

ESTUDO DO COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO SOBRE O COMPORTAMENTO TERMOMECAÂNICO DA LIGA AL-CU-FE MODIFICADA COM ZIRCÔNIO SOLIDIFICADA EM MOLDE UNIDIRECIONAL HORIZONTAL

Anna Márcia Rocha Rodrigues, annamarcia-rocha@hotmail.com¹

Washington Cordovil Rocha, inabra@gmail.com¹

Carlos Alberto Oliveira da Silva, carlos_amazon@hotmail.com²

Everaldo Afonso Fernandes, everaldo.fernandes@ifpa.edu.br²

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

¹Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, Nº 01, Guamá, Belém – Pará – Brasil, CEP: 66075-110,

²Instituto Federal do Pará - IFPA, Folha 22, Quadra Especial, Lote Especial II, Bairro Nova Marabá, Marabá – Pará – Brasil, CEP: 66508-970,

Resumo: As mudanças implementadas no setor elétrico, ao longo da última década, trouxeram importantes alterações institucionais, orientadas por perspectiva de auto regulação pelo mercado, que acabou por se mostrar frágil e ineficiente, como ficou exposto no racionamento de energia elétrica ocorrido entre 2001 e 2002. Desde então, tornou-se evidente e inadiável a necessidade de um novo ordenamento setorial para fazer frente aos entraves e inadequações que colocavam em risco o suprimento às demandas presentes e as expansões para garantir atendimento às projeções futuras. Para isso o melhoramento da resistência mecânica dessas linhas de transmissão é fundamental para garantir que a energia gerada consiga alcançar as industriais e residências com qualidade. Neste cenário o estudo tem o objetivo de pesquisar a influência do elemento químico zircônio [Zr] no teor de 0,22% no comportamento do coeficiente de encruamento (n). Para a realização de tal pesquisa, a liga foi obtida por fundição unidirecional horizontal, a partir da liga base Al-0,05%Cu-[0,35 a 0,45]%Fe. A liga assim obtida teve suas propriedades mecânicas estudadas com o objetivo de definição do diâmetro com melhor desempenho mecânico [LRT]. A correlação entre o desempenho mecânico [LRT], o coeficiente de encruamento [n] definiu o diâmetro de 3,00mm. Sendo então as amostras com este diâmetro submetidas a dois [02] métodos de avaliação da termorresistividade, Protocolo COPEL e o segundo a Norma ASTM B 941-10.

Palavras-chave: Ligas de Al-Zr, Caracterização Mecânica, Termorresistividade, Coeficiente de Encruamento.

1. INTRODUÇÃO

O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica no Brasil, é constituído, pela interligação das grandes geradoras, para conectá-las aos grandes centros consumidores, através de linhas de transmissão. O sistema brasileiro de transmissão, e hidrotérmico, e predomina as grandes usinas hidroelétricas, e interligam as cinco regiões do Brasil. O sistema é denominado de “Sistema Integrado Nacional-SIN” com mais de 124 mil km de linhas de transmissão.

A maior parte da potência gerada é proveniente das hidrelétricas, que por sua vez dependem inquestionavelmente das chuvas nas bacias hidrográficas, que estão submetidas as condições climáticas de cada região geográfica do Brasil, o “Sistema Integrado” funciona, como se fosse um “Sistema de Reservatórios Interligados”, ou seja comunicantes. Com a interligação elétrica, o sistema tornou-se mais eficiente no abastecimento nacional de energia elétrica, evitando-se racionamentos e apagões. No Brasil torna-se um desafio transportar energia elétrica entre as regiões, devido a suas dimensões e grandes distância entre os grandes centros de consumo e os polos de produção deste insumo.

Dentro desse contexto o Grupo de Pesquisa em Engenharia dos Materiais (GPEMat) têm estudado o melhoramento das ligas utilizadas para produção de cabos para transmissão e distribuição de energia elétrica. Estudos mostram que propriedades da peça, são influenciadas pelo tipo de processo empregado em sua solidificação, constatando-se que as propriedades mecânicas não dependem somente do tipo intermetálico presente, mas também de parâmetros macro e microestruturais, distribuição e composição química das fases, tamanho de grão, segregação e porosidade. Aplicações que

tem chamado a atenção é o desenvolvimento de materiais termorresistentes, podendo estes suportar a exposição a temperaturas 50% maiores do que a ligas Al-EC sem perda significativa de suas propriedades. Estudiosos da área de materiais têm utilizado o Al ligado a teores de elementos de transição, como os do grupo 4 (Zr, Ti, Hf), Knipling et al., (2007), Sc, Zhou et al., (2012). A pesquisa destes tipos de materiais objetiva o aumento de resistência do material pela formação de trialuminetos (Al_3Zr , Al_3Ti , Al_3Hf), os quais se formam após a combinação de tratamentos térmicos, Fuller et al., (2003).

Neste panorama, o presente trabalho propõe estudar o comportamento do coeficiente de encruamento (n) para a liga 0,05% Cu, [0,35 – 0,45]% Fe modificada com 0,22% Zr sem e com teste de termorresistividade.

2. METODOLOGIA

A liga foi obtida por fundição direta no laboratório de metalografia e tratamento térmico da GPemat/FEM/ITEC/UFPa, a partir do alumínio eletro condutor (Al - EC). O balanceamento da composição química foi realizada pelo ajuste dos teores dos elementos até se alcançar 0,05% Cu, (0,35 – 0,45)% Fe-0,22% Zr, sendo todos os percentuais em peso. A aferição da composição química foi realizada através de ensaios após a obtenção da liga com o auxílio de espectrometria ótica.

Para o processo de fabricação das ligas, a fundição se iniciou pelo corte e pesagem dos lingotes de alumínio e demais elementos constituintes. As massas balanceadas dos diversos materiais foram introduzidas em cadinho de carvão de silício com volume de 3,5 l, pintado internamente com solução de caulim para evitar aderência de material, o cadinho foi pré-aquecido à 130 °C por 25 minutos.

Após a obtenção da liga base [Al – 0,05% Cu – 0,4% Fe] foi realizada a adição de 0,22% Zr em cadinho, num sistema operacional para solidificação da liga em molde unidirecional horizontal. Os lingotes foram desmoldados, usinados, laminados e feitos os ensaios de tração, segundo a norma NBR 6810, já os testes de termorresistividade seguiram as orientações do Protocolo COPEL e da norma ASTM B941, que propõe como termorresistente as ligas de Al – Zr que não apresentem perdas superior a 10% de seu limite de resistência a tração (LRT) quando submetido à temperatura de e 230°C e 280°C por uma hora, respectivamente, e resfriado à temperatura ambiente. O cálculo do coeficiente de encruamento a partir dos ensaios de tração utilizou o método de Hollomon.

A Figura 1 mostrada o esquemático das operações realizadas para a obtenção dos resultados apresentados neste trabalho.

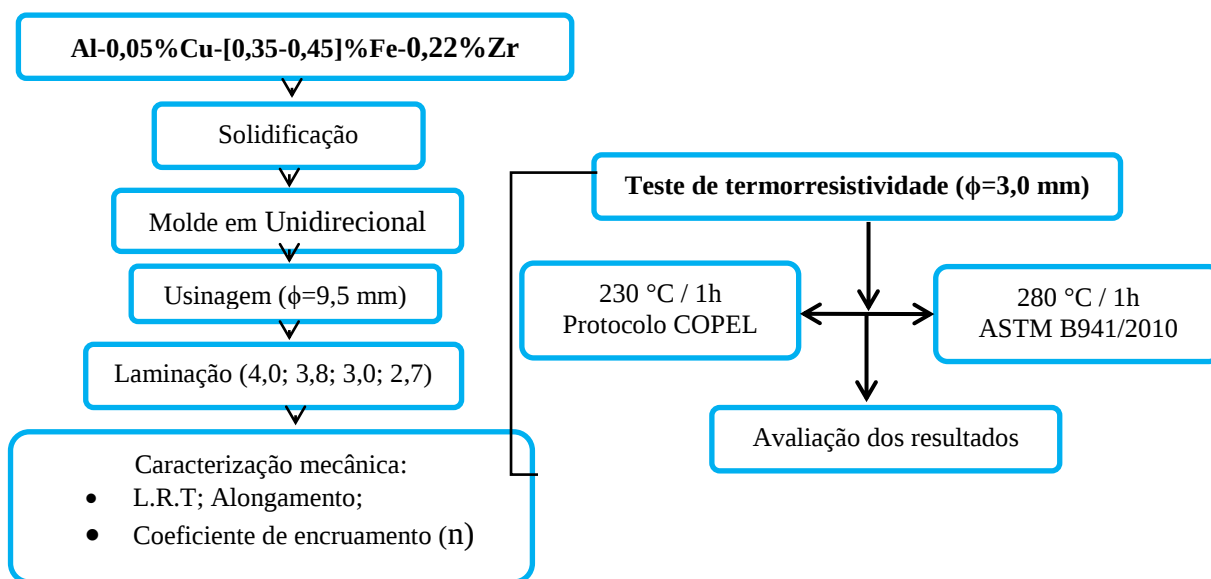


Figura 1 – Detalhamento dos procedimentos experimentais desenvolvidos no trabalho.

3. RESULTADOS E DISCURSÕES

3.1. Resultados da composição química

A Tabela 1 apresenta os resultados das composições químicas, os dados indicam que todos os procedimentos de cálculo estequiométrico foram realizados de forma correta, dada a comprovação por análise em espectrômetro óptico, as análises obtidas estão de acordo com o escopo deste trabalho.

Tabela 1 – Composição da liga modificada com Zircônio

Ligas	Elementos de Liga (%p)		
	Ferro	Cobre	Zircônio
Al - EC	0,125	0,0024	<0,00020
Al-0,05%Cu-[0,35-0,45%Fe-0,22%Zr	0,398	0,048	0,218

3.2. Análise do LRT e coeficiente de encruamento para os diâmetros [2,7;3,0;3,8 e 4,0]mm em função das posições [7,5;22,5;37,5 e 52,5]mm.

A Tabela 2 mostra os resultados de limite de resistência a tração (LRT) e coeficiente de encruamento (η) para todos diâmetros avaliados.

Tabela 2 - Comparação entre os valores de LRT e do Coeficiente de Encruamento da liga Al-Cu-Fe-0,22%Zr para os diâmetros $\varnothing = 4,0$ mm; $\varnothing = 3,8$ mm; $\varnothing = 3,0$ mm e $\varnothing = 2,7$ mm em função da posição.

Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,22%Zr - STT				
Posição [mm]	L.R.T [σ (MPa)] Diâmetro 2,7mm	η Diâmetro 2,7mm	L.R.T [σ (MPa)] Diâmetro 3,0mm	η Diâmetro 3,0mm
7,5	161,35	0,38	173,56	0,15
22,5	159,29	0,45	170,95	0,19
37,5	157,75	0,54	170,65	0,23
52,5	157,24	0,63	169,82	0,32
Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,22%Zr - STT				
Posição [mm]	L.R.T [σ (MPa)] Diâmetro 3,8mm	η Diâmetro 3,8mm	L.R.T [σ (MPa)] Diâmetro 4,0mm	η Diâmetro 4,0mm
7,5	136,26	0,6	142,81	0,48
22,5	136,19	0,68	141,41	0,65
37,5	133,34	0,76	139,82	0,69
52,5	132,51	0,83	135,15	0,72

A Figura 2 mostra os valores de limite de resistência a tração (LRT) e coeficiente de encruamento [η] para a liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,22%Zr. A configuração gráfica mostra que os maiores valores de LRT, Figura 2a, estão relacionados a menores valores de [η], como mostrado na Figuras 2b.

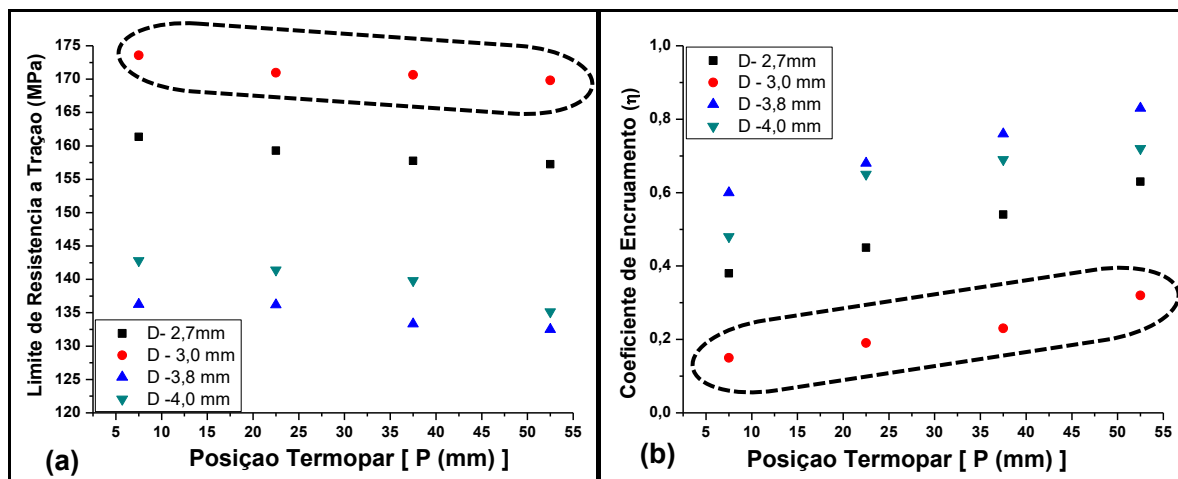


Figura 2 – Correlação do LRT (a), Coeficiente de encruamento [η] em função das posições [7,5;22,5;37,5 e 52,5]mm para todos os diâmetros [2,7;3,0;3,8 e 4,0]mm.

Para análise do conjunto de gráficos mostrados na Figura 2, o diâmetro de 3,00mm apresentou melhor resultado no limite de resistência tração, com valores de coeficiente de encruamento baixo, de acordo com Hollomon, (1948), para cada resposta de LRT há uma resposta diferente para o coeficiente de encruamento (η).

Em ligas deformadas de alumínio perfis decrescentes de LRT estão associados a comportamento crescentes de Coeficiente de Encruamento. Segundo Cardoso 2013 e Tertuliano 2013 o comportamento do Coeficiente de Encruamento é o oposto Limite de Resistência a Tração. Figuras 2(a) e 2(b).

3.3. Análise do LRT, coeficiente de encruamento e alongamento para o diâmetro de 3,0mm em função das posições [7,5;22,5;37,5 e 52,5]mm.

A Tabela 3 mostra que ocorre diminuição do limite de resistência a tração a medida que há variações das posições, esse perfil se mostra tanto para os fios com e sem teste de termorresistividade. A referida tabela ainda mostras os valores de perda de LRT em porcentagem submetidos aos testes de termorresistência.

Tabela 3 – Valores de LRT STT, com CTT de 230°C/1h e 280°C/1h e suas perdas para as amostras submetidas a teste de termorresistividade da liga Al-Cu-Fe-0,22%Zr pelas posições para o diâmetro de 3,0mm.

Posições (mm)	LRT (MPa)			Perdas (%)	
	STT	CTT 230°C/1h	CTT 280°C/1h	CTT 230°C/1h	CTT 280°C/1h
7,5mm	173,56	172,73	171,48	0,5	1,2
22,5mm	170,95	170,35	168,57	0,4	1,4
37,5mm	170,65	169,41	164,32	0,7	3,7
52,5mm	169,82	166,49	162,74	2	4,2

Na Tabela 4 estão listados os valores de Coeficiente de Encruamento (η) e alongamentos, submetidos aos testes de termorresistividade segundo o Protocolo COPEL (230°C/1h) e a Norma ASTM B941-10 (280°C/1h).

Tabela 4 – Valores de Coeficiente de Encruamento e alongamento STT, com CTT de 230°C/1h e 280°C/1h da liga Al-Cu-Fe-0,22%Zr pelas posições para o diâmetro de 3,0mm.

Posições (mm)	Coeficiente de Encruamento (η)			Alongamento (%)		
	STT	CTT 230°C/1h	CTT 280°C/1h	STT	CTT 230°C/1h	CTT 280°C/1h
7,5mm	0,15	0,28	0,53	2,78	3,11	3,28
22,5mm	0,19	0,37	0,62	2,91	3,23	3,39
37,5mm	0,23	0,43	0,68	3,28	3,67	3,75
52,5mm	0,32	0,57	0,76	3,68	3,84	3,96

O arranjo dos gráficos da Figura 3 evidencia a variação nos valores de LRT, Coeficiente de Encruamento e alongamento da liga Al-Cu-Fe-0,22%Zr no diâmetro de 3,0, tais mudanças são percebidas nas amostras sem teste de termorresistividade e com os testes de 230°C/1h e 280°C/1h.

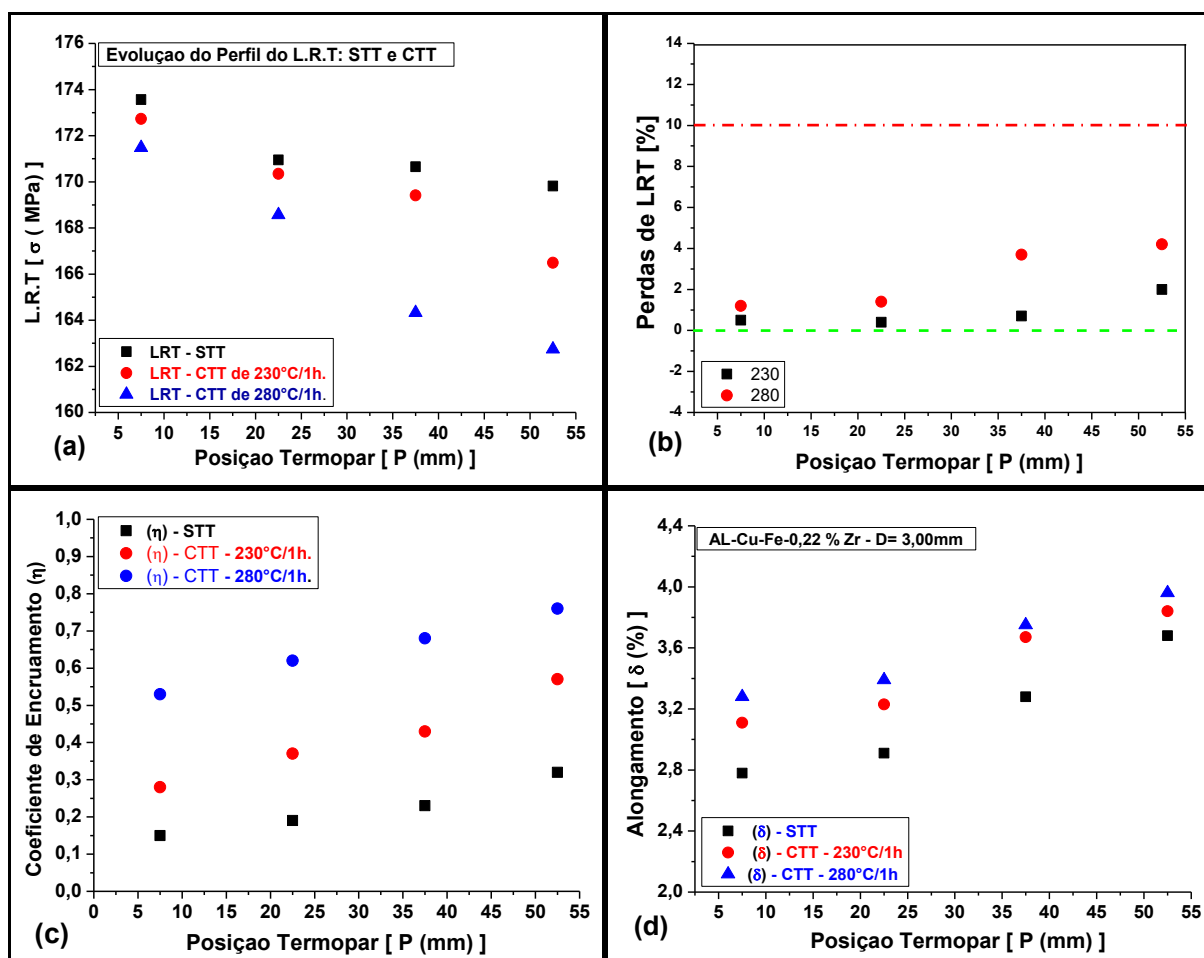


Figura 3 – Avaliação do LRT (a) e suas perdas (b), Coeficiente de encruamento [η] (c) e alongamento [%] (d) para o diâmetro 3,0mm em função das posições [7,5;22,5;37,5 e 52,5]mm.

Os resultados mostram que a liga pode ser enquadrada como termorresistente, já que suas perdas não ultrapassaram os 10% do seu limite de resistência a tração (LRT), tanto quando submetido a 230°/1h e a 280°/1h. O comportamento do Coeficiente de Encruamento é oposto ao LRT, para maiores valores de limite de resistência a tração, posição 7,5mm mostrado na Figura 3a, tem-se os menores valores de η , posição 7,5mm mostrado na Figura 3c. Em ligas deformadas de alumínio quanto maior o comportamento do coeficiente de encruamento (η), menor será seu limite de resistência a tração (LRT), Cardoso 2013.

4. CONCLUSÕES

Nos estudos envolvendo limite de resistência a tração (LRT), coeficiente de encruamento, alongamento realizado para liga Al-0,05%Cu-0,4%Fe-0,22%Zr, mostrou dependência no comportamento do material onde de acordo com HOLLOMON (1948) para cada resposta do LRT há uma resposta diferente para o (η).

Nos ensaios realizados nos fios de diferentes diâmetros, a amostra de 3,0mm foi a que obteve os melhores resultados, com maiores valores de LRT e menores valores de coeficientes de encruamento (η) e alongamentos na faixa de 3%.

Os estudos também mostraram que, os copos de prova mais próximos da interface metal/molde, apresentaram limite de resistência (LRT) maiores enquanto que o coeficiente de encruamento (η) apresenta os menores valores. Tal comportamento se matem também quando fio de diâmetro de 3,0mm são submetidos aos de termorresistividade de 230°C/1h e 280°C/1h.

A liga estudada obteve características termorresistente, se enquadrando de acordo com a norma tanto na temperatura de 230°C quanto na temperatura de 280°C

5. NOMENCLATURA

Algumas siglas, abreviações, notações e símbolos utilizados estão listados na Tabela 5.

Tabela 5 – Lista de símbolos, siglas e abreviaturas

Abreviações e siglas	
LRT	Limite de resistência à tração
STT	Sem Teste de Termorresistividade
CTT	Com Teste de Termorresistividade
(η)	Coeficiente de encruamento

6. AGRADECIMENTOS

A PROPESP e PROEG da Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia – ITEC, Faculdade de Engenharia Mecânica –FEM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial – PPGEI, CAPES e CNPQ.

7. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. B941: Standard Specification for Heat Resistant Aluminum-Zirconium Alloy Wire for Electrical Purposes. West Conshohocken, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 6810). Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos. Rio de Janeiro, ago. 1981.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA ELÉTRICA – COPEL – Especificação 00000-30009-082. Especificação técnica para cabos de alumínio termorresistente com alma de aço. Rev 01, PR, 2006, 26 p.

FULLER, C. B.; SEIDMAN, D. N.; DUNAND, D. C.; Mechanical properties of Al(Sc,Zr) alloys at ambient and elevated temperatures. Acta Mater 2003; 51: 4803-4814.

KNIPLING, K. E.; DUNAND, D. C.; SEIDMAN, D. N. Nucleation and precipitation strengthening in dilute Al-Ti and Al-Zr alloys. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 38A, n. 10, p. 2552-2563, set. 2007.

YANG, D.; LI, X.; HE, D.; NIE, Z.; HUANG, H., Microstructural and mechanical property characterization of Er modified Al-Mg-Mn alloy Tungsten Inert Gas welds. Materials and Design: 34, (2012). 655-659.

SROUR, E. H. J. Determinação do grau de conformabilidade de chapa de aço para suporte de coluna de direção e identificação de similar nacional. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2002, p. 39-40.

ZHOU, W. W.; CAI, B.; LI, W. J.; LIU, Z. X.; YANG, S. Heat-resistant Al-0.2Sc-0.04Zr electrical conductor. Materials Science and Engineering A, v. 552, n. 353-358, maio. 2012.

CARDOSO, M, F, M. Estudo do Efeito da adição de Magnésio sobre Propriedades Mecânicas, Elétricas e Estruturais de fios para Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica da liga Al-0,05%p Cu-[0,24-0,28]%p Fe.. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

TERTULIANO, A. J. O. Análise da influência de dois teores de níquel sobre as propriedades térmicas, mecânicas, elétricas e estruturais da liga Al-0,05%Cu [0,24-0,28]%Fe-0,7%Si destinada à produção de cabos para Tx e Dx de energia elétrica. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

HARDENING RATE STUDY ON THE BEHAVIOR THERMOMECHANICAL LEAGUE AL-CU-FE MODIFIED WITH ZIRCONIUM SOLIDIFIED IN CAST ONE WAY HORIZONTAL

Anna Márcia Rocha Rodrigues, annamarciarocha@hotmail.com¹

Washington Cordovil Rocha, inabra@gmail.com¹

Carlos Alberto Oliveira da Silva, carlos_amazon@hotmail.com²

Everaldo Afonso Fernandes, everaldo.fernandes@ifpa.edu.br²

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

¹University Federal of Pará, St. Augusto Corrêa, Nº 01, Guamá, Belém – Pará – Brazil, CEP: 66075-110.

²Federal Institute of Pará - IFPA, Sheet 22, Special Court, Lot Special II Quarter New Marabá, Marabá - Pará - Brazil, CEP: 66508-970,

Abstract: The changes implemented in the electricity sector over the last decade brought major institutional changes, guided by the perspective of self-regulation by the market, which turned out to be weak and ineffective, as was stated in electricity rationing occurred between 2001 and 2002. Since then, it has become evident and urgent the need for a new sector planning to face the obstacles and inadequacies that endangered the supply demands gifts and expansions to ensure compliance with future projections. For that improving the mechanical strength of these transmission lines is critical to ensure that the generated energy can achieve industrial and residential quality. In this scenario, the study aims to investigate the influence of zirconium chemical element [Zr] in the 0.22wt% level in the work hardening coefficient behavior (n). To conduct such research, the alloy was obtained by unidirectional casting horizontally from the base alloy Al-0.05wt% Cu [.35-.45]wt% Fe. The alloy thus obtained had mechanical properties studied with the diameter of the definition of the aim of better mechanical performance [LRT]. The correlation between the mechanical performance [LRT], the coefficient of hardening [n] defined a diameter of 3.00 mm. after which the samples with this diameter submitted to two [02] methods of assessment termorresistividade, COPEL Protocol and according to ASTM B 941-10.

Key words: Al-Zr alloys, Mechanical Characterization, Thermoresistivity, Work hardening coefficient.