

## RESUMO

### 1. RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os aspectos microestruturais resultantes da solidificação do Bronze Alumínio Silício CuAl6Si2 e sua correlação com propriedades de interesse à sua aplicação como dureza, resistência mecânica, resistência a corrosão e ao desgaste. A liga CuAl6Si2 é utilizada em ambientes que necessitam resistência a corrosão e desgaste, e, devido à baixa permeabilidade magnética, é também aplicada na área da defesa para a fabricação de componentes mecânicos que fazem a identificação de minas terrestres acionadas por meio de sinal magnético. Essa liga também possui boa usinabilidade. O principal parâmetro microestrutural de interesse é a fração volumétrica de fase  $\alpha$ , e, busca-se entender como essa varia em função das variáveis térmicas de solidificação obtidas por solidificação unidirecional ascendente para aprimorar as propriedades da liga. Estas variáveis térmicas são responsáveis pela formação das fases presentes no Bronze Alumínio Silício e interferem diretamente nas propriedades mecânicas do material. Para estudos de desenvolvimento e aprimoramento dos processos de fundição usa-se comumente a estratégia de solidificação unidirecional, onde o material é solidificado em um dispositivo com sistema ascendente de fluxo de calor, sob condições não estacionárias. Nesta técnica o calor é extraído direcionalmente por intermédio de uma base de aço ABNT 1020 refrigerado a água e a temperatura é monitorada ao longo do comprimento de solidificação com termopares. No presente trabalho serão avaliados resultados publicados em teses e revistas científicas de circulação internacional com elevado fator de impacto que estudaram essa liga ou ligas semelhantes. Dessa forma, será traçado um panorama geral sobre o estado da arte dessa correlação entre a estratégia de fundição com a microestrutura e propriedades da liga CuAl6Si2.

Palavras chave: Bronze Alumínio Silício fundido, Microestrutura, Solidificação Unidirecional, Transformação de fases.

### 2. ABSTRACT

This work presents a bibliographic review on the microstructural aspects resulting from the solidification of Bronze Aluminum Silicon CuAl6Si2 and its correlation with properties of interest to its application such as hardness, mechanical resistance, corrosion resistance and wear. The CuAl6Si2 alloy, which is used in environments that require resistance to corrosion and wear, due to low magnetic permeability, a characteristic which is extremely desirable in the area of defense for the manufacture of mechanical components that make the identification of landmines activated by means of magnetic signal, also has good machinability. The main microstructural parameter of interest is the  $\alpha$ -phase volumetric fraction, and we seek to understand how it varies depending on the thermal solidification variables obtained by unidirectional upward solidification to improve the properties of the alloy. These thermal variables are responsible for the formation of the phases present in Bronze Aluminum Silicon will directly interfere in the mechanical properties of the material. For studies of development and improvement of cast processes, the unidirectional solidification strategy is commonly used, where the material is solidified in a device

<sup>1</sup> Universidade Federal do ABC, paulo.tedardi@ufabc.edu.br

<sup>2</sup> Universidade Federal do ABC, anibal.mendes@ufabc.edu.br

with an upward heat flow system, under non-stationary conditions. In this technique, the heat is extracted directionally by means of a water-cooled ABNT 1020 steel base and the temperature is monitored along the solidification length with thermocouples. Papers published in international scientific theses and journals with a high impact factor that studied this alloy or similar alloys will be evaluated. Then, an overview of the state of the art of this correlation between the cast strategy with the microstructure and properties of the CuAl6Si2 alloy will be traced.

**Keywords:** Silicon Aluminum Bronze as Cast, microstructure, unidirectional solidification, phase transformation.

### 3. INTRODUÇÃO

#### 3.1 Considerações iniciais

Ligas fundidas de Bronze Alumínio Silício encontram aplicações em diversos setores como automotivo (guia de válvula), elétrico (Hardware de linha de polo), aeronáutico (pilões das asas) e típicas aplicações industriais (engrenagens, parafusos, porcas, buchas e etc.), dessa forma torna-se indispensável à realização de estudos metalúrgicos detalhados em que se buscam o desenvolvimento da liga e consequentemente o aprimoramento das propriedades mecânicas e estruturais do material (SANTOS, 2017).

O bronze alumínio é um tipo de bronze na qual o alumínio é o principal metal de liga adicionado ao cobre, em contraste com o bronze padrão (cobre e estanho) ou latão (cobre e zinco). Uma variedade de bronze alumínio de diferentes composições encontrou-se uso industrial, com a maioria variando de 5% a 11% de alumínio, a massa restante sendo cobre. Outros agentes de liga, como ferro, níquel, manganês e silício também são às vezes adicionado a bronzes de alumínio (Božidar MATIJEVIĆ et al, 2017)

O desenvolvimento das ligas de Bronze Alumínio Silício fundidas tem sido destinado principalmente para o segmento militar da marinha na fabricação de diversos componentes devido ao conjunto de características, como: elevadas propriedades mecânicas, excelente resistência à corrosão e ao desgaste e baixa permeabilidade magnética (VAIDYANATH, 1968; RICHARDSON, 2016).

No processo de fundição, durante a solidificação, os metais e suas ligas produzem vários tipos de microestruturas e distribuição de fases, a depender da das taxas de extração de calor ao longo da peça que está se solidificando. A microestrutura, tipicamente policristalina nos metais de engenharia, se forma ao redor de núcleos de solidificação, podem apresentar morfologias e dimensões diferentes muito variáveis em função da taxa de resfriamento, que irão influenciar diretamente as propriedades físicas, químicas e mecânicas do material (MOREIRA, 2011).

#### 3.2 Justificativas e Relevâncias

Nesse trabalho visou-se a análise do comportamento da microestrutura, microdureza e dureza, em função das variáveis térmicas de solidificação, visto que as taxas de resfriamento influenciam de forma direta nas características mecânicas e estruturais de um produto fundido.

O estudo das variáveis térmicas de solidificação é de extrema importância, pois as peças e os componentes fundidos possuem uma extensa gama de espessuras que sofrem o resfriamento partir de uma interface metal/molde apresentando, portanto, diferenças de propriedades mecânicas em função da distância da superfície a qual sofre primeiramente o resfriamento. (RICHARDSON, 2016).

O estudo do Bronze Alumínio Silício torna-se ainda mais relevante quando as complexas transformações de fases que ocorrem nessas ligas são consideradas, visto que, a formação dos microconstituintes depende diretamente das variáveis térmicas de solidificação. (MOREIRA, 2011). Assim, neste trabalho, será estudada a

<sup>1</sup> Universidade Federal do ABC, paulo.tedardi@ufabc.edu.br

<sup>2</sup> Universidade Federal do ABC, anibal.mendes@ufabc.edu.br

influência da solidificação unidirecional e os aspectos macroestruturais do SAB (Silicon Aluminum Bronze). Do ponto de vista da previsão de fases que irão se forma na liga, a adição de silício pode ser considerada como uma adição adicional de alumínio, pois tem tendência a formar fase  $\beta$  e causa certo grau de endurecimento, porém o foco é o estudo da fase  $\alpha$  conforme seção vertical do diagrama ternário Cu-Al-Si em 6% de Al, conforme mostrado na Figura 1. Nesta figura é possível observar que o resfriamento da liga fundida passa pelo campo de coexistência das fases  $\alpha$  e  $\beta$  em temperaturas acima de 750°C e, abaixo desta temperatura, com o prosseguimento do resfriamento a liga estará no campo de primário da fase  $\alpha$ .

#### 4. METODOLOGIA

Seguindo o objetivo geral deste trabalho em analisar os aspectos microestruturais da liga CuAl6Si2 e sua correlação com propriedades de interesse, tomando como base a literatura relevante existente. O estudo foi elaborado a partir da composição da liga relacionada a norma de defesa “Ministry of Defence Standard 02-834” também muito próxima a composição da norma composição da CDA (Copper Development Association) UNS C95600, descrita abaixo:

A revisão da literatura deste trabalho foi realizada nos periódicos vinculados à base de dados Science Direct, em publicações com fator impacto maior que 1 que foram publicadas recentemente. Para a busca de trabalhos como fontes de pesquisa, foram inicialmente empregados os descritores: Silicon Aluminum Bronze as cast, microstructure silicon aluminum bronze, Silicon aluminum Bronze unidirectional solidification. Trabalhos correlatos que foram citados nos resultados desta busca inicial também foram considerados nesta revisão.

No banco de dados da Science Direct, com os descritores acima mencionados, foram encontrados 3.789 artigos relacionados, nos idiomas português, inglês e outros. Dentre esse montante, foram selecionados 21 artigos que continham informações sobre Bronze Alumínio Silício. Ainda dentre esses, somente 7 artigos apresentam dados de propriedades mecânicas e microestruturais de interesse a essa revisão.

A análise das informações foi realizada por meio de leitura exploratória do material encontrado, em uma abordagem qualitativa sobre os métodos e rotas de processamento utilizadas e quantitativa, em relação às propriedades que foram obtidas por esses autores.

#### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo J. Iqbal<sup>1</sup> et al, (2008) foi realizado um experimento onde foi inserido amostras da liga fundida em uma circunferência ao redor de um forno de tubo vertical de solidificação unidirecional onde o sistema de solidificação direcional é conectado a termopares e composto de um tubo que serve ao mesmo tempo de base para a chapa de aço ABNT 1020, a qual é resfriada pela água. Os corpos de prova, foram fundidos a 965°C e mantidos nesta temperatura por 30 minutos. O forno foi então desligado e a temperatura caiu gradualmente. O termopar foi conectado a um registrador gráfico que registrou a queda de temperatura com o tempo. As amostras foram retiradas do forno em intervalos regulares conforme a temperatura caía. Para microscopia óptica, as amostras foram preparadas usando técnicas padrão mediante norma ASTM E3. O procedimento de solidificação foi realizado e comprovado a eficácia em trabalhos com ligas de Bronze, realizado por G.A. Santos (2018), V.T. Santos (2017), Teram R. (2019) e Nascimento M.S (2019) e J. Iqbal et al (2008).

Segundo B. A. Lloyd & J. W. Pyemont (1974) foi estudada a composição de 2% de Si e um intervalo de 5-11% de Al em liga de cobre, dessa forma o estudo

<sup>1</sup> Universidade Federal do ABC, paulo.tedardi@ufabc.edu.br  
<sup>2</sup> Universidade Federal do ABC, anibal.mendes@ufabc.edu.br

abrange também a liga CuAl6Si2 indiretamente. No estudo foi investigada a fundição de cobre-silício2 utilizando um forno de indução e resfriado lentamente em aproximadamente 10°C/h, onde evidenciou que na liga CuAl6Si2 é formada unicamente por fase  $\alpha$  com início de formação de  $\beta$  e ausência total de fase  $\kappa$ . Em outro trabalho realizado por J. Iqbal. et al, a sequência de desenvolvimento microestrutural durante o resfriamento contínuo a partir das temperaturas próximas da solidus mostrou que em temperaturas mais altas a liga consiste em  $\beta$  mais  $\alpha$ . A fase  $\alpha$  exibe uma estrutura poligonal. Conforme a temperatura cai, as partículas de formato irregular são nucleadas. Em temperaturas mais baixas, a solubilidade do ferro em  $\alpha$  é excedida e pequenas partículas em forma de ripa que se formam na fase  $\alpha$  (J. Iqbal. et al, 2008).

A liga CuAl10Ni5Fe5, próxima em aplicação mediante a norma ASTM B150, foi solidificada unidirecionalmente por um forno de indução com a temperatura de 1250°C, a partir da leitura do durômetro obteve-se uma dureza média dos pontos de 184,8HB (Santos, 2017). Já para a liga CuAl10Ni5Fe3, foi realizado um experimento onde fundiu-se nos padrões aqui relatados, após a fundição realizou-se o aquecimento do material a algumas temperaturas para medir a variação do mesmo em relação a temperatura (Richardson, 2016). Os autores observaram que a dureza inicial de 200HB foi reduzida a 50 HB quando o material foi exposto a uma temperatura de 538°C. Neste trabalho, foi possível observar que um aumento na velocidade de queda da dureza a partir de 300°C. Esse resultado indica que o material apresenta relativa estabilidade térmica até 300°C.

Para outra liga, a Cu14Al5Ni5Fe, realizaram-se ensaios semelhantes e foi observado um aumento da dureza do material quando comparada com ligas comerciais similares, tais como CuAl10Ni5Fe5, CuAl10Ni5Fe3 CuAl6Si2, teve um aumento, saltando do valor médio de 184,8 HB (Santos et al., 2017) para o valor médio de 273,2 HB na mesma posição (53 mm) (Teram, et al, 2019).

A partir da compilação de resultados apresentados na Tabela 2 é possível observar que as ligas fundidas com a presença dos elementos Ni e Fe possuem uma dureza mais elevada. Além disso, com o aumento do teor de Fe, aumente-se também a permeabilidade magnética da liga e é favorecido a redução dos grãos na liga (Richardson, 2016). A compreensão do efeito de cada desses elementos de liga nessas ligas será fundamental para a correta seleção da liga em cada aplicação. Por exemplo, um dos fatores determinantes utilização da liga CuAl6Si2 é devido à baixa permeabilidade magnética.

A Figura 2 a seguir ilustra de maneira esquemática o o efeito típico de cada elemento de ligas em algumas propriedades de interesse nessas ligas como, a resistência mecânica, a resistência a corrosão, a usinabilidade e a resistência ao desgaste. Dessa forma é possível ver que, por exemplo, adições de Al colaboram para a melhoria simultânea da resistência mecânica, a resistência a corrosão e resistência ao desgaste. De maneira semelhante, maiores teores de Si estarão associados a melhorias na resistência e mecânica e a corrosão, mas, sem afetar de maneira significativa o comportamento em desgaste.

## 6. CONCLUSÕES

Com base nos revisão da literatura aqui apresentada, pode-se concluir que:

O acréscimo na concentração de Al no bronze favorece o endurecimento por precipitação da liga e melhora simultaneamente a resistência a corrosão. A adição de alumínio, e consequentemente a redução de cobre, proporcionou um aumento de dureza sem a necessidade de processos adicionais após a fusão do material o que possibilita uma redução de massa, custo e tempo na utilização da liga estudada, com o aumento da dureza ganha-se em resistência mecânica e devido a adição de alumínio, ganha-se em resistência a corrosão e desgaste.

<sup>1</sup> Universidade Federal do ABC, paulo.tedardi@ufabc.edu.br

<sup>2</sup> Universidade Federal do ABC, anibal.mendes@ufabc.edu.br

A adição de Si nas ligas de bronze alumínio, apresenta um acentuado efeito de retardamento do amolecimento inicial e da recristalização. O grau de retardamento desse amolecimento inicial parece ser diretamente proporcional ao teor de silício, embora acima da temperatura de recristalização completa não haja efeito significativo, aumenta a resistência à corrosão e ao desgaste consideravelmente com o teor a qual é adicionado.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM B150 / B150 M, 2019, "Standard Specification for Aluminum Bronze Rod, Bar, and Shapes", ASTM International.
- ASTM E3, 2012. "Preparation of Metallographic Specimens", ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM E10, 2012. "Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials", ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- B. A. Lloyd & J. W. Pyemont, 1974. "Phase equilibrium diagram for 2% silicon isopleth in copper-aluminium-silicon alloys in the range 5-11%Al", Metals Technology.
- Božidar MATIJEVIĆ, 2017, "EFFECT OF HEAT TREATMENT PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF ALUMINIUM BRONZE", TECHNICAL JOURNAL 11, P. 107-110.
- CDA, 1982, COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION; Aluminium Bronze Alloys –Technical Data, Publication nº82.
- DEF STAN 02-834, 2000, "Requirements for Aluminium Bronze Part 2", Ministry of Defence, USA.
- Garcia, A., 2007, "Solidificação: Fundamentos e Aplicações", Editora da Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, 2. ed., Campinas.
- Hasan, F.; Jahanafrooz, A.; Lorimer, G. W.; Ridley, N., 1982. The morphology, crystallography, and chemistry of phases in as-cast nickel aluminum bronze. Metallurgical Transaction A, vol. 13A, p.1337-1345.
- Jahanafrooz, A.; Hasan, F.; Lorimer, G.W.; Ridley, N., 1983. Microstructural development in complex nickel aluminum bronzes. Metallurgical Transaction A, v. 14A, p. 1951-1956.
- MOREIRA, P. S. Efeito da taxa de resfriamento e dos tratamentos térmicos sobre as propriedades mecânicas da liga Al-Si-Mg (A356.0) fundida. 2011. 85 f. Dissertação (Mestrado) – REDEMAT, Ouro Preto, 2011
- OHNO, A. Solidificação dos Metais, Tradutores Paulo da Silva Pontes, Nivaldo Lemos Cupini. São Paulo: Livraria Ciência e Tecnologia, 1988.
- Richardson, I., 2016, "Guide to Nickel Aluminum Bronze for Engineers", Copper Development Association, Nº 222.
- Nascimento, M. S.; Frajuba, C.; Nakamoto, F. Y.; Santos, G. A. dos; Couto, A. A., 2017. Correlação entre variáveis térmicas de solidificação, microestrutura e resistência mecânica da liga Al-10%Si-2%Cu. Matéria (Rio de Janeiro), 22(1), e11774. Epub 06 de abril de 2017. 12 Dec. 2017 <<https://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0106>>.
- Santos, G. A., 2009, "Correlação entre Variáveis Térmicas de Solidificação, Microestrutura e Comportamento Mecânico de Ligas Al-Zn e Al-Cu-Li", Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São J. dos Campos (SP).
- Santos, V. T., 2017, "Correlação entre as variáveis térmicas de solidificação, microestrutura, microdureza e dureza da liga Bronze Alumínio Níquel CuAl10Ni5Fe5", Dissertação de Mestrado, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, São Paulo (SP).
- TERAM, R.; SANTOS, G. A.; NASCIMENTO, M. S.; NAKAMOTO, F. Y.; SANTOS, V. T.; SILVA, M. R.; COUTO, A. A. INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS TÉRMICAS DE SOLIDIFICAÇÃO NA MICROESTRUTURA E DUREZA DA LIGA CU-14AL-5NI-5FE
- VAIDYANATH, L.R. The Manufacture of aluminium-bronze casting. 1968.

<sup>1</sup> Universidade Federal do ABC, paulo.tedardi@ufabc.edu.br

<sup>2</sup> Universidade Federal do ABC, anibal.mendes@ufabc.edu.br

## 8. AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força e condição de realizar este trabalho, pela condição, vida, saúde e por estar comigo em todos os momentos. Também a minha família por todo apoio.

Agradeço a Universidade Federal do ABC pelo suporte, principalmente pela orientação, dedicação, ensinamentos, conselhos e incentivo do Prof. Dr. Anibal, o qual esteve sempre presente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Bronze Alumínio Silício fundido, Microestrutura, Solidificação Unidirecional, Transformação de fases