

AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DE DUREZA APÓS ENVELHECIMENTO NATURAL NA LIGA AL-CU OBTIDA A PARTIR DE LATAS DE BEBIDAS E FIOS DE COBRE *

Isaque Alan de Brito Moura¹
Gabriel Melo Ferreira²
IvnaNazle Cavalcante Sarquis³

Resumo

As ligas do sistema Al-Cu, conhecidas como série 2XXX (trabalhadas) e 2XX.X (fundidas), são as ligas de alumínio de desenvolvimento mais antigo, sendo que o seu surgimento data do início do século XX, quando o alemão Alfred Wilm descobriu o fenômeno de endurecimento por precipitação. Essas ligas até hoje são conhecidas como duralumínio. A dureza é uma propriedade mecânica largamente utilizada em estudos e pesquisas nas áreas mecânicas e metalúrgicas, e principalmente na especificação e comparação de materiais. Visando analisar a possibilidade de envelhecimento natural, a liga de alumínio com 5% do percentual em massa de Cu foi levada a um ensaio de dureza para que uma futura análise do poder de envelhecimento da peça a partir da introdução de cobre pudesse ser feita. Após a obtenção desse dado, foram realizados ensaios de dureza da liga com 5% de Cu logo após a solidificação e resfriamento, objetivando analisar os níveis de dureza da peça em relação ao tempo. Diante dos resultados obtidos e da regularidade acerca do aumento de dureza em função do tempo, podemos concluir que os resultados sugerem que pode ocorrer envelhecimento natural em uma liga de alumínio contendo 5% de Cu em massa. Esse efeito pode ser explicado pela formação das chamadas zonas de Guinier Preston (GP), em forma de discos formados por um arranjo de átomos de cobre e alumínio nas regiões enriquecidas em cobre, e que já são responsáveis por um razoável ganho de dureza no material devido à adição o percentual de Cu.

Palavras-chave: Metalurgia física; Duralumínio; Zonas GP; Envelhecimento.

EVALUATION OF HARDNESS VARIATION AFTER NATURAL AGING IN AL-CU ALLOY OBTAINED FROM BEVERAGE CANS AND COPPER WIRE

Abstract

The alloys of the Al-Cu system, known as series 2XXX (worked) and 2XX.X (cast), are the aluminum alloys of the earliest development, and their appearance dates back to the early 20th century when the German Alfred Wilm discovered the phenomenon of precipitation hardening. These alloys are known today as duralumin. Hardness is a mechanical property widely used in studies and research in the mechanical and metallurgical areas, and especially in the specification and comparison of materials. In order to analyze the possibility of natural aging, the aluminum alloy with 5% of the Cu mass percentage was subjected to a hardness test so that a future analysis of the aging power of the part from the introduction of copper could be made. After obtaining this data, tests of hardness of the alloy with 5% of Cu were carried out after solidification and cooling, in order to analyze the hardness levels of the part in relation to the time. Considering the results obtained and the regularity about the increase of hardness as a function of time, we can conclude that the results suggest that natural aging can occur in an aluminum alloy containing 5%

Cu in mass. This effect can be explained by the formation of the so-called Guinier Preston (GP) zones, in the form of discs formed by an arrangement of copper and aluminum atoms in copper-enriched regions, which are already responsible for a reasonable material hardness gain due to the addition of Cu..

Keywords: Physical Metallurgy; Duralumin; GP Zones; Aging..

- ¹ *Graduando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.*
- ² *Graduando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.*
- ³ *Graduanda em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.*

1. INTRODUÇÃO

As ligas do sistema Al-Cu, conhecidas como série 2XXX (trabalhadas) e 2XX.X (fundidas) na classificação Aluminum Association, são as ligas de alumínio de desenvolvimento mais antigo, sendo que o seu surgimento data do início do século XX, quando Alfred Wilm, na Alemanha, descobriu o fenômeno de endurecimento por precipitação. Essas ligas até hoje são conhecidas como duralumínio.

O Duralumínio foi desenvolvido pelo alemão Alfred Wilm metalúrgico em Dürener em Metallwerke Aktien Gesellschaft. Em 1903, Wilm descobriu que uma liga de alumínio contendo 4% de cobre iria lentamente endurecer quando deixada à temperatura ambiente durante alguns dias. Outras melhorias levaram à introdução do duralumínio em 1909. Os principais constituintes das ligas são cobre, manganês e magnésio. Entre essas ligas, a 2017 é a mais antiga e também a mais conhecida.

As simples introduções destes elementos de liga já eleva a resistência à tração de 9,1 kg/m² (alumínio comercialmente puro) para 18,2 kg/m². O tratamento térmico de envelhecimento (envelhecimento por precipitação), por tempo e temperatura controlados, permite aumentar ainda mais a resistência à tração, para cerca de 43 kg/m².

Esse grupo de ligas Al-Cu pode ser subdividido em dois grupos principais: as ligas Al-Cu com teores de Mg relativamente baixos (exemplo: liga 2017) e as ligas Al-Cu com teores de magnésio relativamente altos, também denominados Al-Cu-Mg, com os teores de Mg superiores a 1% (exemplo: liga 2024). A principal diferença desses dois subgrupos é que nas ligas Al-Cu, mais antigas, só contribuem para o endurecimento por precipitação as fases precursoras da fase Θ (Al₂Cu): Θ' e Θ'' , ao passo que nas ligas Al-Cu-Mg, é igualmente importante a contribuição da fase S', precursora da fase S (Al₂CuMg).

De um modo geral, as ligas Al-Cu(-Mg) apresentam elevada resistência mecânica após tratamento térmico de endurecimento por precipitação. Entretanto, apesar dessa vantagem, apresentam algumas desvantagens quando comparadas com outros tipos de ligas de Al, que evitam desde a resistência à corrosão relativamente baixa e a conformabilidade limitada até a soldabilidade igualmente restrita (em geral, são soldadas por processos de resistência elétrica).

As ligas Al-Cu(-Mg) apresentam razoável endurecimento quando mantidas por tempos relativamente longos à temperatura ambiente. É chamado envelhecimento natural, que recebe essa denominação para distingui-lo do envelhecimento artificial, obtido através de tratamentos térmicos em fornos. Esse efeito ocorre devido à formação das zonas GP, em forma de discos formados por um arranjo de átomos de cobre e alumínio nas regiões enriquecidas com cobre, e que são responsáveis por um ganho razoável de dureza no material mantido à temperatura ambiente.

As zonas GP também se formam no início do envelhecimento artificial e essas zonas são consideradas precursoras dos precipitados intermediários metaestáveis Θ' e Θ'' . O precipitado Θ' , que se forma durante algumas horas de envelhecimento (3 ou 4 horas a 190°C), é coerente com a matriz e possui formas de plaquetas, assim como o precipitado Θ'' , que se forma algum tempo depois, mas coexiste com o precipitado Θ' , durante um certo intervalo de tempo, o qual

corresponde à dureza mais elevada que pode ser obtida em ligas Al-Cu(-Mg). Ao continuar o tratamento térmico de envelhecimento, ocorre a formação do precipitado Θ (Al_2Cu). Este é o chamado precipitado de equilíbrio termodinâmico, uma vez que o prosseguimento do envelhecimento não muda suas características, com exceção do tamanho das partículas, que tende a crescer. A formação do precipitado Θ corresponde ao superenvelhecimento da liga Al-Cu(-Mg), que é caracterizado por uma acentuada queda de dureza.

1.1 História da descoberta do Duralumínio

O surgimento do Duralumínio começou quando o engenheiro Alfred Wilm fez estudos para substituir o latão de cartuchos por uma liga de alumínio, para que pudesse ter um menor peso e propriedades próximas. Wilm, durante dois anos pesquisou o possível fortalecimento das ligas de Al-Cu através de tratamento térmico. Porém, no começo houve uma grande decepção ao saber que, contrariamente aos aços carbono, essas ligas se tornavam macias e não duras após a têmpera a partir de uma temperatura elevada.

Em 1903, o centro no qual Wilm trabalhava foi contratado por uma fábrica alemã de munições de guerra de Berlim como objetivo de encontrar uma liga de alumínio com características desejáveis de latão que poderiam ser usadas para a fabricação de munições. Fazendo testes, Wilm adicionou 0,5% Mg e preparou uma lâmina a qual foi aquecida em um banho de sal a aproximadamente 520°C e em seguida a resfriou. Alguns dias depois, Wilm descobriu que a dureza havia aumentado significativamente comparada às durezas medidas anteriormente.

Após estes resultados, foi obtida uma patente para uma liga com 3,5-5,5% de Mg, com mais ou menos 1% de Mn, e em 1908 o trabalho experimental avançou para um estágio que foi considerado pronto para ser lançado no mercado. O nome Duralumínio veio porque toda a invenção de Wilm foi realizada em Duren, em Duren Metalwerke, e em 1911, Wilm finalmente publicou artigos descrevendo seu trabalho e, logo após, abandonou o ramo da metalurgia para se dedicar à agricultura.

Até 1919, a análise de microestrutura através de microscopia óptica não revelou qualquer alteração que pudesse comprovar o endurecimento das ligas trabalhadas por Wilm. Porém, nesta data, foi possível concluir que o fenômeno de endurecimento foi causado por diminuição da solubilidade de alguns elementos de liga a temperatura ambiente.

Após isso, o Duralumínio logo começou a ser utilizado em larga escala para construção de aeronaves, principalmente no período da primeira Guerra Mundial pela Alemanha e, em seguida, também passou a ser utilizado em aviões de passageiros, com a característica de se utilizar folhas onduladas para a fuselagem e com isso aumentar ainda mais a rigidez.

O Duralumínio então passou a ser estudado bastante para que se pudesse entender todo o mecanismo de endurecimento. Nos EUA, três pesquisadores, Howard Scott, Paul Merica e R.G. Waltenberg, ficaram famosos por descobrir os principais contribuintes para o mecanismo de endurecimento por envelhecimento. As pesquisas concluíram que o endurecimento por envelhecimento exigiu uma liga onde o segundo metal era solúvel na matriz a uma temperatura elevada, mas era consideravelmente menos solúvel em temperaturas menores. As amostras da

ligativas que se aquecidas a uma temperatura mais alta e em seguida resfriadas rapidamente para manter a solução supersaturada e, neste ponto, a liga de metal era mais dúctil. O envelhecimento consistia na precipitação do segundo metal ou um composto entre os dois metais. No caso da liga de Wilm, isso ocorreu à temperatura ambiente, embora o envelhecimento tenha sido acelerado pelo aquecimento a uma temperatura mais elevada.

Todo este conhecimento desencadeou uma pesquisa mundial por outras ligas que poderiam ser endurecidas por envelhecimento e, numerosas composições de ligas foram encontradas com base no alumínio (exemplos: zinco, cobre, níquel, magnésio, zinco, ferro, entre outros).

O trabalho em questão objetiva avaliar a possibilidade de envelhecimento natural de uma liga Al-Cu, na qual o elemento Cu possui 5wt%.

2. DESENVOLVIMENTO

O alumínio possui grande afinidade pelo oxigênio e naturalmente forma uma camada fina de óxido que o protege a temperaturas ambientes. Porém, durante o processo de fusão, acima de 700°C, e à exposição a atmosfera oxidante do forno, resulta numa espessa camada de óxido de alumínio (Al_2O_3). Esta oxidação representa perda efetiva de matéria prima, agravada pelo arraste de alumínio metálico consigo. De forma a evitar uma significativa perda de material por oxidação, a fusão aconteceu por meio de um forno a cadinho removível, ao invés de um forno de indução. Neste último método, uma corrente eletromagnética é passada através do material, fazendo-o movimentar-se; devido a este fluxo, o alumínio líquido ficará mais exposto ao ar, oxidando-se com mais intensidade do que se estivesse em um cadinho à carvão, na qual não há movimentação do material e apenas uma fina camada de óxido é formada, protegendo o alumínio líquido da oxidação.

O forno cadinho nada mais é do que um forno concebido para utilização com recipientes duráveis conhecidos pela fusão de materiais. Um forno do tamanho correto e o ponto exato de temperatura é fundamental para um trabalho bem sucedido, sendo que quando o produto apresenta problemas de temperatura, o mesmo pode causar reações químicas problemáticas e pode tornar os materiais mais frágeis.

Estes cadinhos podem ser feitos a partir de uma variedade de materiais resistentes ao calor, que podem suportar temperaturas muito elevadas no interior do forno, enquanto uniformemente há transferência de calor para o seu conteúdo. Eles podem ser feitos de cerâmica, assim como outros materiais, dependendo de como e para o que serão usados. O operador pode adicionar os materiais que se desejam derreter e definir um ciclo de queima no forno de cadinho. O mesmo é responsável por reduzir os sólidos aos materiais derretidos uniformemente, que podem ser trabalhados diretamente do forno, bastando apenas levantar a sua tampa. Isso pode ser necessário para projetos onde o material tem de permanecer quente para que se tornem viáveis. Muitos têm opções para salvar ciclos de queima para atividades específicas. O tamanho do forno e sua disposição determinam o tamanho e a forma dos cadinhos que o mesmo pode acomodar.

Dois fatores que afetam as perdas de materiais são a temperatura e a relação área/peso; ou seja,

quantomenoraespessuradasucatamaiorasperdasméticas,edeformaexponencial.Assim, apesar das vantagens de se reciclar o alumínio, o processo de fusão gera grandes quantidades de resíduos e perdas metálicas.

A dureza é uma propriedade mecânica largamente utilizada em estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas, e principalmente na especificação e comparação de materiais.

Para o conceito de dureza são atribuídos diferentes significados, tais como medida de resistência do material a ações de origem mecânica sobre sua superfície, resistência à penetração, à deformação plástica e ao risco. Os métodos mais utilizados no ramo da metalurgia e mecânica para determinação de dureza são Brinell, Rockwell e Vickers.

Os metais, alumínio e cobre foram pesados e sem um balanço eletrônico analítico a qual a massa de Cu obedecia a proporção de 5% da massa de Al, que apresentava 31,82g. Deforma a manter a proporção, 1,67g de Cu foi utilizado para o procedimento. Inicialmente, o alumínio na forma sólida foi introduzido em um copinho de aço inoxidável e, em seguida, levado ao forno. Após o forno atingir a temperatura de 800°C, foi introduzido o copo com o alumínio. Nesse momento houve diminuição de aproximadamente 15°C da temperatura por conta da sua abertura.

Quando atingida novamente a temperatura de 800°C, foram cronometrados 15 minutos para completa fusão do alumínio. Após isso os fios de cobre foram em pequenas dimensões adicionados ao alumínio líquido, difundindo-se dentro da matriz líquida através do mecanismo de difusão. Após a homogeneização, aproximadamente 5 minutos após atingir a temperatura de 700°C, o copo com a liga foi retirado do forno. O conjunto foi deixado para esfriar lentamente ao ambiente. De acordo com o diagrama de fases Al-Cu, pode-se perceber que a temperatura mínima para que ocorra total solubilização da solução é de aproximadamente 680°C, onde teremos apenas fase líquida.

Visando analisar a possibilidade de envelhecimento natural, a liga de alumínio formada pela fusão de latas de bebidas, no estado bruto de fusão, foi levada a um ensaio de dureza para que uma futura análise do poder de envelhecimento da peça a partir da introdução de cobre pudesse ser feita. O ensaio de Dureza Brinell revelou os seguintes valores, mostrados na Tabela 1.

d1	d2	d	HB
0,849	0,825	0,8370	55,15605
0,885	0,827	0,8560	52,66045
0,829	0,858	0,8435	54,28331
0,839	0,892	0,8655	51,47375
0,887	0,886	0,8865	48,98439

Tabela 1. Ensaio de Dureza Brinell em liga de alumínio “como recebida” anterior a adição de cobre

d1: diâmetro 1; d2: diâmetro 2; HB: dureza Brinell

De acordo com os valores apresentados na Tabela 1, a média da dureza da peça como recebida será 52,51 HB.

Após a obtenção do sedado, foi realizado ensaio de dureza da liga com 5% de Cu logo após a solidificação e resfriamento, objetivando analisar os níveis de dureza da peça em relação ao tempo. Foram realizados 5 ensaios, em intervalos de aproximadamente 4 dias. O resultado dessa análise está apresentado no Gráfico 1 a seguir.

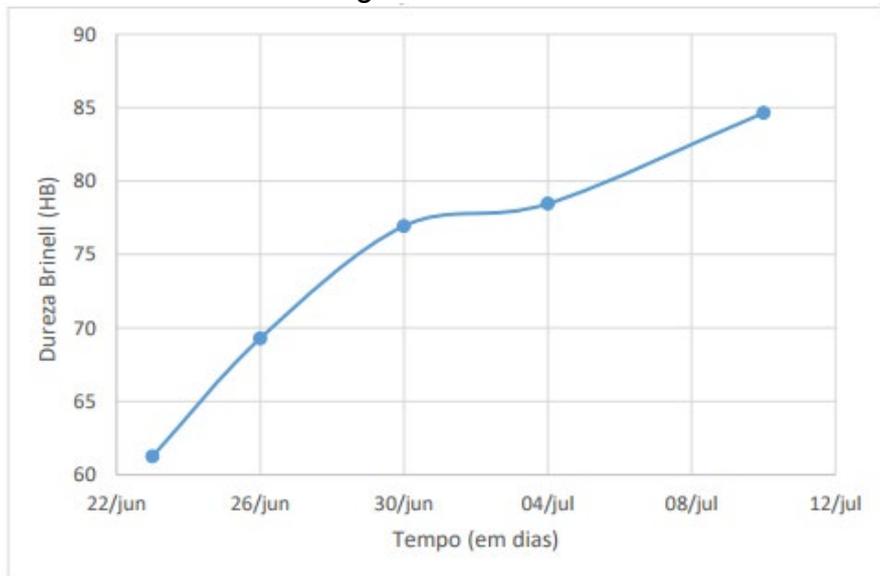


Gráfico 1. Variações de dureza da liga de Al com 5%wt de Cu em função do tempo.

Pelo gráfico pode-se perceber que a dureza da liga Al-Cu apresenta variações crescentes em seu valor de forma proporcional ao tempo, uma característica dada à ligas que apresentam envelhecimento natural. Durante os três primeiros dias de ensaio, período de 8 dias, houve um aumento de aproximadamente 8 HB a cada ensaio realizado. A quarta medição não revelou um aumento tão significativo. Na quinta medição, correspondendo a um intervalo de 18 dias desde a primeira medição, pôde-se medir um aumento de aproximadamente 23 HB.

3 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos de regularidade e aumento da dureza em função do tempo, podemos concluir que ocorre envelhecimento natural em uma liga de alumínio contendo 5% de Cu em massa.

Esse efeito pode ser explicado pela formação das chamadas zonas de Guinier Preston (GP), em forma de discos formados por um arranjo de átomos de cobre e alumínio nas regiões enriquecidas em cobre, e que já são responsáveis por um razoável ganho de dureza no material mantido à temperatura ambiente. O precipitado q'' , que deve ser formado após algumas horas de envelhecimento, é coerente com a matriz e possui formas de plaqueta, assim como o precipitado q' , que se forma algum tempo depois, mas coexiste com o precipitado q'' durante um certo intervalo de tempo, o qual corresponde à dureza mais elevada que pode ser obtida.

A liga em estudo pode ser empregada na indústria aeronáutica e automobilística. Amplamente utilizado em materiais (equipamentos) de montanhismo tais quais mosquetões, freios, etc.

Agradecimentos

Ao professor Jeferson Leandro Klug pelo apoio e disponibilidade para nos ajudar com materiais e infraestrutura do Laboratório de Fundição da Universidade Federal do Ceará.

REFERÊNCIAS

- 1 HABASHI, F. Extractive metallurgy of aluminum, In: HANDBOOK OF ALUMINUM. New York, Marcel Dekker, 2003. v. 2.
- 2 BARBOSA, Cassio. Alumínio e suas ligas: Ligas Alumínio-Cobre. In: BARBOSA, Cassio. Metais não ferrosos e suas ligas. 1. ed. Rio de Janeiro: E-pappers, 2014. cap. 1, p. 13-124. v. 1.
- 3 Regina Maria Hartog Pombo Rodriguez. Formação de óxidos nos revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica. PIPE. 2003 [acesso em 11 jun. 2018]. Disponível em: <http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/tese/005.pdf>.