

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL, ELÉTRICA E MECÂNICA DA LIGA Al-0,05%Cu-0,40%Fe-0,3%Si MODIFICADA COM OS TEORES DE [0,15 E 0,22]% Zr

Milena Cristina Melo Carvalho, milenameloc3@gmail.com¹
Carlos Alexandre Cavalcante Sousa, carlosmec21@gmail.com¹
José Roberto Carreira Reis Filho, betofilho89@hotmail.com¹
Carlos Alberto Oliveira da Silva, carlos_amazon@hotmail.com¹
Emerson Rodrigues Prazeres, eng.emersonrodrigues@gmail.com¹
José Maria do Vale Quaresma, quaresma@fem.unicamp.br¹

¹Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá, CP 479, CEP 66075-110, Belém – Pará.

Resumo: A energia elétrica atualmente é um personagem presente em quase todas as atividades da sociedade moderna, devido a essa grande demanda uma questão muito pertinente a ser estudada é a distribuição dessa energia de forma eficiente, e com este objetivo em mente foi iniciado um estudo sobre ligas de alumínio que atendam a essa necessidade. Produziu-se então a liga Al-0,05%Cu-0,40%Fe-0,3%Si modificada com os teores de [0,15e 0,22]% Zr. Posteriormente os perfis obtidos passaram pelos processos mecânicos de corte, torneamento e na sequência foram transformados por laminação a frio em fios nos diâmetros (2,7; 3,0; 3,8; 4,0) mm para serem submetidos à avaliação elétrica e mecânica. Com os diâmetros obtidos na laminação, foi realizada a caracterização elétrica e mecânica. No que diz respeito à condutividade elétrica a liga modificada com 0,15% Zr se mostrou melhor. No que diz respeito à caracterização mecânica a liga com 0,22% Zr foi mais eficiente.

Palavras-chave: Ligas de alumínio, caracterização elétrica, caracterização mecânica

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica atualmente está presente em quase todas as atividades da sociedade moderna, sendo utilizada de forma doméstica e industrial. Uma questão muito pertinente a ser estudada, devido a essa grande demanda, é a distribuição dessa energia de forma eficiente por meio de redes elétricas que são compostas por cabos, torres de transmissão e distribuição de energia. Para otimizar a transmissão da energia elétrica busca-se melhorar as características dos cabos de transmissão que transportam a eletricidade por grandes distâncias. Com este objetivo tem-se desenvolvido o estudo sobre ligas de alumínio que atendam a essa necessidade.

As propriedades e a peculiaridade do alumínio permitem que ele tenha uma ampla gama de aplicações. Por conta deste fator, o metal é um dos mais utilizados no mundo. Material leve, durável e com excelente caráter estético, o alumínio se mostra com uma excelente performance e propriedades favoráveis na maioria das aplicações (ABAL, 2012). A facilidade pela qual o alumínio pode ser fabricado é uma de suas mais importantes vantagens. O alumínio pode ser fundido por qualquer método conhecido, laminado em qualquer espessura até folhas mais finas que as de papel, chapas de alumínio podem ser estampadas, repuxadas e corrugadas. O metal, também, pode ser extrusado numa infinidade de perfis de seção transversal constante e de grande comprimento, além de poder ser forjado ou impactado. Produtos que utilizam o alumínio ganham também competitividade, em função dos inúmeros atributos presentes neste metal.

Por conta de todos esses fatores, o Grupo de Pesquisa em Engenharia dos Materiais (GPEMAT) têm estudado os mais variados efeitos do alumínio e suas ligas em busca de melhores resultados para o crescimento acadêmico da comunidade. Neste contexto, o presente trabalho propõe estudar o efeito da variação do elemento de liga Zircônio, nos teores de [0,15; 0,22]%Zr, no comportamento elétrico, mecânico e estrutural da liga Al-0,05%Cu-0,4%Fe-0,3%Si solidificada em molde tipo “U”.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Fundição e solidificação

No processo de fundição das ligas, os elementos (Cu, Fe, Si, Zr e Al) foram adicionados ao cadinho e levados a um forno a uma temperatura de 900°C por 4 h, temperatura e tempo que garantem a fusão completa de todos os elementos. O sistema operacional adotado para a solidificação das ligas foi o molde em coquilha que consiste em duas paredes de aço que são convenientemente alinhadas e fechadas com parafusos, de modo a se obter uma cavidade de forma cilíndrica com 22 mm de diâmetro. Momentos antes ao vazamento o molde foi aquecido à temperatura de 250°C, procedimento este realizado visando à remoção de umidade interna e para que houvesse preenchimento total do molde pelo metal líquido. O metal líquido foi vazado no molde de forma convencional e o preenchimento da cavidade ocorreu pela ação da gravidade. Depois que a peça foi solidificada o molde foi aberto e a peça retirada.

2.2. Caracterização elétrica e mecânica

Os ensaios elétricos e mecânicos foram realizados em fios com os diâmetros de (2,7; 3,0; 3,8; 4,0) mm obtidos após a usinagem e laminação dos corpos de prova.

Na caracterização elétrica, os corpos de prova foram submetidos a ensaios com objetivo de se avaliar a resistência elétrica com o auxílio de um multiohmímetro (ponte de kelvin) da marca MEGABRÁS, modelo MPK-2000. Os testes de resistividade elétrica foram realizados segundo as normas NBR 5118, NBR 6814 e NBR 6815.

Após a caracterização elétrica, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio mecânico, em uma máquina de ensaio de tração da marca KRATOS, modelo IKCL1. Os testes de tração foram realizados segundo as normas para cabos elétricos, NBR 6810, e materiais metálicos, NBR 6892, executando-os em três amostras com 20 cm.

2.3. Teste de termorresistividade

Para que um fio de Al, visando sua aplicação em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica, possa ser enquadrado como termorresistente é necessário que seja caracterizado como tal através de um teste de termorresistividade. Neste trabalho foram seguidas duas especificações técnicas para realização desse teste:

- Companhia Paranaense de Energia – COPEL: descreve que condutores elétricos caracterizados como termorresistentes não devem apresentar perda superior a 10% de seu limite de resistência a tração (LRT) quando submetidos à temperatura de 230°C por uma (01) hora.
- ASTM B941 – 10: especifica critérios para enquadrar fios da liga Al-Zr como termorresistentes em aplicações elétricas. Neste teste o condutor elétrico não deve apresentar perda superior a 10% de seu limite de resistência a tração (LRT) quando submetido à temperatura de 280°C por uma (01) hora e resfriado à temperatura ambiente. Além do comportamento mecânico a norma também possibilita a leitura da termorresistividade pela resistividade elétrica, onde após a aplicação da temperatura o fio não deve exceder 0,02873 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ a 20°C, ou seja, a sua condutividade elétrica deve ser igual ou maior a 60% IACS (International Annealed Copper Standard).

3. RESULTADOS

3.1. Composição Química

Após a fundição das ligas, foi utilizada a amostra testemunho para efetuar a análise química, podendo assim ser verificada a composição química das ligas em questão. Os resultados da análise química podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química das ligas de alumínio.

Liga	Elementos de Liga (%p)			
	Cobre	Ferro	Silício	Zircônio
Composição do lingote	0,0005%	0,155%	0,058%	0,0003%
Composição liga Al-0,15%Zr	0,045%	0,397%	0,293%	0,147%
Composição liga Al-0,22%Zr	0,048%	0,392%	0,297%	0,218%

3.2. Macroestruturas

As macroestruturas das ligas estudadas são apresentadas na Figura 1. Na Figura 1(a) nota-se a presença de grãos predominantemente colunares na estrutura do material, porém quando adicionado o maior teor de Zr, como é o caso da Figura 1(b), esses grãos adquiriram configurações diferentes, mostrando que houve uma sensível redução nos grãos colunares e o surgimento de grãos equiaxiais. Segundo Rodrigues (2007), a zona equiaxial é influenciada pela presença de agentes nucleantes, com maior concentração de soluto.

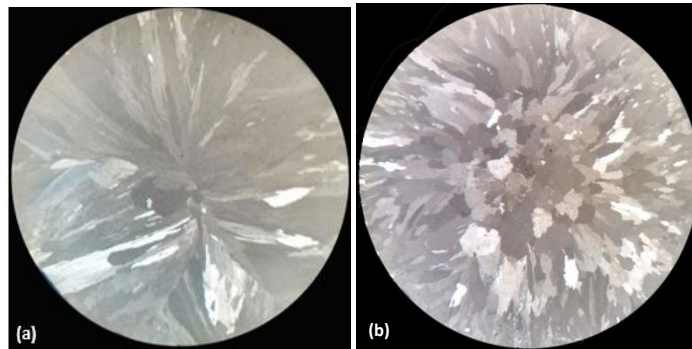


Figura 1. Macrografia da estrutura bruta de fusão: (a) Liga com 0,15% de Zr e (b) Liga com 0,22% de Zr.

3.3. Comparação da condutividade elétrica das ligas com (0,15 e 0,22)% de Zr

Na Figura 2B, observa-se que o fio com diâmetro de 3,0 mm apresenta o maior valor para a condutividade elétrica. É provável que este comportamento esteja associado ao eficiente fenômeno da recuperação dinâmica do material.

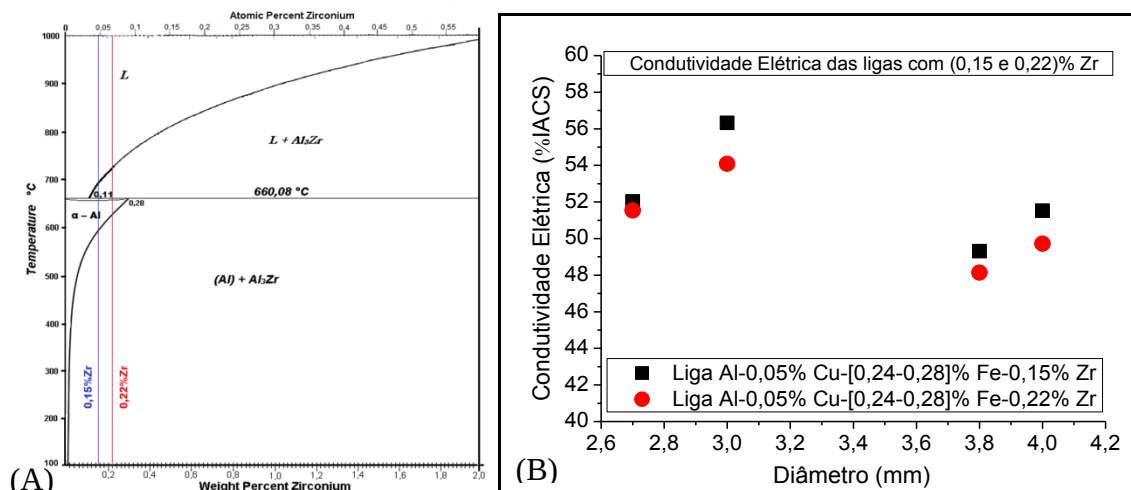


Figura 2. (A) Diagrama de fases Al-Zr (Adaptado de HANDBOOK ASM METALS, 1990), (B) Comparação entre a condutividade elétrica das ligas com 0,15% de Zr e com 0,22% de Zr.

Analisando as ligas com Al-0,15%Zr e Al-0,22%Zr (Figura 2), percebe-se que com o aumento no teor de Zr na liga, há pequena perda na condutividade elétrica, confirmando os estudos propostos por Belov et al..(2009), que afirmam que a medida que aumenta-se a concentração de soluto Zr ocorre um acréscimo na resistividade elétrica, diminuindo assim a condutividade elétrica do material.

3.4. Condutividade elétrica das ligas com (0,15 e 0,22)% de Zr com tratamento térmico

A Figura 3 apresenta as condutividades elétricas das ligas com (0,15 e 0,22)%Zr tratadas termicamente a (230 e 280)°C para os fios com diâmetro de 3,0 mm. Nota-se que o tratamento térmico eleva a condutividade elétrica das ligas e que quanto maior é a temperatura de tratamento térmico, maior é a condutividade elétrica.

Neste caso o que se pode inferir é a possibilidade da maior mobilidade das partículas de segunda fase, que segundo Dias (2016) as torna mais dispersas, mais distribuídas na matriz. O gráfico da Figura 3A permite avaliar a possibilidade de que as partículas de segunda fase possam estar na forma de Al_3Zr e a causa de melhora na condutividade seja consequência disto. Os valores plotados na Figura 3B, após os tratamentos térmicos, apontaram para o melhor desempenho na Condutividade Elétrica para a liga com 0,22%Zr ao reagir com mais rapidez à medida que a temperatura de tratamento aumenta, a causa pode ser a maior quantidade de Al_3Zr formada em cada temperatura.

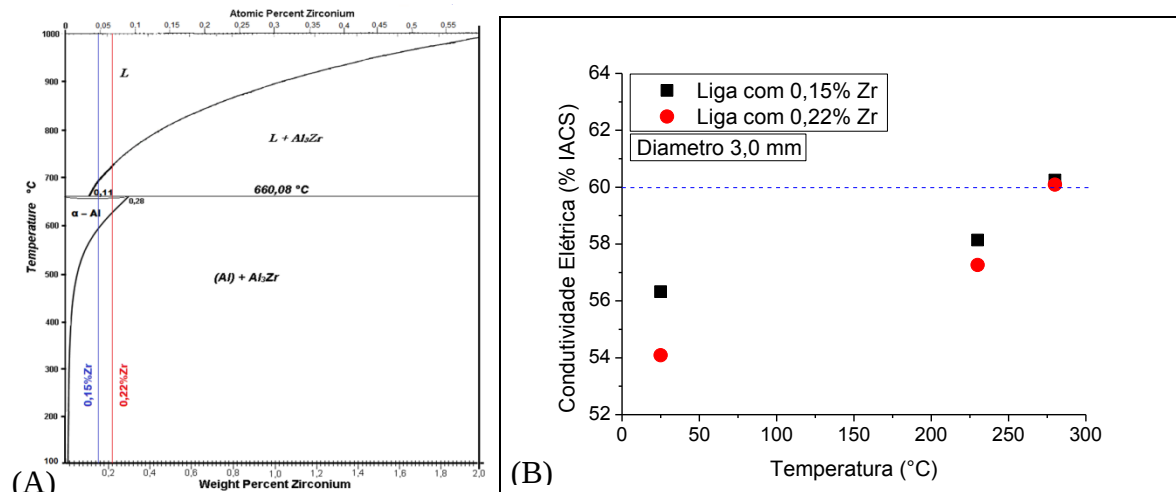


Figura 3. (A) Diagrama de fases Al-Zr (Adaptado de HANDBOOK ASM METALS, 1990), (B) Comparação entre a condutividade elétrica das ligas com 0,15% de Zr e com 0,22% de Zr tratadas termicamente a (230 e 280)°C.

3.5. Comparação do Limite de Resistência a Tração (LRT) das ligas com (0,15 e 0,22)% de Zr.

Assim como na condutividade elétrica, observa-se que o fio com diâmetro de 3,0 mm apresenta o maior valor para o LRT. É provável que este comportamento também esteja associado ao fenômeno da recuperação dinâmica do material. Entretanto, este aspecto também pode ser associado à condição da solidificação em equilíbrio de ligas hipoperitéticas ao produzirem estruturas brutas de fusão na condição de solução sólida, que podem ser mais saturadas quanto maior for o teor de soluto.

A liga Al-0,15%Zr ao solidificar apresenta em sua matriz uma solução sólida com menos soluto quando comparada com a liga Al-0,22%Zr. Em consequência a liga Al-0,22%Zr por apresentar maior concentração de soluto terá sua matriz uma solução sólida saturada e assim tenderá a responder melhor as características mecânicas, como pode ser visualizado na Figura 4B.

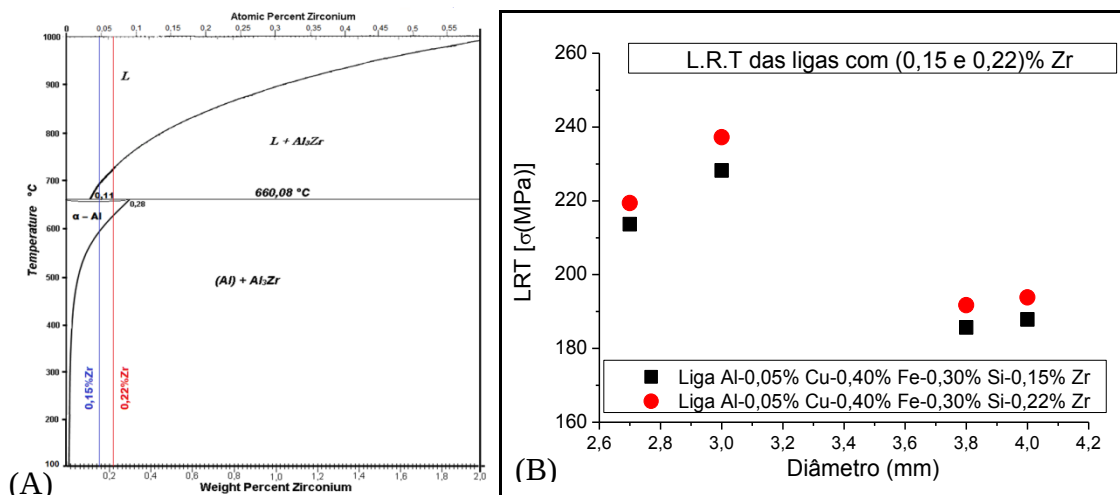


Figura 4. (A) Diagrama de fases Al-Zr (Adaptado de HANDBOOK ASM METALS, 1990), (B) Comparação entre o LRT das ligas com 0,15% de Zr e com 0,22% de Zr.

3.6. Teste de Termorresistividade das ligas com (0,15 e 0,22)% de Zr

Após as verificações de desempenho preliminares e a constatação do melhor desempenho para o fio de diâmetro 3,0 mm, optou-se por utilizar este perfil para as análises de termorresistividade. Através dos resultados gerados pelo ensaio de tração, mostrados na (Figura 5), pode-se avaliar que as perdas de LRT se mantiveram a baixo dos 10% previstos pelo Protocolo Copel e pela norma ASTM B941-10. Com isso, as ligas se caracterizaram como termorresistentes.

Há uma tendência de decréscimo no LRT à medida que a temperatura do teste aumenta. Isto pode estar ocorrendo devido à recuperação estática, que promove um rearranjo das discordâncias, seguido de aniquilamento das mesmas,

quando o material é submetido à temperatura de envelhecimento. No teste com maior temperatura, 280°C, este efeito foi mais pronunciado nas duas ligas em estudo. No entanto, existe a possibilidade da precipitação de partículas de segunda fase na forma de trialuminetos de Zr [Al_3Zr], mesmo nos níveis de temperatura e de tempo utilizado neste trabalho e é possível que tais precipitados estejam contribuindo para as pequenas perdas que se verificam colocando as duas ligas como termorresistentes. Melhor é a que possui maior teor de Zr.

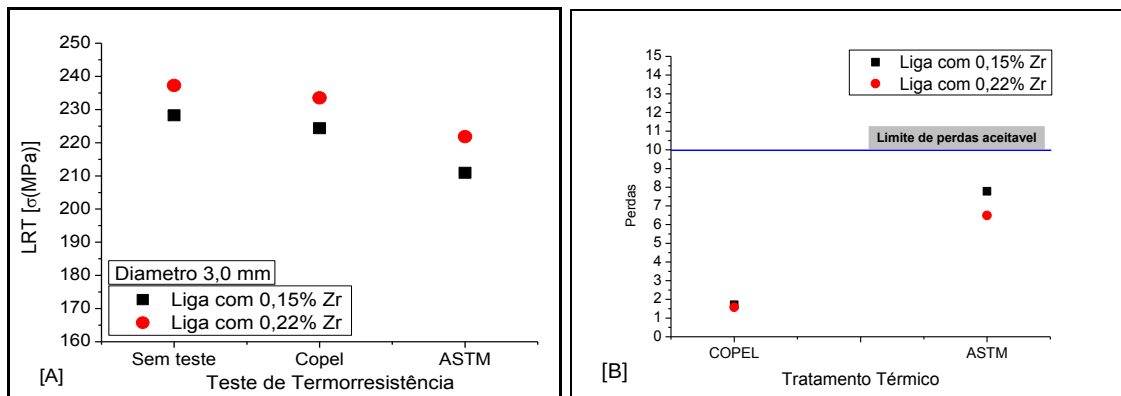


Figura 5. (A) Valores de LRT para o diâmetro de 3,0 mm da liga STT e TT 150°C por 2h; (B) Perdas de LRT em porcentagem.

4. CONCLUSÃO

Em relação às macroestruturas das ligas estudadas, notou-se a presença de grãos predominantemente colunares na estrutura do material, porém quando adicionado o maior teor de Zr, houve uma sensível redução nos grãos colunares e o surgimento de grãos equiaxiais.

O fio com diâmetro de 3,0 mm apresentou o maior valor para a condutividade elétrica e para o limite de resistência a tração. É provável que este comportamento esteja associado à matriz de deformação utilizada que contribui para o surgimento do fenômeno da recuperação dinâmica do material.

Na comparação da condutividade elétrica das ligas, verificou-se que com o aumento no teor de Zr, houve pequena perda na condutividade elétrica, pois com o aumento da concentração de soluto de Zr ocorreu um acréscimo na resistividade elétrica, diminuindo assim a condutividade elétrica do material. O tratamento térmico elevou a condutividade elétrica das ligas e quanto maior a temperatura de tratamento térmico, maior é a condutividade elétrica.

Na comparação do limite de resistência a tração, a liga contendo 0,22% Zr respondeu melhor as características mecânicas, possivelmente devido a solução sólida de α -Al da liga Al-0,22%Zr ser mais saturado e estar associado a uma etapa de recuperação dinâmica do material.

Em relação ao teste de termorresistividade, ocorreu uma tendência de decréscimo no LRT à medida que a temperatura do teste aumenta. Mesmo com essa perda de LRT, as duas ligas em estudo se caracterizaram como termorresistentes. Tendo melhor desempenho a liga que possui maior teor de Zr.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Universidade Federal do Pará (UFPA) – ITEC - Instituto de Tecnologia/UFPA.

6. REFERÊNCIAS

- ABAL - Associação Brasileira do Alumínio, 2012, “Fundamentos e Aplicações do Alumínio”. 2ª Ed.
- American society for metals (ASM INTERNATIONAL), B941-10, “Standard specification for heat resistant aluminum-zirconium alloy wire for electrical purposes, ASTM, 2010.
- American Society For Testing Materials – ASTM, 1990, “Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials ASM”, v. 2, ASM Handbook.
- Associação brasileira de normas técnicas (ABNT NBR 5118), 2007, “Fios de alumínio 1350 nus, de seção circular, para fins elétricos”, Rio de Janeiro.
- Associação brasileira de normas técnicas (ABNT NBR 6810), 1981, “Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos”, Rio de Janeiro.
- Associação brasileira de normas técnicas (ABNT NBR 6810), 1986, “Fios e cabos elétricos - Ensaio de resistência elétrica”, Rio de Janeiro.
- Associação brasileira de normas técnicas (ABNT NBR 6815), 1981, “Fios e cabos elétricos – Ensaio de determinação da resistividade em componentes metálicos”, Rio de Janeiro.

- Associação brasileira de normas técnicas (ABNT NBR 6892), 2002, “Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente”, Rio de Janeiro.
- Belov, N. A., Alabin, A.N. and A. Yu. Prokhorov., 2009, “The Influence that a Zirconium Additive has on the Strength and Electrical Resistance of Cold-Rolled Aluminum Sheets”, Russian Journal of Non-Ferrous Metals, Vol. 50, No. 4, pp. 357–362.
- Companhia Paranaense de Energia Elétrica – COPEL – Especificação 00000-30009-082, 2006, “Especificação técnica para cabos de alumínio termorresistente com alma de aço”, Paraná, 26 p.
- Dias, W.S., 2016, “Análise da influência do tratamento térmico na liga Al-0,05%Cu- [0,35 -0,45]%Fe modificada com dois teores de zircônio solidificada em coquilha metálica”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Rodrigues, J. R. P., 2007, “Efeito da Composição nos Parâmetros Térmicos e Estruturais de Ligas Al-Mg Solidificadas Unidirecionalmente”, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STRUCTURAL, ELECTRICAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF Al-0.05%Cu-0.40%Fe-0.3%Si ALLOYS MODIFIED WITH [0.15 AND 0.22]% Zr LEVELS

Milena Cristina Melo Carvalho, milenamelo3@gmail.com¹
Carlos Alexandre Cavalcante Sousa, carlosmec21@gmail.com¹
José Roberto Carreira Reis Filho, betofilho89@hotmail.com¹
Carlos Alberto Oliveira da Silva, carlos_amazon@hotmail.com¹
Emerson Rodrigues Prazeres, eng.emersonrodrigues@gmail.com¹
José Maria do Vale Quaresma, quaresma@fem.unicamp.br¹

¹Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá, CP 479, CEP 66075-110, Belém – Pará.

Abstract. Electric power is currently something that is present in almost all activities of a modern society. Due to this big demand, a very pertinent subject to be studied is the efficient distribution of this energy, and with this goal in mind, a study on aluminum alloys that meet this need was started. Then, the Al-0.05%Cu-0.40%Fe-0.3%Si alloy, modified with levels of [0.15 and 0.22]% Zr was produced. The obtained profiles went through the mechanical processes of cutting, turning and then turned to wires of (4.0, 3.8, 3.0, 2.7) mm diameter by cold rolling for them to be submitted to electrical and mechanical assessment. Mechanical and electrical characterization was performed with the obtained diameters. The alloy that was modified with 0.15% Zr showed itself better in relation to the electric conductivity, and the 0.22% Zr alloy showed itself more efficient in relation to mechanical characterization.

Keywords: Electric power, Al-Zr alloy, Electric conductivity, Mechanical characterization