

OBTENÇÃO DE FIOS EM LIGAS COBRE-MAGNÉSIO PARA UTILIZAÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

M. G. Fernandes⁽¹⁾; C. S. Mucsi⁽¹⁾; G. Siqueira⁽¹⁾; A. F. Padilha⁽²⁾; J. L. Rossi⁽¹⁾
⁽¹⁾ Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN - CNEN/SP
Av. Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária - 05508-000 - São Paulo - SP
⁽²⁾ Escola Politécnica - USP
Av. Prof. Mello Moraes, 2463 - Cidade Universitária - 05508-900 - São Paulo - SP
mgf@usp.br

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi o de obter-se um conjunto de três composições da liga cobre com 0,13%, 0,25% e 0,34% de magnésio em massa, a partir de lingotes e avaliar-se todas as etapas envolvidas na obtenção de fios. Os fios tiveram as suas propriedades mecânicas avaliadas por meio do ensaio de tração e dureza e condutividade elétrica também foi medida e os resultados comparados com dados da literatura. As análises químicas realizadas nos fios indicaram que a rota de preparação mostrou-se adequada aos estudos em escala de laboratório. Os fios obtidos mostraram-se adequados à utilização como condutor de energia elétrica. Os limites de escoamento e de resistência a tração dos fios tiveram seus valores melhorados com o aumento do teor de magnésio na liga, enquanto houve queda nos valores de condutividade elétrica.

Palavras-chave: ligas cobre-magnésio; fios condutores; arco elétrico; propriedades elétricas; propriedades mecânicas.

INTRODUÇÃO

Foi com a introdução da eletricidade no século XIX que trouxe novamente o uso difundido do cobre. O consumo de cobre então cresceu rapidamente, refletindo a taxa de industrialização e eletrificação e, mais recentemente, com o crescimento do sistema global de comunicações, (cabearamento de cobre, dados e telefonia)^(1,2). A resistência mecânica do cobre pode ser aumentada adicionando-se o magnésio, enquanto a condutibilidade é somente ligeiramente reduzida. Adicionando-se o magnésio como elemento de liga na faixa de 0,1 a 0,3% a relação à resistência à tração e a condutibilidade elétrica pode ser ajustada muito precisamente.

Nas ligas diluídas, onde as interações Cu-Cu predominam (principalmente no estado sólido) sobre as interações Cu-Mg e principalmente sobre as interações

Mg-Mg (estatisticamente muito pouco freqüentes). Em ligas diluídas (menos de 1% em massa de soluto), pode-se supor a validade da lei de Henry (vide e.g., R. A. Swalin); i.e. pode ocorrer a variação linear de uma determinada propriedade com a concentração química⁽³⁾. Portanto, para soluções diluídas muitas grandezas físicas como a condutividade elétrica, por exemplo, variam linearmente com a concentração em massa de soluto. A Fig. 1 mostra o diagrama de fases cobre-magnésio onde é possível manter-se a solubilidade sólida do Mg no cobre em até 3,3 % de Mg em massa.

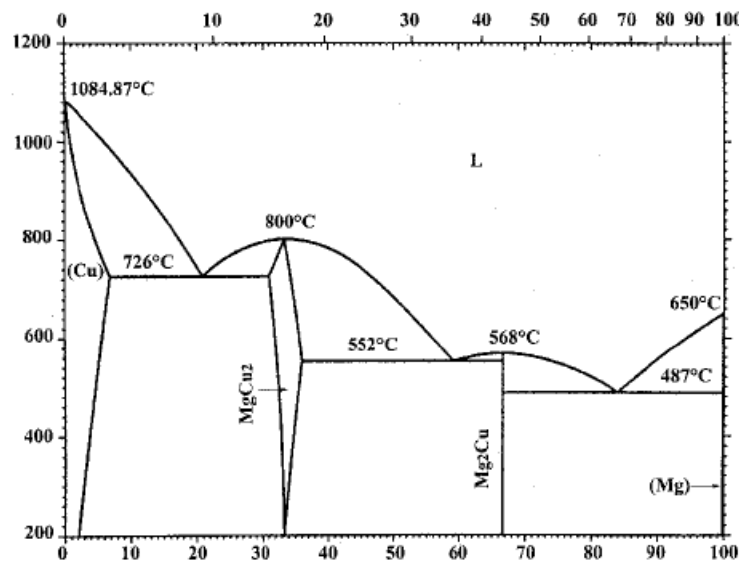


Figura 1. Diagrama de fases cobre-magnésio, indicando uma estreita faixa de solução sólida para limite de solubilidade de 3,3 % massa de Mg para a temperatura de 726 °C e o primeiro ponto eutético a esquerda do diagrama, 9,7% em massa⁽⁴⁾.

MATERIAIS E MÉTODOS

As diversas etapas do processo são mostradas na Fig. 2. Apresenta-se neste fluxograma todos os materiais, equipamentos e ensaios realizados na obtenção dos fios como produto final. O processo iniciou-se com a obtenção de uma liga mãe, com composição eutética cuja composição é mais fácil de ser obtida devido ao menor ponto de fusão, num forno a arco elétrico com eletrodo não consumível de tungstênio. Isto foi seguido por posterior diluição com a adição de cobre até atingir as diferentes composições desejadas em um forno resistivo sob atmosfera inerte e vazamento em lingoteira de cobre. A seguir, foi feito um tratamento térmico de homogeneização a 910 °C por 2 h. Depois, foi executado o processamento termo-mecânico, consistindo de forjamento rotativo a frio e um passe final por trefilação, entremeados por tratamentos térmicos de recristalização a 510 °C

por 1 h. Com a seqüência das operações de forjamento, obteve-se uma redução final de área de 98%, transformando barras de 15,9 mm de diâmetro em fios de 2,20 mm de diâmetro. Finalmente, foi feita a caracterização por ensaios de tração e dureza, seguido pela determinação da condutividade elétrica dos fios.

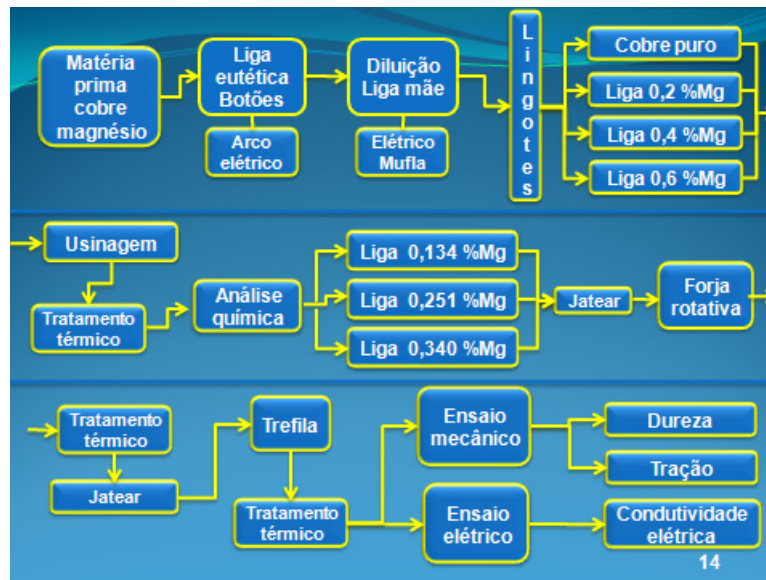


Figura 2. Fluxograma do processo de obtenção e caracterização de fios das ligas Cu-Mg.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo dos processos de fusão, quando da fusão na obtenção dos botões da liga eutética no forno de fusão a arco com eletrodo não consumível e, na segunda fusão para diluição da liga para ajuste da composição química no forno elétrico resistivo, houve perda ao redor de 35% do Mg adicionado.

As medições de dureza foram feitas em amostras retiradas dos fios. Os valores para a amostra de cobre puro (61 HV) ficaram próximos ao valor da liga com 0,13% em massa de magnésio. Os valores de dureza aumentaram com o aumento da porcentagem para as demais ligas, atingindo um valor de 102 HV para a liga com 0,34% em massa de magnésio. A variação dos valores de dureza com a quantidade Mg na liga, teve um aumento linear correspondente, com exceção para a amostra com 0,13% em massa, como mostrado na Fig. 3.

Foram separadas quatro amostras de fios com 2,2 mm de diâmetro por 1,5 m de comprimento, sendo um fio de cobre e os demais fios da família de ligas cobre magnésio para o ensaio de condutividade elétrica. As medições de

condutividade elétrica foram feitas nos fios tratados termicamente na temperatura de 510 °C por uma hora (recristalizado) conforme especificado em norma ⁽⁵⁾.

Para as ligas cobre-magnésio com variação de concentrações na faixa de 0,1 - 0,35% em massa de soluto houve um comportamento linear e decrescente da condutividade elétrica com a concentração em massa de Mg, conforme mostra o gráfico da Fig. 4. O cobre sem adição do elemento de liga Mg apresentou condutividade maior que 100% IACS, enquanto as ligas Cu-Mg apresentaram valores decrescentes à medida que o elemento de liga aumentou, até atingir valores de condutividade da ordem de 60% IACS para a adição de 0,34 % de Mg.

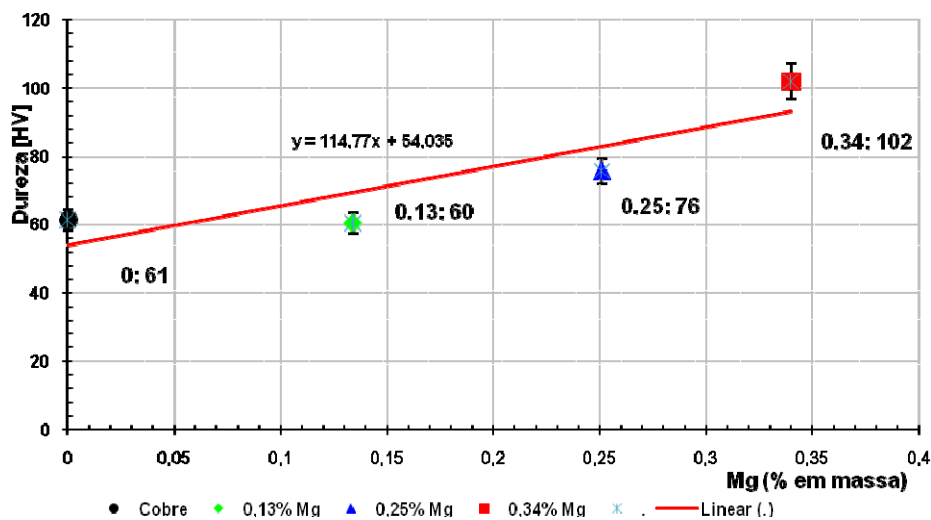


Figura 3. Gráfico da variação de dureza Vickers versus teor de Mg % em massa, para os fios após tratamento térmico de recristalização a 510 °C por 1 h.

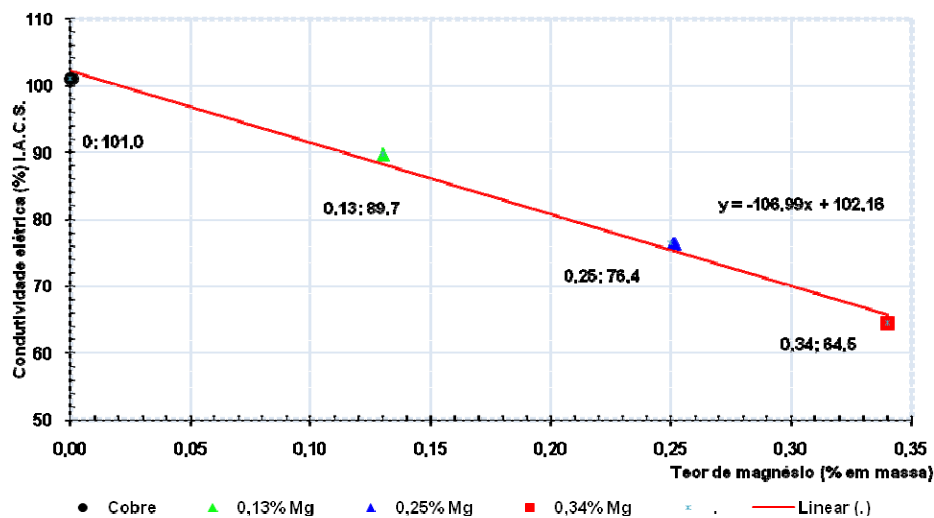


Figura 4. Gráfico da variação da condutividade elétrica versus teor de magnésio (% em massa).

Nos ensaios de tração foram utilizados fios de cobre e fios das ligas Cu-Mg após o tratamento térmico de recristalização a temperatura de 510 °C por um período de 1 h. Foram feitas quatro séries de ensaios de cada grupo de amostras e gerada uma curva média para cada grupo, sendo que o total de curvas médias dos grupos estão mostradas na Fig. 5. Na apresentação das curvas de tensão versus deformação médias (pelo menos 4 ensaios), foi estabelecido um valor máximo de 10% de deformação total como corte ($\epsilon = 10\%$), para representar a comparação entre os comportamentos médios das ligas. A porção reta das curvas no regime elástico apresentaram uma inclinação compatível com os erros normalmente encontrados em ensaios de fios. Pode ocorrer durante o ensaio de tração de um fio, o escorregamento nas garras ou o não perfeito alinhamento do fio e que acabam por aumentar artificialmente a deformação do corpo-de-prova.

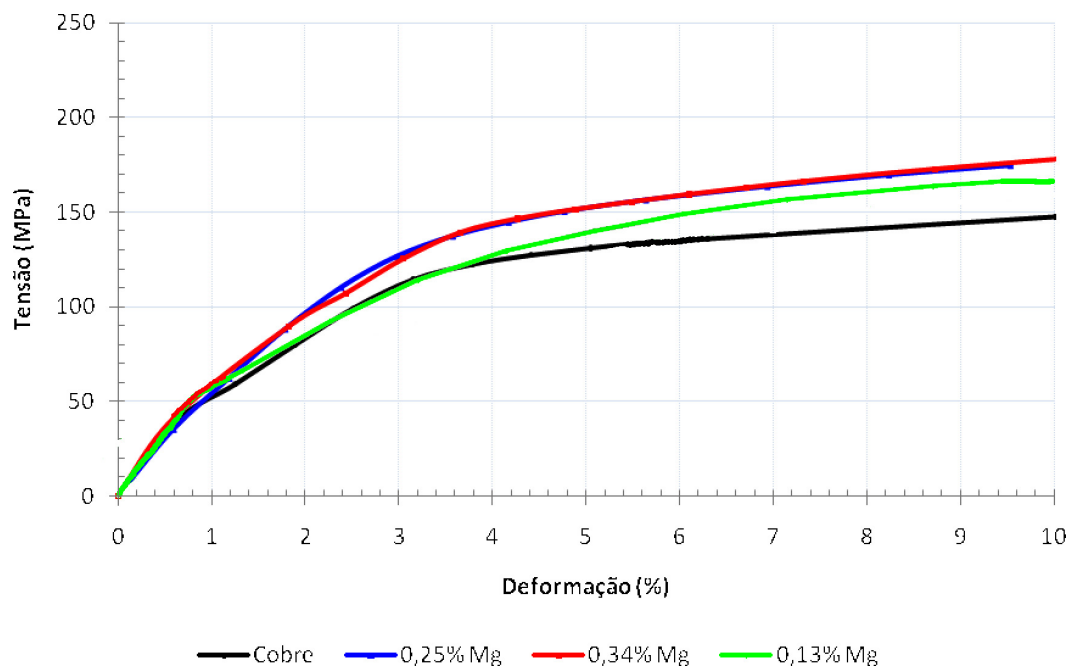


Figura 5. Gráfico de tensão média versus deformação média, fios de Cu e Cu-Mg, com deformação total de até 10%.

Dos resultados dos ensaios de tração foram destacados alguns valores como limite de resistência LR e limite de escoamento com 0,2% de deformação $LE_{0,2}$ sendo são apresentados na Tab. 1. Dos resultados pode-se depreender que ocorre um aumento nos limites de resistência e de escoamento devido a adição de Mg. Entretanto os resultados estão muito próximos e os desvios padrões muito amplos

indicando possivelmente variação microestrutural ou população de defeitos diferenciada para cada fio. Entretanto, os limites de escoamento e de resistência a tração tiveram seus valores melhorados com o aumento do teor de magnésio na liga, 12% e 23% respectivamente

Tabela 1. Valores médios de limite de resistência (LR), limite de escoamento (LE_{0,2}) para as amostras de fios ensaiados.

FIO (% massa Mg)	LR (MPa)	LE _{0,2%} (MPa)
Cobre	194 ± 8	125 ± 12
0,13	212 ± 12	135 ± 10
0,25	240 ± 24	140 ± 12
0,34	235 ± 9	141 ± 18

Os valores dos limites de resistência (LR) foram então relacionados com os índices IACS dos fios e representados no gráfico da Fig. 6. A variação da condutividade elétrica com o limite de resistência e em função da quantidade de Mg adicionada, guarda uma relação aproximadamente linear até 0,25% de Mg em massa na liga. Após este valor um aumento na quantidade de Mg adicionado implica em uma redução na condutividade elétrica que não foi acompanhado por ganhos na resistência mecânica.

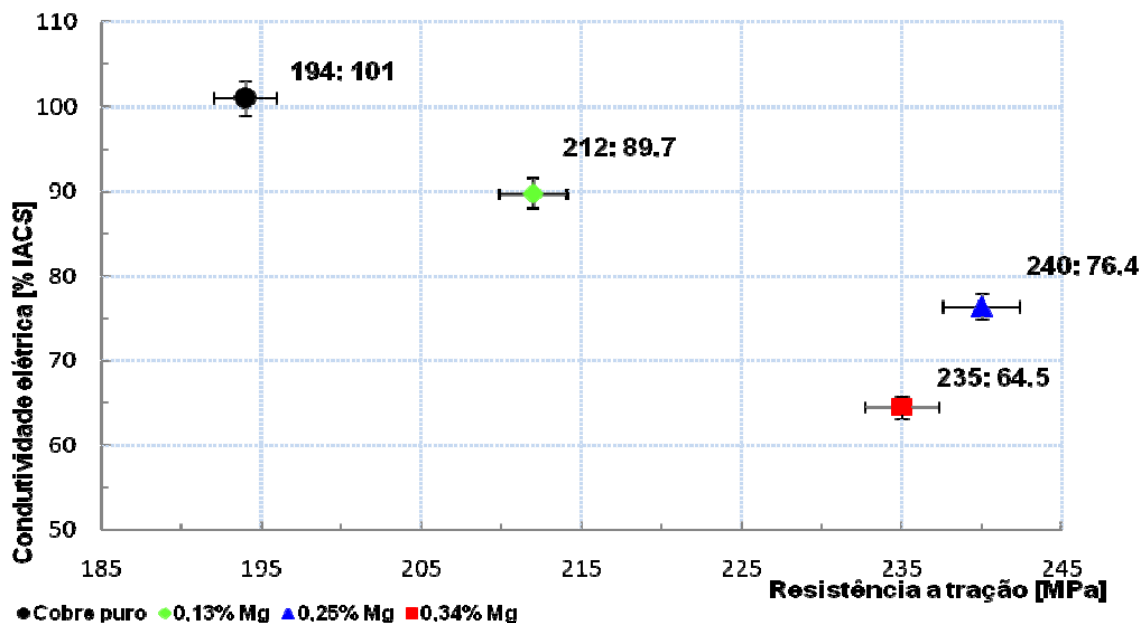


Figura 6. Gráfico de variações de condutividade elétrica versus limite de resistência a tração.

CONCLUSÃO

O magnésio como elemento substitucional em solução sólida na liga de cobre contribuiu na melhora das propriedades mecânicas. A rota de fusão escolhida mostrou-se ser adequada para a obtenção de fios de ligas Cu-Mg, isto demonstrado pela obtenção dos mesmos com uma redução final em área de 98% após o forjamento e trefilação a frio. Os limites de resistência a tração e de escoamento tiveram seus valores melhorados com o aumento do teor de magnésio na liga, de 23% e 12%, respectivamente, enquanto houve queda nos valores de condutividade elétrica para cerca de 60 % IACS (*International Annealed Copper Standard*). Os resultados também indicam um limite máximo de adição de Mg, em torno de 0,25% em massa aonde se tem um ganho nas propriedades mecânicas sem um comprometimento acentuado na condutividade elétrica.

AGRADECIMENTOS:

Ao Departamento de Engenharia de Materiais – LOM, da Escola de Engenharia de Lorena (EEL - USP), pela permissão de uso de forja rotativa; a Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM), da UNICAMP pela permissão de uso de forja rotativa e pelo uso de fieira de trefilação; ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Área de Mecânica (CME), pela permissão de uso da oficina de usinagem.

REFERÊNCIAS

1. J. NEWTOW, C. L. WILSON. **Metallurgy of Copper**. New York: John Willey & Sons Inc, 1942.
2. R. HOJDA, M. KÖHLER, U. RIEPE, S. HECHER. Nachhaltigkeit bei der Werkstoffentwicklung und Werkstoffherstellung. [Online] 2008. <http://www.sundwigmessingwerk.de/> acesso em: 20 de março de 2009.
3. R. A. SWALIN. **Thermodynamics of Solids**, John Wiley & Sons, 1972, 2ª edição
4. H. OKAMOTO. **Phase Diagrams for Binary Alloys. Desk Handbook: Phase Diagrams for Binary Alloys**. Metals Park: ASM International, 2000.
5. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E 1004 - 09. **Standard Test Method for Determining Electrical Conductivity Using the Electromagnetic (Eddy-Current) Method**.
6. AMERICAN, SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E 92 - 82. **Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials**. 2000.
7. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E 8M - 00. **Standard**

Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]1. 2000.

OBTENTION OF COPPER-MAGNESIUM ALLOYS WIRES USED IN ELETRICAL TRANSMISSION LINES

The aim of this work is to obtain a set of three compositions of Cu-Mg alloy in solid solution with 0.134%, 0.251% and 0.340% magnesium, from the raw material area and assess all the steps involved in the manufacture of wires to testing, to evaluate the electrical and mechanical performance of the products. The wires were tested for tensile, hardness and electrical conductivity and the results were compared with theoretical data from literature. Chemical analysis carried out in ingots indicated that the route of preparation of the wires was adequate for the studies in laboratory scale. The materials obtained were suitable for use as a guiding power. (Drop) The results of the conductivity showed good correlation with data obtained in the literature. The final correlation between test data of hardness and resistivity, will allow justify the development of an alloy with mechanical and electrical properties desired.

Keywords: copper magnesium alloys; power wires; electric arc; power lines mechanical properties; power lines electrical properties.