

## ANÁLISE DO COMPORTAMENTO METALÚRGICO E MECÂNICO DA LIGA COMERCIAL AA2024-T3

Fábio Gatamorta (DEMM/FEM/UNICAMP) E-mail: fabiog@fem.unicamp.br

Vivian Maria Marini (UNIP) E-mail: vivianmarini@hotmail.com

Bruna Vilas Bôas (IFSP) E-mail: bruninhavb@yahoo.com.br

Luis Vanderlei Torres (IFSP e DEMM/FEM/UNICAMP) E-mail: torres@ifsp.edu.br; torres@fem.unicamp.br

**Resumo:** O alumínio ocupa lugar de destaque nos segmentos industriais e sua utilização deve-se à sua abundância na natureza como também às suas propriedades. A indústria metal-mecânica está em constante crescimento e desenvolvendo diversas ligas de alumínio, devido às mesmas possuírem combinações interessantes de propriedades químico-físico-mecânicas, destacando-se as ligas da série 2XXX. Estas ligas possuem baixa densidade e elevada resistência mecânica, além disso, suas propriedades podem ser melhoradas através de tratamento térmico de solubilização e envelhecimento. Portanto, este trabalho tem como objetivo a caracterização metalúrgica e mecânica da liga AA2024-T3 (condição comercial) e para efeito de comparação a mesma foi produzida via processo de tixoforjamento. Tem-se que as propriedades mecânicas em tração da liga comercial apresentaram valores de limite de resistência à tração de 473 MPa e alongamento em torno de 20%, valores superiores quando comparados com a condição tixoforjada, como também valores de dureza *vickers*.

**Palavras-chave:** Liga de alumínio, comportamento metalúrgico, comportamento mecânico, AA2024.

## METALLURGICAL AND MECHANICAL BEHAVIOR ANALYSIS OF AA2024-T3 COMMERCIAL ALLOY

**Abstract:** Aluminum occupies a prominent place among the industrial segments and its use is due to its abundance in nature as well as its properties. The metal-mechanical industry is constantly growing and also developing several aluminum alloys, because they have interesting combinations of chemical-physical-mechanical properties, standing out the 2XXX series alloys. These alloys present low density and high mechanical strength, and their properties can be improved through heat treatment of solubilization and aging. Therefore, this work aims the metallurgical and mechanical characterization of the alloy AA2024-T3 (commercial condition) and for comparison purposes it was produced via thixoforging process. The mechanical properties in tensile of the commercial alloy presented values of tensile strength limit of 473 MPa and elongation around 20%, higher values compared to thixoforging condition, as well as values of vickers hardness.

**Keywords:** Aluminum alloy, metallurgical behavior, mechanical behavior, AA2024.

### 1. Introdução

A humanidade sempre teve a necessidade de criar e aperfeiçoar novos materiais e métodos, como exemplo, a indústria aeronáutica que busca a redução de peso em seus componentes, tendo como consequência a redução do consumo de combustível e a diminuição de emissão de poluentes no ar, sendo assim, as ligas de alumínio têm sido utilizadas extensivamente em componentes de manufatura para a indústria aeronáutica e automotiva devido às suas propriedades (HERNANDEZ-PAZ, 2004; GATAMORTA, 2009).

As ligas do sistema Al-Cu, conhecidas como ligas da série 2XXX, são as ligas de alumínio mais antigas, sendo que o seu surgimento data do início do século XX, quando Alfred Wilm, na Alemanha, descobriu o fenômeno de endurecimento por precipitação, sendo o cobre um dos mais importantes elementos de liga, conferindo resistência mecânica ao material não somente em solução sólida, como também pela formação de precipitados através de tratamentos térmicos (ASM, 1990). Esse grupo de ligas pode ainda ser subdividido em dois

grupos: as ligas Al-Cu com teores de magnésio relativamente baixos e as ligas Al-Cu com teores de magnésio relativamente altos (também denominadas Al-Cu-Mg) superiores a 1%, como exemplo, a liga AA2024 (MARTIN, 1968). A liga AA2024 destaca-se por possuir baixa densidade e resistência mecânica elevada, além disso, existe a possibilidade de endurecimento por precipitação das fases  $\text{CuAl}_2$  e  $\text{CuMgAl}_2$ , ou seja, a liga pode ter suas propriedades melhoradas através do tratamento térmico de solubilização e envelhecimento. O tratamento térmico inicia-se com a solubilização promovendo a difusão dos elementos de liga no alumínio até a completa dissolução das fases secundárias presentes na liga. A têmpera do material solubilizado é a segunda etapa do tratamento onde o objetivo é manter em baixas temperaturas a condição de solução sólida supersaturada obtida com a solubilização e por fim, a etapa posterior é o endurecimento por precipitação através do envelhecimento seja ele à temperatura ambiente (envelhecimento natural) ou a uma temperatura mais elevada (envelhecimento artificial) (SOARES, 2009). Portanto, este trabalho tem como objetivo a caracterização metalúrgica e mecânica da liga AA2024-T3 (condição comercial) e para efeito de comparação a mesma foi produzida via processo de tixoforjamento.

## 2. Materiais e métodos

Neste capítulo será apresentada de forma detalhada toda a metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho, perfazendo a caracterização metalúrgica e mecânica da liga em estudo.

### 2.1. Matéria-prima

A matéria-prima utilizada neste trabalho foi a liga comercial de alumínio AA2024-T3, pertencente à série 2XXX, onde tem-se como principal elemento de liga o cobre que lhe confere boa resistência mecânica. Esta condição consiste no processamento mecânico através de um trabalho realizado a frio (laminação) seguido de um tratamento térmico de solubilização e envelhecimento natural. Na Tabela 1, tem-se a composição química da liga determinada via espectrometria de emissão atômica como também via norma ASTM B209-14 (ASTM, 2014).

Tabela 1 - Composição química da liga (% peso) determinada via espectrometria de emissão atômica (MARINI *et al.*, 2015; MARINI *et al.*, 2017).

Liga	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Al
AA2024-T3	4.54	1.48	0.62	0.28	0.08	0.20	0.02	0.02	bal.
ASTM B209-14	3.80-4.90	1.20-1.80	0.30-0.90	0-0.50	0-0.50	0-0.25	0-0.15	0-0.10	bal.

### 2.2. Caracterização metalúrgica

Para a análise metalúrgica, as amostras foram lixadas, polidas e submetidas a um ataque químico com reagente Keller modificado (1.0 ml HF, 2.5 ml HCl, 1.5 ml  $\text{HNO}_3$  e 95.0 ml  $\text{H}_2\text{O}$ ) com imersão total da amostra por um tempo de 1 s, sendo posteriormente enxaguadas em água corrente e secas com o auxílio de um soprador elétrico. As imagens foram obtidas através do microscópio ótico modelo NEOPHOT 55 e as imagens digitalizadas por meio do *software* LEICA Q500MC. A contagem de grãos se deu através do Método dos Interceptos de Heyn regido pela norma ASTM E112 (ASTM, 1996), sendo traçadas linhas retas sobre a imagem e obedecendo aos ângulos de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  com comprimento determinado; com as

linhas sobre a imagem, foi contada a quantidade de grãos interceptados pela linha e determinados os valores a partir da média correspondente ao tamanho da linha traçada (relativa ao aumento discriminado na micrografia). Foram utilizadas oito imagens para o cálculo dos tamanhos médios de grãos, sendo selecionados cinco campos aleatórios em cada uma das imagens, totalizando 40 medidas triplas, ou seja, um total de 120 medidas aleatórias.

### 2.3. Caracterização do comportamento mecânico

A caracterização do comportamento mecânico da liga ocorreu através de ensaios de tração e de ensaios de dureza *vickers*. Os ensaios de tração ocorreram em uma máquina universal de ensaios MTS-810 (capacidade de carga de 100 kN), com corpos de prova fabricados de acordo com a norma ASTM E8 / E8M-15a (ASTM, 2015); os dados de saída da máquina foram força, deslocamento e tempo para cada instante do ensaio, sendo utilizadas três réplicas para cada condição. Os ensaios de dureza *vickers* ocorreram em um equipamento da marca Future-Tech, modelo FV-800, em amostras lixadas e polidas; sendo realizadas 10 indentações em regiões aleatórias, com carga de 0,3 kgf com tempo de indentação de 15 s regido pela norma ASTM E92 (ASTM, 2016).

### 3. Resultados e discussões

Através da caracterização metalúrgica, observam-se os aspectos da morfologia e do tamanho de grão da liga. Na Figura 1(a) sob a condição comercial, ou seja, obtida a partir do processo de laminação e com tratamento térmico T3 os grãos possuem formatos alongados e deformados, devido ao direcionamento dado pelo sentido do processo de laminação, ou seja, a liga apresenta uma orientação cristalina preferencial caracterizando um comportamento anisotrópico e com tamanho médio de grão de 47  $\mu\text{m}$ . Com relação ao comportamento mecânico em tração, a liga apresenta valores satisfatórios de limite de resistência à tração, de 473 MPa e alongamento de 20%, isso ocasionado pelo encruamento dos grãos devido ao processo de laminação, além da presença de grãos recristalizados formado pelo uso de alta deformação associado à temperatura que ativam os mecanismos de refino da estrutura pelo processo de recristalização (MARINI *et al.*, 2015); sendo assim, os níveis elevados das propriedades mecânicas fazem desta liga ideal para aplicações que requerem alta resistência mecânica. Tem-se que os valores encontrados das propriedades mecânicas (limite de resistência à tração e alongamento) são muito semelhantes com a literatura existente, a saber: 483 MPa de limite de resistência à tração e 18% de alongamento (MATWEB, 2019).

Para efeito de comparação, a liga foi produzida via processo de tixoforjamento. O processamento de ligas metálicas no estado semissólido trata-se de uma tecnologia recente, sendo o termo tixoconformação a designação simplificada da tecnologia aplicada à obtenção de componentes a partir da conformação de ligas metálicas no estado semissólido, na transição do estado sólido para o estado líquido. Existem várias vantagens na utilização do processamento de ligas metálicas no estado semissólido em comparação com os processos convencionais, a saber: maior eficiência energética, maior produtividade, menor retenção de ar e menor possibilidade do surgimento de porosidades, maior vida útil dos moldes, microestruturas homogêneas com propriedades melhoradas e produção de peças na condição *near-net-shape*, entre outras (FLEMINGS, 1991; ATKINSON, 2005; TORRES, 2019). Dentre as matérias-primas empregadas no processamento de materiais no estado semissólido, as ligas de alumínio (A356 e A357) são as mais utilizadas ocupando 95% de todas as aplicações; portanto, a utilização de outras ligas de alumínio torna-se essencial para a dissiminação da tecnologia semissólida (CHIARMETTA, 2000). Para tanto, a liga foi

reaquecida em uma matriz até a temperatura de 620 °C (temperatura correspondente à fração líquida entre 45% e 50%) em um forno tipo mulha e mantida por cerca de 3 minutos em temperatura constante para ativação dos mecanismos de globularização, sendo monitorada com o auxílio de um termopar; na sequência já no estado semissólido, a matriz foi retirada do forno e posicionada em uma prensa pneumática para que ocorresse o processo de tixoforjamento e posteriormente desmoldada (MARINI *et al.*, 2015). A determinação da temperatura de trabalho utilizada no processo de tixoforjamento foi obtida através de simulação termodinâmica via *software* Thermo-Calc®.

A condição tixoforjada, Figura 1(b), apresenta uma microestrutura com grãos maiores e mais espaçados entre si e com tamanho médio de grão de 158 µm; esse aumento no tamanho de grão no material tixoforjado deve-se ao longo tempo de permanência na temperatura semissólida. Analisando os resultados referentes ao comportamento mecânico em tração, tem-se que houve uma queda no limite de resistência a tração do material tixoforjado quando comparado com a condição comercial da liga de 223 MPa como também de seu alongamento (MARINI *et al.*, 2015).

Com relação aos valores de dureza *vickers* da liga, observa-se que a condição comercial, apresenta uma dureza de 136 HV, muito semelhante com a literatura existente de 137 HV (MATWEB, 2019). No comparativo com a condição tixoforjada, tem-se uma diferença de 46 HV, mostrando que mesmo a liga sendo produzida via processo de tixoforjamento, onde tem-se uma intensa deformação, a condição comercial conta com o fator “tratamento térmico” essencial para os valores superiores. Na Tabela 2, tem-se um resumo das propriedades mecânicas encontradas para as diversas condições analisadas.

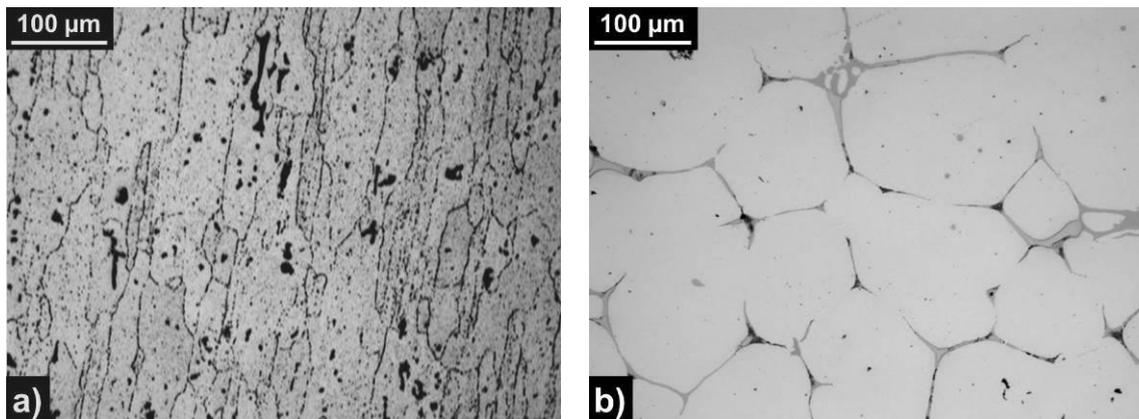


Figura 1- Comparação da microestrutura da liga AA2024, sob a condição comercial (a) e sob a condição tixoforjada (b). Adaptado de MARINI *et al.* (2015) e MARINI *et al.* (2017).

Tabela 2 - Resumo das propriedades mecânicas encontradas para as diferentes condições analisadas (MARINI *et al.*, 2015; MARINI *et al.*, 2017).

Condição	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Dureza <i>vickers</i> (HV)
Comercial	473 ± 7	20 ± 1.0	136 ± 6
Tixoforjada	250 ± 25	5 ± 1.5	90 ± 3

#### 4. Conclusões

Portanto, têm-se as seguintes conclusões para a caracterização metalúrgica e mecânica da liga:

- a) A condição comercial da liga AA2024, ou seja, obtida a partir do processo de laminação e com tratamento térmico T3, apresentou valores médios de tamanho de grão de 47  $\mu\text{m}$ . Devido ao seu processamento, a liga apresenta orientação cristalina preferencial segundo o sentido de laminação caracterizando um comportamento anisotrópico;
- b) Tanto seu comportamento mecânico em tração como de dureza mostraram-se eficientes, ficando com valores muito semelhantes à literatura e muito superiores quando comparada com a condição tixoforjada;
- c) A liga apresenta elevados níveis de propriedades mecânicas fazendo desta, ideal para aplicações que requerem alta resistência mecânica.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao DEMM/FEM/UNICAMP - Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, ao IFSP - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, campus Bragança Paulista e Sorocaba e à UNIP - Universidade Paulista, campus Jundiaí.

#### Referências

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** *ASTM E112: Standard test methods for determining average grain size.* West Conshohocken, 1996.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** *ASTM B209-14: Standard specification for aluminum and aluminum-alloy sheet and plate.* West Conshohocken, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** *ASTM E8 / E8M-15a: Standard test methods for tension testing of metallic materials.* West Conshohocken, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** *ASTM E92: Standard test methods for vickers and knoop hardness of metallic materials.* West Conshohocken, 2016.
- ASM - METALS HANDBOOK.** *Aluminum: properties and physical metallurgy.* American Society for Metals, Metals Park, 1990.
- ATKINSON, H. V.** *Modelling the semisolid processing of metallic alloys.* Progress in Materials Science. Vol. 50, pp. 341-412, 2005.
- CHIARMETTA, G.** *Why Thixo?.* Proceedings of the 6th International Conference on the Semisolid Processing of Alloys and Composites, Turin, 2000.
- FLEMINGS, M. C.** *Behavior of metal alloys in the semisolid state.* Metallurgical Transactions. Vol. 22A, pp. 957-981, 1991.
- GATAMORTA, F.** *Obtenção de espumas sintáticas da liga AA2011 a partir do metal no estado semissólido e sua caracterização metalúrgica.* Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2009.
- HERNANDEZ-PAZ, J.F.; PARAY, F. & GRUZLESKI, J.E.** *Natural aging and heat treatment of A356 aluminium alloy.* AFS Transaction, 2004 apud.
- MARINI, V.M.; VILAS BÔAS, B. & GATAMORTA F.** *Estudo das propriedades mecânicas da liga AA2024 nas condições laminada-T3, fundida e tixoconformada.* 6º Congresso Científico da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia no IFSP, 2015.

**MARINI, V.M.; VILAS BÔAS, B. & GATAMORTA F.** *Efeitos do tratamento térmico de solubilização e envelhecimento em ligas de alumínio AA2024 fundidas e tixoconformadas.* 7º Congresso Científico da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia no IFSP, 2017.

**MARTIN, J.W.** *Precipitation hardening.* Pergamon Press, Oxford, UK, 1968.

**MATWEB.** *Aluminum alloy: 2000 series aluminum alloy - aluminum 2024-T3.* Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=57483b4d782940faaf12964a1821fb61&ckck=1>. Acesso em: 20 jan. 2020.

**SOARES, M.R.N.** *Efeitos dos ciclos de envelhecimento no comportamento de ligas de alumínio.* Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2009.

**TORRES, L.V.** *Uma revisão sobre a tecnologia de processamento de ligas metálicas no estado semissólido.* Impactos das Tecnologias na Engenharia de Materiais e Metalúrgica. 1ed. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019.