

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

INFLUÊNCIA DOS METAIS ALCALINOS TERROSOS Mg E Ca NO REFINO DE GRÃO DE LIGAS COBRE-ALUMÍNIO PASSÍVEIS DO EFEITO MEMÓRIA DE FORMA

Carlos Cássio de Alcântara, cassioalcantara@live.com¹
Ricardo Francisco Alves, ricardo_alves_francisco@hotmail.com¹
Tadeu Antônio de Azevedo Melo, tadeu@lsr.ct.ufpb.br¹
Danniel Ferreira de Oliveira, dannieldeoliveira@gmail.com¹
Gemerson Valois da Mota Cândido, gemerson@gmail.com²

¹Universidade Federal da Paraíba, Cidade Universitária, s/n - Castelo Branco, João Pessoa - PB, 58051-900.

²Instituto Federal do Piauí - Campus Teresina Central, Praça da Liberdade, 1597 - Centro, Teresina - PI, 64000-040.

Resumo: As ligas do sistema Cu-Al, dentre as ligas com EMF, destacam-se devido ao seu processamento relativamente simples e de baixo custo. Entretanto, alguns inconvenientes, incluindo a granulometria grosseira, baixa resistência ao envelhecimento e uma pobre estabilidade térmica, limitam sua aplicação. O tamanho de grão e a composição química são um dos principais fatores que determinam as propriedades em ligas policristalinas do sistema Cu-Al passíveis do efeito memória de forma. Neste trabalho foi verificada a influência do Mg e Ca nas ligas de Cu-Al. As ligas foram elaboradas sob atmosfera ambiente e caracterizadas por Microscopia Óptica, Difração Raios-X e Calorimetria Diferencial de Varredura. A adição de variados valores de magnésio e cálcio nas ligas permitiu elaborar um estudo sobre o efeito destes materiais no tamanho de grão das ligas. A Martensita foi observada em todas amostras à temperatura ambiente. A fase austenita tem início acima dos 350°C. O cálcio agiu eficazmente reduzindo o tamanho de grão da liga após a fusão, entretanto não funciona como bloqueador de crescimento de grão após o tratamento térmico.

Palavras-chave: Cu-Al-Ca, Cu-Al-Mg, Refino de Grão, Efeito Memória de Forma.

1. INTRODUÇÃO

O efeito memória de forma foi descoberto por Chang e Read (1951) em uma liga Au-47.5at%Pd, mas seu real desenvolvimento foi dado por Buehler, Gilfrich e Willey (1963) com o descobrimento da liga de NiTi. Ainda na década de 60, houve avanços nas ligas a base de cobre (PINA, 2006).

A descoberta das ligas com efeito memória de forma à base cobre foi uma alternativa em potencial para a substituição das ligas NiTi, pois as ligas a base de cobre são mais fáceis de serem conformadas, resultando numa redução do custo de processamento dessas ligas. Sendo esta economia a principal vantagem de tais ligas (PAIVA, 2004). Entretanto, as ligas a base de cobre possuem propriedades mecânicas inferiores às ligas NiTi. Alguns inconvenientes dessas ligas são a granulometria grosseira, a baixa resistência ao envelhecimento e a pobre estabilidade térmica. Apesar disso, o controle do tamanho de grão e da composição química dessas ligas é um processo essencial para a obtenção de boas propriedades térmicas e mecânicas.

Visando melhorar tais propriedades, realiza-se a inserção de um terceiro ou quarto elemento na composição deste sistema, modificando assim: temperaturas de transformação, grau de deformação, ductilidade, tamanho de grão entre outras propriedades metalúrgicas.

Yang et al (2009) realizaram um estudo sobre a adição de Cério em ligas de 70%Cu-26%Zn-4%Al como refinador de grão e a sua influência no comportamento das transformações de fase e propriedades mecânicas da liga. Verificou-se que a adição de Cério funciona como refinador de grão, pois a liga sem a adição deste elemento possui uma granulometria com mais de 1.000 µm, e com a adição deste elemento, chega-se a um refino de 30µm pela adição de 0,43% (fração em massa).

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um estudo sobre o efeito da adição dos elementos Mg e Ca nas propriedades termomecânicas (temperaturas de transformação, tamanho de grão e microestrutura) de ligas do sistema Cu-Al com efeito memória de forma.

2. METODOLOGIA

2.1. Elaboração das Ligas

As ligas Cu-Al-Mg foram elaboradas nas composições: Cu-11,8%Al-0,5%Mg, Cu-11,8%Al-1,0%Mg e Cu-11,8%Al-1,5%Mg (% em peso), e as ligas com Ca nas composições: Cu-11,8%Al-0,5%Ca, Cu-11,8%Al-1,0%Ca e Cu-11,8%Al-2,0%Ca (% em peso). A fusão das ligas foi realizada num forno de indução, em um cadinho de argila-grafite, em uma quantidade de 150g, sob atmosfera ambiente. A carga de ambas as ligas era composta de Cu e Al, comercialmente puros, sendo que, para as ligas de Mg, utilizou-se uma liga mãe de Al-15%Mg (% em peso), e para as ligas de Ca utilizou-se uma liga mãe de Ca-15%Al (% em peso). Após a fusão, as ligas foram vazadas em uma coquilha de seção circular com 27mm de diâmetro. O aquecimento indutivo foi realizado com auxílio de um gerador de alta frequência da Polytron com potência de saída de 8 KVA.

2.2. Tratamento Térmico

As ligas, após o processo de fundição, foram homogeneizadas por um tempo determinado de 12h e, imediatamente após serem retiradas do forno, foram temperadas em água à temperatura de 25°C. Os tratamentos foram realizados num forno tipo mufla da JUNG. A temperatura de homogeneização para os diferentes tipos de amostras está mostrada na Tab. 1.

Tabela 1. Temperatura de homogeneização das amostras.

Liga	Temperatura (°C)
Cu-11,8%Al-0,5%Ca	850
Cu-11,8%Al-0,5%Ca	750
Cu-11,8%Al-1,0%Ca	850
Cu-11,8%Al-2,0%Ca	950
Cu-11,8%Al-2,0%Ca	850
Cu-11,8%Al-2,0%Ca	750
Cu-11,8%Al-0,5%Mg	850
Cu-11,8%Al-1,0%Mg	850
Cu-11,8%Al-1,5%Mg	850

2.3. Processo Metalográfico

Após o tratamento térmico as amostras brutas de fusão passaram pelo processo metalográfico, onde foram previamente cortadas na direção axial. Logo após o corte, foram lixadas mecanicamente com auxílio de diferentes lixas com granulometria de 220, 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200. Em seguida, as amostras foram polidas com alumina sobre um disco giratório de feltro em uma máquina politriz. O método utilizado para o ataque químico foi o método de ataque por imersão, onde a superfície da amostra foi imersa em uma solução de cloreto férrico.

2.4. Microscopia Óptica

A observação da morfologia das fases presentes nas amostras foi realizada a temperatura de 25°C com auxílio de um microscópio óptico Axiotech 30 da Carl Zeiss e do software *Analysis*.

2.5. Difração de Raios X (DRX)

A identificação das fases presentes nas amostras foi realizada através de análise por Difração de Raios-X (DRX) em um difratômetro marca Shimadzu, modelo Lab X/XRD-6000, com passo de 0,02°, varredura de 20 a 90° e tempo de passo de 1s, utilizando a radiação Kalfa do cobre como fonte de radiação monocromática. O software *X'Pert HighScore Plus* foi utilizado para identificar as fases nos difratogramas obtidos do ensaio.

2.6. Determinação das Temperaturas de Transformação de Fase das ligas por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

As temperaturas de transformação de fase foram determinadas por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) utilizando-se um equipamento DSC-60 da Shimadzu, em taxas de aquecimento de 10°C/min e refrigeração a temperatura ambiente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Tratamento Térmico

Após o tratamento de têmpera, todas as ligas com adição cálcio apresentaram a formação de trincas e distorções nas faces das amostras. A amostra na Fig. 1 foi lixada para contrastar a trinca e para mostrar o desnível na face gerado pelas distorções. As ligas Cu-Al com adição de magnésio não apresentaram este fenômeno.

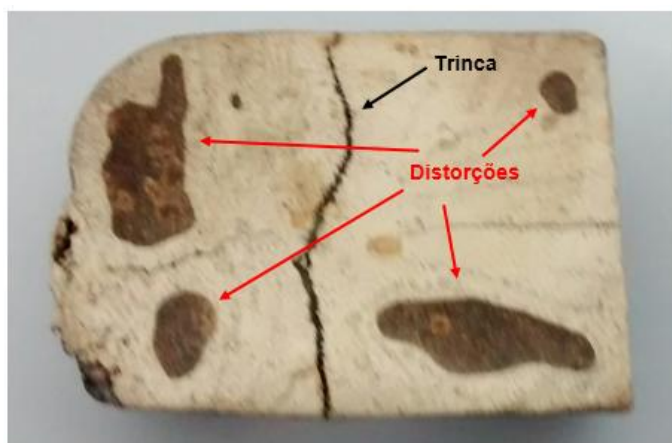


Figura 1. Distorções e trinca na face de uma amostra Cu-11,8%Al-2,0%Ca temperado a 850°C.

3.2. Microscopia Óptica

A Fig. 2 mostra que o tamanho de grão sofreu reduções insignificantes com o aumento da quantidade de magnésio na composição da liga Cu-11,8%Al. O tamanho de grão médio mensurado foi 550µm nas ligas com magnésio. As amostras apresentaram a presença de estrutura martensítica à temperatura ambiente.

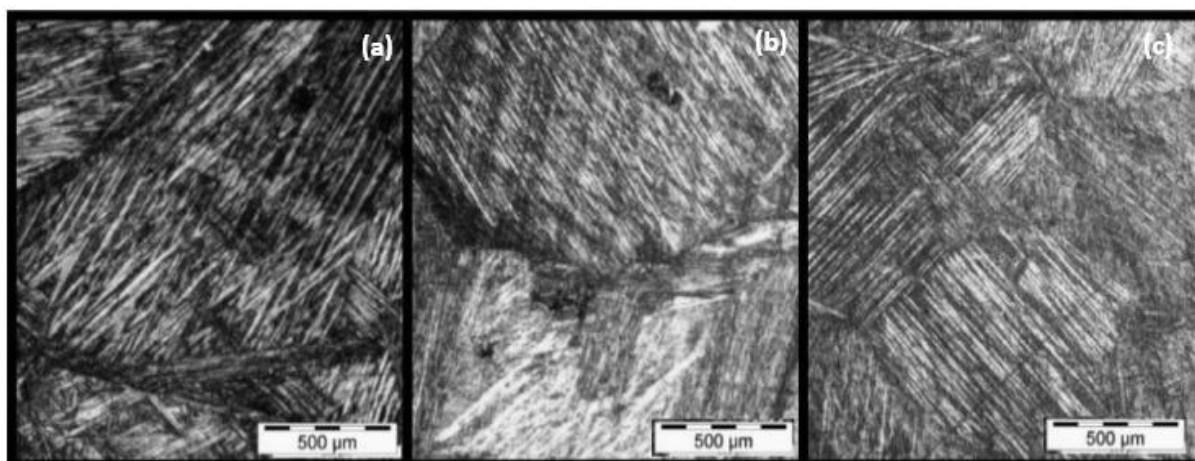


Figura 2. Micrografia da liga Cu-11,8%Al com: (a) 0,5%Mg, (b) 1,0%Mg e (c) 1,5%Mg.

A adição de Ca nas ligas mostrou uma considerável influência na redução do tamanho de grão, ver Fig. 3 e Tabela 2. Todas as amostras com adição de Ca apresentaram aparentemente, através da microscopia, estrutura martensítica à temperatura ambiente.

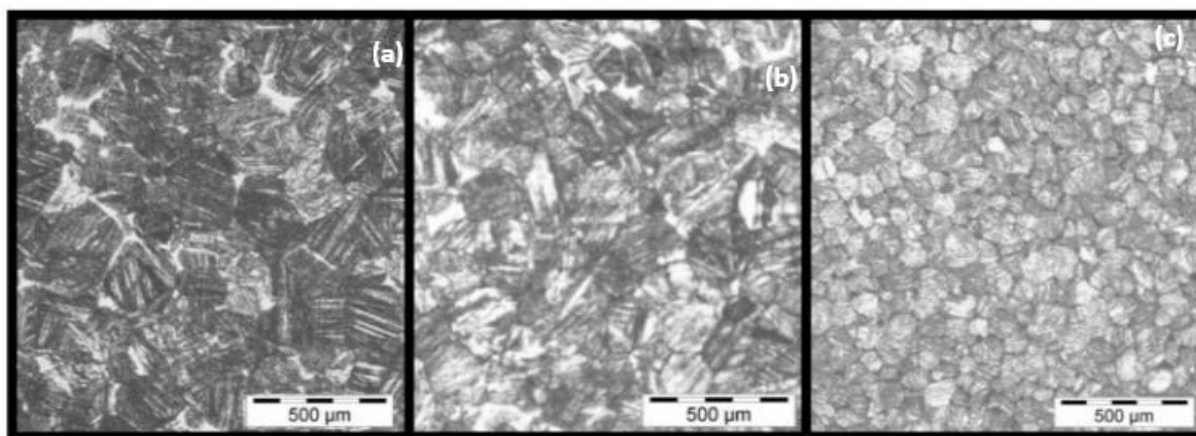


Figura 3. Micrografia da liga Cu-11,8%Al com: (a) 0,5%Ca, (b) 1,0%Ca e (c) 2,0%Ca com tratamentos térmicos a 850°C.

Tabela 2. Tamanho de Grão para as ligas Cu-11,8%Al com adição de Ca tratadas termicamente a 850°C.

Liga	Tamanho Médio de Grão (µm)
Cu-11,8%Al-0,5%Ca	157
Cu-11,8%Al-1,0%Ca	120
Cu-11,8%Al-2,0%Ca	70

A temperatura do tratamento térmico das ligas também teve grande influência na redução do tamanho de grão conforme mostrado na Figura 4 e na Tabela 3.

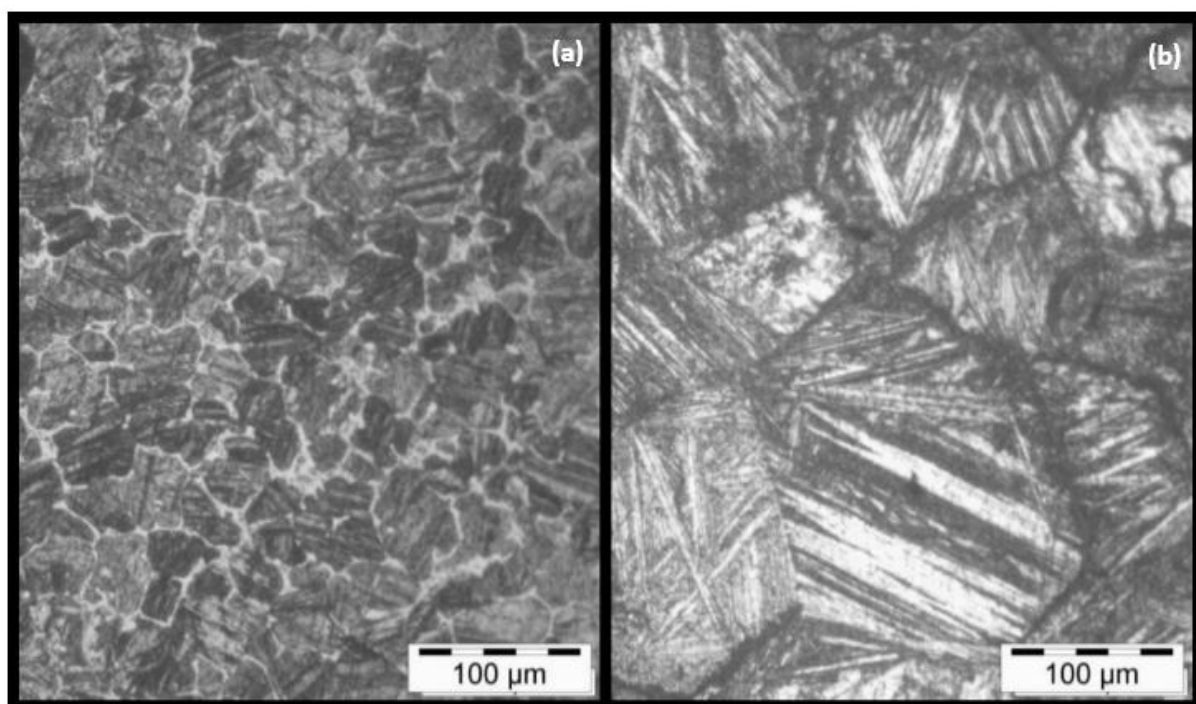
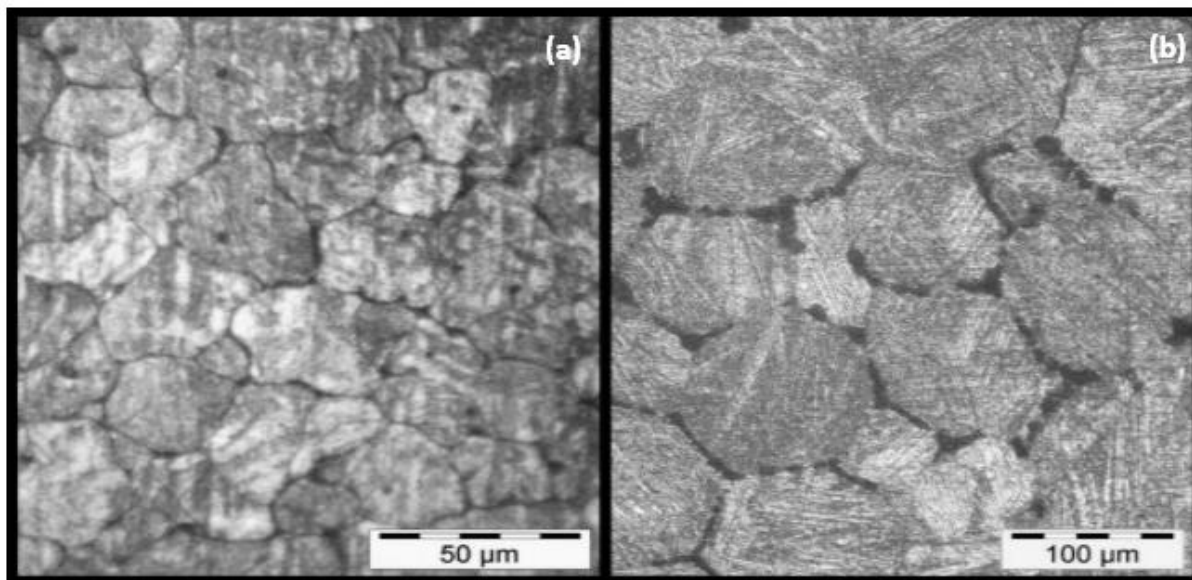


Figura 4. Tamanho do grão em Ligas Cu-11,8%Al-2,0%Ca (a) tratada termicamente a 750°C (b) tratada termicamente a 950° C.

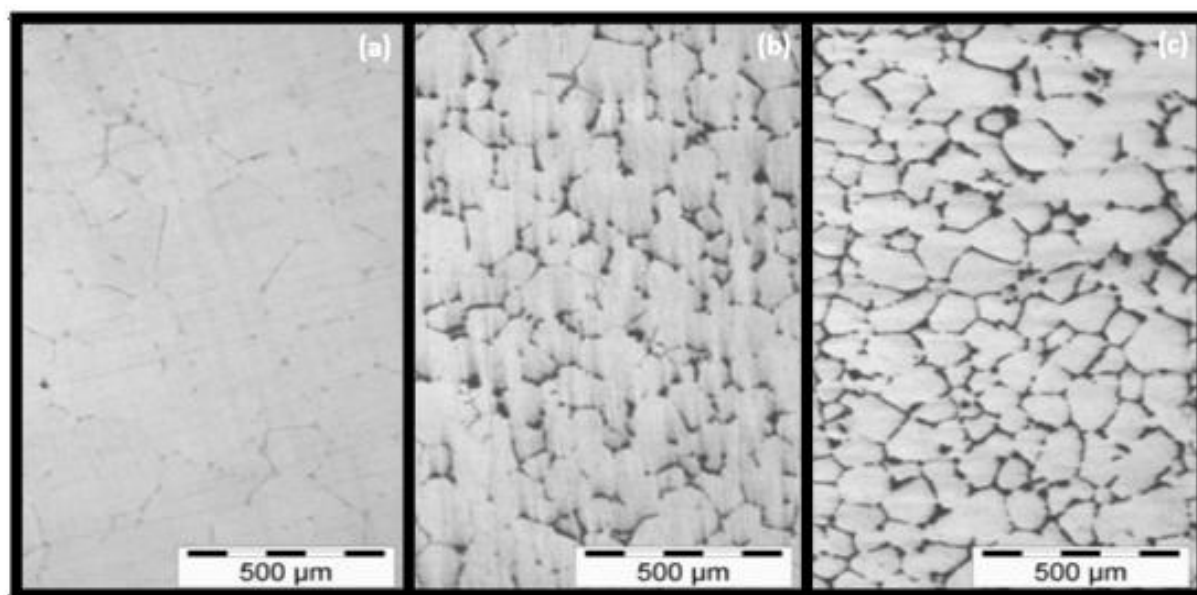
Tabela 3. Tamanho de grão para a liga Cu-11,8%Al-2,0%Ca tratadas termicamente a diferentes temperaturas.

Liga	Tratamento Térmico (°C)	Tamanho Médio de Grão (μm)
Cu-11,8%Al-2,0%Ca	750	24
	950	90

Observou-se também que o Ca atuou refinando o grão das amostras brutas de fusão. Entretanto, o Ca não bloqueou o crescimento dos grãos após o tratamento térmico das ligas, ver Fig. 5.

**Figura 5. Grão de uma liga de Cu-11,8%Al-1,0%Ca (a) Amostra Bruta de Fusão (b) Amostra após tratamento térmico.**

Outro fato decorrente do aumento das quantidades de cálcio nas ligas foi o aumento da quantidade de precipitados nos contornos de grão, conforme Fig. 6.

**Figura 6. Formação de precipitados em ligas Cu-11,8%Al com: (a) 0,5%Ca, (b) 1,0%Ca e (c) 2,0%Ca.**

3.3. Difração de Raios X - DRX

A fase martensítica se mostrou presente nos picos B na forma de AlCu₃ para as ligas com adição de Ca, e na forma de AlCu nas ligas com adição de Mg.

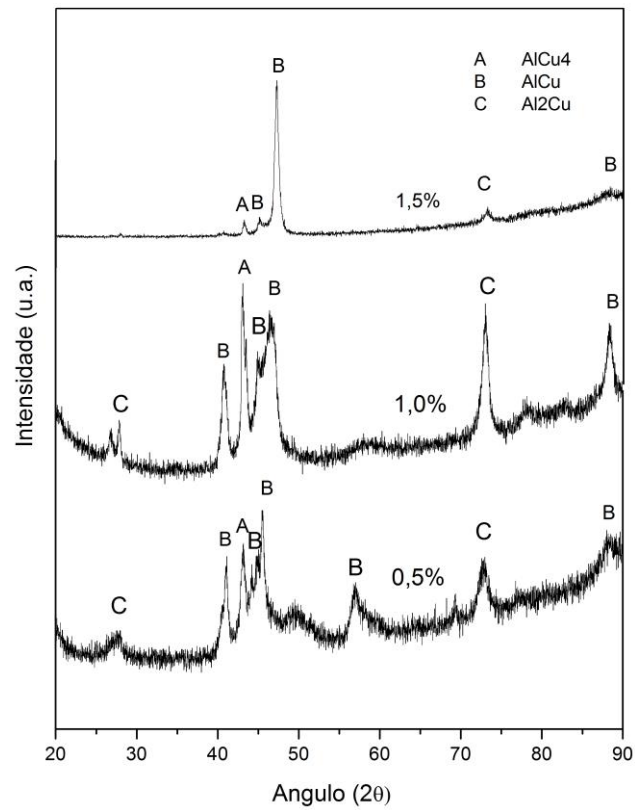


Figura 7. Difratoograma da liga Cu-11,8%Al com 1,5%, 1,0% e 0,5%Mg.

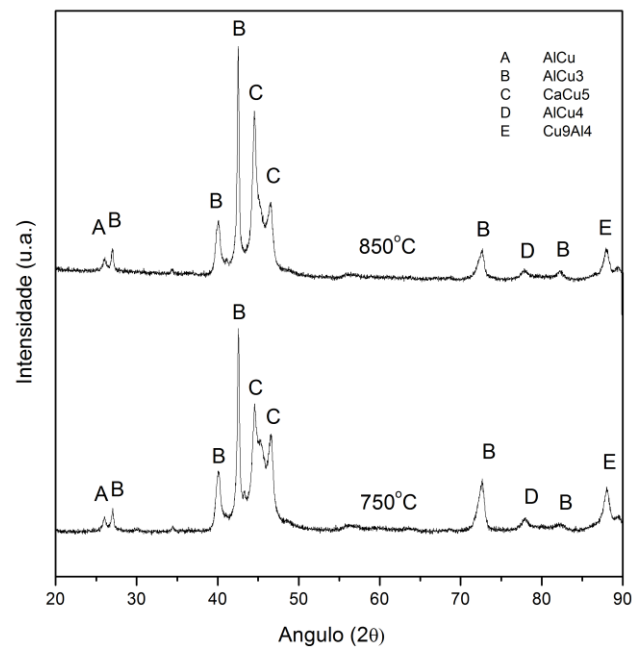


Figura 8. Difratoograma da liga Cu-11,8%Al-0,5Ca.

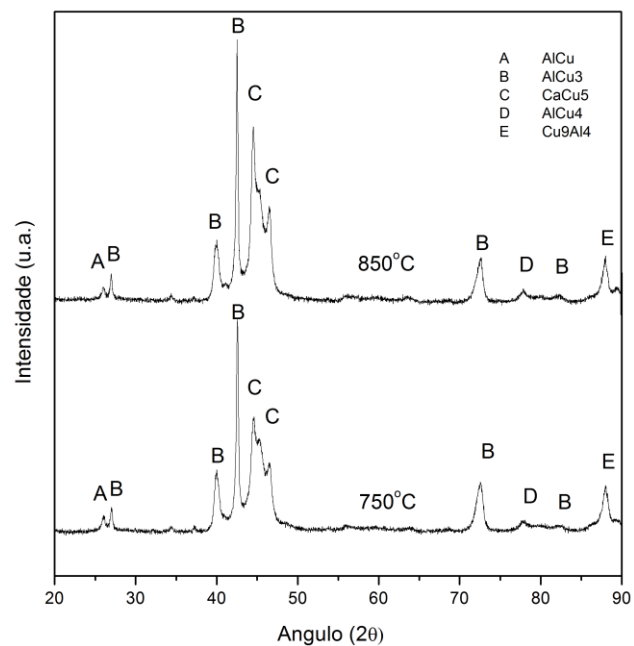


Figura 9. Difratoograma da liga Cu-11,8%Al-1,0Ca.

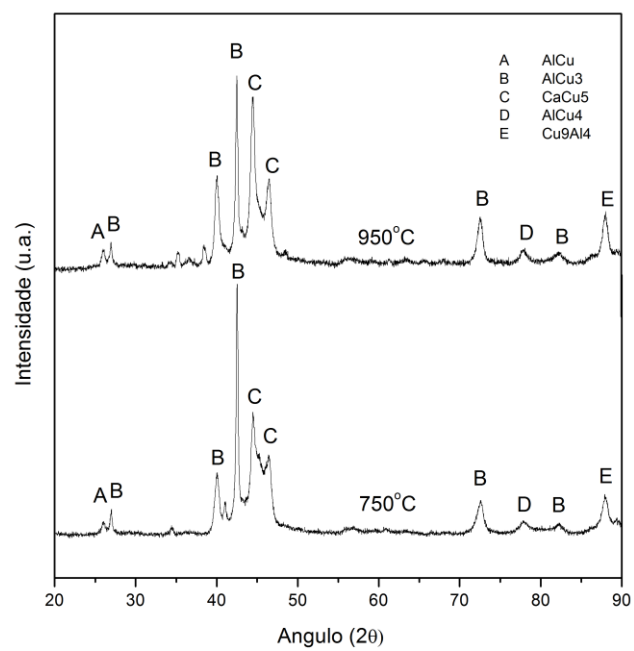


Figura 10. Difratoograma da liga Cu-11,8%Al-2,0Ca.

3.4. Calorimetria Diferencial de Varredura - DSC

No ensaio de DSC foram observadas as temperaturas de início (A_s) e fim (A_f) transformação austenítica das ligas com 1,5% Mg e 2,0% Ca, conforme a Fig. 11 e Fig. 12, respectivamente.

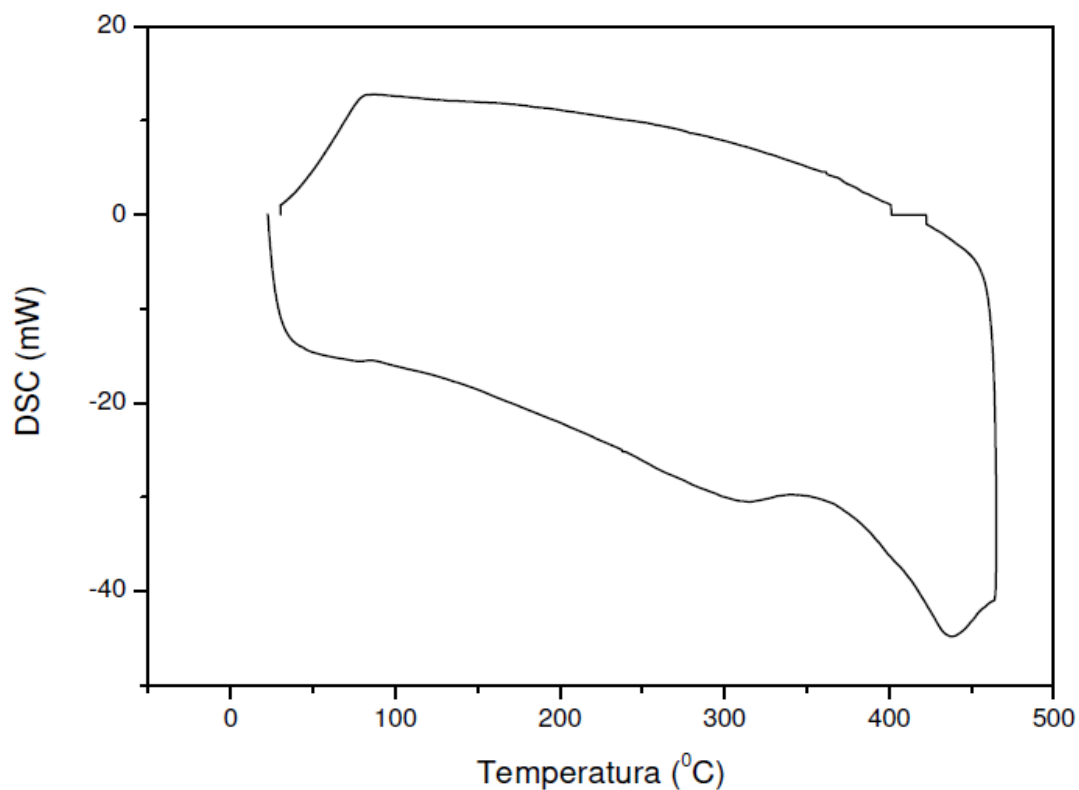


Figura 11. DSC da liga Cu-11.8%Al-1.5%Mg.

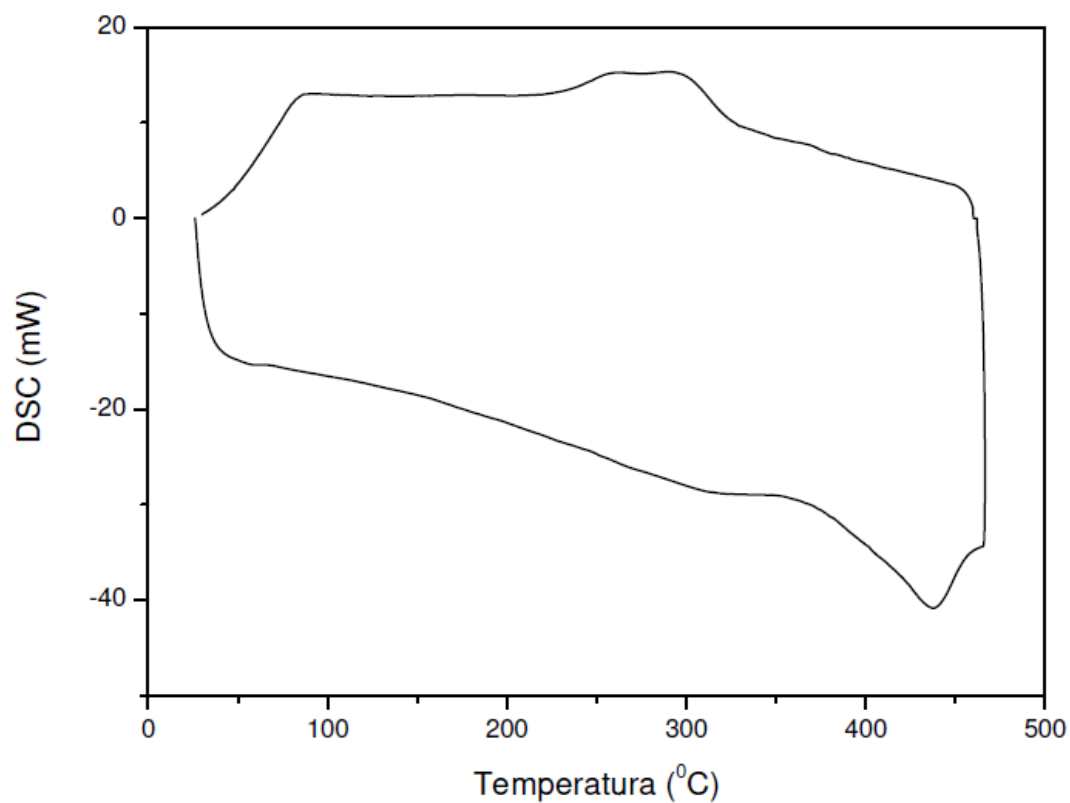


Figura 12. DSC da liga Cu-11.8%Al-2.0%Ca.

Tabela 4. Temperaturas de Transformação Obtidas do DSC.

Liga	As (°C)	Af (°C)
Cu-11,8%Al-1,5%Mg	350	466
Cu-11,8%Al-2,0%Ca	370	460

4. CONCLUSÕES

A variação da quantidade de magnésio na liga se mostrou inerte para mudanças em tamanho de grão e redução das temperaturas de transformação.

Com a adição de 2,0% cálcio e tratamento térmico a 750°C foi possível obter grãos com diâmetro médio de 24µm. Entretanto, o cálcio não funcionou como bloqueador, havendo crescimento considerável dos grãos após tratamento térmico das amostras brutas de fusão. A precipitação do Ca ocorre a partir de 0,5%. A adição de Ca não ocasionou decremento nas temperaturas de transformação da liga, sendo essas similares às temperaturas das ligas com Mg.

A fase martensítica das ligas foi vista através dos ensaio de Microscopia Óptica, na forma de ripas e agulhas na superfície dos grãos, e DRX, sob a forma de AlCu para as ligas de Mg e AlCu3 para as ligas de Ca. A fase austenítica foi vista no ensaio de DSC na temperatura aproximada de 350°C para as ligas de Mg e 370°C para as ligas de Ca.

5. REFERÊNCIAS

- BÜEHLER, W. J.; GILFRICH, J. W.; WILLEY, R. C. Effect of low temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition. *J Appl Physiol*, v. 34, p. 1475-1476, 1963.
- CHANG, L. C.; READ, T. A. Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals-The gold-cadmium beta-phase. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, v. 191, n. 1, p. 47-52, 1951.
- OLIVEIRA, D. F. Determinação das propriedades termomecânicas das ligas CuAlNi e CuAlBe com efeito memória de forma para utilização em atuadores mecânicos. 2009. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica apresentada na Universidade Federal da Paraíba.
- PAIVA, Alberto. Modelagem do Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de Forma. Dr. Tese, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2004.
- PINA, EUCLIDES APOLINÁRIO CABRAL DE. Estudo da Estabilização na Liga Cu-Al-Mn com Memória de Forma. 2006. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.
- YANG, GWON-SEUNG, LEE JONG-KOOK, JANG Woo-Yang. Effect of grain refinement on phase transformation behavior and mechanical properties of Cu-based alloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 19(2009) 979-983.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

INFLUENCE OF ALKALINE EARTH METALS Mg AND Ca IN THE GRAIN REFINEMENT OF COPPER-ALUMINUM ALLOYS SUSCEPTIBLE TO THE SHAPE MEMORY EFFECT

Carlos Cássio de Alcântara, cassioalcantara@live.com¹
 Ricardo Francisco Alves, ricardo_alves_francisco@hotmail.com¹
 Tadeu Antônio de Azevedo Melo, tadeu@lsr.ct.ufpb.br¹
 Danniell Ferreira de Oliveira, danieldeoliveira@gmail.com¹
 Gemierson Valois da Mota Cândido, gemierson@gmail.com²

¹Universidade Federal da Paraíba, Cidade Universitária, s/n - Castelo Branco, João Pessoa - PB, 58051-900.

²Instituto Federal do Piauí - Campus Teresina Central, Praça da Liberdade, 1597 – Centro, Teresina - PI, 64000-040.

Abstract. *The alloys of the Cu-Al system, among alloys with Shape Memory Effect, stand out due to its relatively simple synthesis and low cost. However, some drawbacks, such as coarse granulometry, low resistance to aging and poor thermal stability limit their application. The grain size and its chemical composition are some of the main factors that determine the properties of polycrystalline alloys of the Cu-Al system which are susceptible to the shape memory effect. In this work, it was verified the influence of Mg and Ca in the Cu-Al alloys. The alloys were prepared under ambient atmosphere and characterized by optical microscopy, X-ray diffraction and differential scanning calorimeter. The addition of different magnesium and calcium values in the alloys allowed the preparation of a study about the effect of these materials on the grain size of the alloy. The martensite was observed in all samples at room temperature. The austenite phase begins above 350°C. Calcium acted effectively reducing the grain size of the alloy after fusion, however does not work as grain growth blocking after thermal treatment.*

Keywords: *Cu-Al-Ca, Cu-Al-Mg, Grain Refining, Shapr Memory Effect.*