

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/337894010>

Influência do espaçamento dendrítico secundário na dureza da liga Cu-14Al-5Ni-5Fe obtida por solidificação unidirecional / Influence of the secondary dendritic spacing on the hardn...

Conference Paper · November 2019

CITATIONS

0

READS

25

7 authors, including:



Rogerio Teram

Federal Institute of Education, Science and Technology of São Paulo

3 PUBLICATIONS 2 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Mauricio Silva Nascimento

Federal Institute of Education, Science and Technology of São Paulo

8 PUBLICATIONS 9 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Antonio Augusto Couto

Universidade Presbiteriana Mackenzie

56 PUBLICATIONS 117 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Vinicius Torres dos Santos

Federal Institute of Education, Science and Technology of São Paulo

6 PUBLICATIONS 5 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Desenvolvimento de Correlações entre Variáveis Térmicas da Solidificação, Microestrutura e Propriedades Mecânicas em Ligas [View project](#)



Heat Treatment [View project](#)

Influência do espaçamento dendrítico secundário na dureza da liga Cu-14Al-5Ni-5Fe obtida por solidificação unidirecional

Influence of the secondary dendritic spacing on the hardness of the Cu-14Al-5Ni-5Fe alloy obtained by unidirectional solidification

Rogério Teram ¹, Givanildo Alves dos Santos ¹, Maurício Silva Nascimento ¹, Antonio Augusto Couto ^{2,3}, Vinicius Torres dos Santos ^{4,5} e Márcio Rodrigues da Silva ^{4,5}

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus São Paulo, Brasil. E-mail: rogerioteram@ifsp.edu.br; givanildo@ifsp.edu.br; mauricio.nascimento@ifsp.edu.br

²Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais – CCTM, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, Brasil. E-mail: acouto@ipen.br

³Departamento de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, UPM, Brasil.

⁴Engenharia de Pesquisa e Desenvolvimento, Termomecânica São Paulo S.A., Brasil. E-mail: vinicius.ts1@hotmail.com; marcio.rdrgrs.slv@gmail.com

⁵Centro Educacional da Fundação Salvador Arena, Brasil.

Resumo

O objetivo deste trabalho é analisar a influência do espaçamento dendrítico secundário, na dureza da liga Cu-14Al-5Ni-5Fe após a realização de processo de solidificação. A liga foi solidificada em um dispositivo de solidificação direcional ascendente sendo o calor extraído através de refrigeração à água em uma base de aço SAE 1020. As medições dos espaçamentos dendríticos secundários foram obtidas por meio de microscopia óptica e software acoplado. As variáveis térmicas de solidificação como velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* (V_L) e taxa de resfriamento (T_R) foram avaliadas em função da distância da superfície de extração de calor. A dureza e os espaçamentos dendríticos secundários foram correlacionados com as posições de termopares devidamente dispostos no lingote. Em função dos resultados obtidos, conclui-se que maiores taxas de resfriamento apresentam espaçamentos dendríticos secundários mais refinados que propiciam maiores valores de dureza.

Palavras chave: Liga Cu-14Al-5Ni-5Fe. Solidificação. Dureza. Espaçamento dendrítico secundário.

Abstract

The objective of this paper is to analyze the influence of the secondary dendritic spacing, on the hardness of the Cu-14Al-5Ni-5Fe alloy after the solidification process. The alloy was solidified in an ascending directional solidification device with the heat being extracted through water cooling on a SAE 1020 steel base. Measurements of secondary dendritic spacings were obtained by optical microscopy with coupled software. The solidification thermal variables such as *liquidus* isotherm displacement velocity (V_L) and cooling rate (T_R) were evaluated as a function of the distance of the heat extraction surface. The hardness and secondary dendritic spacings were correlated with the positions of thermocouples duly arranged in the ingot. Due to the results obtained, it was concluded that higher cooling rates have more refined secondary dendritic spacings that provide higher hardness values.

Keywords: Cu-14Al-5Ni-5Fe alloy. Solidification. Hardness. Secondary dendritic spacing.

1. Introdução

Condições severas de aplicação de materiais de engenharia e a crescente necessidade de redução de custos e de massa nos produtos atuais exigem desenvolvimentos de novas ligas.

O cobre puro possui excelente condutividade (elétrica e térmica) e elevada resistência à corrosão, porém sua utilização acaba sendo limitada pela baixa resistência mecânica, que apresenta valores de resistência à tração próximos de 170 MPa. Torna-se relevante, nesse caso, o estudo de ligas de cobre de modo a assegurar a sua excelente condutividade e resistência à corrosão, bem como obter propriedades mecânicas melhores ampliando assim seu campo de utilização.

O aumento do teor de alumínio em ligas comerciais do grupo bronze-alumínio-níquel pode ser uma alternativa para aumentar a dureza da liga com redução de massa específica e custo, uma vez que na liga proposta (Cu-14Al-5Ni-5Fe) são adicionados 4% em massa de alumínio e removidos 4% em massa de cobre em comparação com a liga comercial Cu-10Al-5Ni-5Fe.

Estudos sobre as transformações de fases que ocorrem durante a solidificação de uma liga são indispensáveis, tendo em vista que variáveis térmicas de solidificação como velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* (V_L) e a taxa de resfriamento (T_R) influenciam na formação das fases e dos intermetálicos.

A solidificação direcional ascendente consiste em resfriar um metal de baixo para cima. Isso é alcançado através do resfriamento da superfície inferior do molde evitando-se ao mesmo tempo a extração de calor pelas paredes laterais do molde [1] permitindo minimizar os efeitos de convecção no metal líquido [2].

Nas ligas de Cu-Al-Ni-Fe o componente alumínio é o principal elemento de liga com teor variando entre 8% e 13%. Maiores quantidades de alumínio são usadas para obter alta dureza e reduzir a ductilidade da liga. No entanto, altos níveis de alumínio permitem o surgimento da fase γ_2 que é prejudicial à resistência mecânica e a corrosão. Alguns elementos como o níquel e o ferro, combinam-se com o alumínio para formar fases complexas chamadas κ , evitando o surgimento do γ_2 . O níquel é adicionado em quantidades que variam de 1% a 7% e sua adição melhora a resistência à corrosão, aumenta a resistência mecânica e contribui para o aumento da resistência à erosão em ambientes com alta velocidade de fluxo de água. O ferro por sua vez é adicionado à liga para refinar a estrutura e aumentar a resistência. A baixa solubilidade do ferro a baixas temperaturas nessas ligas é a principal razão para o aparecimento de precipitados ricos em ferro, que podem ser combinados para produzir as propriedades mecânicas necessárias [3] *apud* [4].

As fases presentes na microestrutura das ligas de cobre alumínio níquel ferro são consideradas complexas, pois uma quantidade elevada de intermetálicos se formam durante o resfriamento [5], [6], [7], [8] *apud* [9]. As fases da liga estudada podem ser vistas no diagrama de fases do sistema cobre-alumínio com adição de 5% de níquel e 5% de ferro ilustrado na Figura 1. Considerando 14% (em massa) de alumínio, nota-se a presença de fases sólidas como alfa (α), beta (β), kappa (κ) e gama 2 (γ_2), as quais apresentam morfologias e composições químicas distintas, interferindo, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas da liga [3], [10], [11] *apud* [9].

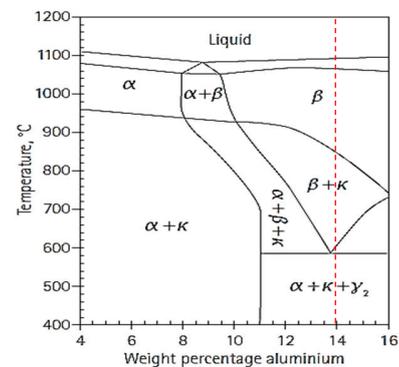


Figura 1. Diagrama pseudo binário parcial da liga Cu-Al com adição de 5% de níquel e 5% de ferro [8] *apud* [3].

O objetivo desse trabalho foi estudar a solidificação direcional ascendente da liga Cu-14Al-5Ni-5Fe através do monitoramento da temperatura em função do tempo em pontos específicos do molde de modo que se possa obter correlações entre V_L e T_R em função da distância da superfície de troca de calor (P); obter correlações entre dureza (HB) e as variáveis térmicas e a correlação entre dureza (HB) e o espaçamento dendrítico secundário.

2. Materiais e Métodos

O dispositivo de solidificação direcional ascendente tem formato cilíndrico (Figura 2), revestido internamente com material refratário e externamente com chapa de aço. O calor para manter o metal líquido aquecido antes do processo de resfriamento é gerado por resistências elétricas controladas por um painel externo. Dois tubos servem de suporte para a placa de troca de calor e a lingoteira, sendo o externo de aço SAE 1020 e o interno de aço inoxidável AISI 304. Entre estes dois tubos foi colocado cimento refratário para aumentar o isolamento no espaço interno do forno. Um tubo dentro dos dois tubos de suporte direciona o jato de água para uma placa responsável pela remoção do calor do metal fundido. Esta placa é de aço SAE 1020 com 5 mm de espessura. A superfície superior da placa, que estará em contato com o

metal líquido, foi lixada com lixas de até 600 *mesh*. A lingoteira, construída de aço inoxidável AISI 304, tem altura de 160 mm, diâmetro interno de 60 mm e externo de 76 mm. Para a aquisição dos dados de temperatura foram utilizados termopares tipo K posicionados a 4, 8, 12, 16, 35 e 53 mm em relação à posição da superfície superior da placa de troca de calor. Esses termopares foram conectados aos dispositivos de aquisição de dados NI 9212 e NI cDAQ 9171, ambos da marca *National Instruments*, responsáveis por enviar, via cabo USB, os dados coletados para um computador. Os dados de temperatura obtidos pelos termopares foram registrados na frequência de um dado por segundo.

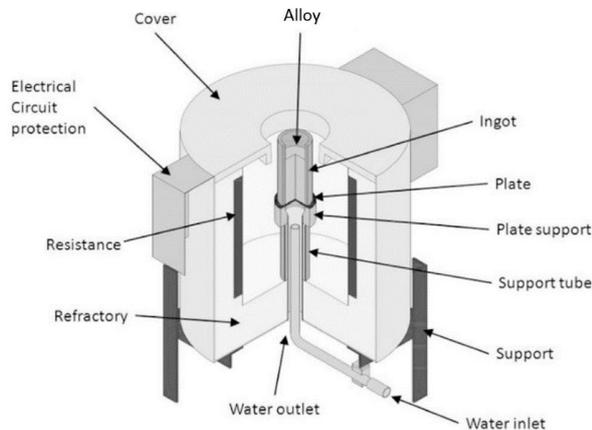


Figura 2. Ilustração esquemática do forno de solidificação unidirecional ascendente [12].

A liga foi aquecida à temperatura acima da temperatura *liquidus* em um forno elétrico tipo mufla, da marca Fortelab, utilizando um cadinho de carbetto de silício, da marca Corona, revestido internamente com cimento refratário tipo QF-180, da marca Unifrax. Após a fusão, o cadinho foi removido do forno e o metal líquido foi vazado na lingoteira revestida internamente com cimento refratário posicionada no dispositivo de solidificação direcional ascendente. O resfriamento do metal líquido dentro da lingoteira deu-se através de jato d'água na placa de troca de calor a uma vazão de 18 L/min. A composição química da liga foi analisada utilizando espectrometria por fluorescência de raios X (XRS) usando um espectrômetro rápido da marca Panalytical Magix.

A velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* (V_L) foi calculada pela derivação da função $P = f(t)$. Essa função é a relação entre a posição do termopar (P) e o intervalo de tempo entre o início do resfriamento da liga e o tempo em que a temperatura *liquidus* (T_L) é observada em cada termopar. Com isso, V_L corresponde à velocidade da passagem frontal de solidificação em cada termopar. Os valores da taxa de resfriamento (T_R) para

cada posição no termopar foram obtidos experimentalmente a partir dos valores de variação de temperatura em função do tempo, a uma temperatura antes e após a temperatura *liquidus* ($\Delta T/\Delta t$). Para análise metalográfica, amostras de seções transversais do lingote fundido foram selecionadas. As superfícies analisadas das amostras foram selecionadas de diferentes posições (P) em relação à superfície de troca de calor. Estas distâncias foram de 4, 8, 12, 16, 26, 35 e 53 mm. Cada amostra foi embutida em baquelite, lixada com lixas de diferentes granulações e polida com pasta diamantada de 6 μm . O reagente utilizado para revelar a microestrutura consistiu de uma solução de 10,7% de HCl, 3,4% de Fe_3Cl e 85,9% de água destilada. O tempo de reação foi de 25 segundos. Um microscópio óptico, modelo AxioVert.A1 da marca Zeiss, foi usado para medição dos espaçamentos dendríticos secundários. As características mecânicas foram avaliadas pelo teste de dureza, segundo norma ASTM E10-2012 [13], em um durômetro Wilson UH-930 utilizando carga de 62,5 kgf e esfera de 2,5 mm de diâmetro. O teste de dureza foi realizado em cinco pontos de cada posição no termopar.

3. Resultados

A Tabela 1 apresentada os resultados da composição química obtida no processo de solidificação da liga:

Tabela 1. Composição química do lingote (% massa).

Elemento	Al	Ni	Fe	Outros	Cu
% massa	14,23	5,44	5,39	0,34	Restante

Fonte: Elaboração própria.

Na tabela 2 são mostrados os valores médios de dureza na escala Brinell e os valores médios do espaçamento dendrítico secundário (EDS) para as posições de 4, 8, 12, 16, 26, 35 e 53 mm. Não foi possível medir o espaçamento dendrítico secundário para as posições 4, 8 e 12 mm.

Tabela 2. Valores médios de dureza e EDS por posição.

Posição (mm)	4	8	12	16	26	35	53
Dureza (HB)	289,8	283,0	281,8	280,0	279,6	278,0	273,2
EDS (μm)	-	-	-	88,3	102,3	114,6	131,7

Fonte: Elaboração própria.

A estrutura obtida no processo de solidificação direcional ascendente da liga Cu-14Al-5Ni-5Fe foi do tipo globular com crescimento dendrítico multidirecional e pode ser observada na Figura 3 com ampliação de 50x.

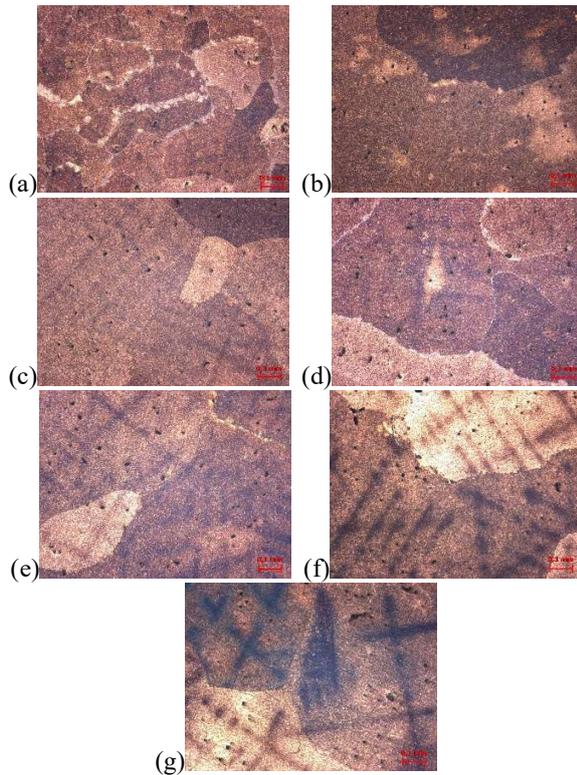


Figura 3. Microestrutura transversal. Posição: (a) 4 mm; (b) 8 mm; (c) 12 mm; (d) 16 mm; (e) 26 mm; (f) 35 mm; (g) 53 mm.

Através dos dados obtidos durante a solidificação do lingote e tendo como referência a temperatura *liquidus* da liga obteve-se o gráfico e a equação mostrada na Figura 4. Os valores apresentados nos gráficos a seguir foram obtidos pelo método dos mínimos quadrados usando o software *Origin*.

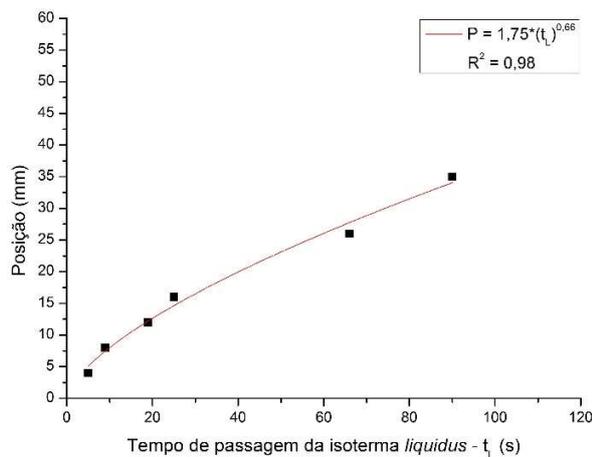


Figura 4. Posição (P) em função do tempo de passagem da isoterma *liquidus* (t_L).

A Figura 5 apresenta o parâmetro térmico V_L obtido experimentalmente em função da distância até a superfície de troca de calor (P). Os valores da V_L diminuíram com maiores valores de P.

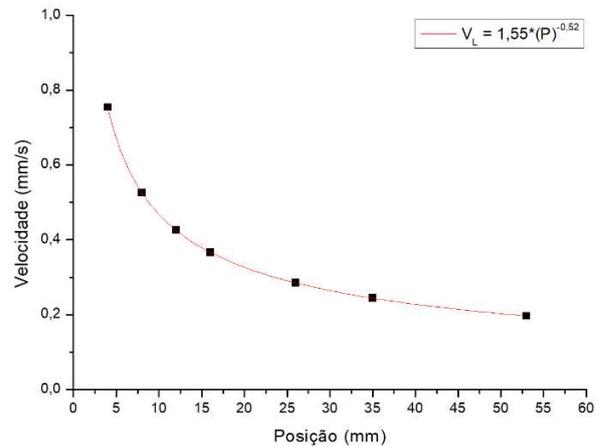


Figura 5. Velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* (V_L) em função da Posição (P).

A Figura 6 mostra o parâmetro térmico T_R obtido experimentalmente também em função da distância até a superfície de troca de calor (P). Os valores da T_R , semelhante a V_L , diminuíram com o aumento da distância da superfície de troca de calor (P).

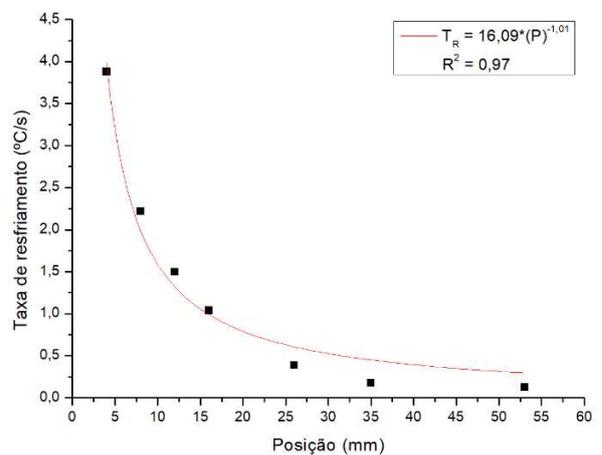


Figura 6. Taxa de resfriamento (T_R) em função da Posição (P).

A Erro! Fonte de referência não encontrada.7 permite ver a correlação dos valores de dureza com as posições analisadas definindo uma equação experimental. O gráfico mostra que posições mais próximas da base da lingoteira apresentam durezas superiores em relação as posições mais afastadas da base.

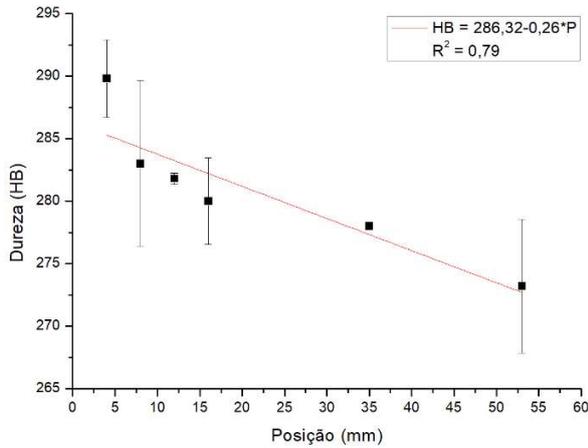


Figura 7. Dureza em função da Posição (P).

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** relaciona os valores de espaçamentos dendríticos secundários com as posições analisadas mostrando que posições mais próximas da base da lingoteira apresentam espaçamentos dendríticos secundários menores em relação as posições mais afastadas do ponto de extração de calor.

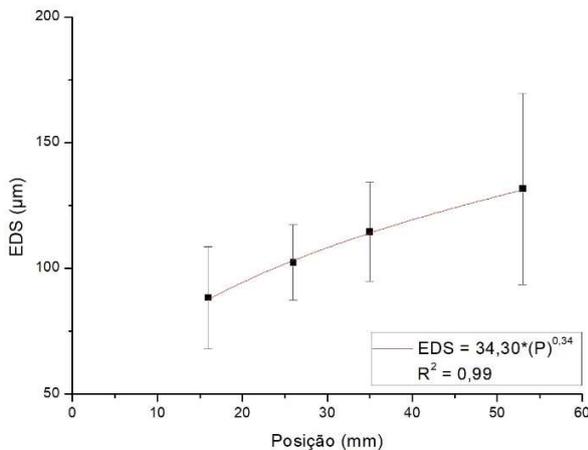


Figura 8. Espaçamento dendrítico secundário (EDS) em função da Posição (P).

Na Figura 9, onde são relacionados os valores médios dureza com o espaçamento dendrítico secundário, onde mostra-se que espaçamentos dendríticos secundários maiores resultam em valores de durezas menores.

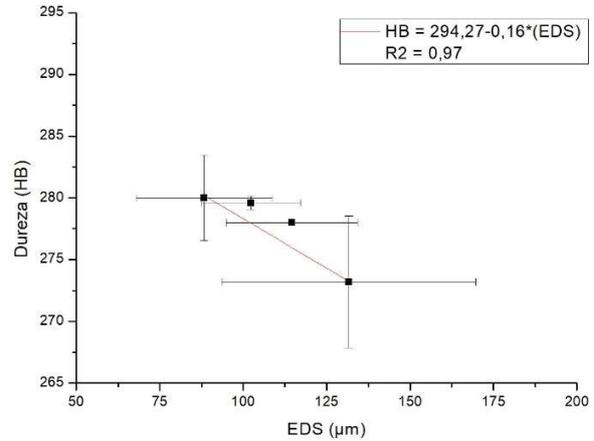


Figura 9. Espaçamento dendrítico secundário (EDS) em função da Dureza.

4. Conclusões

Com base nos resultados obtidos, nota-se que os valores da velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* (V_L), da taxa de resfriamento (T_R) e os valores médios de dureza são maiores para as posições mais próximas da superfície de troca de calor enquanto que os valores médios de espaçamento dendrítico secundário são maiores quanto maior for a distância do ponto de extração de calor.

Analisando as micrografias ópticas transversais para a liga, a mesma apresenta uma morfologia difusa com pequenas microestruturas no interior do grão. Na posição $P = 4$ mm, observa-se que os grãos são menores que os da posição $P = 53$ mm. Na posição $P = 53$ mm, observou-se que os braços dendríticos tinham uma cor escura. A capacidade de observar os braços dendríticos em posições de maior valor de P e não em valores menores mostra que o tamanho do grão aumenta à medida que o valor de P aumenta.

Comparando os valores do EDS com a dureza observou-se que para espaçamentos dendríticos secundários maiores os valores de dureza diminuíram.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem: à Termomecânica São Paulo S. A. pela doação do material e alocação dos laboratórios para análise.

6. Referências

- [1] R. A. Cruz. “Estudo sobre a influência das variáveis térmicas de solidificação na microestrutura e nas propriedades mecânicas da liga Cu-Sn”. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2018.

- [2] A. Garcia. “Solidificação: Fundamentos e Aplicações”. 2. ed. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, 2007.
- [3] I. Richardson. “Guide to nickel aluminum bronze for engineers”. *Copper Development Association*, n. 222, 2016.
- [4] M. S. Nascimento; G. A. Santos; R. Teram; V. T. Santos; M. R. Silva; A. A. Couto. “Effects of Thermal Variables of Solidification on the Microstructure, Hardness, and Microhardness of Cu-Al-Ni-Fe Alloys”. *Materials* 2019, 12, 1267. <https://doi.org/10.3390/ma12081267>
- [5] E. A. Culpan; G. Rose. “Microstructural characterization of cast nickel aluminum bronze”. *Journal of Materials Science*, vol. 13, p. 1647-1657, 1978.
- [6] G. M. Weston. “Survey of nickel aluminum bronze casting alloys for marine applications”. Department of Defense, Report MRL-R-807, Melbourne, 1981.
- [7] A. Jahanafrooz; F. Hasan; G. W. Lorimer; N. Ridley. “Microstructural development in complex nickel aluminum bronzes”. *Metallurgical Transaction A*, v. 14A, p. 1951-1956, 1983.
- [8] H. J. Meigh. “Cast and wrought aluminum bronzes properties, processes and structure”. London: IOM Communications, 2000.
- [9] V. T. Santos. “Correlação entre as variáveis térmicas de solidificação, microestrutura, microdureza e dureza da liga bronze alumínio níquel – CuAl10Ni5Fe5”. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2017.
- [10] K. B. Faires. “Characterization of microstructure and microtexture in longitudinal sections from friction stir processed nickel aluminum bronze”. Thesis (Master) – Naval Postgraduate School. Monterey, California, 2003.
- [11] F. A. Pierce. “The isothermal deformation of nickel aluminum bronze in relation to friction stir processing”. Thesis (Master) – Naval Postgraduate School, Monterey – California, 2004.
- [12] M. S. Nascimento; A. T. R. Franco; C. Frajuca; F. Y. Nakamoto; G. A. Santos; A. A. Couto. “An Experimental Study of the Solidification Thermal Parameters Influence upon Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-Cu Alloys”. *Materials Research*. 2018, 21, e20170864. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0864>
- [13] ASTM E10. Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials; *ASTM International*: West Conshohocken, PA, USA, 2012.