

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE DO EFEITO DA ADIÇÃO DE Fe e Zr NA LIGA Al-0,05%Cu ANTES E APÓS TRATAMENTO TÉRMICO À 230°C POR 500 h

Natália Cristina Araújo Costa, natalia.araujoc@hotmail.com¹

Mário Américo Xavier, marioamerico92@hotmail.com¹

Rafael Assis da Silva, rafael7.assis@gmail.com¹

Nardiny Diego Souza Alves, nardiny_diego@hotmail.com¹

Renan Gouvea Dias, renan.gouveadias@mail.utoronto.ca¹

Hélido Cleidson de Oliveira Sena, helido.sena@alubar.net¹

José Maria Do Vale Quaresma, quaresma@fem.unicamp.br¹

¹Universidade Federal do Pará – Instituto de Tecnologia, Rua Augusto Corrêa, 01.

Resumo: O Sistema Interligado Nacional de transmissão e distribuição de Energia Elétrica vem sofrendo com sobrecargas. Sendo estas linhas feitas com ligas de Alumínio eletro condutor (Al-EC), é proposto o recondicionamento das mesmas com ligas de Al Termorresistente (TAL) que são capazes de maior transmissão de energia em comparação com o Al-EC de mesmo diâmetro. O estudo objetiva comparar diferentes elementos de liga (Fe e Zr) para definir a influência dos mesmos para selecionar a melhor liga na aplicação de cabos elétricos. As diferentes ligas estudadas foram caracterizadas elétrica, mecânica e estruturalmente. A confecção dos corpos de prova foi feita a partir de vazamento em molde de coquilha metálica “U”, usinados, laminados e trefilados para o diâmetro de 2,90mm. Os resultados já encontrados mostram que ligas Al-0,05%-Cu-0,03%Zr-X%Fe podem ter até 0,23%Fe para serem caracterizadas como TAL para um ensaio de Termorresistência à 230°C por 500 h.

Palavras-chave: Ligas Al-Zr, Ligas Al-Fe, Termorresistência

1. INTRODUÇÃO

A distribuição de energia elétrica no Brasil e no mundo é um desafio que cresce com o passar do tempo. A criação de novas linhas é de alto custo, porém é frequentemente visto como a única solução. Contudo o recondicionamento de linhas com cabos feitos a partir de ligas com melhores propriedades elétricas e mecânicas pode ser uma alternativa para solução do problema e com menor custo que a simples ampliação da rede de distribuição.

O estudo apresentado neste trabalho objetiva analisar a influência do ensaio de termorresistividade nas ligas Al-Cu-Fe modificadas com 0,03% de Zr quanto às propriedades elétricas e mecânicas.

Para obter uma avaliação qualitativa e quantitativa do comportamento da liga, as etapas de produção e avaliação foram divididas da seguinte forma: i. A primeira etapa consistiu no ajuste do teor de Cu na obtenção da liga base Al-0,05%Cu para em seguida ser modificada com Fe nos cinco teores estudados [0,15-0,20-0,25-0,30-0,35]%; ii. A segunda etapa em que as ligas obtidas com Fe foram modificadas com 0,03% de Zr. As ligas com e sem Zr foram comparadas mecanicamente e eletricamente. A liga modificada com Zr foi ainda analisada segundo a termorresistividade por 500h.

1.1. Obtenção dos Corpos de Prova

As ligas foram obtidas por fundição em coquilha metálica. Os materiais utilizados foram: barras de Al 1350 – 99,70%; perfil de cobre eletrolítico – 99,90%; arame recozido – 99,90% Fe; e lingote da pré-liga de Al-10%Zr. Estes materiais foram cortados, pesados e fundidos em forno do tipo mufla a 790°C. Antes do vazamento foi realizada a injeção de argônio com vazão de 0,20 l/min por 35 segundos para agitação da liga, retirada de gases e purificação do banho metálico com a retirada de impurezas. O metal fundido foi vazado em lingoteira em formato “U” calafetado com argamassa refratária. Este processo foi repetido para obtenção de cada uma das ligas com diferentes composições.

O corpo de prova em formato de “U” obtido teve suas pernas seccionadas, dando origem a dois cilindros de 250mm de comprimento por 22 mm de diâmetro. Estes cilindros foram usinados para o diâmetro de 10 mm. Em seguida

foram laminados a frio para o diâmetro de 4 mm e trefilados para os diâmetros de 3,60 mm, 3,18 mm e finalmente 2,90 mm, o diâmetro pré-definido para o corpo de prova que foi ensaiado.

1.2. Ensaios

As propriedades elétricas foram medidas adotando a NBR 6814, que descreve o método de medição de resistividade elétrica para fios condutores, utilizando uma ponte de Kelvin. As medições foram feitas em conformidade com as temperaturas limite descritas na NBR 5118. Os resultados obtidos foram convertidos para valores em %IACS.

O ensaio mecânico realizado foi o de tração, seguindo as recomendações da NBR 6810 em um equipamento de controle hidráulico, que registrou os valores do limite de resistência a tração para cada uma das ligas analisadas.

Também foi realizado ensaio de termoresistividade seguindo o protocolo da Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL) modificado para 500h visando a avaliação das propriedades do material após o tratamento térmico.

Para garantir a boa qualidade do fio obtido, foi realizado o teste de ductilidade segundo a norma NBR 5118.

Para obtenção qualitativa das microcavidades foram obtidas imagens utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) e foi utilizado o software MOTIC para auxílio na contagem e medição das microcavidades seguindo a norma ASTM E112-96 (Método de Heyn).

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os elementos de adição utilizados foram selecionados para a liga de maneira que todas as adições de ferro formam ligas hipoeutéticas, solidificando até a temperatura ambiente obtendo um arranjo estrutural [$\alpha + (\alpha + \text{Al}_3\text{Fe})$], como pode ser visto na figura 1(a). Por outro lado o sistema Al-Zr presente no sistema sempre se apresentará na forma Al- α , sem a possibilidade de precipitação, como evidenciado na Figura 1(b).

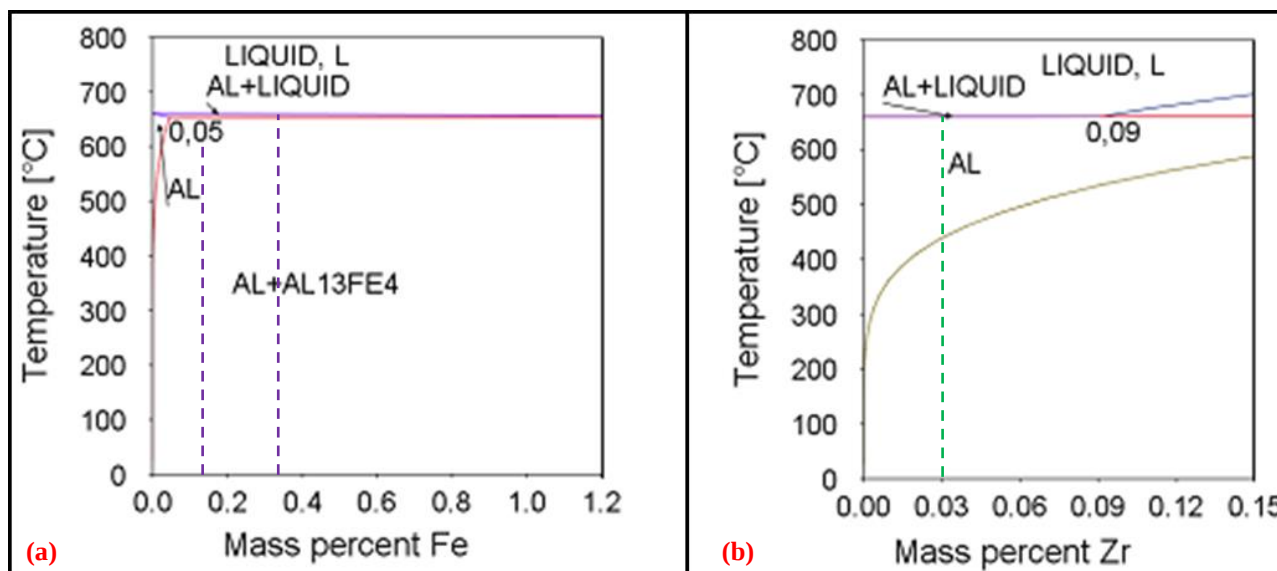


Figura 1. Trecho da Transformação Eutética do Diagrama de Fases Al-Fe obtido com o software ThermoCalc com adições mínima e máxima de Fe utilizadas demarcadas (a) e Diagrama de Fases Al-Zr obtido com o software ThermoCalc com adição de Zr utilizada demarcada (b).

Na primeira etapa do trabalho é feita a adição apenas de ferro nos teores de 0,15%; 0,20%; 0,25%; 0,30%; e 0,35% na liga base de Al-0,05% Cu. Os resultados obtidos pelos ensaios de condutividade e tração são mostrados na nos itens 2.1 e 2.2.

2.1. Avaliação da Condutividade Elétrica em função do Teor de Fe.

Foi realizado o ensaio de condutividade elétrica das ligas obtidas e os resultados são mostrados na figura 2(a), em %IACS (International Annealed Copper Standard). A figura 2(a) mostra leve queda de condutividade elétrica com o aumento dos teores de ferro. Neste caso é possível inferir que a presença de maior quantidade de Al_3Fe contido no constituinte eutético com o aumento do teor de ferro provoque a pequena perda na condutividade elétrica constatada, na ordem de 1% de IACS entre a menor e maior adição de ferro. Esta perda, quando comparada ao grande aumento de resistência à tração, próximo dos 20%, pode ser considerada sem consequência em face do grande ganho mecânico.

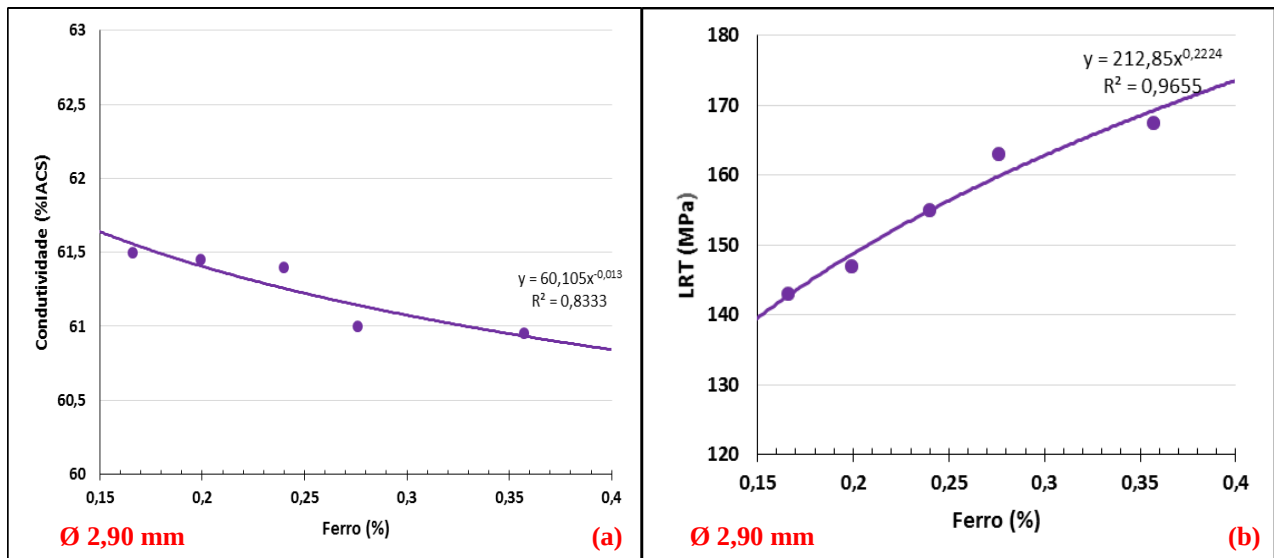


Figura 2. Valores de condutividade elétrica em função da porcentagem de Fe para a liga Al-0,05%Cu-X%Fe (a) e Limite de resistência a tração para a mesma liga (b).

2.2. Avaliação do LRT em função do Teor de Fe.

A figura 2(b) mostra que o aumento do teor de ferro na liga acompanha aumento progressivo do limite de resistência à tração, resultado que é desejável para a aplicação na construção de cabos de transmissão de energia elétrica. A variação foi entre 140 MPa para a menor adição de ferro, 0,15%, até valores próximos de 170 MPa para a adição de 0,35%. É muito provável que este comportamento esteja atrelado a presença, sempre crescente, do trialumínio $[Al_3Fe]$ contido no constituinte eutético consequência das ligas serem hipoeutéticas.

2.3. Avaliação da comparação da Condutividade Elétrica em função do Teor de Fe com e sem Zr.

O zircônio adicionado se apresenta na condição de liga diluída e independente da condição termodinâmica que se encontre estará sempre na forma de solução sólida $[\alpha-Al]$, como pode ser observado na figura 1(b).

A Figura 3(a) apresenta o perfil de evolução da condutividade elétrica para as ligas com e sem Zircônio.

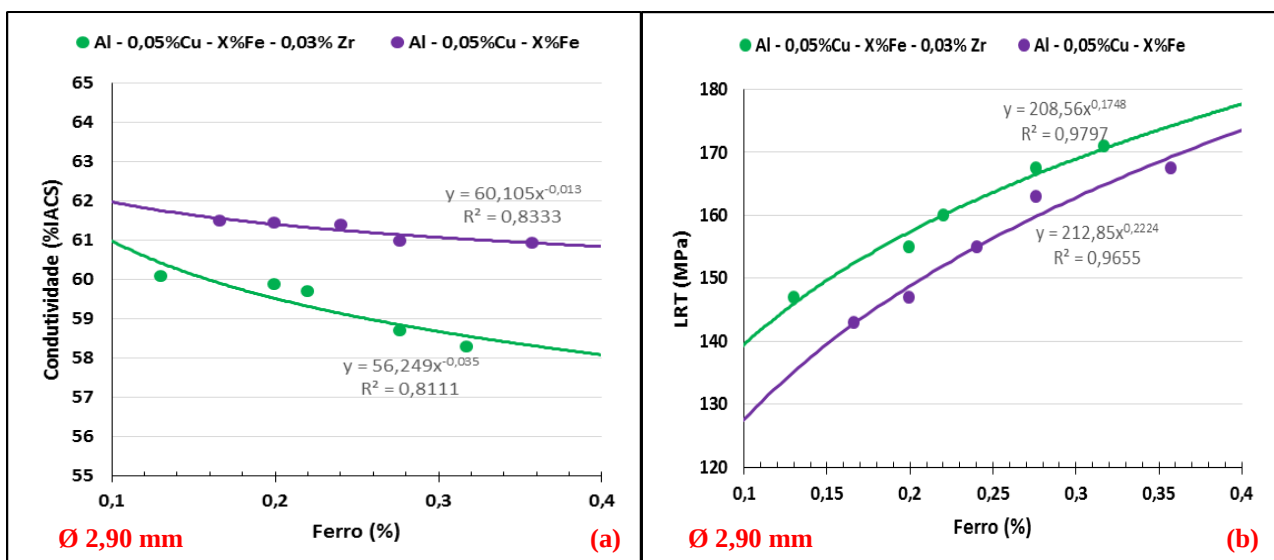


Figura 3. Valores de condutividade elétrica em função da porcentagem de Fe para a liga Al-0,05%Cu-0,03%Zr-X%Fe comparada com a liga sem a presença de Zr (a) e limite de resistência a tração para a mesma comparação entre ligas (b).

Os resultados obtidos demonstram queda dos valores de condutividade elétrica com o aumento dos teores de ferro, contudo esta queda está mais acentuada para as ligas com adição de zircônio.

Todavia a variação foi de aproximadamente 3% IACS entre os valores da maior e menor adição de ferro, o que pode ser considerado satisfatório quando comparado ao aumento próximo dos 20% nos valores de LRT.

Quando se compara as ligas com e sem a presença de zircônio. Os valores para condutividade caíram entre 1 a 2% quando comparados com as ligas sem Zr. É possível que esta perda na condutividade elétrica esteja atrelada ao fato da elevada condição de deformação que a liga se encontra; da condição de SSS (solução sólida saturada) que a matriz de alumínio apresenta pela solubilização do Cu, Zr e de parte do Fe; além do constituinte eutético esmagados nos contornos de grão desta matriz. É provável que tudo isto venha a contribuir para diminuir o livre caminhar dos elétrons.

2.4. Avaliação da comparação do LRT em função do Teor de Fe com e sem Zr.

No entanto, a pequena adição de 0,03% de zircônio nas ligas modificadas com ferro levaram a resultados obtidos nos ensaios de tração muito promissores e da ordem de aproximadamente de 7 MPa maior, como pode ser constatado na figura 3(b), que compara os resultados obtidos para a nova liga em comparação com os resultados anteriores da liga sem zircônio.

Por outro lado, a pequena adição de zircônio na liga modificada com ferro, por se encontrar como SS (solução sólida) a exemplo do que ocorre com o Cu e com parte do Fe sugere a possibilidade da matriz de alumínio na condição de SSS que associada a presença do constituinte eutético, nos contornos de grão da matriz, crescente com o teor de Fe pode levar naturalmente ao aumento do emaranhado das discordâncias e dos valores de LRT pela etapa da deformação a frio que as ligas estão submetidas. Quando comparados as perdas menores e ganhos maiores ainda é possível ver a viabilidade da liga com zircônio quando pesados os fatores elétricos e mecânicos.

2.5. Avaliação da Termorresistividade em função do Teor de Fe com e sem Zr.

Em seguida foi feito o ensaio de termorresistividade seguindo o protocolo COPEL para a liga modificada com adição de Zr. A figura 4(a) compara os valores encontrados antes e após o ensaio para a liga estudada.

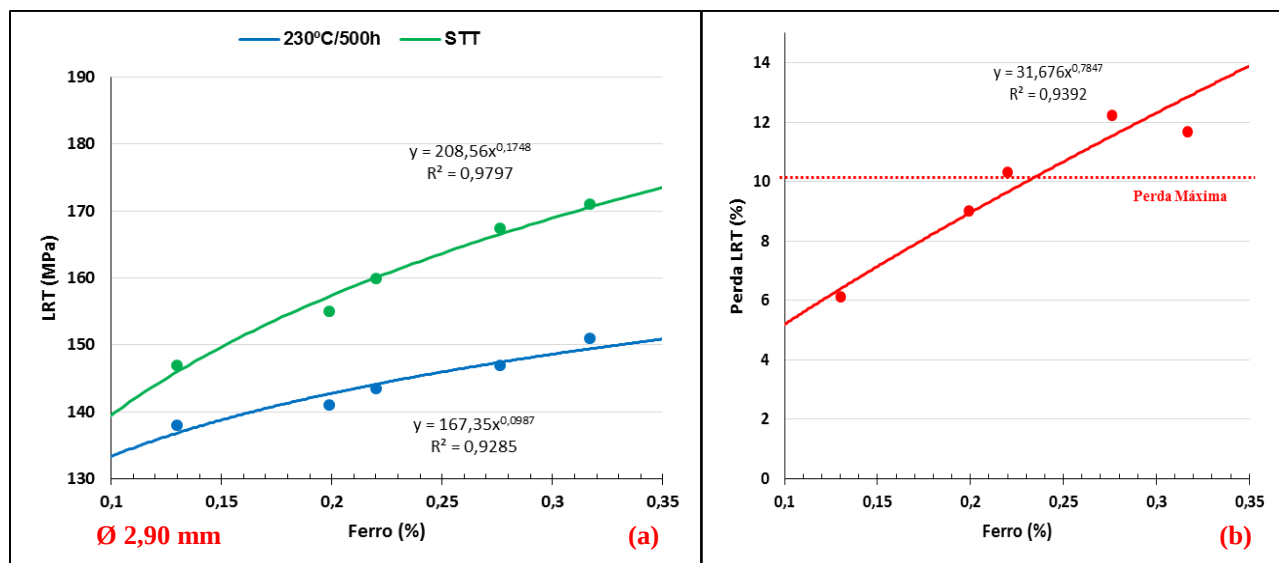


Figura 4. Limite de resistência a tração para a liga Al-0,05%Cu-0,03%Zr-X%Fe antes e após ensaio de termorresistividade à 230°C por 500h (a) e mesma comparação em perda percentual de LRT (b).

Quando comparados os resultados do limite de resistência a tração antes e após o ensaio de termorresistividade por 500h, figura 4(a), é possível notar uma queda nos valores obtidos, o que é esperado. Contudo a análise vital para a norma é a perda percentual de LRT, que não deve ser superior a 10% para que um cabo elétrico seja qualificado como termorresistente.

Esta análise percentual é apresentada na figura 4(b), onde a linha de tendência traçada mostra que das ligas estudadas com adição de zircônio, as que apresentam teores abaixo de 0,23% de ferro podem ser qualificadas como termorresistentes, por apresentarem uma perda inferior à 10% em seu LRT. Contudo é notório que a maior perda foi de aproximadamente 14% na liga com 0,35% de ferro, um resultado ainda bem positivo considerando que o ensaio modificado se deu por 500h, ao contrário da 1h recomendada na norma.

Também foi realizado um ensaio estrutural para as ligas com adição de zircônio nos teores de 0,15%, 0,25% e 0,35%, representando adições baixas, médias e altas de ferro nas ligas estudadas. As imagens obtidas utilizando microscopia ótica de varredura são apresentadas na figura 5.

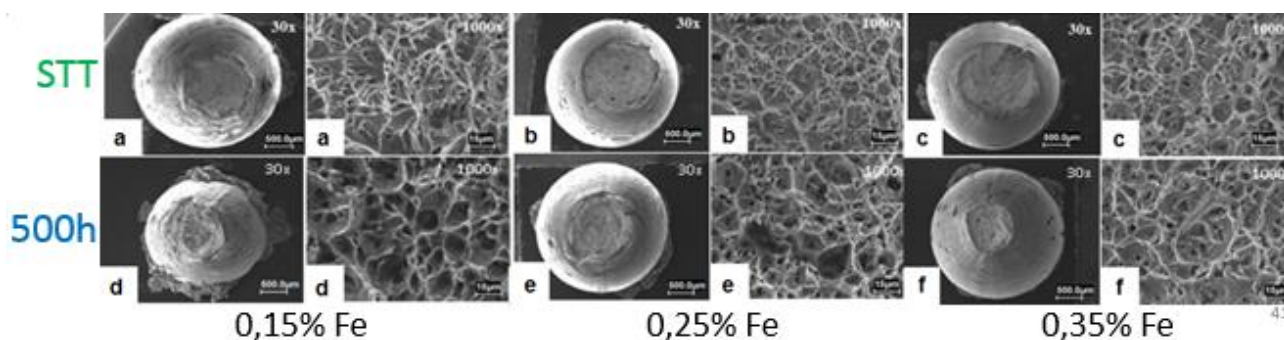


Figura 5. Imagens das superfícies de fratura para as adições de 0,15%, 0,25% e 0,35% de ferro nas ligas com adição de Zr antes e após ensaio de termorresistividade obtidas no microscópio eletrônico de varredura.

Foi feita a leitura de microcavidades utilizando o software MOTIC e os resultados foram organizados na figura 6 a fim de facilitar a interpretação dos fenômenos que ocorreram com as microcavidades das ligas.

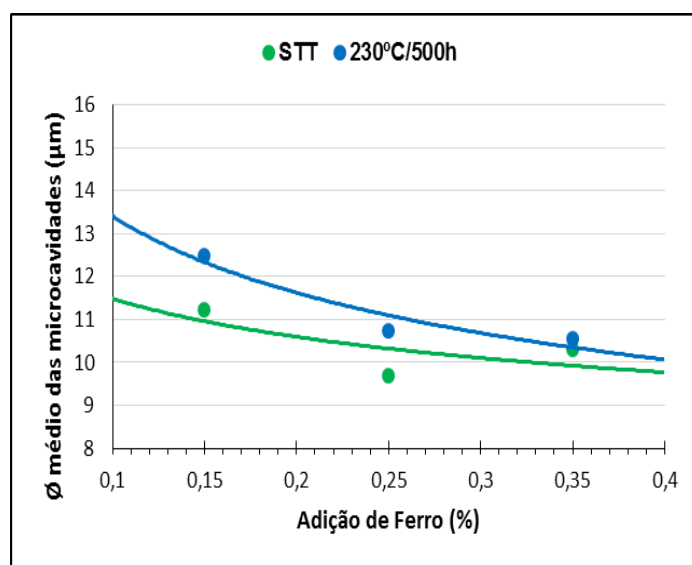


Figura 6. Tamanho das microcavidades medido utilizando o método de Heyn com auxílio do software MOTIC em função da porcentagem de ferro para as ligas com zircônio antes e após ensaio de termorresistividade.

Os valores obtidos para os diâmetros das microcavidades mostram que as ligas que passaram pelo ensaio de termorresistividade tiveram maiores diâmetros quando comparadas as ligas observadas como fundidas. Isto indica um coalescimento da liga, fenômeno provavelmente responsável pelas mudanças nos valores de LRT.

3. CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos é possível notar que a adição de ferro na liga base de Al EC com adição de 0,05% de cobre foi benéfica quanto as propriedades mecânicas avaliadas através do ensaio de tração. Maiores adições de Fe resultaram em maiores valores de limite de resistência a tração obtidos, aproximadamente 20% de ganho entre a menor e a maior adição. O ensaio de condutividade elétrica revelou uma queda de aproximadamente 1% entre a maior e menor adição conforme o teor de ferro aumentava. Levando em conta as propriedades elétricas e mecânicas, é possível inferir que o aumento nas propriedades mecânicas compensa as perdas observadas nas propriedades elétricas para a aplicação em cabos elétricos.

Quanto a adição de zircônio nas ligas modificadas com ferro, do ponto de vista mecânico houveram ganhos de aproximadamente 7% para cada adição de ferro quando comparadas com as ligas sem zircônio. O mesmo aumento entre as maiores e menores adições de ferro observado anteriormente também ocorreu. As propriedades elétricas sofreram um impacto entre 1 e 2% para as ligas com e sem zircônio. Quando comparado ao aumento de 5% do LRT obtido em média, é possível concluir que a adição de Zr ainda é vantajosa apesar das perdas elétricas.

O ensaio de termorresistividade revelou que as ligas modificadas com zircônio e ferro com teores de até 0,23% de Fe podem ser enquadradas como termorresistentes segundo o protocolo COPEL modificado para 500h. Mesmo a pior perda, de 14% para a adição de 0,35% de carbono ainda pode ser considerado um resultado positivo visto que a norma é para apenas 1h de ensaio e mesmo assim a perda após 500h não ficou muito acima de 10%.

Ainda é possível notar que maiores adições de ferro ocasionaram menores microcavidades e maior LRT, indicando menor alongamento e, consequentemente, menor ductilidade. Este fenômeno pode ser observado tanto antes, como após o ensaio do protocolo COPEL.

4. AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Pará (UFPA) e seus Instituto de Tecnologia (ITEC); Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM); e Programa de pós Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) pelo acolhimento e conhecimento disponibilizado aos seus alunos.

A ALUBAR Metais e Cabos pelo material cedido e apoio à pesquisa realizada.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento das bolsas de pesquisa concedidas.

Ao Grupo de Pesquisa em Engenharia dos Materiais (GPEMAT) pelo acolhimento e estrutura cedidos para a realização deste trabalho.

5. REFERÊNCIAS

- American Society for Metals, 1973, “Metals Handbook, Volume 8: Metallography, Structures and Phase Diagrams”, 8th Edition. ASM, EUA.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas, 2007, “NBR 5118: Fios de alumínio 1350 nus, de seção circular, para fins elétricos”, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas, 1981, “NBR 6810: Fios e cabos elétricos – tração à ruptura em componentes metálicos”, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas, 1986, “NBR 6814: Fios e cabos elétricos – Ensaio de resistência elétrica”, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas, 1981, “NBR 6815: Fios e cabos elétricos – Ensaio de determinação da resistividade em componentes metálicos”, Rio de Janeiro, Brasil.
- ASTM, 2004, “E112-96 - Standard Test Methods for Determining Average Grain Size”, American Society for Testing and Materials, EUA.
- COPEL - Companhia Paranaense de Energia Elétrica, 2006, “Especificação Técnica [00000-30009-082]”, Brasil.
- Horikoshi, T.; Kuroda, H.; Shimizu, M.; Aoyama, S, 1988, “Development of Aluminum Alloy Conductor with High Electrical Conductivity and Controlled Tensile Strength and Elongation”, Hitachi Cable Review. ASM International, EUA.
- SENA, H. C. O, 2015, “Análise do comportamento da liga Al 1350 ou Al EC com adição dos elementos de liga Cu, Fe e Zr (Al-0,05%Cu-[0,15-0,35]%Fe-0,03%Zr) para obtenção de liga de alumínio termorresistente”. Dissertação de Mestrado – PPGEM/UFPA, Belém, Brasil.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

EFFECT ANALYSIS OF THE ADDITION OF Fe AND Zr IN AN Al-0.05%Cu ALLOY BEFORE AND AFTER A 500h HEAT TREATMENT AT 230°C

Natália Cristina Araújo Costa, natalia.araujoc@hotmail.com¹

Mário Américo Xavier, marioamerico92@hotmail.com¹

Rafael Assis da Silva, rafael7.assis@gmail.com¹

Nardiny Diego Souza Alves, nardiny_diego@hotmail.com¹

Renan Gouvea Dias, renan.gouveadias@mail.utoronto.ca¹

Hélido Cleidson de Oliveira Sena, helido.sena@alubar.net¹

José Maria Do Vale Quaresma, quaresma@fem.unicamp.br¹

¹Universidade Federal do Pará – Instituto de Tecnologia, Rua Augusto Corrêa, 01.

Abstract. *The Brazilian National Interconnected System of Transmission and Distribution of Electricity (SIN) historically suffers from overloads. Since the majority of lines are made from electro-conductive aluminum alloys (Al-EC), it is proposed to recondition those alloys with thermal resistant aluminum alloys (TAL) that are capable of higher electricity transmission compared to an Al-EC alloy of a same diameter. This study aims to compare different alloying elements (Fe and Zr) to define their influence into the alloy targeting the selection of the best combination possible for electricity cables. The studied alloys were mechanically, electrically and structurally characterized. The specimens were obtained through casting into an “U” shaped chill mold, machined, rolled and drawn to the 2.9mm diameter. The results indicate that the Al-0.05%Cu-0.03%Zr-X%Fe can be classified as thermal resistant with additions up to 0.23%Fe after a 230°C/500h heat treatment.*

Keywords: *Al-Zr Alloys, Al-Fe Alloys, Thermal resistant*