

## INFLUÊNCIA DE CICLAGENS TÉRMICAS NA TRANSFORMAÇÃO DE FASE DA LIGA CuAlBe

Ieverton Caiandre A. Brito<sup>1\*</sup>, Victor Hugo C. de Albuquerque<sup>2</sup>, Rodinei M. Gomes<sup>1†</sup>, Tadeu Antonio A. Melo<sup>1+</sup>,  
João Manuel R. S. Tavares<sup>3</sup>

1-Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Mecânica, João Pessoa, Brasil, email: {\*caiandre.lsr.ct, †gomes, +tadeu}@lsr.ct.ufpb.br

2-Universidade de Fortaleza, Centro de Ciências Tecnológicas, Fortaleza, Brasil, email: victor.albuquerque@fe.up.pt

3-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, email: tavares@fe.up.pt

**Palavras chave:** Liga CuAlBe, Calorimetria diferencial exploratória, Ciclos térmicos, Transformações de fases

### Resumo

Ligas CuAlBe apresentam propriedades mecânicas superiores às ligas CuAlNi, que são frágeis em temperaturas negativas, também CuAlBe são mais baratos que as ligas de NiTi. Em relação as ligas CuAlZn, que têm um grande problema em termos de composição química de controle, e ligas CuAlMn, que têm menor ductilidade, as ligas CuAlBe são mais estáveis, fácil controle de composição química e maior flexibilidade em relação as ligas mencionadas devido à sua pseudo-elasticidade. Além do mais, as ligas CuAlBe têm excelente absorção de vibrações de ondas mecânicas, devido ao seu tamanho de grão grosseiro, e pode ser usada com confiabilidade em baixas temperaturas. Devido a essas características, as ligas CuAlBe são utilizadas como atuadores eletromecânicos para eletromecânica atuadores e união de tubulações em baixas temperaturas, entre outras aplicações.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a influência de 22 ciclos térmicos de resfriamento em água em atmosfera ambiente sobre as temperaturas de transformação de fases em uma liga CuAlBe através do ensaio por calorimetria diferencial exploratória (DSC). Os resultados mostraram uma diminuição na estabilidade térmica da liga utilizada com o aumento dos ciclos térmicos de tempera em água, bem como um aumento significativo nas temperaturas de transformação de fases. Essas modificações ocorrem provavelmente devido a perda em peso do elemento berílio por oxidação durante os tratamentos térmicos sucessivos.

## 1. Introdução

O termo “ligas com efeito memória de forma” (EMF) é utilizado para designar um conjunto de materiais metálicos nobres que possuem alta capacidade de recuperar sua forma ou dimensão após serem submetidos a um ciclo térmico apropriado. Muitos materiais metálicos possuem essa característica, no entanto, somente alguns sistemas como os CuAl e CuZn são economicamente viáveis de serem aplicados industrialmente [1] e possuem boa usinabilidade para serem trabalhados. No entanto, as ligas do sistema Ni-Ti possuem propriedades mecânicas muito superiores as dos sistemas já citados, sendo o seu alto custo e dificuldade de processamento os principais responsáveis por sua limitação no uso industrial.

As ligas com efeito memória de forma em regime pseudoelástico possuem propriedades mecânicas que as tornam adequadas para uso em diversos campos da engenharia [2] como nos setores aeroespacial, automobilístico, controle e comando em máquinas elétricas, médico e artístico. São as transformações martensíticas as forças motrizes para o surgimento do efeito memória de forma, e que podem ser induzidas através da aplicação de tensão ou através de mudanças de temperatura. Sob altas temperaturas as ligas CuAlBe, que são uma derivação do sistema CuAl, possuem a fase  $\beta$  ou austenítica como fase estável, contudo, pode-se conseguir a estabilização da fase  $\beta$  à temperatura ambiente por meio de resfriamento rápido ou têmpera [3].

Segundo Ceylan et al., [4] e Guenin et al., [5], pequenas mudanças na percentagem de berílio nas ligas do sistema CuAl influenciam bruscamente as temperaturas de transformação de fases.

O objetivo desse trabalho foi avaliar a influência de diversos tratamentos térmicos de têmpera em água nas temperaturas de transformação de fase na liga CuAlBe, motivadas pela perda de berílio por oxidação quando expostas a altas temperaturas em fornos sem controle de atmosfera.

## 2. Material e métodos

A liga Cu-11,8Al-0,5Nb-0,5Ni-0,6Be (% em peso) foi fundida em um forno de 8KVA de alta frequência com aquecimento por indução utilizando cadinho de grafite-argila, sendo vazada em um molde metálico cilíndrico com diâmetro de 16mm, conforme utilizado por Oliveira et al. [6]. Após a fundição, a liga foi homogeneizada durante doze horas a uma temperatura de 850°C em um forno de resistência sem controle de atmosfera e em seguida temperada em água a temperatura ambiente. Posteriormente, a liga foi usinada nas dimensões Ø5mm x 2mm, estabelecida de acordo com o ensaio DSC, e temperada para recuperar o efeito memória de forma. Depois de temperada, foram retirados 11 corpos de prova utilizando um aparelho cut-off modelo minitom da Struers com disco de corte de diamante com rotação de 250 rpm.

As amostras foram submetidas a vinte e dois tratamentos térmicos de têmpera em água a temperatura ambiente. A cada dois tratamentos uma amostra era retirada a fim de se obter amostras sujeitas a números diferentes e crescentes de tratamento térmico utilizando um forno de resistência elétrica sem controle de atmosfera na temperatura de

850°C durante um período de 10 minutos. Esse procedimento foi realizado no intuito de avaliar a influência de sucessivos ciclos de têmpera em água sobre as temperaturas de transformação de fase na liga Cu-Al-Be com adição dos elementos Ni e Nb como refinadores de grão.

Após temperadas, cada amostra foi submetida ao ensaio termo analítico por calorimetria exploratória diferencial (DSC - differential scanning calorimetry) com taxa de resfriamento e aquecimento de 10 °C/min, empregando atmosfera de fluxo constante de gás nitrogênio de 50 ml/min. O equipamento de calorimetria exploratória diferencial da série DSC-60 (Shimadzu Co. Ltd, Kyoto, Japão) foi utilizado considerando faixa de temperatura variando de -120 a 150°C, bem como faixa de fluxo de calor na ordem de  $\pm 40$  mW. O ensaio DSC foi empregado visando estabelecer uma relação entre quantidade de ciclos térmicos com as alterações provocadas nas temperaturas de transformação de fase do material estudado.

Por fim, as amostras temperadas 2 e 22 vezes foram preparadas por metalografia convencional utilizando aluminas de 1,0 e 0,3 micrometro como abrasivos para o polimento e atacadas quimicamente com reagente cloreto férrico (FeCl<sub>3</sub>) por 15 segundos.

Concluída a preparação metalográfica, as amostras foram analisadas por microscopia óptica utilizando equipamento da marca Karl Zeiss, modelo Axiotech 100 (Iowa, USA), conectado diretamente a um microcomputador, a temperatura ambiente, para avaliar as possíveis alterações microestruturais oriundas dos diversos tratamentos térmicos de têmpera em água.

## 3. Resultados e discussões

A partir da Figura 1 é possível verificar uma temperatura de máxima transformação de austenita (TMTA) na ordem de -65°C para a amostra submetida a dois tratamentos de têmpera. A TMTA sofre um significativo aumento quando a amostra é submetida ao quarto tratamento, chegando a -40°C. Na medida em que os tratamentos foram aumentando, pôde-se observar um comportamento praticamente constante das TMTA, apresentando uma variação de apenas 6°C entre o quarto e o décimo quarto tratamento de têmpera. Para este último tratamento, a TMTA foi de -34°C.

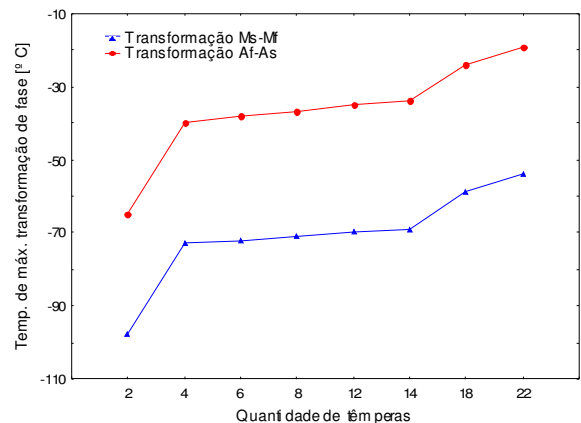


Figura 1: temperaturas de transformação de fase em função do número de ciclos térmicos

A partir da décima quarta amostra houve um aumento significativo nas temperaturas de transformação como se pode observar para a amostra temperada 18 vezes e cuja temperatura é de  $-24^{\circ}\text{C}$ . Seguindo a mesma tendência, a amostra temperada 22 vezes apresentou aumento na temperatura ( $-22^{\circ}\text{C}$ ), mas não de maneira tão significativa como para o intervalo de 14-18.

Foi verificado para o ciclo de resfriamento que a temperatura correspondente a máxima transformação martensítica (TMTM) para a amostra tratada duas vezes é de  $-98^{\circ}\text{C}$  e que esta temperatura sofre um rápido aumento quando a amostra é submetida a quatro tratamentos térmicos.

Mais uma vez, para a amostra temperada 18 vezes a temperatura de  $-59^{\circ}\text{C}$  correspondente a máxima formação de martensita mostrou-se elevada em relação à tendência de crescimento das demais. A TMTM da amostra temperada 22 vezes é de  $-54^{\circ}\text{C}$  mostrando uma tendência de crescimento a partir da amostra tratada 18 vezes menor do que aquela vista nas amostras do intervalo de tratamento de 14 a 18.

A observação das análises de microscopia óptica mostra que para as amostras temperadas até 22 vezes não ocorre nem uma alteração na microestrutura da liga. Isso pode ser verificado nas figuras 2 e 3 das metalografias das amostras temperadas 2 e 22 vezes, respectivamente. Estudando ligas do sistema CuAl, Ceylan et al. [4] e Guenin et al. [5] verificaram que quando adicionadas pequenas porcentagens de berílio nas ligas desse sistema as temperaturas de transformação de fases eram afetadas bruscamente.

Segundo estudos realizados por Belkahla [7] pode-se inferir que a perda em massa de 0,1% de berílio corresponde a uma mudança nas temperaturas de transformação de fases na ordem de  $90^{\circ}\text{C}$ . Desta maneira, como houve um aumento de  $45^{\circ}\text{C}$  em média para a amostra temperada 22 vezes pode-se verificar que houve um decréscimo de 0,05% em massa de berílio para esta amostra.

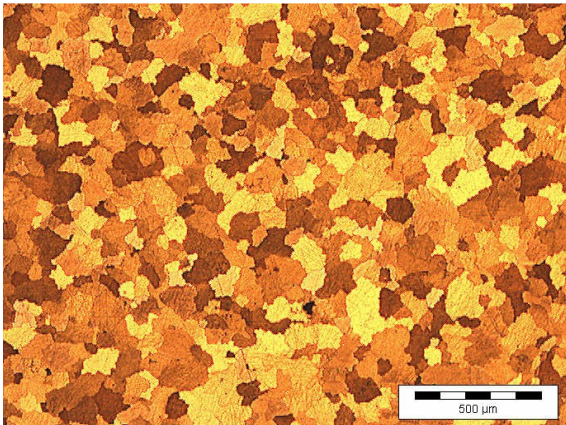


Figura 2: amostra temperada 2 vezes com microestrutura totalmente austenítica

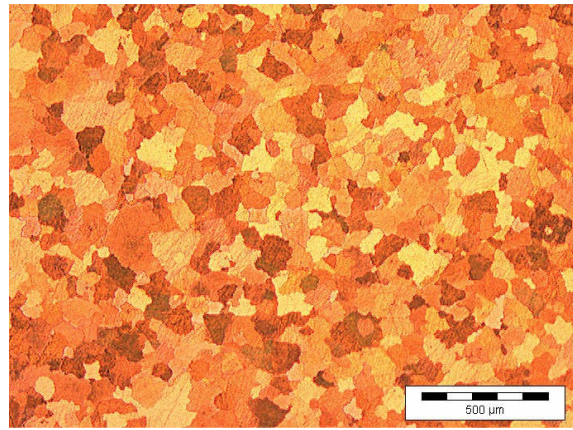


Figura 3: amostra temperada 22 vezes e ainda com microestrutura totalmente austenítica

Pode-se admitir que haja um decréscimo de 0,002273% em massa de berílio em média para cada tratamento de têmpera efetuado e que essa perda de berílio é acompanhada por um paralelismo das curvas de aquecimento e resfriamento.

A partir dessas análises é possível estimar com segurança que se o comportamento das curvas de variação de temperatura seguirem a mesma tendência da atual, as amostras apresentarão exclusivamente fase martensita quando sujeitas a aproximadamente 45 tratamentos térmicos de têmpera. Isso é possível estimar uma vez que segundo Melo, as ligas Cu-11,8Al-0,5Nb-0,5Ni-0,5Be (% em peso), apresentam na temperatura ambiente uma estrutura completamente martensítica.

A suposição mais plausível para o aumento nas temperaturas de transformação de fase é a perda de berílio por oxidação motivada por longos períodos de exposição às altas temperaturas nos fornos sem controle de atmosfera. O berílio desloca-se para a superfície e forma lentamente uma camada de óxido sobre a superfície da amostra. Durante o resfriamento brusco as diferenças nos coeficiente de dilatação térmica do óxido e da liga resultam na formação de trincas que facilitam o contato do berílio do interior da amostra com o oxigênio da atmosfera dando continuidade ao ciclo de oxidação em cada tratamento.

Como a massa média das amostras submetidas ao ensaio de DSC é de aproximadamente 235,5mg, é provável que à medida que a massa das amostras aumentem, esse decréscimo de berílio se torne menos significativo devido ao fato das distâncias para o deslocamento do berílio na amostra serem também maiores necessitando um maior tempo de exposição a atmosfera não controlada para uma mesma perda percentual de berílio.

Foi verificado pela análise por differential scanning calorimetry (DSC) que à medida que os tratamentos de têmpera foram sendo efetuados, os gráficos de DSC perderam estabilidade no comportamento onde os picos endotérmicos e exotérmicos se alargam em direção ao eixo das temperaturas bem como se reduzem na direção do eixo do fluxo térmico como mostrado nas Figuras 4, 5 e 6.

DSC da liga CuAlBeNbNi para duas têmperas

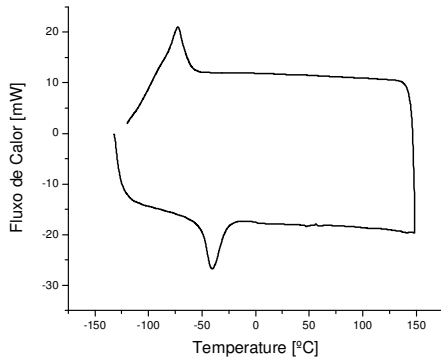


Figura 4: DSC para a amostra temperada 2 vezes

DSC da liga CuAlBeNbNi para doze têmperas

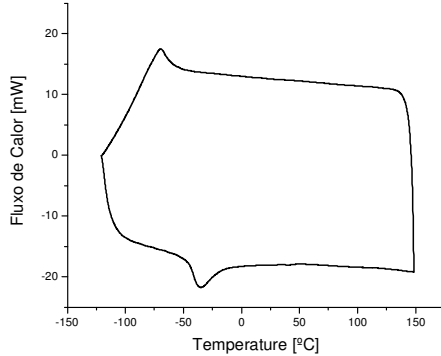


Figura 5: DSC para a amostra temperada 12 vezes

DSC da liga CuAlBeNbNi para vinte e duas têmperas

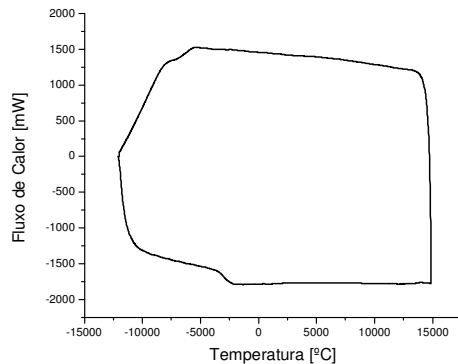


Figura 6: DSC para a amostra temperada 22 vezes

#### 4. Conclusão

As amostras das ligas Cu-11,8Al-0,5Nb-0,5Ni-0,6Be (% em peso) sofrem um decréscimo significativo em sua percentagem de berílio quando submetidas a tratamentos térmicos de têmperas sucessivos em condi es de atmosfera não controlada e, em seguida, resfriadas em  gua. Esta perda de berílio influencia diretamente as temperaturas de transforma o de fase austenítica e martensítica como pode ser comprovado através de ensaios de DSC e microscopia  ptica.

#### 5 Agradecimentos

O segundo autor gostaria de agradecer ao suporte financeiro do CNPq e FUNCAP através da concessão de sua bolsa de Desenvolvimento Científico Regional (DCR - projeto de número 35.0053/2011.1) para Universidade de Fortaleza (UNIFOR).

#### Referências

- [1] FMB Fernandes, "Ligas com Memória de Forma", Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Ciências dos Materiais/CENIMAT, Lisboa, Portugal, abril 2006.
- [2] A Isalgue, J Fernandez, V Torra, FC Lovey, "Conditioning treatments of CuAlBe shape memory alloys for dampers", *Materials Science and Engineering A*, **438-440**:1085-1088, 2006.
- [3] S Montecinos, A Cuniberti, "Thermomechanical behavior of a CuAlBe shape memory alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, **457**:332-336, 2008.
- [4] SN Balo, M Ceylan, "Effect of Be content on some characteristics of CuAlBe shape memory alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, **124**:200-208, 2002.
- [5] D Dunne, M Morin, C Gonzalez, G Guenin, "The effect of quenching treatment on the reversible martensitic transformation in CuAlBe alloys", *Materials Science and Engineering A*, **378**:257-262, 2004.
- [6] DF Oliveira, "Determina o das propriedades termomecânicas das ligas CuAlNi e CuAlBe com efeito memória de forma para utiliza o em atuadores mecânicos", Disserta o de Mestrado em Engenharia Mecânica apresentada na Universidade Federal da Paraíba, 2009.
- [7] S Belkahl, Elaboration et caractérisation de nouveaux alliages   mémoire de forme de basse température type CuAlBe", Th se de Doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Villeurbanne, France, 1990, 132p.