

CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA, MECÂNICA E TÉRMICA DE LIGAS DE ALUMÍNIO 6201 MODIFICADA COM NB

Vinicius Silva dos Reis

Beatriz Seabra Melo

Universidade Federal do Pará, FEM – Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá. CEP 66075-110. Belém – PA, Brasil

e-mail: viniciusreis11@hotmail.com

e-mail: beatrizseabrak@hotmail.com

Derick Muller Borges de Almeida

Universidade Federal do Pará, FEM – Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá. CEP 66075-110. Belém – PA, Brasil

e-mail: derickmuller19.pro@gmail.com;

Emerson Rodrigues Prazeres

Universidade Federal do Pará, FEM – Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá. CEP 66075-110. Belém – PA, Brasil

e-mail: engemersonrodrigues@gmail.com

José Maria do Vale Quaresma

Universidade Federal do Pará, FEM – Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá. CEP 66075-110. Belém – PA, Brasil

e-mail: quaresma@fem.unicamp.br

Resumo. O desenvolvimento de novos materiais que agreguem qualidade na distribuição e na transmissão de energia elétrica implica em estudos sobre ligas de alumínio favoráveis a propriedades desejadas e ao custo-benefício. Este trabalho visa analisar o efeito do Nb nas propriedades térmicas de solidificação, elétricas, estruturais e mecânicas da liga 6201. As ligas foram produzidas, por meio de processos de fundição, na composição de Al-0,05p.%Cu-0,33p.%Fe-0,5p.%Si-0,6p.%Mg sem e com 0,1p.% de Nb. A solidificação foi realizado no molde unidirecional horizontal, e os parâmetros térmicos foram medidos na direção de extração de calor. Ademais, parte dos lingotes foi seccionou para caracterização macroestrutural e para ensaio de microdureza. O restante do tarugo foi usinado e laminado para o diâmetro de 3,0 mm, a fim de serem submetidos ao ensaio de resistividade elétrica. Diante disso, a liga modificada com Nb possuiu maior velocidade de solidificação. A macroestrutura da liga modificada com Nb apresentou predomínio de grãos colunares, já na liga base há grãos colunares e equiaxiais bem definidos. As alterações na microdureza do material microligado foram mínimas. A caracterização elétrica mostrou que houve pequenas diferenças entre as ligas. Portanto, a modificação da liga 6201 com 0,1%Nb demonstrou modificações significativas apenas nas propriedades estruturais e térmicas.

Palavras chave: Alumínio. Microdureza. Nióbio. Condutividade Elétrica.

1. INTRODUÇÃO

A expansão da rede de transmissão e de distribuição de energia elétrica é notória, visto o crescimento populacional atual, fato este que implica na necessidade por cabos elétricos com melhores propriedades elétricas, mecânicas e termorresistência. As linhas de transmissão e distribuição elétricas oneram em até 40% dos investimentos em capital na rede (Frontin et al., 2010). Com isso, a seleção de materiais que ampliem o tempo de vida e a qualidade, tornam-se inerente para o recrudescimento dessa expansão.

O grupo de ligas da série 6XXX tratáveis termicamente é bastante estudado visando melhorias na sua qualidade, por meio das modificações na composição química ou na seleção de tratamentos térmicos (Karabay, 2006; Huynh, 2019). Na série em questão, encontra-se a liga 6201, a qual é largamente utilizada na indústria de cabos elétricos devido às propriedades mecânicas e elétricas favoráveis.

As ligas da série 6XXX são dependentes da composição química, do tratamento térmico e do trabalho a frio. O grupo de ligas mencionado, utiliza em sua composição Mg e Si, os quais formam precipitados (Mg_2Si) que ocasionam o endurecimento da liga e atrasam a recristalização durante os processos termomecânico que implicam em efeitos nas propriedades mecânicas do material (Meyruey, et al., 2018; Qin, et al., 2019).

As principais reservas de nióbio são concentradas no Brasil (Pereira, 2009), tornando sua exploração e beneficiamento importantes para o desenvolvimento econômico nacional (Alves e Coutinho, 2015). Nesse sentido, a modificação das ligas da série 6XXX (6201) com o Nb pode garantir melhorias nas propriedades mecânicas e na resistência ao desgaste, além de estabilidade térmica (Almeida et al., 2001; Moreira et al., 2019).

O conhecimento sobre os efeitos da modificação do Nb em ligas de alumínio é bastante limitado, visto que informações sobre: microestrutura, propriedades mecânicas, térmicas, estruturais e elétricas são pouco encontradas nas literaturas atuais (Moreira *et al.*, 2019).

Diante disso, o trabalho visa estudar os efeitos nas propriedades térmicas de solidificação, mecânicas e elétricas na liga da série 6XXX [Al-0,05%Cu-(0,33-0,45)%Fe-0,5%Si-0,6%Mg] modificada com Nb, com intuito de avaliar a aplicação na distribuição e na transmissão de energia elétrica.

2. METODOLOGIA

2.1. Preparação da liga

O processo de fundição das ligas segue o padrão já desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais (GPEMAT), no qual se selecionou o material a ser utilizado por meio de cálculo estequiométrico, isto é, para as porcentagens em peso dos elementos de liga: 0,05%Cu; 0,35%Fe; 0,50%Si; 0,6%Mg e 0,1%Nb este último no caso da liga modificada (Lobato, 2015). Diante da seleção dos materiais, faz-se o preparo do cadinho a ser utilizado na fundição e trabalha-se a temperatura de 900°C no forno BRASIMET.

A metodologia de solidificação do material baseia-se no modelo unidirecional horizontal de extração de calor desenvolvido por Quaresma (1999). O sistema é composto de um molde de aço SAE 1010, com dimensões de 60x60x110 mm e placas de material refratário com o objetivo de isolar as paredes da câmara de vazamento, a qual tem as mesmas dimensões do molde. Além disso, posicionou-se termopares do tipo K dentro da câmara, para registrar os parâmetros térmicos de resfriamento, essas posições são 7,5; 15,0; 22,5; 30,0; 37,5 e 45 mm. A Figura 1 esquematiza o molde e o sistema de obtenção dos parâmetros térmicos.

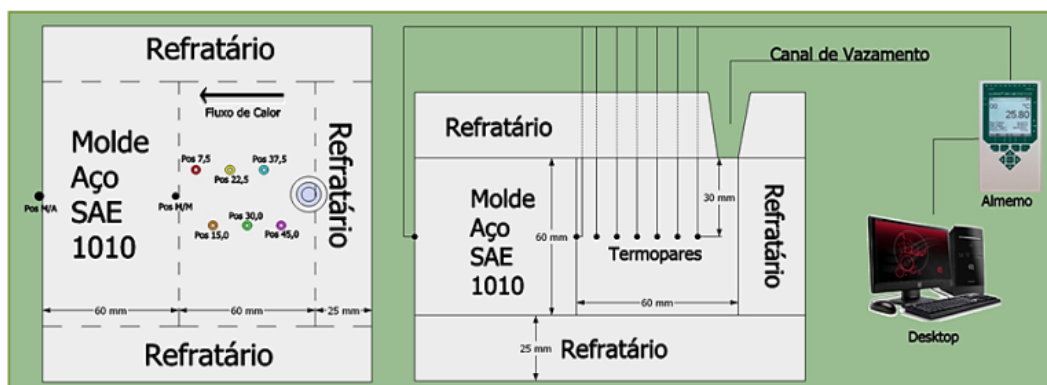


Figura 1. Esquematização do molde de solidificação unidirecional horizontal, indicando posição dos termopares e obtenção de dados (Lobato, 2015)

A determinação das propriedades térmicas durante a solidificação da liga baseou-se na aferição da velocidade de resfriamento, tomou-se como base a temperatura liquidus para definir o instante em que há a passagem da isoterma liquidus em cada termopar, obtendo-se a posição (referente ao termopar em relação ao tempo). A partir desses pontos são geradas curvas experimentais.

Derivando-se a expressão obtidas das curvas da passagem das isotermas líquidas, posição em função do tempo, obtém-se as velocidades de deslocamento da isoterma liquidus em relação ao tempo e após breve manipulação numérica é obtida a equação para o perfil de velocidade em função da posição relativa à interface metal/molde. A taxa de resfriamento seguiu a metodologia adotada por Okamoto e Kishitake (1975), onde a taxa de resfriamento é calculada pelo módulo da razão entre os intervalos de temperatura e tempo obtidos antes e depois da passagem da isoterma liquidus para cada termopar.

2.2. Caracterização Macroestrutural e Mecânica

As amostras utilizadas para macrografia foram seccionadas no sentido longitudinal a extração de calor conforme evidenciado na Fig. 2. A preparação das superfícies para análise macroestrutural, iniciou-se no lixamento em politriz, com lixas d'água abrasivas de carbetto de silício com granulometrias decrescentes #80, #100, #220, #400, #600 e polidas com alumina em suspensão com a granulometria de 1,0µm, posteriormente foram atacadas por imersão em reagente Keller (2mL HF, 3mL HCl, 5mL HNO₃, 190mL H₂O). Após o ataque químico, as amostras foram lavadas em água corrente e enxaguadas com álcool etílico para capturar as imagens.

A microdureza foi obtida mediante a utilização do microdurometro digital HV-1000B. A mensuração dessa propriedade foi realizada por meio de indetações em cada posição medida pelos termopares na solidificação, isto é, (7,5;

15,0; 22,5; 30,0; 37,5 e 45,0 mm), como uma carga de 100g por um período de 10s, cada microdureza apresentou espaçamento de 2,0 mm, assim realizado 15 indetações para cada posição na amostra retirada do centro da seção longitudinal do tarugo obtido na fundição, amostra essa possuindo as dimensões de 25x30x60 mm, conforme a Fig. 2, tal metodologia foi semelhante à adotada pela literatura Dias Filho (2012).

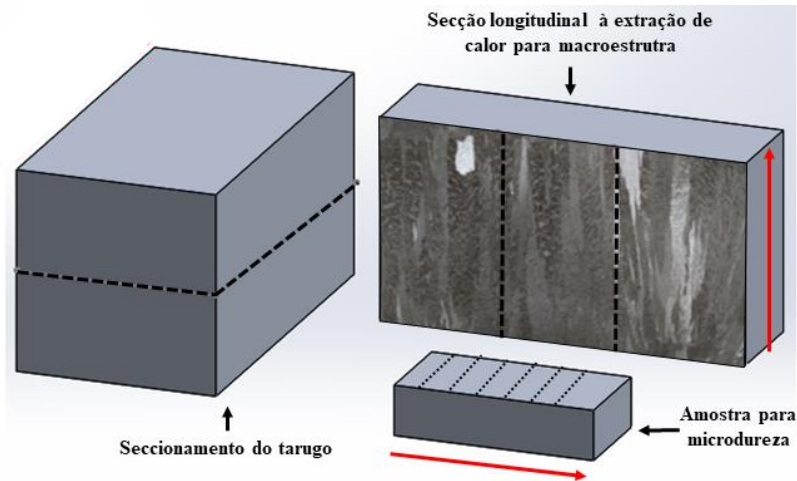


Figura 2. Esquema de amostras utilizadas para análise de macroestrutura e de microdureza (Autores, 2020)

2.3. Caracterização Elétrica

As amostras utilizadas para a caracterização elétrica foram retiradas do lingote, adotando os planos de secção trabalhados por Lamarão (2013). Diante os cortes das amostras do tarugo as mesmas com dimensão 13x13x110 mm, fez a usinagem com intuito de tornar o corpo de prova prismático em cilíndrico com diâmetro de 9,5 mm. Após o processo de usinagem as amostras foram laminadas a frio no duo laminador reversível até que a mesma obtivesse o diâmetro de 3,0 mm correspondem às bitolas empregadas na indústria de condutores elétricos de alta tensão. A Figura 3 o secçãoamento das amostras e o processo de conformação do fio para o diâmetro desejado. Adotou-se o uso das amostras de nomenclatura A, B e C que correspondem as posições dos termopares 7,5; 22,5 e 37,5, respectivamente.

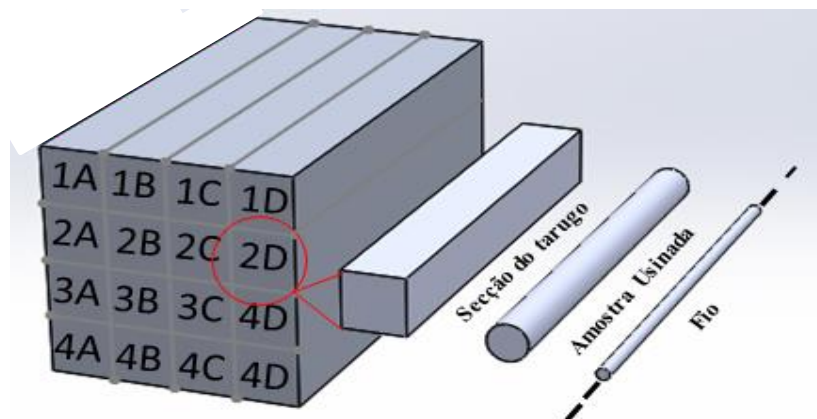


Figura 3. Esquema de obtenção das amostras para o ensaio de condutividade elétrica (Autores, 2020)

Na avaliação das propriedades elétricas é adotada a norma NBR-6814 como referência, que descreve o método de medição de resistividade elétrica para fios cabos elétricos em corrente contínua. No ensaio utiliza-se o microhmímetro Ponte de Kelvin MEGABRÁS, modelo MPK-2000. A resistência elétrica de cada fio foi medida a uma temperatura não inferior a 10°C, nem superior a 30°C, e corrigida para a temperatura de 20°C, utilizando-se a equação fornecida pela norma NBR 6814. Os resultados obtidos permitem o cálculo da Condutividade Elétrica [%IACS].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Curvas de Resfriamento

As curvas de solidificação para a liga base e para a modificada com 0,1%Nb são apresentadas, respectivamente, na Fig. 4.a e na Fig. 4.b. É importante evidenciar que para as curvas geradas em relação a liga modificada, houve problemas na obtenção dos valores dos parâmetros térmicos, uma vez que os termopares para as posições 7,5 e 22,5 mm falharam durante a fundição.

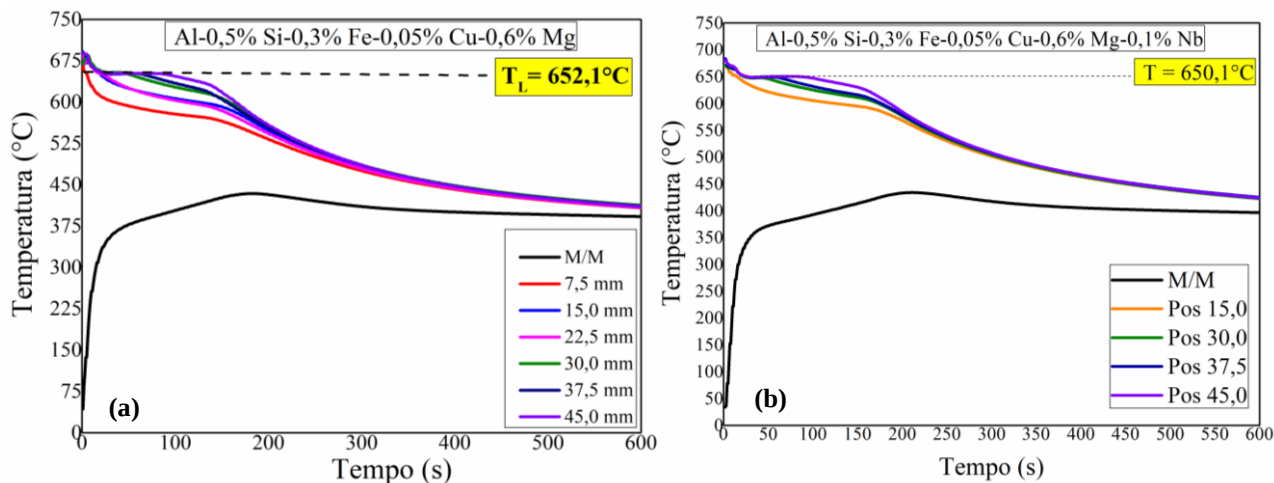


Figura 4. Curvas de Resfriamento das ligas: base (a) e modificada com 0,1%Nb (b) (Autores, 2020)

Ao serem feitas análises das curvas de resfriamento evidenciadas na Fig. 4, selecionou-se o ponto de 45,0 mm relativo à interface metal molde, assim foi possível determinar a temperatura experimental de fusão. Ademais, é válido ressaltar que houve um decréscimo em 2 °C na temperatura *liquidus* com a adição de 0,1% Nb na liga base.

A análise das curvas de solidificação demonstra que há diferença de comportamento nas curvas de aquecimento do molde entre as ligas. A literatura Garcia (2001), ao iniciar, o processo de solidificação há a formação de uma fina camada de metal junto à parede do molde. E para ligas que apresentam maior intervalo de solidificação e maior fluidez a camada que forma junto ao molde é de aspecto mais delgado e tende a aderir ao molde, pressionada pela pressão metalostática e isso faz com que haja maior aquecimento do molde. Tal separação física gradativa entre metal e molde resulta em uma resistência térmica à passagem do calor em direção ao molde.

3.2. Velocidade de Resfriamento

Após a determinação da temperatura de início de solidificação dos materiais, determinou-se para todos os termopares posicionados na câmara de vazamento, o período no qual a isoterma *liquidus* passa pelos mesmos. Essa análise é apresentada na Tab. 1. Os dados vistos na tabela abaixo apresentam valores para a posição 22,5 mm, por mais que a mesma tenha falhado durante o processo de fundição foi possível utilizar de interpolações matemáticas para obter o possível resultado para ela.

Tabela 1. Tempos de passagem da isoterma *liquidus* para cada posição (Autores, 2020)

Distância da interface Metal/Molde (mm)	Tempo (s)	
	Al-Si-Fe-Cu-Mg	Al-Si-Fe-Cu-0Mg-0,1%Nb
7,5	5	--
15	19	15
22,5	32	28,5
30	47	44
37,5	59	59
45	75	83

A partir de manipulações numéricas para obter a expressão que determina o perfil de velocidade em função da posição relativa a interface metal/molde, com base na relação entre a posição x tempo e velocidade x tempo o qual é evidenciado

na Fig. 5.a. As taxas de resfriamento foram determinadas baseadas no método descrito em Okamoto e Kishitake (1975), conforme exposto na Fig. 5.b.

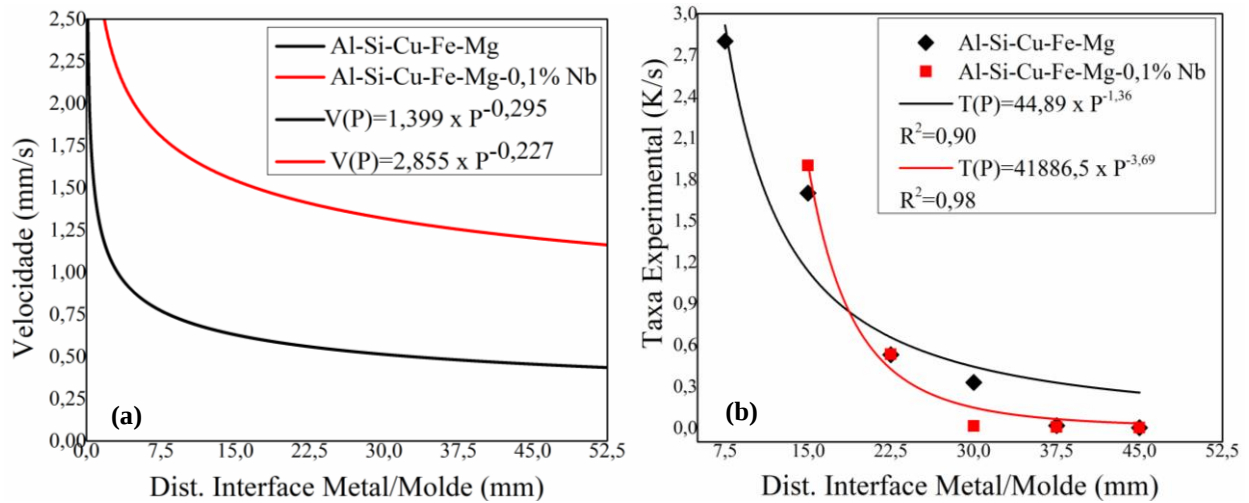


Figura 5. (a) Passagem da isoterma *liquidus* velocidade em função da posição para as ligas e (b) (Autores, 2020)

A observação da Figura 5.a, percebe-se que a liga modificada com 0,1%Nb apresenta maior velocidade de solidificação. Outrossim, é notado que para as posições próximas a fonte extratora de calor, os valores de velocidade de solidificação são mais elevados e diminuem à medida que há o distanciamento da interface metal/molde e o aumento do tempo decorrente, essa afirmação é evidenciada nos trabalhos Prazeres (2006) e Lamarão (2013), devido ao andamento do processo de solidificação a fonte extratora de calor começar a perder eficiência e a parte que solidifica na câmara de vazamento diminui a eficiência das trocas de calor, isto é, atuando como um isolamento. Associando essa observação a curva metal/molde das duas ligas, notou-se o indicio de maior afinidade metal/molde por parte da liga base o que sugere maior diminuição da velocidade de solidificação à medida que ocorre o processo, diferente do que se observa na liga modificada com Nb.

A análise da Fig. 5.b. denota que a afirmação exposta na discussão das velocidades de solidificação também é analogamente representada na taxa experimental, em que para as posições mais próximas da fonte extratora há maiores taxas de resfriamento, que diminuem ao longo do lingote. Percebe-se também que a modificação com 0,1%Nb, influenciou em menores proporções o comportamento da taxa de resfriamento.

3.3. Caracterização Macroestrutural

As macrografias são representadas na Fig. 6, na qual a 6.a e a 6.b, apresentam as amostras para a liga base e modificada com 0,1%Nb, respectivamente. Além disso, encontra-se a esquerda das imagens a seta em vermelho indica o sentido de extração de calor.

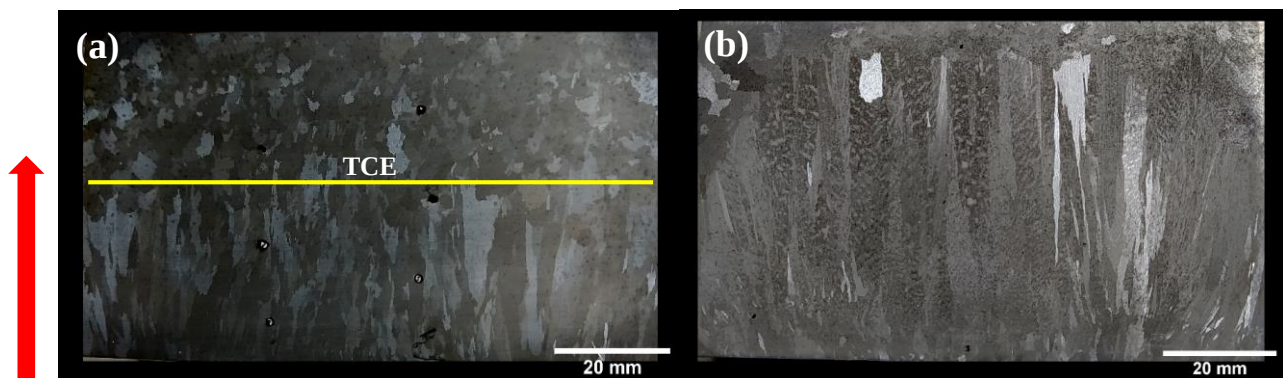


Figura 6. Macroestrutura de solidificação para a liga (a) Al-0,05%Cu-[0,24-0,45]%Fe-0,5%Si-0,6%Mg e (b) Al-0,05%Cu-[0,24-0,45]%Fe-0,5%Si-0,6%Mg-0,1%Nb (Autores, 2020)

A análise da Fig. 6.b evidencia a modificação macroestrutural proveniente da adição de 0,1% Nb. Diante disso, quando se compara a Fig. 6.a, percebe-se que a mesma apresenta a zona de transição colunar/equiaxial (TCE), (linha em amarelo),

fato esse que expõem a existência que a liga base obteve uma maior zona equiaxial que a liga modificada com 0,1% Nb, uma vez que essa última possui maior velocidade de solidificação, o que pode ser indicativo de maior colunariadeade do grãos, vista na Fig. 6.b. É valido ressaltar que essa afirmativa segue na contramão da Doherty, *et al.* (1977), pois o aumento no teor de soluto não inibiu o aparecimento da zona colunar.

3.4. Microdureza

A caracterização mecânica das ligas baseou-se na utilização do ensaio de microdureza, o qual foi realizado para cada posição dos termopares em relação ao extrator de calor empregados no molde de solidificação. A Tabela 2 apresenta dos valores médios e suas variações (desvio padrão) para cada posição em função da liga analisada.

Tabela 3. Microdureza para as ligas trabalhadas em função da posição dos termopares (Autores, 2020)

Posições (mm)	Microdureza (HV)	
	Al-Si-Cu-Fe-Mg	Al-Si-Cu-Fe-Mg-0,1%Nb
7,5	36,15 ± 3,52	37,75 ± 3,42
15	38,32 ± 2,92	37,99 ± 1,89
22,5	38,72 ± 3,14	38,70 ± 4,01
30	39,38 ± 3,06	39,22 ± 2,43
37,5	41,56 ± 3,74	40,13 ± 2,01
45	39,09 ± 3,27	39,40 ± 1,47

Diante dos dados de microdureza, realizou-se a análise de variância (ANOVA), por meio do software PAST4.0[®], comparando-se as posições de cada liga, com intuito de verificar se houve variação significativa quando se compara o conjunto de posições. Com isso percebeu-se que para a liga Al-Si-Cu-Fe-Mg, houve variação significativa, isto é, $p < 0,05$, caso contrário ao que se observou nessa análise estatística para a liga modificada com 0,1% de Nb. Além disso pode-se justificar esses resultados pelo fato das alterações macroestruturais da amostra modificada com Nb que apresentou uma macroestrutura mais homogênea, isto é, predomínio de grãos colunares, enquanto a liga 6201 apresentou uma melhor distribuição de grãos colunares e equiaxiais. A Figura 7 compara a microdureza com a macrografia das amostras analisadas.

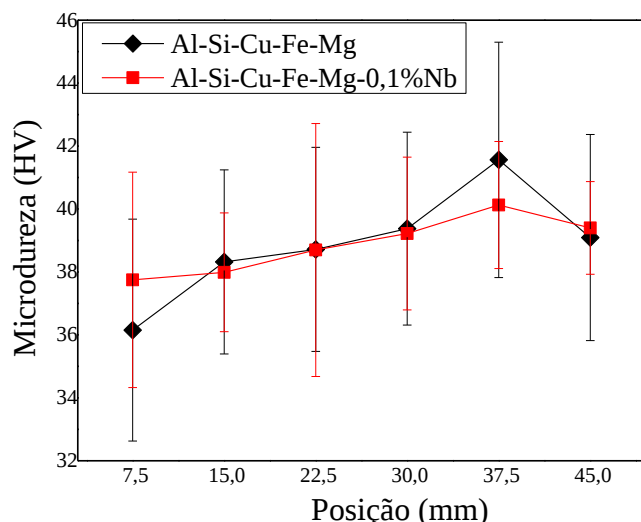


Figura 7. Correlação da microdureza com a macroestrutura (Autores, 2020)

3.5. Condutividade Elétrica

A caracterização elétrica foi realizada para as posições 7,5; 22,5 e 37,5 mm para cada liga, a Fig. 8 expõem a análise exposta. Diante disso, quando se realiza a análise da significância na variação da condutividade elétrica entre as posições, por meio da análise de variância (ANOVA), é notório que para ambas as ligas não houve variação significativa na condutividade em relação as posições. Quando comparado o efeito do teor de 0,1% de Nb na liga da série 6XXX, nota-se que houve um mínimo incremento nessa propriedade, pode-se inferir que essa baixa melhoria no desempenho pode estar relacionada com a quantidade de soluto em solução sólida presente nas ligas associada ao elevado grau de trabalho a frio no qual encontram-se submetidas, uma vez que ambas as ligas foram submetidas ao mesmo trabalho a frio e a

quantidade de soluto empregada na liga não foi suficiente para implicar em acréscimos consideráveis na capacidade de conduzir corrente elétrica (Lobato, 2016).

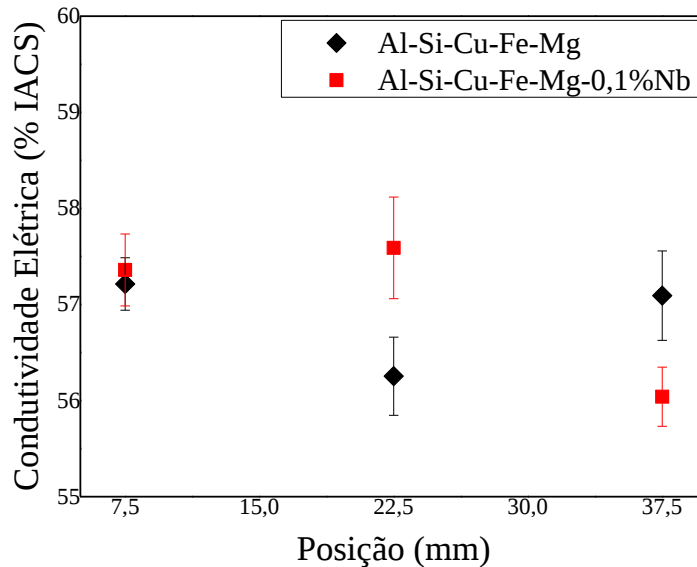


Figura 8. Gráfico de relação da condutividade elétrica para as ligas analisadas (Autores, 2020)

4. CONCLUSÃO

A modificação com da liga da série 6XXX (Al-0,05%Cu-[0,24-0,45]%Fe-0,5%Si-0,6%Mg) como 0,1% de Nb não gerou ganhos significativos nas análises de microdureza e de condutividade elétrica. Contudo, o elemento Nb agiu como modificante nos parâmetros térmicos da liga e macroestruturais da liga.

Por tanto, o teor modificado de Nb demonstrou estabilidade nas propriedades mecânicas e elétricas da liga estuda, assim a aplicação desse teor, pelas análises expostas não gerou melhorias para aplicação na distribuição de energia elétrica.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais-GPEMAT e à Universidade Federal do Pará agradece pela disponibilização de espaço físico e equipamentos e ao CNPQ pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Almeida, A., Petrov, P., Nogueira, I., & Vilar, R. 2001. Structure and properties of Al–Nb alloys produced by laser surface alloying. *Materials Science and Engineering: A*, 303(1-2), 273-280.
- Alves, A.R.; Coutinho, A.D.R. 2015. The evolution of the niobium production in Brazil. *Mater. Res*, 18, 106–112.
- ABNT. 1986. *NBR 6814: fios e cabos elétricos: ensaio de resistência elétrica*. Rio de Janeiro: ABNT. 1986.
- Dias Filho, J. M. da S. 2012. *Análise Teórico-Experimental dos Espaçamentos Dendríticos Primários e Secundários da Liga Al-6%Cu Solidificada Unidirecionalmente sob Condições Transitórias de Extração de Calor*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Belém, Pará.
- Doherty, R. D., Cooper, P. D., Bradbury, M. H., & Honey, F. J. 1977. On the columnar to equiaxed transition in small ingots. *Metallurgical Transactions A*, 8(3), 397-402.
- GARCIA, A. 2001. *Solidificação: Fundamentos e aplicações*. Campinas: UNICAMP.
- Huynh, K. C. 2019. Effects of the heat treatment on the mechanical properties of 6201 aluminium alloy wire. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 57(3A), 11.
- Karabay, S. 2006. Modification of AA-6201 alloy for manufacturing of high conductivity and extra high conductivity wires with property of high tensile stress after artificial aging heat treatment for all-aluminium alloy conductors. *Materials & design*, 27(10), 821-832.
- Lamarão, P.H.L. 2013. *Efeito de Adições de Ni e Mg sobre o Comportamento térmico, Mecânico e Elétrico de Ligas Al-Cu-Fe solidificadas Unidirecionalmente*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará.

- Lobato, M.Q. 2016. Avaliação da influência de teores de Zr na termoresistividade da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,3%Si, solidificada em molde unidirecional horizontal. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil.
- Maduro-Abreu, A., Saavedra, A. R., Mendonça, G. P., Araújo, J. A., Murça, L. B., Frontin, S. D. O., ... & Rego, V. B. 2010. Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão. Brasília, DF: Teixeira Gráfica e Editora.
- Meyruey, G., Massardier, V., Lefebvre, W., & Perez, M. 2018. Over-ageing of an Al-Mg-Si alloy with silicon excess. *Materials Science and Engineering: A*, 730, 92-105.
- Moreira, C.M., Saraiva, S.J. I., Primo, S.T., Monteiro, R.D. 2019. Upward UnsteadyState Solidification of Dilute Al-Nb Alloys: Microstructure Characterization, Microhardness, Dynamic Modulus of Elasticity, Damping, and XRD Analyses. *Metals*, 9(6), 713.
- Okamoto, T., & Kishitake, K. 1975. Dendritic structure in unidirectionally solidified aluminum, tin, and zinc base binary alloys. *Journal of Crystal Growth*, 29(2), 137-146.
- Pereira Jr., R. F. 2009. Nióbio. In: Rodrigues, A. F. da S; Ferraz, C.P. (Coord.), Economia mineral do Brasil. Brasília-DF: DNPM.
- Prazeres, U.R. 2006. *Avaliação do Efeito do Ferro na Formação da Macroestrutura, Propriedades Mecânicas e Elétricas do Alumínio Eletrocondutor*. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- Qin, Q., Zhao, H., Zhang, Y., Li, J., & Wang, Z. 2019. Microstructures and mechanical properties of Al-Mg₂Si-Si alloys resistance spot welded with Al-Si interlayers. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 4318-4332.
- Quaresma, J.M.V. 1999. *Correlação entre condições de solidificação, microestrutura e resistência mecânica*. Campinas: Tese de doutorado, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual de Campinas, Brasil.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

ELECTRICAL, MECHANICAL AND THERMAL CHARACTERIZATION OF 6201 MODIFIED ALUMINUM ALLOYS WITH NB

Abstract. The development of new materials that add quality to the distribution and transmission of electric power implies studies on aluminum alloys favorable to the desired properties and cost-effectiveness. This work aims to analyze the effect of Nb on the solidification thermal, electrical, structural and mechanical properties of the 6201 alloy. The alloys were produced, by casting processes, in the composition of Al-0.05wt.%Cu-0.33wt.%Fe-0.5wt.%Si-0.6wt.%Mg without and with 0.1wt.% of Nb. Solidification was carried out in the horizontal unidirectional mold, and the thermal parameters were measured in the direction of heat extraction. In addition, part of the ingots were sectioned for macrostructural characterization and microhardness testing. The remaining billet was machined and rolled to a diameter of 3.0 mm to be submitted to the electrical resistivity test. Therefore, the alloy modified with Nb had a higher solidification speed. The macrostructure of the Nb-modified alloy showed a predominance of columnar grains, while in the base alloy there are well defined columnar and equiaxial grains. The changes in microhardness of the microalloyed material were minimal. The electrical characterization showed that there were small differences between the alloys. Therefore, modification of the 6201 alloy with 0.1%Nb has shown significant modifications only in the structural and thermal properties.

Translated with www.DeepL.com/Translator (free version).

Keywords: Aluminum. Microhardness. Niobium. Electric conductivity.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.