

ESTUDO DA INFLUÊNCIA NA ESTRUTURA E PROPRIEDADE MECÂNICA DA ADIÇÃO DE 4,5% DE COBRE EM LIGA Al-2,5%Ni SOLIDIFICADA SOBRE REGIME TRANSIENTE DE FLUXO DE CALOR

*

*Mauricio Matos de Mesquita Filho¹
Karolina Costa Seixas²
Antonio de Oliveira Sarmiento³
Luiz Gabriel da Silva Nascimento⁴*

Resumo

Este trabalho foi realizado a partir da fabricação de um dispositivo de solidificação para ligas de alumínio controlado automaticamente por controlador de temperatura, que possui uma lingoteira metálica e resistência em seu interior e que permite um ambiente propício à extração de calor em apenas uma direção. Analisou-se a solidificação direcionada com fluxo de calor transiente e solidificação ascendente. A macroestrutura se deu por grãos direcionados verticalmente e microestrutura dendríticas, além disso, quanto menor o espaçamento dendrítico secundário maior a dureza do material. Em regiões mais distantes da interface extratora de calor, os espaçamentos dendritos tendem a ser maiores e a dureza cada vez menor. O material processado possui fases intermetálicas, que auxiliam no aumento da resistência que podem ser de suma importância para fabricação de produtos de boa qualidade.

Palavras-chave: Al-Ni-Cu, Solidificação; Microestrutura; Propriedade mecânica.

STUDY OF THE INFLUENCE ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES. OF THE ADDITION OF 4,5% OF COPPER IN AL-2,5%NI ALLOY SOLIDIFIED ON A TRANSIENT HEAT FLOW REGIME

Abstract

This work was done from the manufacture of a solidification device for aluminum alloys automatically controlled by temperature controller, which has a metallic ingot and inner resistance and which allows a conducive environment to the heat extraction in only one direction. There was an analysis of the directed solidification with transient heat flow and upward solidification. The macrostructure was given by vertically directed grains and dendritic microstructure, in addition, the smaller the secondary dendritic spacing the greater was the material hardness. In regions further away from the heat-extracting interface, the dendrites tend to be larger and the hardness decreasing. The processed material has intermetallic phases, which aid in the increase of the resistance that can be of paramount importance for the manufacture of good quality products..

Keywords: Al-Ni-Cu, Solidification; Microstructure; Mechanical Properties.

- ¹ Engenharia de materiais, graduando, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, Pará e Brasil.
- ² Engenharia de materiais, graduanda, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, Pará e Brasil.
- ³ Engenharia de materiais, graduando, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Belém, Pará e Brasil.
- ⁴ Engenheiro mecânico, professor, Instituto federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Belém, Pará, Brasil.
- ⁵

1 INTRODUÇÃO

O desempenho das peças, tanto daquelas de fundição que já se apresentam na sua forma definitiva como dos produtos que serão trabalhados para produção de chapas, fios e forjados, é significativamente influenciado pela estrutura que se forma imediatamente após a solidificação ^(6; 5; 4; 3; 2; 1). É fato conhecido que a resistência mecânica e dureza são dependentes da morfologia macro e microestrutural.

As características do material e o processo de solidificação influem significativamente na formação da macroestrutura, microestrutura e defeitos. As estruturas brutas de solidificação obtidas, ou seja, as estruturas formadas durante a transformação líquido/sólido determinam as propriedades do produto final ⁽⁷⁾, que recebe posteriormente transformações mecânicas e/ou térmicas. Uma forma de produzir lingotes completamente colunares consiste na utilização de dispositivos de solidificação unidirecional. O dispositivo deve apresentar um bom isolamento térmico nas laterais para evitar a extração de calor pelas paredes do molde e impedir a possibilidade de nucleação de cristais junto a essas paredes e à frente da interface de crescimento.

As microestruturas, que resultam do processo de solidificação, estão relacionadas com a forma da interface entre o sólido e o líquido (S/L) e influenciam nas propriedades mecânicas ^(8; 9; 10). Em condições ideais essa interface deveria permanecer plana, porém alterações nos parâmetros constitucionais e térmicos do sistema metal/molde que ocorrem durante a solidificação provocam a instabilidade dessa interface, dando origem às microestruturas. O objetivo desse trabalho é comparar os efeitos da solidificação na liga Al-2,5%Ni e Al-4,5%Cu-2,5%Ni e correlacionar os efeitos do cobre nas ligas.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1.1 DISPOSITIVO DE SOLIDIFICAÇÃO

Foi utilizado um dispositivo de solidificação unidirecional, Figura 1, onde o resfriamento se dá pela parte basal do sistema em regime transiente de extração de calor. O mesmo é fabricado de cimento e manta refratária, que suportam altas temperaturas e tendem a apresentar baixa condutividade térmica. Esse sistema funciona com o aquecimento da lingoteira fabricada em aço. A lingoteira possui corte longitudinal, e braçadeiras acopladas nas extremidades, para que após o processo seja feito o desmoldamento do material mais facilmente.

Através de resistência elétrica foi fornecido ao dispositivo calor suficiente para manter um atmosfera adequada a solidificação direcional. O forno utiliza princípios físicos em seu funcionamento desde o aquecimento até o resfriamento. Tal resfriamento funcionou devido à interface meta/molde localizada na parte inferior do sistema de solidificação que tem contato com o líquido de resfriamento, esse contato possibilitou a extração de calor do material que está líquido na lingoteira até sua total solidificação. Depois do contato da água com a base da lingoteira do sistema, a água desce para local adequado.

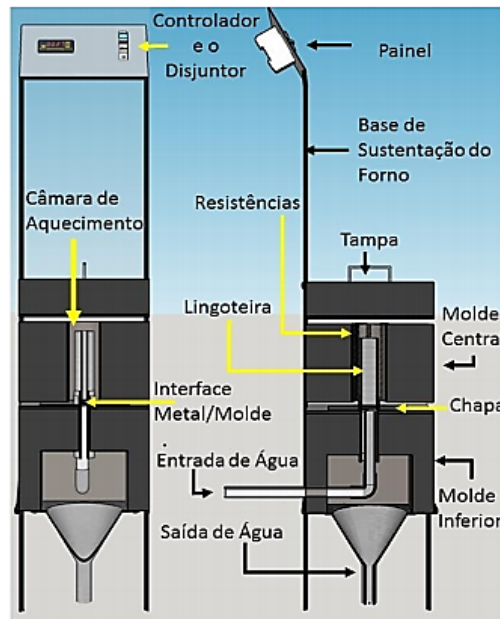


Figura 1. Desenho esquemático do dispositivo de solidificação

2.1.2 Procedimentos metalográfico

Após a solidificação vertical ascendente os lingotes foram cortados longitudinalmente ao meio, uma secção será usada para se caracterizar a geometria da macroestrutura, e lixados em uma lixadeira manual, em uma sequência de lixas de granulometria variando de 80 até 600 mesh, variado a direção de lixamento em noventa graus para cada novo lixamento até a última lixa de modo a se conseguir uma superfície espelhada sem a presença de riscos. Em seguida a superfície polida foi atacada quimicamente, com uma solução de ácido fluorídrico (HF)

2.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.2.1 Macrografia da liga Al-4,5%Cu-2,5%Ni e Al-2,5%Ni

A Figura 2, mostra a macroestrutura de solidificação das ligas Al-4,5%Cu-2,5%Ni e Al-2,5Ni, na qual percebe-se que na primeira liga contendo o cobre e níquel como elemento de liga, houve uma região de transição colunar-equiaxial, devido a introdução de cobre e houve um maior refino dos seus grãos. Na figura 2-A e B, temos uma estrutura predominantemente colunar vertical devido ao fluxo de calor do processo⁽¹⁰⁾.

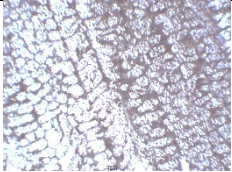
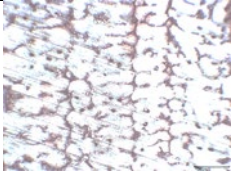
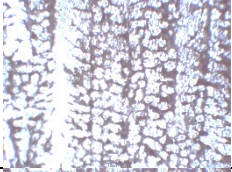
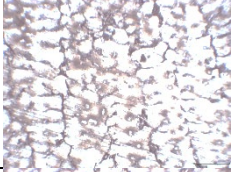
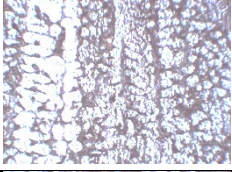
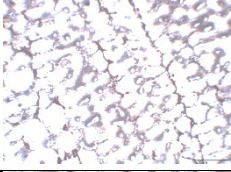
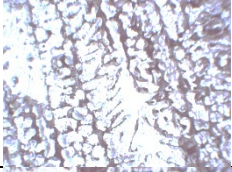
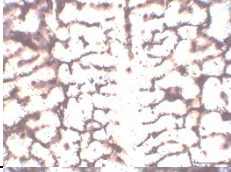
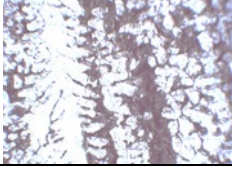
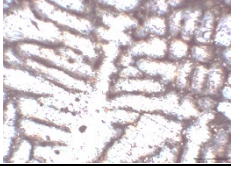


Figura 2. Macroestruturas (A) Al-4,5%Cu-2,5%Ni e (B) Al-2,5%Ni

2.2.2 MICROGRAFIA DA LIGA Al-4,5%Cu-2,5%Ni e Al-2,5%Ni

A tabela 1 compara os espaçamentos dendríticos secundários médios das duas ligas medidos, pelo menos dez braços secundários para cada região. Os resultados entre as distâncias determinou que apesar da liga Al-4,5%Cu-2,5%Ni apresentar macrografia de grãos aparentemente mais refinados a micrografia entre as ligas revelou que o espaçamento da liga Al-2,5%Ni, foram menor em relação a contendo cobre. As regiões R1 e R2, apresentaram menores espaçamento dendritico secundário, pois estas regiões se encontra próximas da zona de contato com o líquido que promoveu a extração de calor e consequentemente o direcionamento dos grãos do metal. Na liga Al-4,5%Cu-2,5%Ni, há presença de intermetálico Al_7Cu_4Ni em sua microestrutura^(11, 10).

Tabela 1. Micrografia da liga Al-2,5%Ni e Al-4,5%Cu-2,5%Ni

Região	Al-2,5%Ni (200X)	λ_2 médio (μm)	Al-4,5%Cu-2,5%Ni (200X)	λ_2 médio (μm)
R1		10,09		9,91
R2		8,48		12,05
R3		11,42		13,14
R4		11,53		14,82
R5		13,92		17,61

2.2.3 MICROGRAFIA DAS FASES INTERMETÁLICOS E EDS

2.2.3.1 Liga Al-2,5%Ni

A Figura 3-A, feita por microscopia eletrônica de Varredura-MEV mostra o intermetálico Al_3Ni , que se forma na liga Al-2,5%Ni durante o processo de solidificação. Esse intermetálico reforça a matriz de alumínio e influencia diretamente em suas propriedades mecânicas e possui geometria fibrosa⁽¹⁰⁾, Figura 3-B

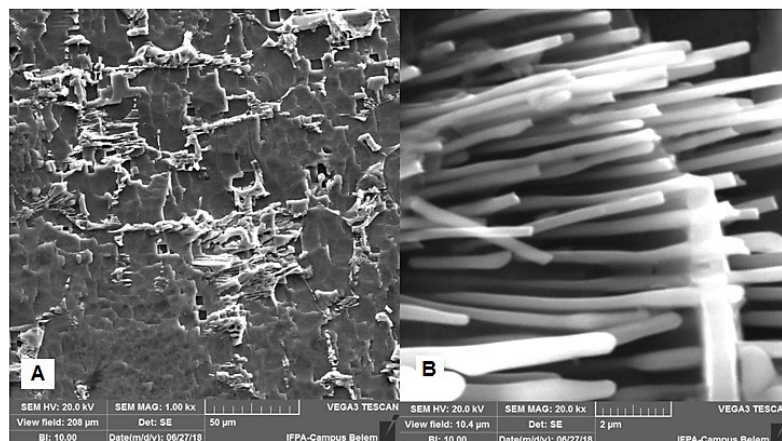


Figura 3. A) Microestrutura do intermetálico Al_3Ni B) Estrutura fibrosa do Intermetálico Al_3Ni

2.2.3.2 Liga Al-4,5%Cu-2,5%Ni

Na figura 4 B, mostra a ampliação da micrografia da liga Al-4,5%Cu-2,5%Ni, Figura 4-A, as fases escuras a matriz de alumínio e claras são os intermetálicos Al₇Cu₄Ni. No EDS (Tabela 2) observam-se os teores dos elementos químicos encontrados neste material, onde no ponto 1 (P1) da figura 4-B, possuem teores de alumínio maiores do que no ponto 2 e 3, que contém porcentagens de cobre e níquel aproximados, ou seja, estas regiões (P2 e P3) estão concentrados os intermetálicos formado ao longo da solidificação da liga⁽¹¹⁾.

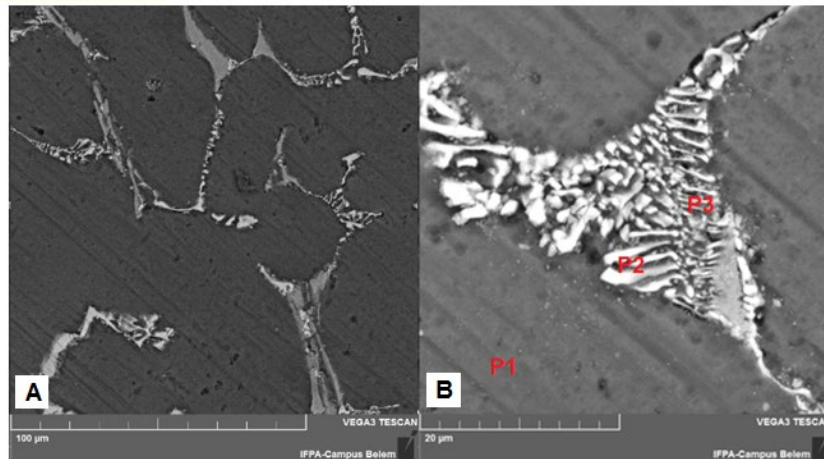


Figura 4. Morfologia do intermetálico Al₇Cu₄Ni na matriz de alumínio.

Tabela 2. Análise química pontual via EDS.

Ponto	Al (%)	Cu (%)	Ni (%)
P1	96,42	3,30	0,28
P2	65,20	19,41	15,39
P3	74,04	15,88	10,09

2.2.4 DUREZA

Os gráficos das Figuras 5 e 6, são durezas na escala Brinell, A liga Al-4,5%Cu-2,5%Ni, apresentou maior resistência a penetração, a presença do cobre induziu a formação do intermetálico Al₇Cu₄Ni, que favoreceu o acréscimo da mesma. Observa-se, que quanto mais próximo à base de extração de calor maior será a dureza para ambas a ligas.

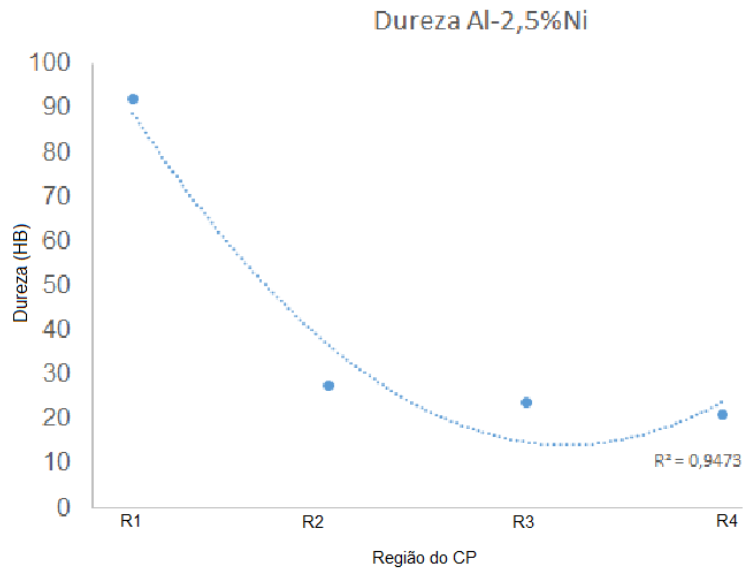


Figura 5. Gráfico da dureza da liga Al-2,5%Ni

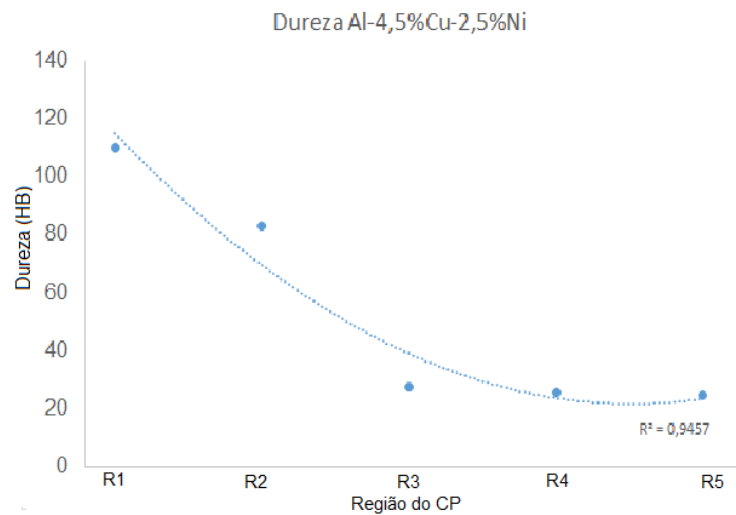


Figura 6. Gráfico da dureza da liga Al-4,5%Cu-2,5%Ni

2.2.5 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizado no corpo de prova de referência – alumínio puro, e nas ligas Al-4,5Cu-2,5%Ni e Al-2,5%Ni. A adição do cobre além de promover maior resistência a penetração, também proporcionou uma elevada tensão de escoamento que triplicou e duplicou em relação a liga de alumínio puro e alumínio-níquel, respectivamente.

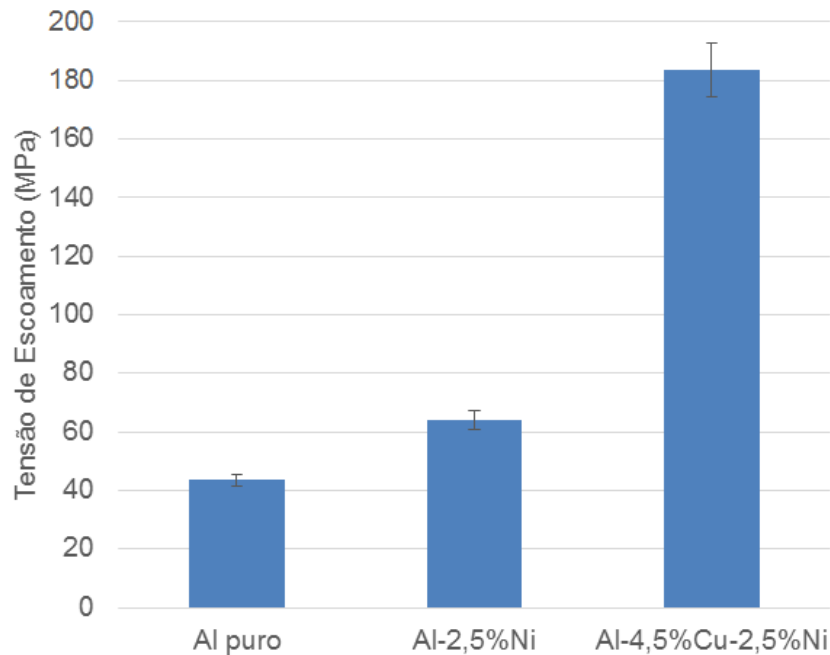


Figura 7. Tensão de escoamento do alumínio puro, Al-2,5%Ni e Al-4,5%Cu-2,5%Ni

3 CONCLUSÃO

Esse estudo revela para as ligas de alumínio estudadas, uma macroestrutura com transição colunar-equiaxial para a liga Al-4,5%Cu-2,5%Ni e predominantemente colunar para a liga Al-2,5%Ni, sendo que ambas tiveram formação de intermetálicos específicos. A dureza é maior para a liga Al-4,5%Cu-2,5%Ni assim como a tensão de escoamento, nas regiões mais próxima a extração de calor a dureza também é maior para ambas as ligas estudadas. Os espaçamentos dendríticos secundários são menores nas regiões mais inferiores do lingote.

REFERÊNCIAS

- 1 ABAL: Associação Brasileira do Alumínio. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>>. Acesso em: 06 mar. 2018
- 2 COSTA, G. B. Variáveis térmicas de solidificação, espaçamentos dendríticos secundários e resistência à corrosão de ligas hipoeutéticas Al-Ni, 2008. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Pará. Instituto de tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 2008.
- 3 GARCIA, A. Solidificação: fundamentos e aplicações. São Paulo: Ed. Unicamp, 2007.
- 4 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.
- 5 SANTOS, R.G.DOS. Transformações de Fases em Materiais Metálicos, UNICAMP, São Paulo, 2006.
- 6 QUARESMA, J. M. V. Correlação entre condições de solidificação, micro-estrutura e resistência mecânica, 1999. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- 7 CANTÉ, M.V., SPINELLI, J.E., FERREIRA, I.L., CHEUNG, N., GARCIA, A. Microstructural development in Al-Ni alloys directionally solidified under unsteady-state conditions, *Metallurgical and Materials Transactions A* 39 (7), 1712-1726, 2008
- 8 OSÓRIO, W. R. R. Correlação entre parâmetros da solidificação, microestrutura e propriedades mecânicas de ligas Zn-Al, Dissertação (Mestrado)- Universidade de Campinas-FEM-DEMA, Campinas – São Paulo. 2000.
- 9 ROSA, D.M. et al. Cellular growth during transient directional solidification Pb-Sb Alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 422, p.227-238, 2006.
- 10 NASCIMENTO, L. G. S. ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE LIGAS HIPOEUTÉTICAS Al-Ni SOLIDIFICADAS UNIDIRECIONALMENTE EM CONDIÇÕES TRANSITÓRIAS DE FLUXO DE CALOR. 2011. Dissertação [mestrado] Universidade Federal do Pará. Instituto de tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 2011.
- 11 RODRIGUES, A. V. Correlações entre Microestruturas de Solidificação e Resistências Mecânica e à Corrosão de Ligas Al-Cu-Ni. 2017. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.