



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

INFLUÊNCIA DO ELEMENTO ZIRCÔNIO NA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E NA TERMORRESISTIVIDADE EM FIOS DE ALUMÍNIO ELETRO CONDUTOR

Calos Alexandre Cavalcante Sousa, carlosmec21@gmail.com¹
Ruy Felipe Souza Vasconcelos, ruyfelppe@outlook.com¹
Everaldo Afonso Fernandes, eaf_1980@hotmail.com¹
Mauro Quaresma Lobato, mauroqlobato@gmail.com¹
Washington C. Rocha, inabra@gmail.com¹
José Maria do Vale Quaresma, quaresma@fem.unicamp.br¹

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

Resumo: No contexto atual a demanda de energia elétrica é cada vez maior pelo uso industrial e doméstico, as ligas de alumínio são bastante utilizadas em diversas aplicações industriais e este alto consumo pode causar sobrecarga nas linhas de transmissão e distribuição, como consequência desse fato os condutores elétricos tem que suportar um fator de trabalho acima da temperatura ambiente. Pesquisa estão sendo desenvolvidas a respeito do elemento zircônio “Zr”, que adicionado na matriz de alumínio, da uma características de liga de alumínio termorresistente, denominada “TAL”. Os condutores com a liga de alumínio termorresistentes podem ser utilizados em regime contínuo de trabalho em temperaturas de até 150°C, sem que haja deterioração das características mecânicas como tração, alongamento e dureza. Este estudo tem como objetivo analisar a influencia do elemento zircônio, nos teores 0,15% e 0,22%Zr, na condutividade elétrica e como agente termorresistente na liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe. A liga foi produzida no Sub-laboratório de engenharia mecânica-FEM/ITEC/UFGA onde foi solidificada em molde unidirecional horizontal de dimensões 60x60x110mm de formato retangular. Posteriormente os perfis obtidos passaram pelos processos mecânicos de corte, torneamento e laminação a frio, para na sequência transformado em fios de diâmetro 3,0 mm. Em seguida outras amostras do fio de 3,0 mm foram submetidos ao teste de termorresistencia segundo o Protocolo COPEL (230°C/1h) e a Norma ASTM B941-10 (280°C/1h). A liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe com a adição de 0,15%Zr apresentou perdas de Limite de Resistência a Tração (LRT) muito pequenas, abaixo de 3%, o que caracteriza a liga como termorresistente, e possível de operar em elevadas temperaturas sem perder seu desempenho eletrocondutor.

Palavras-chave: Condutividade elétrica, Termorresistente, Processos mecânicos, Limite de Resistencia a tração

1. INTRODUÇÃO

A facilidade pela qual perfis de alumínio podem ser fabricados é uma de suas mais importantes vantagens. O alumínio pode ser fundido por qualquer método conhecido, pode ser laminado em qualquer espessura até folhas mais finas que as de papel. O alumínio pode ser extrudado numa infinidade de perfis de seção transversal constante e de grande comprimento. O metal pode ser também, forjado ou impactado. Produtos que utilizam o alumínio ganham também competitividade, em função dos inúmeros atributos que este metal incorpora (Davis, 1993):

Alguns elementos são adicionados em ligas, e as suas relações com a matriz ou com os elementos já presentes formam partículas de segunda fase. As partículas de segunda fase influenciam as propriedades mecânicas de ligas metálicas, tais como endurecimento e resistência mecânica (Meyers; Chawla, 2009). As partículas de segunda fase são definidas segundo o seu modo de formação e na sua habilidade para se dissolver na matriz. Uma das classes de partícula de segunda fase são os dispersóides. Diferentes dos precipitados, que conferem endurecimento por precipitação, os dispersóides são virtualmente impossíveis de se dissolver completamente como os precipitados. Além de a dispersão oferecer reforço, a distribuição e o tamanho dos dispersóides em ligas trabalhadas é um fator chave no controle do grau de recristalização, granulometria do recristalizado e textura cristalográfica. Dispersóides não são tratáveis termicamente

e também estabilizam a subestrutura de deformação durante a exposição a elevadas temperaturas (ASM INTERNATIONAL, 2004).

Os trialuminetos são um exemplo de partículas de segunda fase pertencente à classe dos dispersóides, que podem formar-se durante o estado sólido de precipitação, durante o pré-aquecimento de lingotes ou durante o tratamento térmico de perfis fundidos de elementos supersaturados de baixa-difusão, isto é, solúvel no alumínio fundido; porém, estes têm um limite de solubilidade no alumínio sólido.

Uma das aplicações que tem chamado à atenção é o desenvolvimento de materiais termorresistentes, podendo estes suportar a exposição a elevadas temperaturas sem perda significativa de suas propriedades. Estudiosos da área de materiais têm utilizado o Al ligado a teores diluídos de elementos de transição, como os do grupo 4 (Zr, Ti, Hf) (Knipling et al., 2007). A pesquisa destes tipos de materiais objetiva o aumento de resistência do material pela formação de trialuminetos (Al_3Zr , Al_3ScZr , Al_3Ti , Al_3Sc), os quais se formam após a combinação de tratamentos térmicos (Knipling et al., 2007).

Com base no texto apresentado acima, este estudo tem como objetivo analisar a influencia do elemento zircônio, nos teores 0,15% e 0,22%Zr, na condutividade elétrica e como agente termorresistente na liga $\text{Al-0,05\%Cu-[0,35-0,45]\%Fe}$.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As ligas foram obtidas por fundição direta no laboratório de metalografia e tratamento térmico da UFPa, a partir do alumínio eletro condutor (Al - EC). O balanceamento da composição química foi realizado pelo calculo estequiométrico para se alcançar teores de 0,05% Cu, (0,35 – 0,45)% Fe e dois teores de zircônio, 0,15% Zr e 0,22% Zr, sendo todos os percentuais em peso. A aferição da composição química foi realizada através de ensaios após a obtenção da liga.

A fusão dos metais foi realizada em um forno tipo mufla, com temperatura de trabalho ajustada em 950°C , para se garanti a fusão completa dos metais. Após a constatação da fusão completa dos metais, o cadinho foi retirado do forno, e se realizou a homogeneização do metal fundido através de agitação manual, utilizando-se uma espátula de aço pintada com solução de caulim. Após a homogeneização da liga foi realizada a injeção de gás inerte (argônio) numa vazão entre [0,2 e 0,4] l/s através de um tubo de aço inoxidável ligado a um cilindro de 10m^3 . A injeção de argônio no metal líquido foi realizada para se remover os gases e as impurezas de baixa densidade, as quais são segregadas formando na superfície do banho uma camada de escória, que foi imediatamente removida por espátula de aço pintada com solução de caulim.

O vazamento se iniciou com a retirada da amostra para análise química (amostra testemunho), foi introduzido um termopar no cadinho para verificar a temperatura do metal, até que se atinja um valor de temperatura com um superaquecimento de 10% acima da temperatura *liquidus* para cada liga, faixa de temperatura prevista para a realização do vazamento. Para a solidificação foi utilizado o molde de solidificação unidirecional horizontal também utilizado em vários trabalhos (Quaresma, 1999; Fernandez, 2011; Monteiro, 2013). Neste molde, a câmara de vazamento possui as dimensões de $60 \times 60 \times 110$ mm, Fig. 1, na qual uma das paredes funciona como fonte de absorção da carga térmica liberada pelo metal líquido. Esta parede é referente a um bloco de aço SAE 1010, que possui as dimensões de $63 \times 60 \times 110$ mm. O molde possui um furo a 3,0 mm na interface metal/molde e uma profundidade de 30 mm. A partir do topo da parede superior do molde é possível posicionar o termopar para medir a sua temperatura. Os termopares acoplados em um registrador de dados ALMEMO foram inseridos em posições específicas na câmara de vazamento. Seis termopares tipo “K” foram colocados no câmara nas posições 7,5; 15,0; 22,5; 30,0; 37,5; 45,0mm em relação à interface metal-molde, além destes termopares, um termopar foi posicionado no molde (bloco metálico) a 3mm da interface Metal/Molde e outro foi posicionado na interface molde-ambiente.

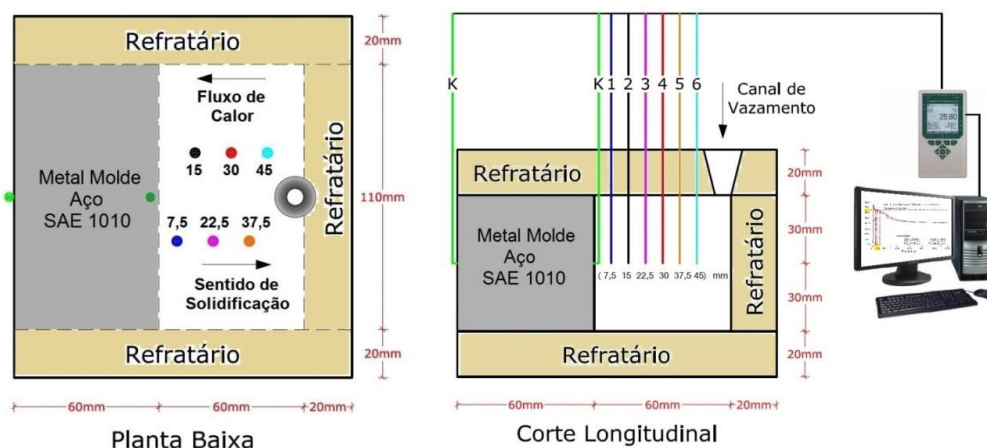


Figura 1. Esquemático do aparato de solidificação unidirecional horizontal, com os posicionamentos dos termopares e registrador de dados.

Os lingotes obtidos na solidificação foram marcados, cortados com uma serra de fita circular nas dimensões de 14x14x110mm e posteriormente foram usinados para o formato cilíndrico com 9,5mm de diâmetro, E finalmente foram submetidos ao processo laminação a frio e assim obtidos corpos de prova com o diâmetro de 3,0 mm. As etapas do processo são mostrados na Fig. 1 abaixo.

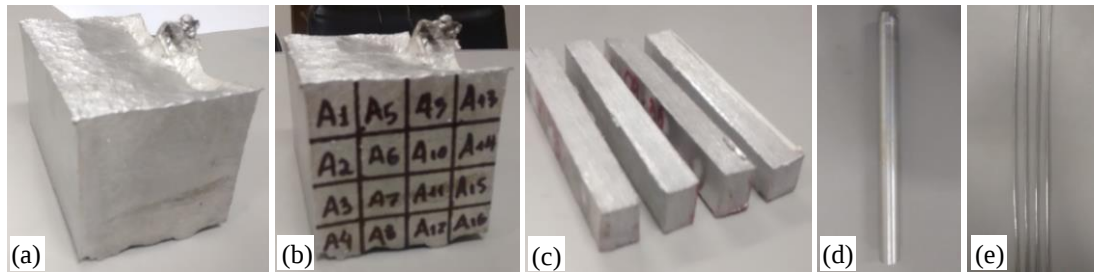


Figura 2. Sequencia de preparação (a) lingote solidificado (b) Lingote marcado (c) amostra obtidas após corte por serra de fita (d) amostra usinada (e) amostras após laminação a frio.

Após a laminação, os corpos de provas foram submetidos aos ensaios de resistência elétrica com o auxílio de um micro-ohmímetro. As resistências elétricas dos fios foram medidas conforme a recomendação da norma NBR 5118. Depois de obtidos os resultados utilizaram-se a norma NBR 6814 e NBR 6815 para obter a resistividade elétrica. Em seguida, os resultados obtidos foram transformados em condutividade elétrica, ou seja, em %IACS, que corresponde à *International Annealed Cooper Standard*, um padrão internacional de condutividade correspondente à apresentada por um fio de cobre com 1 m de comprimento e 1 mm² de seção transversal a 20°C, através da Eq. 1:

$$\phi = \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Al}} \quad (1)$$

Onde:

ϕ = a condutividade elétrica do fio em IACS;

ρ_{Cu} = a resistividade elétrica do cobre em $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;

ρ_{Al} = a resistividade elétrica do alumínio em $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

Após a etapa de conformação por laminação a frio e teste de resistência elétrica, cada corpo de prova foi submetido ao ensaio mecânico, em uma máquina de ensaio de tração. Os corpos de prova foram confeccionados nas dimensões especificadas pelo padrão normativo presente nas NBR 6810 e NBR ISO 6892, respeitando as distâncias entre garras de 150 mm. Assim, o ensaio foi realizado com amostras de 200 mm de comprimento confeccionadas para cada corpo de prova. Os resultados são adquiridos fazendo uma média da quantidade de amostras ensaiadas. Por fim foram realizados os testes de termorresistência. O teste de natureza térmica é realizado segundo o Protocolo Copel e a Norma ASTM B941, que descreve que condutores elétricos caracterizados como termorresistentes, não devem apresentar perda superior a 10% de seu limite de resistência à tração, quando submetidos à temperatura de 230°C segundo Protocolo Copel e 280°C segundo ASTM B941 pelo tempo de uma hora.

3. RESULTADOS E DISCURSSÃO

3.1. Análise química

Após a fundição das ligas, foram obtidos os resultados das composições químicas dos materiais produzidos, conforme apresentado na Tab. 1. Os dados desta tabela indicam que todos os procedimentos de cálculo estequiométrico foram realizados de forma correta, dada a comprovação por análise em espectrômetro óptico. Portanto, as composições químicas obtidas estão de acordo com o escopo deste trabalho.

Tabela 1 - Composição das ligas modificadas com Zircônio.

Liga	Elementos de Liga (%p)		
	Ferro	Cobre	Zircônio
Al - EC	0,125	0,0024	<0,00020
Al-0,05%Cu-0,4%Fe-0,15%Zr	0,397	0,045	0,148
Al-0,05%Cu-0,4%Fe-0,22%Zr	0,399	0,049	0,217

3.2. Comparação das Condutividades elétricas das ligas Al-Cu-Fe-0,15%Zr e Al-Cu-Fe-0,22%Zr

Os resultados de condutividade elétrica para ambas as ligas e seus respectivos desvio padrão estão apresentados na Tab. 2.

Tabela 2. Resultados experimentais da caracterização elétrica para ambas as ligas por posição.

Posição [P(mm)]	Condutividade Elétrica [ρ (%IACS)]- 0,15%Zr	Desvio padrão [S (%IACS)]	Condutividade Elétrica [ρ (%IACS)]- 0,22%Zr	Desvio padrão [S (%IACS)]
7,5mm	58,17	$\pm 0,4$	58,75	$\pm 0,3$
22,5mm	59,18	$\pm 0,5$	57,46	$\pm 0,2$
37,5mm	59,44	$\pm 0,3$	57,49	$\pm 0,4$
52,5mm	60,02	$\pm 0,5$	57,02	$\pm 0,5$

A Figura 3 apresenta os gráficos obtidos a partir dos dados da Tab. 2. Na comparação entre as duas ligas, com 0,15%Zr e 0,22%Zr, verificou-se que enquanto a liga com adição de 0,15%Zr apresenta perfil de valores de condutividade elétrica crescente ao se distanciar da interface metal/molde, a liga com adição de 0,22%Zr apresenta comportamento oposto.

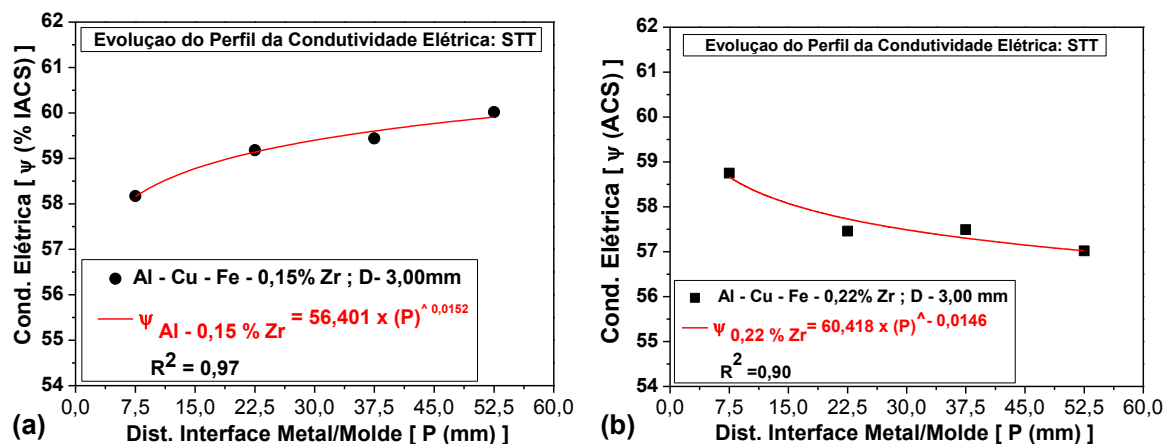


Figura 3. Comparação da condutividade elétrica em relação a distância da interface Metal/Molde das ligas (a)Al-Cu-Fe-0,15%Zr e (b)Al-Cu-Fe-0,22%Zr.

Outro fato importante a ser observado na Fig. 3, é que a liga que possui maior concentração de zircônio apresentou menores valores de condutividade elétrica. Belov et al (2009), diz que o aumento do teor de Zircônio nas ligas de alumínio provoca um acréscimo na resistividade elétrica, e consequentemente uma queda na condutividade elétrica do material.

3.3. Comparação dos resultados das resistências Mecânica das ligas Al-Cu-Fe-0,15%Zr e Al-Cu-Fe-0,22%Zr

Os valores obtidos de ensaio de tração para ambas as ligas estão presentes na Tab. 2 com seus respectivos desvio padrão.

Tabela 2. Comparação de LRT para ambas as ligas em função da posição.

Posição [P(mm)]	L.R.T [σ (MPa)] 0,15% Zr	Desvio padrão [S (MPa)]	L.R.T [σ (MPa)] 0,22% Zr	Desvio padrão [S (MPa)]
7,5mm	170,65	$\pm 0,3$	173,56	$\pm 0,1$
22,5mm	167,42	$\pm 0,1$	170,95	$\pm 0,2$
37,5mm	162,66	$\pm 0,2$	170,65	$\pm 0,3$
52,5mm	163,06	$\pm 0,6$	169,82	$\pm 0,2$

A Figura 4 mostra uma comparação entre a liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,15%Zr e Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,22%Zr. Todos os valores de LRT foram para as posições 7,5mm; 22,5mm; 37,5mm e 52,5mm. Os gráficos da Fig. 2 mostram um aumento no limite de resistência à tração quando se adiciona a liga o teor de 0,22%Zr, quando comparados com a adição de 0,15%Zr.

Devida suas composições químicas e condições em que as ligas foram solidificadas, a temperatura ambiente ambas as ligas estão em solução sólida na matriz de alumínio e num estado de supersaturação, sendo maior para a liga com

0,22%Zr. Essa maior concentração de zircônio (0,22%) como solução sólida e o processo de laminação a frio podem ter ocasionado o maior encruamento para a liga contendo o maior teor de zircônio (0,22%) e consequentemente maior Limite de resistência à tração, como pode ser observado na Fig. 4.

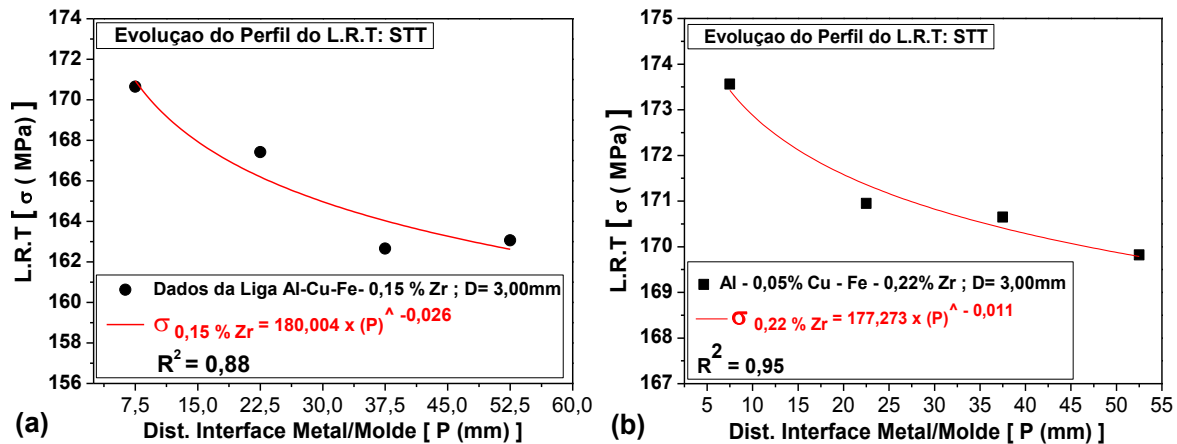


Figura 4. Comparação das resistências mecânicas (LRT) em relação a distância da interface Metal/Molde das ligas (a) Al-Cu-Fe-0,15%Zr e (b) Al-Cu-Fe-0,22%Zr.

3.4. Influência do tratamento térmico na condutividade elétrica

Os valores de Condutividade elétrica para ambas as ligas submetidas ao tratamento térmico 230°C/1h e 280°C/1h estão apresentados na Tab. 3 e Tab. 4. Os testes foram realizados nos fios obtidos pós deformação e nas posições 7,5mm; 22,5mm; 37,5mm e 52,5mm em relação a interface metal/molde.

Tabela 3. Valores de condutividade elétrica para a liga com 0,15%Zr após tratamento a 230°C/1h e 280°C/1h e seus respectivos ganhos.

Posição [P(mm)]	Condutividade			Condutividade		
	Elétrica [φ (%IACS)]	Desvio padrão [S (%IACS)]	Ganhos[φ (%IACS)]	Elétrica [φ (%IACS)]	Desvio padrão [S (%IACS)]	Ganhos[φ (%IACS)]
	230°C/1h			280°C/1h		
7,5mm	59,6	±0,6	1,43	60,52	±0,3	2,35
22,5mm	60,12	±0,4	0,94	61,06	±0,2	1,88
37,5mm	60,59	±0,7	1,15	61,29	±0,6	1,85
52,5mm	61,15	±0,2	1,13	61,76	±0,4	1,74

Tabela 4. Valores de condutividade elétrica para a liga com 0,22%Zr após tratamento a 230°C/1h e 280°C/1h e seus respectivos ganhos.

Posição [P(mm)]	Condutividade			Condutividade		
	Elétrica [φ (%IACS)]	Desvio padrão [S (%IACS)]	Ganhos[φ (%IACS)]	Elétrica [φ (%IACS)]	Desvio padrão [S (%IACS)]	Ganhos[φ (%IACS)]
	230°C/1h			280°C/1h		
7,5mm	59,83	±0,1	1,08	60,48	±0,2	1,73
22,5mm	59,15	±0,4	1,69	59,87	±0,5	2,41
37,5mm	58,2	±0,2	0,71	59,61	±0,1	2,12
52,5mm	58,15	±0,3	1,13	59,07	±0,5	2,05

Os resultados de condutividade elétrica após os tratamentos térmicos de 230°C/1h e 280°C/1h estão plotados na Fig. 5 e mostram ganhos de condutividade para ambas as ligas para os dois tratamentos. Estes ganhos podem estar associados ao processo de recuperação estática, que ocorre ao submeter-se o material deformado (encruado) um tratamento térmico. Nota-se que o ganho é mais acentuado após o tratamento a 280°C/1h. Essa temperatura pode ter causado uma recuperação mais acentuada do material do que a temperatura 230°C/1h.

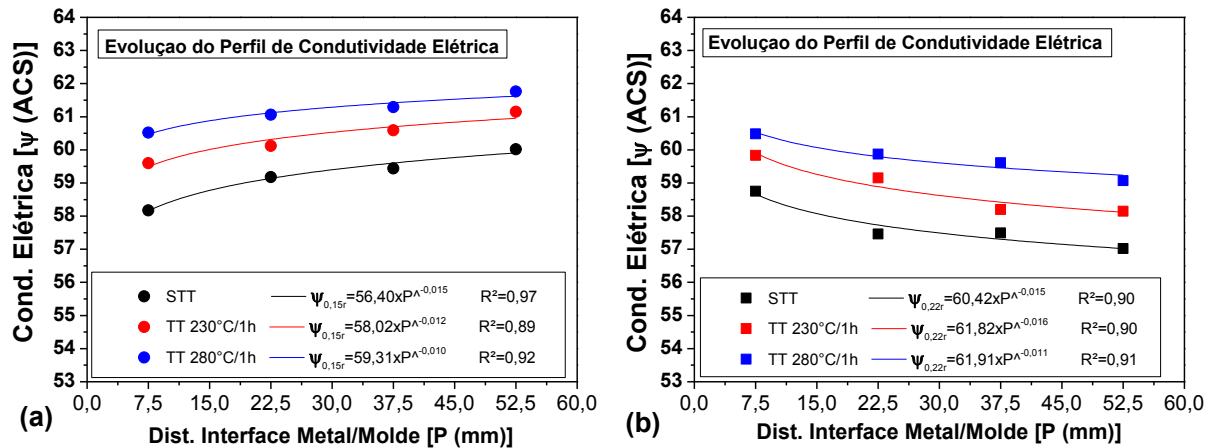


Figura 5. Comparação das condutividades elétricas em relação à distância da interface Metal/Molde das ligas (a) Al-Cu-Fe-0,15%Zr e (b) Al-Cu-Fe-0,22%Zr, após tratamento térmico.

Fazendo um comparativo entre as ligas, nota-se na Fig. 5 que a liga com 0,15%Zr apresenta desempenho elétrico maior, mesmo após ser submetida aos tratamentos térmicos, o que poder estar relacionado ao fato da liga com 0,22%Zr encontra-se em maior estado de encruamento, devido a maior concentração de soluto em solução sólida. Observa-se na Fig. 6 para os gráficos de ganhos de condutividade elétrica que para ambas as ligas, se apresentam valores muito próximos de ganhos, logo o fato de a liga com 0,15%Zr apresentar menor estado de supersaturação e consequentemente menor estado de encruamento pode estar acarretando no melhor desempenho elétrico para esta liga.

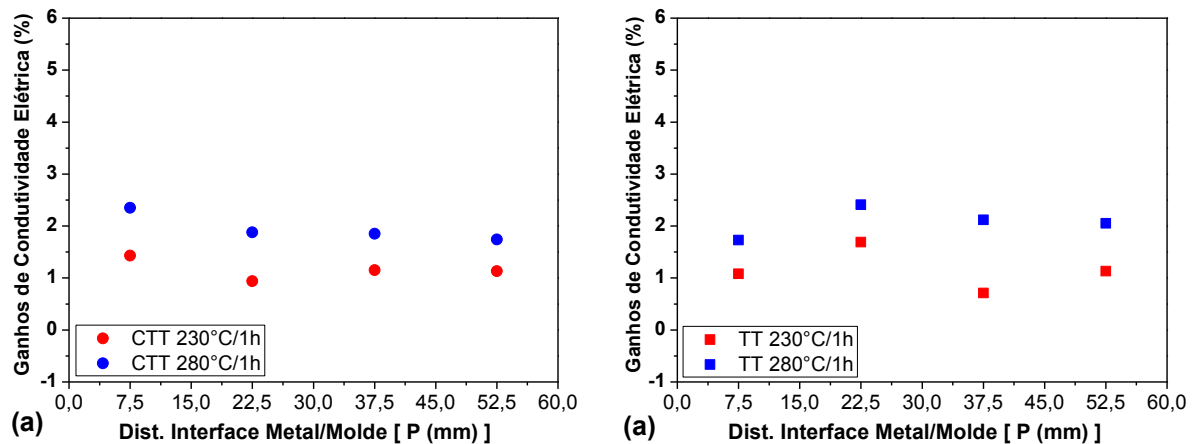


Figura 6. Comparação dos ganhos de condutividades elétricas em relação à distância da interface Metal/Molde das ligas (a) Al-Cu-Fe-0,15%Zr e (b) Al-Cu-Fe-0,22%Zr, após tratamento térmico.

3.5. Teste de Termorresistividade para as ligas Al-Cu-Fe-0,15%Zr e Al-Cu-Fe-0,22%Zr

Os valores de Limite de Resistência a Tração (LRT) para ambas as ligas submetidas ao teste de Termorresistividade segundo o Protocolo COPEL – CTT_R de 230°C/1h e a Norma ASTM B941-10 – CTT_R de 280°C/1h estão apresentados na Tab. 5 e Tab. 6. Os testes foram realizados nas posições 7,5mm; 22,5mm; 37,5mm e 52,5mm em relação a interface metal/molde.

Tabela 5. Valores de LRT da liga 0,15%Zr após termorresistência a 230°C/1h e 280°C/1h e suas respectivas perdas.

Posição [P(mm)]	L.R.T [σ (MPa)] 230°C/1h	Desvio padrão [S (MPa)]	Perdas L.R.T (%)	L.R.T [σ (MPa)] 280°C/1h	Desvio padrão [S (MPa)]	Perdas L.R.T (%)
7,5mm	168,57	±0,3	1,22	166,24	±0,5	2,6
22,5mm	164,40	±0,2	1,8	162,42	±0,2	3
37,5mm	161,91	±0,4	0,5	160,66	±0,3	1,2
52,5mm	159,83	±0,5	2,01	158,58	±0,2	2,7

Tabela 6. Valores de LRT da liga 0,22%Zr após termorresistência a 230°C/1h e 280°C/1h e suas respectivas perdas.

Posição [P(mm)]	L.R.T [σ (MPa)] 230°C/1h	Desvio padrão [S (MPa)]	Perdas L.R.T (%)	L.R.T [σ (MPa)] 280°C/1h	Desvio padrão [S (MPa)]	Perdas L.R.T (%)
7,5mm	172,73	±0,3	0,5	171,48	±0,4	1,2
22,5mm	170,35	±0,1	0,4	168,57	±0,2	1,4
37,5mm	169,41	±0,4	0,7	164,32	±0,3	3,7
52,5mm	166,49	±0,3	2	162,74	±0,1	4,2

A Figura 7 representa os valores de LRT para as ligas e suas respectivas perdas de LRT em porcentagem após a submissão ao teste de termorresistividade. Fazendo uma comparação da liga STT_R e CTT_R de 230°C/1h. Quando ensaiada a temperatura menor (230°C) durante uma hora, não ocorreram grandes perdas na resistência mecânica para ambas as ligas, bem abaixo dos 10% exigidos pela norma. Já quando ensaiadas em uma temperatura maior (280°C), observa-se que houve maior perda, principalmente para as últimas posições para a liga com 0,22%Zr, mesmo assim abaixo do 10% que a norma exige. Essas perdas de LRT podem ser ocasionadas pelo rearranjo dos emaranhados das discordâncias que ocorre ao submeter os materiais deformados as temperaturas de 230°C e 280°C, como a segunda temperatura é maior, ocasionou um rearranjo com maior efeito no material e consequentemente ocasionando maiores perdas de LRT. Outro fato observado é que a liga com 0,22%Zr mesmo com as perdas de LRT se mantém sempre com valores maiores, e isto pode estar relacionado com a maior concentração de zircônio presente nesta liga, que consegue manter resultados sempre melhores que a liga com composição de 0,15%Zr.

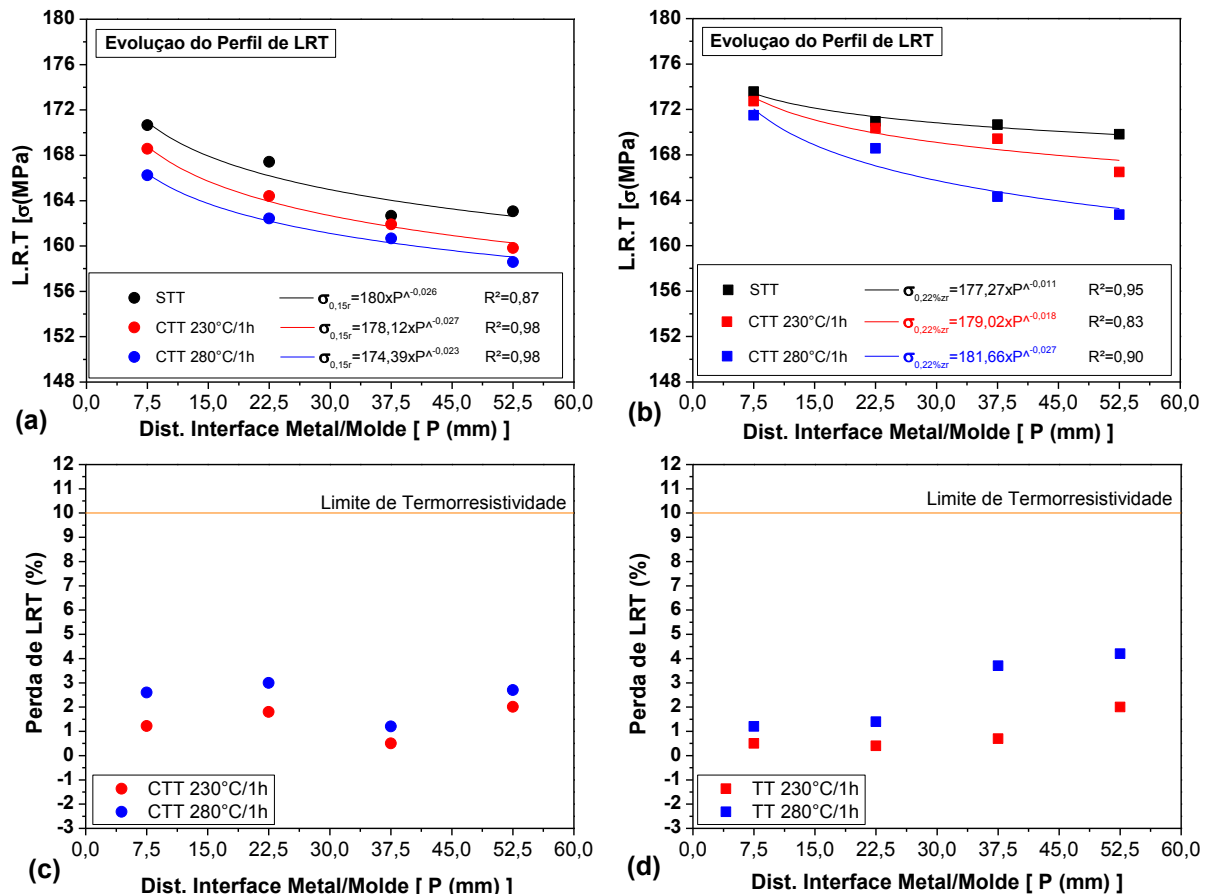


Figura 7. Comparação do LRT das ligas (a)Al-Cu-Fe-0,15%Zr e (b)Al-Cu-Fe – 0,22%Zr, e suas respectivas perdas em porcentagem de LRT (c)Al-Cu-Fe-0,15%Zr e (d)Al-Cu-Fe – 0,22%Zr em relação a distância da interface Metal/Molde, após o teste de termorresistividade.

Tal comportamento de termorresistividade pode estar associado aos níveis de temperatura e tempo utilizadas para esses testes. Utilizando o software Thermo-Calc-Academic para gerar um diagrama de fase Al-Zr e sobrepondo no diagrama as temperaturas a que as ligas foram submetidas ao teste de termorresistividade, observamos na Fig. 8 que essas temperaturas estão dentro de uma região de precipitação. Segundo Knipling (2006), devido à baixa mobilidade do zircônio no alumínio quando este se encontra como solução sólida, partindo-se desde estado de solução sólida supersaturada, a decomposição do Al₃Zr durante o envelhecimento inicia-se pela formação da estrutura metaestável L1₂,

e somente mantendo a altas temperaturas ($>450^{\circ}\text{C}$) por longos períodos se formará a estrutura tetragonal D0_{23} em equilíbrio. Mesmo estando a temperaturas de 230° e 280° propícias a formar Al_3Zr de estrutura L1_2 , aparentemente não há fortes indícios de que houve a precipitação, o que pode estar associado ao tempo utilizado, sendo muito curto. Logo pode ser concluído que no estado de solução sólida que o zircônio se apresenta, contribui de forma bastante eficiente para inibir a recristalização do material nos níveis de temperatura e tempo aos quais os testes de termoresistividade são submetidos. Neste trabalho, ambas as ligas foram caracterizadas como termorresistentes para ambos os testes de termoresistividade.

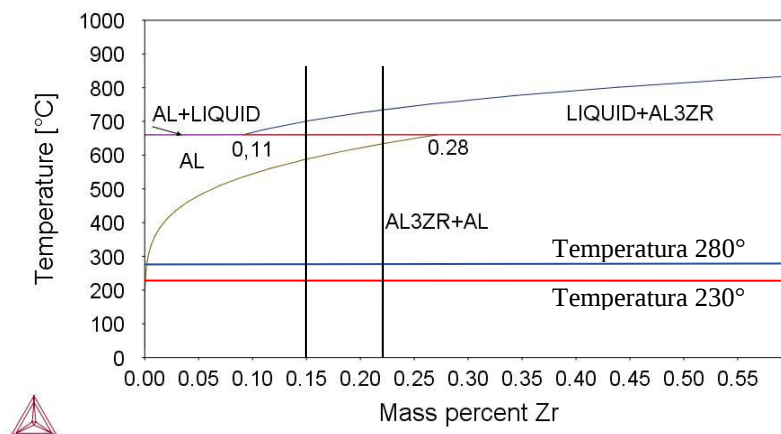


Figura 8. Diagrama de fase Al-Zr obtido através do software Thermo-Calc-Academic, associado as temperaturas de tratamento e aos respectivos teores de zircônio estudados.

4. CONCLUSÕES

Em relação a condutividade elétrica, a liga com adição de $0,15\%\text{Zr}$ apresenta um aumento de condutividade elétrica ao se distanciar da interface metal/molde, comportamento oposto apresentado para a liga com adição de $0,22\%\text{Zr}$. A liga que possui maior concentração de zircônio apresentou menores valores de condutividade elétrica.

Em relação à resistência mecânica há o aumento no limite de resistência à tração quando se adiciona a liga o teor de $0,22\%\text{Zr}$, quando comparados com a adição de $0,15\%\text{Zr}$. Esse aumento na resistência mecânica pode estar associado a maior concentração de soluto na matriz de alumínio.

Fazendo uma comparação das ligas após o teste de termoresistividade, é possível observar que não há grandes perdas de LRT quando os fios são submetidos à temperatura de 230°C ficando bem abaixo do limite de termoresistência (10%). Quando submetidas a temperatura de $280^{\circ}\text{C}/1\text{h}$, é possível observar perdas maiores, mas ainda assim abaixo dos 10% que é o máximo previsto. Apesar deste comportamento a liga com $0,22\%\text{Zr}$ apresenta maiores LRT.

Neste trabalho todas as ligas se enquadraram como termorresistentes tanto para o Protocolo Copel quanto para a norma ASTM B941-10.

5. REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR METALS - ASM INTERNATIONAL, 1994 Aluminum and Aluminum alloys. v. 9. American Society for Metals - ASM Handbook.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. B941, 2010, "Standard Specification for Heat Resistant Aluminum-Zirconium Alloy Wire for Electrical Purposes", West Conshohocken.
- 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 6815), 1981, "Fios e cabos elétricos – Ensaio de determinação da resistividade em componentes metálicos", 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 5285), 1985, "Fios de alumínio-liga, nus, de seção circular, para fins elétricos", 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". Rev 01, PR, 26 p.
- Davis, J. R., 1993, "General introduction. In: ASM SPECIALTY HANDBOOK. Aluminum and aluminum alloys". Ohio, ASM International, 1993a. p. 3-17.

- Fernandez, H. J. L., 2011, “Influência do teor de soluto na molhabilidade e características estruturais, correlacionadas com propriedades mecânicas e elétricas de fios e cabos para transmissão e distribuição de energia nas ligas Al-EC-0,7%Si[0,05%;0,15%]Ti”, Belém: 2011, 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Área de concentração materiais e processos de fabricação, FEM, ITEC, Universidade federal do Pará, Belém.
- Knipling, K. E., 2006, “Development of a Nanoscale Precipitation-Strengthened Creep-Resistant Aluminum Alloy Containing Trialuminide Precipitates”, Graduate School, Northwestern University, Evanston.
- Meyer, M.; Chawla, K., 2009, “Mechanical Behavior of Materials”, Nova York, Cambridge.
- Monteiro, V.C.O., 2013, “Correlação da coalescência de microcavidades com as propriedades mecânicas e elétricas de fios para Tx e Dx de energia elétrica da liga base Al-0,5%Cu-[0,24-0,28]%Fe modificada com teores de silício”. Belém: 2013, 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Área de concentração materiais e processos de fabricação, ITEC, Universidade federal do Pará, Belém.
- Quaresma, J. M. V., 1999, “Correlações entre condições de solidificação, microestrutura e resistência mecânica”, Tese de doutorado, Faculdade de engenharia mecânica, UNICAMP, Campinas.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho

INFLUENCE OF ZIRCONIUM ELEMENT ON THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND HEAT RESISTANCE ON ALUMINIUM WIRES ELETRICAL CONDUCTOR.

Calos Alexandre Cavalcante Sousa, carlosmec21@gmail.com¹

Ruy Felipe Souza Vasconcelos, ruyfelippe@outlook.com¹

Everaldo Afonso Fernandes, eaf_1980@hotmail.com¹

Mauro Quaresma Lobato, mauroqlobato@gmail.com¹

Washington C. Rocha, inabra@gmail.com¹

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

¹Federal University of Pará, Augusto Corrêa Street, 01 – Guamá. CEP 66075-110. Belém-Pará-Brasil

Abstract. In the current context the electricity demand is growing for industrial and domestic use, aluminum alloys are widely used in many industrial applications and can suffer from overloading on transmission and distribution lines, as consequence for this fact the electrical conductors have to endure a work factor above room temperature. Researches are being developed regarding the zirconium element (Zr) which added to the aluminum matrix, gives aluminum an alloy heat-resistant characteristic, known as “TAL”. The conductors with thermal resistant aluminum alloy can be used in continuous work at temperatures up to 150°C without deterioration of the mechanical characteristic like strength, elongation and hardness. This study aims to analyze the influence of zirconium element, the levels 0.15% and 0.22% Zr, the electrical conductivity and as a thermal-resistant agent in the alloy Al-0.05% Cu-[0.35-0.45]% Fe. The alloy was produced in Sub-laboratory mechanical engineering FEM/ITEC/UFPA where was solidified in horizontal unidirectional mold of dimensions 60x60x110mm of rectangular format. Subsequently the obtained profiles passed by mechanical cutting, turning and cold rolling, for the sequence turned into 3.0mm diameter wires. Then other samples of 3.0mm wire were subjected to thermal-resistance test by the Copel Protocol (230°C/1h) and ASTM B941-10 (280°C/1h). The Al-0.05% Cu-[0.35-0.45]% Fe alloy with the addition of 0.15% Zr showed very little losses of Ultimate Tensile Strength (UTS), below 3%, characterizing the alloy as thermal-resistant, and able to operate at high temperatures without losing its electro conductive performance.

Keywords: Electrical conductivity, Heat-resistant, Mechanical processes, Ultimate tensile strength.