

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS TÉRMICOS DE SOLIDIFICAÇÃO NA TRANSIÇÃO COLUNAR-EQUIAXIAL DA LIGA AL10%CU, SOB EFEITO DA CONVECÇÃO TERMOSSOLUTAL.

Fabrício SILVA (1); Maurício TAVARES (2); Thiago FERRÃO (3);Diego CORREIA(4);Mayara LIMA (5);Marcelino DIAS (6); Otávio ROCHA (7)

(1) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, travessa mariz e barros, 2220 - marco, cep: 66093-090, (91) 3228-1719, e-mail: (1)eng.fabriciopaiva@gmail.com

(2) IFPA, e-mail: mauriciodemoraestavares@hotmail.com

(3) IFPA, e-mail: thiagotiger@hotmail.com

(4) IFPA, e-mail: diegodjccs@yahoo.com.br

(5) IFPA, e-mail: maysarisari@yahoo.com.br

(6) IFPA, e-mail: marcelino_dias@hotmail.com

(7) IFPA, e-mail: otvrocha@oi.com.br

RESUMO

O processo de fundição representa a mais importante alternativa para a fabricação de produtos metálicos acabados e semi-acabados. As condições térmicas operacionais em que a transformação líquido/sólido ocorre, tais como gradientes de temperatura e taxas de resfriamento, variam de processo para processo e podem também depender tanto do tempo como da posição, por exemplo, em relação à interface metal/molde. Essas condições transientes, combinadas com as diferentes composições das ligas, conduzem a múltiplas possibilidades de obtenção de estruturas finais para um mesmo produto fundido e, por conseguinte, para o seu desempenho mecânico. Durante a mudança de fase líquido/sólido de um material metálico, as variáveis operacionais envolvidas proporcionam o surgimento, ou não, de três zonas estruturais, ou seja, zonas coquilhada, colunar e equiaxial. A caracterização da macroestrutura deste tipo de material consiste no estudo da geometria, dimensão, distribuição e orientação cristalográfica dos grãos obtidos. Considerando o exposto, o presente trabalho consiste na análise dos parâmetros térmicos, influência termossolutal no processo de solidificação da liga Al-10%Cu, com superaquecimento de 10% acima da temperatura *liquidus* da referida liga. A liga foi vazada em um dispositivo refrigerado a água que permite a solidificação unidirecional horizontal. A macroestrutura obtida é analisada assim como é estudada a influência do grau de superaquecimento e quantidade de soluto na formação da transição colunar-equiaxial da liga Al-10%Cu.

Palavras-chave: Solidificação, Transição colunar-equaxial, Superaquecimento, Liga Al-10%Cu.

1. INTRODUÇÃO

A solidificação de materiais pode ser considerada fundamentalmente como um processo de transferência de calor em regime transitório. A transformação líquido/sólido é acompanhada por liberação de energia térmica, com uma fronteira móvel separando as duas fases de propriedades termofísicas distintas. A análise da transferência de calor na solidificação apresenta essencialmente dois objetivos: a determinação da distribuição de temperaturas no sistema material/molde e a determinação da cinética da solidificação. Apesar da crescente industrialização e aplicações dos materiais cerâmicos, polímeros, e compósitos, os materiais metálicos, onde se destacam principalmente o aço, alumínio e suas ligas, continuam sendo bastante aproveitados nas mais diversas aplicações, devido a suas propriedades mecânicas que dificilmente são alcançadas por outros materiais. A melhoria das propriedades dos materiais metálicos se deve ao aumento de seu grau de isotropia. Tal aumento é sensivelmente procedido a partir da macroestrutura homogênea, ou seja, estrutura formada de grãos de pequenas dimensões; sem orientação preferencial de crescimento e distribuídos uniformemente no interior da peça. A macroestrutura de produtos fundidos consiste de três zonas distintas conhecidas, respectivamente, como coquilhada, colunar e equiaxial. A origem de cada uma tem sido objeto de diversos estudos teóricos e experimentais devido a importante correlação existente entre grãos cristalinos e propriedades mecânicas. As referidas zonas podem ou não estar presentes simultaneamente em uma peça fundida, contudo, quando esta apresenta grãos colunares e equiaxiais, ocorre o surgimento da chamada transição colunar-equiaxial (TCE). O estudo da TCE está associado a muitos parâmetros que influenciam durante o processo de solidificação tais como sistema da liga, composição da liga, superaquecimento do líquido, propriedades termofísicas do metal e do molde, coeficiente de transferência de calor na interface metal-molde, taxa de resfriamento, dimensão da peça, convecção no líquido, transporte de soluto, concentração de partículas nucleadoras, direção de crescimento da frente de solidificação, etc (DOHERTY et al., 1977; ARES et al., 2000; SIQUEIRA et al., 2003; WILLERS et al., 2005 e CANTÉ et al., 2007). A previsão da transição em questão é de grande interesse para avaliação e projeto das propriedades mecânicas de produtos solidificados. A dificuldade de estabelecer-se uma correlação entre condições térmicas de solidificação e estrutura resultante tem limitado o desenvolvimento de determinados procedimentos e métodos capazes de elevar a qualidade final de peças fundidas através da ativação de mecanismos que proporcionem a obtenção de grãos equiaxiais (SIQUEIRA et al., 2002).

Considerando o exposto, pode-se afirmar que a importância do conhecimento dos parâmetros térmicos , bem como, seus mecanismos de funcionamento são uma excelente ferramenta para entender, e de certa forma “manipular “ esse fenômeno, não só no que se refere a TCE, mas também em outras situações que existem, não abordadas aqui. É importantíssimo também que através desses parâmetros térmicos se chegue a um consenso, no que se refere a fatores influentes na convecção termossolutal para a liga Al-Cu. É importante salientar a quase inexistência de trabalhos que avaliem a influência dos efeitos convectivos na solidificação em condições transitórias de fluxo de calor.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A liga estudada neste trabalho foi devidamente pesada em balança eletrônica nas proporções necessárias para se obter uma liga com 10% de soluto. Inicialmente, foram colocados manualmente os respectivos materiais constituintes da mesma na proporção exata no cadinho de carbetto de silício, revestido internamente por uma camada protetora de tinta à base de caulim, na proporção de 75% de caulim e 25% de água. A temperatura do forno foi programada para garantir superaquecimentos de 10% acima da temperatura *liquidus* da liga

investigada, ou seja, 693,5 °C. Logo após, o cadinho foi retirado do forno e o metal líquido homogeneizado durante um tempo de aproximadamente 25 segundos.

O processo de solidificação consistiu no vazamento da liga Al-10%Cu previamente fundida em um forno do tipo mufla à resistência detalhado na figura 1 dentro de um molde de chapa de aço 1020, posicionado na parte superior do dispositivo, devidamente aquecido por resistência elétrica à uma temperatura muito próxima da temperatura de fusão. Uma vez atingida a temperatura de vazamento estabelecida, 10% acima da temperatura liquidus da respectiva liga, o dispositivo foi desligado iniciando-se o processo de refrigeração através de um fluxo de água constante na parte frontal do dispositivo. A Figura 2 abaixo mostra o dispositivo de solidificação com detalhamento da resistência elétrica. As temperaturas no metal fundido foram monitoradas durante a solidificação através de um conjunto de 5 (cinco) termopares tipo K (1,6 mm diâmetro) localizados no metal líquido nas seguintes posições em relação à interface metal/molde: 5mm, 10mm, 15 mm, 30 mm e 50 mm. Todos os termopares foram conectados por um cabo em um registrador de dados interfaceados com um computador, e os dados de temperatura foram adquiridos automaticamente.



Figura 1- Forno do tipo Mufla adotado para fundir a liga Al-10%Cu.

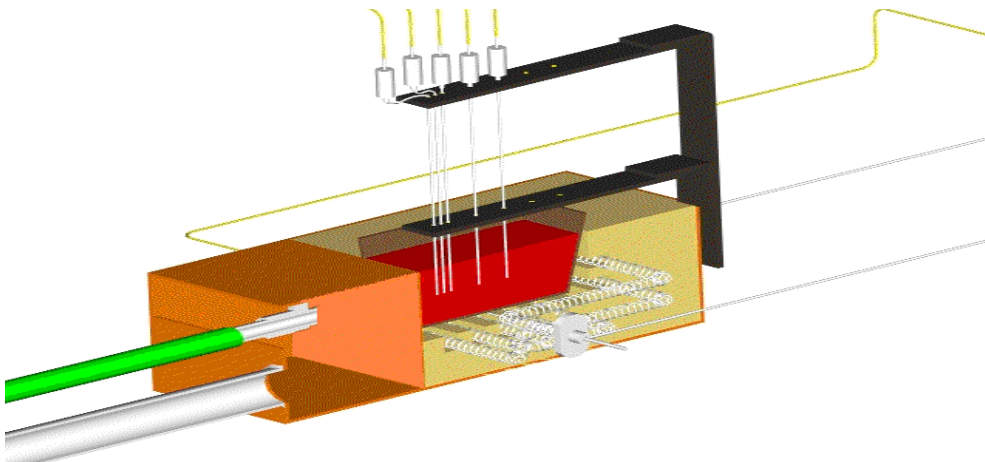


Figura 2 - Dispositivo de solidificação unidirecional horizontal, em corte.

Em seguida, obtido o lingote, foram feitos os procedimentos metalográficos para se obter as revelações macroscópicas através de corte transversal utilizando uma serra de fita com fluido refrigerante; lixamento com as lixas recomendadas, seguidas de ataque químico com composição 5ml de HF; 1,5ml de HNO₃, 3ml de HCl e 90,5ml de H₂O, por imersão em um tempo de aproximadamente (40s).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As macroestruturas mostradas nas figuras 3 (a) e (b) apresentam estruturas bem diferentes deixando evidente a importância do superaquecimento na formação de grãos colunares e portanto surgimento da TCE. Na figura 3(a) um lingote da liga Al-10%Cu com 5% de superaquecimento cuja estrutura é predominantemente equiaxial, e de grãos mais grosseiros à partir de 75mm da interface metal/molde. Por outro lado, na figura 3(b) a mesma liga, Al-10%Cu, porém com 10% de superaquecimento apresenta transição colunar-equiaxial, com o surgimento desta TCE a aproximadamente 45mm da interface metal/molde. Os grãos colunares encontram-se com direção preferencial da extração de calor e com inclinações diagonais, que podem ser explicados pelo efeito da convecção termossolutal.



(a)



Figura 3 (b) – macroestrutura da liga Al-10%Cu com 10% de superaquecimento

3.1- Parâmetros Térmicos

A figura (4) apresenta os perfis de temperatura para cada posição de termopar localizados no metal líquido. Para que fossem possíveis os cálculos da velocidade da isoterma líquida (V_L) foi gerada uma função potência da posição em função do tempo, A derivada desta função com relação ao tempo permitiu a obtenção do respectivo valor experimental para o gráfico $V_L = f(p)$ pode ser observado na figura(5). Em contra partida, os valores das taxas de resfriamento (T_R) foram determinados considerando os dados da análise

térmica experimental obtidos após a passagem da frente líquida por cada termopar. Os resultados obtidos estão indicados nas Figuras abaixo. Finalmente, os gradientes térmicos (G_L) referentes a cada liga estudada foram determinados através de relações analíticas entre as respectivas taxas de resfriamento e as velocidades das isothermas liquidus, ou seja, $T_R = G_L V_L$ (Spinelli et al 2004). Os resultados dos parâmetros térmicos referentes a liga Al-10%Cu estudada neste artigo estão apresentados na Tabela 1.

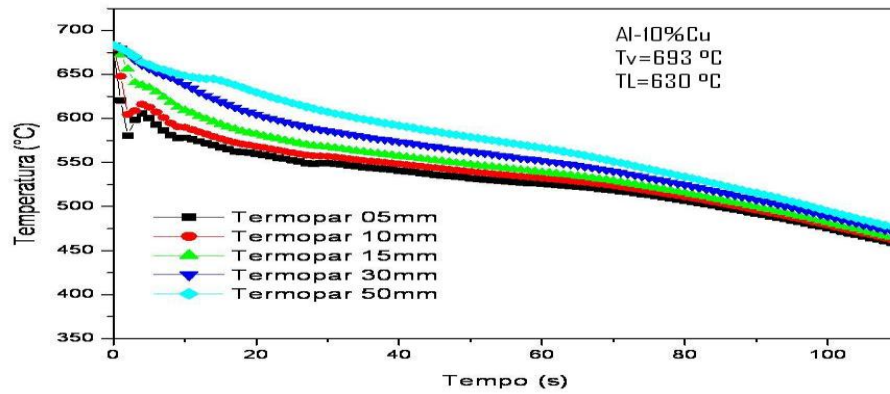


Figura 4- Perfis de temperatura para cada posição de termopar

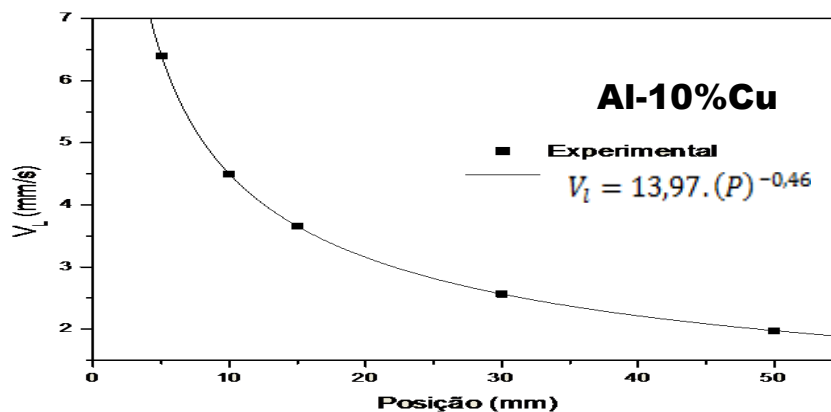


Figura 5- V_L em função da posição da isoterma líquida.

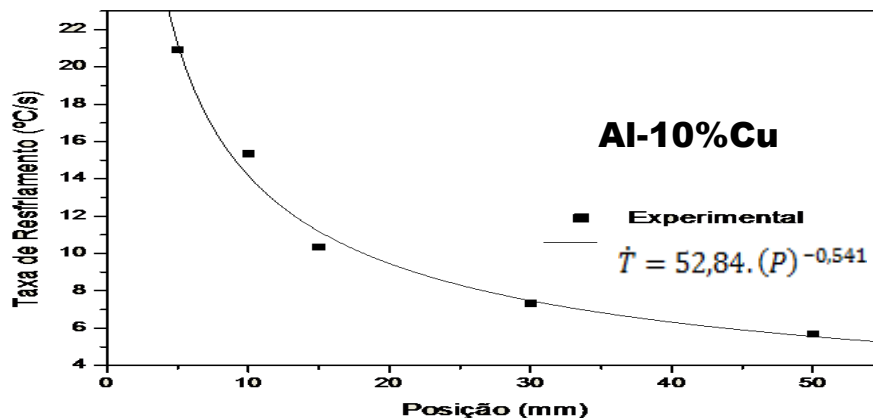


Figura 6- Taxa de Resfriamento em função da posição da isoterma líquidus

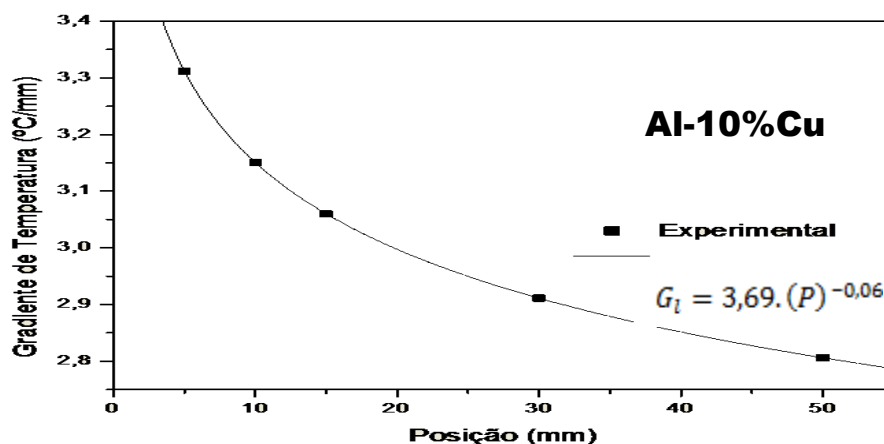


Figura 7- Gradiente de temperatura em função da posição

Tabela 1- parâmetros térmicos para TCE e termopares.

Posição	T_R (°C/s)	V_L (mm/s)	G_L (°C/mm)	Posição/ base refrigerada (mm)
TCE	5,5	1,8	2,83	45
Termopar 1	20,08	6,4	3,31	5
Termopar 2	15,2	4,4	3,15	10
Termopar 3	10,1	3,6	3,05	15
Termopar 4	7,2	2,5	2,92	30
Termopar 5	5	1,7	2,8	50

Os dados da tabela 1 foram obtidos pelos cálculos dos parâmetros térmicos experimentais para a liga Al-10%Cu. Observa-se, portanto, pelos gráficos das figuras (6) à (8), a diminuição de V_L , T_R e G_L ao longo do processo de solidificação, isto é, quanto mais afastado da base refrigerada menores serão os valores desse parâmetro. A literatura ainda não está completamente consolidada para determinar o percentual de soluto abordado nesse experimento, mas, assim como a maioria das ligas de Al, é interessante experimentos dessa natureza.

4. CONCLUSÃO

Os resultados alcançados nesse experimento nos permite fundamentar algumas conclusões referentes aos parâmetros térmicos e a Transição colunar – equiaxial para o binário Al-10%Cu.

Um deles é que o superaquecimento parece ser mais influente que o teor de soluto no que se refere a ocorrência da TCE, conforme observado nas macrografias.

Outra observação é que a TCE se faz presente quando a velocidade da isoterma liquidus atinge valor crítico de 1,8mm/s. E também quando o gradiente de temperatura (G_L) a frente da Zona colunar atinge também valores críticos de 2,8 °C/mm.

Outro detalhe importantíssimo é que a convecção termossolutal gera grãos equiaxiais, e a ocorrência da TCE, por meio da quebra de dendritas dos grãos colunares que são então liberadas para a região de líquido localizada à frente da interface de solidificação encontrando condições para crescimento.

REFERÊNCIAS

- B. Willers, S. Eckert, U. Michel, I. Haase, G. Zouhar. The columnar-to-equiaxed transition in Pb–Sn alloys affected by electromagnetically driven convection. *Materials Science and Engineering A* 402 (2005) 55–65.
- Gandin, Ch.-A., 2000, “From Constrained to Unconstrained Growth During Directional Solidification”, *Acta Materialia*, Vol. 48, pp. 2483-2501.
- Jose N. Silva, Daniel J. Moutinho, Antonio L. Moreira, Ivaldo L. Ferreira, Otavio L. Rocha. The Columnar to equiaxed transition during the horizontal directional solidification of Sn–Pb alloys. *Journal of Alloys and Compounds* 478 (2009) 358–366.
- R.D. Doherty, P.D. Cooper, M.H. Bradbury, F.J. Honey. On the columnar to equiaxed transition in small ingots. *Metallurgical Transactions* 8A (1977) 397-402.
- Siqueira, C.A., Cheung, N. and Garcia, A., 2003, “The Columnar to Equiaxed Transition During Solidification of Sn–Pb Alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 351, pp. 126-134.
- Spinelli, J.E., Ferreira, I.L. and Garcia, A., 2004, “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*, Vol. 384, pp. 217-226.
- Wang, C.Y. and Beckermann, C., 1994, “Prediction of Columnar to Equiaxed Transition During Diffusion-Controlled Dendritic Alloy Solidification”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 25A, pp. 1081-1093.
- Ziv, I. and Weinberg, F., 1989, “The Columnar-to-Equiaxed Transition in Al 3Pct Cu”, *Metallurgical Transactions*, Vol. 20B, pp. 731-734.
- Sturz, L., Drevermann, A., Pickmann, C., and Zimmermann, G., 2005, “Influence of Grain Refinement on the Columnar-to-Equiaxed Transition in Binary Al Alloys”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 413, pp. 379–383.
- Hunt, J.D., 1984, “Steady State Columnar and Equiaxed Growth of Dendrites and Eutetic”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 65, pp. 75-83.
- Canté, M.V., Cruz, K.S., Spinelli, J.E., Cheung, N. and Garcia, A., 2007, “Experimental Analysis of the Columnar-to-Equiaxed Transition in Directionally Solidified Al–Ni and Al–Sn Alloys”, *Materials Letters*, Vol. 61, pp. 2135-2138.

