

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

AValiação DAS PROPRIEDADES ELÉTRICA, MECÂNICA E TERMORESISTIVA DA LIGA Al-Cu-Fe-Si-Zr SEM E COM O ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL

Carlos Alexandre Cavalcante de Sousa, carlosmec21@gmail.com¹

Marcos Rafael da Silva Jorge, marcosdsjrafael@gmail.com¹

Jhonata Maico Paes Bezerra, jhonata_maico@hotmail.com¹

Clóvis Iarlande Oliveira Santana, clovis.mecanica@hotmail.com¹

Tiago dos Santos Antunes, tiagotunes2@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: Devido ao aumento no consumo de energia elétrica ao longo dos anos, se faz necessário o estudo de novas ligas para que sejam utilizadas como cabos de transmissão de energia elétrica a alta tensão. Nesse ponto o alumínio se mostra com grande potencial para ser utilizado. No presente trabalho, foi estudado o comportamento da liga de Al-Cu-Fe-Si com a adição do teor de 0,15% de Zr com fins de utilização em cabos elétricos. Após a obtenção do material como fundido o mesmo foi submetido a dois trajetos operacionais: sem e com tratamento térmico de envelhecimento artificial a 150°C por duas horas. Em seguida, as ligas tratadas e não tratadas passaram pelo processo de usinagem para o diâmetro de 18,5 mm e posteriormente pelo processo de trabalho a frio onde foram obtidos os diâmetros de (4,0; 3,8; 3,0 e 2,7) mm. Ambas as ligas foram submetidas aos ensaios de condutividade elétrica e tração. Após a caracterização e a análise dos resultados obtidos, o diâmetro de 3 mm apresentou o melhor conjunto de propriedades mecânicas e elétricas, tanto para a liga sem tratamento térmico quanto para a liga tratada termicamente, com isso, o mesmo foi selecionado para o teste de termorresistividade. No que diz respeito à condutividade elétrica a liga tratada termicamente apresentou melhor desempenho. No que diz respeito à caracterização mecânica o tratamento térmico não teve grande influência no limite de resistência à tração. Já com relação ao teste de termorresistividade o tratamento térmico ocasionou pequenas perdas no limite de resistência à tração da liga.

Palavras-chave: Energia Elétrica, Liga Al-Zr, caracterização mecânica, condutividade elétrica, termorresistividade.

1. INTRODUÇÃO

Com a necessidade crescente por demanda de energia, tem-se a criação de novas instalações que irão somar suas capacidades individuais a fim de gerar as quantidades de energia suficientes para suprir a demanda nacional. Entretanto, com os níveis requeridos de energia ocorrem diversos efeitos sobre as linhas de transmissão, que vem a atuar diretamente na deterioração das características mecânica dos mesmos.

A maioria dos sistemas de transmissão para grandes distâncias compõe-se de linhas aéreas, em que o uso de condutores de alumínio Eletro Condutor – Al-EC proporciona grande economia na altura e na resistência das estruturas de sustentação.

Dentro desse contexto surgem às ligas termoresistentes, que possui entre outras propriedades, capacidade de transmissão e/ou distribuição de energia elétrica maior do que aquelas possíveis de serem obtidas por condutores de Al-EC após o tratamento térmico pertinente sem grandes perdas das suas propriedades mecânicas.

Segundo (Régis Júnior, 1999), devido a essas características, um condutor com Liga de alumínio termorresistente pode ser utilizado em regime contínuo de trabalho em temperaturas de até 150°C sem que haja deterioração das características mecânicas, tais como: tração, alongamento e dureza.

Frente à necessidade, o Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais (GPEMAT) vem estudando novas ligas que possam ser capazes de atuar de forma superior, fornecendo assim materiais com características mecânicas melhores a fim de atuar diretamente na vida útil do material. O trabalho tem como finalidade analisar as propriedades estruturais,

elétricas e mecânicas da liga Al-0,05%Cu-0,40%Fe-0,3%Si-0,15%Zr dessa forma, averiguando a sua aplicabilidade na transmissão e distribuição de energia elétrica por meio de fios e cabos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A produção das ligas se deu por fundição direta no sub-laboratório de Metalografia e Tratamento Térmico da Universidade Federal do Pará. A preparação das ligas foi feita com a adição dos teores de 0,05% de Cu, 0,40% de Fe, 0,30% de Si e 0,15% de Zr ao Al-EC, nas proporções adequadas para obtenção das composições químicas desejadas.

Primeiramente os lingotes de alumínio foram cortados na serra fita e pesados na balança de precisão. Em seguida, o alumínio já seccionado foi fundido em um cadinho de carbetto de silício de 3,5 l, sendo que o mesmo foi previamente preparado com uma pintura na sua parte interna com uma solução de caulim, para evitar aderência do material fundido a parede do cadinho, e aquecido a uma temperatura de 150°C para a retirada de umidade em um forno do tipo Mufla da marca BRASIMET.

Antes de realizar o vazamento das ligas foi feita a inserção de argônio no banho metálico para efetuar a retirada de impurezas da liga, sendo feito este serviço com auxílio de uma espátula de aço previamente pintada com a solução de caulim. Após foi realizada a obtenção de uma amostra testemunho para a análise química.

A análise química da liga foi realizada efetuando a média de no mínimo três queimas da amostra testemunho e realizada a leitura da análise química. O equipamento utilizado para efetuar-la foi o espectrômetro de emissão ótica da marca Brucker, modelo Q4 Tasman.

O banho metálico vazado em uma coquilha metálica em formato de “U” que já estava previamente pintada com uma solução de caulim e aquecida à temperatura de 150°C para a retirada de umidade.

Após o vazamento o material obtido foi usinado para o diâmetro de 18,0 mm. Em seguida as amostras foram divididas em dois [02] lotes: i. Foi tratado termicamente a 1500°C; ii. Não sofreu tratamento térmico. Posteriormente foram laminado para os diâmetros de [4,0; 3,8; 3,0 e 2,7]mm.

Na caracterização elétrica os corpos de provas foram submetidos aos ensaios para avaliação de sua resistência elétrica com o auxílio de um Microhmímetro Megabráis (ponte de kelvin) modelo MPK-2000.

Os valores de resistência elétrica dos fios foram medidas em temperatura de 20°C como recomenda a norma NBR 5118 (ABNT NBR 5118, 2006).

O teste de termoresistividade foi realizado segundo duas [02] especificações: i. Realizado pela proposta da COPEL (Companhia Paranaense de Energia), para a temperatura de 230°C por uma hora, realizado segundo a Norma ASTM B941 para a temperatura de 280 °C por uma hora. Nos dois [02] casos condutores elétricos caracterizados como termorresistentes não devem apresentar perda superior a 10% de seu limite de resistência a tração.

Posteriormente os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração para a obtenção do seu LRT (Limite de Resistência a Tração) em máquina de ensaio de tração do fabricante Kratos, modelo KE 3000MP. Os ensaios de tração foram efetuados segundo a norma ABNT NBR 6810, 1981 para cabos elétricos, executados em três amostras com 20cm de comprimento para cada diâmetro ou tratamento térmico produzido ao longo do trabalho, resultando em um valor médio de LRT em MPa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Composição química da liga

A liga estudada foi preparada com adição de elementos de liga sobre a composição química do lingote. Após a fundição da liga, obteve-se o resultado da composição química do material produzido. Através da Tabela 1 podemos notar que a composição química da liga obtida esta de acordo com a composição química desejada no início do trabalho, salvo pequenas variações, indicando que todos os procedimentos efetuaram-se de forma normal.

Tabela 1: Composição da liga.

Liga	Elementos de liga (%p)			
	Cu	Fe	Si	Zr
Composição do lingote	0,0005	0,155	0,058	0,0003
Composição desejada	0,05	0,40	0,30	0,15
Composição obtida	0,045	0,397	0,293	0,147

3.2. Caracterização macroestrutural

A Figura 1 revela a macroestrutura da liga Al-0,05%Cu-0,40%Fe-0,3%Si-0,15%Zr, sem e com tratamento térmico, revelada através de ataque químico com solução “Keller” de composição [3ml HCl, 2ml HF, 5ml HNO₃, 190ml H₂O]. É possível observar a presença predominante de grãos colunares finos na liga como fundida.

Após o tratamento térmico de 150°C por 2 horas não ocorreram mudanças expressivas nas estruturas características da solidificação, pois possivelmente as alterações provocadas pelo tratamento térmico estão em escala microestrutural ou subatômica.

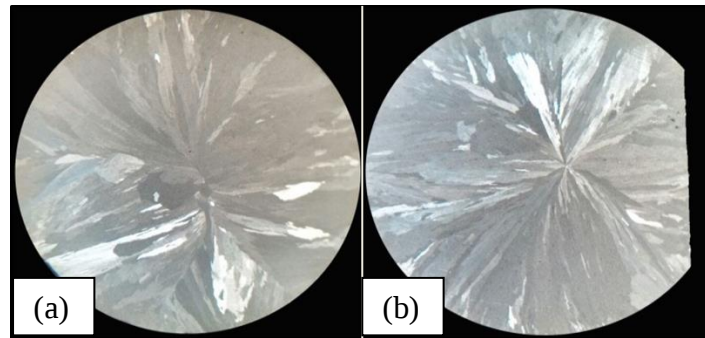


Figura 1: Macrografia da liga Al-0,05% Cu-0,40% Fe-0,3% Si-0,15% Zr solidificada em molde 'U'. (a) Liga sem tratamento térmico; (b) Liga com tratamento térmico de 150°C por 2 horas.

3.3. Comparação dos resultados

3.3.1. Comparação Da Condutividade Elétrica Da Liga 0,15% Zr STT E TT-150°C/2h

A Tabela 2 e a Figura 2 ilustram os valores de condutividade elétrica, para os diâmetros 4,0, 3,8, 3,0 e 2,7mm, para a liga sem tratamento e tratada termicamente a 150°C por duas horas. De acordo com os dados, nota-se que houve um acréscimo nos valores de condutividade elétrica da liga em estudo após o tratamento térmico.

Tabela 2: Resultados do ensaio de condutividade elétrica para a liga em estudo STT e TT 150°C por 2 horas.

Diâmetro dos Fios [φ(mm)]	Condutividade Elétrica (% IACS)	
	Al-0,15%Zr – STT	Al-0,15%Zr – TT 150°C – 2h
2,7	52,03	55,94
3,0	56,32	57,58
3,8	49,31	51,68
4,0	51,52	52,83

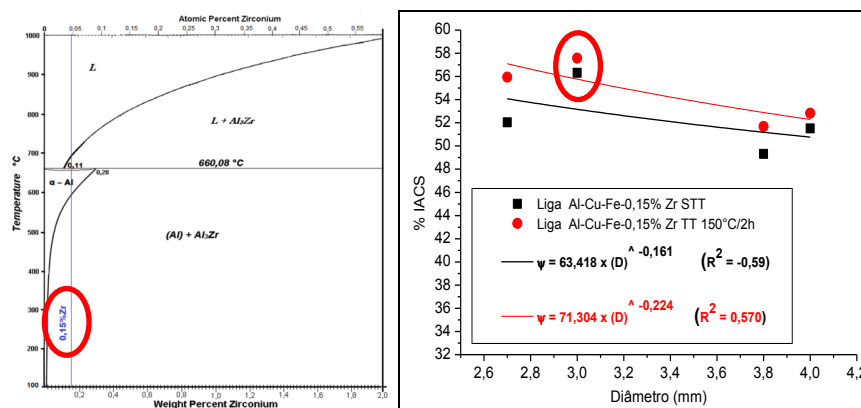


Figura 2: (a) Diagrama de fases Al-Zr, adaptado de HANDBOOK ASM METALS; (b) Comparação dos resultados da condutividade elétrica para a liga em estudo STT e TT 150°C-por 2 horas.

Consultando o diagrama de equilíbrio para o binário Al-Zr (ver Figura 2a), a estrutura da liga na condição como fundida se apresenta na forma de solução sólida. No entanto susceptível a precipitação de partículas de segunda fase quando submetida a tratamento térmico; no sistema Al-Zr estas partículas surgem na forma de trialuminetos [Al₃Zr].

O aumento de condutividade observado após a aplicação do tratamento térmico de 150°C por 2 horas na liga estudada sugere que a presença de trialuminetos influenciou em uma melhora na condutividade da liga.

O outro aspecto que pode ser avaliado dos valores observados na Figura 2B trata-se dos relativos aos fios com diâmetros de 3,00mm, que independente do estado termodinâmico apresenta os maiores valores. É possível que este desempenho esteja relacionado com o fenômeno da recuperação dinâmica provocada pela matriz de deformação adotada no processo mecânico deste trabalho.

3.3.2. Comparação Dos Limites De Resistência A Tração Da Liga 0,15% Zr STT E TT-150°C/2h

A Tabela 3 e a Figura 3 ilustram os valores do limite de resistência à tração, para os diâmetros [4,0; 3,8; 3,0 e 2,7]mm, para a liga sem tratamento e tratada termicamente a 150°C por duas horas. De acordo com os dados, nota-se que não houve alterações que pudessem definir uma tendência de aumento ou queda nos valores de limite de resistência à tração da liga em estudo após o tratamento térmico.

Tabela 3: resultados do limite de resistência a tração para a liga em estudo STT e TT 150°C por 2 horas.

Diâmetro dos Fios [ϕ (mm)]	Limite de Resistência a tração (MPa)	
	Al-0,15%Zr – STT	Al-0,15%Zr – TT 150°C – 2h
2,7	213,66	218,06
3,0	228,24	225,67
3,8	185,71	184,35
4,0	187,85	186,02

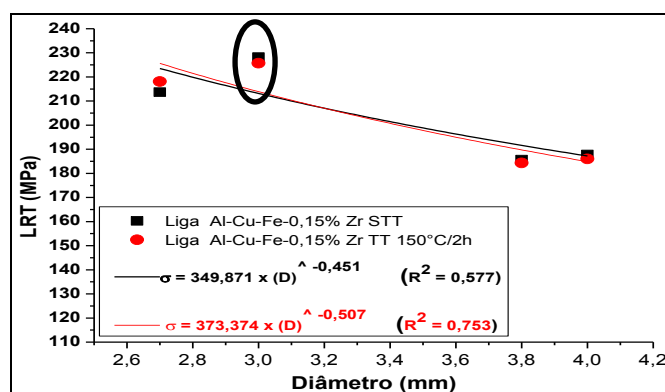


Figura 3: Comparação dos resultados do LRT para a liga em estudo STT e TT 150°C por 2 horas.

Como citado anteriormente à condição como fundida da liga ao se encontrar na forma de solução sólida apresenta boa suscetibilidade a precipitação quando submetida ao tratamento térmico de 150°C por 2 horas. Entretanto, o que pode inferir-se neste caso é em relação a forma e a quantidade dos trialuminetos que não interferem nas características mecânicas.

3.4. Teste de termorresistividade

Como o diâmetro de 3 mm apresentou os melhores resultados, condutividade elétrica e LRT, tanto para a liga sem tratamento como a tratada termicamente, o mesmo foi selecionado para a realização dos testes de termorresistividade.

3.4.1. Avaliação da condutividade elétrica da liga com e sem tratamento de 150°C por 2 horas antes da deformação, para o diâmetro de 3,00mm, submetidas a temperaturas de [230 e 280] °C/1h, conforme o protocolo COPEL e norma ASTM B941-10, respectivamente.

A Tabela 4 e Figura 4 relacionam os valores da condutividade elétrica e os ganhos ocorridos após os tratamentos térmicos de 230°C e 280°C por 1 hora, realizados durante os testes de termorresistividade realizados na liga sem tratamento e com tratamento térmico prévio de 150°C por 2 horas antes da deformação.

Tabela 4: resultado da condutividade elétrica para o diâmetro de 3,0mm da liga STT e TT 150°C por 2h.

Liga	Sem o teste de termorresistividade	Com o teste de termorresistividade			
		230 °C / 1h		280 °C / 1h	
		Condutividade elétrica (%IACS) Ganho (%)			
		%IACS	%IACS	Ganho (%)	%IACS
Al-0,15%Zr – STT	56,32	57,26	0,94	61,47	5,15
Al-0,15%Zr – TT 150°C – 2h	57,58	60,25	2,67	63,09	5,51

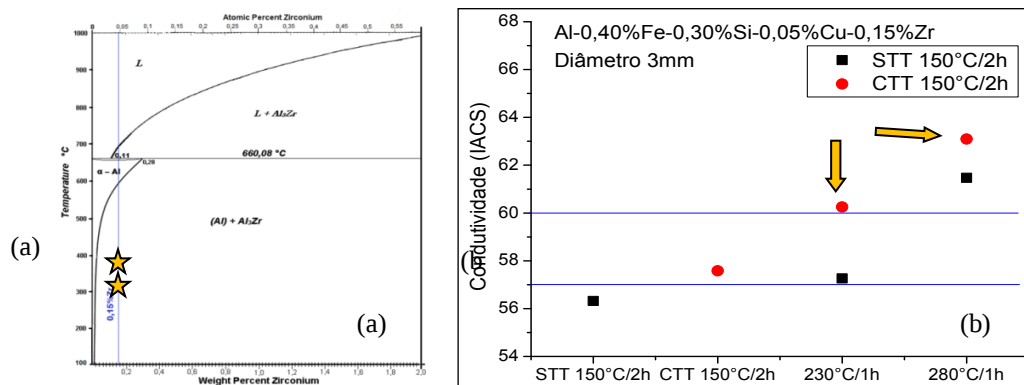


Figura 4: (a) Diagrama de fases Al-Zr, adaptado de HANDBOOK ASM METALS; (b) Valores da condutividade elétrica para o diâmetro de 3,0 mm da liga STT e TT 150°C por 2 Horas.

Após o teste de termorresistividade, ocorreram ganhos na condutividade elétrica maiores, para a liga, à medida que foram utilizadas maiores temperaturas de tratamento térmico. Estes resultados sugerem que indicados pelas setas, e à medida que a temperatura de tratamento térmico aumenta provoca aumento na precipitação das partículas de trialuminetos que o duplo tratamento térmico [150+230]0C e [150+280]0C, estariam sendo responsáveis pela elevação dos valores de condutividade elétrica observados na Figura 4(b). No diagrama de fases Al-Zr, Figura 4a, encontram-se indicadas as temperaturas utilizadas nos testes de termorresistividades.

3.4.2. Teste de Termorresistividade para a liga com e sem tratamento de 150°C por 2 horas antes da deformação, segundo o Protocolo COPEL CTT de 230°C/1h e a Norma ASTM B941-10 CTT de 280°C/1h e suas respectivas perdas para o diâmetro de 3,00 mm.

Os resultados do limite de resistência a tração e as perdas que ocorreram após os testes de termorresistividade podem ser observados na Tabela 5 e Figura 5.

Tabela 5: Valores do LRT para o diâmetro de 3,0 mm da liga STT e TT 150°C por 2 horas.

Liga	Sem o teste de termorresistividade		Com o teste de termorresistividade		
			230 °C / 1h	280 °C / 1h	
	LRT	Limite de Resistência a Tração (MPa) Perda (%)			
		LRT	Perda (%)	LRT	Perda (%)
Al-0,15%Zr – STT	228,24	224,33	1,72	210,93	7,58
Al-0,15%Zr – TT 150°C – 2h	225,67	218,84	3,03	205,27	9,04

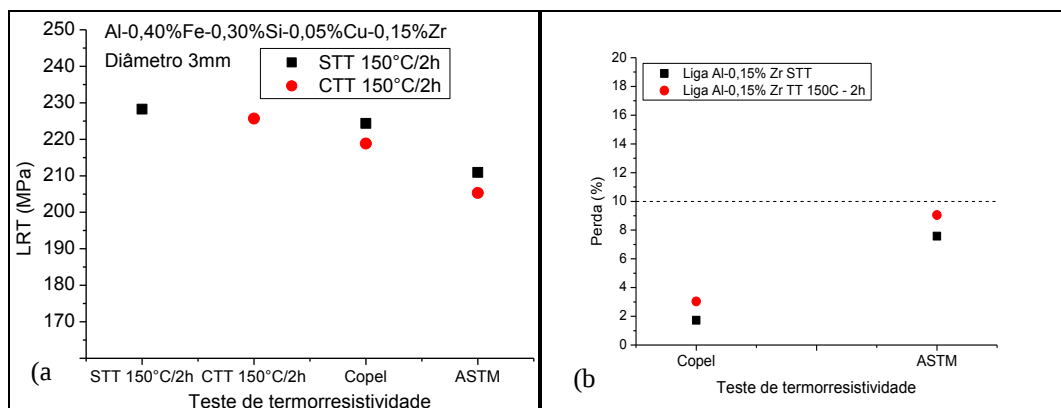


Figura 5: (a) Resultados do LRT para o diâmetro de 3,0 mm da liga STT e TT 150°C por 2 h; (b) Perda em porcentagem, do limite de resistência a tração.

Através dos resultados gerados pelo ensaio de tração, mostrados na tabela 5 e figura 5, pode-se avaliar que com o tratamento térmico nas amostras, há a tendência de decréscimo da resistência a esforços de tração à medida que a temperatura do tratamento aumenta, como citado anteriormente isso pode estar relacionado com a maior quantidade de precipitados que são gerados durante tratamentos térmicos a temperaturas mais elevadas.

Os valores de limite de resistência à tração (Mpa) após a realização dos testes de termorresistência se mantiveram a baixo dos 10% de perdas.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos deste estudo, para o teor de Zr (0,15%p) apresentado, constatou-se que o tratamento térmico não provocou significativas alterações na microestrutura bruta de fusão da liga Al-0,05%Cu-0,40%Fe-0,3%Si-0,15%Zr. Os fios deformados após o tratamento térmico não obtiveram variações significativas nos valores de limite de resistência a tração. Já os valores de condutividade (IACS) apresentaram um aumento após os tratamentos térmicos.

Em todas as temperaturas analisadas, para o fio com diâmetro de 3,0 mm, ocorreu ganho nos valores de condutividade elétrica.

Após o teste de termorresistividade, Copel (230°C/1h) para a ASTM B941 – 10 (280°C/1h), a liga Al-0,05%Cu-0,40%Fe-0,3%Si-0,15%Zr teve perdas de LRT inferiores 10%. Tanto a liga sem e com tratamento térmico onde ambas se enquadraram como termorresistente, com destaque para a liga tratada a 150°C por 2 horas (CTT) que obteve ganhos de 2,85% e 7,69%, em que as ligas estavam submetidas a duplo tratamento térmico [150+230]°C e [150+280]°C, respectivamente para o protocolo Copel e a Norma ASTM B941 – 10, mantendo os valores de condutividade acima de 60% IACS, em ambos os caso.

Por outro lado, fica evidente que os trialuminetos de Zr [Al3Zr] produzidos nas condições operacionais deste trabalho, contribuíram de forma positiva nas características de conduzir eletricidade e de termorresistência.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem 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.
- 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.
- 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.
- American Society For Testing Materials – ASTM, 1990, “Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials ASM”, v. 2, ASM Handbook.
- Regis Júnior, O, 1999. “A utilização de condutores de Liga de Al Termo-resistente na Repotencialização de LT de Transmissão e Sub-transmissão”, In: Seminário de Produção e Transmissão de Energia, n.15, Foz do Iguaçu. Anais, 1999.
- Knipling, K. E.; Dunand, D. C.; Seidman, D. N, 2007. “Nucleation and precipitation strengthening in dilute Al-Ti and Al-Zr alloys”, Metallurgical and Materials Transactions A, v. 38A, n. 10, p. 2552-2563.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ELECTRICAL, MECHANICAL AND THERMAL RESISTIVE PROPERTIES EVALUATION OF Al-Cu-Fe-Si-Zr ALLOY WITH AND WITHOUT ARTIFICIAL AGING

Carlos Alexandre Cavalcante de Sousa, carlosmec21@gmail.com¹

Marcos Rafael da Silva Jorge, marcosdsjrafael@gmail.com¹

Jhonata Maico Paes Bezerra, jhonata_maico@hotmail.com¹

Clóvis Iarlande Oliveira Santana, clovis.mecanica@hotmail.com¹

Tiago dos Santos Antunes, tiagotunes2@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. Due to the increasing electric power consume, it is necessary to study new kinds of alloys for them to be utilized as transmission cables for high voltage electric power. Aluminium shows itself as one of the bests options for that. In this work, the behavior of Al-Cu-Fe-Si alloy plus 0,15% of Zr was studied in order to use it on electric cables. Then, the molten material was subjected to two kind of process: one is a two hour 150°C artificial aging heat treatment and the other is without the heat treatment. After that, both alloys turned to a 18,5mm diameter by a machining process and then turned to (4.0, 3.8, 3.0 and 2.7) mm diameter by a cold working process. Both alloys was also submitted to tensile and electric conductivity tests. After the results characterization and analysis, the 3mm diameter presented the best set of mechanical and electrical properties, both for the alloy without heat treatment alloy and for the heat treated alloy, therefore, it was selected for the thermal resistance test. The heat treated alloy showed better performance in regard to electric conductivity, the heat treatment had little influence on the tensile strength limit in regard to mechanical characterization, and the heat treatment resulted in small losses to alloy's tensile resistance limit in regard to the thermal resistance test.

Key words:

Keywords: Electric power, Al-Zr alloy, Mechanical characterization, Electrical conductivity, Thermal resistance.