

Tema: Produtos Metálicos não-ferrosos

AVALIAÇÃO DO EFEITO DO TRABALHO A FRIO SOBRE A LIGA Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si MODIFICADA COM OS SOLUTOS Ti e Ni RELATIVO ÀS PROPRIEDADES ELETROMECAÑICAS*

*Everaldo Afonso Fernandes¹
Whellisson da Silva Dias²
Jessiana Avelar de Lima²
Isabella Cristina da Silva Jorge³
José Maria do Vale Quaresma⁴*

Resumo

O presente trabalho foi realizado com a finalidade de estudar o efeito dos elementos titânio (teor de 0,05%) e de níquel (teor de 0,03%) na liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si para fins de transmissão e distribuição de energia elétrica. Dessa forma, foi adotada uma sequência operacional a fim de caracterizar as estruturas apresentadas pelas ligas. Os processos de solidificação foram realizados via coquilha de aço (forma de “U”). Depois de solidificadas as ligas, os lingotes passaram pelos processos mecânicos de usinagem e laminação para obtenção de corpos de prova com quatro distintos diâmetros (2,7; 3,0; 3,8; 4,0) mm a fim de aproximar estes das bitolas utilizadas em indústrias de cabos elétricos. Todas as ligas foram caracterizadas macroestruturalmente analisando as estruturas brutas de fusão, eletromecanicamente por meio do ensaio de tração [σ] e condutividade elétrica [%IACS]. Posteriormente, para a melhor compreensão dos resultados foram avaliados os valores de alongamento [% δ] indicando que o diâmetro 3,00mm é a modificação com 0,05%Ti foram os de melhor resultados apresentados.

Palavras-chave: Titânio; Níquel; Propriedades eletromecânicas; Encruamento.

EVALUATION OF THE EFFECT OF COLD WORK ON Al-Cu-05% [0.24-0.28] %- Fe-0,7%Si MODIFIED SOLUTES TI AND NI ON THE PROPERTIES ELECTROMECHANICAL

Abstract

The present work was conducted to study the effect of titanium elements (content of 0.05%) and nickel (content of 0.03%) in the alloy Al-0, 05%Cu-[0, 24 to 0, and 28] %Fe-0, 7%Si for transmission and distribution of electricity. Thus, an operational sequence was adopted to characterize the structures provided by the leagues. Solidification processes were carried out via steel chill (“U”). After solidified alloys, ingots passed by mechanical machining and lamination for obtaining specimens with four different diameters (2.7, 3.0, 3.8, and 4.0) mm in order to bring them from the gauges used in electrical cable industries. All alloys were characterized macroestruturalmente analyzing gross fusion constructs, electromechanically through the tensile test [σ] and electrical conductivity [%IACS]. Subsequently, to better understand the results the values of elongation [% δ] were evaluated indicating that the diameter of 3.00 mm is the modification with 0.05%Ti were the best reported results.

Keywords: Titanium; Nickel; Electromechanical properties; Hardening.

- ¹ *Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia Mecânica, UFPA, Belém, PA, Brasil.*
- ² *Engenheiro (a) de Produção, Mestrando (a) em Engenharia Mecânica, UFPA, Belém, PA, Brasil.*
- ³ *Engenheira de Produção, Mestre em Engenharia Mecânica, UFPA, Belém, PA, Brasil.*
- ⁴ *Engenheiro Mecânico, Dr. em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.*

* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*



1 INTRODUÇÃO

Os recentes investimentos no setor de energia elétrica, como os R\$ 126,3 bilhões de reais aplicados na segunda fase do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC2), o que abrange as áreas de geração e transmissão – permitindo assim ampliar a capacidade do parque gerador brasileiro em 8.457 megawatts [1] – ainda não é o suficiente para suprir a necessidade da nação, visto que ainda estamos aquém do cenário ideal a fim de atender a demanda de energia elétrica do nosso país, para a qual tem se observado um crescente aumento no consumo doméstico e industrial. Como reflexos desta deficiência, em 2012 houve dois grandes apagões que atingiram principalmente a região nordeste nos dias 22 de setembro e 25 de outubro e um em 2013, que foram ocasionados por problemas de interligações entre as regiões do Sudeste/Norte e Sudeste/Nordeste. Para tentar minimizar alguns desses problemas, tem-se estudado o melhoramento de linhas de transmissão de energia, tais como ligas que resistam mais às altas temperaturas sem perderem as propriedades mecânicas e elétricas, que são tão fundamentais à boa transmissão e distribuição de energia elétrica [2].

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 [3].

Dentro desta realidade, o presente trabalho propõe-se a caracterizar eletromecanicamente a liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si modificada com os teores de 0,05%Ti e 0,03%Ni, objetivando relacioná-lo com o refino de grão e o trabalho a frio.

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 0,05%Ti e 0,03%Ni, na busca da proporção adequada para obtenção da composição química ideal para a liga.

Logo após o desmolde, os perfis obtidos foram usinados para o diâmetro 18,5 mm, sendo posteriormente submetidos ao processo de deformação por laminação a frio que gerou os corpos de provas em forma de fios, nas dimensões de 4,0; 3,8; 3,0 e 2,7 mm, dimensões estas que se aproximam das bitolas comerciais produzidas pelas indústrias de fios e cabos para transmissão e distribuição de energia elétrica. Na sequência os perfis foram caracterizados elétrica e mecanicamente como mostra o esquema abaixo

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

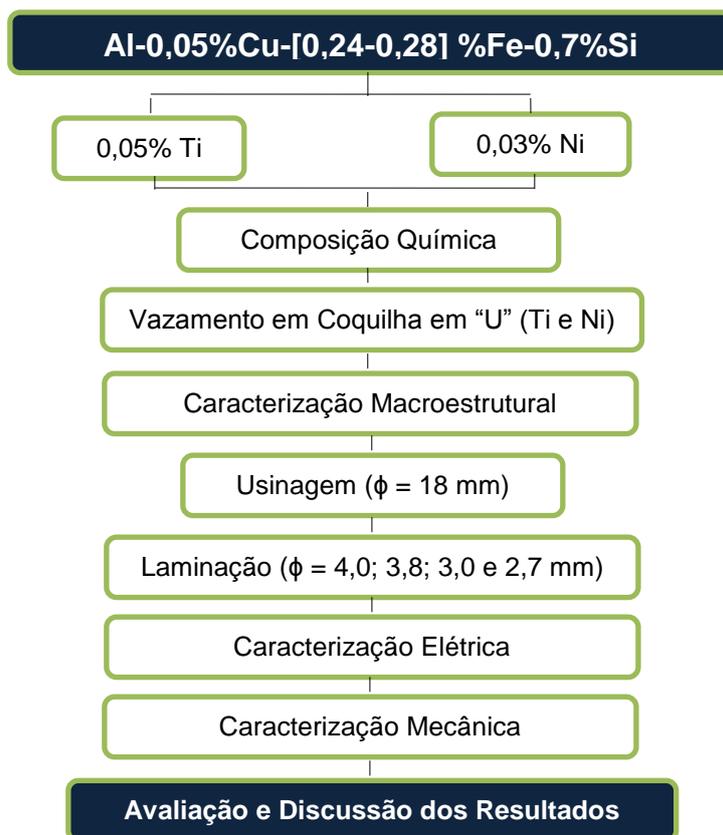


Figura 1. Fluxograma detalhando as operações metalúrgicas e de caracterização para a liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si modificada com Ti e Ni.

Para a preparação das ligas foram utilizadas barras de Al-EC, pedras de silício metálico, barras de liga mãe Al-10%Ti e ligas puras de níquel, 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 de emissão ótica, marca Brucker, modelo Q4 Tasman. Todo o alumínio utilizado para a obtenção das ligas foi cedido pela empresa parceira no desenvolvimento dos estudos em questão.

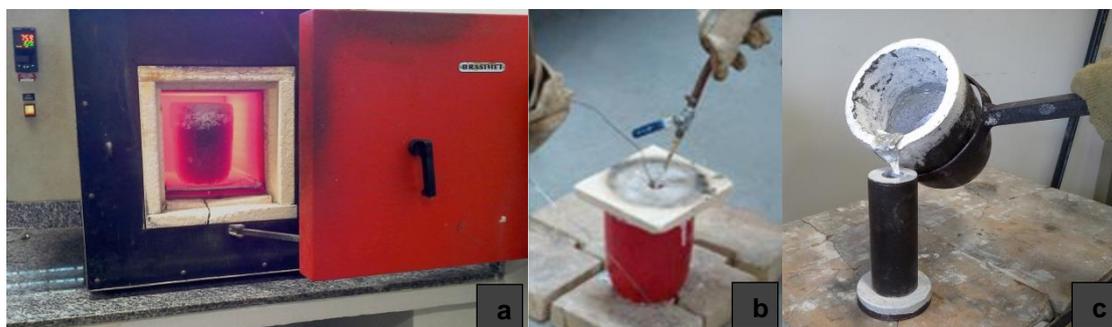


Figura 2. Esquema de preparação e obtenção das ligas fundidas

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

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

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

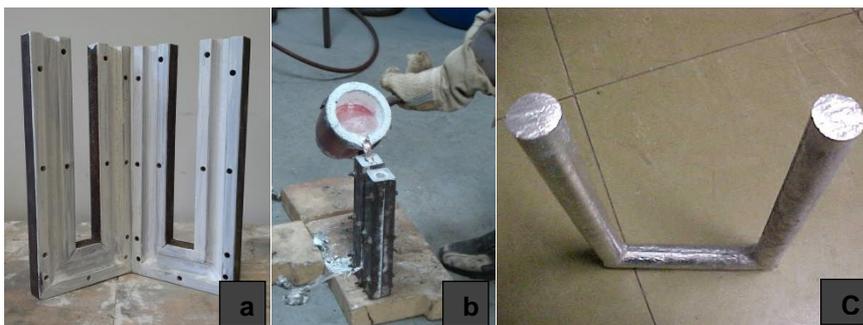


Figura 3. Lingoteira em forma de “U”: (a) desmontada, (b) no momento do vazamento e (c) lingote fundido.

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 18 mm 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.

2.1 Caracterização Macroestrutural

Utilizaram-se reagentes para revelação das macroestruturas de solidificação. Para a revelação das macrografias utilizou-se os reagentes de Poulton (2 ml HF, 3 ml HCl, 20 ml HNO₃, 175 ml H₂O) (SOUZA, P. H. L, 2013) [4]. O objetivo dos ataques químicos foi o de revelar os contornos de grãos, para observação qualitativa da variação dos tamanhos dos grãos ao longo do comprimento dos lingotes.

2.2 Trabalhabilidade das Ligas

Antes dos resultados serem mostrados e discutidos, deve-se considerar o trabalho de conformação mecânica, ao quais as ligas desenvolvidas neste trabalho foram submetidas. Considerando que as amostras são usinadas para o diâmetro de 18 mm então laminadas para uma sequência de diâmetros, tais como $\Phi = [4,0; 3,8; 3,0 \text{ e } 2,7]$ mm, vale ressaltar que para cada diâmetro foram obtidos três corpos de prova, onde todos foram submetidos aos canais de laminação sofrendo graus de encruamento idênticos, assim obtendo-se a média para se construir os gráficos da Figura 4, possibilitando-se observar assim, passe a passe, como o material foi deformado na matriz de conformação a frio [5].

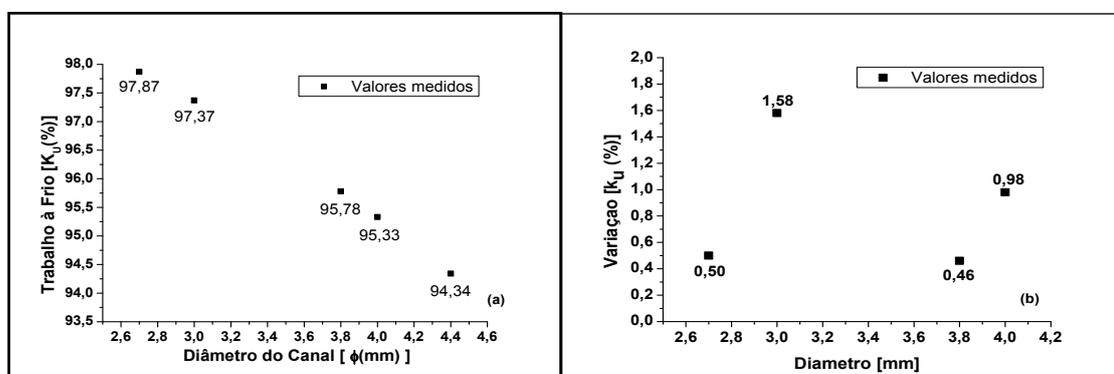


Figura 4 – (a) Trabalho a frio previsto; (b) Variação do trabalho a frio previsto, em função dos diâmetros dos canais de laminação, diâmetro inicial igual a 18 mm.

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

2.3 Caracterização Elétrica das Ligas

Nesta etapa, os corpos de provas foram submetidos aos ensaios com objetivo de avaliar-se a resistência elétrica dos mesmos, com o auxílio de um multiohmímetro MEGABRÁS, modelo MPK-2000. As resistências elétricas dos fios foram medidas a uma temperatura não inferior a 10°C e nem superior a 30°C, corrigida para a temperatura de 20°C conforme a recomendação da norma NBR 6815 [6]. Para cada ponto representado no gráfico da figura 7, foram realizadas três medidas de resistividade de onde posteriormente foram calculados os valores de condutividade elétrica e seus respectivos erros padrões.

2.4 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 [7] e, portanto, executados em três amostras com 20 cm de comprimento total e 15 cm de comprimento útil para cada diâmetro produzido ao longo do trabalho, sempre se utilizando da média para esboço do gráfico de LRT (em MPa) e alongamento ($\delta\%$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Química

Após a fundição das ligas, obtiveram-se os resultados das composições químicas dos materiais produzidos, conforme apresentado na Tabela 1, indicando que foram feitas três comprovações da análise química e suas médias se apresentam na tabela comprovando que 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 química da liga de alumínio modificada com titânio e níquel

Liga	Elementos de Liga (%)				
	Ferro	Cobre	Silício	Titânio	Níquel
Al-Base-0,7%p Si	0,26	0,05	0,70	-----	-----
Al-Base-0,7%p Si-0,050%p Ti	0,25	0,05	0,69	0,05	
Al-Base-0,7%p Si-0,030%p Ni	0,24	0,05	0,70	-----	0,03

3.2 Caracterização Macroestrutural

A Fig. 4 evidencia a evolução das estruturas produzidas para a liga Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si e as modificações com os teores de Ni e Ti para formar as ligas Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si-0,05%Ti e Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si-0,03%Ni. A estrutura das ligas foi revelada por meio de ataque com solução química "Poulton".

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



Figura 5 – Macrografias da liga base e das ligas modificadas com Ti e Ni solidificadas em coquilha em ‘U’.

Para a liga com 0,050%Ti, observa-se que o tamanho e a orientação dos grãos não sofreram grandes modificações em relação à liga base Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si, apesar do Ti ser um potente refinador de grãos [8]. Contrariando também os estudos de Fernandez que mostram a atuação refinadora do Ti em ligas de alumínio [9].

Em relação ao Ni, observa-se que para o teor de 0,03%Ni acrescentado na liga base Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si – considerando o tamanho e a orientação dos grãos – pouco contribui para a transformação de sua configuração. Assim, constata-se que a presença de Ni, no teor utilizado, não apresentou a capacidade de refinar os grãos da estrutura bruta de fusão da liga base, a presença de Ni sugere uma capacidade de eliminação da região de grãos equiaxiais centrais, tornando a estrutura bruta de fusão da liga, com Ni, eminentemente composta de grãos colunares grossos bem definidos.

3.3 Trabalhabilidade das Ligas

Os resultados mostrados na Tabela 2 são característicos da matriz de laminação utilizada no GPEMAT/FEM. Assim, fica evidenciado o grau de trabalho a frio [ku (%)], ao quais os perfis foram submetidos. Considera-se que as amostras são usinadas para o diâmetro de 18 mm e então laminadas para uma sequência de diâmetros de interesse comercial, tais como $\Phi = [4,0; 3,8; 3,0 \text{ e } 2,7]$ mm. Os gráficos da Figura 6 apresentam, passe a passe, como o material foi deformado para posteriormente serem avaliadas suas propriedades elétricas e mecânicas.

Na Figura 6(a), tem-se o encruamento que aumenta gradativamente, e a Figura 6(b) mostra que, entre um passe e outro, e com a diminuição do canal de laminação, o encruamento ou trabalho a frio aplicado vai sendo acumulado.

Tabela 2 – Diâmetros do canal de laminação, acúmulo de trabalho a frio [ku (%)] e variação de trabalho a frio [ku (%)].

Diâmetro (mm)	Trabalho a frio [ku (%)]	Varição [ku (%)]
4,4	94,34	-----
4,0	95,33	0,98
3,8	95,78	0,46
3,0	97,37	1,58
2,7	97,87	0,50

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

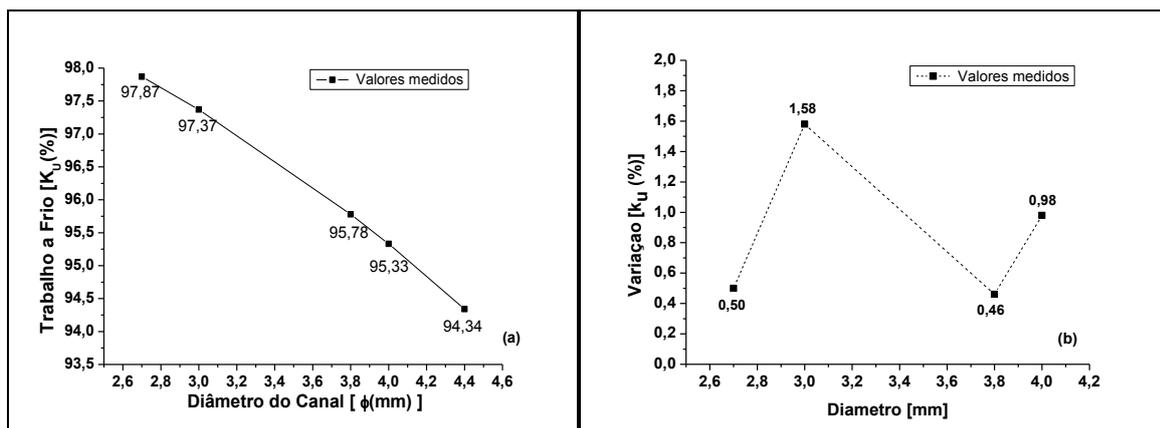


Figura 6 – Trabalho a frio e variação de deformação.

3.4 Caracterização Elétrica

Os valores que caracterizam as ligas quanto às propriedades elétricas, encontram-se listados na tabela 3 e plotados na figura 7. Estes resultados sugerem que a adição dos teores de 0,05%Ti e 0,03%Ni não atuou de forma acentuada para a condutividade elétrica (%IACS), com surpreendente desempenho para o Ti. Em relação ao Ni, este comportamento diverge ao proposto por Horikoshi et al. [10].

Tabela 3 – Correlação das ligas Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si, Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si-0,05%Ti e Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si-0,03%Ni com suas respectivas condutividades elétricas e seus erros padrões.

Diâmetro (mm)	0,7%Si (%IACS)	0,05%Ti (%IACS)	0,03%Ni (%IACS)
2,7	55 ± 0,3	52 ± 0,2	51 ± 0,5
3,0	61 ± 0,1	58 ± 0,1	57 ± 0,3
3,8	53 ± 0,2	51 ± 0,4	50 ± 0,6
4,0	54 ± 0,4	53 ± 0,5	52 ± 0,4

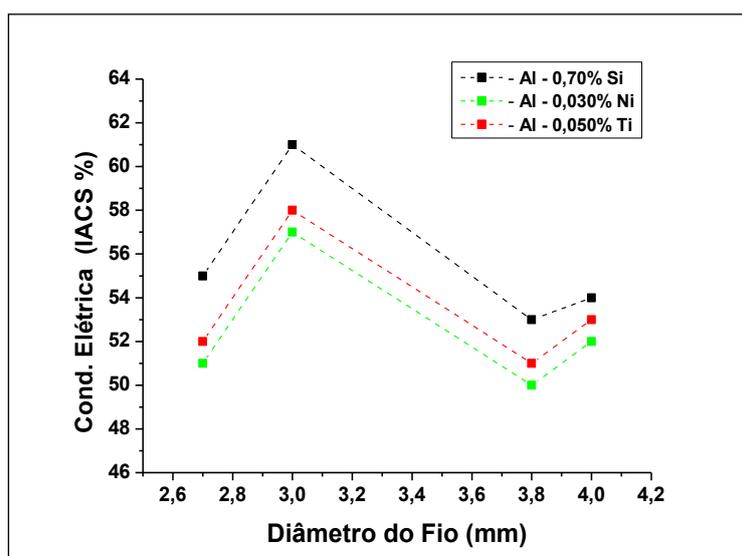


Figura 7 – Condutividade elétrica das ligas.

3.5 Caracterização Mecânica

3.5.1 Avaliação do limite de resistência à tração

Os valores de resistência mecânica da liga base Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si com 0,03%Ni e 0,05%Ti, estão apresentados na Tab. 04. Observa-se que as ligas apresentaram do ponto de vista do desempenho mecânico, comportamento muito semelhante, que pode estar associado ao grau de trabalho a frio idêntico impostos aos três perfis, com discreto melhor desempenho para a liga com 0,05%Ti, como pode ser visto na Fig. 8, onde há elevação do LRT. Este comportamento pode estar associado à possibilidade do Ni e Ti contribuírem na formação de partículas de segunda fase capazes de dificultarem o caminhar de discordâncias, pelo ancoramento das mesmas, quando as ligas são deformadas para a obtenção dos fios com os diferentes diâmetros. E ainda, este discreto melhor comportamento com relação ao Ti pode estar associado a sua elevada taxa de coerência com a matriz de alumínio, como sugerido por Mohanty e Gruzleski [11].

Tabela 4 – Correlação das ligas Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si, Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si-0,05%Ti e Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si-0,03%Ni com seus respectivos limite de resistência à tração (LRT) e seus erros padrões.

Diâmetro (mm)	0,07%Si LRT	0,05%Ti LRT	0,03%Ni LRT
2,7	226 ± 0,3	236 ± 0,1	233 ± 0,2
3,0	241 ± 0,4	251 ± 0,1	248 ± 0,1
3,8	201 ± 0,2	210 ± 0,3	207 ± 0,4
4,0	204 ± 0,1	215 ± 0,2	212 ± 0,2

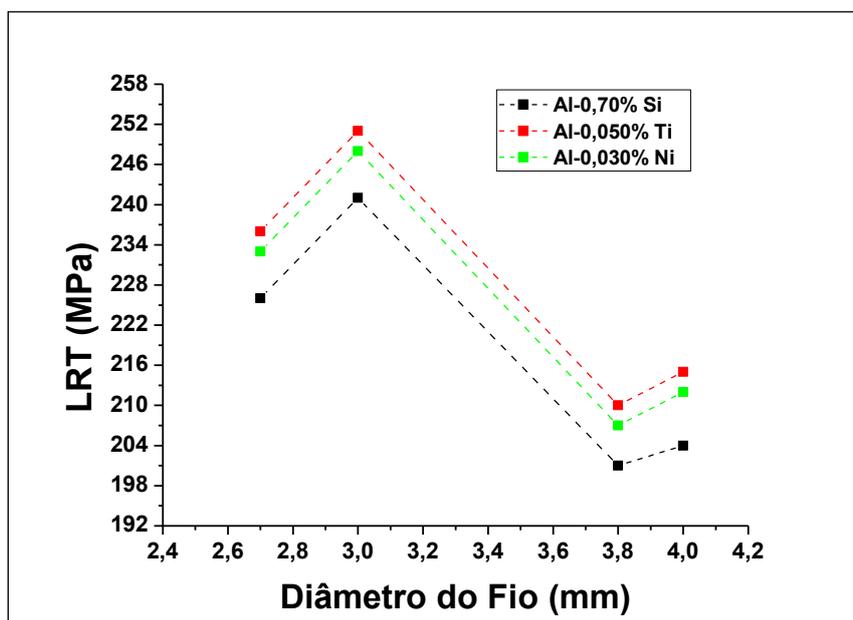


Figura 8 – Resistência mecânica da liga base com adição de Ti e Ni em lingoteira em “U”

As ligas analisadas individualmente nos gráficos das Figuras 7 e 8 apresentaram para o diâmetro de 3,0 mm melhores resultados. Isto pode ter ocorrido devido ao maior grau de deformação acumulada como indicado na Figura 6(b) e que, naturalmente, pode estar vinculado a menores índices de recuperação dinâmica, sofrido pelos fios.

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

3.5.2 Avaliação do alongamento ($\delta\%$)

Os valores dos alongamentos registrados para as ligas Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si e as modificadas com os teores de 0,03%Ni e de 0,05%Ti, estão apresentados na tabela 05 e mensurados graficamente na figura 9.

Tabela 5 – Correlação das ligas Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si, Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si-0,05%Ti e Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si-0,03%Ni com seus respectivos alongamentos e seus erros padrões.

Diâmetro (mm)	0,7%Si $\delta(\%)$	0,05%Ti $\delta(\%)$	0,03%Ni $\delta(\%)$
2,7	4,7 \pm 0,1	4,6 \pm 0,3	4,5 \pm 0,7
3,0	4,4 \pm 0,3	5,2 \pm 0,5	4,2 \pm 0,5
3,8	6,4 \pm 0,1	4,6 \pm 0,2	5,7 \pm 0,1
4,0	5,6 \pm 0,4	5,4 \pm 0,6	5,2 \pm 0,2

Observa-se que as ligas apresentaram, do ponto de vista da ductilidade, desempenho parcialmente semelhante ao obtidos para o comportamento mecânico. Em vista de ter-se grau de trabalho a frio idêntico impostos aos três perfis, infere-se como possível causa para o comportamento divergente apresentado pela liga modificada com 0,05%Ti é o elevado grau de coerência que o Ti apresenta com a matriz de Al, como mencionado anteriormente.

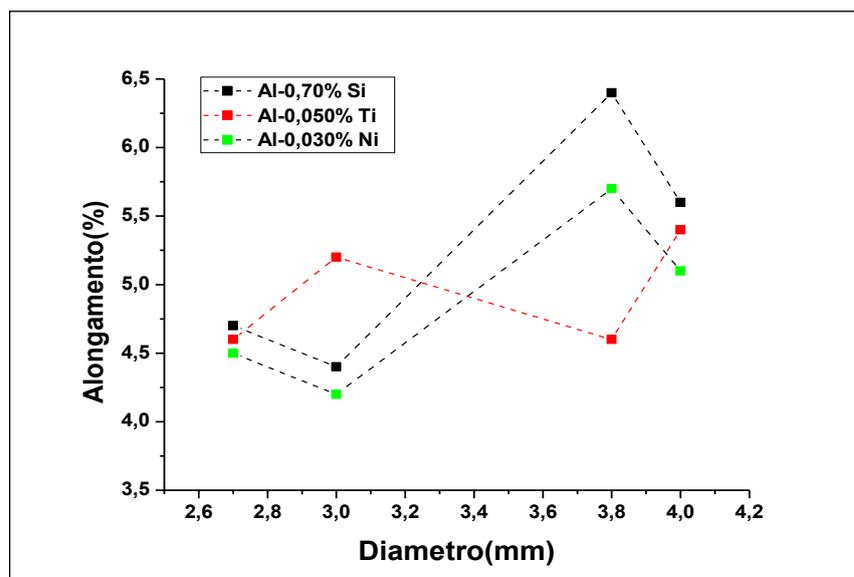


Figura 9 – Alongamento das ligas.

5 CONCLUSÕES

Os valores obtidos para os vários agentes estudados e os objetivos proposto neste trabalho permitem que se apresente como conclusões o seguinte:

Quanto à caracterização eletromecânica os valores de alongamento/ductilidade mostra que as ligas modificadas reagiram como esperado, isto é: maiores limites de resistência à tração (LRT) estão associados a maiores intensidades de trabalho a frio/encruamento com bons reflexos na caracterização elétrica, particularmente no que diz respeito ao titânio quando comparado com o níquel. No que se refere à caracterização macroestrutural observou-se que para os teores propostos de Ti e Ni, tais elementos de liga não agiram como potentes refinadores de grão. Em relação ao trabalho a frio nos perfis analisados, o diâmetro de 3,00 mm apresentou os

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



resultados mais satisfatórios, tanto para deformabilidade, LRT, condutividade elétrica e alongamento, o que faz desse perfil o elemento de destaque deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Ministério de Minas e Energia (MME). Disponível em: <http://www.http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html>. Acesso em: 02 out. 2013.
- 2 Ambrosi I, Gonzatto V. Situação Energética no Brasil e Alternativas Frente à Falta de Investimentos no Setor, Teor. Evid. Econ., Passo Fundo, 1993; 1(1): 143-164.
- 3 Liu S-D, Zhang Y, Liu W-J, Deng Y-L, Zhang X-M. Effect of step-quenching on microstructure of aluminum alloy 7055, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2010; 20: 1-6.
- 4 Souza P.H.L. Análise da influência de teores de MG e Ni sobre as propriedades térmicas, mecânicas e elétricas de uma liga Al-Cu-Fe para transmissão e distribuição de energia elétrica. Belém: 2013.112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.
- 5 Fernandes E. A. Avaliação do Trabalho a Frio Sobre a Liga Base Al-0,05%Cu-[0,24-0,28] %Fe-0,7%Si Modificada Com os Teores de 0,05%Ti e 0,03% Ni Relativo ao Refino de grão e às Propriedades Eletromecânicas. Belém: 2013.68f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.
- 6 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6815). Fios e cabos elétricos – Ensaio de determinação da resistividade em componentes metálicos. Rio de Janeiro, ago. 1981.
- 7 ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas – “Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos”, Rio de Janeiro, Ago. 1981, NBR 6810.
- 8 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.
- 9 Fernandez H.J.L. 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: 2011.115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.
- 10 Horikoshi T, Kuroda H, Shimizu M, Aoyama S. Development of aluminum alloy conductor with high electrical conductivity and controlled tensile strength and elongation. Hitachi Cable Review N° 25 August, Japan, 2006.
- 11 Mohanty PS, Gruzleski EJE. Mechanism of Grain Refinement in Aluminium, Acta metall. mater., Elsevier Science Ltd, 1995; 43(5): 2001-2012.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.