



## METALOGRAFIAS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA DO SISTEMA Cu-Al

Carlos Cássio de Alcântara <sup>1</sup>  
Daniel Nicolau Lima Alves <sup>2</sup>

### RESUMO

Neste trabalho foram apresentadas diversas microestruturas, obtidas por microscopia óptica, referentes a ligas com memória de forma do sistema Cu-Al. As ligas foram preparadas através da fusão de metais puros em um forno de indução sob atmosfera ambiente. Para a realização dos ensaios de MO, todas as amostras passaram por lixamento em lixas de 80, 100, 200, 400, 600 e 1200. Na sequência, foi realizado um polimento com aluminas de granulometria de  $1\mu\text{m}$  e  $0,3\mu\text{m}$ . As soluções de ataque para visualização dos contornos de grão foram consultadas na norma ASTM E407 – 07. As imagens foram obtidas através de um microscópio óptico da Carl Zeiss - Axiotech 30 e do *software* de imagem Analysis. Por fim, foram apresentadas microestruturas variadas referentes a LMFs do sistema Cu-Al, desde microestruturas de liga em estado bruto de fundição até diferentes microestruturas resultantes da transformação martensítica, seja esta por resfriamento, temperatura ou sollicitação mecânica.

**Palavras-chave:** Memória de forma, Microestrutura, Metalografia, Ligas Cu-Al.

### INTRODUÇÃO

As ligas com memória de forma (LMFs) integram um grupo especial de materiais denominado materiais inteligentes. Elas apresentam capacidade de recuperação da forma memorizada, isto é, após dada deformação, mediante a um gradiente térmico ou a um campo magnético, tais materiais retornam à sua forma original pré-definida. Tal fenômeno é conhecido como efeito de memória de forma (EMF) (BARBARINO, FLORES, et al., 2014, p. 1; CALLISTER JR, WILLIAM e RETHWISCH, 2016, p. 12). As LMFs podem ser fabricadas a partir diferentes sistemas: Cu-Al, Ni-Ti entre outros (ALANEME e OKOTETE, 2016, p. 5-8). De modo geral, as ligas com memória de forma possuem duas fases sólidas distintas (austenita e martensita) as quais comutam entre si em função dos níveis de carregamentos mecânicos, térmicos e/ou magnéticos. A Austenita é a fase de alta temperatura, e a Martensita é fase de baixa temperatura (SONG, MA e LI, 2006, p. 1267), sendo esta

<sup>1</sup> Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, [cassioalcantara@live.com](mailto:cassioalcantara@live.com);

<sup>2</sup> Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, [danves@live.com](mailto:danves@live.com);



última caracterizada pela presença de placas (LA ROCA, ISOLA, *et al.*, 2015, p. 1136) e/ou agulhas (BOULLAY e SCHRYVERS, 2001, p. 1). As propriedades características das LMFs proporcionam a sua aplicação em diversos campos: automotivo, aeroespacial, robótica e biomédica são alguns deles (JANI, LEARY, *et al.*, 2014, p. 1079).

Várias pesquisas têm sido realizadas na busca de melhor compreender esse materiais, e assim possibilitar melhorias de suas propriedades. Para estes fins, realiza-se uma série de ensaios, a saber: calorimetria exploratória diferencial (DSC) para determinação das temperaturas de transformação martensítica (YANG, ZHANG, *et al.*, 2017, p. 20), carregamento cíclico para determinação de propriedades superelásticas (LIU, HUANG e XIE, 2015, p. 2012), difração de raios de X (DRX) para a identificação de fases (YANG, WANG, *et al.*, 2016, p. 216) e técnicas de microscopia para a análise da evolução microestrutural (WANG, YANG, *et al.*, 2014, p. 3198-3199), sendo a técnica de microscopia óptica (MO) a mais comum entre elas (COLPAERT, 2008, p. 68).

Ante ao exposto, motivado pela importância desse grupo de materiais, todo o seu potencial de aplicação e escopo de contribuir para um estudo inicial acerca das LMFs, o presente trabalho apresenta diversas microestruturas obtidas em LMFs do sistema Cu-Al a partir do ensaio de microscopia óptica.

## **METODOLOGIA**

As ligas foram preparadas através da fusão de metais puros em um forno de indução sob atmosfera ambiente. O vazamento para a obtenção dos lingotes foi realizado em um molde de aço 1045, de seção retangular, com dimensões 94 mm de comprimento x 22 mm de largura x 59 mm. Em seguida, os lingotes foram cortados em pequenas placas quadradas com 21mm de aresta x 1,4mm de espessura. Os tratamentos térmicos aplicados foram de homogeneização a 850°C por 12h com resfriamento dentro do próprio forno, recozimento a 850°C por 30min e, por fim, têmpera em água à temperatura ambiente.

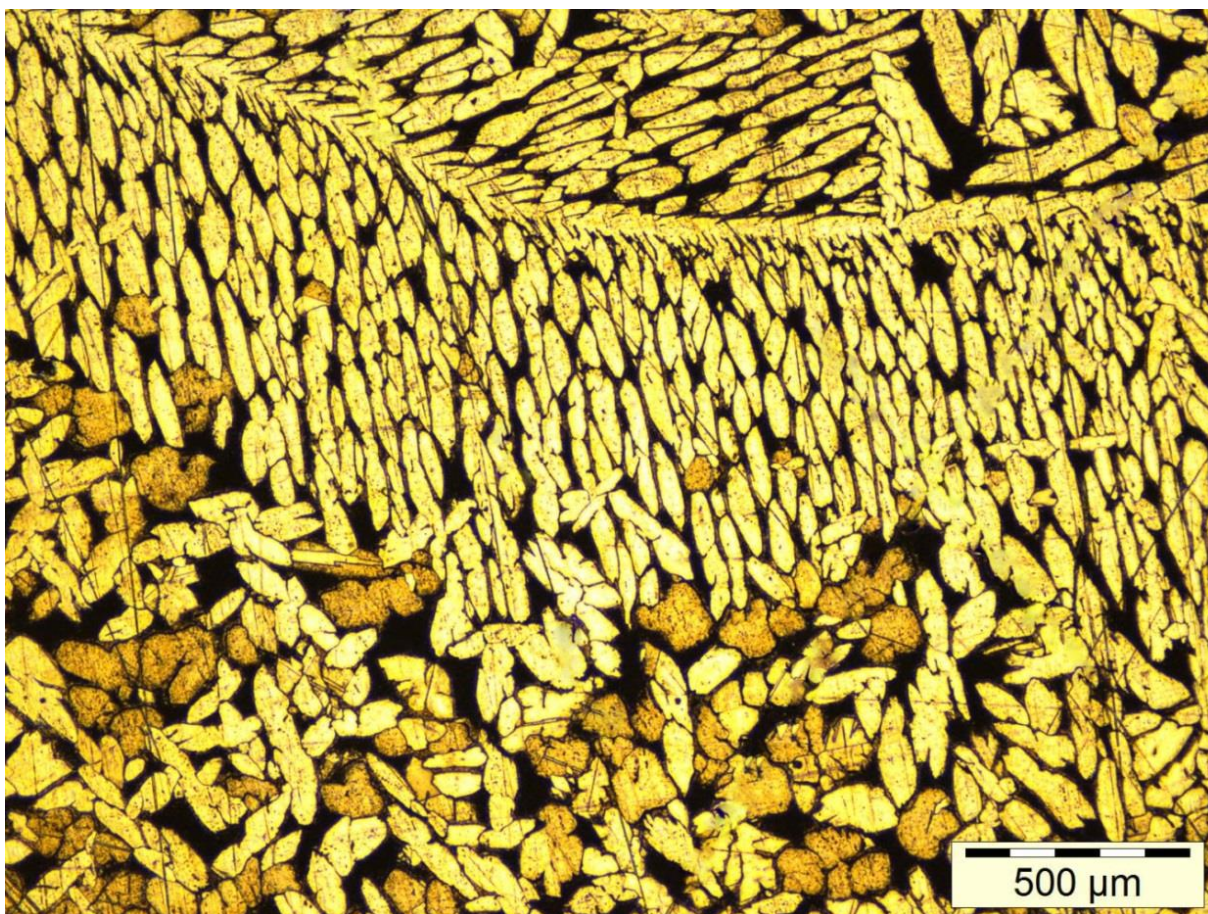
Para a realização dos ensaios de MO, todas as amostras passaram por lixamento em lixas de 80, 100, 200, 400, 600 e 1200. Na sequência, foi realizado um polimento com aluminas de granulometria de 1 $\mu$ m e 0,3 $\mu$ m. As soluções de ataque para visualização dos contornos de grão foram consultadas na norma ASTM E407 – 07 (2015) e serão indicadas nas respectivas micrografias. As imagens foram obtidas através de um microscópio óptico da Carl Zeiss - AxioTech 30 e do *software* de imagem Analysis.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As ligas depois de fundidas e sem passar por nenhum tratamento térmico costumam ser chamadas de ligas brutas de fundição (LBF). A microscopia da LBF é utilizada como referência, de forma a identificar as fases presentes em temperatura ambiente, supressão de fases após homogeneização e verificar ocorrência de crescimento de grão. Na Figura 1 está uma LBF de composição Cu-8,14%Al-10,92Mn (% em peso).

Figura 1 – Estrutura dendrítica de uma liga bruta de fundição. Composição: Cu-8,14%Al-10,92Mn (% em peso).  
Ataque: 2g  $K_2Cr_2O_7$ , 8ml  $H_2SO_4$ , 2ml HCl e 100ml  $H_2O$  destilada.

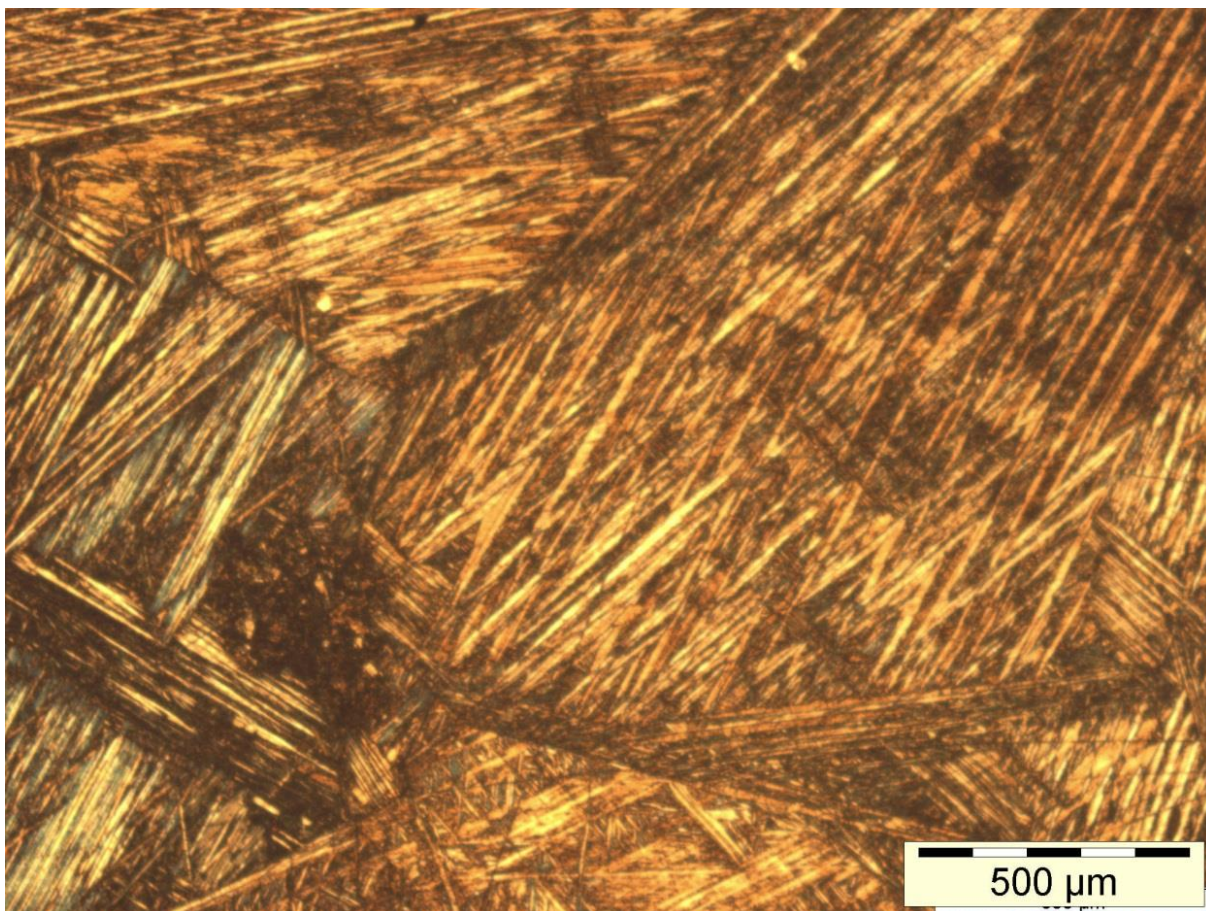


Após fundição, as ligas devem passar por tratamentos térmicos específicos como a homogeneização, que permite alcançar uma maior homogeneidade química, e a têmpera, para que seja possível obter alguma propriedade relacionada ao EMF. Em LMFs submetidas a têmpera, o ensaio metalográfico permite avaliar de forma qualitativa se a microestrutura da liga é referente à fase Austenita ou Martensita. Entretanto, ensaios complementares como DSC e DRX possibilitam a identificação da fase presente. Na Figura 2 é mostrada a liga Cu-



11,8%Al-0,5%Mg (% em peso) após tratamentos de homogeneização e têmpera. Nota-se a presença da estrutura martensítica em forma de agulhas.

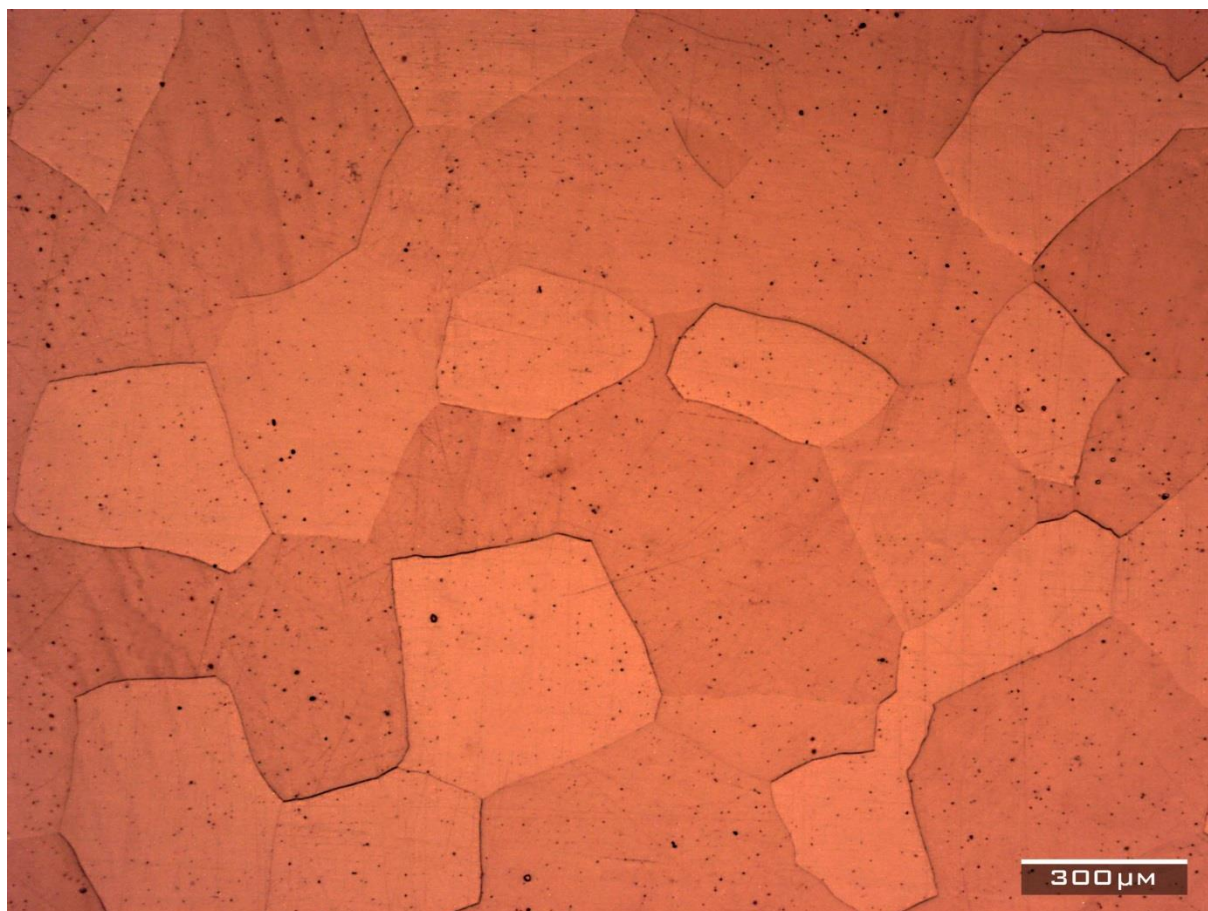
Figura 2 – Estrutura martensítica obtida após homogeneização e têmpera. Composição: Cu-11,8%Al-0,5%Mg (% em peso). Ataque: 5g FeCl<sub>3</sub>, 16ml HCl e 60ml etanol.



Na ausência de ripas ou agulhas na LMF, a liga se apresenta na fase Austenita, Figura 3. Como citado anteriormente, ensaios de DRX e DSC, associados com a microscopia óptica, auxiliam na identificação da fase existente.



Figura 3 - Estrutura austenítica obtida após homogeneização e têmpera. Composição: Cu-9,52% Al-12,09% Mn (% em peso). Ataque: 2g  $K_2Cr_2O_7$ , 8ml  $H_2SO_4$ , 2ml HCl e 100ml  $H_2O$  destilada.



Outra forma de observação da estrutura martensítica nas LMFs se dá através do resfriamento da estrutura austenítica. Na Figura 4 está a evolução da microestrutura de uma liga austenítica submetida a resfriamento em nitrogênio líquido. Na Figura 4a, nota-se, em virtude do resfriamento induzido, a formação das primeiras placas de martensita, indicando o início da transformação martensítica. A transformação prossegue durante o processo de resfriamento da amostra, Figuras 4b e 4c, até atingir a temperatura de transformação final da martensita ( $M_f$ ) ilustrada na Figura 4d. Na Figura 5, a martensita apresenta-se sob a forma de placas e agulhas.



Figura 4 - Evolução da transformação martensítica numa liga austenítica resfriada em  $N_2$ . Composição: Cu-8,14%Al-10,92%Mn (% em peso). Sem ataque.

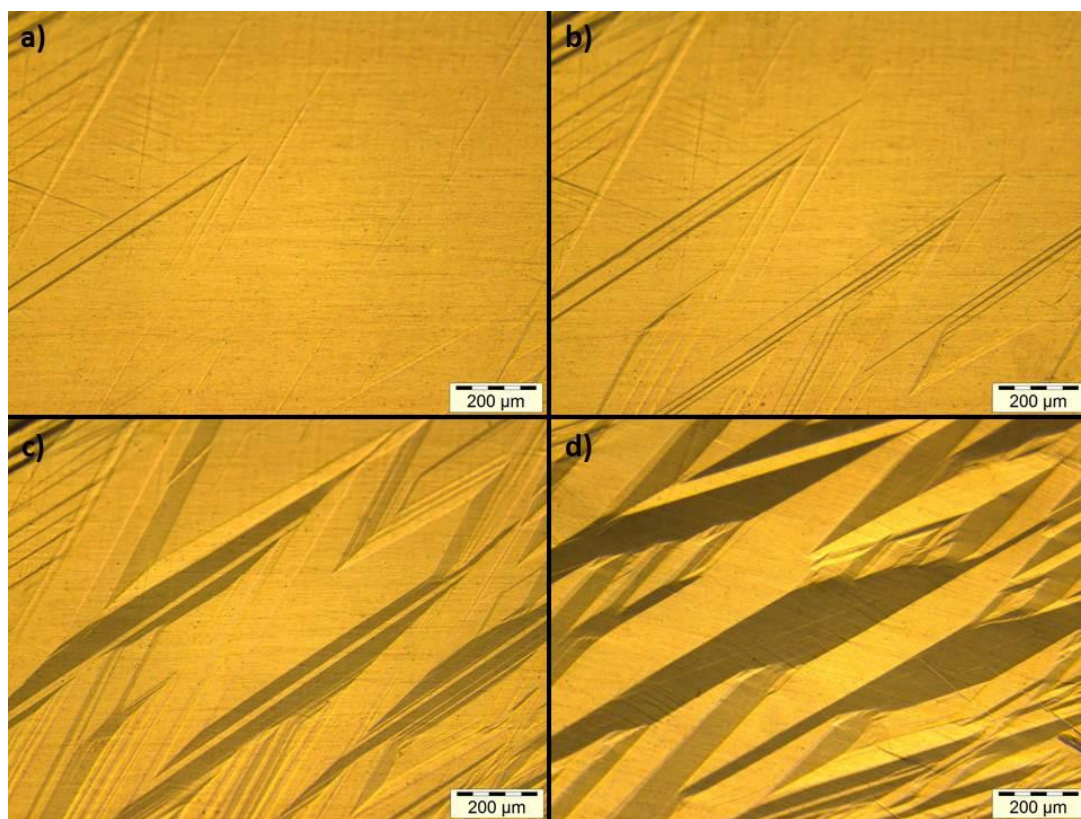
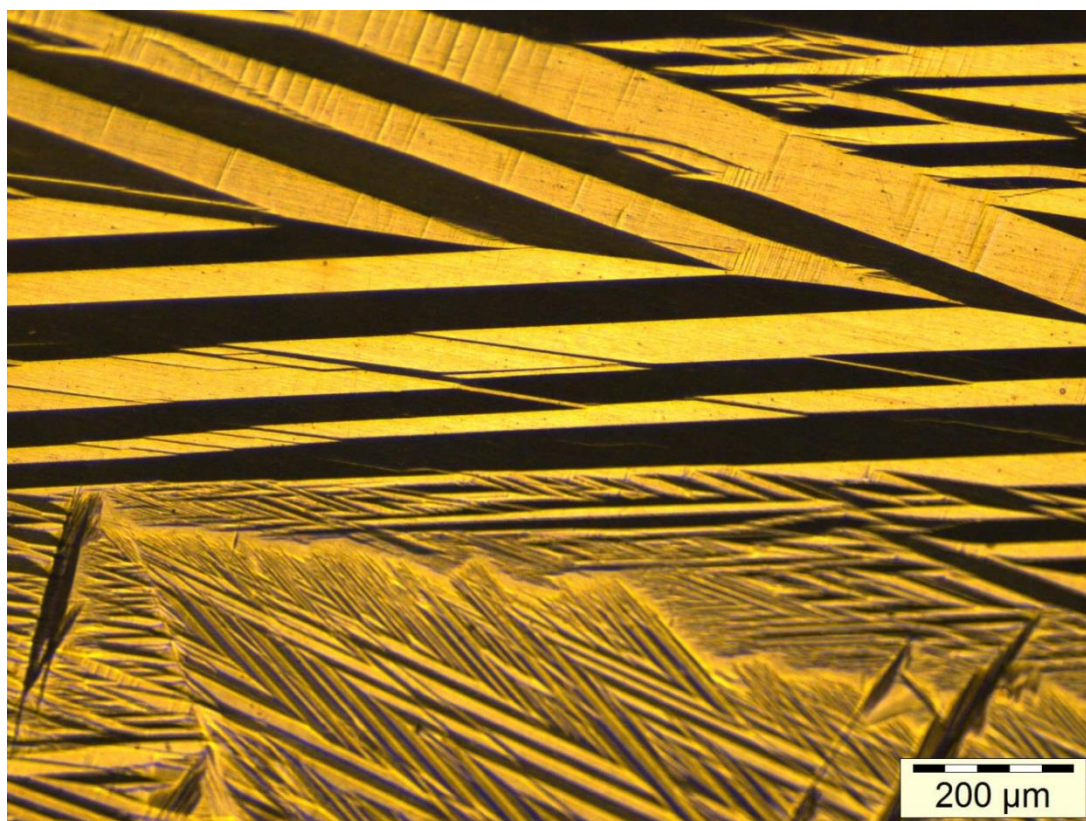


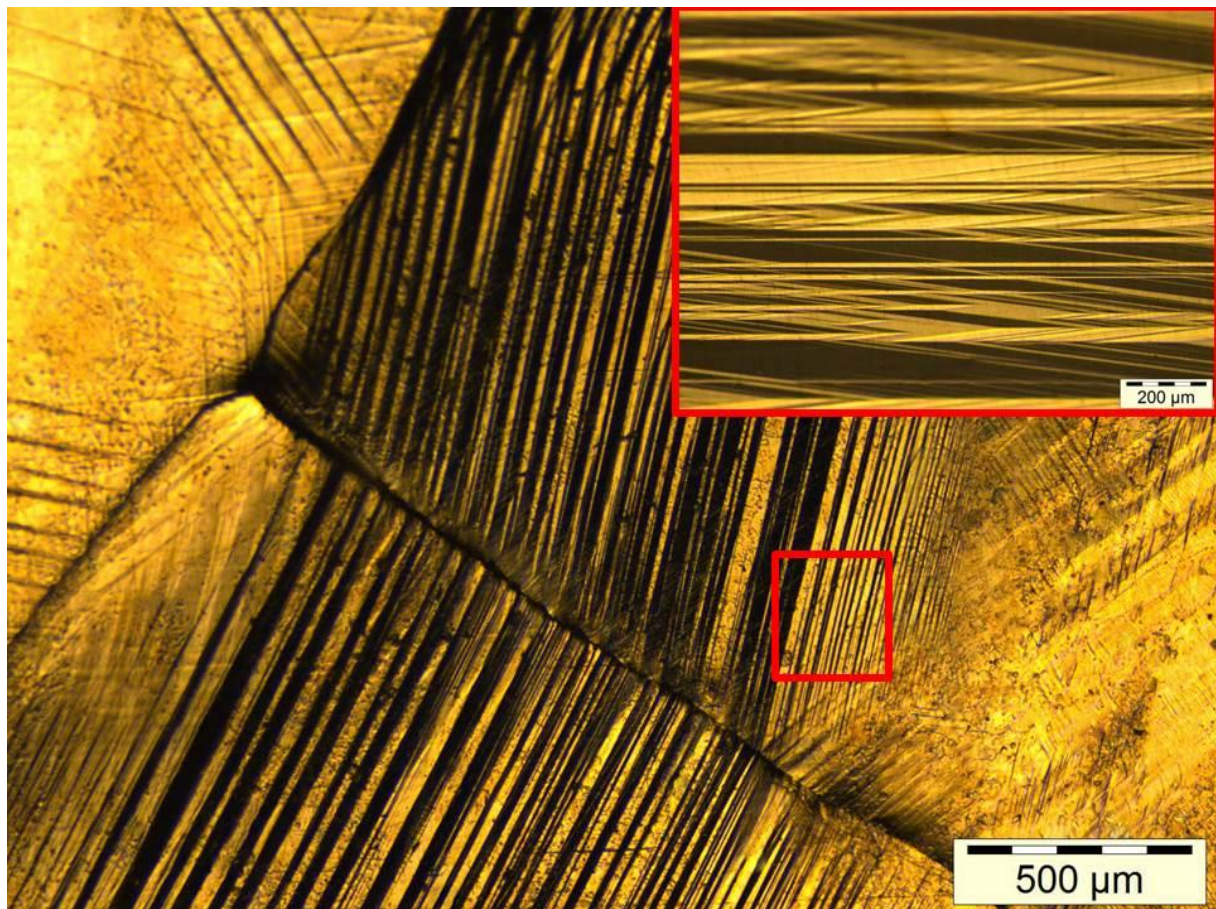
Figura 5 - Martensita sob a forma de placas e agulhas. Composição: Cu-8,14%Al-10,92%Mn (% em peso). Sem ataque.





A fase martensítica pode também ser observada quando as LMFs são submetidas a um determinado nível de tensão, provocando assim uma transformação de fase induzida por tensão (ALANEME e OKOTETE, 2016, p. 4). A fase gerada é a martensita induzida por tensão, Figura 6.

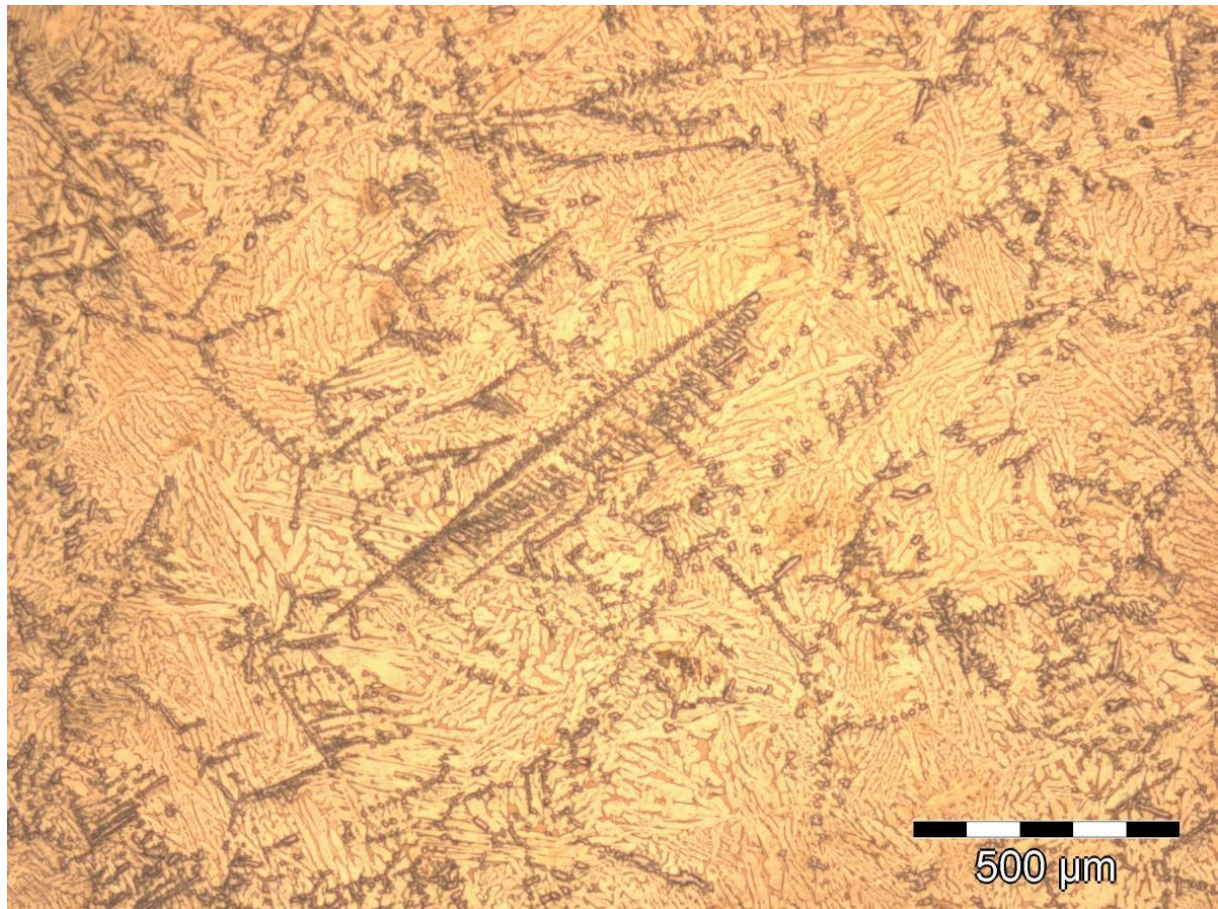
Figura 6 – Martensita induzida por tensão em uma liga tracionada. Composição: Cu-8,14%Al-10,92%Mn (% em peso). Sem ataque



Em algumas LMFs são adicionados elementos de liga a fim de melhorar as propriedades mecânicas e de memória de forma do material. Alguns elementos apresentam boa solubilidade na matriz, enquanto a baixa solubilidade de outros promove a formação de precipitados. Esses precipitados, de forma geral, podem ter influência nas temperaturas de transformação, na capacidade de trabalho a frio (SUTOU, KAINUMA e ISHIDA, 1999, p. 2) e no refino de grão das ligas (YANG, WANG, *et al.*, 2016). Na Figura 7 está a liga Cu-8,14%Al-10,92%Mn-4,00%Nb (% em peso) com o nióbio precipitado devido a sua baixa solubilidade na matriz.



Figura 7 - Liga Cu-8,14% Al-10,92% Mn-4,00% Nb (% em peso) com precipitados de Nb. Ataque: 2g  $K_2Cr_2O_7$ , 8ml  $H_2SO_4$ , 2ml HCl e 100ml  $H_2O$  destilada.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com desígnios de melhor elucidar os fenômenos relacionados ao efeito memória de forma, foram apresentadas microestruturas variadas referentes a LMFs do sistema Cu-Al, desde microestruturas de liga em estado bruto de fundição até diferentes microestruturas resultantes da transformação martensítica, seja esta por resfriamento, temperatura ou sollicitação mecânica.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e a Universidade Federal da Paraíba (UFPB) pela estrutura fornecida para a execução do trabalho.





## REFERÊNCIAS

- ALANEME, K. K.; OKOTETE, E. A. Reconciling viability and cost-effective shape memory alloy options – A review of copper and iron based shape memory metallic systems. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, 2016.
- ASTM. **ASTM E407 – 07: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys**. American Society for Testing and Materials. [S.l.]. 2015.
- BARBARINO, S.; FLORES, E. I. S; AJAJ, R. M.; DAYYANI, I; FRISWELL, M. I. A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft. **Smart Mater. Struct.** **23**, 2014.
- BOULLAY, P.; SCHRYVERS, D. Bending martensite needles in Ni<sub>65</sub>Al<sub>35</sub> investigated by two-dimensional elasticity and high-resolution transmission electron microscopy. **PHYSICAL REVIEW B** **64**, 2001.
- CALLISTER JR, G.; WILLIAM, D.; RETHWISCH, D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 9. ed. [S.l.]: Grupo GEN, 2016
- COLPAERT, H. In: \_\_\_\_\_ **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. Cap. 5.
- JANI, J. M.; LEARY, M.; SUBIC, A.; GIBSON, M. A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. **Materials and Design** **56**, 2014.
- LA ROCA, P; ISOLA, L.; VERMAUT, PH; MALARRÍA, J.  $\beta$ -grain size effects on the 18R-martensite microstructure in Cu-based SMA. **Procedia Materials Science** **8**, 2015. 1133 – 1139.
- LIU, J.-L.; HUANG, H.-Y.; XIE, J.-X. Superelastic anisotropy characteristics of columnar-grained Cu–Al–Mn shape memory alloys and its potential applications. **Materials and Design** **85**, 2015. 211-220.
- MARKOPOULOS, A. P.; PRESSAS, I. S.; MANOLAKOS, D. E. Manufacturing processes of shape memory alloys. In: \_\_\_\_\_ **Materials Forming and Machining**. [S.l.]: [s.n.], 2016. Cap. 7.
- SONG, G.; MA, N.; LI, H. Applications of shape memory alloys in civil structures. **Engineering Structures** **28**, 2006.
- SUTOU, Y.; KAINUMA, R.; ISHIDA, K. Effect of alloying elements on the shape memory properties of ductile Cu–Al–Mn alloys. **Materials Science and Engineering A273–275**, 1999. 375–379.



WANG, SHAN-LING; YANG, QIN; LI, XIAO-LAN; PENG, HUA-BEI; WEN, YU-HUA. Influence of recovery heating rate on shape memory effect in up-quenched Cu-Al-Mn alloy. **Trans. Nonferrous Met. Soc. China** **24**, 2014. 3196-3200.

YANG, J; WANG, Q.Z; YIN, F.X; CUI, C.X; JI, P.G; LI, B. Effects of grain refinement on the structure and properties of a CuAlMn shape memory alloy. **Materials Science & Engineering A** **664**, 2016.

YANG, SHUIYUAN; ZHANG, FAN; WU, JIALIN; LU, YONG; SHI, ZHAN; WANG, CUIPING; LIU, XINGJUN. Superelasticity and shape memory effect in Cu–Al–Mn–V shape memory alloys. **Materials and Design** **115**, 2017.

YANG, SHUIYUAN; ZHANG, JIXUN; CHI, MENGYUAN; WEN, YUHUA; CHEN, XINREN; WANG, CUIPING; LIU, XINGJUN. Low-cost Cu-based shape memory single crystals obtained by abnormal grain growth showing excellent superelasticity. **Materialia**, 2019.