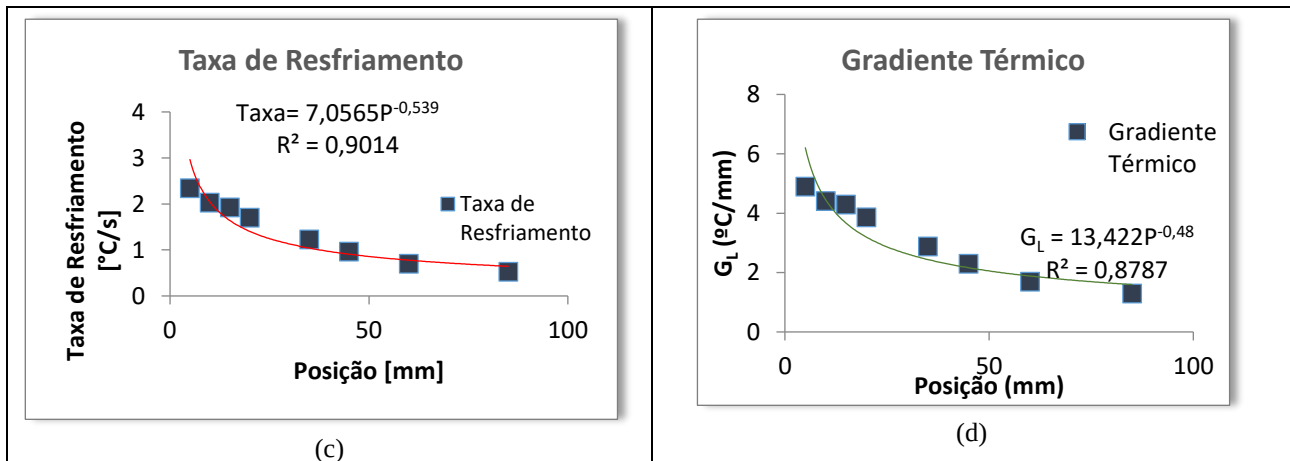


Figura 8 – Determinação das variáveis térmicas: (a) Velocidade deslocamento da interface versus posição do termopar (b) velocidade de deslocamento do isoterma; (c) Taxa de Resfriamento e (d) Gradiente térmico

As Figs 8 (c) e 8(d), respectivamente, mostram que a taxa de resfriamento e o gradiente térmico diminuem à medida que o isoterma *liquidus* avança para posições mais distantes da base refrigerada.

4.3 -Macro e Microestrutura

A macroestrutura do alumínio solidificada está mostrada na Fig. 9 (a) e a microestrutura em cada posição do termopar está ilustrada nas Figs. 9(b) a 9(f). Na região próxima da base refrigerada, a macroestrutura mostra-se coquilhada. Isso se deve à alta taxa de resfriamento que ocorre naquele local, não dando tempo, portanto, para o aumento do grão durante o processo. À medida que o sentido da solidificação avança, nota-se uma estrutura colunar, característica de solidificação unidirecional. Não foi observada a macroestrutura equiaxial. Com relação a microestrutura, o alumínio puro apresenta uma morfologia celular e os grãos na região próxima a base refrigerada apresentam-se mais refinados (Fig. 9(b), enquanto

que na posição mais distante (Fig. 9(i)), os grãos são maiores. Isso é devido a taxa de resfriamento ser menor nesta região, favorecendo o crescimento do grão.

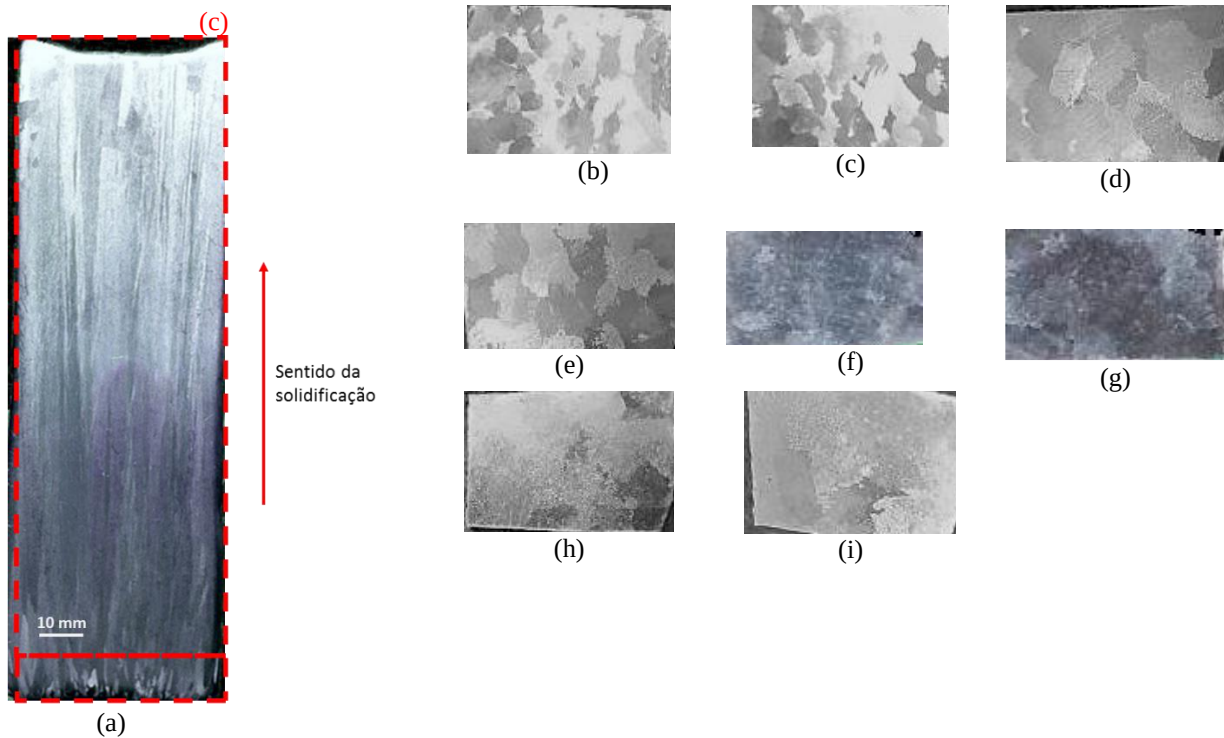


Figura 9 (a) Macroestrutura do alumínio puro. Microestrutura do alumínio puro obtida em diferentes posições dos termopares. (b) P= 5mm; (c) P = 10mm; (d) P = 15 mm; (e) P= 20 mm; (f) 35 mm; (g) 45 mm (h) 60 mm; (i) 85 mm.

O tamanho de grão foi obtido pelo método dos interceptos e os valores e pode ser quantificado pelo emprego da Eq. 3.

$$G = (6,643856 \log_{PL}) - 3,288 \quad (3)$$

A Tab.1 mostra o tamanho do grão para cada posição do termopar. A escala de estimativa do tamanho de grão é inversa, ou seja, quanto menor o valor, maior o tamanho do grão.

Posição (mm)	5	10	15	20	35	45	60	85
G	7,9	7,3	5,9	3,4	2,2	2,1	1,1	1

5. CONCLUSÕES

- Quando o alumínio é submetido ao processo de solidificação unidirecional vertical ascendente, sua macroestrutura é do tipo colunar, cujo crescimento se deu na direção da extração de calor.
- A taxa de resfriamento, gradiente térmico e a velocidade de solidificação são mais elevados próximo a base refrigerada.
- A adição do estanho provocou a diminuição da temperatura líquida.
- Com relação à microestrutura, os grãos são pequenos próximo da base refrigerada e aumentam à medida que se afasta da base.

Espera-se, ainda, com este trabalho:

- Com relação à liga, obter uma macroestrutura com a presença da transição colunar-equiaxial.
- Avaliar a alteração na microestrutura devido a adição de estanho.
- Estabelecer a correlação do espaçamento dendrítico e as variáveis térmicas do alumínio puro e da liga Al-10%Sn;
- Obter dados quantitativos da macro/microestrutura, tanto do alumínio puro solidificado, quanto da liga Al-10%Sn, para avaliar a influência do elemento de liga.

6. REFERÊNCIAS

- ASTM E112-96(2004), 2004, “Standard Test Methods for Determining Average Grain Size”, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Boeira, A.P., “Macrossegregação e Formação de Poros na Solidificação de ligas Al-Cu: Modelagem Numérica e Desenvolvimento Experimental, Tese de Doutorado. UNICAMPFEM-DEMA, Campinas – São Paulo. 2006.
- Canté, M.V., Cruz, K. S., Spinelli, J. E., Cheung, N., Garcia, A., Experimental analysis of the columnar-to-equiaxed transition in directionally solidified Al–Ni and Al–Sn alloys, *Materials Letters* V.61, p. 2135-2138, 2007.
- Cruz, K.S., SPINELLI, J., FERREIRA, I.L., CHEUNG, N., GARCIA, A., Microstructural development in Al–Sn alloys directionally solidified under transient heat flow conditions, *Materials Chemistry and Physics*, p.89-98, 2008.
- Davis, J., *Aluminum and Aluminum Alloys*, (Ed.). ASM Specialty Handbook, OH, EUA, 1993.
- Garcia, A. *Solidificação: Fundamentos e Aplicações*. Editora UNICAMP. Campinas, SP. 2007;
- Gomes, L. G. *Microestrutura Dendrítica, Macrossegregação e Microporosidade na Solidificação de Ligas Ternárias Al-Si-Cu*. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Campinas, Campinas, 2012.
- Júnior, A. A. C., “Parâmetros Térmicos de Solidificação, Microestrutura e Propriedades em Tração de Liga Ternária Al-Sn-Cu”, *Dissertação de Mestrado*, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- Martorano, M. A., “Efeitos de algumas Variáveis de Processo na Microsegregação da Liga Cu-8%Sn”. Tese de Doutorado. Escola Politécnica. Universidade Estadual de São Paulo. São Paulo, 1998.
- Okayasu, M., Takeuchi, S. “Crystallization characteristics of cast aluminum alloys during unidirectional solidification process”, *Materials Science and Engineering A*, V. 633, p. 112-120, 2015;
- Pathak, J.P.; Mohan, S. “Tribological Behavior of Conventional Al-Sn and equivalent Al-Pb alloys under lubrication”. *Bulletin on Materials Science*, v. 26, n. 1, p. 315-20, Jan.-Dec. 2003.
- Rocha, O. L.; Siqueira, C.; Garcia, A.” Cellular Spacings in Unsteady-state directionally solidified Sn-Pb alloys”, *Materials Science and Engineering A*, v.361, p.111 - 118, 2003a;
- SANTANA, A.J., AMORIM, D.S.C., CUNHA, M.A., CÔRTEZ, P.,E.,F., *Automação da Medida de Tamanho de Grão Médio Utilizando Metodologia Estatística para Identificação de Formas*,

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

An Experimental Study of the Addition of Aluminum Tin in the Formation of the Macro / Microstructure in the Unidirectional Upward Solidification in Transient Heat Extraction Conditions

Thamara Cristina Santos de Oliveira da Silva, tha_cris@yahoo.com¹

Thiago Alves de Souza, eng.metalthiago@hotmail.com¹

Alexandre Furtado Ferreira, furtado@metal.eeimvr.uff.br¹

Janayna Jasmin Passos, janajp_2005@hotmail.com¹

Wysllan Jefferson Lima Garção, wysllan.lima@ifrrj.edu.br¹

Wemberson Bittencourt Chrisóstimo, wembersonbc@uol.com.br¹

Roberto Carlos Sales, rcsallesvr@gmail.com¹

¹Universidade Federal Fluminense, Av. dos Trabalhadores,

Abstract. Al-Sn alloys are widely employed where wear resistance is a requirement. To that end, the development of materials that meet these needs is increasing. The present aims to evaluate the effect of tin addition in aluminum in the microstructure formed and the microhardness in the unidirectional solidification process in transient regime of heat extraction. The objective is to perform a comparative study of the macro and microstructure and the hardness of pure aluminum and alloy with that of 10% tin (by weight). The parameters of pure aluminum will be evaluated initially and later with the addition of tin. Parameters such as liquidus isotherm passage time, solidification interval, isotherm velocity, cooling rate and thermal gradient will be determined experimentally. It is expected that the addition of tin modifies the thermal variables, as well as the formed microstructure, and as a consequence, changes in the properties of the material.

Keywords: Aluminium, tin, solidification, transient regime.

