

Estudo Experimental da Adição de Cobre no Alumínio e seus Efeitos na Macro/Microestrutura Formada

Janayna Jasmin Passos, janajpassos@gmail.com¹

Alexandre Furtado Ferreira, furtado@metal.eeimvr.uff.br¹

Roberto Carlos Sales, rcsalesvr@gmail.com¹

Thamara Cristina Santos de Oliveira da Silva, tha_cris@yahoo.com¹

Thiago Alves de Souza, eng.metalthiago@hotmail.com¹

Wysllan Garção, wysllan.lima@ifrrj.edu.br¹

Wemberson Bitencourt Chrisóstimo, wembersonbc@uol.com.br¹

¹Universidade Federal Fluminense, Av. dos Trabalhadores 420 - Vila Santa Cecília 27255-125, Volta Redonda-RJ.

Resumo: É notória a importância do processo de solidificação em metais e ligas metálicas, uma vez que este determina as propriedades do produto final. O alumínio possui uma aplicabilidade no mundo moderno, podendo originar desde simples utensílios até partes fundamentais de aviões. A liga de alumínio-cobre é fortemente empregada na indústria aeronáutica, de transporte, em máquinas e equipamentos e também em peças usinadas e forjadas devido a sua alta resistência mecânica, alta ductibilidade e boa usinabilidade. O presente trabalho tem como objetivo estudar e caracterizar os efeitos na macroestrutura e microestrutura do alumínio com adição de cobre, através do processo de solidificação unidirecional ascendente em regime transiente de extração de calor, verificando a existência de possíveis mudanças relevantes ocasionadas pela presença do soluto. A composição da liga binária estudada será Al-5%Cu. A metodologia consiste em preliminarmente avaliar o comportamento do alumínio puro durante o processo de solidificação e subsequentemente adicionar cobre e avaliar a relevância das modificações provocadas. Na primeira etapa, o alumínio comercialmente puro será fundido no forno tipo mufla e posteriormente será vazado no molde inserido na lingoteira colocada no forno de solidificação vertical unidirecional ascendente refrigerado a água. Este molde é do tipo bipartido e possui oito termopares tipo K fixados em posições espaçadas de 0,5, 10, 15, 20, 35, 45, 60 e 85mm para monitoramento das temperaturas e assim possibilitando a determinação das curvas de resfriamento. As curvas de temperatura em função do tempo para cada termopar serão geradas e a partir delas as variáveis térmicas são determinadas. O mesmo procedimento será realizado na etapa de fusão e solidificação da liga de alumínio com 5% de cobre. Após a solidificação e a determinação dos parâmetros térmicos do alumínio comercialmente puro e da liga de Al-5%Cu, há o preparo das amostras para a realização da micrografia e macrografia, através de corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico. Finalmente, com a obtenção dos dados experimentais, são apresentadas as análises com os valores obtidos para o alumínio comercialmente puro e para a liga Al-5%Cu confrontando os resultados e determinando os efeitos da adição do cobre e a relação das variáveis térmicas com as propriedades dos materiais solidificados.

Palavras-chave: ligas binárias, Al-Cu, solidificação unidirecional, microestrutura, macroestrutura.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com ABAL (2007) alumínio é um material que possui uma ampla aplicação na engenharia, arquitetura e indústrias em geral. Produzido comercialmente há cerca de 150 anos, o alumínio possui propriedades e características responsáveis por sua versatilidade, tal como resistência a corrosão, baixo peso específico, baixo ponto de fusão, entre outras. Na sociedade contemporânea o alumínio está entre os três metais mais utilizados, ao lado do Aço e do Cobre. Em 1945, o primeiro lingote de alumínio no Hemisfério Sul foi produzido, em Minas Gerais, na fábrica Elquisa localizada na cidade de Ouro Preto.

O presente trabalho destacará as ligas de alumínio-cobre, que apresentam, entre outras características, elevada resistência mecânica combinada com baixo peso. Tais características são dependentes do processo de solidificação.

Gomes (2012) afirma que a solidificação é um dos importantes caminhos para o processo de produção de materiais metálicos, principalmente as ligas. Ao ser determinada a composição da liga, o desenvolvimento do processo de solidificação irá definir a microestrutura resultante, assim como as características mecânicas do produto final, uma vez que o tamanho de grão, espaçamentos dendríticos, microsegregação, estão ligadas as condições de solidificação.

Garcia (2001) atesta que as variáveis térmicas do processo de solidificação são de total importância para determinação das propriedades finais da liga solidificada.

Rosa (2007) enfatiza, em sua pesquisa sobre estruturas celulares na solidificação unidirecional transitória, que manipulando as variáveis térmicas no processo de solidificação consegue-se controlar a microestrutura celular e assim sendo, pode-se produzir componentes fundidos, como a liga Pb-Sb estudada pela autora.

Em um estudo elaborado por Peres *et al.* (2014), abordando a solidificação direcional em condições fora de equilíbrio para as ligas de Al-Si, pode-se observar que, de acordo com as análises realizadas, o aumento da taxa de resfriamento na solidificação faz com que os espaçamentos dendríticos diminuam.

Segundo Garcia (2007), ao se compreender as estruturas formadas a partir do processo de solidificação é possível prever as propriedades mecânicas que o material final irá apresentar, porém a complexidade dos processos físicos e químicos envolvidos reforçam a necessidade de estudos cada vez mais aprofundados das variáveis de controle da solidificação, tais como, velocidade de solidificação, taxa de resfriamento, gradiente térmico frente à interface sólido/líquido, concentração e redistribuição de soluto.

Dehnavi *et al.* (2015) analisam o efeito da taxa de resfriamento ($\dot{T}$) e da adição de cobre em uma transformação eutética da massa fundida binária de Al-Cu através da análise da curva de resfriamento.

De acordo com Kaufman (1931), a composição das ligas determina o potencial para obter propriedades físicas e mecânicas específicas. O conteúdo da liga é projetado para produzir características que incluem a capacidade de proteção e as capacidades de desempenho desejadas. A interação de elementos de liga é reconhecida na promoção de fases microestruturais desejadas e de soluções sólidas para o desenvolvimento dessas propriedades.

Em outro estudo realizado por Ferreira *et al.* (2017), sobre simulação da velocidade de crescimento dendrítico em ligas binárias Al-Cu, verifica-se que as mudanças na concentração de cobre afetam a velocidade de crescimento da dendrita. Isto ocorre pois o soluto tende a reduzir a mobilidade da interface.

Em vista da grande importância e ampla aplicabilidade das ligas de alumínio-cobre, este trabalho propõe o estudo dos efeitos da adição de cobre em alumínio, verificando a dependência das propriedades mecânicas com parâmetros do processo de solidificação, assim como as modificações sofridas na macro e microestrutura devido a adição do cobre no alumínio.

O trabalho proposto terá como diferencial a análise e estudo do comportamento, primeiramente, do alumínio puro durante a solidificação e posteriormente da liga Al-5%Cu. Ao longo de todo processo serão coletados dados dos efeitos que a adição de cobre causa na macro e microestrutura do alumínio.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O processo experimental tem como primeiro passo a fusão do alumínio comercialmente puro colocando-o em um cadinho preparado com alumina e introduzindo-o no forno tipo mufla, com uma temperatura acima da temperatura de fusão. Neste trabalho foi utilizada uma temperatura de 800°C. O preparo do molde que irá no forno de solidificação deverá ser feito com antecedência, visto que a alumina requer um tempo de secagem que aproximadamente 48 horas. O molde é do tipo bipartido e possui inseridos oito termopares tipo K em posições espaçadas de 0,5, 10, 15, 20, 35, 45, 60 e 85 mm, a partir da base, para monitoramento das temperaturas e assim possibilitando a determinação das curvas de resfriamento. O metal fundido será vazado no molde inserido no forno de solidificação vertical unidirecional ascendente refrigerado a água.

O mesmo ocorre para a etapa da liga de alumínio-cobre, porém, após a fusão, retira-se o cadinho do forno e mistura-se manualmente a liga a fim de obter perfeita homogeneização da mesma. Antes de vaziar a liga no molde inserido no forno de solidificação unidirecional ascendente, faz-se o resfriamento lento, com a finalidade de verificar as temperaturas *liquidus* e *solidus*, que compreendem o intervalo de solidificação, obtidos experimentalmente. Este resfriamento é feito através da inserção de um termopar no cadinho com a liga e através da verificação da temperatura obtida por tal termopar durante o resfriamento natural e gradativo. Após a realização desta etapa, a liga é refundida e vazada no molde inserido no forno de solidificação.

Os termopares inseridos ao longo do molde fornecerão os dados da temperatura durante todo processo (tanto para o alumínio puro, quanto para a liga) a fim de determinar o perfil térmico da solidificação. Através do software Tecplot serão geradas curvas de temperatura em função do tempo para cada termopar. A partir destas curvas as variáveis térmicas poderão ser determinadas. São elas: velocidade de solidificação (VL), gradiente térmico (GL) e taxa de resfriamento ($\dot{T}$).

Para obter as variáveis térmicas, segundo Goulart (2010), deve-se primeiro determinar o tempo de passagem da isoterma *liquidus* (T_L). Entende-se por isoterma a temperatura *liquidus*, para o caso da liga, ou temperatura de fusão quando se trata do alumínio comercialmente puro, ou também a interface sólido/líquido. A partir do procedimento experimental pode-se obter o resultado do par ordenado tempo e posição (t, posição) e então traçar um gráfico com os valores da posição (em metro) em função do tempo (em segundo). A partir da T_L da liga, ou T_f do alumínio comercialmente puro, traça-se uma reta paralela ao eixo correspondente ao tempo e assim das intersecções dessa reta com as respectivas curvas de resfriamento, em cada uma das posições dos termopares (P), em metro, obtêm-se os tempos correspondentes, conforme a Eq. (1).

$$P=f(t)$$

(1)

Ainda de acordo com Goulart (2010), ao derivar a equação P em função do tempo obtêm-se a velocidade de deslocamento da isoterma, conforme Eq. (2). Entende-se por velocidade de solidificação (V_L) a velocidade que a interface sólido/líquido avança durante o processo de solidificação. A equação gerada através da derivada será em função do tempo. Com a equação da posição pode-se isolar o tempo e igualar a equação da velocidade, gerando assim uma nova equação da velocidade em função do tempo de passagem da interface sólido/líquido, com unidade em m/s.

Para determinar a velocidade em função da posição dos termopares, basta pegar a equação gerada P(t), isolar a variável tempo (t) e substituir na equação da velocidade em função do tempo.

$$V_L = \frac{dP}{dt} \quad (2)$$

Meza (2012) afirma que taxa de resfriamento ($\dot{T}$), em K/s, refere-se à variação de temperatura, em graus Kelvin, pela variação do tempo, em segundos, imediatamente antes e depois de T_{Liquidus} durante o processo de solidificação e está representada pela Eq. (3).

$$\dot{T} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3)$$

O gradiente térmico (G_L) é uma expressão que, segundo Rosa (2001), irá designar a variação de temperatura no líquido junto a isoterma líquida e está representada pela Eq. (4). Para esta equação divide-se a taxa de resfriamento, em K/s, pela velocidade de passagem da isoterma, em m/s. Portanto a unidade do gradiente térmico será em graus Kelvin por metro (K/m).

$$G_L = \frac{\dot{T}}{V_L} \quad (4)$$

Após a solidificação do alumínio comercialmente puro e da liga de Al-5%Cu e da obtenção dos parâmetros térmicos, deve-se preparar as amostras para a realização da micrografia e macrografia, através de corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico. A análise macroestrutural será realizada a olho nú, através de corte no sentido longitudinal. Posteriormente ao corte, será feito lixamento, polimento e ataque químico a fim de revelar uma possível macroestrutura coquilhada, colunar, equiaxial e até mesmo uma região colunar-equiaxial. Na micrografia, o corte será feito de forma transversal e posteriormente realizará lixamento, polimento e ataque químico a fim de revelar uma possível microestrutura dendrítica ou celular. Será realizada a contagem de grão no caso de uma microestrutura celular. Para uma microestrutura dendrítica, haverá análise do espaçamento dendrítico.

Para determinação do tamanho do grão médio das amostras aplica-se a técnica dos interceptos lineares ou também conhecida como técnica de Heyn para a análise das imagens de acordo com ASTM (2004). Tal técnica fundamenta-se em estimar o tamanho de grão médio através da contagem do número de grãos interceptados por uma ou mais linhas retas. Estas linhas devem ser suficientemente longas para conter 50 interseções. A Equação (5) estima o tamanho de grão médio (G) em função do número de contagem de interseções por unidade de comprimento da linha teste utilizada (PL).

$$G = (6,643856 \log_{10} PL) - 3,288 \quad (5)$$

Segundo a ASTM (2004), a escala que estima o tamanho do grão é inversa, ou seja, quanto maior o grão menor será o valor que o representa. Este valor é adimensional. Neste trabalho foi utilizado um aumento de 50 vezes e a linha teste varreu toda a amostra, devido ao comprimento da mesma.

Para determinar o espaçamento dendrítico serão escolhidos três campos representativos em cada amostra e fotografados com aumento de 100 e 50 vezes, no microscópio óptico. Desta forma será gerada quarenta e oito imagens que serão avaliadas através do software Goitacá, fornecendo cinco medidas de espaçamento dendrítico para cada imagem.

Após a obtenção dos dados experimentais será realizada uma análise com os valores obtidos para o alumínio comercialmente puro e para a liga a fim de confrontar os resultados e determinar os efeitos da adição do cobre e a relação das variáveis térmicas com as propriedades dos materiais solidificados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a solidificação do alumínio comercialmente puro obteve-se o gráfico demonstrado na Fig. 1. A temperatura de vazamento, ou seja, temperatura acima da $T_{\text{fusão}}$ a qual permite o metal líquido se acomodar no molde antes do início da solidificação, foi de aproximadamente 740°C. Por sua vez, a temperatura de fusão é de aproximadamente 659°C. Pode-se perceber que a inclinação da curva será maior para os termopares mais próximos da base. Isto ocorre pelo fato de estarem mais próximos a temperatura de fusão.

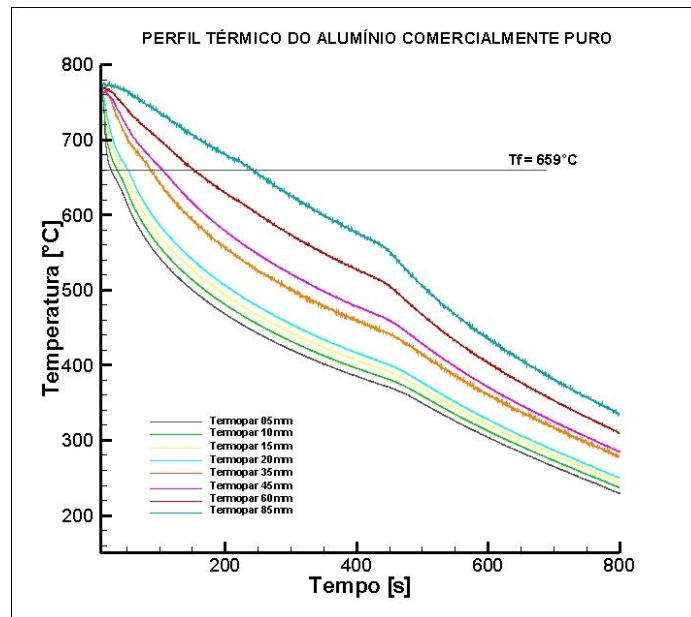


Figura 1. Perfil térmico do alumínio comercialmente puro.

Para determinar tais variáveis é necessário conhecer a equação da posição da temperatura de fusão em função do tempo. Como dito anteriormente, esta equação se dá através da intercessão da reta da temperatura de fusão com as curvas dos termopares. Para cada intercessão haverá um tempo de passagem da interface sólido/líquido e assim pode-se determinar a equação da posição desta interface ao longo do lingote em função do tempo de solidificação, de acordo com a Fig. 2.

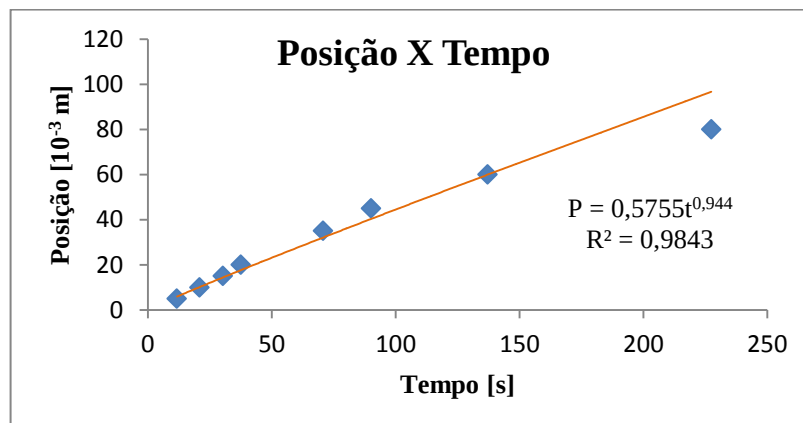


Figura 2. Gráfico da posição em função do tempo.

Através do gráfico da Fig. 2, observa-se que no início da solidificação o deslocamento é apreciável em função do tempo, devido à proximidade com a base refrigerada. À medida que o tempo passa, a interface sólido/líquido se desloca para pontos mais afastados, portanto o deslocamento desta isoterma vai se tornando menor e tendendo a um valor constante. Isto ocorre, pois, à medida que o metal líquido se solidifica, a fração sólida aumenta e consequentemente a resistência térmica também.

Derivando a equação da posição determina-se a velocidade em função do tempo para cada termopar. Ao isolar o “t” da função $P(t)$ e substituir na equação da velocidade, determina-se a mesma em função da posição. Após a determinação das variáveis térmicas, os valores obtidos para cada posição são demonstrados na Tab.1.

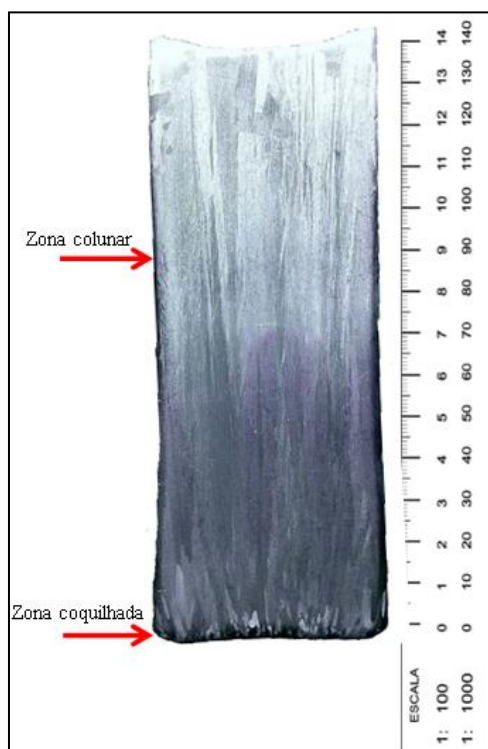
Tabela 1. Variáveis térmicas obtidas a partir dos dados experimentais alcançados durante a solidificação unidirecional ascendente do alumínio comercialmente puro.

Posição (10^{-3}m)	Velocidade (10^{-3}m/s)	Taxa de Resfriamento (K/s)	Gradiente Térmico (10^3K/m)
5.	0,48	2,96	6,20
10	0,46	2,04	4,44
15	0,45	1,64	3,66
20	0,44	1,40	3,19
35	0,43	1,04	2,44
45	0,42	0,91	2,16
60	0,41	0,78	1,88
85	0,40	0,64	1,59

Pelos dados demonstrados na Tab. 1, observa-se que no início da solidificação a velocidade é alta e à medida que o processo avança ela vai diminuindo tendendo a um valor constante. Pode-se observar que nas posições mais próximas a base refrigerada há uma velocidade maior que nas posições mais afastadas. Isto ocorre devido ao aumento da fração sólida e consequentemente da resistência térmica. Este comportamento converge com o que foi discutido sobre o gráfico da Fig. 2.

Outro ponto observado é que a taxa de resfriamento decresce para as posições mais afastadas da base refrigerada, mantendo similaridade com o comportamento da velocidade de solidificação. De maneira análoga, o gradiente térmico tem valor elevado para posições perto da base refrigerada e vai decrescendo à medida que se afasta. Este comportamento, assim como o das demais variáveis térmicas analisadas é devido ao aumento da fração sólida e consequentemente o aumento da resistência térmica.

A macroestrutura encontrada na solidificação do alumínio comercialmente puro é 100% colunar, com uma pequena região coquilhada perto da base, onde há nucleação mais intensa devido ao contato do metal líquido com a base refrigerada, de acordo com a Fig. 3. Esta estrutura colunar caracteriza a solidificação unidirecional ascendente, uma vez que os grãos colunares tendem a crescer na direção da extração de calor. Sendo assim, este tipo de estrutura comprova a direcionalidade da solidificação. A Figura 3 possui uma escala a fim de demonstrar o tamanho do lingote solidificado, aproximadamente $14 \times 10^{-2}\text{ m}$. A escala também facilita a visualização das posições dos termopares ao longo do lingote.

**Figura 3. Macrografia do alumínio comercialmente puro.**

A microestrutura do alumínio comercialmente puro é celular, com grãos mais refinados perto da base, pois existe uma taxa de resfriamento maior, portanto maior taxa de nucleação. Grãos mais refinados oferecem ao material melhores propriedades mecânicas. À medida que se afasta da base, a taxa de resfriamento vai diminuindo, portanto os grãos são maiores e mais grosseiros. A Figura 4 ilustra as oito amostras analisadas, correspondentes às posições de $5 \cdot 10^{-3}\text{m}$ (amostra zero) até $85 \cdot 10^{-3}\text{m}$ (amostra 7). Já a Tabela 2 apresenta os resultados do tamanho médio do grão em função da

posição de cada termopar e, como pode ser observado, o tamanho de grão aumenta conforme se afasta da base refrigerada.

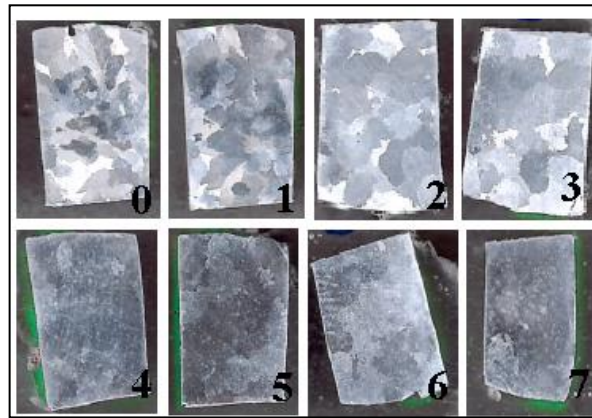


Figura 4. Amostras micrográficas.

Tabela 2. Tamanho médio de grão para cada posição dos termopares.

Posição (10^{-3} m)	Tamanho de Grão
5	7,9
10	7,3
15	5,9
20	3,4
35	2,2
45	2,1
60	1,1
85	1

Foi realizada a fundição da liga de alumínio com 5% de cobre e assim sendo obteve-se a curva de resfriamento lento, conforme Fig. 5. A temperatura que se dá início a solidificação, também conhecida como temperatura líquidus (TL) e a temperatura que finda o processo de solidificação, também conhecida como temperatura sólidus (TS) são identificadas no gráfico da curva de resfriamento lento devido ao intervalo de variação de inclinação da curva. O primeiro patamar da curva representa a Tliquidus e o segundo patamar representa a Tsolidus. O valor encontrado para TL foi de aproximadamente 646,38°C enquanto TS foi de aproximadamente 543,34°C. Esses valores foram obtidos experimentalmente. Na Figura 6 tem-se o diagrama de fases calculado através da composição da liga a partir do software Thermocalc. Os valores encontrados experimentalmente possuem coerência com os valores obtidos através do diagrama de fases, onde a TL foi de 647,41°C. O diagrama de fases calculado pelo software Thermocalc atesta a correta composição da liga desenvolvida experimentalmente.

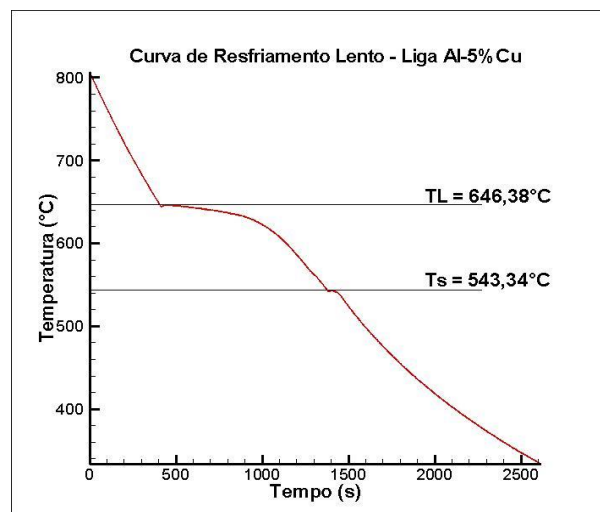


Figura 5. Curva de resfriamento lento da liga Al-5%Cu.

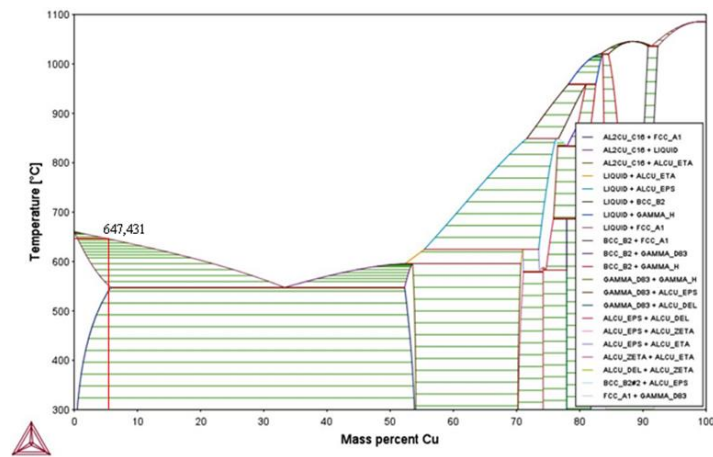


Figura 6. Diagrama de fases da liga alumínio-cobre obtida no software Termocalc.

Após a solidificação da liga de alumínio com adição de cobre obteve-se o gráfico demonstrado na Fig 7. A temperatura de vazamento, ou seja, temperatura acima da $T_{líquidus}$ a qual permite o metal líquido se acomodar no molde antes do início da solidificação, foi de aproximadamente 760°C. Por sua vez, a temperatura líquidus é de aproximadamente 646°C. Pode-se perceber que a inclinação da curva será maior para os termopares mais próximos da base. Isto ocorre pelo fato de estarem mais próximos a temperatura líquidus.

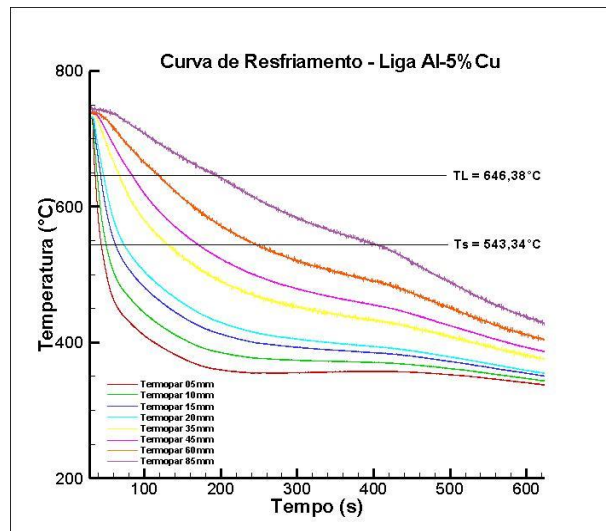


Figura 7. Curva de resfriamento da liga Al-5%Cu.

Para determinar as variáveis térmicas fez-se a equação da posição da temperatura de fusão em função do tempo de maneira análoga a do alumínio comercialmente puro, conforme Fig. 8.

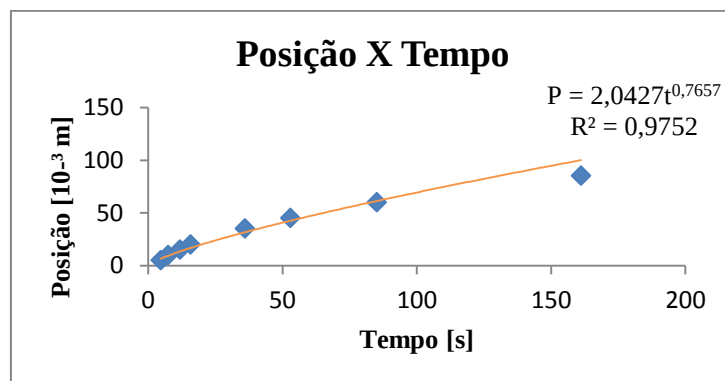


Figura 8. Gráfico da posição em função do tempo para a liga Al-5%Cu.

Através do gráfico da Fig. 8, observa-se que no início da solidificação o deslocamento é significativo em função do tempo, devido à proximidade com a base refrigerada. À medida que o tempo passa, a interface sólido/líquido se desloca para pontos mais afastados, portanto o deslocamento desta isoterma vai se tornando menor e tendendo a um valor constante. Isto ocorre, pois, à medida que o metal líquido se solidifica, a fração sólida aumenta e consequentemente a resistência térmica também.

Derivando a equação da posição determina-se a velocidade em função do tempo para cada termopar. Ao isolar o “t” da função $P(t)$ e substituir na equação da velocidade, determina-se a mesma em função da posição. Após a determinação das variáveis térmicas, os valores obtidos para cada posição são demonstrados na Tab.3.

Tabela 3. Variáveis térmicas obtidas a partir dos dados experimentais alcançados durante a solidificação unidirecional ascendente da liga Al-5%Cu.

Posição (10^{-3} m)	Velocidade (10^{-3} m/s)	Taxa de Resfriamento (K/s)	Gradiente Térmico (10^3 K/m)
5	1,19	16,29	13,70
10	0,96	13,06	13,58
15	0,85	8,71	10,25
20	0,78	5,85	7,52
35	0,66	2,76	4,21
45	0,61	1,74	2,86
60	0,56	1,16	2,09
85	0,50	0,49	0,98

A macroestrutura obtida na solidificação unidirecional ascendente da liga Al-5%Cu pode ser vista na Fig.9.

Observa-se inicialmente uma zona colunar com grãos alongados na direção do fluxo de calor. Em aproximadamente 12 cm inicia-se a zona de transição colunar-equiaxial e logo acima a zona equiaxial, onde encontram-se grãos equiaxiais de orientação cristalográfica aleatória.

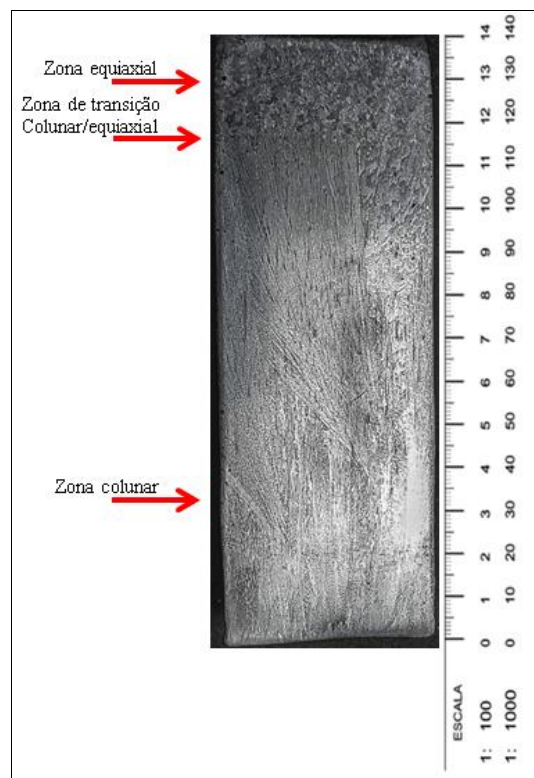


Figura 9. Macrografia da liga Al-5%Cu.

Na micrografia da liga de alumínio-cobre espera-se uma microestrutura dendrítica. As velocidades de solidificação são relativamente altas no começo do lingote, fazendo com que a célula comece a mudar suas características. A microestrutura, à medida que se distancia da base, ficará menos refinada. Espera-se obter uma microestrutura dendrítica, cujos espaçamentos vão aumentando conforme se afasta da base. Isto ocorre, pois os espaçamentos dendríticos são favorecidos a baixa velocidade, e como visto anteriormente, conforme se afasta da base refrigerada, a velocidade de solidificação vai diminuindo. Portanto, é esperado maiores espaçamentos dendríticos nas

posições mais afastadas da base. A taxa de resfriamento também influencia nos espaçamentos dendríticos. Assim como a velocidade, a taxa vai diminuindo conforme se afasta da base.

4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que:

- Para a solidificação unidirecional ascendente tanto o alumínio comercialmente puro quanto a liga Al-5%Cu apresentaram variáveis térmicas de mesmo padrão, ou seja, velocidade de solidificação, taxa de resfriamento e gradiente térmico com valores maiores no início da solidificação, perto da base refrigerada, decrescendo à medida que a interface sólido/líquido se afasta da base e tendendo a valores constantes.
- Ainda na análise das variáveis térmicas, observa-se que a adição de cobre afeta diretamente as grandezas. Os valores para a liga Al-5%Cu são maiores que os do alumínio comercialmente puro. Pode-se comprovar em várias literaturas que o aumento do teor de cobre provoca aumento nas variáveis térmicas durante a solidificação unidirecional.
- Com adição de cobre houve influência também na macrografia. A microestrutura totalmente colunar do alumínio comercialmente puro ocorre devido à ausência de soluto. Enquanto para a liga, a presença de soluto deu origem a zona equiaxial.
- A existência de cobre manifesta-se de forma atuante também na microestrutura. Devido à velocidade de solidificação do alumínio comercialmente puro ser relativamente baixa e com variações não tão significativas, encontra-se uma microestrutura celular. Na liga, a velocidade de solidificação é maior e com variações mais intensas, favorecendo a microestrutura dendrítica. Portanto este tipo de micrografia é esperado na liga Al-5%Cu do presente trabalho.
- O tamanho de grão é influenciado pela taxa de resfriamento. Como dito anteriormente, segundo a ASTM, a escala que estima o tamanho do grão é inversa, ou seja, quanto maior o grão menor será o valor que o representa. Desta maneira, observa-se que à medida que a taxa de resfriamento diminui, os grãos vão tornando-se maiores e mais grosseiros.

Depois de realizada uma análise comparativa entre as respostas obtidas durante a solidificação unidirecional ascendente do alumínio comercialmente puro e da liga Al-5%Cu, pode-se concluir que a adição de cobre como elemento de liga influencia de forma direta nas variáveis térmicas e desta forma na macro e microestrutura formada, indo de encontro com pesquisas encontradas em várias literaturas.

5. REFERÊNCIAS

- ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. “Fundamentos e aplicações do alumínio. Manual técnico”. São Paulo, SP, 68p., 2007.
- ASTM E112-96(2004), 2004, “Standard Test Methods for Determining Average Grain Size”, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Dehnavi, M., Kuhestani, F., Haddad-Sabzevar, M., 2015, “Cooling curve analysis in binary Al-Cu Alloys: Part I- effect of cooling rate and copper content on the eutectic formation”. Association of Metallurgical Engineers of Serbia, v 21, p 195 – 205.
- Ferreira, A. F. et al., 2017, “Simulation of the Dendritic Growth Velocity for Binary Alloy Al-Cu in the Undercooled System.” International Research Journal of Materials Sciences and Applications, v 1, p. 1-9.
- Garcia, A., 2007, “Solidificação: Fundamentos e Aplicações”. Editora UniCamp. 2ed, Campinas, SP.
- Garcia, A.; Spim, J. A.; Santos, C. A., 2001, “Ensaio dos materiais.” Rio de Janeiro: LTC.
- Gomes, L. G., 2012, “Microestrutura Dendrítica, Macrosegregação e Microporosidade na Solidificação de Ligas Ternárias Al-Si-Cu”. Tese Doutorado. Universidade de Campinas, Campinas.
- Goulart, R. P., 2010, “Caracterização da Microestrutura de Solidificação de Ligas Al-Fe e Correlação com Propriedades Mecânicas”. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas.
- Kaufman, G. J., 1931, “Introduction to Aluminum Alloys and Tempers”. United States of America: ASM international.
- Meza, S. E., 2012, “Modelagem Analítica e Numérica da Solidificação das Ligas Binárias: Análise de Fatores de Influência”. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP.
- Peres, M. D., Siqueira C. A., Garcia A., 2014, “Macrostructural and microstructural development in Al-Si Alloys directionally solidified under unsteady-state conditions”. Journal of Alloys and Compounds 381, p 168-181.
- Rosa, D. M., 2007, “Estruturas celulares, transição celular/dendrítica e estruturas dendríticas na solidificação unidirecional transitória”. Tese de Doutorado – UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas. Campinas.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores Janayna Jasmin Passos, Alexandre Furtado Ferreira, Roberto Carlos Sales, Thamara Cristina Santos de Oliveira da Silva, Thiago Alves de Souza, Wysllan Garção e Wemberson Bitencourt Chrisóstimo são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

Experimental Study of Addition of Copper in Aluminum and its Effects on Formed Macro / Microstructure

Janayna Jasmin Passos, janajpassos@gmail.com¹

Alexandre Furtado Ferreira, furtado@metal.eeimvr.uff.br¹

Roberto Carlos Sales, rcsalesvr@gmail.com¹

Thamara Cristina Santos de Oliveira da Silva, tha_cris@yahoo.com¹

Thiago Alves de Souza, eng.metalthiago@hotmail.com¹

Wysllan Garção, wysllan.lima@ifrrj.edu.br¹

Wemberson Bitencourt Chrisóstimo, wembersonbc@uol.com.br¹

¹Universidade Federal Fluminense, Av. dos Trabalhadores 420 - Vila Santa Cecília 27255-125, Volta Redonda-RJ.

Abstract: The importance of the solidification process in metals and metal alloys is notorious, since it determines the properties of the final product. The aluminum has an applicability in the modern world, being able to originate from simple utensils to fundamental parts of airplanes. Aluminum-copper alloy is heavily used in the aeronautics, transportation, machinery and equipment industries and also in machined and forged parts due to its high mechanical strength, high ductility and good machinability. The objective of this work is to study and characterize the effects on the macrostructure and microstructure of aluminum with addition of copper through the ascending unidirectional solidification process in a transient regime of heat extraction, verifying the existence of possible relevant changes caused by the presence of the solute. The composition of the binary alloy studied will be Al-5% Cu. The methodology consists of preliminarily evaluating the behavior of pure aluminum during the solidification process and subsequently adding copper and evaluating the relevance of the induced changes. In the first step, the commercially pure aluminum will be melted in the muffle furnace and will subsequently be cast into the mold inserted into the ingot mold placed in the upstream unidirectional vertical solidification furnace cooled by water. This mold is a two-part type and has eight K-type thermocouples fixed at spaced positions of 0.5, 10, 15, 20, 35, 45, 60 and 85mm for temperature monitoring and thus making it possible to determine the cooling curves. The temperature curves as a function of time for each thermocouple will be generated and from them the thermal variables are determined. The same procedure will be carried out in the step of melting and solidifying the aluminum alloy with 5% copper. After solidification and determination of the thermal parameters of commercially pure aluminum and Al-5% Cu alloy, samples are prepared for micrography and macrography by cutting, inlay, sanding, polishing and etching. Finally, with the experimental data, the analyzes with the values obtained for commercially pure aluminum and Al-5% Cu alloy are presented, comparing the results and determining the effects of copper addition and the relation of the thermal variables with the properties of the solidified materials.

Keywords: binary alloys, Al-Cu, unidirectional solidification, microstructure, macrostructure.