

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES ELÉTRICA E MECÂNICA DE UMA LIGA AL-FE-ZR

Jesus Nazareno Pereira da Cunha¹

Mauro Quaresma Lobato²

Clóvis Iarlande Oliveira Santana²

Viviane do Socorro da Costa¹

José Maria do Vale Quaresma³

Resumo

Este trabalho objetiva analisar as propriedades eletromecânicas da liga Al-0,15%Fe-0,22%Zr, bem como a influência de diferentes tratamentos térmicos nas suas propriedades. A liga foi fundida em molde metálico no formato de “U”. As amostras obtidas das pernas laterais foram usinadas de 22 mm para 18 mm de diâmetro. Em seguida, foram laminadas para os diâmetros de (4; 3,8; 3 e 2,7) mm. Traçou-se a correlação entre o limite de resistência a tração, o alongamento e a condutividade elétrica, e através dessa correlação, escolheu-se o diâmetro que apresentou melhor resultado para ser submetido a tratamentos térmicos nas temperaturas de 230°C, 310°C e 390°C. Na seqüência foi realizada a caracterização elétrica e mecânica pós-tratamento. Os resultados demonstraram que o diâmetro de 3 mm apresentou melhor desempenho elétrico (%IACS) e mecânico (LRT), e após ser submetido aos tratamentos térmicos, obteve o melhor desempenho elétrico para a temperatura de 390°C e o melhor desempenho mecânico para a temperatura de 230°C.

Palavras-chave: Ligas de alumínio; Laminação; Resistência mecânica; Condutividade elétrica.

INFLUENCE OF THERMAL TREATMENT IN THE ELECTRICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF AN AL-FE-ZR ALLOY

Abstract

This work aims to analyze the electromechanical properties of the alloy Al-0.15%Fe-0.22% Zr, and the influence of different heat treatments on their properties. The alloy was cast into a metal mold on the “U” format. The samples obtained from the side legs were machined of 22 mm to 18 mm in diameter. Then they were rolling to the diameters of (4; 3.8; 3 to 2.7) mm. Drew a correlation between the tensile yield strength, elongation and electrical conductivity, and through this correlation, chose the diameter that showed the best result to be subjected to heat treatment at temperatures of 230°C, 310°C and 390°C. In the sequence was carried out electrical and mechanical characterization after treatment. The results showed that the 3 mm diameter showed better mechanical performance (LRT) and electrical (% IACS), and after being subjected to heat treatments, had the best mechanical performance to 230°C and the best electrical performance for the temperature 390°C

Keywords: Aluminum alloys; Rolling; Mechanical resistance; Electrical conductivity.

1 INTRODUÇÃO

O mercado de cabos para transporte e distribuição de energia elétrica tem crescido nos últimos anos, principalmente o de cabos de ligas de alumínio, graças à boa propriedade mecânica aliada a alta condutividade elétrica e peso reduzido desses cabos. Tais propriedades, que podem ser melhoradas e aliadas a outras, como a termorresistência, podem

contribuir para produzir linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica cada vez mais eficientes e de menor custo. O conhecimento de diversos elementos de liga e seus efeitos sobre a estrutura do material é fundamental para esta finalidade. Quaresma [1] e Quaresma et al. [2] relatam que do ponto de vista tecnológico, a estrutura do material

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, PA, Brasil. E-mail: jnpcunha@ufpa.br

²Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, PA, Brasil.

³Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, PA, Brasil.



é de suma importância, tendo em vista que a mesma esta correlacionada com as propriedades mecânicas, físicas e químicas do material da peça.

Por outro lado, além dos elementos de liga, os tratamentos térmicos de qualquer natureza e os processos de fabricação também são responsáveis pela estrutura final dos materiais metálicos e, segundo Dieter [3] “[...] a deformação plástica ou o conjunto de deformações plásticas e fratura, são condicionantes importantes em que se apoiam à avaliação do processo de trabalhabilidade do metal” em particular quando se avalia a topografia da fratura, região em que se avalia as micro cavidades, que são geradas através de inclusões metálicas ou constituintes existentes na matriz do material, e nucleiam de regiões com tensões descontínuas que estão associados com partículas de segunda fase, inclusões, contornos de grão e acúmulos de discordâncias [4].

Recentemente, na engenharia de energia elétrica, houve um aumento no interesse por ligas termo resistentes, aquelas que conseguem manter suas propriedades a altas temperaturas, particularmente as mecânicas. Adições de zircônio em liga de alumínio se apresentaram como uma maneira promissora de elevar a temperatura de recristalização de tais ligas. Segundo Belov et al. [5] a adição de Zr no intervalo de [0,4-0,6%] em ligas de Al permitem não somente um reforço para a manutenção da deformação, mas adicionalmente aumenta as propriedades de resistência devido a inclusões de partículas de segunda fase Al₃Zr. Em suas análises com ligas de Alumínio hipo peritéticas, Knipling et al. [6] estudaram sobre a precipitação em ligas Al-Zr, Al-Ti e Al-Zr-Ti no intervalo de temperatura [450-600]°C e Knipling et al. [7] avaliaram propriedade mecânica de ligas Al-Zr, Al-Sc e Al-Sc-Zr na temperatura ambiente e em elevadas temperaturas, testemunham que o Zr consegue inibir o processo de recristalização em temperaturas elevadas.

Este trabalho, enfim, faz uma análise das alterações nas propriedades mecânicas e elétricas da liga Al-0,15%Fe-0,22%Zr causadas pelo processo de laminação a frio e teste de recuperação estática aplicados.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A liga desenvolvida para este estudo foi obtida por fundição direta utilizando alumínio comercialmente puro em um cadinho de carbetto de silício, em forno tipo mufla. Adicionou-se posteriormente ao metal líquido a massa de zircônio proporcionalmente a fim de se obter um teor de 0,22%. A liga foi vazada em molde tipo coquilha metálica com o formato de “U”, para que fosse possível retirar corpos de prova cilíndricos. Concomitantemente ao vazamento, foram retiradas amostras para a caracterização química da liga a fim de se atestar a composição desejada.

Os corpos de prova foram obtidos das pernas laterais do perfil “U” usinados de 22 mm para 18 mm de diâmetro. Após a usinagem os mesmos foram conformados

plasticamente através de laminação a frio, em um laminador elétrico duo reversível com canal circular. Foram feitos sucessivos passes até serem obtidos fios com diâmetros de aproximadamente (4; 3,8; 3 e 2,7) mm.

Após o processamento a frio dos corpos de prova, estes foram submetidos a ensaios de resistividade elétrica segundo as normas da NBR 5118 [8] e NBR 6814 [9] para a caracterização elétrica, e ensaios de tração axial segunda a norma NBR 6810 [10], para a caracterização mecânica. Após os ensaios mecânicos os corpos de prova fraturados foram preparados para avaliação metalográfica como o auxílio de um limpador ultrassônico, a fim de se eliminar qualquer resíduo de contaminante externo na superfície da fratura. Posteriormente, as topografias das fraturas resultantes foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Após a análise dos resultados obtidos nesta primeira etapa, fez-se a seleção do diâmetro que obteve melhores propriedades mecânicas e elétricas para submetê-lo à tratamentos térmicos a fim de avaliar suas propriedades mecânicas e elétricas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição Química

A tabela I apresenta os resultados da análise da composição química da liga base de alumínio [Al-0,15%Fe] modificada com o teor de 0,22% de zircônio, mostrando os valores obtidos com a queima do material em 3 pontos distintos da amostra testemunho, tal como o resultado das médias destes resultados.

Conforme mostrado na tabela I acima, o resultado demonstra que a liga se encontra dentro da composição química proposta, Al-0,15%Fe-0,22%Zr.

3.2 Caracterização Macroestrutural

A Figura 1 mostra a macrografia obtida da estrutura bruta de fusão da liga, tal como a microestrutura da liga quando observada via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Conforme mostrado na Figura 1, a macrografia da liga como fundida mostra grãos predominantemente colunares. A microestrutura da liga obtida via MEV revela partículas de segunda fase apresentando distribuição dispersa e aleatória com forte características de resultante de transformação do

Tabela I. Composição química da liga

| Elementos | Zr | Fe | Si | Cu |
|---------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 ^a Amostragem | 0,2197 | 0,1563 | 0,0554 | 0,0005 |
| 2 ^a Amostragem | 0,2267 | 0,1581 | 0,0554 | 0,0005 |
| 3 ^a Amostragem | 0,2178 | 0,1472 | 0,0554 | 0,0005 |
| MÉDIA | 0,2214 | 0,1538 | 0,0554 | 0,0005 |

sistema Al/Fe [(α -Al) + Al₃Fe], semelhantemente observado por Lobato [11]

3.3 Caracterização Elétrica e Mecânica

Na Figura 2 é apresentado o gráfico com os valores de condutividade elétrica e do LRT obtidos nos ensaios dos corpos de prova. Através destes resultados pode ser observado que ao diminuir-se os diâmetros dos corpos de prova, os valores tanto da condutividade elétrica como do LRT da liga aumentam. Contudo, os valores destas propriedades para o diâmetro de 3 mm destaca-se por serem maiores.

Segundo Santos [12], ao se deformar plasticamente uma liga de alumínio se provoca o fenômeno de encruamento que,

em consequência, geram discordâncias altamente emaranhadas no material. Fisicamente este elevado emaranhado deveria atuar prejudicando a transmissão de energia elétricas por servirem como barreiras para o livre caminhar dos elétrons, assim como elevar o LRT. No entanto, conforme pode ser observado na Figura 2, o que ocorre na liga estudada é o crescimento nos valores destas duas propriedades para os menores diâmetros, destacando-se o diâmetro de 3 mm. Este é o comportamento característico do fenômeno de recuperação dinâmica, que ao diminuir suavemente o emaranhado das discordâncias durante a deformação à frio, por desenvolver níveis de energia térmica suficiente para tal e, desse modo, contribui para aumentar a condutividade elétrica da liga sem interferir no LRT [4].

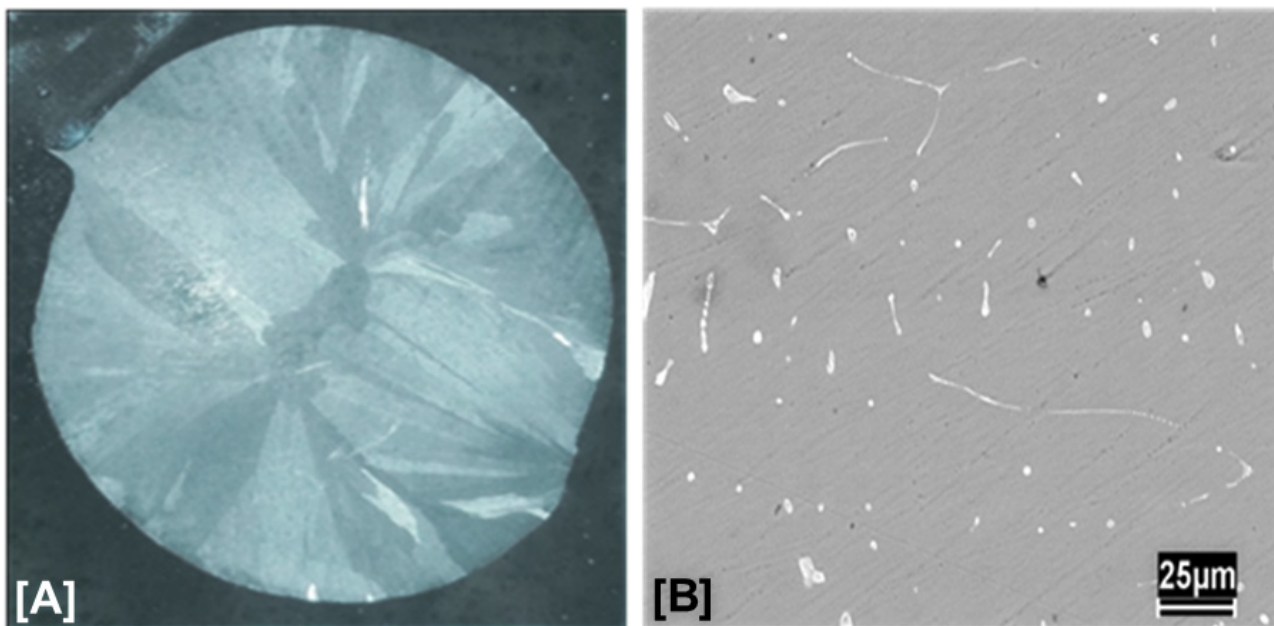


Figura 1. Fotos macro e micro estruturais obtidas da amostra da liga Al-0,15%Fe-0,22%Zr sem deformação: (A) Macrografia da estrutura bruta de fusão via microscopia ótica; e (B) Micrografia analisada via MEV.

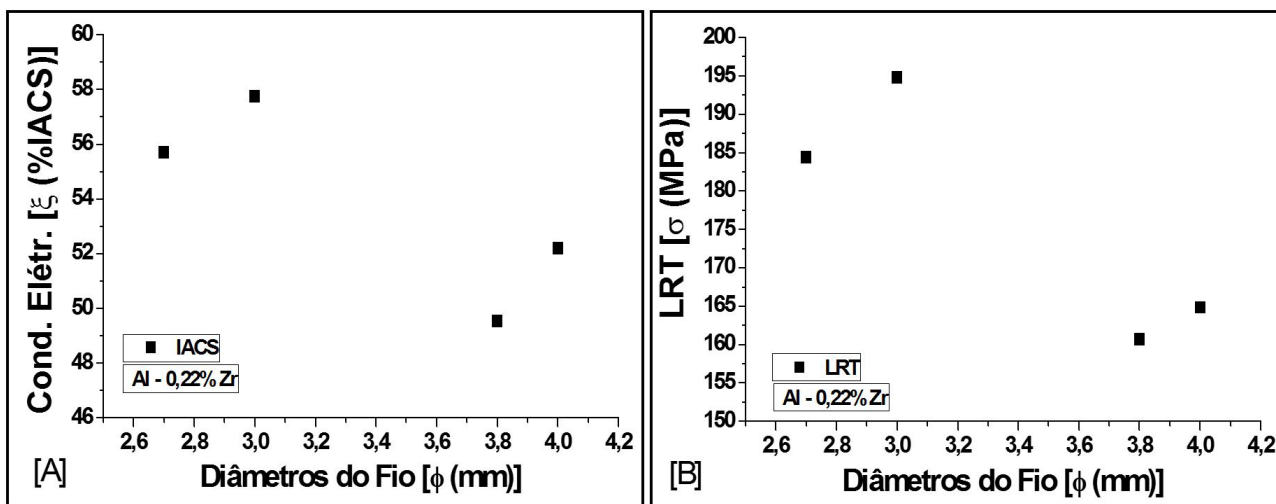


Figura 2. Avaliação Eletro/Mecânica da liga Al-0,15%Fe-0,22%Zr com deformação: (A) Condutividade Elétrica; e (B) Limite de resistência a tração (LRT).

3.4 Caracterização Mecânica e Micro Estrutural

A Figura 3 relaciona os gráficos com os valores do LRT e do alongamento (%) com a topografia das fraturas para os diâmetros estudados obtidos pós fratura. Pode-se observar ainda, neste conjunto de dados, a razoável concordância entre a evolução dos valores para o LRT com os valores do alongamento. Consta-se que, em resposta ao aumento do limite de resistência à tração, o alongamento da liga coerentemente diminui com a diminuição do diâmetro dos fios. Por outro lado, é possível observar a particularidade para o comportamento do fio com diâmetro de 3,00 mm ao apresentar o maior valor para o LRT apresenta o menor valor para o alongamento, como pode ser avaliado na Figura 3. Nesta figura, a topografia da fratura associada ao fio com diâmetro de 3,00 mm apresenta micro cavidades relativamente homogêneas e isenta de coalescência diferente dos diâmetros de 2,7 e 3,8 mm que apresentaram coalescimento como indicado pelas setas.

Tem-se que ressaltar que ligas de alumínio apresentam alta energia de falha de empilhamento o que facilita a associação do elevado poder de encruar ao do fenômeno da recuperação dinâmica, uma vez que a tensão aplicada para provocar a deformação do material gera energia térmica e, desta energia, parte é armazenada na estrutura deformada causando aumento na Energia Interna que se adicionam às tensões que agem entre as discordâncias desmembrando-as suavemente. Assim, os efeitos da recuperação dinâmica podem ser observados a temperaturas muito baixas, mantendo o LRT da liga elevados.

3.5 Tratamentos Térmicos

O corpo-de-prova medindo 3 mm de diâmetro, que apresentou maiores valores para condutividade elétrica, limite de resistência a tração e menor valor de alongamento entre os corpos-de-prova estudados, foi escolhido para aplicação de três testes de recuperação estática a 230°C/1h, 310°C/1h

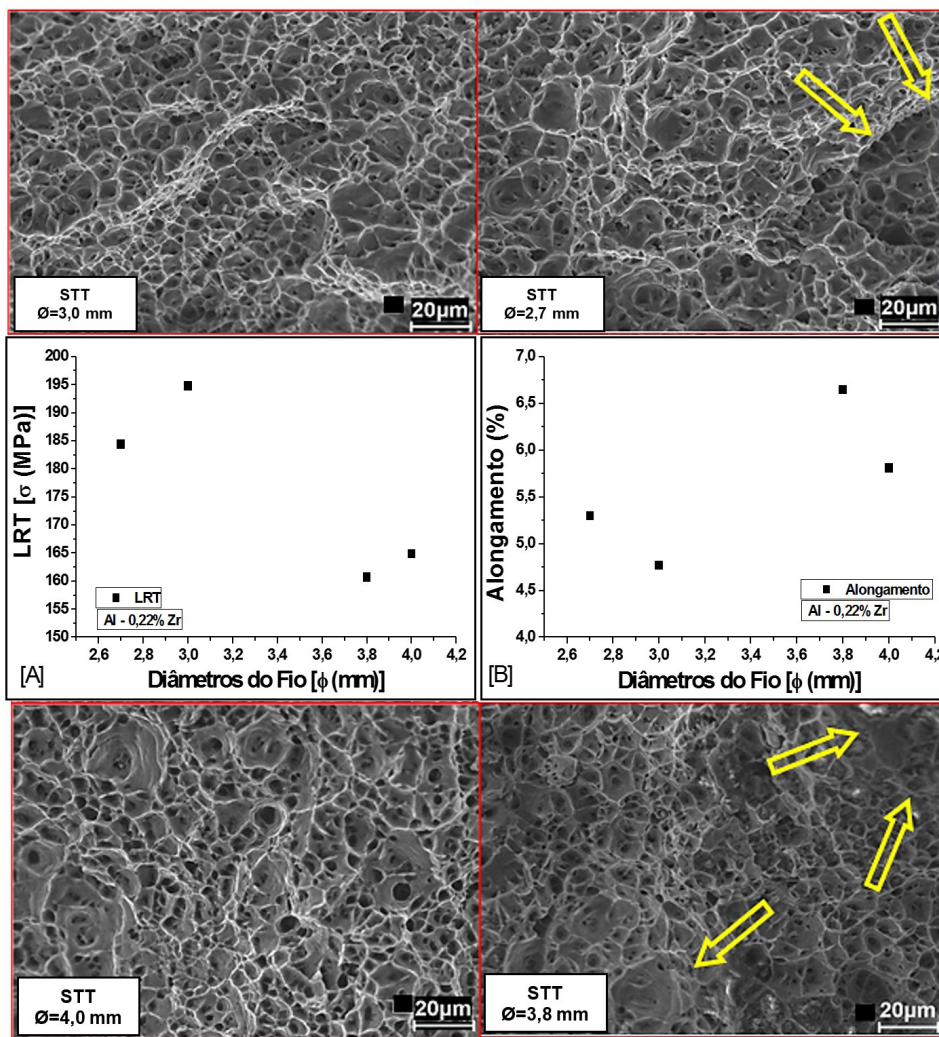


Figura 3. Arranjo esquemático associando a topografia da fratura da liga Al-0,15%Fe-0,22%Zr ao: (A) Limite de resistência à tração; e (B) Alongamento.

e 390°C/1h. Espera-se com esses testes de recuperação estática avaliar a possível temperatura de recristalização do material. A temperatura onde poderá ocorrer a eliminação do emaranhado das discordâncias/encruamento ocasionando a queda da resistência mecânica.

Na Figura 4 estão representados os resultados obtidos para o LRT associados a topografia das fraturas e

distribuição de partículas de segunda fase após a aplicação dos tratamentos térmicos.

A observação dos resultados a partir da amostra STT, a amostra que sofreu a recuperação estática a 230°C/1h, apresentou ligeiro ganho no LRT. É possível que pequena diferença para a temperatura de 230°C esteja relacionada a distribuição das partículas de segunda fase, amplamente

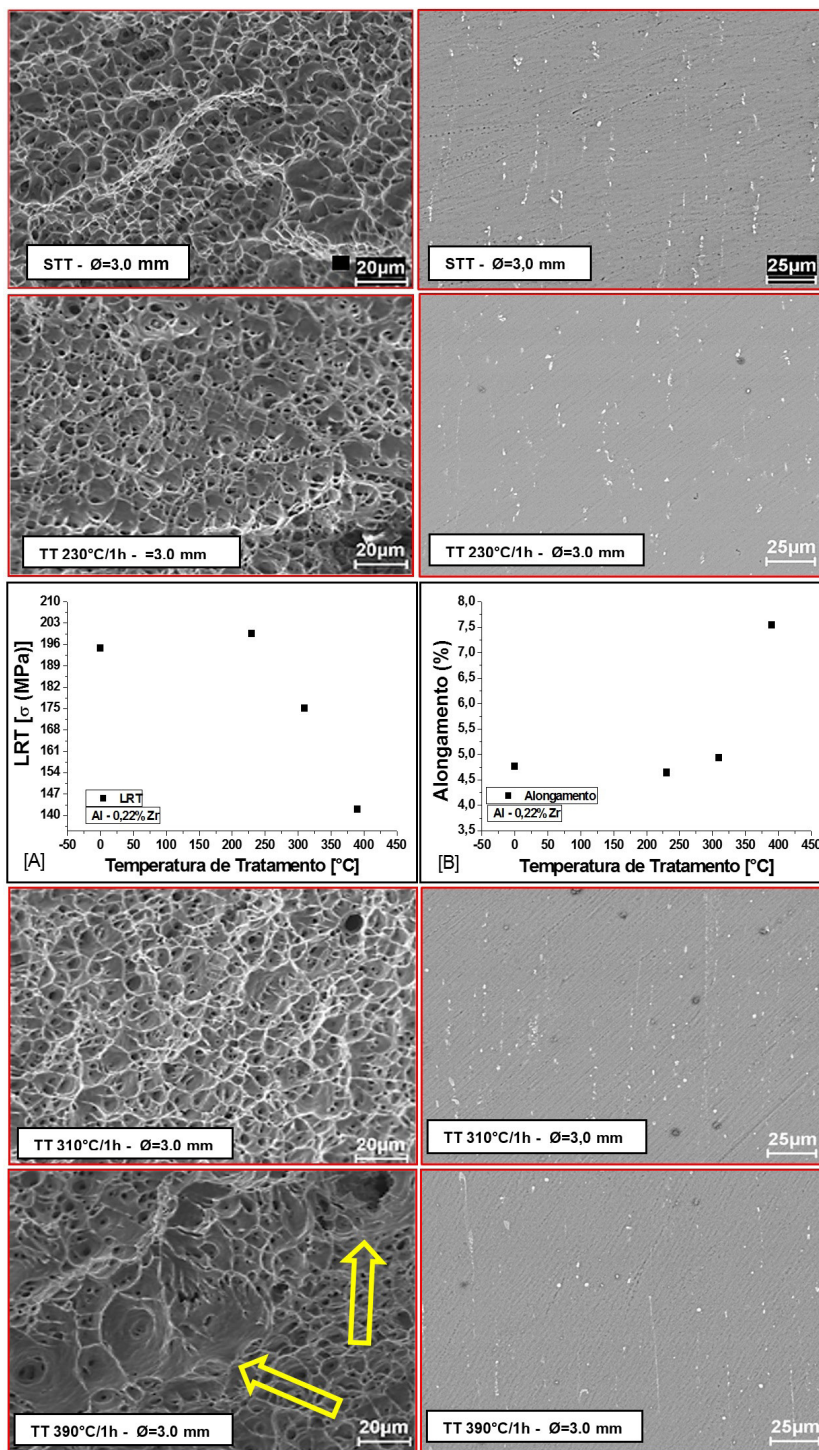


Figura 4. Arranjo esquemático associando a topografia da fratura e das micrografias próximas as fraturas da liga Al-0,15%Fe-0,22%Zr ao: (A) Limite de resistência à tração; (B) Alongamento após tratamento térmico recuperação estática em diferentes temperaturas por 1 hora.

distribuídas. O tempo e temperatura de recuperação estática, não ocasionou uma dispersão destas partículas, desta forma, favorecendo a formação de sítios de nucleação de microcavidades, este comportamento se reflete tanto na topografia da fratura como nos valores dos alongamentos das amostras, com micro cavidades muito refinadas e pequena perda nos valores para o alongamento.

A comparação com a amostra que foi submetida a recuperação estática a 310°C/1h é observado perdas de aproximadamente 10% no LRT. É possível que a ocorrência da relativa dispersão das partículas de segunda fase para a temperatura de 310°C, contribua para a formação de micro cavidades com levíssima presença de coalescência e, por isso, pequenos ganhos nos valores para o alongamento.

Quando se avalia a amostra que sofreu a recuperação estática a 390°C/1h observa-se perdas consideráveis no LRT (aprox. 25%) com micro cavidades com fortíssima presença de coalescimento (como indicado pelas setas) que, em consequência, apresenta elevado valor para o alongamento. A ocorrência da forte dispersão das partículas de segunda fase pode ter contribuído para a formação de micro cavidades fortemente coalescidas que, em consequência, apresentam menor LRT e elevado valor para o alongamento. Segundo Lobo [13], onde há poucos locais de nucleação e partículas muito espaçadas geram grandes microcavidades.

Na Figura 5 é apresentado o desempenho elétrico da liga obtido após a submissão à recuperação estática comparando com o LRT e alongamento. Nota-se ganhos

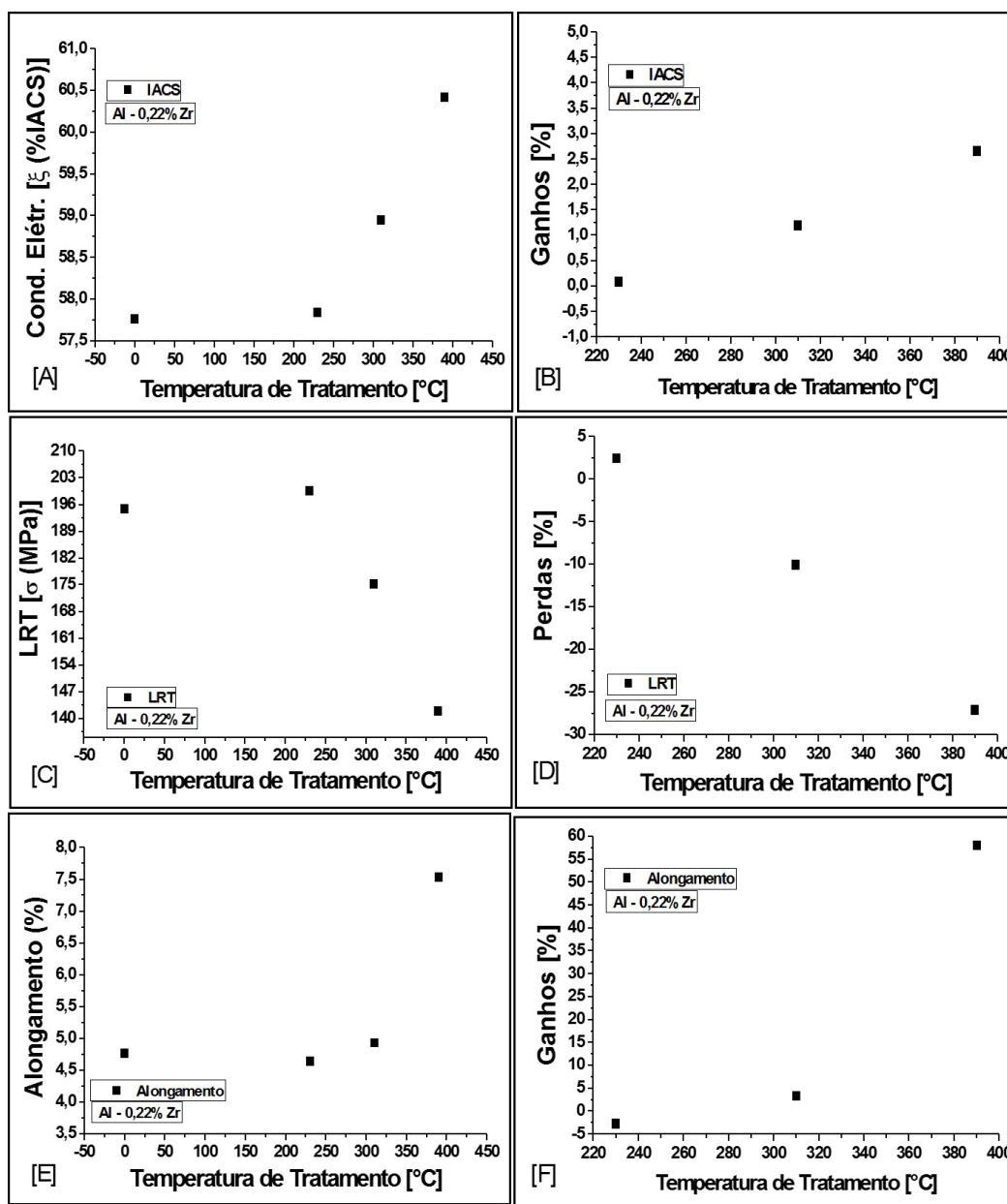


Figura 5. Avaliação Eletro/Mecânica da liga Al-0,15%Fe-0,22%Zr com deformação: (A) e (B) Condutividade Elétrica e Ganhos (C) e (D) Limite de resistência a tração (LRT) e Perdas (E) e (F) Alongamento e ganhos após tratamento térmico em diferentes temperaturas por 1 hora.

de condutividade elétrica com o aumento da temperatura. O perfil dos valores da condutividade elétrica desenvolveu-se de forma inversa ao observado na determinação do LRT. Nas amostras a 230°C/1h, constata-se a ocorrência de ligeiro ganho na condutividade elétrica a exemplo do que ocorreu com o LRT.

A amostra submetida a recuperação estática a 310°C/1h, são observados pequenos ganhos na condutividade elétrica (1,5%) e ganho de alongamento (próximo a 3,3%) diferente do observado na avaliação do LRT em que se constatam perdas próxima de 10%.

A outra observação que pode ser feita com base na Figura 5 refere-se à avaliação da amostra que sofreu tratamento térmico a 390°C/1h. É possível observar ganhos na condutividade elétrica [3,0%] e ganho de alongamento [próximo a 58%] diferente do observado na avaliação do LRT, Figura 4, em que foram constatadas perdas consideráveis no LRT (próximo a 27%).

Estes comportamentos opostos entre a condutividade elétrica e LRT além da comparação do alongamento, são uma constatação de que, na medida em que a temperatura de teste aumenta, propicia o desemaranhar das discordâncias e a distribuição das partículas de segunda fase até atingir a recristalização, facilitando o livre caminhar dos elétrons, diminuindo o LRT e aumentando a capacidade de alongamento e conduzir energia elétrica da liga.

Se bem observado estas consequências podem ser indicativas de que temperaturas acima de 310°C iniciam o processo de recristalização da liga e consequente perda de seu LRT.

REFERÊNCIAS

- 1 Quaresma JMV. Correlação entre condições de solidificação, microestrutura e resistência mecânica [tese]. Campinas: Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual de Campinas; 1999.
- 2 Cruz KS, Meza ES, Fernandes FAP, Quaresma JMV, Casteletti LC, Garcia A. Dendritic arm spacing affecting mechanical properties and wear behavior of Al-Sn and Al-Si alloys directionally solidified under unsteady-state conditions. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2010;41(4):972-984. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-009-0161-2>.
- 3 Dieter GE. *Mechanical metallurgy*. Ohio: McGraw-Hill Kogakusche; 1988.
- 4 Padilha AF, Siciliano FJ. *Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura*. São Paulo: ABM; 1996.
- 5 Belov NA, Alabin AN, Prokhorov AY. The influence that a zirconium additive has on the strength and electrical resistance of cold-rolled aluminum sheets. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2009;50(4):357-362. <http://dx.doi.org/10.3103/S1067821209040099>.
- 6 Knipling KE, Dunand DC, Seidman DN. Precipitation evolution in AlZr and Al-Zr-Ti alloys during aging at 450-600°C. *Acta Materialia*. 2008;56(6):1182-1195. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2007.11.011>.
- 7 Knipling KE, Seidman DN, Dunand DC. Ambient- and high temperature mechanical properties of isochronally aged Al-0.06Sc, Al-0.06Zr and Al-0.06Sc-0.06Zr (at.%) alloys. *Acta Materialia*. 2011;59(3):943-954. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2010.10.017>.
- 8 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5118: fios de alumínio 1350 nus, de seção circular, para fins elétricos. Rio de Janeiro: ABNT; 2007.

4 CONCLUSÃO

Tendo como base os estudos experimentais apresentados verificou-se que, a macroestrutura da liga como solidificada apresenta grãos predominantemente colunares e a microestrutura apresenta semelhança com o constituinte eutético [(Al- α)+Al₃Fe] do sistema Al/Fe. Com relação às características mecânicas (LRT) e elétricas (IACS) constatou-se que, o diâmetro de 3 mm apresenta desempenho superior aos demais diâmetros estudados e, desta forma, tornando o diâmetro escolhido para ser submetido aos testes de recuperação estática.

Observou-se que após a submissão aos testes nas temperaturas citadas houver queda da resistência mecânica e aumento de condutividade elétrica, com exceção para a amostra submetida ao tratamento de 230°C que teve pequeno ganho no LRT.

Para as topografias das fraturas dos corpos de prova submetidos aos testes de recuperação estática a (230 e 310)°C constata-se homogeneidade no tamanho das microcavidades. No caso da temperatura de 390°C observa-se microcavidades maiores, fortemente coalescidas que pode ser associado com forte dispersão das partículas de segunda fase, com regiões mais concentradas e região com menor concentração dessas micropartículas.

Os resultados permitem concluir ainda que as temperaturas utilizadas interferem mais na modificação do aspecto do encruamento do que na propositura de partículas precipitadas; corroborando estudos de autores citados, no corpo do trabalho, que afirmam que a mobilidade do Zr necessita de temperaturas elevadas associadas a intervalos de tempo relativamente longos.

- 9 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6814: fios e cabos elétricos: ensaio de resistência elétrica. Rio de Janeiro: ABNT; 1986.
- 10 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6810: fios e cabos elétricos: tração à ruptura em componentes metálicos. Rio de Janeiro: ABNT; 2010.
- 11 Lobato MQ. Avaliação da influência de teores de Zr na termo resistividade da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,3%Si, solidificada em molde unidirecional horizontal [dissertação]. Belém: Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará; 2016.
- 12 Santos WLR. Efeitos de teores de Zr sobre as propriedades mecânicas e elétricas de ligas Al-EC-Si aplicadas na elaboração de ligas para Tx e Dx de energia elétrica [dissertação]. Belém: Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará; 2010.
- 13 Lobo JBA. Correlação entre as propriedades mecânicas e elétricas da liga Al-0,4% Si-0,6%Mg não refinada, modificada com teores de cobre [dissertação]. Belém: Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará; 2007.

Recebido em: 1 Dez. 2016

Aceito em: 23 Jul. 2017