

CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA, MECÂNICA E TERMORRESISTIVA DE UMA LIGA DE AL-0,05%CU-0,40%FE-0,30%SI-0,22%ZR*

Carlos Alexandre Cavalcante de Sousa¹

Gregory de Oliveira Miranda²

Gustavo Neves Rebelo²

Victor Lima Melor⁴

Daniel Cavalcante da Conceição³

José Maria do Vale Quaresma⁶

Resumo

A energia elétrica é uma das formas de energia mais utilizadas pela sociedade. Com a modernização dos meios de produção e o aumento populacional, a sua demanda cresce cada vez mais. Por este motivo, existe uma grande necessidade de fazer o transporte dessa energia de forma eficiente. O desenvolvimento de novos materiais para serem utilizados como cabos de transmissão e distribuição é de suma importância. O presente trabalho visa estudar a liga de alumínio Al-0,05%Cu-0,40%Fe-0,30%Si-0,22%Zr para transmissão de energia elétrica. A liga foi obtida por fundição direta em lingoteira metálica em formato de "U". As pernas correspondentes ao perfil foram seccionadas, usinadas e separadas em dois grupos, o primeiro sem tratamento térmico e o segundo com tratamento térmico. Após esta etapa os corpos de prova foram submetidas ao processo de laminação a frio para os diâmetros de [2,7; 3,0; 3,8 e 4,0] mm e encaminhados para a caracterização elétrica e mecânica. Verifica-se que o tratamento térmico de 150°C/2h melhorou a condutividade elétrica para o diâmetro de 3,0 mm. Após a aplicação dos testes de termorresistividade para o diâmetro de 3,0 mm, constata-se que para ambas as orientações, tanto a liga sem quanto com tratamento térmico se enquadram como termorresistentes..

Palavras-chave: Eletricidade; Ligas de alumínio; Propriedades eletromecânicas; Zircônio;

ELECTRICAL, MECHANICAL AND THERMORESSISTIVE CHARACTERIZATION OF A AL-0,05%CU-0,40%FE-0,30%SI-0,22%ZR

Abstract

The electrical energy it is of the forms of energy more used through the society. With the modernization of the means of productions and the increase population, the in your demand grows more and more. For this reason, there is a great need of do the transport of that energy of efficient way. Thus, the development of new materials for be utilized with cables of transmission and distribution it of high importance. The present paper aims study the aluminium alloy Al-0,05%Cu-0,40%Fe-0,30%Si-0,22%Zr for transmission and distribution of electrical energy. The alloy was obtained by direct foundry in metallic ingot in format of "U". The matching legs to perfil were sectioned, machined and separated in two groups, the first without heat treatment and the second with heat treatment. After this step the proof bodies were submitted to process of cold rolling for the diameters of [2,7; 3,0; 3,8 e 4,0] mm and forwarded for the electrical and mechanical characterization. It is verified that the heat treatment of 150°C/2h improved the electrical conductivity for the 3,0 mm diameter. After the application of the thermoresistivity test for the 3,0 mm diameter, it is verified that for both orientations, both the alloy without and with heat treatment it's was considered as thermoresistive.

Keywords: Electricity; Aluminum alloys; Electromechanical properties; Zirconium.

* Contribuição técnica ao 72º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 17º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil.

- ¹ *Mestrando em Engenharia Mecânica, Bacharel em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil.*
- ² *Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará e Brasil.*
- ³ *Bacharel em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil.*
- ⁴ *Bacharel em Engenharia Mecânica, Doutor, Professor Titular, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará e Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é uma das formas de energia mais utilizadas pela sociedade. Com a modernização dos meios de produção e, com o aumento populacional, a sua demanda cresce cada vez mais. Tanto que até 2003 o Brasil possuía 73,7 mil Km de linhas de transmissão, e até 2015 este montante passou para 124,2 mil Km (SIN). Por este motivo, o sistema de transmissão de energia elétrica do Brasil pode ser considerado como único no mundo e, desta forma, existe grande necessidade de fazer o transporte dessa energia de forma eficiente, o que implica na necessidade de que grandes investimentos sejam feitos para aprimorar as linhas de transmissão.

Existem uma variedade de ligas metálicas utilizadas em cabos para a transmissão de energia. No entanto, as ligas de alumínio, em geral, possuem características muito interessantes para esta aplicação, como a sua condutividade elétrica elevada e massa específica relativamente baixa.

No presente estudo, é avaliado o potencial da liga 0,05%Cu-0,40%Fe-0,3%Si-0,22%Zr para transmissão e distribuição de energia, com e sem o tratamento térmico a 150°C/2h com a utilização dos ensaios de tração e condutividade elétrica, além de realizar o teste de termorresistividade para os fios de diâmetros diferentes.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material foi obtido por fundição direta a partir de tarugos de alumínio eletro condutor [AL-EC], adicionando-se os elementos de liga nas proporções adequadas para obtenção das composições químicas desejadas.

A obtenção da liga iniciou-se com o corte e pesagem dos lingotes de alumínio e demais elementos. Posteriormente, os materiais foram fundidos em cadinho de carbetto de silício (3,5 l) previamente pintado na sua parte interior com solução de caulim, para evitar a aderência de metal, e submetido a pré-aquecimento a 150°C para eliminar a umidade. Em seguida, a liga foi vazada à temperatura de 900°C.

Para a solidificação da liga, adotou-se a coquilha metálica em formato de “U” como sistema operacional. Após a solidificação e desmolde, os corpos de prova [CP] como fundidos foram seccionados e usinados para os perfis de diâmetro 18,5 mm. A partir deste diâmetro, as amostras foram divididas em dois [02] grupos: i. Com amostras para serem submetidas ao processo de deformação por laminação a frio; ii. Com amostras para serem tratadas a 150°C/2h e, posteriormente, serem deformadas por laminação a frio. Para a obtenção da microestrutura de solidificação, os corpos de provas usinados, sem e com tratamento térmico, foram submetidos a técnicas de metalografia quantitativa e qualitativa.

O procedimento de conformação mecânica a frio gerou corpos de prova [CP] em forma de fios nas dimensões de [4,0; 3,8; 3,0 e 2,7] mm. A caracterização elétrica foi realizada com o auxílio de um Microhmímetro Megabrás (ponte de Kelvin) modelo MPK-2000. Os valores de resistência elétrica foram obtidos à temperatura de 20°C, como recomenda a norma NBR 5118 (ABNT NBR 5118, 2006).

Com relação a caracterização mecânica, foram ensaiados três corpos de prova com 20 cm de comprimento para cada diâmetro ou tratamento térmico em uma máquina de ensaio de tração Kratos, modelo KE 3000MP, seguindo-se a norma ABNT NBR 6810, 1981 para cabos elétricos

Os testes de termorresistividade foram realizados segundo duas [2] orientações: i. Protocolo COPEL (Companhia Paranaense de Energia), no qual é

utilizado a temperatura de 230°C por uma hora e ii. Norma ASTM B941-10, no qual é utilizado a temperatura de 280°C por uma hora. Nos dois [2] casos, os condutores elétricos não devem apresentar perda superior à 10% do seu Limite de Resistência a Tração [LRT].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Composição Química da Liga

A liga foi preparada utilizando-se cálculos estequiométricos, a fim de se obter os teores desejados dentro das devidas proporções. Após fundição, foi realizada a análise química, cujos resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 1, indicando que todos os procedimentos foram efetuados corretamente e a composição está em concordância com o escopo deste trabalho. Dessa forma, definiu-se a liga como sendo Al-0,05%Cu-0,40%Fe-0,30%Si-0,22%Zr.

Tabela 1: Composição química da liga.

Liga	Elementos de liga (%p)			
	Cu	Fe	Si	Zr
Composição desejada	0,05	0,40	0,30	0,22
Composição obtida	0,0496	0,397	0,296	0,218

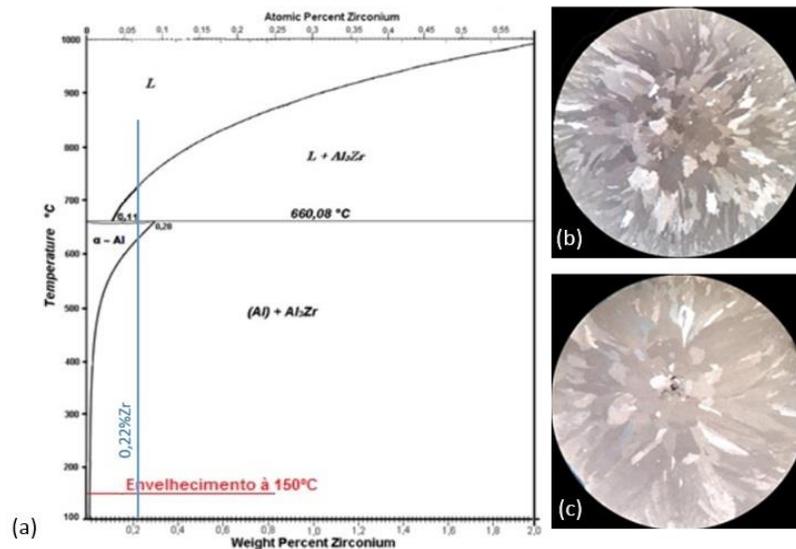
Fonte: Arquivo Pessoal.

3.2. Caracterização Macroestrutural

A Figura 1 mostra a macroestrutura da liga, com e sem tratamento térmico, reveladas através de ataque químico com solução Keller [3ml HCl, 2ml HF, 5ml HNO₃, 190ml H₂O], sendo possível identificar a predominância de grãos colunares.

Após o tratamento térmico a 150°C/2h, verifica-se que não ocorreram mudanças macroestruturais significativas, conforme a Figura 1c. É possível que as modificações acarretadas pelo tratamento térmico estejam em escala microestrutural ou subatômica, ou que possam ser percebidas através da variação da condutividade elétrica.

Figura 1: Diagrama de fases Al-Zr (a). Macrografia da liga Al-0,05% Cu-0,40%Fe-0,3%Si-0,22%Zr solidificada em molde 'U'. Liga sem tratamento térmico (b); Liga com tratamento térmico de 150°C/2h (c).



Fonte: Adaptado de HANDBOOK ASM METALS e Arquivo Pessoal.

Levando-se em consideração o modo de solidificação que o material sofreu, que seria a têmpera líquida, o material - Figura 1 (b) – se encontraria como solução sólida supersaturada, tendo em vista que a velocidade de solidificação não foi lenta o suficiente para favorecer o fenômeno da difusividade no material. Contudo, com a utilização do tratamento térmico de 150°C/2h e com a utilização do diagrama da Figura 1 (a), observa-se que o material se encontra em uma região em que provavelmente ocorra a precipitação de trialuminetos de Zr [Al_3Zr].

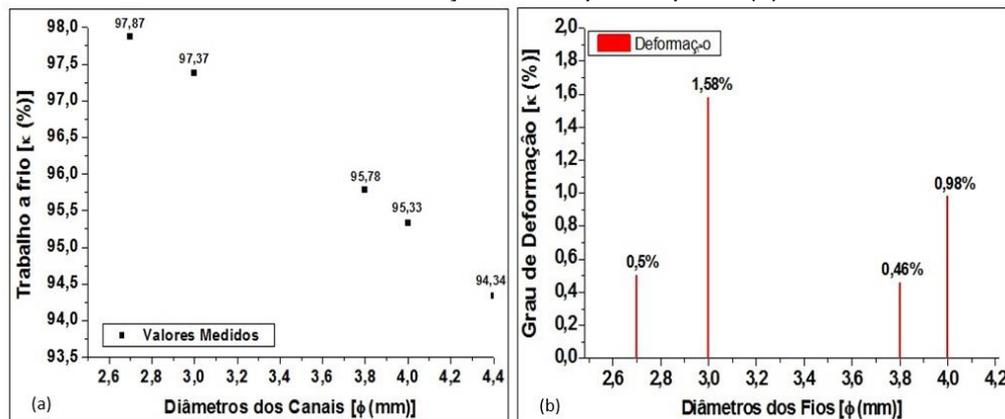
Por outro lado, a quantidade máxima possível de precipitação do [Al_3Zr]. é de aproximadamente 0,283% levando-se em consideração o tempo e temperatura propostos. Essa quantidade relativamente pequena possui estrutura sub microscópica, a qual é lida em escalas de nanômetros e identificada como dispersóides, por isso, não é possível a sua visualização na escala macroscópica.

3.3. Conformação Mecânica.

Como a etapa de conformação mecânica antecede os ensaios de resistividade elétrica e de tração, faz-se necessário explicar sobre o trabalho a frio ao qual o material foi submetido. A Figura 2 (a) e (b) indicam, respectivamente, a intensidade do trabalho a frio e o grau de deformação desenvolvidos durante a laminação. É possível perceber que o diâmetro de 2,7 mm possui a maior percentagem de trabalho a frio sofrido, que é de 97,87%. Entretanto, o diâmetro de 3,0 mm possui o maior acúmulo de deformação, considerando-se os quatro [04] diâmetros estudados.

Com o processo de laminação a frio sofrido pelo material, tanto as partículas de segunda fase quanto os próprios grãos têm várias das suas características alteradas e, dessa forma, acaba refletindo nos resultados de condutividade elétrica e limite de resistência à tração [LRT] da liga; portanto, essa abordagem tem grande importância assim como os resultados de acúmulo de deformação para cada passo de laminação. À medida que o material é laminado, parte das tensões aplicadas é transmitida para a sua estrutura cristalina, o que causa deformações nos parâmetros de rede da mesma. Esta condição é mais intensa na liga como fundida, sob Têmpera Líquida, do que a liga sob tratamento térmico de recuperação estática.

Figura 2: Trabalho a frio total alcançado durante a laminação (a) e grau de deformação para cada cadeia de laminação dos corpos de prova (b).



Fonte: Arquivo Pessoal.

É conveniente ressaltar que as amostras foram divididas em dois [02] grupos para serem avaliadas:

- i. O primeiro grupo foi caracterizado sem tratamento térmico e na condição como fundida supersaturada. Dessa forma, com a rápida solidificação da liga, a mesma se encontra como estrutura supersaturada de zircônio na matriz de alumínio, pois, com as altas taxas de solidificação, a difusão do elemento de liga estudado foi impedida, deixando a mesma enclausurada na matriz do solvente como consequência da Têmpera Líquida.
- ii. O segundo grupo foi caracterizado pós tratamento térmico, em que a temperatura e o tempo são relativamente pequenos, caracterizando um procedimento basicamente de alívio de tensão, eliminando qualquer resquício da causa da Têmpera Líquida.

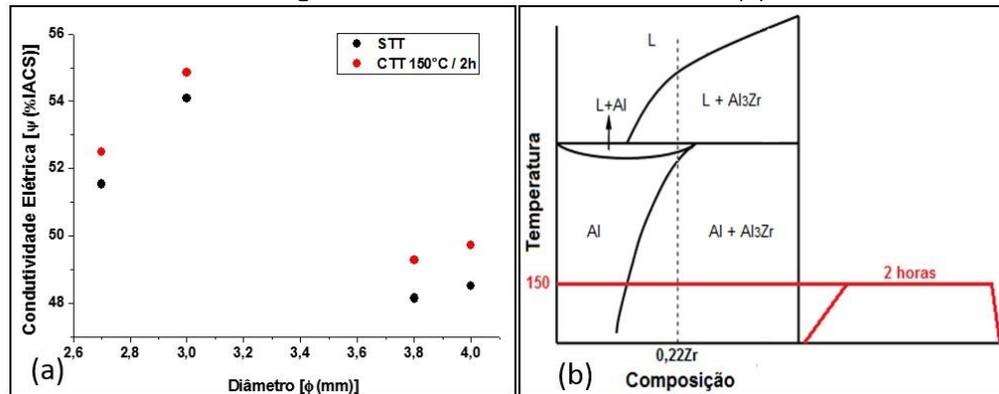
Essa é a condição em que, provavelmente, encontram-se as amostras para serem caracterizadas elétrica e mecanicamente pós deformação.

3.4. Caracterização Elétrica.

A Figura 3 apresenta os valores de condutividade elétrica para os corpos de prova sem e com tratamentos térmicos pelos diâmetros obtidos após laminação. Verifica-se que houve ganho de condutividade elétrica para a liga que sofreu o tratamento térmico de 150°C/2h. A partir da análise do diagrama de fases para o binário Al-Zr e o histórico esquemático de tratamento térmico, observa-se que o envelhecimento é realizado isotermicamente em uma região bifásica [α -Al + Al₃Zr], caracterizada pela formação de precipitados, como ilustrado na Figura 3(b). No entanto, conforme observado por Dias (2016), o efeito do tratamento térmico aparenta ter sido apenas o alívio de tensões da liga solidificada, favorecendo a mobilidade de elétrons. Assim, é provável que o tempo e a temperatura de tratamento térmico não foram suficientes para provocar a precipitação de partícula de segunda fase.

Fica evidente que o fio de 3,0 mm apresentou maior condutividade elétrica, tanto para a liga tratada quanto para a não tratada. É possível que este fato resulte da recuperação dinâmica, pois o aumento de temperatura que ocorre durante o passo de redução para o diâmetro de 3,0 mm provavelmente aumenta a mobilidade das discordâncias, resultando em uma estrutura celular com contornos mais delgados (REED-HILL, 4 Ed. p. 241, 2009).

Figura 3: Gráfico de condutividade elétrica para os diâmetros obtidos pela laminação (a) e o diagrama binário de alumínio e zircônio (b).



Fonte: Arquivo Pessoal.

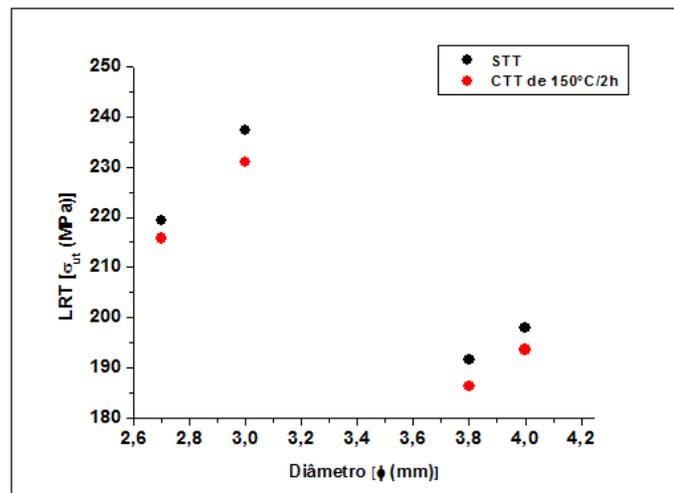
3.5. Caracterização Mecânica

Para que se possa analisar os resultados obtido nos ensaios de tração, deve-se considerar o grau de deformação a frio sofrido pelos fios em cada passo para diminuição da bitola. Como os corpos de prova são laminados para os diâmetros [4,0; 3,8; 3,0 e 2,7] mm, a Figura 2(b) ilustra o grau de deformação sofrido no passo para obtenção dos diâmetros desejados, onde se observa que o encruamento aplicado possui intensidade variável.

No processo de laminação a frio, é conhecido o fato de que a estrutura cristalina acumula parte das tensões aplicadas à peça, aumentando a concentração de discordâncias. De acordo com Reed-Hill (4th. Ed, 2009, p. 228), a deformação a frio pode elevar a quantidade de discordâncias a fatores da ordem de $[10^4 \text{ a } 10^6] m^{-1}$, aumentando, conseqüentemente, a energia de deformação do material. No entanto, como o trabalho a frio provoca quedas de condutividade elétrica menores do que os outros processos de endurecimento, constitui-se numa forma satisfatória de endurecer materiais condutores, aumentando a resistência mecânica (ASKELAND, 1 Ed., 2008, p. 180). Desta forma, ocorre a multiplicação de discordâncias, que se concentram nos contornos da rede celular, formando emaranhados de discordâncias (DIETER, 2 Ed., 1988, p. 204).

Como comentado anteriormente estas condições acima são mais intensas na liga como fundida, sob Têmpera Líquida do que na liga sob tratamento térmico de recuperação estática.

Figura 4: Gráfico de Limite de resistência a tração para os diâmetros obtidos pela laminação.



Fonte: Arquivo Pessoal.

Na Figura 4, são ilustrados os resultados para o LRT em função do diâmetro das ligas tratada e não tratada, onde se observa que a recuperação estática da liga a 150°C/2h provocou pequena redução nos valores de LRT para a liga tratada. Neste caso, a temperatura e o tempo de tratamento utilizados [150°C/2h], por serem relativamente pequenos, podem se caracterizar como tratamento de recuperação estática, e não interferem de maneira significativa sobre a resistência mecânica.

Com isso, confirma-se que o tratamento submetido à liga Al-0,22%Zr a temperatura de 150°C/2h não propicia a precipitação do [Al₃Zr], promovendo apenas o alívio de tensões internas do material ocasionado pela solidificação e, assim, a capacidade de endurecer por deformação a frio diminui.

Novamente, é nítido que o fio de 3,0mm apresentou maior valor de LRT, tanto para as amostras tratadas e não tratadas. Para elevados graus de deformação, gera-se quantidade elevada de discordâncias, o que ocasiona aumento do LRT. Contudo, quando se compara a Figura 4 (a) e a Figura 2 (b), é possível emitir juízo de que, quando precedidos de altas tensões de deformação, pequenos graus de deformação aliviam os emaranhados de discordâncias, resultando em queda de LRT (CONCEIÇÃO, 2015, p. 54).

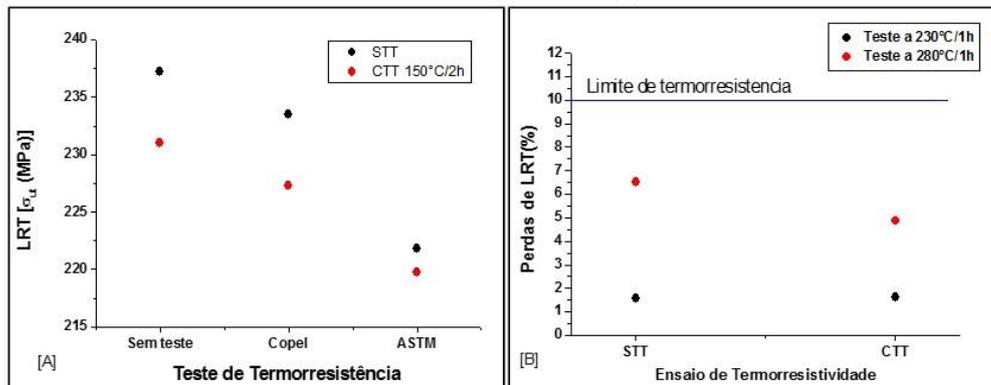
3.6. Ensaio de Termorresistividade

Como o fio de diâmetro 3,0 mm apresentou os melhores resultados de condutividade elétrica e LRT, tanto para a liga tratada quanto para a não tratada, o mesmo foi selecionado para realizar o teste de termorresistividade, conforme mostra a Figura 4.

Como o limite de perda de LRT estabelecido pelo protocolo COPEL e pela norma ASTM é fixado em 10%, pode-se identificar que as duas ligas, com e sem o tratamento de 150°C por duas horas, são termorresistentes em relação às duas orientações. No entanto, observa-se que a liga sem tratamento apresenta menores perdas de LRT do que a liga envelhecida.

Com relação aos tratamentos térmicos aos quais são submetidas as ligas nos testes de termorresistividade, observa-se que o aumento da temperatura provoca maiores perdas de LRT, como mostra a Figura 5, para COPEL (230°C/1h) e ASTM B941-10 (280°C/1h), que pode estar ocorrendo devido ao desemaranhado mais intenso das discordâncias nos contornos dos grãos a temperaturas mais elevadas, diminuindo o encruamento do material.

Figura 5: Gráfico de Limite de resistência a tração para os diâmetros obtidos pela laminação, com e sem o tratamento térmico (a) e o gráfico de perda para o LRT das ligas que passaram pelo teste de termorresistividade (b).



Fonte: Arquivo Pessoal.

4 CONCLUSÃO

- Com relação aos resultados obtidos para a liga com 0,22%Zr, verifica-se que:
- O tratamento térmico proposto não alterou significativamente a macroestrutura bruta de fusão da liga.
 - Foi constatado uma pequena queda nos valores de LRT para os fios submetidos ao tratamento térmico de envelhecimento. Entretanto, observou-se que o tratamento térmico aumentou a condutividade elétrica da liga e para o diâmetro de 3,0 mm, sem e com tratamento térmico, e permite observar que a mesma possui valores de condutividade acima de 64% IACS.
 - Após a aplicação dos testes de termorresistividade (COPEL e ASTM B941-10) realizados com os fios de 3,0 mm de diâmetro, tanto para a liga sem quanto para a liga com tratamento térmico, as perdas nos valores de LRT são inferiores a 10%, o que permite enquadrá-las como termorresistentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – Grupo de Pesquisas em Engenharia dos Materiais – GPEMAT – Instituto de Tecnologia/UFPa – ITEC - Universidade Federal do Pará – UFPA.

REFERÊNCIAS

- ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. Ciência e Engenharia dos Materiais, 1 ed., p. 180. São Paulo, Cengage Learning, 2008.
- CONCEIÇÃO, D. C. Estudo do efeito do tratamento térmico sobre uma liga al-cu-fe-si modificada com zr, destinada a tx e dx de energia elétrica. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.
- DIAS, W.S. Análise da influência do tratamento termico na liga Al-0,05%Cu- [0,35 - 0,45]%Fe modificada com dois teores de zircônio solidificada em coquilha metálica. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

- 4 DIETER, G. E. Mechanical metallurgy, 2 Ed., p. 204. Rio de Janeiro: McGraw-Hill Kogakusche Ltd. American Society for Metals-ASM, 1988.
- 5 REED-HILL, R. E. Physical Metallurgy Principles, 4ª Edição, pp. 228; 241. Rio de Janeiro: Ganabara Koogan, 2009.