



# RECICLAGEM DE UMA LIGA AERONÁUTICA À BASE DE ALUMÍNIO: INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NÍQUEL E DA TAXA DE RESFRIAMENTO DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO

**Palavras-Chave:** Solidificação, Reciclagem, Microestrutura

**Autores:**

**Eduardo Rodrigues Manzano, FEM – Unicamp**  
**Prof. Dr. Noé Cheung (orientador), FEM – Unicamp**  
**Dr. Rafael Kakitani (coorientador), FEM – Unicamp**

---

## INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio são amplamente utilizadas no setor aeroespacial devido à baixa densidade e ótima resistência mecânica desses materiais. Por conta disso, e aliado ao fato de que milhares de aeronaves são aposentadas anualmente [1], uma grande quantidade de Al pode ser reciclada, diminuindo a necessidade de Al primário, cuja produção demanda um alto custo energético [2]. Portanto, seu processo de reciclagem merece maior atenção.

Entretanto, uma desvantagem da reciclagem de ligas de Al é a contaminação por Fe, que ocorre durante o processamento da sucata. Oriundo de outros materiais, e do contato com os equipamentos e ferramentas de reciclagem, o Fe possui baixíssima solubilidade no Al [3] e induz à formação de intermetálicos deletérios às propriedades mecânicas da liga [4,5]. Dessa forma, o presente trabalho buscou estudar a influência da adição de 0,5% Ni em uma liga de Al aeronáutica contaminada com Fe, buscando a redução ou eliminação dos intermetálicos deletérios. Para tanto, as ligas Al-5%Cu-0,5%Fe e Al-5%Cu-0,5%Fe-0,5%Ni (composição em peso) foram solidificadas direcionalmente em regime transiente e suas microestruturas caracterizadas, através de técnicas de microscopia óptica e eletrônica de varredura.

## METODOLOGIA

Inicialmente, realizou-se um levantamento bibliográfico sobre o processo de solidificação direcional e a influência do Fe em ligas Al-Cu. Também foi estudada a consequência da adição de metais de transição, como o Ni e o Mn, para mitigar efeitos deletérios do Fe nestas ligas. Constatou-se que a literatura carece de estudos sobre

reciclagem de ligas Al-Cu e a influência do Ni nessas ligas não é totalmente compreendida, demonstrando a pertinência do projeto.

Para a obtenção dos lingotes, as ligas de interesse foram solidificadas utilizando o dispositivo de solidificação direcional (Figura 1). Durante o experimento de solidificação direcional, com o auxílio de termopares, foram registradas as curvas de resfriamento em função do tempo em diversas posições ao longo do comprimento do lingote. A partir do registro das temperaturas, foram obtidas a taxa de resfriamento ( $\dot{T}$ ) e a velocidade de resfriamento ( $v$ ) ao longo do comprimento de cada lingote.

As análises macro e microestrutural das ligas foram feitas utilizando técnicas de microscopias óptica e eletrônica de varredura. Para tanto, cada lingote foi seccionado ao meio e uma metade foi submetida ao lixamento até #400 *mesh* e atacada quimicamente com a solução de água régia (3 partes de HCl e uma parte de HNO<sub>3</sub>). A outra metade foi cortada em amostras transversais com espessuras de 5 mm até a altura de 40 mm e espessuras de 10 mm nas alturas de 40 a 70 mm, em relação à base dos lingotes. Dessa mesma metade, duas amostras longitudinais foram seccionadas. As amostras transversais e longitudinais foram submetidas à prática metalográfica, nas quais as superfícies foram lixadas até #1200 *mesh*, seguido de polimento com pastas diamantadas de 3 a 1  $\mu\text{m}$ . A microestrutura foi caracterizada pela análise do espaçamento dendrítico secundário ( $\lambda_2$ ), medido a partir do método do intercepto [6] e correlacionado com a velocidade de resfriamento das ligas. A análise das fases foi realizada através da espectroscopia de energia dispersiva no microscópio eletrônico de varredura (MEV-EDS).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da análise da macroestrutura, foi possível observar grãos predominantemente colunares, paralelos à direção de extração de calor, em ambas as ligas, como mostrado na Figura 2. Esta estrutura é resultado do processo de extração de calor que ocorreu na base da lingoteira de forma direcional. Nota-se que os grãos colunares da liga com adição de Ni são mais refinados. Possivelmente, isto ocorreu devido a afinidade química entre o Ni, presente na liga, e o Fe, proveniente da lingoteira, a qual melhorou a molhabilidade liga/molde [7]. Portanto, durante a solidificação com refrigeração a água, velocidades de solidificação mais altas podem ser atingidas e, em consequência, gerando grãos mais refinados.



Figura 1 – Dispositivo de solidificação direcional. Fonte autoral.

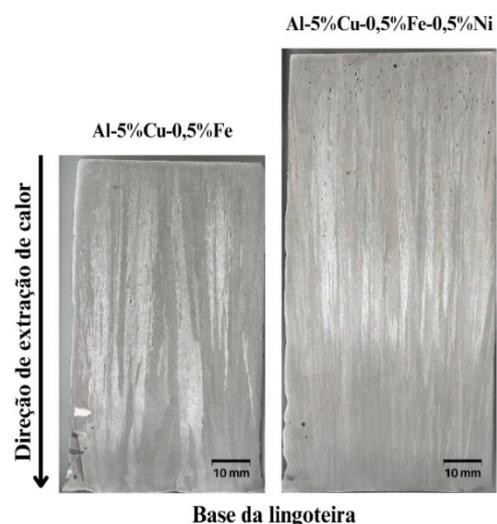


Figura 2 – Macroestruturas obtidas no processo de solidificação direcional.

Com o registro da temperatura ao longo da solidificação, foi possível traçar as curvas dos perfis térmicos, para diferentes posições dos lingotes das ligas Al-5%Cu-0,5%Fe e Al-5%Cu-0,5%Fe-0,5%Ni, apresentadas nas Figuras 3 e 4, respectivamente. Nota-se em ambas as ligas que as posições próximas à superfície de extração de calor dos lingotes apresentaram variações mais acentuadas de temperatura, ou seja, maiores valores de taxa de resfriamento e velocidade de solidificação – como apresentado no gráfico da Figura 7.

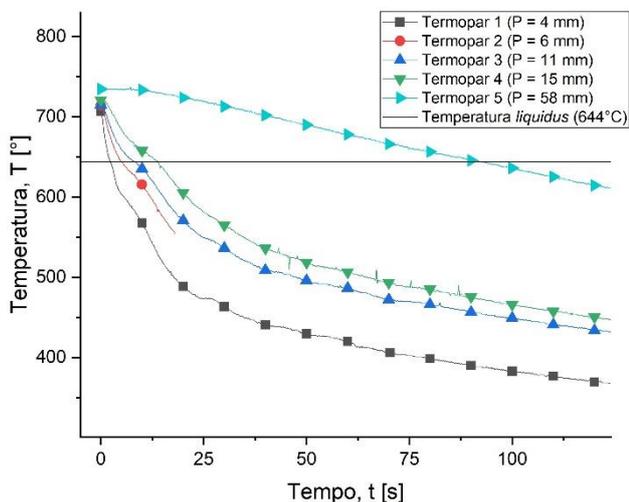


Figura 3 – Curva Temperatura vs Tempo dos perfis térmicos de temperatura da liga Al-5%Cu-0,5%Fe.

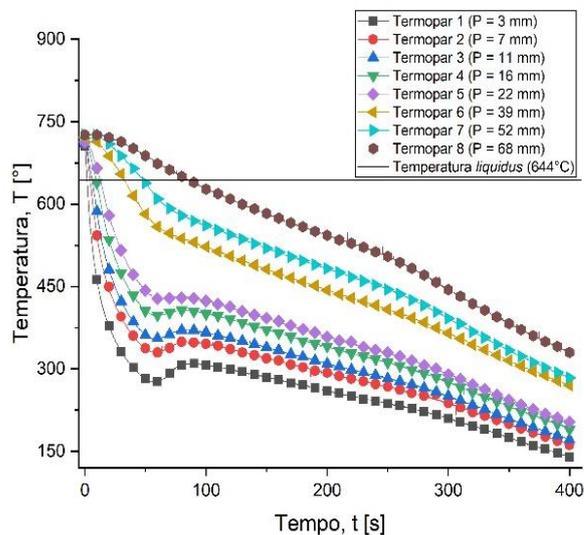


Figura 4 – Curva Temperatura vs Tempo dos perfis térmicos de temperatura da liga Al-5%Cu-0,5%Fe-0,5%Ni.

A partir das imagens obtidas no microscópio óptico, foi possível observar uma microestrutura dendrítica nas duas ligas, conforme Figura 5, onde é possível visualizar os ramos dendríticos secundários. Dessa forma, correlacionando o espaçamento dendrítico secundário com a velocidade de solidificação (Figura 6), observa-se uma diminuição de  $\lambda_2$  com o aumento de  $v$ . Verifica-se que as duas ligas analisadas se comportaram obedecendo à equação experimental  $\lambda_2 = 15 \cdot v^{-2/3}$ , cujo expoente  $-2/3$  é coerente com a aproximação descrita anteriormente por Bouchard e Kirkaldy [8]. Também foi feita uma comparação com a liga Al-5%Cu, estudada anteriormente por Rocha e colaboradores [9]. Neste caso, é possível observar que a adição de Fe e Ni refinou a microestrutura das ligas, com uma redução do espaçamento dendrítico secundário em torno de 51%. A partir da análise pontual por MEV-EDS (Figura 8), constatou-se a formação de solução sólida de Cu na matriz  $\alpha$ -Al – pontos #1 e #2 em (a) e (b) – e a precipitação das fases  $Al_7Cu_2Fe$  na liga Al-5Cu-0,5Fe – pontos #3, #4, #6 e #7 da Figura 8a e  $Al_2Cu$  nas duas ligas – ponto #5 da Figura 8a e pontos #4 e #5 da Figura 8b. Além disso, ocorreu a formação de intermetálico contendo Ni na liga Al-5Cu-0,5Fe-0,5Ni, que provavelmente pode ser  $Al_9FeNi$ . Isso possivelmente contribuiu para a melhora nas propriedades mecânicas da liga, como verificado por Lin e colaboradores [10].

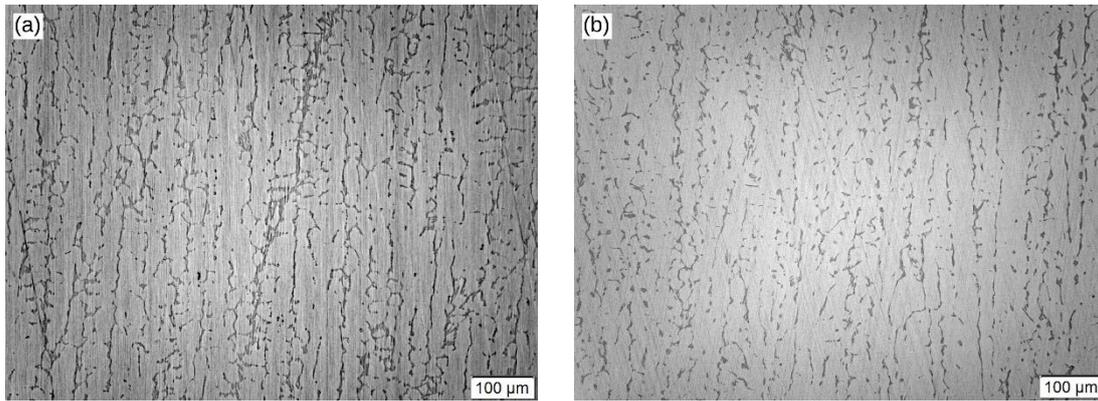


Figura 5 – Microestrutura das ligas estudadas para taxa de resfriamento de 5°C/s das ligas (a) Al-5%Cu-0,5%Fe e (b) Al-5%Cu-0,5%Fe-0,5%Ni.

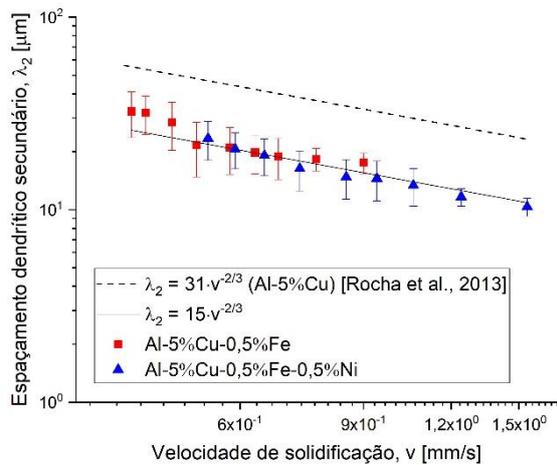


Figura 6 – Espaçamento dendrítico secundário em função da velocidade de solidificação.

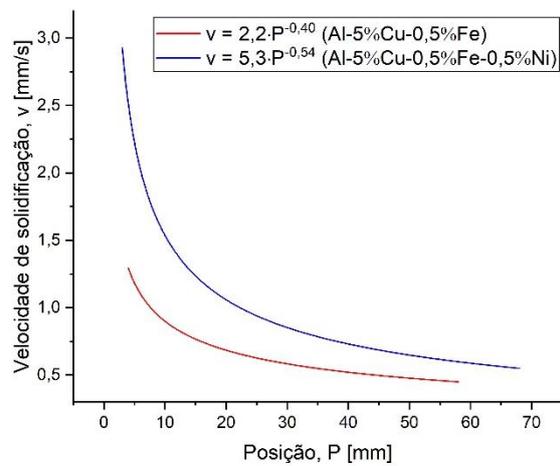
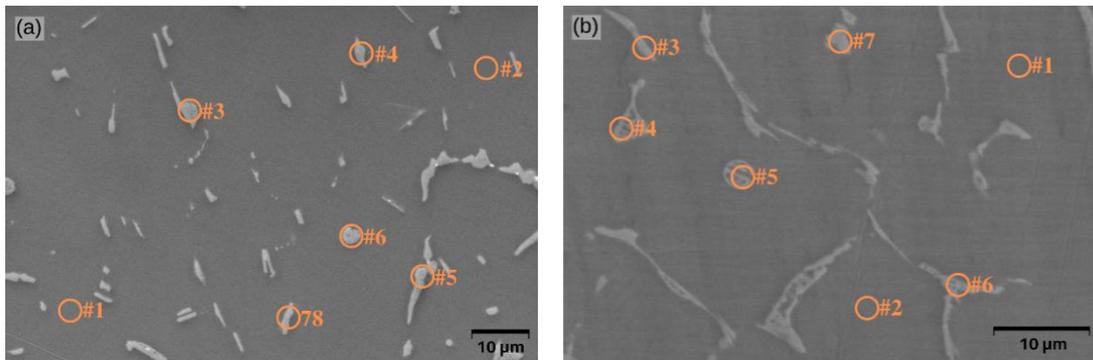


Figura 7 – Curvas de Velocidade de solidificação vs Posição.



Posição	wt.% Al	wt.% Fe	wt.% Cu
#1	96,05	--	3,95
#2	97,30	--	2,70
#3	59,37	2,09	38,54
#4	65,78	4,93	29,30
#5	54,98	--	45,02
#6	60,71	6,64	32,50
#7	65,91	9,86	24,23

Posição	wt.% Al	wt.% Fe	wt.% Ni	wt.% Cu
#1	97,58	--	--	2,42
#2	98,29	--	--	1,71
#3	71,29	3,29	3,07	22,35
#4	69,65	--	--	30,35
#5	79,76	--	--	20,24
#6	83,57	1,35	1,16	13,93
#7	79,07	2,28	1,17	17,48

Figura 8 – Análise por MEV-EDS das ligas (a) Al-5%Cu-0,5%Fe e (b) Al-5%Cu-0,5%Fe-0,5%Ni.

## CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, conclui-se que as ligas Al-5%Cu-0,5%Fe e Al-5%Cu-0,5%Fe-0,5%Ni apresentaram grãos colunares e microestrutura dendrítica. A relação entre o espaçamento dendrítico secundário e a velocidade de solidificação das ligas apresentou expoente  $-2/3$ , coerentes com a aproximação da lei experimental determinada em estudos anteriores. Além disso, os resultados da análise por MEV-EDS indicaram que a adição de Ni proporcionou a formação de uma fase contendo Fe e Ni ( $Al_9FeNi$ ), reduzindo a porcentagem da fase deletéria  $Al_7Cu_2Fe$  e potencialmente contribuindo para a melhora nas propriedades mecânicas da liga.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AFRA, **Aircraft Fleet Recycling Association**. 2014. Disponível em <<http://www.afraassociation.org/>>. Acesso em 14 de abril de 2022.
- [2] Mahinroosta, M.; Allahverdi, A. Hazardous aluminum dross characterization and recycling strategies: A critical review. **Journal of Environmental Management**, v. 223, p. 452-468, 2018.
- [3] Goulart, P.R.; Spinelli, J.E.; Cheung, N.; Garcia, A. The effects of cell spacing and distribution of intermetallic fibers on the mechanical properties of hypoeutectic Al-Fe alloys. **Materials Chemistry and Physics**, v. 119, p. 272-278, 2010.
- [4] Cinkilic, E.; Ridgeway, C.D.; Yan, X.; Luo, A.A. A formation map of iron-containing intermetallic phases in recycled cast aluminum alloys. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 50, p. 5945-5956, 2019.
- [5] Liu, K.; Cao, X.; Chen, X.-G. Tensile properties of Al-Cu 206 cast alloys with various iron contents, **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 45, p. 2498-2507, 2014.
- [6] Böyük, U., Engin, S., Kaya, H., Maraşlı, N. Effect of solidification parameters on the microstructure of Sn-3.7Ag-0.9Zn solder. **Materials Characterization**, v. 61, p. 1260-1267, 2010.
- [7] Kakitani, R.; Cruz, C. B.; Lima, T. S.; Brito, C.; Garcia, A.; Cheung, N. Transient directional solidification of a eutectic Al-Si-Ni alloy: Macrostructure, microstructure, dendritic growth and hardness. **Materialia**, v. 7, p. 100358, 2019.
- [8] Bouchard, D.; Kirkaldy, J.S. Prediction of dendrite arm spacings in unsteady-and steady-state heat flow of unidirectionally solidified binary alloys. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 28, p. 651-663, 1997.
- [9] Rocha, O.L.; Siqueira, C.A.; Garcia, A. Heat flow parameters affecting dendrite spacings during unsteady-state solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 34, p. 995-1006, 2003.
- [10] Lin, B.; Zhang, W.; Zheng, X.; Zhao, Y.; Lou, Z.; Zhang, W. Developing high performance mechanical properties at elevated temperature in squeeze cast Al-Cu-Mn-Fe-Ni alloys. **Materials Characterization**, v. 150, p. 128-137, 2019.