

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS SOLUTOS DE ZR E TI SOBRE A PROPRIEDADE DE TERMORRESISTÊNCIA DE UMA LIGA AL-0,05%CU-[0,24-0,28]%FE-0,7%SI DESTINADA À TRANSMISSÃO [TX] E/OU DISTRIBUIÇÃO [DX] DE ENERGIA ELÉTRICA¹

Isabella Cristina da Silva Jorge²

Everaldo Afonso Fernandes³

Jessiana Avelar de Lima²

Paulo Cordeiro Machado⁴

José Maria do Vale Quaresma⁵

Resumo

Sob a expectativa do desenvolvimento de novos materiais, estudos foram realizados visando avaliar o efeito da adição de solutos de Zr e Ti em uma liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si destinada à manufatura de cabos elétricos. Na busca de verificar seu comportamento sob diferentes temperaturas, o estudo submete a liga formada a diferentes ciclos térmicos, na tentativa de simular os fenômenos aos quais o material estará sujeito quando empregado em operações como cabos para transmissão [Tx] e/ou distribuição [Dx] de energia elétrica. As amostras foram obtidas a partir de perfis solidificados, usinados e deformados a frio para diferentes diâmetros. Nestas circunstâncias, o diâmetro de 3,00 mm foi aquele que apresentou as melhores respostas elétricas e mecânicas, sendo, portanto, adotado como fonte de estudo.

Palavras-chave: Termorresistividade; Limite de resistência à tração; Condutividade elétrica; Tratamentos térmicos.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SOLUTES ZR AND TI ON THE THERMORESISTANCE PROPERTY OF AN ALLOY AL-0.05%CU-[0.24-0.28]%FE-0.7%SI DESIGNED FOR TRANSMISSION [TX] AND/OR DISTRIBUTION [DX] OF ELECTRICITY

Abstract

Under the expectation of developing new materials, studies were conducted to evaluate the effect of the addition of solutes Zr and Ti in an alloy Al-0.05%Cu-[0.24-0.28]%Fe-0.7%Si intended to manufacture electric cables. Associated with this expectation and in seeking to check their behavior under different temperatures, the study submitted the alloy formed at different thermal cycles in an attempt to simulate the phenomena to which the material will be subjected when used in operations such as cables for transmission [Tx] and/or distribution [Dx] of electricity. Samples were obtained from solidified profiles, machined and cold deformed to different diameters. In these circumstances, the diameter of 3.00 mm presented the best electrical and mechanical responses and, therefore, adopted as a source of study.

Key words: Thermoresistance; Limit of tensile strength; Electrical conductivity; Heat treatments.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheira de Produção. Mestrando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará. Belém, PA, Brasil.

³ Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará. Belém, PA, Brasil.

⁴ Engenheiro Mecânico. Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará. Belém, PA, Brasil.

⁵ Engenheiro Mecânico. Dr. em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará. Belém, PA, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O aumento constante da demanda de energia elétrica em nosso país, tanto em escala industrial, quanto em escala doméstica, gera a necessidade de ampliação e renovação das linhas de transmissão atuais. Segundo Ambrosi e Gonzatto,⁽¹⁾ somas vultosas são gastas na implantação de novas linhas de transmissão e manutenção da rede já existente. A busca por materiais mais eficientes e menos onerosos é um dos caminhos trilhados por pesquisadores para sanar essas dificuldades e garantir a transmissão e distribuição de energia elétrica.

Neste contexto, o Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais – GPEMAT tem seu foco de trabalho em novas combinações de materiais e aperfeiçoamento de suas características, pois os investimentos feitos para modificar as linhas de transmissão já existentes, para cabos produzidos a partir destes novos materiais, seriam bem menores se comparado aos atuais custos de manutenção destas linhas. Existindo ainda, para estes novos materiais, os incrementos da temperatura operacional, sem aumentar as perdas de Efeito-Joule, enquanto limita a flecha entre as torres dentro de valores aceitáveis nas instalações existentes.⁽²⁾

Com este objetivo, os estudos de Santos,⁽²⁾ Freitas⁽³⁾ e Cordeiro,⁽⁴⁾ com ligas diluídas Al-Si modificadas com Ti, Zr e Ti+Zr, investigaram o desempenho destes elementos quanto às características mecânicas, elétricas e de termorresistividade.

Baseados nestes fatos, este trabalho propôs-se a estudar o comportamento elétrico, mecânico e estrutural da liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si modificada com 0,26%Zr e 0,26%Ti, caracterizando-a como uma liga TAL [*Thermal Resistant Aluminium Alloy* – Liga de alumínio termorresistente] para a utilização na transmissão e distribuição de energia elétrica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As ligas foram obtidas por solidificação estática direta, em lingoteira metálica, no Sub-laboratório de Metalografia e Tratamento Térmicos da UFPa. Sua preparação foi realizada inicialmente através de adições de 0,05%Cu, [0,24 a 0,28]%Fe e 0,7% de Si, e em seguida, através da adição de 0,26%Zr (Etapa A) e 0,26%Ti (Etapa B), na busca da proporção adequada para obtenção da composição química ideal para a liga.

Para a obtenção de maiores informações quanto às características de termorresistividade e formação das partículas de segunda fase – que tendem a aumentar a temperatura de recristalização da liga –, foram realizados os seguintes tratamentos térmicos descritos na Figura 1. Assim, estes estudos tiveram por base, além dos anteriormente citados, os estudos sobre o efeito da etapa de têmpera sobre a microestrutura da liga de alumínio 7055 de Liu et al.⁽⁵⁾ com a liga Al-8,0%Zn-1,8%Mg-2,3%Cu-0,17%Zr a partir de chapas com 2,5mm de espessura, laminadas à quente e que foram solubilizadas a 470^oC por uma hora e depois submetidas a ciclos térmicos e resfriamento brusco, em água, com as temperaturas [235, 355 e 415]^oC que estão no intervalo de temperatura crítica e, posteriormente, envelhecida artificialmente a 121^oC durante 24 h. Por base também, teve-se os estudos de Deschamps e Bréchet⁽⁶⁾ sobre a Influência da têmpera e das taxas de aquecimento sobre a resposta ao envelhecimento da um liga Al-Zn-Mg-Zr. E por fim, neste presente estudo, a investigação teve por base chapas com 3mm de espessura laminadas a frio.

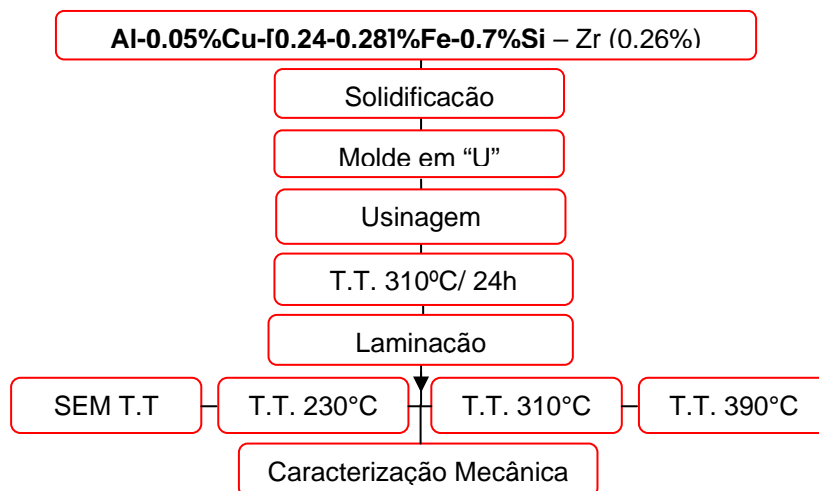


Figura 1. Fluxograma detalhando as operações metalúrgicas e de caracterização para a liga Al-EC-0,7%Si-0,26%Zr (Etapa A).

A Etapa B consistiu nos mesmos passos da Etapa A, porém com a inserção de 0,26% Ti na liga base.

Os Tratamentos Térmicos, em diferentes temperaturas, têm o objetivo de verificar a possibilidade de provocar a presença das partículas de segunda fase e estudar seus efeitos sobre as características mecânicas das ligas Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si-0,26%Zr e Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si-0,26%Ti

Para a preparação das ligas foram utilizadas barras de Al-EC, pedras de Silício metálico, barras de pré-liga Al-10%Zr e barras de pré-liga Al-10%Ti, que foram cortadas com serra de fitas, pesadas com balança digital e fundidas em forno do tipo mufla, no qual foram executadas todas as operações de fundição.

A composição foi confirmada em espectrômetro óptico de propriedade da empresa parceira de uso contínuo no monitoramento do processo industrial. Além das análises espectrométricas, todo o alumínio utilizado para a obtenção das ligas foi cedido pela empresa parceira no desenvolvimento dos estudos em questão.

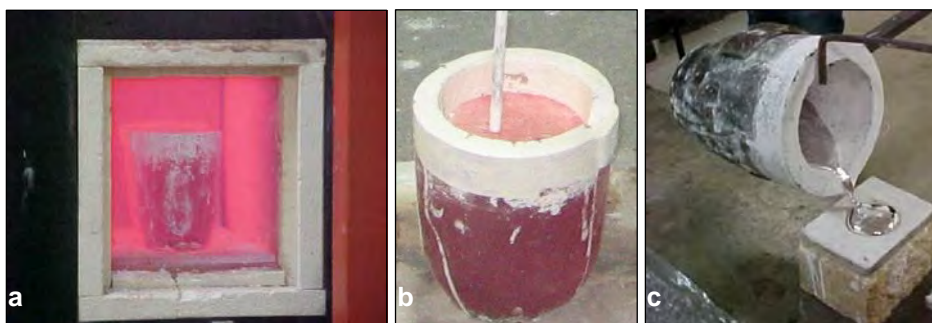


Figura 2. Esquema de preparação e obtenção das ligas fundidas: (a) fundição do material; (b) injeção de argônio; (c) coleta de amostras para análise química.

Na sequência de imagens ilustrada na Figura 2, tem-se o processo de fundição das ligas nas composições químicas predefinidas (Figura 2a), seguida de injeção de argônio (Figura 2b), e vazamento para obter-se as amostras para a análise química (Figura 2c).

O vazamento do metal líquido foi realizado em uma lingoteira metálica com formato em "U" (Figura 3), que possibilita a solidificação estática do metal líquido.

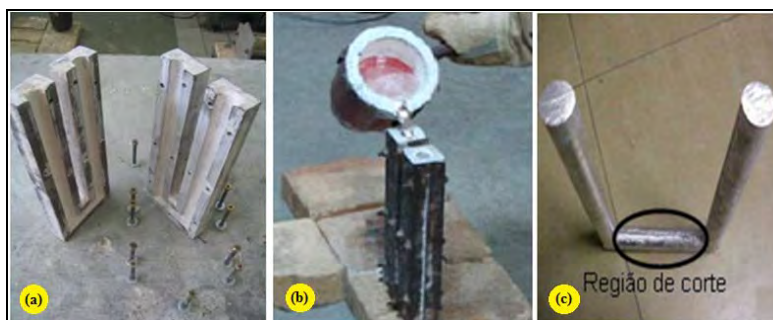


Figura 3. Lingoteira em forma de “U”: (a) desmontada, (b) no momento do vazamento e (c) lingote fundido com identificação da região de corte.

Após a obtenção dos perfis solidificados, foram seccionadas as duas “pernas” do lingote com comprimento de 250 mm, para serem em seguida usinadas do diâmetro de 22 mm para o diâmetro de 18mm e, então, laminadas a frio até a obtenção dos diâmetros de estudo [4,0; 3,8; 3,0 e 2,7]mm em um laminador duo elétrico de secção circular de diferentes diâmetros.

A Figura 4 apresenta a relação do desempenho dos solutos em provocar nucleação em ligas de Al. Quando a proporção solvente/soluto é próximo da unidade, a probabilidade de existir um cristal bem ordenado é muito maior, e o refinamento de grão eficiente é alcançado, como é experimentalmente verificada com a adição de Nb, Ti e Ta no Al. Por outro lado, a incoerência significativa com a matriz de Al leva à “intoxicação” do material e à precipitação de estruturas metaestáveis, por exemplo, Zr e Cr.⁽⁷⁾ Nota-se que o Ti tem maior capacidade de nucleação para o Al devido à sua baixa incoerência com a matriz, caso oposto para o Zr. Esta relação do soluto com a coerência da matriz de alumínio influencia as propriedades mecânicas e elétricas do material.

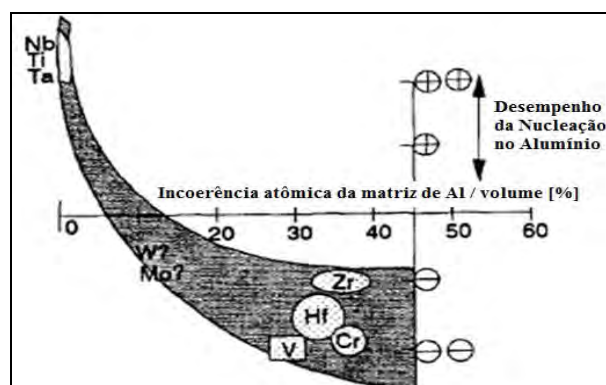


Figura 4. Imagem qualitativa da capacidade de refino de grão de metais de transição com base na incoerência atômica com a matriz de Al.⁽⁷⁾

2.1 Caracterização Mecânica das Ligas.

Após a deformação a frio das ligas e a obtenção dos diâmetros desejados no estudo, os corpos de prova foram submetidos a ensaio mecânico, em uma máquina de ensaio de tração acoplada a um micro computador com sistema de aquisição de dados que facilita a coleta das informações. Os testes de tração foram ensaiados segundo a norma para cabos elétricos NBR 6810⁽⁸⁾ e, portanto, executados em três amostras com 20 cm de comprimento para cada diâmetro ou tratamento térmico produzido ao longo do trabalho em cada etapa.

2.2 Testes de Termorresistividade

O teste de natureza térmica é realizado segundo especificações realizadas pela Copel (Companhia Paranaense de Energia), que descreve que condutores elétricos caracterizados como termorresistentes não devem apresentar perda superior a 10% de seu limite de resistência à tração [LRT], quando submetidos à temperatura de 230°C por uma hora. Ademais, a escolha das outras duas temperaturas tiveram por referência os estudos de Liu et al.⁽⁵⁾ e Deschamps e Bréchet,⁽⁶⁾ como comentados anteriormente.

Os tratamentos térmicos exigidos foram executados em um forno do tipo mufla, da marca Brasimet, que já foi mostrado anteriormente na Figura 2a.

3 RESULTADOS

A Tabela 1 mostra os resultados da análise da composição química para as amostras obtidas da liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si modificada com 0,26%Zr (ETAPA A) e 0,26%Ti (ETAPA B). Esta leitura foi obtida a partir de análise em espectrômetro óptico de massa.

Tabela 1. Composição química da liga de Alumínio modificada com Zircônio e Titânio

Liga	%Cu	%Fe	%Si	% Zr	%Ti
0,26% Zr	0,0512	0,2501	0,7262	0,2599	-
0,26% Ti	0,0524	0,2563	0,6818	-	0,2556

3.1 Caracterização Mecânica e Avaliação da Termorresistividade (0,26%Zr)

Abaixo, a Tabela 2 apresenta a correlação entre o diâmetro do corpo de prova, limite de resistência à tração e temperatura de tratamento térmico para a liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si-0,26%Zr, e a exemplo dos estudos realizados por Liu et al.⁽⁵⁾ e Deschamps e Bréchet,⁽⁶⁾ foram realizados estudos com ciclos térmicos na faixa das temperaturas [230, 310 e 390]^oC na expectativa de serem observados potenciais termorresistivos nas ligas modificadas.

Tabela 2. Correlação entre o diâmetro do corpo de prova, limite de resistência à tração (LRT) e temperatura de tratamento térmico

Diâmetro	STT	TT230°C		TT310°C		TT390°C	
	LRT	LRT	Perda (%)	LRT	Perda (%)	LRT	Perda (%)
4,0	206	191	7	174	16	153	26
3,8	207	185	10	170	18	151	27
3,0	249	232	7	202	19	176	29
2,7	233	210	10	175	25	158	32

A análise da variação do LRT (perdas percentuais), para cada temperatura, teve como referência a amostra deformada que não foi submetida a tratamento térmico. Os gráficos da Figura 5 apresentam os resultados da análise de Termorresistividade para os diâmetros [4,0; 3,8; 3,0 e 2,7]mm da liga com 0,26%Zr, cujos estão relacionados às temperaturas dos tratamentos. Assim, observa-se que há uma tendência de decréscimo na resistência a esforços trativos à medida que a temperatura de teste aumenta.

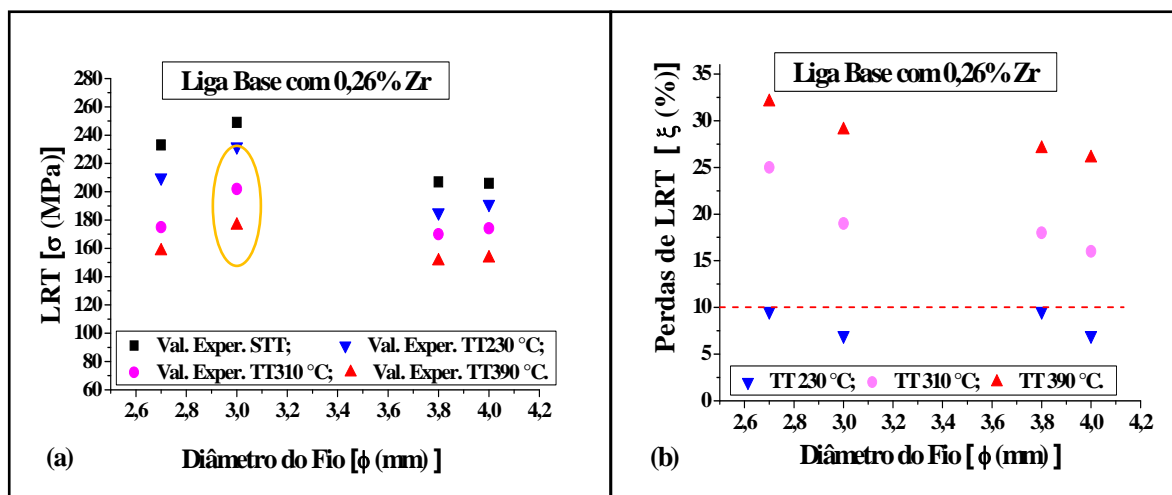


Figura 5. Resultados da Caracterização Mecânica para análise de Termorresistividade para os diâmetros [4,0; 3,8; 3,0 e 2,7]mm. Em (a) sem Tratamento Térmico [STT] e com Tratamento Térmico [TT230/1h; TT 310/1h e TT 390/1h]; em (b) relação das perdas ocorridas pós Tratamento Térmico [TT230/1h; TT 310/1h e TT 390/1h].

Na Figura 5, observa-se os seguintes aspectos:

- o diâmetro do fio [$\phi = 3,0\text{mm}$] apresenta, para todas as temperaturas utilizadas, os maiores valores para o LRT, que estão destacados no gráfico pelo círculo amarelo da Figura 5a; e
- para a liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si-0,26%Zr, quando ensaiada de acordo com o protocolo Copel [230°C/1h], é observado um comportamento satisfatório, pois não ultrapassou o limite exigido de 10% (linha em vermelho), como fica evidente pelos valores representados pelos pontos de cor azul da Figura 5b. E é possível que estes resultados estejam atrelados ao aspecto da recuperação dinâmica e que as fases descritas, tanto por LIU Sheng et al, 2009 como por A. Deschamps, Y. Bréchet; 1998, reorganizem-se dispersas na matriz, mas com elevada incoerência com a mesma, como propõem Mohanty e Gruzleski, 1995.

3.2 Caracterização Mecânica e Avaliação da Termorresistividade (0,26%Ti)

A Tabela 3 apresenta a correlação entre o diâmetro do corpo de prova, limite de resistência à tração e temperatura de tratamento térmico para a liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si-0,26%Ti.

Tabela 3. Correlação entre o diâmetro do corpo de prova, limite de resistência à tração (LRT) e temperatura de tratamento térmico

Diâmetro	STT	TT230°C		TT310°C		TT390°C	
	LRT	LRT	Perda (%)	LRT	Perda (%)	LRT	Perda (%)
4,0	203	180	11	159	22	120	41
3,8	205	179	13	123	40	114	44
3,0	248	228	8	149	40	134	46
2,7	231	202	13	126	45	125	46

Da mesma forma que para a liga com inserção de Zr, a análise da variação do LRT (perdas percentuais) para cada temperatura da liga com 0,26%Ti, teve como referência a amostra deformada que não foi submetida a tratamento térmico.

Os gráficos da Figura 6 apresentam resultados da análise de Termorresistividade para os diâmetros [4,0; 3,8; 3,0 e 2,7]mm da liga com 0,26%Ti, cujos estão relacionados às temperaturas dos tratamentos.

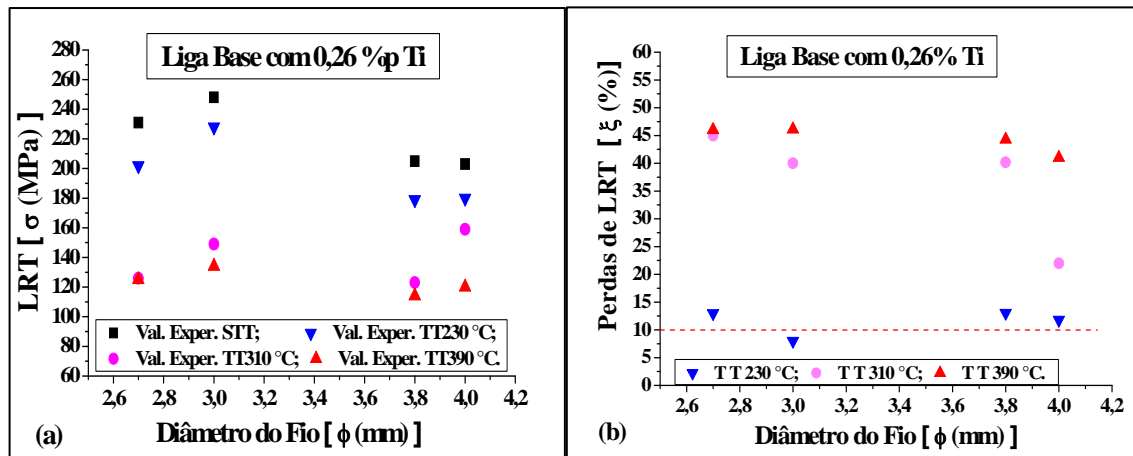


Figura 6. Resultados da Caracterização Mecânica para os diâmetros [4,0; 3,8; 3,0 e 2,7]mm. Em (a) sem Tratamento Térmico [STT] e com Tratamento Térmico [TT230/1h; TT 310/1h e TT 390/1h]; em (b) relação das perdas ocorridas pós Tratamento Térmico [TT230/1h; TT 310/1h e TT 390/1h].

Na Figura 6, observa-se os seguintes aspectos:

- o diâmetro do fio [$\phi = 3,0\text{mm}$] também apresenta, para todas as temperaturas utilizadas, os maiores valores para o LRT;
- a liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,7%Si-0,26%Ti, quando ensaiada de acordo com o protocolo Copel [230°C/1h], apresentou um comportamento não satisfatório, pois apenas o diâmetro de 3,00mm, em alguns diâmetros, não ultrapassou o limite exigido de 10% (linha em vermelho), dada a evidência proporcionada pelos valores representados pelos pontos de cor azul da Figura 6b;
- a avaliação dos resultados apresentados mostra que o tempo de uma hora utilizado para as temperaturas de [310 e 390]°C, para a liga modificada com o teor de 0,26% Ti, resulta em tempo/temperatura de uma possível precipitação, pois o material após solidificar-se, encontra-se apenas com fase α , logo com boa capacidade de precipitação de novas partículas, que neste caso apresentam-se coerentes com a matriz de Al (Figura 4).⁽⁷⁾
- a partir desta análise em conjunto com os baixos valores de termorresistência determinados (Figura 6b), tal liga não se enquadra no protocolo Copel. Em temperaturas mais elevadas de TT, o arranjo microestrutural sofre maiores alterações, devido à movimentação de discordâncias em um meio com baixa incoerência atômica que pode, naturalmente, levar ao aniquilamento das mesmas. Desta forma o material não passa pelo processo de recuperação estática, passando diretamente para a etapa de recristalização. Estas particularidades podem estar causando os resultados não favoráveis à termorresistência da liga.

4 DISCUSSÃO

4.1 Caracterização Mecânica e Termorresistência - Etapa A e Etapa B

Observa-se, primeiramente, para todos os diâmetros, tanto na Etapa A quanto na Etapa B, que existe uma tendência ao decréscimo do LRT à medida que a temperatura de tratamento térmico das amostras aumenta. Este comportamento pode ser explicado através de Padilha e Siciliano⁽⁹⁾ que discorrem acerca do rearranjo das discordâncias, seguido do desemaranhamento das mesmas, explicando que este pode ser provocado pelo aquecimento.

Ao serem analisados, os resultados obtidos após os ensaios realizados de acordo com o protocolo Copel, permitem inferir que:

- Através da Figura 5, infere-se que a liga modificada com o teor de 0,26%Zr cumpriu integralmente a exigência do protocolo, respondendo como termorresistente para todos os diâmetros e temperaturas ensaiadas;
- Após análise dos dados plotados na Figura 6, observa-se que a liga modificada com o teor de 0,26%Ti se apresentou como termorresistente, segundo o protocolo, apenas para o diâmetro de 3mm; e
- Quando ensaiadas às temperaturas de 310°C e 390°C, acima da temperatura exigida pelo protocolo Copel, ambos os teores apresentaram variações significativas na resistência mecânica, que podem ter sido provocadas pela recuperação/precipitação estática provocadas – principalmente – pelas temperaturas à qual foram expostos, sendo muito mais significativas para a temperatura de 390°C da liga 0,26%Ti.

5 CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados obtidos, infere-se que apenas a liga com adição de 0,26%Zr se enquadra como Termorresistente para todos os diâmetros e temperaturas ensaiadas, de acordo com o protocolo Copel. A liga com adição de 0,26%Ti apresenta característica termorresistente apenas para o diâmetro de 3 mm. Os resultados apontam ainda para impossibilidade destas ligas, nos teores estudados e para a finalidade a que se destinam, de serem utilizadas com eficácia em temperaturas superiores a 230°C e para fios com diâmetro do 3,00mm.

REFERÊNCIAS

- 1 AMBROSI, I.; GONZATTO, V.; **Situação Energética no Brasil e Alternativas Frente a Falta de Investimentos no Setor**, Teor. Evid. Econ., Passo Fundo, Ano 1, n.1, , março 1993, p.143-164.
- 2 SANTOS, W. L. R.; **Efeito 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 de Mestrado, Área de Concentração Materiais e Processos de Fabricação, Universidade Federal do Pará - UFPA, 2010.
- 3 FREITAS, E. S.; **Correlação entre as propriedades mecânicas e elétricas de fios para Tx e Dx de energia elétrica do Al-EC modificado com teores de silício e zircônio**. Dissertação de Mestrado, Área de Concentração Materiais e Processos de Fabricação, Universidade Federal do Pará - UFPA, 2010.
- 4 MACHADO, P. C.; **Análise da Influência dos Solutos Zr e Ti sobre as Propriedades Mecânica, Elétrica e de Termorresistência de uma Liga Al-Cu-Fe-Si destinada d**

- Tx e a Dx de energia elétrica**, Dissertação de Mestrado, Área de Concentração Materiais e Processos de Fabricação, Universidade Federal do Pará - UFPA, 2012.
- 5 LIU Sheng-dan, ZHANG Yong, LIU Wen-jun, DENG Yun-lai, ZHANG Xin-ming, **Effect of step-quenching on microstructure of aluminum alloy 7055**, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 20 (2010) 1-6.
- 6 A. Deschamps, Y. Bréchet, **Influence of quench and heating rates on the ageing response of an Al–Zn–Mg–(Zr) alloy**, *Materials Science and Engineering A251* (1998) 200–207.
- 7 MOHANTY, P. S. e GRUZLESKI, J. E.; **Mechanism of Grain Refinement in Aluminium**, *Acta metall. mater.*, Elsevier Science Ltd, Vol. 43, No. 5, pp. 2001-2012, 1995.
- 8 ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas – “**Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos**”, Rio de Janeiro, Ago. 1981, NBR 6810.
- 9 PADILHA, A. F.; SICILIANO F. J.; **Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura**. 3ed. ver. amp. São Paulo: ABM, 1996.