

## **INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

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

## MARCOS GONZALES FERNANDES

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais.

Orientador:

Dr. Jesualdo Luiz Rossi

SÃO PAULO

2010



## **INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

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

## MARCOS GONZALES FERNANDES

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais.

Orientador:

Dr. Jesualdo Luiz Rossi

SÃO PAULO

2010

#### AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi, que me recebeu e que me acompanhou em todos os momentos, apesar das minhas dificuldades, nesta jornada de trabalho.

Ao Dr. Cristiano Stefano Mucsi por sua valiosa ajuda e ensinamento nos mais variados assuntos.

Ao Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM) - IPEN, por oferecer as condições para a realização dos experimentos, ao técnico de laboratório Olandir Vercino Correa pela ajuda na preparação das amostras.

Ao Prof. Dr. Angelo Fernando Padilha, pelas oportunas sugestões feitas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Hugo Ricardo Zschommler Sandim do Departamento de Engenharia de Materiais – LOM, da Escola de Engenharia de Lorena (EEL - USP) pela permissão de uso de forja rotativa.

Ao Prof. Dr. Sérgio Tonini Button da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM), da UNICAMP, pela permissão de uso de forja rotativa e pelo uso de fieira de trefilação.

A Termomecânica São Paulo S.A., Laboratório Físico e Químico, pelas análises químicas e de condutividade elétrica.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), pela minha concessão para participação no Programa de Pós-Graduação (PPG), e a Área de Mecânica (CME), pela permissão de uso da oficina de usinagem.

A minha esposa, Olga, pelo apoio, incentivo e dedicação, as minhas filhas, Daniele e Marina, por sua juventude e esperança na busca de uma vida melhor.

Ao apoio dos meus pais, Oswaldo e Emilia, que sempre estiveram presentes.

Ao amigo Engenheiro Gonçalo Siqueira, que desde o início acompanhou e participou das dificuldades e sucessos desta missão.

Ao amigo Físico Leandro César Pereira Gomes Safra pelo acompanhamento nos ensaios de laboratório e pelo companheirismo demonstrado.

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

#### Marcos Gonzales Fernandes

#### RESUMO

O objetivo desse trabalho foi o de obter-se fios de cobre em três composições químicas distintas da liga Cu-Mg a partir de cobre eletrolítico e de magnésio. Foram avaliadas as etapas envolvidas, começando com a fusão de botões em forno a arco na composição do eutético Cu-Mg, diluição destes botões em forno resistivo, vazamento em lingoteira de cobre, seguido de tratamento térmico de homogeneização em forno resistivo a 910 °C por 2 h. Os tarugos foram posteriormente trabalhados mecanicamente por forjamento rotativo seguido de um passe final de acabamento por trefilação, para obtenção do fio. As análises químicas realizadas nos lingotes indicaram que a rota de preparação dos fios mostrou-se adequada aos estudos em escala de laboratório, suficiente para a confecção de fios com área de seção transversal de 4 mm<sup>2</sup> por 10 m de comprimento, para cada composição de liga. Os fios foram caracterizados mecanicamente por ensaio de tração e de dureza após tratamento térmico de recristalização a 510 °C por 1 h. Os fios também tiveram as condutividades elétricas medidas na condição recristalizada e os resultados foram comparados com dados experimentais da literatura. Os materiais obtidos mostraram-se adequados à utilização como fio condutor de energia elétrica. Os limites de escoamento e de resistência a tração tiveram seus valores melhorados com o aumento do teor de magnésio na liga, 11 % e 24 %, respectivamente, enquanto houve queda nos valores de condutividade elétrica para cerca de 60 % IACS (International Annealed Copper Standard).

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

#### **Marcos Gonzales Fernandes**

#### ABSTRACT

The aim of this work was to obtain copper wires in three different chemical compositions starting from electrolytic copper and magnesium. The mains steps were evaluated, starting from the melting of small eutectic cooper-magnesium specimens in an electric arc furnace, followed by further dilution of this buttons in a resistive furnace and casting it in a copper mould. The as cast billets were homogenized in a resistive furnace at 910 °C for 2 h. The billets were mechanically cold worked by swaging and a final drawing step to attain a round shape and a reasonable surface quality. The cast ingots chemical analysis indicated that the processing route showed to be adequate, in laboratory scale, to obtain wires with cross sectional area of 4 mm<sup>2</sup> and 10 m in length. The wires in both conditions – as cold worked and after a recovering heat treatment at 510 °C for 1 h, were mechanically characterized by tensile testing and hardness. The wires had also the electric conductivity assessed in the recovered heat-treated state and the results were compared to the literature data. The obtained material showed to be adequate to be used as electric conductor. The yield strain and ultimate tensile strength were improved with the increasing amount of Mg in the alloy, 11 % and 24 %, respectively, while the electric conductivity decreased to 60 % IACS (International Annealed Copper Standard).

#### **LISTA DE FIGURAS**

#### Página

FIGURA 1. Influência dos elementos de liga sobre a condutividade do cobre. Destaque para o magnésio, com adições na faixa de 0.05 % - 0.3 % em massa correspondem a uma condutividade de 75 % - 98 % IACS. Adaptado [4]. ..... 2 FIGURA 2. Gráfico da condutividade elétrica versus limite de resistência para materiais à base de cobre. Fios encruados (trefilados), com cerca de 2 mm de FIGURA 3. Gráfico de limite de resistência a tração versus condutividade elétrica, dos materiais (MPC), cobre eletrolítico tenaz (Cu ETP), cobre refinado a fogo de alta condutividade (FRHC) e ligas baseadas em cobre para uso em fios de catenárias. Destague para as ligas Cu-Mg [18]. .....7 FIGURA 4. Diagrama da influência da temperatura de recozimento sobre limite de resistência e ductilidade de uma liga de latão. Tamanho de grão em função da temperatura de recozimento. Estrutura do grão durante a recuperação, crescimento de grão são mostrados recristalização estágios de е esquematicamente. Adaptado [33]. ..... 15 FIGURA 5. Fluxograma do processo de obtenção de fios nas ligas Cu-Mg. ..... 17 FIGURA 6. Pedaços da barra de cobre cortados e pesados para uso na carga do FIGURA 7. Amostra de magnésio, lixado, utilizado para compor as cargas da liga FIGURA 8. Espectro de energia dispersiva do magnésio, obtida em microscópio eletrônico de varredura mostrando a composição dos elementos presentes na FIGURA 9. Micrografia de elétrons retroespalhados de uma amostra de magnésio, FIGURA 10. Vistas frontal e interna (soleira) do forno MCR, seta indicando o local FIGURA 11. Retificador de solda de 400 A usado como fonte de energia para o FIGURA 12. Diagrama de fases, pressão e temperatura do magnésio [35]. ...... 25 FIGURA 13. 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 % FIGURA 14. Foto do forno com circulação de gás inerte (argônio) e dispositivo FIGURA 15. Desenho esquemático da capa de revestimento em aço inoxidável e FIGURA 16. Cadinho de grafite com revestimento em aço inoxidável, com 

FIGURA 17. Desenho esquemático da lingoteira de cobre, mostrando o detalhe FIGURA 20. Lingotes usinados com diâmetro de 18 mm prontos para o FIGURA 21. Tarugos obtidos de cobre puro e ligas Cu-Mg durante o tratamento térmico de homogeneização a 910 °C por 2 h. ..... 35 FIGURA 22. Operador introduzindo a barra da liga cobre-magnésio em uma foria FIGURA 23. Conjunto de matrizes composta de guatro peças e detalhe do perfil FIGURA 25. Operações de forjamento rotativo a frio, entrada e saída de material. FIGURA 26. Fieira com diâmetro de 2,2 mm, utilizada na operação de trefilação FIGURA 27. (a) Máquina universal de ensaios mecânicos. (b) detalhe do FIGURA 28. (a) Seção transversal dos fios de cobre mostrada pelo projetor de perfil, diâmetro do fio ( $\Phi_f$ ). (b) Fios tracionados mostrando onde foram feitas as FIGURA 29. Durômetro usado nas medidas de dureza Vickers com carga de FIGURA 31. Variação da guantidade de elemento de liga adicionado (teórica) e o teor de elemento de liga resultante (real), isto demonstra a perda do magnésio no FIGURA 32. Gráfico tensão versus deformação fio de cobre, amostra Cobre I. . 48 FIGURA 33. Gráfico tensão versus deformação fio de cobre, amostra Cobre II. 49 FIGURA 34. Gráfico tensão versus deformação fio de cobre, amostra Cobre III-2. FIGURA 35. Gráfico tensão versus deformação fio de cobre, amostra Cobre III-3. FIGURA 36. Gráfico tensão versus deformação fio de cobre sem elemento de liga, foram ensaiadas quatro amostras. ..... 50 FIGURA 37. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,13 % em massa de Mg, FIGURA 38. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,13 % em massa de Mg, FIGURA 39. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,13 % em massa de Mg,

amostra Mg III-1
FIGURA 40. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,13 % em massa de Mg, amostra Mg III-2
FIGURA 41. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,13 % em massa de Mg, foram ensaiadas quatro amostras
FIGURA 42. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,25 % em massa de Mg, amostra Mg I
FIGURA 43. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,25 % em massa de Mg, amostra Mg II
FIGURA 44. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,25 % em massa de Mg, amostra Mg III-1
FIGURA 45. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,25 % em massa de Mg, amostra Mg III-2
FIGURA 46. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,25 % em massa de Mg, foram ensaiadas quatro amostras
FIGURA 47. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,34 % em massa de Mg, amostra Mg I
FIGURA 48. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,34 % em massa de Mg, amostra Mg II
FIGURA 49. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,34 % em massa de Mg, amostra Mg III-1
FIGURA 50. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,34 % em massa de Mg, amostra Mg III-2
FIGURA 51. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,34 % em massa de Mg, foram ensaiados quatro amostras
FIGURA 52. Gráfico de dureza Vickers versus teor de Mg, % em massa, para os fios após tratamento térmico de recristalização a 510 °C por 1 h
FIGURA 53. Valores de dureza Vickers (carga de 15,625 kgf) das barras fundidas em bruto, base e topo, e barras após tratamento térmico de homogeneização a 910 °C por 2 h
FIGURA 54. Gráfico de condutividade elétrica versus teor de magnésio (% em massa)
FIGURA 55. Gráfico de variações de condutividade elétrica versus limite de resistência a tração
FIGURA 56. Família de ligas, agrupadas (tratadas térmicamente após estiramento), comparadas com ligas comerciais (trabalhadas a frio, segundo estiramento)
FIGURA 57. Valores de limite de resistência à tração após tratamento de recozimento em cobre eletrolítico (ETP) e ligas de cobre refinado a fogo (PMA1, PMA2 e PMA3 trabalhadas a frio) a diferentes temperaturas por uma hora [18]. 66
FIGURA 58. Valores de condutividade após tratamento térmico a diferentes temperaturas, em cobre eletrolitico (ETP) e ligas de cobre (PMA1, PMA2 e PMA3)

#### LISTA DE TABELAS

#### Página

TABELA 1. Comparação entre codificação UNS e códigos de fabricantes de ligaspara aplicações em fios condutores elétricos9

TABELA 4. Composição em massa de cobre e magnésio para confecção dosbotões na composição eutética.27

TABELA 5. Balanço de massa, quantidades de cobre e magnésio para diluição da liga nas proporções 0,2 %, 0,4 % e 0,6 % em massa de magnésio. Para as corridas 5, 6 e 7 foram usadas duas massas de cobre.

TABELA 6. Sequência de reduções utilizadas para redução da seção dos fios. .37

TABELA 7. Análise química das quatro corridas, liga diluída fundida, após homogeneização dos lingotes. Destaque para o elemento magnésio, que corresponde na mesma faixa de valores das ligas normalizadas número UNS C15500 (0,08 - 0,13) % massa de Mg e C18661 (0,1 - 0,7) % massa de Mg.

TABELA 8. Comparação da massa inicial de magnésio pesada, antes da fusão,

TABELA 9. Grupos de amostras das famílias de ligas e cobre para ensaio detração.47

TABELA 12. Valores dos ensaios individuais dos fios da liga cobre 0,13 % magnésio em massa, para limites de resistência, limite de escoamento, alongamento total e redução em área com o valores médios e desvio padrão dos quatro ensaios. 51

TABELA 13. Valores dos ensaios individuais dos fios da liga cobre 0,25 % magnésio em massa para limites de resistência, limite de escoamento, alongamento total e redução em área com o valores médios e desvio padrão dos quatro ensaios. 54

TABELA 14. Valores dos ensaios individuais dos fios da liga cobre 0,34 % magnésio para limites de resistência, limite de escoamento, alongamento total e redução em área com o valores médios e desvio padrão dos quatro ensaios. ... 57

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	. 1			
1.1	Breve histórico	. 1			
1.2	Atualidade	. 2			
1.3	Aplicação	. 5			
1.4	Qualificação da condutividade elétrica	. 7			
1.5	Classificação do cobre e suas ligas	. 8			
1.6	Utilidades	. 9			
1.7	Objetivo	10			
2	REVISÃO DA LITERATURA	11			
2.1	A importância das impurezas de uma liga em solução sólida	11			
2.2	Ligas de cobre endurecidas por solução sólida	12			
2.3	Ligas com altos teores de cobre endurecidas por precipitação	13			
2.4	Recuperação, recristalização e crescimento de grão	14			
3	MATERIAIS E MÉTODOS	16			
3.1	Procedimento	16			
3.2	Materiais	18			
3.2.1	Cobre	18			
3.2.2	Magnésio	19			
3.3	Equipamentos	22			
3.3.1	Forno a arco elétrico	22			
3.3.2	Forno elétrico resistivo	28			
3.3.3 (	Cadinho	29			
3.3.4	Lingoteira	31			
3.4	Tratamento térmico do fundido	35			
3.5	Forjamento rotativo	36			
3.6	Jateamento dos fios	38			
3.7	Trefilação	39			
3.8	Tratamento térmico dos forjados	40			
3.9	Tratamento térmico dos fios	40			
3.10	Ensaios mecânicos	41			
3.10.1 Ensaio de tração 41					
3.10.2	Ensaio de dureza	42			
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44			

4.1	Fusão	. 44
4.2	Ensaios de tração	46
4.3	Ensaio de dureza	. 60
4.4	Condutividade elétrica	62
4.5	Condutividade elétrica e resistência a tração	63
5	CONCLUSÕES	67
6	TRABALHOS FUTUROS	68
REFE	ERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	. 69

#### 1 INTRODUÇÃO

#### 1.1 Breve histórico

O cobre foi o primeiro metal a ser manipulado pelo homem para a manufatura de utensílios de serviços. Objetos manufaturados de cobre datam de aproximadamente 8.500 anos a.C., o provável local de origem do uso do metal foi a Ásia Menor, embora artefatos pré-históricos possam ser associados com as civilizações em quase todos os continentes habitados. O cobre é um dos poucos metais encontrados na forma nativa (metálica) na natureza, e os primeiros objetos foram indubitavelmente manufaturados a partir de pepitas. Uma cabeça de martelo de cobre maciço foi encontrada próximo de Çatal Hüyük, Anatólia (atual Turquia), com data de 8.000 a.C. [1,2].

Acredita-se que a fundição tenha começado na região que é atualmente Israel, por volta de 3.600 a.C., e um comércio vigoroso do metal foi bem estabelecido por diversas centenas de anos. Os objetos de cobre pré-históricos têm sobrevivido através dos milênios atestando a estabilidade química inerente do metal. Ligas de cobre apareceram por volta de 3.500 a.C. primeiro na Mesopotâmia (atual região do Iraque), através da adição de estanho (anunciando a idade do bronze) e mais tarde pela adição de zinco. As ligas de cobre resultantes eram mais fortes do que o cobre puro e foram usadas para novas aplicações. A descoberta do ferro logo suplantou as ligas de cobre em alguns itens como ferramentas e armamentos. Foi com a introdução da eletricidade no século XIX que trouxe novamente o uso difundido do cobre [3].

Algumas descobertas ao longo do século impulsionaram e motivaram as pesquisas de novas aplicações para o uso do cobre, invenção do telégrafo (1835), invenção da lâmpada (1879), invenção do rádio (1896), a iluminação elétrica pública e privada. O consumo de cobre cresceu então rapidamente, refletindo a taxa de industrialização e eletrificação e mais recentemente o crescimento do sistema global de comunicações (cabeamento de cobre, dados e telefonia).

#### 1.2 Atualidade

As propriedades físicas e mecânicas que requerem o uso do cobre e suas ligas incluem a alta condutividade térmica e elétrica, as combinações favoráveis de resistência e ductilidade, fácil fabricação (usinagem, fundição e propriedade de junta e brasagem) resistência á corrosão e também o apelo estético. Estas propriedades estão disponíveis em combinações favoráveis de ligas e tratamentos térmicos. A adição de elementos de liga no cobre geralmente diminui a condutividade elétrica, com exceção da prata. Para a prata a adição de quantidades moderadas (até aproximadamente 0,25 % em massa) causa um aumento de condutividade, vide FIG. 1.



FIGURA 1. Influência dos elementos de liga sobre a condutividade do cobre. Destaque para o magnésio, com adições na faixa de 0,05 % - 0,3 % em massa correspondem a uma condutividade de 75 % - 98 % IACS. Adaptado [4].

A família de ligas de cobre contendo magnésio não era viável na década de 1930, o pouco interesse pelo magnésio como elemento de liga era reflexo da tecnologia de fusão existente na época que, não permitia a obtenção de lingotes isentos de porosidades oriundas de gases, devido à grande afinidade do magnésio por oxigênio. O fato de que muitas outras ligas em cobre com outros metais podiam ser obtidas mais facilmente [5] também prejudicaram o uso de ligas Cu - Mg. A família das ligas de magnésio com cobre, alta concentração de magnésio, como elemento de liga tiveram na época um interesse maior, segundo os trabalhos desenvolvidos por JONES et al. [6-9].

Com o desenvolvimento, a partir da década de 1950, dos sistemas de fornos de fusão por indução com controle da atmosfera, possibilitou a utilização do magnésio como elemento de liga no cobre, contornando o problema da oxidação e formação de escória.

A seguir é dada uma descrição da evolução da história dos processos de fusão por arco elétrico, [10,11]. A historia da fusão dos metais por arco elétrico iniciou-se pouco depois da descoberta do arco elétrico por Sir Humphrey Davy (1810), utilizando a corrente gerada por uma grande pilha de Volta. Em 1839 o médico Robert Hare utilizou o arco elétrico, numa câmara fechada, para a realização de varias reações químicas, produzindo carbeto de cálcio, fósforo, grafite e cálcio. Em 1870, após a invenção do dínamo, Von Walter Siemens iniciou experimentos para a fusão exclusiva de metais, trabalho que resultou nos atuais fornos a arco elétrico para a fusão de grandes quantidades de aço. O forno de Siemens utiliza-se de eletrodos de carbono e cadinhos cerâmicos.

Há contradições sobre a invenção do arco elétrico, atribuindo a Paul Louis-Toussaint Héroult, a sua invenção para a manufatura de aços [12]. Inegavelmente Heroult foi o grande desenvolvedor da tecnologia para obtenção do alumínio metálico, com a utilização do arco elétrico.

Em 1903 Werner Von Bolton desenvolveu o trabalho original de Hare e construiu o predecessor dos fornos a arco sob vácuo. As três características originais do forno de Werner Von Bolton que lhe permitiram fundir metais reativos e refratários são as mesmas utilizadas no modernos fornos a arco elétrico sob vácuo. Eles usaram o arco elétrico como uma fonte de alta temperatura, resfriamento por água das superficies em contato com as altas temperaturas, e

um encapsulamento que permite a operação sob vácuo ou sob atmosfera controlada.

Analogamente ao equipamento de Von Bolton, nos equipamentos modernos o metal que primeiro entra em contato com a lingoteira solidifica-se instantaneamente, formando uma casca que funciona como um recipiente do mesmo metal e que se funde posteriormente. Uma vez que atinja um estado estacionário adequado para a transferência de calor, o metal fundido não mais interage com partes do forno construídas com outros materiais. Von Bolton não utilizou eletrodo de carbono, mas sim do próprio metal a ser fundido, após a solidificação, esse recipiente que inicialmente se forma passa a fazer parte do lingote final. O forno de Von Bolton foi melhorado por O. A. Simpson que produziu aproximadamente uma tonelada de tântalo, a qual foi utilizada na confecção de instrumentos dentais cirúrgicos e filamentos de lâmpadas. O trabalho original de Von Bolton continuou a ser utilizado, dessa vez por Weiss e Stilmmelmayr, os quais fundiram tungstênio em atmosfera de hidrogênio, amônia, nitrogênio e em vácuo.

Em 1935, R. K. Hopkins atingiu pela primeira vez escala industrial num forno a arco elétrico com eletrodo consumível, utilizando proteção por escória, no lugar de atmosfera controlada. Este processo ficou conhecido como "processo Hopkins". Pouco depois, em 1939, Wilhem J. Kroll reportou uma técnica para produzir lingotes de titânio. O mesmo Kroll dá nome ao processo físico-químico para obtenção das esponjas de titânio e zircônio, que são largamente utilizadas nas indústrias aeroespaciais e nucleares.

Num trabalho publicado em 1946, Parke e Ham, foram os primeiros a utilizar alto vácuo, menos de 0,1 mmHg, para a fusão de grandes quantidades de molibdênio. A necessidade por metais mais puros cresceu na década de 1950, assim como a disponibilização de equipamentos de alto vácuo, possibilitando que Noesen e Hughes obtivessem tungstênio com menos de 1 ppm de oxigênio, hidrogênio e nitrogênio, sendo que o carbono não pode ser detectado na época, pois o limite de detecção era de 10±10 ppm. Foi também durante a década de 1950 que ocorreu aumento do interesse pela purificação e pelo controle da estrutura de aços ligas.

#### 1.3 Aplicação

O cobre como elemento puro apresenta alta condutividade elétrica e baixa resistividade, isto o torna um ótimo condutor elétrico a um preço razoável, (7,4 US\$/kg, dados de 2010) [13]. Ao mesmo tempo em que as propriedades elétricas são importantes para um condutor, propriedades mecânicas adequadas tornamse determinantes para permitir a sua aplicação em condutores na rede de transmissão aérea, isto em razão dos esforços de tração a que esse condutor é submetido. Para isso são adicionados elementos de liga que melhoram as propriedades mecânicas, produzindo uma liga, sem, contudo alterar significativamente sua principal característica, a condutividade elétrica. As normas ASTM B 105 [14] e B 624 [15] descrevem as exigências para forte estiramento, alta resistência e alta condutividade elétrica para fios de ligas de cobre para aplicações em condutores elétricos e conexões.

Como já mencionado, duas propriedades desempenham um papel preponderante na seleção e no desempenho dos condutores: a condutividade elétrica e a resistência a tração. A FIG. 2, extraída da publicação *High-performance copper alloy wire*, da empresa alemã WIELAND-WERKE AG, mostra que estas duas propriedades são, em geral, concorrentes, ou seja, enquanto uma aumenta a outra diminui [16]. Duas ligas Cu-Mg indicadas (quadrados azuis), Cu - 0,1 % Mg e Cu - 0,4 % Mg, percebe-se que de acordo com o gráfico que um aumento do teor de magnésio causa aumento da resistência mecânica, mas decresce a condutividade elétrica.

A liga Cu-Mg é também apropriada para conexões elétricas, para pinos de conectores e para linhas aéreas telefônicas. Nos últimos anos, esta liga tornou-se cada vez mais importante como fios de contato em cabos de catenárias para trens de alta velocidade. Diversos parâmetros limitam a velocidade de um trem, entre eles, o problema de capturar a corrente. Por causa do movimento do trem, a catenária é sujeita ao movimento vibratório vertical. Para que a catenária transmita a corrente elétrica, a velocidade do trem não deve exceder a velocidade das ondas que se desloca pela catenária. A velocidade da propagação de ondas da vibração atuaria como um limite de velocidade, uma "barreira da catenária", similar à barreira do som. Geralmente, a velocidade da propagação destas ondas mecânicas é próxima a 500 km/h, que ajusta um limite de velocidade máxima

para trens de alta velocidade em uns 470 km/h. Na prática, o trem de alta velocidade francês (TGV) não pode exceder uma velocidade de 70 % da velocidade da propagação de onda durante todo o comprimento da catenária [17].



FIGURA 2. Gráfico da condutividade elétrica versus limite de resistência para materiais à base de cobre. Fios encruados (trefilados), com cerca de 2 mm de diâmetro. Adaptado [16].

A maior resistência à tração do material usado para a catenária possibilita maior tração nos cabos, isto abre por sua vez a possibilidade para que os trens registrem novos recordes de velocidade nos trilhos. Devido à melhora no limite de resistência à tração mecânica, as catenárias produzidas a partir da liga cobre-magnésio estão gradualmente suplantando outros tipos de ligas utilizadas em catenárias. Esta família de ligas é usada em substituição às ligas cobre-cádmio, que em muitos países é proibida, isto devido às propriedades tóxicas do cádmio, além disso, a alta resistência mecânica deve ser mantida sem risco de queda, mesmo se temperaturas elevadas forem ocasionalmente alcançadas sob condições de trabalho. A partir de ligas conhecidas foi construído um gráfico de propriedades de material - MPC (acrônimo do inglês – *materials properties chart*) para ligas de cobre relacionando resistência a tração e condutividade, com aplicação específica em fios de trole, vide FIG. 3 [18]. As regiões demarcadas



indicam às áreas de abrangência das características de condutividade e resistência a tração das famílias de ligas utilizadas em fios de catenárias.

FIGURA 3. Gráfico de limite de resistência a tração versus condutividade elétrica, dos materiais (MPC), cobre eletrolítico tenaz (Cu ETP), cobre refinado a fogo de alta condutividade (FRHC) e ligas baseadas em cobre para uso em fios de catenárias. Destaque em vermelho para as ligas Cu-Mg [18].

Na fabricação dos fios, com uma determinada composição de cobre refinado a fogo, propriedades mecânicas e térmicas, como a temperatura atingida na deformação plástica de 30 % (deformação  $\varepsilon_{30\%}$ ) podem ser controladas pela composição de oxigênio, um parâmetro ajustável durante a fundição continua ou semi-continua. A temperatura  $\varepsilon_{30\%}$  constitui um parâmetro industrial importante, diretamente relacionado ao processo de obtenção dos fios por trefilação. Os teores de impurezas em qualquer quantidade dentro do limite de solubilidade afetam diretamente a condutividade, a deformação  $\varepsilon_{30\%}$  e valores dos limites de resistência a tração.

#### 1.4 Qualificação da condutividade elétrica

A principal utilização, do cobre e suas ligas é na transmissão de corrente elétrica, é necessária uma maneira para realizar a medição e sua classificação como condutor de corrente elétrica. Tem-se como padrão histórico (1913), de

condutividade elétrica o cobre puro recozido obtido eletroliticamente, tendo uma densidade específica de 8,89 g/cm<sup>3</sup> a 293 K (20 °C). A este padrão atribui-se a fração 100 % IACS (*International Annealed Copper Standard*), o que representa uma condutividade de 58 megaSiemens por metro (MS/m); isto é equivalente a uma resistividade de 1/58 ohm por metro para um fio de um milímetro quadrado de seção transversal, para um cobre puro isento de oxigênio. Qualquer impureza pode fazer com que a condutividade elétrica diminua enquanto alguns tratamentos de recozimento fazem a condutividade aumentar até mais do que 101 % IACS, um valor usual para fios de cobre para aplicações elétricas e eletrônicas. Dessa forma, esse é o padrão de condutividade adotado, o que significa que todos os demais condutores, sejam em cobre, alumínio ou outro metal qualquer, têm suas condutividades sempre referidas a este condutor [19].

A resistividade elétrica, por sua vez, que é definida como o inverso da condutividade elétrica, é a propriedade que os materiais possuem de dificultar a passagem da corrente elétrica [20].

#### 1.5 Classificação do cobre e suas ligas

A CDA (*Copper Development Association*) é o braço da indústria de cobre e suas ligas na América do Norte, constituído para intensificar e expandir os serviços de desenvolvimento de mercado, engenharia e informação [21]. Ela administra a UNS (*Unified Numbering System*) que é o sistema de designação de produtos de cobre e suas ligas e que estabeleceu uma classificação de cinco dígitos precedidos da letra C, números de C10000 até C79999 para ligas trabalhadas, e.g., laminadas, trefiladas, forjadas ou extrudadas, e C80000 até C99999 para ligas fundidas, que é regulada por órgãos normativos em conjunto, com a ASTM *International* (anteriormente conhecida como *American Society for Testing and Materials*) e o SAE (*Society of Automotive Engineers*) e no Brasil a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) que é o órgão responsável pelas normas técnicas no país e perante os organismos internacionais de normalização.

#### 1.6 Utilidades

Existem ligas com características similares de aplicação como, fios condutores que possuem denominações segundo o UNS e alguns correspondentes códigos de fabricantes como mostrado na TAB. 1.

N°	F	abrica	inte		Elementos (% massa )										
UNS	w	KME	FISK	тм	Cu	Fe	Cr	Te	Si	Ag min max	P	Cd	Pb	Sn	Mg
C 14410					99,90	0,05					0,005 0,02		0,05	0,1 0,2	
C 14415	K 81				<mark>99,9</mark> 6									0,1 0,15	
C 14500				C 145	99,90			0,4 0,7			0,004 0,012				
C 15500	K Y1	STOL ®77			<mark>99</mark> ,75					0,027 0,1	0,04 0,08				0,08 0,13
C 16200			C 162		Res	0,02						0,7 1,2			
C 16500					Res	0,02						0,6		0,5 0,7	
	K B9				Res										
C 18080	K 88				Res	0,02 0,20	0,20 0,7		0,01 0,10	0,01 0,30					
	K Y2				Res										0,40
C 18661			CMG 1		Res	0,10					0,001 0,02			0,20	0,10 0,70
C 18665		STOL ®78			99,00						0,002 0,04				0,40 0,90

TABELA 1. Comparação entre codificação UNS e códigos de fabricantes de ligas para aplicações em fios condutores elétricos.

TM: Termomecânica. W: Wieland

Vários elementos de liga são adicionados ao cobre, vide TAB. 1, para utilização como condutores elétricos, um exemplo de aplicação é a liga C16200 [14,15], cobre - cádmio que tem uma condutividade maior do que 80 % IACS e quando trabalhada e endurecida, pode atingir uma resistência a tração superior a 680 MPa. Apesar das boas características, o cádmio tem sido conhecido por oferecer riscos à saúde e tentativas estão sendo feitas para substituir este elemento químico. O cádmio aparece na lista de elementos quimicamente tóxicos

e bioacumulativos relacionados pela EPA (Environmental Protection Agency), agência de proteção ambiental dos Estados Unidos. No Brasil o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) e a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), consideram o cádmio como um possível elemento carcinogênico humano. Várias propostas têm sido feitas em diferentes países para banir ou restringir o uso deste elemento. Como alternativa às ligas Cu-Cd, o magnésio pode ser usado como elemento de liga, constituindo a família de ligas cobre-magnésio que oferece propriedades igualmente atrativas.

Existem pedidos de patente, CN1401803 (A) e US 2004/0238086 A1 [22,23] na qual é reivindicada a invenção de uma liga de cobre a qual possui uma alta resistência mecânica e uma alta condutividade elétrica. A liga de cobre é formada por uma base de cobre contendo de 0,05 % a 0,9 % em massa de magnésio e não mais que 15 ppm de impurezas no total, um fio de cobre com diâmetro de 2,54 mm apresenta uma resistência mecânica de pelo menos 689 MPa (encruado) e uma condutividade elétrica de 60 % IACS (*International Annealed Copper Standard*). O pedido de patente também reivindica o processo de obtenção do fio.

#### 1.7 Objetivo

Este trabalho teve como objetivo descrever as várias etapas que envolvem o processo de obtenção de fios de uma família de ligas cobre magnésio, avaliar as propriedades mecânicas e elétricas das ligas, através da análise dos valores obtidos em ensaios de dureza, tração e condutividade elétrica.

#### 2 REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1 A importância das impurezas de uma liga em solução sólida

A deformação plástica de metais é possível pela ocorrência da movimentação de discordâncias. Para que haja diminuição da deformação plástica e consequente diminuição da ductilidade dos materiais é necessário diminuir-se a densidade de discordâncias ou dificultar o movimento das mesmas. Pode-se imaginar que durante a deformação plástica as discordâncias vão formando degraus e a sua mobilidade vai se tornando cada vez mais dificultada, esta explicação foi proposta por P. B. Hirsch e N. F. Mott, [24] no início da década de 1960, para explicar o aumento da resistência de um material à medida que ele vai sendo deformado plasticamente (encruamento).

Para dificultar o movimento das discordâncias, vários tipos de obstáculos podem ser utilizados, muitas vezes simultaneamente. Esta área da ciência dos materiais é denominada mecanismos de aumento de resistência mecânica ou simplesmente mecanismos de endurecimento. Os seguintes obstáculos ou mecanismos de endurecimento são mais utilizados:

outras discordâncias (endurecimento por deformação ou encruamento);

- átomos de soluto (endurecimento por solução sólida);
- precipitados coerentes com a matriz (endurecimento por precipitação);
- partículas incoerentes com a matriz (endurecimento por dispersão) e
- contornos de grãos e de subgrãos (endurecimento por refino de grão).

A obtenção de ligas com os diversos mecanismos de endurecimento mencionados e os tratamentos termomecânicos combinados resulta em materiais com melhores propriedades físicas e mecânicas. A movimentação de discordâncias numa solução sólida leva ao aumento da energia interna do sistema, portanto a presença de solutos dificulta o movimento de discordâncias.

#### 2.2 Ligas de cobre endurecidas por solução sólida

O retículo cristalino do cobre é capaz de reter certa quantidade de átomos de outros metais, por exemplo, Sn, Zn e Mg. Estes átomos que compõem os elementos de liga tomam o local do reticulado substituindo os átomos de cobre, essa liga é chamada de solução sólida substitucional. O retículo cristalino do cobre é distorcido na vizinhança do átomo por expansão se os átomos forem maiores do que o átomo de cobre (raio atômico 1,28 Å), como exemplo, Zn e Mg (1,38 Å, 1,6 Å) Se os átomos forem menores do que o cobre, como exemplo, Ni e Cr (1,24 Å, 1,27 Å) a distorção do reticulo cristalino trará uma contração. Em ambos os casos a resistência do material à deformação é aumentada comparada com o cobre puro. Este tipo de liga é chamado de liga endurecida por solução sólida [25]. A solubilidade do magnésio no cobre é no máximo de 3,3 % em massa para a temperatura de 726 °C.

Alguns elementos podem ser dissolvidos no cobre em altas porcentagens. De acordo com o diagrama de equilíbrio de fases a máxima solubilidade do Zn é 39,0 % e do Sn 15,8 % [26]. Os latões com 30 % ou 36 % de Zn e bronzes com 5 %, 6 % e 8 % Sn são freqüentemente usados na indústria eletrônica, se a resistência do cobre puro não for suficiente [27].

Para conseguir um fio de alta resistência além do efeito de endurecimento por solução sólida é necessário um alto nível de deformação por trefilação a frio, fios finos de bronze fósforo conseguem facilmente valores de resistência de 1000 MPa devido à trefilação a frio. Mas a distorção do retículo cristalino devido aos elementos de liga diminui a condutividade elétrica. A desvantagem das ligas endurecidas por solução sólida é a baixa condutividade elétrica, por exemplo, de aproximadamente 25 % IACS (latão CuZn<sub>36</sub>) e aproximadamente 14 % IACS (bronze fósforo CuSn<sub>6</sub>). Esta diminuição da condutividade elétrica é devida à distorção do retículo cristalino e aumento da energia interna, causada pelos átomos dos elementos de liga.

Os metais apresentam alta condutividade elétrica porque suas bandas de energia só são parcialmente preenchidas. Como existem estados de energia vazios adjacentes aos estados ocupados, a aplicação de um campo elétrico pode acelerar facilmente os elétrons produzindo corrente elétrica. Além disto, a passagem de elétrons da banda de valência para a banda de condução é relativamente fácil nos metais. Qualquer fato que dificulte o movimento dos elétrons reduz a condutividade elétrica, por exemplo, a vibração térmica (aumento da temperatura), átomos de soluto e defeitos cristalinos aumentam a resistividade elétrica dos metais [28].

Com a finalidade de minimizar a queda na condutividade elétrica e aumentar a resistência, ligas diluídas, endurecida por solução sólida com baixo índice de elementos de liga são usadas [29]. Em ligas diluídas, Cu-Mg, (menos de 1 % em massa de soluto), 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), pode-se supor a validade da lei de Henry [30] ); variação linear da atividade química com a concentração. Para soluções diluídas, muitas grandezas físicas (a condutividade elétrica, por exemplo) variam linearmente com a concentração em massa de soluto [31].

Uma desvantagem das ligas endurecidas por solução sólida é sua insuficiente resistência a fluência em ligeiros aumentos na temperatura de trabalho iniciando por volta de 60 °C. Para superar isto, torna-se necessário ao uso de ligas endurecidas por precipitação.

#### 2.3 Ligas com altos teores de cobre endurecidas por precipitação

A capacidade para dissolver outros tipos de átomos em geral é aumentada em temperaturas elevadas. Se a temperatura diminui, então o limite de solubilidade é impulsionado para baixo. Este fato pode ser utilizado para gerar precipitações por um processo de envelhecimento em temperaturas abaixo do limite de solubilidade, os átomos formam precipitações, segundas fases e fases intermetálicas. O tamanho dessas partículas geralmente é menor do que 100 nm. Como os átomos saem do reticulado, a distorção do retículo cristalino é desfeita e a condutividade elétrica do material aumenta. Por outro lado, os precipitados aumentam a resistência do material de base e influenciam o comportamento mecânico da liga. Eles endurecem o material, por esta razão, estes tipos de ligas são chamados de "ligas endurecidas por precipitação ou dispersão". Uma grande vantagem das ligas endurecidas por dispersão é a sua resistência ao relaxamento. Se o material é exposto a temperaturas elevadas de trabalho os precipitados não se dissolvem e o aumento da dureza pode ser mantido [4].

#### 2.4 Recuperação, recristalização e crescimento de grão

A recuperação, a recristalização e o crescimento de grão são as fases que um metal trabalhado a frio, conformado mecanicamente por processos de laminação, forjamento, extrusão e trefilação, passa quando ele é tratado termicamente. O trabalho a frio produz um grande número de defeitos cristalinos no material, e tratamentos térmicos são necessários para recuperar determinadas propriedades, especialmente a ductilidade. Deformando-se plasticamente um metal por conformação a frio, resulta que uma pequena parcela da energia mecânica aplicada fica armazenada no material na forma de defeitos cristalinos, sendo que a maior parte da energia é perdida na forma de calor [32].

A densidade de discordâncias aumenta com o aumento da deformação plástica, e devido suas interações, transforma a microestrutura original. Materiais conformados a frio estão em alto estado de energia e são termodinamicamente instáveis. O efeito do tratamento de recristalização e recozimento é fornecer energia de ativação térmica que transforma o material para estados de energia mais baixos acompanhados por uma serie de mudanças microestruturais, marcadamente uma diminuição na densidade de discordâncias e no número de defeitos puntiformes, bem como pode implicar em transformações de fase. Outras propriedades do material mudam como resultado do tratamento térmico. Normalmente, a resistência do material diminui como resultado do recozimento e a ductilidade aumenta, vide FIG. 4.



FIGURA 4. Diagrama da influência da temperatura de recozimento sobre limite de resistência e ductilidade de uma liga de latão. Tamanho de grão em função da temperatura de recozimento. Estrutura do grão durante a recuperação, recristalização e estágios de crescimento de grão são mostrados esquematicamente. Adaptado [33].

#### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### 3.1 Procedimento

Com o objetivo de obter uma família de ligas de cobre-magnésio foi necessário desenvolver uma metodologia e ter disponível matérias primas e equipamentos adequados. Os recursos foram disponibilizados nos laboratórios do Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), onde foi desenvolvida a maior parte dos trabalhos. A matéria prima para obter a família de ligas já estava disponível no CCTM. Foram utilizados os Laboratórios de Fusão onde se encontravam os fornos resistivos e o forno a arco elétrico. No Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFSP) foi utilizado um torno universal para usinagem para adequação da superfície dos lingotes. No Departamento de Engenharia de Materiais (LOM) da Escola de Engenharia de Lorena (EEL-USP), foram utilizados dois equipamentos de forjamento rotativo para obtenção dos fios. No Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM-UNICAMP), foi utilizado um equipamento de forjamento rotativo para última redução em área. Deste laboratório da UNICAMP utilizou-se também uma fieira pra o acabamento final dos fios. No Laboratório Químico/Físico da Termomecânica São Paulo S.A. foram realizados os ensaios de condutividade elétrica e análise química das ligas obtidas. No Laboratório de Comportamento Mecânico do CCTM foram feitos os ensaios de tração e de dureza.

As diversas etapas desenvolvidas no processo são sumarizadas na FIG. 5, onde através de um fluxograma apresentam-se os materiais, equipamentos e ensaios realizados na obtenção dos fios como produto final. De posse das matérias primas, cobre e magnésio, foram fundidos em forno a arco elétrico com eletrodo não consumível e sob atmosfera inerte (argônio), os botões da liga com composição próxima a eutética (9,7 % em massa de Mg). Na etapa seguinte foi utilizado um forno resistivo sob atmosfera inerte (argônio) para fusão do cobre e diluição dos botões de liga. O balanço de carga foi calculado para obterem-se lingotes com as composições teóricas de (0,2, 0,4 e 0,6) % em massa de Mg. Um maior detalhamento de cada etapa dos processos mencionados vai ser descrito

nos próximos itens deste trabalho.

Uma vez fundidos os lingotes, estes foram usinados para a retirada de carepas e regularização da superfície e controle dimensional. Os lingotes foram homogeneizados a 910 °C por 2 horas em forno resistivo sob atmosfera inerte. Após jateamento para limpeza, os lingotes seguiram para a etapa de conformação mecânica por forjamento rotativo até uma redução em área de 96,79 %. Após a redução das barras em fios de diâmetro 2,4 mm foi feito um tratamento térmico de recristalização a 510 °C por 1 h. Uma trefilação a frio foi à última etapa de conformação mecânica reduzindo o fio de 2,4 mm de diâmetro para 2,2 mm de diâmetro final em um único passe em fieira.

Obtidos os fios como produto final em cobre puro e em ligas Cu-Mg, foi feito o último tratamento térmico a 510 °C por 1 h. Os ensaios nos laboratórios, físico, químico e mecânico que se seguiram, foram feitos na condição após tratamento térmico de recristalização.



FIGURA 5. Fluxograma do processo de obtenção de fios nas ligas Cu-Mg.

#### 3.2 Materiais

#### 3.2.1 Cobre

O cobre utilizado, de alta pureza em forma de barra laminada, com a composição como mostrada na TAB. 2, segundo análise química quantitativa realizada por espectrometria óptica com fonte de centelha (*spark*).

Foram cortadas e pesadas pequenas quantidades para compor as cargas, como mostrado na FIG. 6, para obtenção da liga mãe eutética e para sua posterior diluição.

Elemento	ppm
Ag	10
Fe	12
Mg	< 1,5
Mn	< 4
0	< 7
Р	< 3
Pb	< 4
S	< 15
Se	< 3
Sn	< 8
Ti	< 2
Zr	< 3
Cu	balanço

TABELA 2. Análise química em ppm, obtida por espectrometria óptica com fonte de centelha (*spark*) da barra de cobre utilizada como material de partida.



FIGURA 6. Pedaços da barra de cobre cortados e pesados para uso na carga do forno resistivo.

### 3.2.2 Magnésio

O magnésio, vide FIG. 7, foi retirado de um tarugo de composição conforme mostrado pela análise química semiquantitativa por espectroscopia por dispersão de energia EDS, vide TAB. 3 e FIG. 8. Deste tarugo, foram cortados e separados pequenos pedaços usados na obtenção de vários botões com composição química próxima ao eutético.

TABELA 3. Composição química da amostra de magnésio utilizado na composição da liga eutética, obtida por espectroscopia de energia dispersiva em um microscópio eletrônico de varredura.

Elemento	% (massa)	% (atômica)
Mg	82,16	86,81
Si	2,83	2,59
S	6,11	4,90
Са	8,90	5,70



FIGURA 7. Amostra de magnésio, lixado, utilizado para compor as cargas da liga na composição eutética.

Uma amostra metalográfica do tarugo de magnésio foi preparada. A superfície da amostra foi lixada, lixa grana 600 de carbeto de silício e submetida a análise no microscópio eletrônico de varredura. A análise revelou a ausência de quantidades significativas de impurezas, somente sendo detectadas por EDS inclusões de cálcio, vide espectro de EDS na FIG. 8 e a micrografia de elétrons retroespalhados mostrada na FIG. 9.



FIGURA 8. Espectro de energia dispersiva do magnésio, obtida em microscópio eletrônico de varredura mostrando a composição dos elementos presentes na amostra, dentro do limite de detecção do equipamento.



FIGURA 9. Micrografia de elétrons retroespalhados de uma amostra de magnésio, somente lixada, mostrando a presença de inclusões de cálcio.

#### 3.3 Equipamentos

#### 3.3.1 Forno a arco elétrico

Para a obtenção de botões de liga eutética, de cobre-magnésio, foi utilizado um forno a arco elétrico com eletrodo não consumível sob atmosfera de gás inerte fabricado pela MCR (*Materials Research Corporation*), série V-II, vide FIG. 10.



FIGURA 10. Vistas frontal e interna (soleira) do forno MCR, seta indicando o local da lingoteira utilizado nas confecções dos botões.

O forno utilizado para obtenção das ligas encontrava-se em desuso há algum tempo, não apresentando condições de utilização em função dos vazamentos apresentados. Foi necessária uma desmontagem completa de todas as partes constituintes, limpeza e troca de todos os elementos de vedação. O sistema de válvulas também apresentava vazamentos que foram resolvidos com a desmontagem e substituição de componentes. As várias partes que constituem o forno foram muito bem descritas em uma outra dissertação de mestrado [34].

O forno é constituído de uma câmara de vácuo em cujo interior existe uma soleira de cobre refrigerada à água na qual estão dispostos horizontalmente
vários recipientes para conter o metal líquido separadamente. Estes recipientes permitem a fusão do metal, e a solidificação do metal líquido na forma de pequenos botões e barras. Devido à refrigeração da soleira, não há contaminação do material fundido da liga com o cobre da soleira. A soleira é suportada por um corpo de alumínio onde estão localizadas entradas para vácuo e gases inertes, acessórios para o posicionamento de medidores de pressão e uma lâmpada para visualização da soleira e do *starter*, de tungstênio, para a abertura do arco. A câmara de vácuo, fabricada em aço inoxidável, é dotada de serpentina de refrigeração confeccionada do mesmo material.

O topo desta câmara comporta um dispositivo para manipular o eletrodo através de uma lança de cobre refrigerado à água montado numa rótula esférica que permite movimentação vertical, horizontal e também circular na extremidade inferior deste embolo, permanentemente no interior da câmara de vácuo. Um eletrodo de tungstênio com 2 % de tório e com 7,0 mm de diâmetro e 150,0 mm de comprimento, está fixo na extremidade inferior da lança, sendo o arco elétrico estabelecido entre a extremidade livre deste e o material a ser fundido. Este eletrodo apresenta desgaste mínimo durante a fusão e como suporta grandes intensidades de corrente, seu pequeno diâmetro permite obter uma fonte de calor extremamente concentrada sobre a carga a ser fundida, pode-se dizer que a área abrangida pelo arco proveniente do eletrodo utilizado envolve toda a carga de fusão.

Para ter acesso ao interior da câmara é necessário abrir a campânula (tampa de fechamento do forno), que é presa através de sistema articulado de dobradiça, o sistema de fechamento é feito pelo contato da extremidade da borda da campânula com o anel de vedação da base do forno, o dispositivo para manipulação da lança que contém o eletrodo está solidário ao conjunto da campânula. Para poder acompanhar a visualização do processo de fusão, ter acesso visual à câmara existe um visor de vidro transparente com parede dupla e circulação de água de refrigeração. Devido a alta intensidade luminosa gerada pela manutenção do arco elétrico é necessário o uso de equipamento de proteção individual, óculos e máscara com lentes de proteção. A corrente se estabelece entre o eletrodo e a soleira, anodo e catodo, respectivamente.

No sistema de vácuo deste equipamento é utilizado conjunto moto bomba

mecânica, com capacidade de bombeamento de 15,5 m<sup>3</sup>/h, a 540 rpm. Esta bomba permite que a depressão na câmara do forno seja da ordem de 10<sup>-1</sup> MPa. A energia necessária à manutenção do arco elétrico é fornecida por uma fonte de corrente de um retificador de solda, com capacidade máxima de corrente de 400 A, vide FIG. 11.



FIGURA 11. Retificador de solda de 400 A usado como fonte de energia para o forno a arco.

Para dar início a preparação da fusão foi necessário um procedimento de três ciclos de purga, que consta da retirada do ar interno da câmara, e posterior preenchimento com gás inerte, argônio. A depressão formada no interior da câmara retira o ar juntamente com oxigênio, elemento prejudicial à composição da liga, devido à grande afinidade do magnésio por oxigênio na formação de óxidos. Após três ciclos completos foi injetada pela operação de manobra de válvulas uma quantidade suficiente de argônio de alta pureza 5.0 analítico para preenchimento da câmera, tornando a atmosfera inerte. Uma vez ionizada, esta atmosfera permitiu que o arco elétrico se mantivesse aberto, constante e

direcionado para a carga de Cu-Mg. Um aspecto operacional para a incorporação do magnésio no cobre foi o de manter o magnésio sob o cobre para reduzir as perdas por evaporação, já que a diferença nas temperaturas de fusão dos dois elementos é grande, 1085 °C para o cobre e 650 °C para o magnésio. Na prática, com o direcionamento do arco elétrico primeiramente para o cobre e conseqüente fusão sobre o magnésio, há uma formação de uma camada líquida que de alguma forma faz com que haja uma maior retenção do magnésio na liga eutética formada.

Os valores dos dados operacionais para utilização do forno na seqüência de preparação que antecede a fusão foram determinados, com a formação de vácuo (27 inHg – 685,8 Torr - 0,0914 MPa) no interior do forno e a introdução de gás argônio pressurizado (22 inHg – 558,8 Torr - 0,0745 MPa), estabeleceu-se uma atmosfera de depressão, com baixa concentração de oxigênio. A depressão garante a vedação do sistema (0,167 atm – 127 Torr - 0,0169 MPa), e a partir dessas condições foram fundidos os botões.

A temperatura atingida no interior do forno atingiu valores suficientes para a fusão do cobre (1085 °C) e bem superiores a do magnésio (650 °C), devido a esses valores de pressão e temperatura o magnésio atingiu o ponto de ebulição, causando perda na porcentagem final de magnésio da liga, FIG. 12.



FIGURA 12. Diagrama de fases, pressão e temperatura do magnésio [35].

Recapitulando, para obtenção dos fios de ligas cobre com magnésio, foi adotado o procedimento de primeiramente fundir pequenas quantidades (botões) dos componentes envolvidos em proporções estabelecidas no primeiro ponto eutético junto à solução sólida, lado esquerdo do diagrama de fases, 90,3 % de cobre e 9,7 % de magnésio, FIG. 13. Obteve-se então os denominados botões. Para tal, foram separadas e pesadas quantidades de material, cobre e magnésio, para compor vinte botões. A partir destes botões foi realizada a sua diluição com o cobre para obterem-se três ligas com as porcentagens em massa teóricas de 0,2 %; 0,4 %; 0,6 %. Entretanto, ao fundirem-se os materiais no forno a arco, percebeu-se que após a pesagem dos botões, parte do magnésio evaporou, impregnando a campânula e o visor com fuligem opaca.



FIGURA 13. 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 [26,36].

A confecção de 20 botões e como a cavidade da soleira do forno utilizada tinha um volume de 9 cm<sup>3</sup>, isto e correspondeu a uma massa de cobre de 80 g. Então, fez-se um cálculo das cargas de cobre e magnésio nas proporções mostradas na TAB. 4, para compor a liga eutética.

TABELA 4. Composição em massa de cobre e magnésio para confecção dos botões na composição eutética.

	Liga cobre-magnésio (eutético) (90,3 Cu - 9,7 Mg) % em massa									
Número da amostra	Comp. A pesado Cu	Comp. B calculado Mg	Comp. B* pesado Mg	Composto A+B* Cu+Mg	A+B* após fusão	A+B* fusão decap)	Perda Mg	Perda Mg (%)	A+B* após fusão - A	A+B* fusão (decap) - Cu (A) Mg
				(g)						
1	36,29	3,90	3,92	40,21	40,01	38,80	0,20	0,50	3,72	2,51
2	41,48	4,46	4,44	45,92	45,72	45,13	0,20	0,44	4,24	3,65
3	42,60	4,58	4,56	47,16	46,82	46,39	0,34	0,72	4,22	3,79
4	43,08	4,63	4,63	47,71	47,43	47,02	0,28	0,59	4,35	3,94
5	43,31	4,65	4,67	47,98	47,43	46,73	0,55	1,15	4,12	3,42
6	43,64	4,69	4,70	48,34	47,98	47,52	0,36	0,74	4,34	3,88
7	44,28	4,76	4,78	49,06	48,43	47,97	0,63	1,28	4,15	3,69
8	45,78	4,92	4,91	50,69	50,39	49,41	0,30	0,59	4,61	3,63
9	45,94	4,94	4,93	50,87	50,35	49,91	0,52	1,02	4,41	3,97
10	46,38	4,98	5,00	51,38	50,82	50,16	0,56	1,09	4,44	3,78
11	47,11	5,06	5,06	52,17	51,71	50,84	0,46	0,88	4,60	3,73
12	47,45	5,10	5,09	52,54	51,88	51,10	0,66	1,26	4,43	3,65
13	47,68	5,12	5,12	52,80	52,42	51,96	0,38	0,72	4,74	4,28
14	47,68	5,12	5,13	52,81	52,54	51,96	0,27	0,51	4,86	4,28
15	48,51	5,21	5,22	53,73	53,21	52,70	0,52	0,97	4,70	4,19
16	48,58	5,22	5,22	53,80	53,55	53,09	0,25	0,46	4,97	4,51
17	50,09	5,38	5,38	55,47	55,05	54,28	0,42	0,76	4,96	4,19
18	53,30	5,73	5,71	59,01	58,55	57,70	0,46	0,78	5,25	4,40
19	58,50	6,29	6,28	64,78	64,17	63,33	0,61	0,94	5,67	4,83
20	60,40	6,49	6,49	66,89	66,51	65,65	0,38	0,57	6,11	5,25

#### 3.3.2 Forno elétrico resistivo

Foi efetuado um balanço de massa com a adição de quantidades de cobre necessárias aos botões na composição eutética, para obtenção das várias ligas diluídas com composição controlada a serem fundidas no forno resistivo. A TAB. 5 indica as quantidades de cobre e magnésio utilizadas para as ligas nas várias corridas.

Após a obtenção dos botões da liga mãe, no forno a arco elétrico, com composição eutética foi efetuado um balanço de massa, com a adição de quantidades de cobre, necessárias a obtenção das várias ligas diluídas com composição controlada, dentro da composição de solução sólida, num forno elétrico com aquecimento resistivo, sob atmosfera de gás inerte. A TAB.5 indica as quantidades de cobre e magnésio utilizadas para as ligas nas várias corridas. Foram vazadas sete corridas no total, duas de cobre puro e cinco com as composições teóricas de, 0,2 %, 0,4 % e 0,6 % em massa de magnésio, às corridas produziram lingotes que foram usinados e homogeneizados.

TABELA 🗄	5.	Bala	nço	de	massa,	quan	itida	des	de	СС	bre	е	mag	nésio	ра	ara
diluição d	la	liga	nas	pro	oporções	0,2	%,	0,4	%	е	0,6	%	em	mass	а	de
magnésio	. P	ara a	is co	rrid	as 5, 6 e	7 for	am	usac	las	du	as n	nas	sas o	de cob	re	

Corrida	Massa de cobre	Massa de cobre (total)	Massa de cobre (total) + botão	Mg 0,2 sem botão	Mg 0,4 sem botão	Mg 0,6 sem botão	Total Mg com botão	Massa Mg botão	Número da amostra
				(	g)				
1	668,2	668,2							
2	706,4	706,4							
3	519,4	519,4	555,7		2,08		2,22	2,51	1
4	546,0	546,0	591,8			3,28	3,55	3,63	8
5	572,1	110/ 5	1253.0		2,29		5.01	1 83	10
5	622,4	1194,5	1255,0		2,49	-	3,01	4,00	19
6	668,0	1304 4	1/37 7	1,34			2.88	3 1 2	5
0 <u> </u>	726,4	1394,4	1437,7	1,45			2,00	3,42	5
7	627,4	1258 9	58,8 1360,7			3,76	8 16	8,16 8,91	16-18
/ -	631,4	1230,0				3,79	0,10		

Para a fusão das ligas foi utilizado um forno com aquecimento resistivo, tipo mufla, com capacidade para atingir temperatura de 1200 °C. O conjunto é composto pelo forno, cilindro de gás inerte e dispositivo borbulhador, que possibilita a manutenção de uma atmosfera com pressão positiva no interior da câmara do forno através da injeção do argônio por uma tubulação com controles de pressão e vazão 18 MPa e 5 L/min, respectivamente. A visualização do fluxo de argônio foi observada pela formação de bolhas na superfície da água contida no reservatório plástico ao lado do forno. O forno possui um controlador eletrônico de potência com uma rampa de aquecimento até estabelecer a temperatura máxima desejada de 1200 °C. O conjunto pode ser visto na FIG. 14.



FIGURA 14. Foto do forno com circulação de gás inerte (argônio) e dispositivo borbulhador.

## 3.3.3 Cadinho

Para que as matérias primas, componentes da elaboração da liga fossem fundidas, o cobre mais os botões da liga eutética, foi projetado e confeccionado um cadinho de grafite com revestimento externo de aço inoxidável (FIG. 15). O cadinho foi confeccionado com grafite grau MFP-7, de boa usinabilidade e resistência mecânica. A escolha do grafite deveu-se ao fato do material ser inerte as cargas, pois não há histórico de formação de carboneto de cobre e resistir a

altas temperaturas. O suporte de aço inoxidável forneceu a resistência mecânica para suportar a manipulação com uma tenaz, conforme mostra a FIG. 16. A capacidade volumétrica do cadinho foi de 280 cm<sup>3</sup> e foi calculada em função do tamanho do habitáculo do forno, contando-se com um espaço suficiente para manipulação e movimentação do conjunto.



FIGURA 15. Desenho esquemático da capa de revestimento em aço inoxidável e do cadinho de grafite.



FIGURA 16. Cadinho de grafite com revestimento em aço inoxidável, com capacidade volumétrica de 280 cm<sup>3</sup> para fusão da liga de cobre.

Após a fusão do cobre e atingida à temperatura na qual a carga total se estabiliza-se na temperatura de 1200 °C, foram então feitas as adições dos botões, novamente aquecendo-se de toda massa do conjunto cadinho-liga mãe, para atingir a temperatura estabelecida de 1200 °C.

# 3.3.4 Lingoteira

Uma lingoteira foi projetada e confeccionada em cobre, a partir de uma barra com diâmetro nominal de 50 mm (vide FIG. 17). A capacidade volumétrica total, volume do corpo cilíndrico (71 cm<sup>3</sup>) mais volume do massalote (15 cm<sup>3</sup>), ficou com 86 cm<sup>3</sup>, suficiente para produzir lingotes com diâmetro de 19 mm por 250 mm de comprimento, o que correspondeu em cobre, a uma barra sem o massalote de cerca de 630 g.



FIGURA 17. Desenho esquemático da lingoteira de cobre, mostrando o detalhe do corte AA, do corpo bipartido com fixação por parafusos.

O corpo da lingoteira é bipartido no seu eixo longitudinal, com fixação por parafusos e o fundo da mesma é independente. Este conjunto facilitou a extração das barras do fundido, vide FIG. 18.



FIGURA 18. Lingoteira bipartida de cobre, com volume de 86 cm<sup>3</sup>.

Resumindo, primeiramente fundiu-se o cobre puro no cadinho de grafite, adicionando-se então a quantidade em massa de botões necessários para atingir a porcentagem próxima da composição final da liga. Tentou-se melhorar a homogeneização da mistura com uma haste de grafite, em seguida o conjunto retornou ao forno para a recuperação da temperatura. Após atingir a temperatura de 1200 °C, vazou-se o metal na lingoteira de cobre, obtendo-se um lingote cilíndrico (vide FIG. 19). Foram realizadas sete corridas, as duas primeiras com 100 % de cobre puro para obtenção de um elemento de controle, as demais com porcentagens que resultaram em composições que determinaram três famílias de ligas.



FIGURA 19. Sequência operacional da fusão e vazamento da liga.

Após o vazamento das corridas na lingoteira, abertura do molde e retirada dos lingotes cilíndricos, foram serradas as extremidades da base e do massalote no topo, para análise química e medição de dureza. Foi feito um faceamento nas extremidades por usinagem cilíndrica externa, para retirada de carepas e irregularidades superficiais (vide FIG. 20).



FIGURA 20. Lingotes usinados com diâmetro de 18 mm prontos para o beneficiamento mecânico (forjamento rotativo).

# 3.4 Tratamento térmico do fundido

As ligas metálicas fundidas, após solidificação podem apresentar heterogeneidades de composição, denominadas de segregação. As segregações são indesejáveis e devem ser diminuídas por difusão através do tratamento térmico de homogeneização. Este tratamento que foi realizado no forno resistivo sob atmosfera de argônio com as barras distribuídas uniformemente e aquecidas a uma temperatura de 910 °C por um período de 2 h, com resfriamento no interior do próprio forno, vide FIG. 21.



FIGURA 21. Tarugos obtidos de cobre puro e ligas Cu-Mg durante o tratamento térmico de homogeneização a 910 °C por 2 h.

## 3.5 Forjamento rotativo

Após o tratamento térmico de homogeneização, as barras foram jateadas com granalhas de areia para retirada óxidos superficiais. As barras foram cortadas nas extremidades para retirada de material para ensaio de dureza, antes da operação de forjamento rotativo. Foram utilizados três equipamentos para redução da área da seção transversal. Foi obedecida uma sequência de reduções sucessivas, através de conjuntos de matrizes com diâmetros determinados. Um equipamento de porte maior foi utilizado para uma primeira redução das barras cilíndricas com 18 mm de diâmetro permitindo uma redução para o diâmetro de 16 mm (FIG. 22), Este forjamento rotativo foi executado nos laboratórios da EEL-USP (Escola de Engenharia de Lorena).



FIGURA 22. Operador introduzindo a barra da liga cobre-magnésio em uma forja rotativa para redução de diâmetro de 18 mm até 16 mm.

Empregou-se um segundo equipamento, que reduziu em 17 passes sucessivos o diâmetro de 16 mm para 2,84 mm, FIG. 23. As operações com as ferramentas da forja rotativa seguiram uma sequência de acordo com a tabela de redução (vide TAB. 6). Para cada redução de diâmetro era necessária a troca do conjunto das matrizes, cada conjunto era composto de quatro peças, que em função de seu perfil e seu movimento relativo alternativo / rotativo, determinava o diâmetro do tarugo após cada passe (FIG. 24).



FIGURA 23. Conjunto de matrizes composta de quatro peças e detalhe do perfil interno da ferramenta.

Diâmetro (pol)	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	% RA	% de redução	Redução (mm)	% RA (final)
0,575	14,61	167,530	15	8	1,27	
0,531	13,49	142,872	15	8	1,12	
0,490	12,45	121,660	15	8	1,04	
0,450	11,43	102,608	16	8	1,02	
0,410	10,41	85,178	17	8	1,02	
0,375	9,53	71,256	16	8	0,89	
0,343	8,71	59,614	16	9	0,81	
0,312	7,92	49,325	17	9	0,79	
0,280	7,11	39,726	19	10	0,81	
0,250	6,35	31,669	20	11	0,76	
0,230	5,84	26,805	15	8	0,51	
0,210	5,33	22,346	17	9	0,51	
0,190	4,83	18,292	18	9	0,51	
0,172	4,37	14,990	18	9	0,46	
0,155	3,94	12,174	19	10	0,43	
0,140	3,56	9,931	18	10	0,38	
0,112	2,84	6,356	36	10	0,71	96,8

TABELA 6. Sequência de reduções utilizadas para redução da seção dos fios.



FIGURA 24. Forja rotativa para redução de diâmetro até 2,84 mm.

Com a seqüência de operações de forjamento obteve-se uma redução final de área de 96,79 %, transformando as barras de 15,88 mm de diâmetro em fios de 2,84 mm de diâmetro.

A seqüência de operações é ilustrada na FIG. 25, onde as etapas da primeira redução com o equipamento maior é iniciada e as demais etapas com o equipamento menor são finalizadas.

Uma terceira forja rotativa, equipamento utilizado nas dependências da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM), da UNICAMP, reduziu o diâmetro de 2,84 mm para 2,40 mm de diâmetro, preparando assim, os fios para um último trabalho mecânico de trefilação para uniformização da superfície e aumento da resistência mecânica.

## 3.6 Jateamento dos fios

Uma etapa que antecedeu a operação de trefilação foi o jateamento com granalhas de areia. Os fios foram enrolados para permitir seu acesso à cabine do equipamento e de forma que toda a superfície dos fios pudesse ser limpa de forma uniforme. O objetivo do jateamento foi o de retirar qualquer tipo de resíduo contaminante superficial que pudesse ter sido depositado nos fios em etapas anteriores de forjamento rotativo, e criar uma rugosidade que permitisse que um sabão lubrificante se depositasse na superfície dos fios permitindo e facilitando a sua passagem pelo orifício da fieira, ferramenta que determinou o diâmetro final do fio.



FIGURA 25. Operações de forjamento rotativo a frio, entrada e saída de material.

# 3.7 Trefilação

Para executar o último processamento mecânico a frio de redução de diâmetro e regularização da superfície, foi utilizada uma fieira com diâmetro interno de 2,20 mm (vide FIG. 26). Para a operação de trefilação, partiu-se de um fio com 2,40 mm, obtido na terceira etapa do forjamento rotativo. Foi utilizada uma

morsa de bancada para a fixação da fieira, foi feito uma redução na ponta do fio para permitir sua passagem pelo orifício da fieira e com um alicate de pressão foi preza a ponta do fio e puxado manualmente o fio através do orifício, procedimento em escala de laboratório. Utilizou-se como lubrificante um sabão líquido que facilitou a operação e que foi realizada de uma única vez. Em um único passe reduziu-se o diâmetro dos fios de 2,40 mm, até o diâmetro final de 2,20 mm.



FIGURA 26. Fieira com diâmetro de 2,2 mm, utilizada na operação de trefilação dos fios.

### 3.8 Tratamento térmico dos forjados

Com as sucessivas reduções de diâmetro o material foi adquirindo cada vez uma maior dureza, dificultando as etapas de redução posteriores. Para tanto os fios foram submetidos ao tratamento térmico de recristalização, aquecimento a 510 °C por 1 h, seguido de resfriamento ao ar, para adequação da dureza e redução de tensões internas.

## 3.9 Tratamento térmico dos fios

Foi realizado em todos os fios, após a operação de trefilação, um tratamento térmico em forno resistivo na temperatura de 510 °C durante o período de 1 h e posterior resfriamento ao ar, com objetivo de aliviar as tensões. Todos os

ensaios que se seguiram, químicos, físicos e mecânicos, foram executados nesta condição.

# 3.10 Ensaios mecânicos

# 3.10.1 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados nos laboratórios de ensaios mecânicos do CCTM-IPEN. Foi utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos, (FIG. 27). Foram medidos os diâmetros iniciais ( $\Phi_0$ ) dos fios e seus comprimentos iniciais ( $I_0$ ), foi medida a distância entre garras, no fio em seu ponto de tangencia com o suporte de fixação ( $I_0$ ), (FIG. 27 b). Após a aplicação da carga e deformação, com rompimento do fio, foi medido o comprimento final ( $I_f$ ) e o seu diâmetro final ( $\Phi_f$ ) (FIG. 28). A partir dos valores obtidos foram elaborados os gráficos de tensão de engenharia versus porcentagem de deformação dos ensaios dos fios de cobre puro e das ligas cobre-magnésio. Os ensaios seguiram o método padrão para teste de tração de materiais metálicos, sistema métrico, [37].



FIGURA 27. (a) Máquina universal de ensaios mecânicos. (b) detalhe do dispositivo de fixação do fio, com indicação da medida inicial do fio (l<sub>0</sub>).



FIGURA 28. (a) Seção transversal dos fios de cobre mostrada pelo projetor de perfil, diâmetro do fio ( $\Phi_f$ ). (b) Fios tracionados mostrando onde foram feitas as medições do comprimento final ( $I_f$ ).

### 3.10.2 Ensaio de dureza

Os ensaios de medição de dureza foram realizados em um durômetro equipado com indentador Vickers (FIG. 29) e as imagens das indentações foram medidas em um analisador de imagens (FIG. 30). Foi ensaiado o material retirado da base e do topo dos lingotes do bruto de fusão, o material dos lingotes do fundido homogeneizado e o material dos fios de cobre e da família de ligas de cobre-magnésio. Foi utilizado o método de teste para materiais metálicos de dureza Vickers, ASTM - E 92 - 82 [38]. As indentações foram feitas por penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada por uma carga de 15,625 kgf. Com as medidas das diagonais formadas pelos vértices opostos da base da pirâmide, feitas pelo analisador de imagens, foram calculadas as durezas Vickers dos corpos de prova.



FIGURA 29. Durômetro usado nas medidas de dureza Vickers com carga de 15,625 kgf.



FIGURA 30. Analisador de imagens e amostra de indentação no fio.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Fusão

A rota utilizada para fusão em forno resistivo mostrou limitação na resposta de aquecimento, pois os elementos resistivos de aquecimento disponíveis limitaram a temperatura a 1150 °C, próxima a temperatura de fusão do cobre (1085 °C). Com uma demora em atingir o superaquecimento, o procedimento de diluição da liga tornou-se muito demorado, cerca de quatro horas até atingir a temperatura de fusão, e depois para manipulação do cadinho, adição dos botões, mistura mecânica e com a abertura da tampa do forno e consequente perda de calor, novamente um tempo excessivo até restabelecer a temperatura de fluidez do líquido para verter-se na lingoteira.

Todos os cuidados com o controle do tempo não evitaram o fenômeno de gota fria, causando em alguns lingotes, defeitos de fusão e irregularidades superficiais. A retirada de material para regularização da superfície dos lingotes em forma de barras cilíndricas foi feita por usinagem em torno mecânico, operação que precedeu o forjamento rotativo a frio. Devido aos trabalhos de conformação mecânica terem sido feitos a frio, os defeitos oriundos da fundição puderam se propagar para os fios, alterando principalmente os resultados dos ensaios mecânicos.

O cadinho de grafita mostrou-se apropriado a este tipo de liga, resistindo aos vários ciclos térmicos, sem trincas, apresentando um desgaste maior nas bordas, com uma vida útil de 10 corridas de fusão.

Os valores calculados inicialmente previstos para a obtenção de uma família de ligas cobre-magnésio com 0,2 %, 0,4 % e 0,6 % em massa de magnésio não foram alcançados, em função da evaporação de magnésio Foram retiradas quatro amostras para análise química, dos lingotes obtidos da fusão, uma de cobre e as demais da família de ligas cobre magnésio, após tratamento térmico de homogeneização, os resultados estão mostrados na TAB. 7.

TABELA 7. Análise química das quatro corridas, liga diluída fundida, após homogeneização dos lingotes. Destaque para o elemento magnésio, que corresponde na mesma faixa de valores das ligas normalizadas número UNS C15500 (0,08 - 0,13) % massa de Mg e C18661 (0,1 - 0,7) % massa de Mg.

Elementos (%) massa									
Liga	Mg	Fe	Ag	S	Cu				
1	-	0,0012	0,0019	0,0011					
2	0,134	0,0012	0,0018	-	Bal				
3	0,251	0,0012	0,0018	-	Dai.				
4	0,34	0,0011	0,0018	-					

- Não detectado.

Ao longo dos processos de fusão, quando da primeira 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 eutética no forno elétrico resistivo de fusão, houve-se perda de magnésio. Os valores das perdas de magnésio por processo de fusão estão mostrados na TAB. 8.

A partir dos resultados obtidos entre os valores calculados e medidos de porcentagem em massa de magnésio presentes na familia de ligas foi possível levantar uma curva de comportamento para determinar a quantidade de adição de magnésio. Esse comportamento é mostrado no gráfico da FIG. 31, válido para as condições descritas, neste trabalho.



FIGURA 31. Variação da quantidade de elemento de liga adicionado (teórica) e o teor de elemento de liga resultante (real), isto demonstra a perda do magnésio no processo de fusão da liga (Mg % em massa).

TABELA 8. Comparação da massa inicial de magnésio pesada, antes da fusão, com a massa residual de magnésio após a primeira fusão, em porcentagem e comparação de porcentagem de magnésio calculada no lingote com a análise química do lingote.

Nu an	úmero da nostra	Massa de Mg pesada (inicial) (g)	Massa de Mg (após primeira fusão) (g)	Primeira fusão % perda de Mg	% (massa) calculada no lingote	Análise química no lingote % (massa)	Segunda fusão % perda de Mg
	1	3,92	3,72	5,10	0,40	0,25	37,25
	2	4,44	4,24	4,50	-	-	-
	3	4,56	4,22	7,46	-	-	-
	4	4,63	4,35	6,05	-	-	-
	5	4,67	4,12	11,78	0,20	0,13	33,00
	6	4,70	4,34	7,66	-	-	-
	7	4,78	4,15	13,18	-	-	-
	8	4,91	4,61	6,11	0,60	0,34	43,33
	9	4,93	4,41	10,55	-	-	-
	10	5,00	4,44	11,20	-	-	-
	11	5,06	4,60	9,09	-	-	-
	12	5,09	4,43	12,97	-	-	-
	13	5,12	4,74	7,42	-	-	-
	14	5,13	4,86	5,26	-	-	-
	15	5,22	4,70	9,96	-	-	-
	16	5,22	4,97	4,79	0,60	0,34	43,33
	17	5,38	4,96	7,81	-	-	-
	18	5,71	5,25	8,06	0,60	0,34	43,33
	19	6,28	5,67	9,71	0,40	0,25	37,25
	20	6,49	6,11	5,86	-	-	-

- Ausente.

## 4.2 Ensaios de tração

Para os ensaios de tração foram utilizados fios de cobre e fios da família da ligas cobre magnésio trabalhados a frio por forjamento e trefilação e submetidos ao tratamento térmico de recristalização a temperatura de 510 °C por um período de 1 h. No levantamento dos dados para a elaboração das curvas de tensão versus deformação em função do número de testes de tração efetuados, foram destacados alguns valores médios como limite de resistência a tração e o limite de escoamento, alongamento total medido no gráfico tensão – deformação e

redução em área.

Foi separado certo número de amostras de fios para cada grupo de composição, família de ligas e cobre com adição de magnésio, vide TAB. 9, foram feitas séries de ensaios de tração individuais para cada grupo de amostras e grupos de curvas com todos os quatro ensaios por famílias, foram feitas medidas dos limites de resistência e limites de escoamento individuais do cobre e das ligas de magnésio, conforme valores das TABS. 10, 11, 12, 13 e 14.

TABELA 9. Grupos de amostras das famílias de ligas e cobre para ensaio de tração.

Crupes	Família de ligas (% massa Mg)					
Grupos -	Cu	0,13	0,25	0,34		
	Amostras					
1	4	-	-	-		
2	-	4	-	-		
3	-	-	4	-		
4	-	-	-	4		

Para o grupos 1 a 4 de ensaios em cobre puro e ligas de cobres, é apresentado na TAB. 10 um comparativo do limite de resistência e de escoamento médios e variação total em função da quantidade de magnésio adicionada.

TABELA 10. Valores médios de limite de resistência a tração e limite de escoamento para as amostras de fios ensaiados. A variação do limite de resistência e do limite de escoamento após a adição de magnésio em relação ao cobre puro e a adição máxima de magnésio de 0,34% em massa é mostrado nas colunas LR % e LE %.

FIO	LR	LE <sub>0,2</sub>	LR	LE
(% massa Mg)	(MPa)	(MPa)	%	%
Cobre puro	189	120		
0,13	217	135	24	11
0,25	239	128	24	
0,34	235	133		

Para cada grupo de ligas 1 a 4, será apresentado a seguir os grupos individualmente.

#### Cobre puro – grupo 1

Para o grupo 1 que trata das ligas de cobre puro, os resultados dos ensaios mecânicos são apresentados na TAB. 11

TABELA 11. Valores dos ensaios individuais dos fios de cobre puro para limites de resistência, limite de escoamento, alongamento total e redução em área com o valores médios e desvio padrão dos quatro ensaios.

Cobre	LR (MPa)	LE <sub>0,2</sub> (MPa)	AL%	RA%
I	189	116	38,5	47,1
II	189	104	36,6	50,4
III-2	184	142	31,0	47,1
III-3	193	118	32,6	53,5
Média	189	120	35	50
Desvio padrão	4	16	4	3

Nas FIGS. 32 a 35 são mostradas curvas tensão - deformação típicas para a amostras de cobre puro. Na FIG. 36 as curvas de tensão - deformação típicas para as fusões de cobre puro são mostradas juntas, sendo que as diferenças na região elástica para as amostras se devem provavelmente a problemas de ancoramento nas garras da máquina universal de ensaios mecânicos.







FIGURA 33. Gráfico tensão versus deformação fio de cobre, amostra Cobre II.



FIGURA 34. Gráfico tensão versus deformação fio de cobre, amostra Cobre III-2.



FIGURA 35. Gráfico tensão versus deformação fio de cobre, amostra Cobre III-3.



FIGURA 36. Gráfico tensão versus deformação fio de cobre sem elemento de liga, foram ensaiadas quatro amostras.

### Cobre 0,13% Mg – grupo 2

Para o grupo 2 de ensaios de liga de cobre com 0,13% de Mg em massa, é as propriedades mecânicas são apresentadas na TAB. 12 a seguir.

TABELA 12. Valores dos ensaios individuais dos fios da liga cobre 0,13 % magnésio em massa, para limites de resistência, limite de escoamento, alongamento total e redução em área com o valores médios e desvio padrão dos quatro ensaios.

0,13 % Mg	LR (MPa)	LE <sub>0,2</sub> (MPa)	AL%	RA%
I-1	212	129	29,4	50,4
III-2	222	124	33,4	53,5
II	203	137	27,2	53,5
III-1	230	151	41,2	50,4
Média	217	135	33	52
Desvio padrão	12	12	6	2

Nas FIGS. 37 a 40 são mostradas curvas tensão - deformação típicas para a amostras de cobre com 0,13% de Mg em massa. Na Fig. 41 as curvas de tensão - deformação típicas para as fusões de liga de cobre com 0,13% de Mg são mostradas juntas, sendo que as diferenças na região elástica para as amostras se devem provavelmente a problemas de ancoramento nas garras da máquina universal de ensaios mecânicos.



FIGURA 37. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,13 % em massa de Mg, amostra Mg I-1.



FIGURA 38. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,13 % em massa de Mg, amostra Mg II.



FIGURA 39. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,13 % em massa de Mg, amostra Mg III-1.



FIGURA 40. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,13 % em massa de Mg, amostra Mg III-2.



FIGURA 41. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,13 % em massa de Mg, foram ensaiadas quatro amostras.

### Cobre 0,25% Mg – grupo 3

Para o grupo 3 de ensaios de liga de cobre com 0,25% de Mg em massa, é as propriedades mecânicas são apresentadas na TAB. 13 a seguir.

TABELA 13. Valores dos ensaios individuais dos fios da liga cobre 0,25 % magnésio em massa para limites de resistência, limite de escoamento, alongamento total e redução em área com o valores médios e desvio padrão dos quatro ensaios.

0,25 % Mg	LR (MPa)	LE <sub>0,2</sub> (MPa)	AL%	RA%
I	235	121	37,8	43,8
II	266	132	38,4	47,1
III-1	247	152	39,6	47,1
III-2	209	107	25,2	43,8
Média	239	128	35	45
Desvio padrão	24	19	7	2

Nas FIGS. 42 a 45 são mostradas curvas tensão - deformação típicas para a amostras de cobre com 0,25% de Mg em massa. Na Fig. 46 as curvas de tensão - deformação típicas para as fusões de liga de cobre com 0,25% de Mg são mostradas juntas, sendo que as diferenças na região elástica para as amostras se devem provavelmente a problemas de ancoramento nas garras da máquina universal de ensaios mecânicos.



FIGURA 42. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,25 % em massa de Mg, amostra Mg I.



FIGURA 43. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,25 % em massa de Mg, amostra Mg II.



FIGURA 44. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,25 % em massa de Mg, amostra Mg III-1.



FIGURA 45. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,25 % em massa de Mg, amostra Mg III-2.



FIGURA 46. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,25 % em massa de Mg, foram ensaiadas quatro amostras.

### Cobre 0,34% Mg – grupo 4

Para o grupo 4 de ensaios de liga de cobre com 0,34% de Mg em massa, é as propriedades mecânicas são apresentadas na TAB. 14 a seguir.

TABELA 14. Valores dos ensaios individuais dos fios da liga cobre 0,34 % magnésio para limites de resistência, limite de escoamento, alongamento total e redução em área com o valores médios e desvio padrão dos quatro ensaios.

0,34 % Mg	LR (MPa)	LE <sub>0,2</sub> (MPa)	AL%	RA%
I	237	130	34,2	65,1
II	231	121	32,0	62,4
III-1	249	158	40,2	59,5
III-2	224	123	34,7	59,5
Média	235	133	35	62
Desvio padrão	11	17	3	3

Nas FIGS. 47 a 50 são mostradas curvas tensão - deformação típicas para a amostras de cobre com 0,34% de Mg em massa. Na Fig. 51 as curvas de tensão - deformação típicas para as fusões de liga de cobre com 0,34% de Mg são mostradas juntas, sendo que as diferenças na região elástica para as amostras se devem provavelmente a problemas de ancoramento nas garras da máquina universal de ensaios mecânicos.



FIGURA 47. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,34 % em massa de Mg, amostra Mg I.



FIGURA 48. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,34 % em massa de Mg, amostra Mg II.


FIGURA 49. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,34 % em massa de Mg, amostra Mg III-1.



FIGURA 50. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,34 % em massa de Mg, amostra Mg III-2.



FIGURA 51. Gráfico tensão versus deformação, fio liga 0,34 % em massa de Mg, foram ensaiados quatro amostras.

# 4.3 Ensaio de dureza

As medições de dureza foram feitas em amostras retiradas dos fios, os valores para a amostra de cobre apresentou um valor de 61 HV, próxima ao valor da liga 0,13 % em massa de magnésio, os valores de dureza aumentaram com o aumento da porcentagem para as demais ligas, atingindo um valor próximo a 100 HV para a liga com 0,34 % em massa de magnésio.

As medidas dos valores de dureza tiveram um aumento correspondente em função da variação da porcentagem em massa da quantidade de magnésio nas amostras, exceção para a amostra com 0,13 % em massa, como mostrado na FIG. 52.



FIGURA 52. Gráfico de dureza Vickers versus teor de Mg, % em massa, para os fios após tratamento térmico de recristalização a 510 °C por 1 h.

Foram medidas as durezas dos lingotes em bruto de fusão de amostras retiradas da base e do topo do cobre e da família de ligas de cobre-magnésio, os valores das medidas de dureza apresentaram um aumento com a adição de magnésio na liga, base e topo tiveram um aumento na dureza, com valores de dureza maiores para as amostras da base.

Foram feitas medições de dureza em todas as amostras das barras após um tratamento térmico de homogeneização de 910 °C por duas horas, os valores de dureza aumentaram com o aumento da adição de magnésio na liga, entretanto, apresentaram valores de dureza menores que as amostras dos lingotes do bruto de fusão, como mostrado no gráfico da FIG. 53.



FIGURA 53. Valores de dureza Vickers (carga de 15,625 kgf) das barras fundidas em bruto, base e topo, e barras após tratamento térmico de homogeneização a 910 °C por 2 h.

#### 4.4 Condutividade elétrica

Foram separadas quatro amostras de fios com 2,2 mm de diâmetros por 1,5 m de comprimento, sendo um fio de cobre e os demais fios da família de ligas cobre magnésio. As medições de condutividade elétrica foram feitas nos fios trabalhados a frio por trefilação e tratados termicamente na temperatura de 510 °C por uma hora.

Para a família de ligas cobre-magnésio com variação de concentrações na faixa de 0,1 % - 0,35 % em massa de soluto houve uma variação linear da condutividade elétrica com a concentração em massa de magnésio, conforme o gráfico da FIG. 54.

Como conseqüência da adição do magnésio no cobre foi registrada queda de condutividade elétrica, o cobre sem adição do elemento de liga magnésio apresentou condutividade maior que 100 % IACS, enquanto as famílias de ligas apresentaram valores decrescentes à medida que o elemento de liga aumentou, até atingir valores de condutividade da ordem de 60 % IACS.

O fio de cobre e os fios da família de ligas cobre-magnésio foram tratados termicamente a temperatura de 510 °C por um período de 1 hora (recristalização).



FIGURA 54. Gráfico de condutividade elétrica versus teor de magnésio (% em massa).

## 4.5 Condutividade elétrica e resistência a tração

As amostras dos fios foram ensaiadas em tração até a sua ruptura. Os valores dos limites de ruptura foram então relacionados com os índices IACS dos fios e representados no gráfico da FIG. 55.

Observou-se que a variação dos limites de resistência em MPa foi inversamente proporcional a variação dos índices de condutividade elétrica IACS, isto é, quanto maior o limite de resistência dos fios menor foi a sua condutividade elétrica.



FIGURA 55. Gráfico de variações de condutividade elétrica versus limite de resistência a tração.

Os valores dos limite de resistência à tração das ligas produzidas ficaram abaixo dos valores das ligas comerciais, como apresentado no diagrama da FIG. 56 (região de pontos demarcados). Os valores de condutividade elétrica das ligas produzidas ficaram acima da maioria das ligas comerciais, essas diferenças são em função dos tratamentos de recozimento, 510 °C por 1 hora, feitos após trabalho a frio de trefilação.

Os fios das ligas comerciais foram trabalhadas a frio em segundo estiramento, isto é, duplamente trefilado, favorecendo as características mecânicas em detrimento das características elétricas. Os trabalhos a frio fazem com que o material encrue e adquira uma resistência mecânica mais elevada ao mesmo tempo em que diminui sua condutividade.



FIGURA 56. Família de ligas, agrupadas (tratadas térmicamente após estiramento), comparadas com ligas comerciais (trabalhadas a frio, segundo estiramento).

De acordo com os resultados obtidos por MARTINEZ M. e FERNANDEZ A.I. et all [18] mostraram através de experimentos, FIG. 57, comportamentos de queda nos valores de limite de resistência a tração ápos tratamento térmico de recozimento em determinadas faixas de temperatura, e pelos experimentos descritos na FIG. 58 comportamento de melhora nos índices de condutividade após tratamento térmico de recozimento em determinadas faixas de temperatura por um período de uma hora.A partir desses resultados pode-se estabelecer um paralelo e concluir que as propriedades físicas e mecânicas, respectivamente, condutividade e resistência mecânica são concorrentes.



FIGURA 57. Valores de limite de resistência à tração após tratamento de recozimento em cobre eletrolitico (ETP) e ligas de cobre refinado a fogo (PMA1, PMA2 e PMA3 trabalhadas a frio) a diferentes temperaturas por uma hora [18].

As ligas que sofreram deformações por trabalhos a frio, tiveram uma melhoria nos valores de condutividade, após tratamento térmico em determinadas temperaturas por um período de uma hora.



FIGURA 58. Valores de condutividade após tratamento térmico a diferentes temperaturas, em cobre eletrolitico (ETP) e ligas de cobre (PMA1, PMA2 e PMA3) trabalhadas a frio a diferentes temperaturas por uma hora [18].

#### **5 CONCLUSÕES**

A opção pelo magnésio como elemento substitucional na composição da liga é devido ao ganho nas propriedades mecânicas em relação à reduzida perda de condutividade e de não ser um elemento causador de danos a saúde humana e deixar resíduos acumulativos no meio ambiente.

Os resultados obtidos nos ensaios se mostraram satisfatórios e confirmaram as alterações nas características físicas e mecânicas. O magnésio como elemento substitucional em solução sólida na liga de cobre contribuiu na melhora significativa das propriedades mecânicas assim como os processos mecânicos de forjamento e trefilação; o tratamento térmico resultou em uma melhora na condutividade dos fios. Os limites de escoamento e de resistência a tração tiveram seus valores melhorados com o aumento do teor de magnésio na liga, 11 % e 24 % respectivamente, enquanto houve queda nos valores de condutividade elétrica para cerca de 60 % IACS (*International Annealed Copper Standard*).

A melhora nas propriedades mecânicas, com a adição do elemento de liga magnésio, trouxe uma diminuição na condutividade, mas para valores entre 0,1 e 0,3 % massa de magnésio, os índices I.A.C.S. ficaram acima dos 60 %, indicando seu uso para aplicações em condutores elétricos.

Os trabalhos a frio fazem com que o material encrue e adquira uma resistência mecânica mais elevada ao mesmo tempo em que diminui sua condutividade.

### 6 TRABALHOS FUTUROS

O aprendizado no desenvolvimento de obtenção de uma família de ligas de cobre magnésio mostrou as dificuldades de unir a teoria com a prática, as informações disponíveis e a realidade do processo produtivo, os equipamentos, a dependência dos recursos humanos envolvidos, mas superadas as dificuldades ficam as inúmeras possibilidades para melhoria do trabalho desenvolvido.

Pode-se listar nesta mesma linha de pesquisa, a comparação entre os dados obtidos com os fios trabalhados a frio nas suas várias etapas de redução sem tratamento térmico posterior, com os fios encruados submetidos a determinadas faixas de aquecimento nos valores que dizem respeito à resistência mecânica e condutividade, curvas de recozimento de 50 em 50 °C para cada uma das ligas, efeitos do magnésio na recristalização do material e medir o potencial de corrosão.

Partindo-se para a obtenção de outras famílias de ligas de cobre, a adição de outros elementos, que não o magnésio, no cobre e suas consequências no desempenho dos produtos obtidos.

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. **KUTZ, M.** *Mechanical Engineers' Handbook.* 3<sup>a</sup> Ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2006.

2. **JOSEPH, G.; KUNDIG, J.A.K.** *Copper - Its Trade, Manufacture, Use and Environmental Status.* New York: ASM (International Copper Association), 1999.

3. **NEWTOW, J.; WILSON, C.L.** *Metallurgy of Copper.* New York: John Willey & Sons Inc, 1942.

4. **HOJDA, R.; KÖHLER, M.; RIEPE, U.; HECHER, S.** Nachhaltigkeit bei der Werkstoffentwicklung und Werkstoffherstellung. [Online] 2008. [Citado em: 20 de março de 2009.] http://www.sundwigermessingwerk.de/.

5. **JONES**, **W.R.D.** The magnesium-copper alloys. Part V - The copper rich alloys. *Journal of Institute of Metals.* 1936, Vol. 58.

6. COOK, W. T.; JONES, W.R.D. Preliminary experiments on the coppermagnésium alloys. *Journal of Institute of Metals.* 1926, Vol. 36.

7. COOK, W.T.; JONES, W.R.D. The copper-magnesium alloys. Part II. *Journal of Institute of Metals.* 1927, Vol. 38.

8. **JONES, W.R.D.** The copper-magnesium alloys. Part III. *Journal of Institute of Metals.* 1928, Vol. 4.

9. JONES, W.R.D. The copper-magnesium alloys. Part IV. *Journal of Institute of Metals.* 1931, Vol. 46.

10. **NOESEN, S.J.** *Vacuum Arc Melting, Consumable, Nonconsumable, and Skull. In: Tecniques of Metals Research VI.* New York: John Wiley and Sons, 1968. pp. 659-703.

11. **MUCSI, C.S.** Proposição de um processo alternativo à fusão via forno VAR para a consolidação de cavacos prensados de zircaloy e estudo do sistema dinâmico do arco elétrico. *Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares - IPEN/CNEN-SP.* São Paulo: s.n., 2005.

12. http://www.chemheritage.org/classroom/chemach/electrochem/heroulthall.html. [Online] Chemical Heritage Foundation, 11 de julho de 2010. [Citado em: 11 de julho de 2010.] http://www.chemheritage.org.

13. www.metalprices.com. *Metalprices.com.* [Online] 21 de março de 2010. [Citado em: 21 de março de 2010.]

14. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** B 105-94. *Standard specification for hard-drawn copper alloy wires for electric conductors.* 1994.

15. **MATERIALS, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND.** B-624. *Standard Specification for High-Strength, High-Conductivity Copper-Alloy Wire for Electronic Application.* 1999.

16. Wieland. *Site da Wieland*. [Online] [Citado em: 20 de agosto de 2007.] Highperformance copper alloy wire. http://www.wieland.de/internet/de/startseite.jsp.

17. LEHOUCQ, R. Copper in the transport systems of the future - The example of

the high-speed train. *European Copper Institute*. [Online] Junho de 2007. http://www. copper.org.

 MARTINEZ, M.; FERNANDEZ, A.I.; SEGARA, M.; XURIGUERA, H.;
ESPIELL, F.; FERRER, N. Comparative study of electrical and mechanical properties of fire-refined and electrolytically refined cold-drawn copper wires. [ed.] Springer Netherlands. *Journal of Materials Science*. 18, september de 2007, Vol. 42, pp. 7745-7749.

19. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** E 1004 - 09. Standard Test Method for Determining Electrical Conductivity Using the Electromagnetic (Eddy-Current) Method.

20. —. B 193 – 95. Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor *Materials.* 1995.

#### 21. Copper Development Association.

http://www.copper.org/resources/market\_data/pdfs/annual\_data.pdf. *Copper.org.* [Online] [Citado em: 27 de março de 2010.] http://www.copper.org.

22. XIKANG, C.; YUEJUN, F.; QI, Z. Copper-magnesium alloy strand production process thereof. *esp@cenet*. [Online] 12 de março de 2003. European Patent Office - CN 1401803. http://ep.espacenet.com.

23. **SALEH, J.** *Processing copper-magnesium alloys and improved copper alloy wire. US 2004/0238086 A1 US/Morristown*, NJ, 2 Dec 2004.

24. **MOTT, N.F.** Memories of early days in solid state physics. [ed.] The Royal Society. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences.* 1980, Vol. 371, pp. 56 - 66.

25. **CALLISTER Jr., W.D.** *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução.* Rio de Janeiro: LTC, 2002.

26. **OKAMOTO, H.** Phase diagrams for binary alloys. *Desk Handbook: Phase Diagrams for Binary Alloys.* Metals Park: ASM International, 2000.

27. DIETER, G.E. Metalurgia mecânica. Rio de Janeiro: Guanabara 2, 1981.

28. **SMALLMAN, R. E.** *Modern Physical Metallurgy.* 4<sup>a</sup> Edição. London : Butterworths, 1990.

29. **GODBOLE, R.P.; JHA, S.A.; MILANARUN, A.K.; MISHRA, A.K.** Thermodynamics of liquid Cu–Mg alloys. *Journal of Alloys and Compounds.* 363, 2004.

30. **SWALIN, R.A.** Thermodynamics of solids, John Wiley & Sons, 1972, 2<sup>nd</sup>. Ed.

31. PADILHA, A.F. Comunicação pessoal. 21 de fevereiro de 2009.

32. **PADILHA, A.F.; SICILIANO Jr., F.** *Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura.* 3 ed. rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. p. 232.

33. **SACHS, G.; VAN HORN, K.R.** *Practical Metallurgy, Applied Metallurgy and the Industrial Processing of Ferrous and Nonferrous Metals and Alloys.* Cleveland, Ohio: American Society for Metals, 1940. p. 139.

34. **JULIO Jr., O.** Contribuição ao Estudo da Fusão a Arco Sob Atmosfera de Gás Inerte da Esponja de Zircônio. *Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas*  Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN-SP. São Paulo: s.n., 1990. pp. 38 - 41.

35. **CEBRACO.** Textura do cobre e das baixas ligas de cobre. Diagramas de equilibrio, micrografias, aula nº 13. *Curso de Metalurgia e Metalografia.* 1968, Vol. II, p. 17 e 18.

36. **BAKER, H.** *Alloys Phase Diagrams.* [ed.] Metals Park. OH : American Society for Metals, 1992. p. 172. Vol. 2.

37. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** E 8M - 00. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]1.* 2000.

38. **AMERICAN, SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** E 92 - 82. *Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.* 2000.

39. **CEBRACO.** Cobre e suas ligas Aula nº 11. Noções básicas de diagrama de equilibrio de metais. *Cobre e Suas Ligas. Curso básico de metalurgia e metalografia.* Vol. I.