



INFLUÊNCIA DA SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL NA LIGA $Al_2\%Cu$ E $Al_5\%Cu$ PARA ESTUDO MACROESTRUTURAL, MICROESTRUTURAL E PROPRIEDADE MECÂNICA¹

Fabício Dias Magalhães²
Marcelo Torres de Oliveira³
Flaviano dos Santos Rodrigues⁴
Adriano Alves Rabelo⁵

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da solidificação unidirecional em ligas hipoeutéticas do sistema Al-Cu através de análise das macroestruturas e microestruturas de solidificação mediante verificação de transição colunar/equiaxial (TCE) e quantificação dos espaçamentos dendríticos secundários (EDS), assim como, avaliação da propriedade mecânica, por meio de ensaios de dureza. As ligas de trabalho, Al-2%Cu e Al-5%Cu, foram confeccionadas conforme o diagrama de fases hipoeutético para o sistema alumínio-cobre, solidificadas em um dispositivo de solidificação unidirecional ascendente, constituído de um forno tubular aquecido radialmente com resistências do tipo global, usando um molde de aço inox 310 refrigerado a água. Foram acoplados à câmara termopares nas posições a partir da base, conectados a um sistema de captação automática de dados para se obter o mapeamento térmico durante o processo de solidificação. Com o resultado observou-se que, com o aumento do teor de cobre houve um aumento do tamanho dos grãos equiaxiais seguido de uma diminuição da zona colunar e mudança na posição da TCE. As microestruturas evidenciaram que à medida que se eleva o teor de cobre, ocorre o aumento dos espaçamentos dendríticos secundários, em virtude do maior tempo de solidificação. A dureza é elevada com o aumento do teor de Cu.

Palavras-chave: Solidificação; Estruturas; Espaçamentos.

INFLUENCE OF UNIDIRECTIONAL SOLIDIFICATION LEAGUE $Al_2\%Cu$ AND $Al_5\%Cu$ TO STUDY STRUCTURAL ASPECTS, MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTY

Abstract

This work has with object to evaluate the influence of unidirectional solidification in Al-Cu alloy, using as the change in solute content. Analyzing macrostructures, microstructures solidified by secondary dendritic spacing and mechanical properties obtained from testing of hardness. The work of Al alloy-2 and 5%Cu were prepared according to the phase diagram hypoeutectic solidified one-pointed in a device consisting of a tube furnace heated with radials resistors wide facility, using a cast of stainless steel water cooled. Were engaged in the chamber thermocouples in from the base, connected to a system of automatic capture of to obtain the thermal mapping during the solidification process. How result ,observed that with increased of copper intent also increased a size of equiaxiais grain reducing column zone and changed a position of TCE .The microstructures of the Al-Cu evidence with increasing copper content there was an increase of mechanical strength macrostructures showed an increase in grain size proportional to the amount of copper also there is an increase of secondary dendritic spacing, due to the increasing solidification time due to the higher concentration of solute.

Key words: Solidification; Structures; Spacing.

¹ Contribuição técnica ao 65° Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Aluno de Graduação de Engenharia de Materiais – UFPA – Fabricio742@hotmail.com

³ Aluno de Graduação de Engenharia de Materiais – UFPA - oliveira.engmat@gmail.com

⁴ Aluno de Graduação de Engenharia de Materiais – UFPA - rodriguesengmat05@hotmail.com

⁵ Professor Dr. do curso de Engenharia de Materiais – UFPA - adrianoalves@ufpa.br



1 INTRODUÇÃO

A busca por melhoria na qualidade de produtos fundidos tem gerado um grande número de pesquisas que se concentram no estudo dos processos de solidificação de ligas não ferrosas, em especial de ligas de alumínio devido a sua excelente combinação de propriedades físico-químicas, entre as quais se destacam o baixo peso específico, a alta condutividade térmica e elétrica, boa resistência mecânica, resistência a corrosão e reciclagem. As propriedades mecânicas das peças fundidas em alumínio e suas ligas dependem do tipo de liga, da forma e dimensões da peça, do processo e técnica de fundição empregada. O cobre está entre os principais elementos de liga adicionados ao alumínio, por promover aumento da resistência mecânica, dureza, resistência à fadiga e usinabilidade.⁽¹⁾

Experimentalmente a técnica da solidificação unidirecional tem sido bastante utilizada em estudos de caracterização de aspectos macroestruturais, da microestrutura e da relação destas estruturas com as propriedades mecânicas. As formas das estruturas de solidificação dependem das condições de resfriamento e da composição da liga. Geralmente, a solidificação conduz a dois tipos morfológicos característicos, colunar e equiaxial.⁽²⁾ Na revelação macroestrutural de lingotes em seu estado bruto, é comum encontrar estas estruturas distribuídas de uma forma bem característica, sendo uma região periférica, em contato direto com o molde, formada de grãos equiaxiais de granulometria reduzida, seguida de uma região intermediária de grãos alongados unidirecionalmente conhecida por grãos colunares e, por uma, região central de grãos equiaxiais de tamanho maior aos encontrados na periferia.⁽³⁾ Na caracterização da macroestrutura é importante a determinação da transição colunar/equiaxial para a pré-programação estrutural de peças fundidas, já que estes dois tipos estruturais apresentam características mecânicas bastante distintas.

Assim como a macroestrutura, a microestrutura, também exerce elevada influência nas propriedades de produtos fundidos. Os tipos de microestruturas presentes em uma liga estão fortemente relacionados com a forma da interface entre o sólido e o líquido (S/L) durante o processo de solidificação. Pode-se passar da forma plana dos metais puros para estruturas celulares e dendríticas, em decorrência de alterações nos parâmetros térmicos do sistema metal/molde durante a solidificação. A microestrutura dendrítica é o tipo de morfologia mais observada durante a solidificação em processos de fundição de metais e suas ligas.⁽⁴⁾ O estudo de microestruturas envolve a determinação de aspectos qualitativos e quantitativos das mesmas, como também, a definição de parâmetros dimensionais e a constituição de fases. Os espaçamentos dendríticos são parâmetros microestruturais importantíssimos, pois afetam os perfis de microsegregação e governam a formação de segundas fases na região interdendrítica, influenciando as propriedades mecânicas do material.⁽⁵⁾

Diante disto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da solidificação unidirecional nas ligas hipoeutéticas Al-2%Cu e Al-5%Cu, através de análise das macroestruturas e microestruturas de solidificação mediante verificação de transição colunar/equiaxial (TCE) e quantificação dos espaçamentos dendríticos secundários (EDS), assim como, avaliação de propriedade mecânica, por meio de ensaios de dureza HLD.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As ligas Al-2%Cu e Al-5%Cu utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho foram obtidas a partir dos elementos comercialmente puros, fundidos em um forno tipo mufla a temperatura de 760 °C. A solidificação foi realizada por meio de um dispositivo de solidificação unidirecional vertical ascendente, que consiste em um forno tubular aquecido radialmente com resistências do tipo global, acrescido de um sistema de refrigeração a água na parte inferior (Figura 1 e 2) construído na UFPA financiado pelo projeto Proint. Foi utilizada uma lingoteira, de seção cônica, de aço inoxidável SAE 310 com 150 mm de altura. Neste trabalho adotou-se superaquecimento de 10% acima da temperatura *liquidus* das ligas.

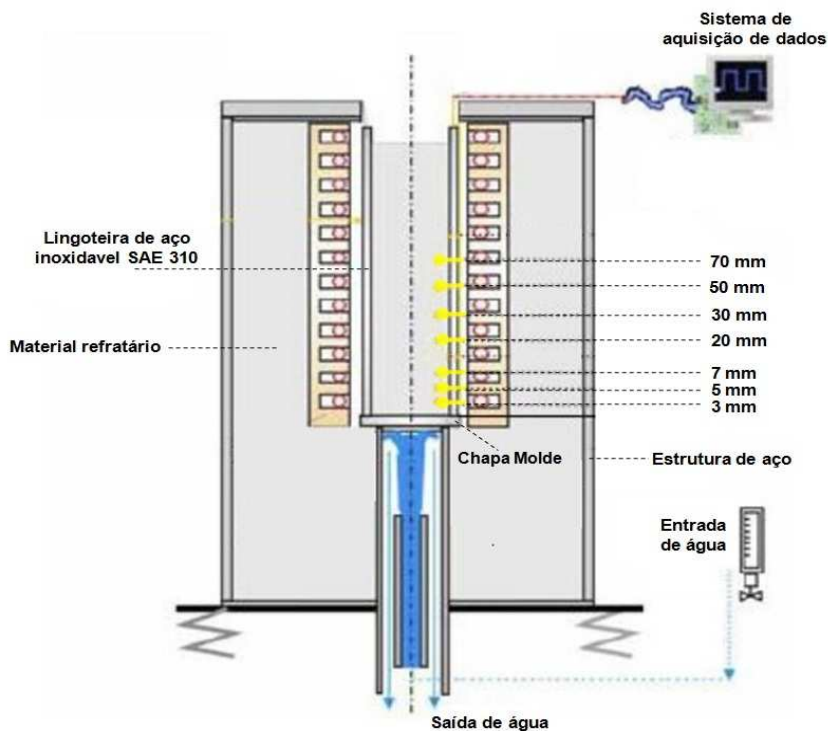


Figura 1. Representação esquemática do sistema de solidificação unidirecional.⁽⁶⁾



Figura 2. Forno vertical refrigerado a água utilizado no processo de solidificação.

As temperaturas no metal foram monitoradas durante a solidificação através de um conjunto de 7 termopares tipo K, dispostos ao longo da lingoteira nas

posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm em relação a base. Todos os termopares foram conectados a um registrador ligado a um computador para aquisição automática de dados.

Após a confecção dos lingotes, os mesmos foram seccionados longitudinalmente e posteriormente lixados em lixadeira rotativa utilizando-se uma seqüência de lixas de carbetto de silício (100 mesh, 220 mesh, 320 mesh, 400 mesh e 600 mesh). Para revelação da macroestrutura as superfícies das amostras foram atacadas com solução ácida composta por 15 ml HF, 4,5 ml HNO₃ e 9 ml HCl em 271,5 ml de H₂O.⁽⁷⁾

Após a caracterização macroestrutural foram retiradas 7 amostras referentes as posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm, em relação a base do lingote, (Figura 3), estas foram submetidas a um novo lixamento com uma sequencia de lixas de carbetto de silício (100 mesh, 220 mesh, 320 mesh, 400 mesh, 600 mesh, 800 mesh, 1.000 mesh e 1.200 mesh) e polimento em uma politriz rotativa. Foi utilizado como abrasivo pasta de diamante de 9 μ , 6 μ , 3 μ , 1 μ e 1/4 μ . As faces polidas foram atacadas com o reagente 5%NaOH em água destilada, para revelar suas microestruturas.⁽⁷⁾

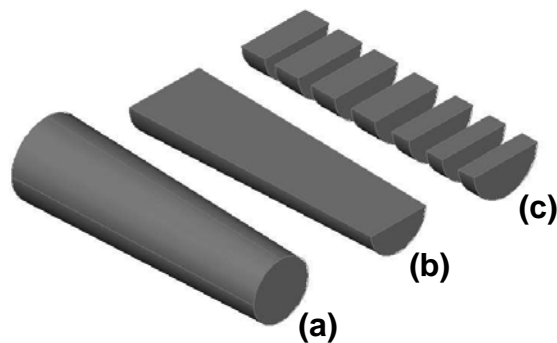


Figura 3. Esquema referente à preparação das amostras: (a) Lingote inteiro, (b) Corte longitudinal para caracterização macroestrutural e (c) cortes para caracterização microestrutural.

A caracterização continuou com a captura de imagens da microestrutura das amostras por meio de um microscópio óptico metalográfico seguido da quantificação dos espaçamentos dendríticos secundário (EDS), representados por λ_2 , dados obtidos por meio do software Motic images plus.

Os valores de λ_2 foram medidos de acordo com esquema mostrado na Figura 4. Este método consiste em calcular o valor de λ_2 através da média das distâncias entres os braços adjacentes (ramificações secundárias) sobre a seção longitudinal (paralela ao fluxo de calor ou a direção de crescimento) de uma dendrita primária, onde n é o número de braços secundários. Desta forma, foram realizadas 20 medições de λ_2 para cada posição, a partir da interface metal/molde.

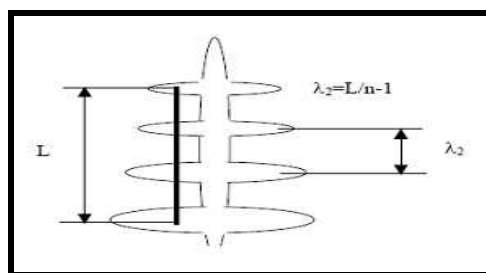


Figura 4. Esquema para quantificação do parâmetro λ_2 .⁽⁶⁾

Os procedimentos experimentais foram finalizados com o ensaio de dureza HLD realizados em uma máquina da marca equotip 3, foi realizada uma varredura nas posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm da base do lingote.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 5 são apresentadas as imagens das macroestruturas de solidificação para as ligas Al-2%Cu e Al-5%Cu solidificadas unidirecionalmente, onde se percebe variações na posição da TCE.

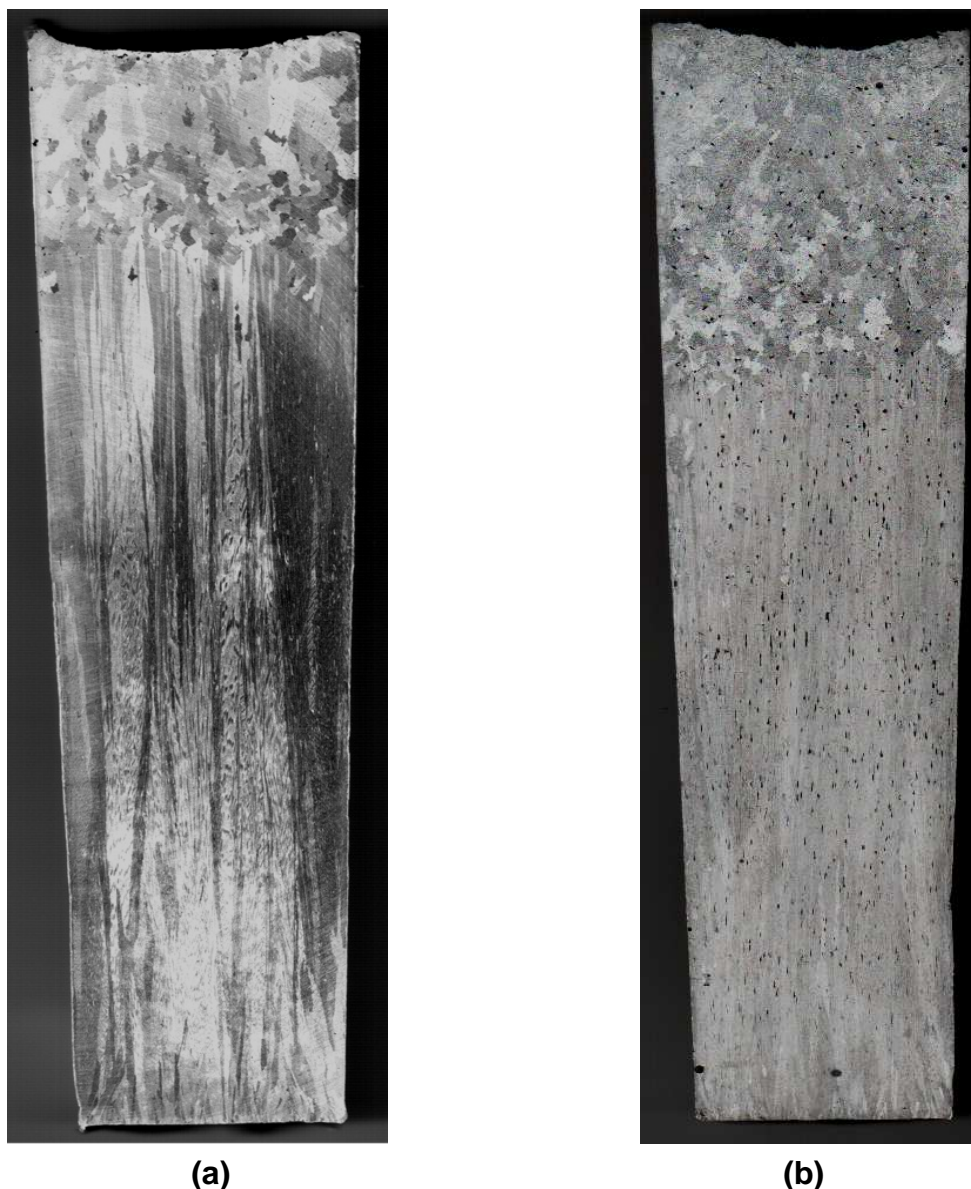


Figura 5. Macroestruturas da liga: (a) Al-2%Cu e (b) Al-5%Cu, solidificadas unidirecionalmente.

Através das macroestruturas foram determinadas as posições da transição colunar/equiaxial para os dois lingotes submetidos à solidificação direcional. As posições, em relação à base do lingote, são apresentadas na Tabela 1; onde se observa a variação na faixa da transição colunar equiaxial causada pela variação no teor de soluto, com o aumento do teor de soluto os grãos colunares não tiveram as

mesmas condições de crescimento, como redução na velocidade da isoterma liquidus e taxas de resfriamento.⁽⁸⁾

Tabela 1. Posição da TCE em relação à base do lingote

Liga	TCE
Al – 2%Cu	120 mm
Al – 5%Cu	100 mm

Nas Figuras 6 e 7 são mostradas imagens das microestruturas para as respectivas ligas Al-2%Cu e Al-5%Cu. É possível verificar, através das imagens que os espaçamentos dendríticos secundários tornam-se cada vez maiores à medida que se avança a solidificação.

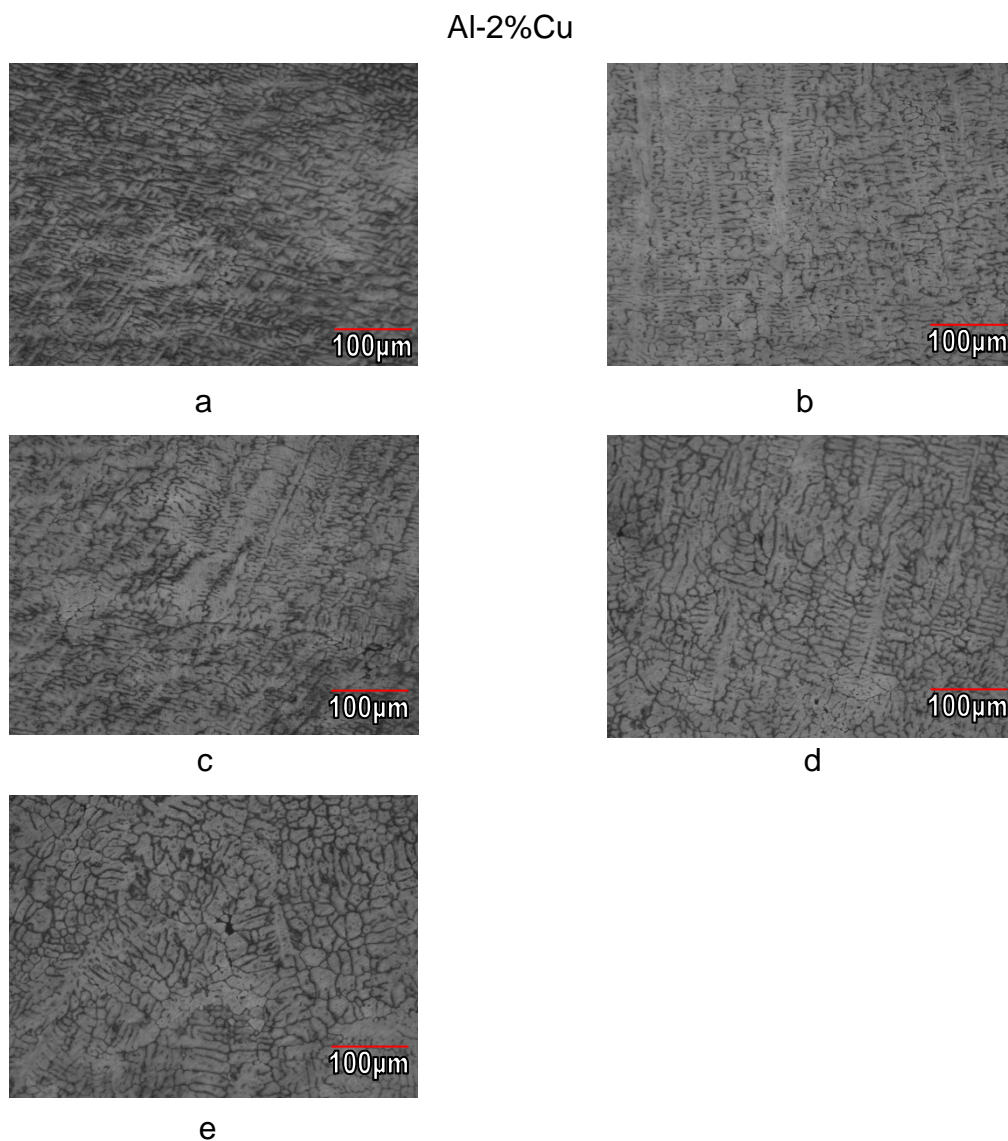


Figura 6. Micrografias da liga Al-2%Cu contendo os espaçamentos dendríticos secundários para as posições (a) 3 mm, (b) 5 mm, (c) 7 mm, (d) 30 mm e (e) 70 mm em relação a base do lingote. (aumento de 100x).

Al-5%Cu

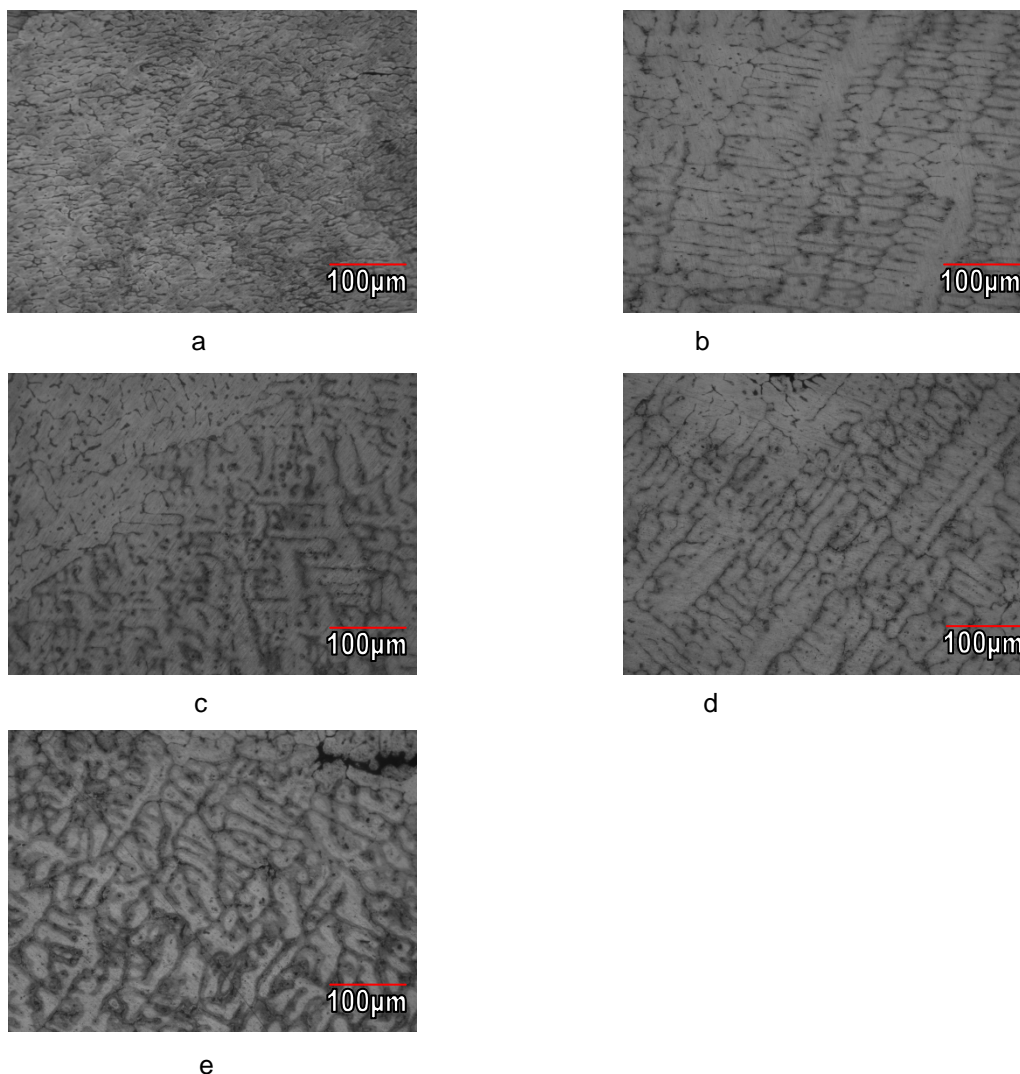


Figura 7. Micrografias da liga Al-5%Cu contendo os espaçamentos dendríticos secundários para as posições (a) 3 mm, (b) 5 mm, (c) 7 mm, (d) 30 mm e (e) 70 mm em relação a base do lingote. (aumento de 100x).

As médias dos resultados dos espaçamentos dendríticos secundários são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios dos EDS (λ_2)

Posições (mm)	λ_2 (μm)	
	Al - 2%Cu	Al - 5%Cu
3	18,54	20,75
5	19,31	22,22
7	21,68	24,16
20	27,32	29,25
30	27,83	31,07
50	34,23	36,75
70	35,95	38,36

Os espaçamentos dendríticos apresentados para a liga Al-2%Cu aumentaram à medida que a solidificação avança da base para topo do lingote. A liga Al-5%Cu apresentou aumento dos espaçamentos dendríticos nas mesmas condições da liga

Al-2%Cu, quando esses resultados são comparados com as macroestruturas podemos notar que a liga Al-2%Cu obteve uma extração de calor mais eficiente que a liga Al-5%Cu em virtude do menor teor de soluto. Nos gráficos das Figuras 8 e 9 estão representados os espaçamentos dendríticos das ligas de trabalho.

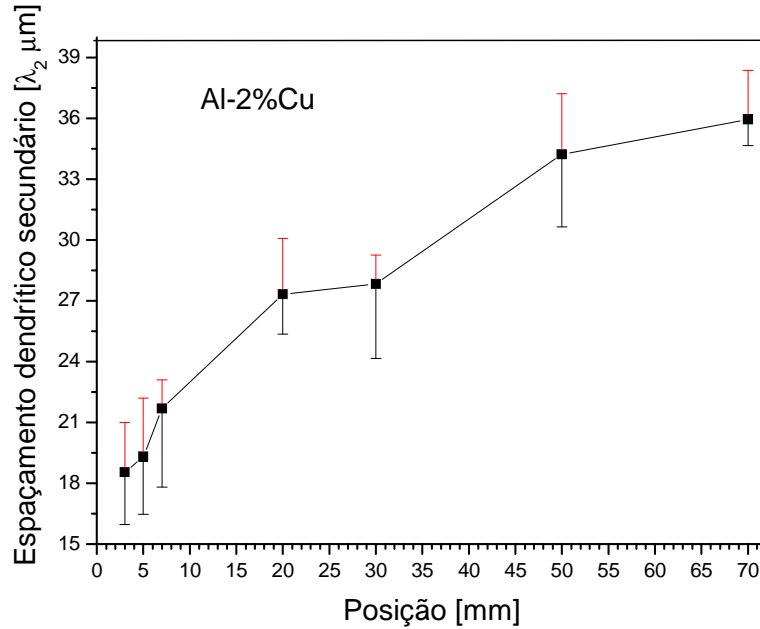


Figura 8. Espaçamentos dendríticos secundários para as posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm em relação à base do lingote, liga Al-2%Cu.

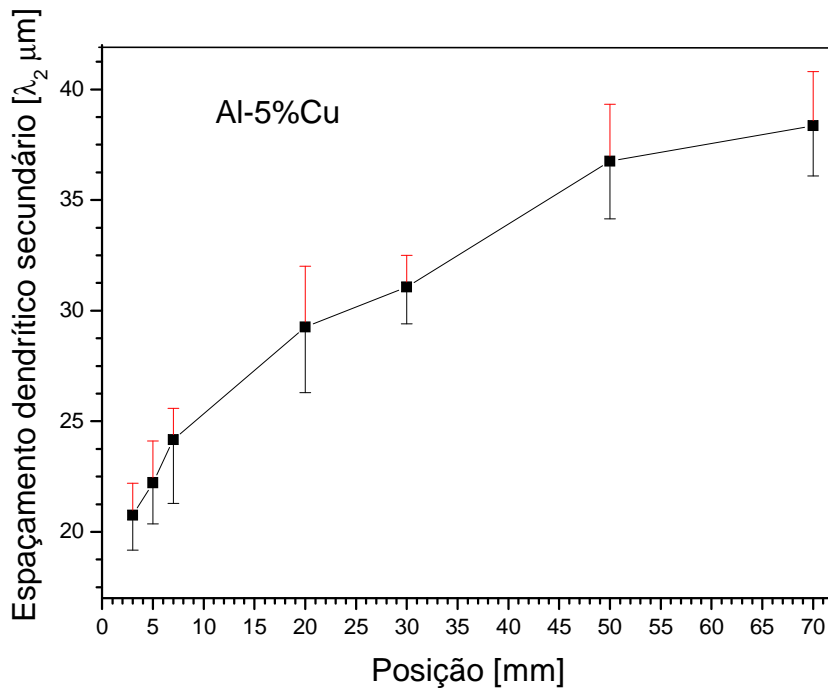


Figura 9. Espaçamentos dendríticos secundários para as posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm em relação à base do lingote, liga Al-5%Cu.



Na Tabela 3 está representada a dureza (propriedade mecânica) para efeito de comparação com as medidas dos espaçamentos dendríticos secundários.

Tabela 3. Valores médios para o ensaio de dureza

Posições (mm)	Dureza HLD	
	Al - 2%Cu	Al - 5%Cu
3	144	162
5	150	160
7	140	161
20	147	157
30	137	155
50	150	158
70	146	154

A dureza apresentou resultados que demonstram uma relação com os espaçamentos dendríticos secundários, quando os EDS aumentam a dureza apresenta uma leve redução para as duas ligas de trabalho.

4 CONCLUSÃO

Com a variação do teor de soluto nas ligas Al-2%Cu e Al-5%Cu os espaçamentos dendríticos secundários aumentaram deslocando a transição colunar equiaxial para baixo na liga Al-5%Cu. Os espaçamentos dendríticos secundários aumentaram com o avanço da solidificação da base para o topo dos lingotes nas duas ligas de trabalho. A liga Al-5%Cu apresentou maior dureza devido ao teor de Cu, com relação ao perfil de dureza a liga Al-5%Cu obteve uma redução de 5% na dureza da base para o topo do lingote. Na liga Al-2%Cu a dureza apresentou uma variação de 1,8% da base para o topo do lingote.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Pará pelo incentivo aos alunos.

REFERÊNCIAS

- OSÓRIO, W.R., GARCIA, L.R.; PEIXOTO, L.C., GARCIA, A. A influência da macrosegregação e da variação dos espaçamentos dendríticos na resistência à corrosão da liga Al-4,5%Cu. **Revista de Materia**, v. 13, n. 3, p. 542-552, 2008.
- KURZ, Wilfried. Bezençon, C. Gäumann, M., Columnar to Equiaxed Transition in Solidification Processing, **Science and Technology of Advanced Materials**, V.2, 185-191, 2001.
- ZULIAN, F.D., RIJO, M.G.Q., MISSIAGGIA, L.; HECKTHEUER, D.A., BOEIRA, A. P. Correlação entre propriedades mecânicas e características macroestruturais em ligas de Al-Cu. **Revista Thema**, v. 07, n. 1, p. 01-12, 2010.
- KURZ, W.; FISHER, D.J. Dendritic growth at limit of stability: tip radius and spacing. **Acta Metall**, v.29, p.11 – 20, 06-1981.
- ROSA, D.M. Caracterização da microestrutura dendrítica na solidificação vertical descendente de ligas Al-Cu, Dissertação de mestrado, **Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP**, Campinas – São Paulo. 2004.
- PERES, M.D. Desenvolvimento da macroestrutura e da microestrutura na solidificação unidirecional transitória de ligas Al-Si, Tese de doutorado, **Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP**, Campinas – São Paulo. 2005.

- 7 SIQUEIRA, C.A. Influencia de parâmetros térmicos de solidificação na transição colunar/equiaxial, Tese de doutorado, **Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP**, Campinas – São Paulo. 2002.
- 8 Bouchard, D; Kirkaldy, J. S., 1997, Prediction of Dendrite Arm spacings in Unsteady and Steady-State Heat Flow of Unidirectionally Solidified Binary Alloys, **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 28B, pp.651-663.