

CRESCIMENTO DENDRÍTICO TERCIÁRIO DA LIGA Al-3%Cu-5,5%Si DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO DIRECIONAL HORIZONTAL TRANSIENTE

M. BRABO¹, R. H. L. KIKUCHI², A. S. BARROS¹, A. L. S. MOREIRA¹ e O. L. ROCHA^{2*}

¹Universidade Federal do Pará - UFPA

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará - IFPA
otavio.rocha@ifpa.edu.br*

Artigo submetido em julho/2015 e aceito em julho/2015

DOI: 10.15628/holos.2015.3204

RESUMO

Neste estudo, objetivando analisar as relações entre os parâmetros térmicos e os espaçamentos dendríticos terciários (λ_3) a liga Al-3%Cu-5,5%Si foi solidificada direcionalmente sob condições de fluxo de calor transitório em um dispositivo de configuração horizontal. Velocidades de deslocamento da isoterma líquida (V_L), taxas de resfriamento (T_R) e tempos locais de solidificação (t_{LS}) foram experimentalmente determinados a partir das curvas de resfriamento registradas em diferentes posições do metal. Amostras transversais foram retiradas de diferentes posições do

lingote e a microestrutura foi caracterizada por meio de microscopia ótica. Os resultados encontrados indicam que a variação de λ_3 pode ser expressa por meio de funções na forma de potência com V_L , T_R e t_{LS} dadas, respectivamente, por $\lambda_3 = 11(V_L)^{-1,1}$, $\lambda_3 = 44(T_R)^{-0,55}$ e $\lambda_3 = 2,2(t_{LS})^{0,55}$. Uma análise comparativa é realizada entre os resultados deste trabalho e aqueles apresentados na literatura para a liga investigada quando solidificada direcionalmente na configuração vertical ascendente.

PALAVRAS-CHAVE: Ligas Al-Cu-Si, Solidificação Direcional, Microestrutura Dendrítica.

TERTIARY DENDRITIC GROWTH OF Al-3wt.%Cu-5.5wt.%Si ALLOY DURING TRANSIENT HORIZONTAL DIRECTIONAL SOLIDIFICATION

ABSTRACT

In this work, in order to analyzing the interconnection among solidification thermal variables and tertiary dendrite arm spacing the Al-3wt.%Cu-5.5wt.%Si alloy was directionally solidified under transient heat flow conditions in a directional solidification device. Tip growth rate (V_L), cooling rate (T_R) and solidification local time (t_{LS}) were experimentally determined by cooling curves recorded during solidification process. Transverse samples were extracted from different positions of the

casting and analyzed by optical microscopy. It was observed that the tertiary spacing variation can be expressed as power law functions of V_L , T_R and t_{LS} given by $\lambda_3 = 11(V_L)^{-1,1}$, $\lambda_3 = 44(T_R)^{-0,55}$ and $\lambda_3 = 2,2(t_{LS})^{0,55}$, respectively. A comparative analysis with other studies published in the literature for the analyzed alloy solidified in upward vertical directional condition was performed.

KEYWORDS: Al-Cu-Si alloys, Directional Solidification, Dendritic Microstructure.

1 INTRODUÇÃO

Ligas de alumínio vêm recebendo enorme destaque em aplicações industriais em virtude da excepcional combinação de propriedades mecânicas, físicas e tribológicas (Rana *et al.*, 2012). Neste contexto, ligas ternárias Al-Cu-Si têm sido amplamente utilizadas em componentes de manufatura nas indústrias automotiva e aeroespacial tendo em vista a excelente fluidez, alta resistência mecânica aliada à elevada relação resistência/peso, além de boa resistência ao desgaste (Ferreira *et al.*, 2010; Gomes, 2012; Moutinho, 2012; Costa *et al.*, 2015). Dentre os processos de fabricação em que essas ligas se submetem, destaca-se como principal o de fundição. Vale destacar que os produtos fundidos, depois de solidificados, podem ser caracterizados por uma imensa variedade de estruturas que possibilitam os mais diversos desempenhos mecânicos aos mesmos. Dessa forma, estabelecer correlações entre estruturas brutas de solidificação e propriedades mecânicas decorrentes é uma tarefa complexa e que se inicia pela análise dos diferentes aspectos estruturais (Garcia, 2007).

No caso de ligas metálicas que apresentam estrutura dendrítica, as propriedades dos produtos fundidos dependem fortemente dos espaçamentos entre braços dendríticos primários (λ_1), secundários (λ_2) e terciários (λ_3). Osório *et al.* (2012) observaram que um arranjo dendrítico terciário bem definido fornece uma mistura eutética interdendrítica mais distribuída homogeneamente exibindo uma melhor proteção contra a corrosão em uma liga Pb-3,5%Sb. Da mesma forma, Spinelli *et al.* (2014) apresentaram um estudo experimental com ligas de soldagem Sn-0,7%Cu-X%Ag (onde X= 1, 2 e 3) onde observa-se que a presença de braços dendríticos terciários promove uma melhor distribuição de compostos intermetálicos de reforço, contribuindo também para o aumento da resistência mecânica. Estes trabalhos comprovam a forte influência destes espaçamentos sobre importantes propriedades dos materiais devido à formação de uma rede dendrítica mais complexa. Convém ressaltar que uma vez os braços dendríticos terciários estejam caracterizados na estrutura dendrítica, as propriedades mecânicas devem ser correlacionadas com os mesmos (Garcia, 2007). A Figura 1 ilustra uma rede dendrítica caracterizada pela presença de braços dendríticos primários e o surgimento de braços terciários a partir de secundários.

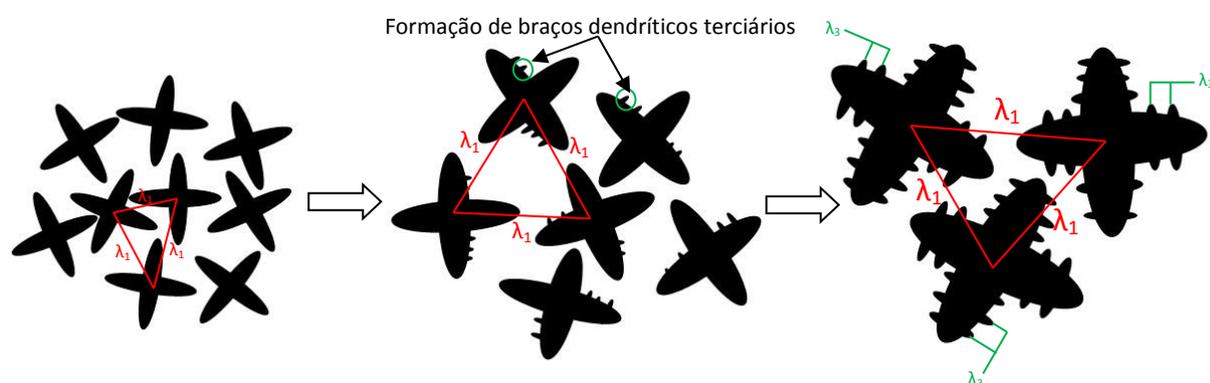


Figura 1: Representação esquemática evidenciando a presença e evolução de braços dendríticos terciários.

Estudos recentes têm analisado a significativa influência das condições térmicas envolvidas na transformação líquido/sólido, tais como velocidade de deslocamento da isoterma liquidus (V_L), tempo local de solidificação (t_{LS}) e taxa de resfriamento (T_R), sobre os aspectos

estruturais para diversas composições de ligas a base de alumínio (Böyük *et al.*, 2012; Çadirli *et al.*, 2013; Vasconcelos *et al.*, 2014; Barros *et al.*, 2015; Bertelli *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2015). No entanto, são raros estudos reportando os espaçamentos dendríticos terciários (λ_3) em função das variáveis térmicas durante a solidificação. Gurgel (1993), a partir de experimentos realizados com ligas hipoeutéticas Al-Si em um sistema de solidificação Bridgman (Garcia 2007), determinou uma lei experimental de variação de λ_3 em função do tempo local de solidificação para ligas, dada por $\lambda_3 = 10(t_{SL})^{1/3}$. Sá *et al.*(2004) observaram que os expoentes -1,1 e -0,55 caracterizam as leis experimentais de λ_3 em função de V_L e T_R para ligas hipoeutéticas Al-Cu, solidificadas direcionalmente na configuração vertical ascendente em regime transiente de extração de calor. Rosa *et al.* (2008) avaliaram ligas hipoeutéticas Al-Cu quando solidificadas na configuração vertical descendente e obtiveram o mesmo valor de lei de potência de λ_3 em função de T_R proposto por Sá *et al.*(2004), mas com uma tendência de redução de cerca de 2-3 vezes de λ_3 . Expressões de λ_3 em função de V_L e T_R para ligas multicomponentes (Al-Cu-Si) foram apresentadas pela primeira vez por Gomes (2012) e Moutinho (2012), ambos utilizando dispositivos de solidificação direcional vertical ascendente. Moutinho (2012) comparou ainda seus resultados experimentais de λ_3 com aqueles obtidos por Sá *et al.*(2004) para ligas Al-Cu, observando que a relação $\lambda_{3(\text{liga binária})} / \lambda_{3(\text{liga ternária})}$ é igual a 1,21.

Observa-se que a maioria dos estudos sobre solidificação direcional tem se dedicado a investigar a formação de estruturas dendríticas considerando dispositivos com as configurações verticais ascendente e descendente. Recentemente, pesquisas têm sido conduzidas visando a verificação dos efeitos do vetor gravidade em relação à formação dos espaçamentos dendríticos por meio de experimentos realizados na configuração horizontal (Nogueira *et al.*, 2012; Carvalho *et al.*, 2013; Carvalho *et al.*, 2014). Uma característica interessante do sistema horizontal durante a mudança de fase é o gradiente de concentração de soluto bem como os efeitos de densidade na direção vertical, pois o líquido enriquecido de soluto sempre decanta ao passo que o solvente tende a emergir devido às forças de flutuabilidade. Além disso, devido os efeitos impostos pela convecção termossolutal, sempre ocorrerá um gradiente de temperatura na direção vertical (Carvalho *et al.*, 2013; Carvalho *et al.*, 2014).

É importante ressaltar que pesquisas relacionadas à evolução microestrutural, utilizando sistemas de solidificação horizontal ainda são bastante raras na literatura (Atwood e Lee, 2003; Voller, 1998; Costa *et al.*, 2015), e destacar a inexistência de correlações entre as variáveis térmicas de solidificação e o comportamento de λ_3 para ligas ternárias nesta configuração. Considerando o exposto, o principal objetivo deste estudo é analisar a correlação entre os parâmetros térmicos e os espaçamentos dendríticos terciários (λ_3) da liga Al-3%Cu-5,5%Si quando solidificada direcionalmente em um sistema de configuração horizontal refrigerado a água, sob condições transientes de fluxo de calor. Um estudo comparativo entre os resultados obtidos neste trabalho e valores apresentados na literatura para λ_3 da liga estudada, quando solidificada direcionalmente no sistema vertical ascendente sob as mesmas condições assumidas neste trabalho, também é realizado.

2 METODOLOGIA

O dispositivo de solidificação utilizado neste estudo é apresentado na Figura 2. Este dispositivo foi projetado de tal modo que a extração de calor fosse realizada somente por uma

das paredes laterais (refrigerada a água) da lingoteira promovendo a solidificação direcional horizontal. As resistências elétricas do forno tiveram sua temperatura controlada a fim de permitir a obtenção dos níveis de superaquecimentos desejados no metal líquido. A coquilha de aço inox utilizada apresenta 160 mm de comprimento, 60 mm de largura, 60 mm de altura e 3 mm de espessura. Suas superfícies laterais internas foram revestidas com camadas de alumina e a parte superior da mesma foi isolada com material cerâmico refratário a fim de evitar perdas de calor permitindo, dessa forma, a direcionalidade desejada para o fluxo de calor.

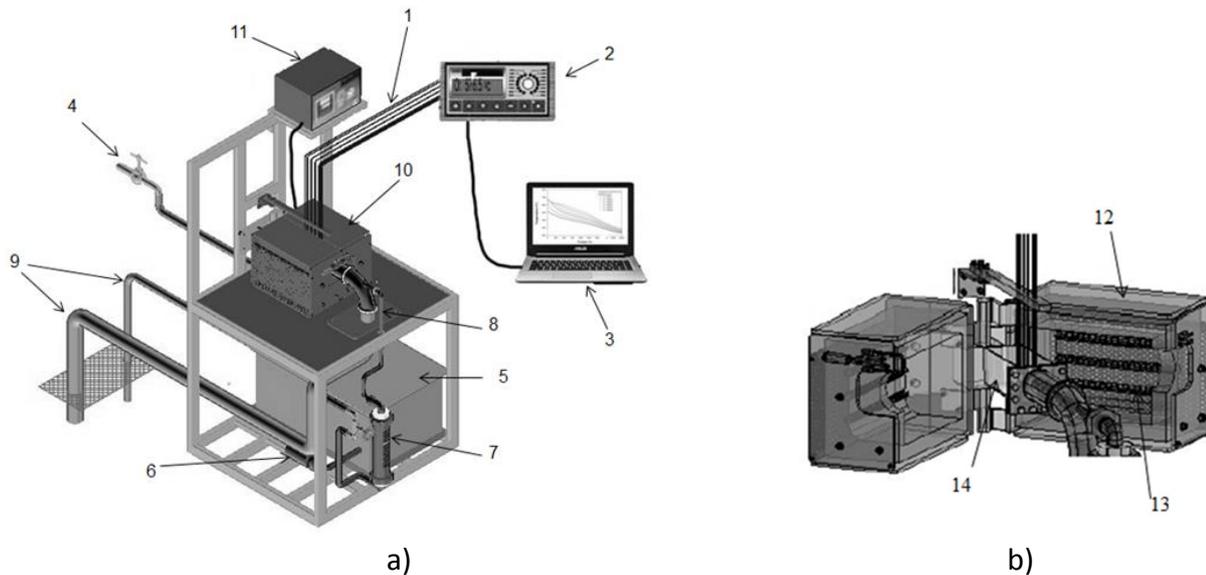


Figura 2: Representação esquemática do dispositivo de solidificação direcional horizontal: 1- termopares , 2- FieldLogger, 3- computador de aquisição de dados, 4- alimentação de água, 5- recipiente de água, 6- bomba de água, 7- rotâmetro, 8- entrada de água, 9- saída de água, 10- dispositivo de solidificação direcional, 11- controlador de temperatura ; b) visão da parte interna do dispositivo de solidificação: 12- isolante térmico cerâmico, 13- aquecedores elétricos, 14- lingoteira retangular (de aço inoxidável).

As temperaturas no metal fundido foram monitoradas durante a solidificação por termopares do tipo K (Chromel-Alumel) posicionados a 5, 15, 30, 50, 70 e 90 mm em relação à câmara de refrigeração. Estes termopares foram conectados a um registrador de dados interligado a um computador para acompanhar, registrar e armazenar os dados obtidos durante o processo de solidificação, além de possibilitar um monitoramento on-line dos dados medidos. As composições químicas dos metais utilizados na preparação da liga analisada são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química (% em peso) dos metais utilizados na preparação da liga Al-5,5%Si-3%Cu.

Metal	Al	Fe	Ni	Si	Ca	Ti	Zn	Ga	Cu
Al	99,7	0,176	0,006	0,062	-	0,009	0,007	0,012	-
Si	0,1094	0,3164	0,0102	99,596	0,0214	0,0455	-	-	-
Cu	0,0951	-	-	-	-	-	-	-	99,859

O processo de solidificação consistiu no vazamento da liga Al-5,5%Si-3%Cu no interior da coquilha, localizada a parte superior do dispositivo, devidamente aquecida por resistências elétricas. Attingido o nível de superaquecimento de 10% acima da temperatura liquidus, o qual normalmente representa o grau de superaquecimento adotado na indústria de fundição, as resistências elétricas do dispositivo foram desligadas, o sistema de resfriamento foi acionado e os jatos do fluido refrigerante induziram uma extração de calor longitudinal.

Para caracterização e quantificação da estrutura dendrítica foram retirados transversalmente ao longo do comprimento longitudinal do lingote nove corpos de prova, nas posições correspondentes a 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20 e 30 mm em relação à interface metal/molde. As amostras foram lixadas e polidas com pasta de diamante de 6 μm até 1 μm . Em seguida, foi realizado o ataque químico com solução de 5% NaOH em água durante 15 segundos para revelar a microestrutura. As imagens foram obtidas em um microscópio ótico Olympus modelo BX51, sendo as medições de λ_3 posteriormente realizadas utilizando-se o software Image Tool (IT). O método utilizado para quantificar os valores desses espaçamentos foi descrito anteriormente na literatura (Sá *et al.*, 2004; Rosa *et al.*, 2008; Dias *et al.*, 2015). Neste método, considera-se o valor de λ_3 pela média das distâncias entre os braços adjacentes ao longo do comprimento “n” sobre a seção transversal do lingote, aproximadamente no mesmo sentido da ramificação dendrítica primária sendo que, ao final, são obtidos a média dos valores e o intervalo de dispersão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3a são apresentadas as curvas de resfriamento para os seis termopares inseridos no metal nas posições anteriormente descritas em metodologia. Estas curvas foram utilizadas para calcular a posição da isoterma *liquidus* em função do tempo. A função $P = f(t)$ foi definida experimentalmente pela interseção da reta equivalente à temperatura *liquidus* (T_L) da liga com o perfil térmico correspondente à posição de cada termopar. Os resultados dos pares ordenados (P,t) obtidos a partir do procedimento em questão possibilitam que seja plotado um gráfico experimental da posição da isoterma *liquidus* com o tempo, conforme mostrado na Figura 3b.

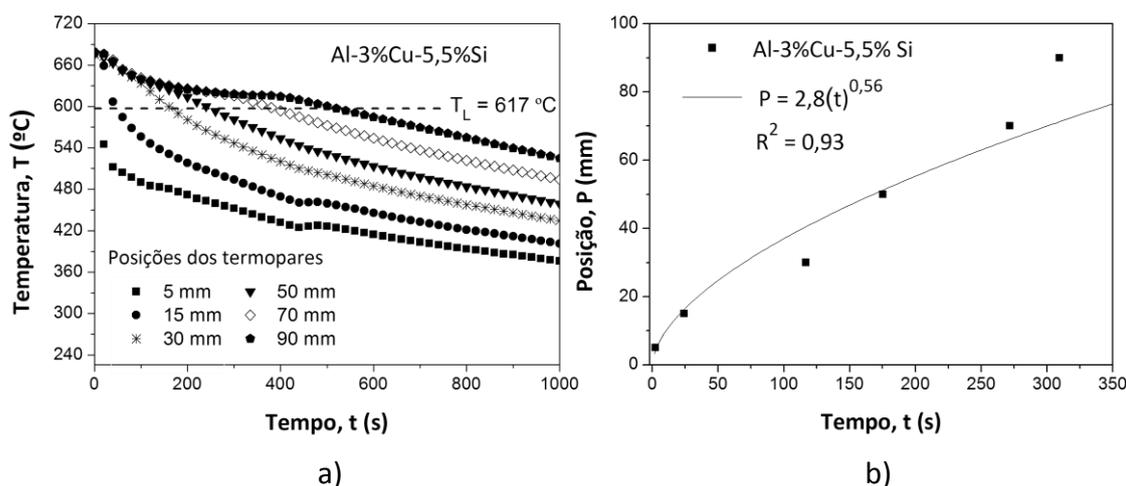


Figura 3: a) Curvas experimentais de resfriamento; b) Posição da isoterma *liquidus* a partir da interface metal/molde em função do tempo.

A partir da derivada da função potência da posição com relação ao tempo, ou seja, dP/dt , são obtidos os respectivos valores experimentais das velocidades de deslocamento da isoterma *liquidus* (V_L) a partir da interface metal/molde em função do tempo, o que corresponde à passagem da frente líquida por cada termopar. A Figura 4a apresenta os resultados obtidos, e é possível observar a diminuição progressiva da velocidade com o avanço da solidificação. Na determinação dos valores das taxas de resfriamento (T_R) foi utilizada uma metodologia

apresentada recentemente na literatura (Nogueira *et al.*, 2012; Carvalho *et al.*, 2013; Carvalho *et al.*, 2014; Vasconcelos *et al.*, 2014, Barros *et al.*, 2015). O método consiste em calcular a taxa de resfriamento para cada posição dos termopares a partir das interseções da reta da temperatura *liquidus* com os perfis térmicos equivalentes a cada posição dos termopares, através do resultado da leitura direta do quociente das temperaturas imediatamente antes e depois da temperatura *liquidus* e dos tempos correspondentes, isto é, $T_R = \Delta T/\Delta t$. Assim, com base nos pontos experimentais foram geradas funções potência da taxa de resfriamento em função da posição cujos resultados encontram-se indicados na Figura 4b.

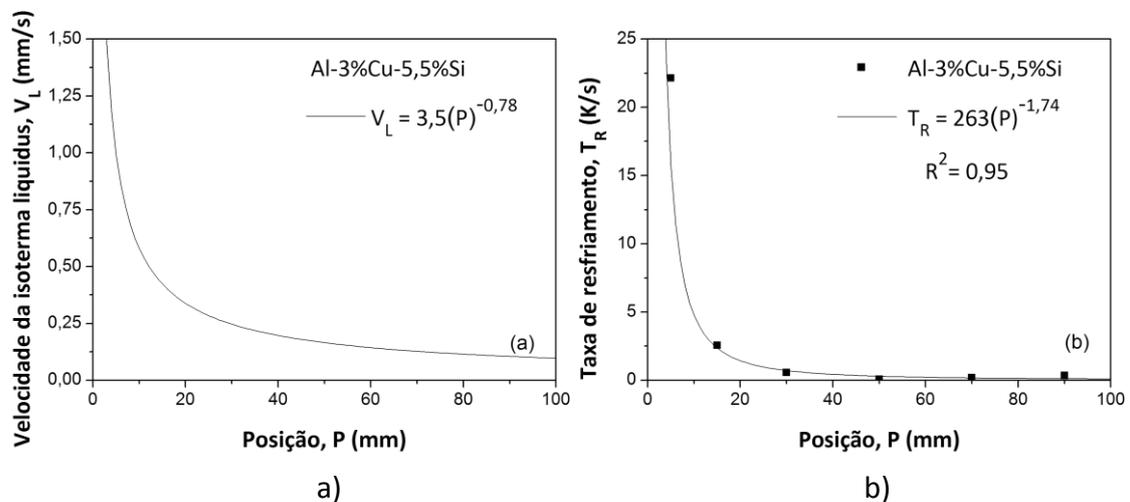


Figura 4: a) Velocidades de deslocamento da isoterma liquidus e b) Taxas de resfriamento em função da posição a partir da interface metal/molde.

O tempo local de solidificação, definido como o intervalo de tempo entre a passagem da ponta e a raiz da dendrita, para o caso de solidificação direcional, foi determinado experimentalmente para cada termopar identificando-se o instante de tempo em que as posições das isothermas *liquidus* e *solidus* passam por um determinado termopar, sendo os resultados encontrados apresentados na Figura 5.

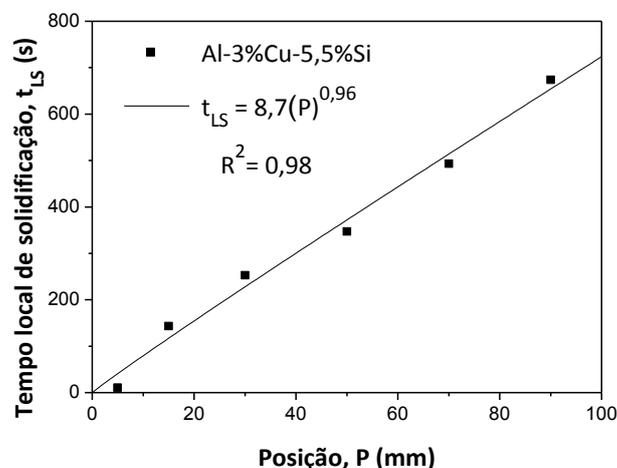


Figura 5: Tempos locais de solidificação em função da posição a partir da interface metal/molde.

Observa-se uma diminuição da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus e da taxa de resfriamento com a posição da isoterma *liquidus*, ao passo que os tempos locais de solidificação aumentam com o avanço da solidificação, isto é, quanto mais afastados da base refrigerada menores são os valores de V_L e T_R enquanto t_{LS} são maiores. Tal fato pode ser explicado pela elevação da resistência térmica à extração de calor por condução ao longo do processo de solidificação, devido ao aumento da camada solidificada.

A fim de representar e comparar a evolução das microestruturas dendríticas bem como as condições locais de solidificação, na Figura 6 são apresentadas micrografias características da liga Al-3%Cu-5,5%Si e os correspondentes valores de V_L , T_R , t_{LS} e λ_3 em três diferentes posições do lingote.

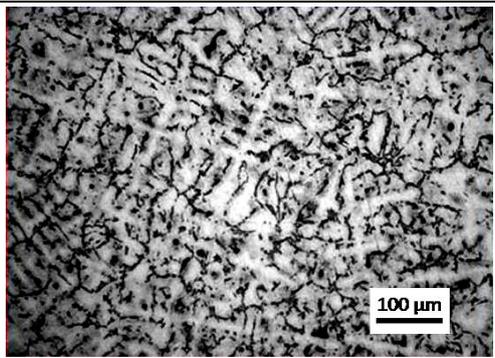
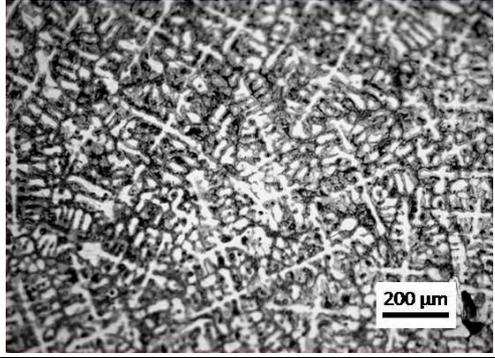
Posição = 4 mm		<ul style="list-style-type: none"> • $V_L = 1,2 \text{ mm/s}$ • $T_R = 23,6 \text{ K/s}$ • $t_{LS} = 33 \text{ s}$ • $\lambda_3 = 13 \text{ µm}$
Posição = 8 mm		<ul style="list-style-type: none"> • $V_L = 0,7 \text{ mm/s}$ • $T_R = 7 \text{ K/s}$ • $t_{LS} = 64 \text{ s}$ • $\lambda_3 = 22,5 \text{ µm}$
Posição = 20 mm		<ul style="list-style-type: none"> • $V_L = 0,3 \text{ mm/s}$ • $T_R = 1,4 \text{ K/s}$ • $t_{LS} = 154 \text{ s}$ • $\lambda_3 = 35,5 \text{ µm}$

Figura 6: Microestruturas dendríticas obtidas para as posições de 4, 8 e 20 mm a partir da interface de resfriamento.

As Figuras 7a, 7b, 7c e 7d apresentam os resultados experimentais das medições dos espaçamentos dendríticos terciários à medida que a solidificação evolui. As linhas equivalem às equações experimentais obtidas e representam, respectivamente, as leis de crescimento desses espaçamentos com a posição, velocidade, taxa de resfriamento e tempo local de solidificação. Observa-se, em todos os casos, um excelente coeficiente de correlação ($R^2 > 0,7$) entre os pontos

e as curvas correspondentes. Pode ser observado também que os expoentes -1,1 e -0,55 caracterizam as leis experimentais de λ_3 em função de V_L e T_R , respectivamente. Tais expoentes são os mesmos encontrados por Sá *et al.* (2004) e Rosa *et al.* (2008) para ligas Al-Cu, bem como Gomes (2012) e Moutinho (2012) para as ligas ternárias Al-Cu-Si.

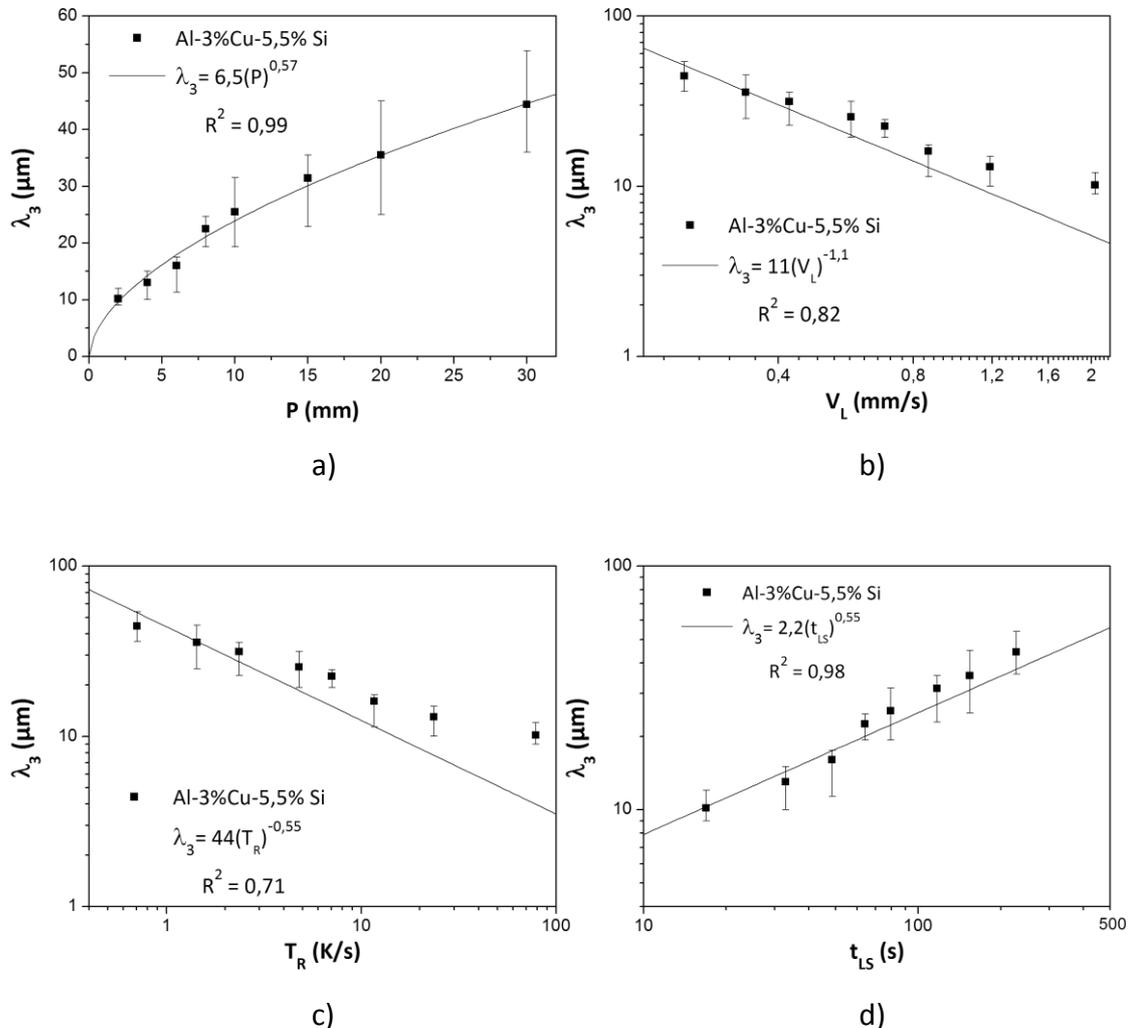


Figura 7: Espaçamentos dendríticos terciários em função de - a) Posição; b) Velocidade de deslocamento da isoterma liquidus; c) Taxa de resfriamento; d) Tempo local de solidificação.

Na Tabela 2 é apresentada uma análise comparativa entre os resultados obtidos neste trabalho com os da literatura para ligas à base de alumínio, desenvolvidos nos sistemas de solidificação direcional vertical ascendente e descendente, todos sob condições transientes de extração de calor. De maneira geral, verifica-se, pelos resultados mostrados na Tabela 2, que a tanto a adição de silício nas ligas Al-Cu quanto a direção de crescimento (horizontal ou vertical) não afetam a lei de crescimento de braços dendríticos terciários em função da taxa de resfriamento, isto é, para todos os casos a lei de potência é mantida e representada matematicamente pela expressão $\lambda_3 = K(T_R)^{-0,55}$. Por outro lado, evidencia-se pela Tabela 2 que a direção de crescimento vertical descendente da solidificação afeta os valores da constante K, observando-se valores desta constante iguais a K= 18 e 22 para as ligas Al-Cu do trabalho de Rosa *et al.* [16], os quais são aproximadamente 2-3 vezes menores que os valores verificados para as demais ligas binárias e ternárias.

Tabela 2: Leis experimentais para previsão dos espaçamentos dendríticos terciários em ligas dos sistemas Al-Cu e Al-Cu-Si solidificadas direcionalmente.

Autor	Configuração	Liga	Lei
Sá et al. [15]	Vertical ascendente	Al-5%Cu Al-8%Cu Al-10%Cu Al-15%Cu	$\lambda_3 = 50(T_R)^{-0,55}$
Rosa et al. [16]	Vertical descendente	Al-5%Cu	$\lambda_3 = 18(T_R)^{-0,55}$
		Al-8%Cu	$\lambda_3 = 22(T_R)^{-0,55}$
Moutinho [4]	Vertical ascendente	Al-6%Cu-1%Si Al-6%Cu-4%Si	$\lambda_3 = 41,2(T_R)^{-0,55}$
Gomes [3]	Vertical ascendente	Al-3%Cu-5,5%Si Al-3%Cu-9%Si	$\lambda_3 = 50(T_R)^{-0,55}$
Este trabalho	Horizontal	Al-3%Cu-5,5%Si	$\lambda_3 = 44(T_R)^{-0,55}$

A Figura 8 apresenta um gráfico comparativo entre os resultados deste trabalho com a lei de crescimento proposta por Gomes (2012). Observa-se, portanto, que o valor da constante $K=44$, encontrada para a lei de crescimento de $\lambda_3 = f(T_R)$ deste trabalho, é muito próximo daquele encontrado por Gomes (2012), mostrando que os efeitos impostos pela convecção termosolutal devido, respectivamente, ao gradiente de temperatura provocado pelo superaquecimento e a movimentação de soluto no líquido, características da solidificação direcional horizontal, praticamente nada afetam nos espaçamentos dendríticos terciários. A partir do método *Global Fitting* do software OriginPro, em que uma única curva é para vários pontos amostrais, observou-se que uma única lei experimental é capaz de representar o crescimento de λ_3 em função de T_R , representada pela equação $\lambda_3 = 48 (T_R)^{-0,55}$, para as configurações vertical ascendente (Gomes 2012) e horizontal com boa aproximação da curva para os pontos experimentais ($R^2 = 0,90$).

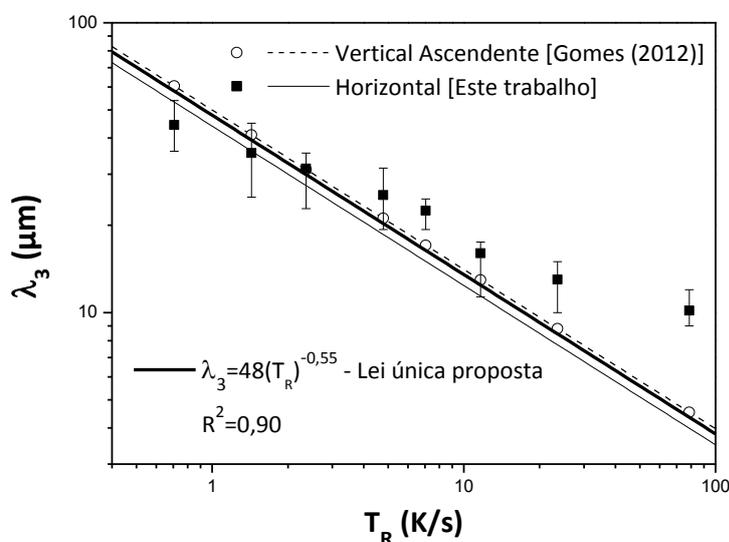


Figura 8: Influência do sentido de crescimento do sólido nos espaçamentos dendríticos terciários.

4 CONCLUSÕES

O estudo desenvolvido neste trabalho sobre os espaçamentos dendríticos terciários da liga Al-3%Cu-5,5%Si solidificada direcionalmente em um sistema refrigerado a água de configuração horizontal, sob condições transientes de extração de calor, permite que sejam extraídas as seguintes conclusões:

- Os valores experimentais de V_L e T_R diminuem com o avanço da isoterma liquidus, isto é, quanto mais próximo da superfície de extração de calor, maiores valores são encontrados para esses parâmetros, podendo ser representados por equações na forma de potência em função da posição dadas, respectivamente, por $V_L = 3,5(P)^{-0,78}$ e $T_R = 263(P)^{-1,74}$.
- Os espaçamentos entre braços dendríticos terciários aumentam progressivamente da interface metal/molde para o interior do lingote, em virtude da diminuição gradativa dos valores de velocidades e taxas de resfriamento promovida pela formação do metal sólido.
- A evolução dos espaçamentos dendríticos terciários para a liga Al-3%Cu-5,5%Si solidificada nas condições assumidas neste trabalho pode ser representada por leis experimentais de crescimento em função de V_L , T_R e t_{LS} , dadas, respectivamente, por $\lambda_3 = 11(V_L)^{-1,1}$, $\lambda_3 = 44(T_R)^{-0,55}$ e $\lambda_3 = 2,2(t_{LS})^{0,55}$.
- A lei experimental $\lambda_3 = f(T_R)$ obtida neste estudo foi muito próxima daquela encontrada para a liga Al-3%Cu-5,5%Si quando solidificada na direção vertical ascendente, indicando que a convecção termossolutal parece não influenciar os valores dos espaçamentos dendríticos terciários da liga estudada quando solidificada direcionalmente da configuração horizontal, sendo proposta uma única lei de crescimento dendrítico terciário para representar a variação destes espaçamentos em função da taxa de resfriamento para as duas configurações, dada por: $\lambda_3 = 48(T_R)^{-0,55}$.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Brasil), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) e a Universidade Federal do Pará, pelo apoio financeiro e na concessão de bolsas de Iniciação Científica e de Desenvolvimento Tecnológico para os alunos do IFPA.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ATWOOD, R.C., LEE, P.D. Simulation of the three-dimensional morphology of solidification porosity in an aluminium-silicon alloy. *Acta Materialia*, v.51, p.5447-5466, 2003.
2. BARROS, A.S., MAGNO, I.A.B., SILVA, F.P., MOTA, C.A., MOREIRA, A.L.S., SILVA, M.A.P.S., ROCHA, O.L. Measurements of microhardness during transient horizontal directional solidification of Al-Rich Al-Cu alloys: effect of thermal parameters, primary dendrite arm spacing and Al₂Cu intermetallic phase. *Metals and Materials International*, v.21, p.429-439, 2015.
3. BERTELLI, F., BRITO, C., FERREIRA, I.L., REINHART, G., NGUYEN-THI, H., MANGELINCK-NOËL, N., CHEUNG, N., GARCIA, A. Cooling thermal parameters, microstructure, segregation and

- hardness in directionally solidified Al-Sn-(Si;Cu) alloys. *Materials in Engineering*, v.72, p.31-42, 2015.
4. BÖYÜK, U., MARASLI, N., ÇADIRLI, E., KAYA, H., KESLIOGLU, K. Variations of microhardness with solidification parameters and electrical resistivity with temperature for Al-Cu-Ag eutectic alloy. *Current Applied Physics*, v.12, p.7-10, 2012.
 5. ÇADIRLI, E. Effect of solidification parameters on mechanical properties of directionally solidified Al-Rich Al-Cu alloys. *Metals and Materials International*, v.19, p.411-422, 2013.
 6. CARVALHO, D.B., COSTA, T.A., MOREIRA, A.L.S., SILVA, M.A.P.S., DIAS, M., MOUTINHO, D.J.C., ROCHA, O.L. Solidification thermal parameters and dendritic growth during the horizontal directional solidification of Al-7wt.%Si alloy. *Revista Escola de Minas (Impresso)*, v.67, p.265-270, 2014.
 7. CARVALHO, D.B., GUIMARÃES, E.C., MOREIRA, A.L., MOUTINHO, D.J., DIAS FILHO, J.M., ROCHA, O.L. Characterization of the Al-3wt.%Si alloy in unsteady-state horizontal directional solidification. *Materials Research*, v.16, p.874-883, 2013.
 8. COSTA, T.A., MOREIRA, A.L., MOUTINHO, D.J., DIAS, M., FERREIRA, I.L., SPINELLI, J.E., ROCHA, O.L., GARCIA, A. Growth direction and Si alloying affecting directionally solidified structures of Al-Cu-Si alloys. *Materials Science and Technology*, v.31, p.1103-1112, 2015
 9. DIAS, M., KIKUCHI, R.H., COSTA, T.A., MOREIRA, A.L., ROCHA, O.L. Influência das variáveis térmicas sobre os espaçamentos dendríticos terciários durante a solidificação direcional horizontal da liga Al-6%Cu. *Matéria*, v.20, p.47-63, 2015.
 10. FERREIRA, I.L., MOUTINHO, D.J., GOMES, L.G., ROCHA, O.L., GOULART, P.R., GARCIA, A. Microstructural development in a ternary Al-Cu-Si alloy during transient solidification. *Materials Science Forum*, v.636-637, p.643-650, 2010.
 11. GARCIA, A. *Solidificação Fundamentos e Aplicações*. UNICAMP-SP, 2007.
 12. GOMES, L.G., *Microestrutura Dendrítica, Macrosegregação e Microporosidade na Solidificação de Ligas Ternárias Al-Si-Cu*, 2012. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas, 2012.
 13. GURGEL, R.N. secondary and tertiary dendrite arm spacing relationships in directionally solidified Al-Si alloys. *Journal of Materials Science*, v.28, pp. 677-683, 1993.
 14. MOUTINHO, D.J.C., *Análise da Evolução Microestrutural e da Formação de Macrosegregação e Microporosidade na Solidificação Unidirecional Transitória de Ligas Ternárias Al-Cu-Si*, 2012. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas, 2012.
 15. NOGUEIRA, M.R., CARVALHO, D.B., MOREIRA, A.L., DIAS FILHO, J.M., ROCHA, O.L. Espaçamentos dendríticos primários da liga Sn-5%Pb solidificada direcionalmente em um sistema horizontal. *Matéria*, v.17, p.1009-1023, 2012.
 16. OSÓRIO, W.R., FREITAS, E.S., PEIXOTO, L.C., SPINELLI, J.E., GARCIA, A. The effects of tertiary dendrite arm spacing and segregation on the corrosion behavior of a Pb Sb alloy for lead-acid battery components. *Journal of Power Sources*, v.207, p.183-190, 2012.
 17. RANA, R.S., PUROHIT, R., DAS, S. Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites. *International Journal of Scientific and Research Publications*, v.2, p.1-7, 2012.

18. ROSA, D.M., SPINELLI, J.E., FERREIRA, I.L., GARCIA, A. Cellular/dendritic transition and microstructure evolution during transient directional solidification of Pb-Sb alloys. *Metallurgical and Materials Transactions*, v.39, pp. 161-2174, 2008.
19. SÁ, F.A., ROCHA, O.L., SIQUEIRA, C.A., GARCIA, A. The effect of solidification variables on tertiary dendrite arm spacing in unsteady-state directional solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys. *Materials Science and Engineering A*, v.373, pp. 131-138, 2004.
20. SPINELLI, J.E., SILVA, B.L., GARCIA, A. Assessment of tertiary dendritic growth and its effects on mechanical properties of directionally solidified Sn-0.7Cu-xAg Solder Alloys. *Journal of Electronic Materials*, v.43, p.1347-1361, 2014.
21. VASCONCELOS, A.J., SILVA, C.V.A., MOREIRA, A.L.S., SILVA, M.A.P.S., ROCHA, O.L. Influence of thermal parameters on the dendritic arm spacing and the microhardness of Al-5.5wt.%Sn alloy directionally solidified. *Revista Escola de Minas*, v.67, p.173-179, 2014.
22. VOLLER, V.R. A numerical scheme for solidification of an alloy. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v.37, p.169-177, 1998.
23. YANG, W., YANG, X., JI, S. Melt superheating on the microstructure and mechanical properties of diecast Al-Mg-Si-Mn alloy. *Metals and Materials International*, v.21, p.382-390, 2015.