



Estudo da variação das propriedades mecânicas da liga Al-Mg-Si no tempo de envelhecimento

Study of the variation in mechanical properties of the Al-Mg-Si alloy with ageing time

10.56238/isevmjv3n1-013

Recebimento dos originais: 01/02/2024

Aceitação para publicação: 23/02/2024

Emilienne Moselli Pirolla

Eng. UTFR

Lattes: 2390312439026426

E-mail: emilienne@alunos.utfpr.edu.br

Janaina Fracaro de Souza Gonçalves

PhD, UTFPR

Lattes: 1857241899832038

E-mail: janainaf@utfpr.edu.br

Émillyn Ferreira Trevisani Olivio

Dra., UFPR

Lattes: 6384446281379311

E-mail: emillynf@utfpr.edu.br

Paulo Sergio Olivio Filho

Dr., UFPR

Lattes: 7661277224045900

E-mail: pfilho@utfpr.edu.br

RESUMO

Ligas de alumínio tem tido cada vez mais aplicações industriais, portanto, fazem-se necessários os estudos de seus processamentos e composições químicas para o entendimento e aprimoramento de suas propriedades mecânicas. Este trabalho tem como objetivo analisar a composição química de uma liga Al-Mg-Si e os efeitos que os tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento em diferentes tempos possuem sobre suas características mecânicas e microestruturais. Foram realizados ensaios de tração e microdureza Vickers para obtenção das propriedades mecânicas do material de fábrica, em seguida o material foi submetido a solubilização em 530 °C durante 40 minutos e a envelhecimento a 180 °C por 0,5, 1, 2, 4, 6 e 8 horas e a microdureza Vickers do material para cada tempo de envelhecimento. Análises metalográficas foram realizadas no material de fábrica, com 4 e 8 horas de envelhecimento. Os resultados das microdurezas foram comparados, o que permitiu plotar a curva de envelhecimento do material e observar a influência do tempo de envelhecimento nas propriedades mecânicas da liga.

Palavras-chave: Liga de alumínio, Endurecimento por precipitação, Solubilização, Envelhecimento.



1 INTRODUÇÃO

Existem diversos tipos de ligas de alumínio, com inúmeras possibilidades de composição química, processamentos e tratamentos térmicos que resultam em propriedades mecânicas diferentes, o que torna a área da pesquisa em ligas de alumínio um vasto e convidativo campo para novos estudos.

A liga de alumínio do tipo Alumínio-Magnésio-Silício se encaixa na série 6XXX e é um tipo de liga termicamente tratável, ou seja, pode ter suas propriedades mecânicas melhoradas através de tratamentos térmicos. Na indústria, são amplamente aplicadas em perfis arquitetônicos e componentes automotivos (SANTOS, 2015). De acordo com Santos (2015), o magnésio é responsável pelo aumento da resistência mecânica, enquanto o silício melhora a resistência à corrosão.

No tratamento de solubilização, todos os átomos de soluto são dissolvidos para formar uma solução sólida monofásica. Considerado uma liga de composição C₀ com uma combinação de fases α e β , a solubilização consiste em se aquecer a liga até uma temperatura T₀, dentro do campo de fases α , e aguardar até que toda a fase β seja completamente dissolvida, de maneira que a liga seja composta apenas por uma fase α de composição C₀. Esse procedimento é então seguido pelo resfriamento rápido, ou têmpera, até uma temperatura T₁, que geralmente é a temperatura ambiente (CALLISTER, 2021)

O envelhecimento baseia-se na combinação de temperatura e tempo durante o tratamento de precipitação, parte fundamental do processo para obter as propriedades desejadas na liga.

Especificamente para ligas de alumínio, Petty (1962) desenvolveu correlações que estimam os valores para limite de resistência à tração e limite de escoamento em ton/in² através da medida de dureza Vickers do material, exibidas pelas Equações 1 e 2, respectivamente:

$$LE_{\text{Petty}}(\text{ton/in}^2) = (0,148 \times \text{HV}) - 1,59$$

$$LRT_{\text{Petty}}(\text{ton/in}^2) = (0,189 \times \text{HV}) - 1,38$$

Como as equações de Petty resultam na unidade ton/in², basta multiplicar o resultado por 15,4448 para se obter o valor em MPa.

Para estimativa das resistências mecânicas do material, neste trabalho serão utilizadas as correlações de Petty.

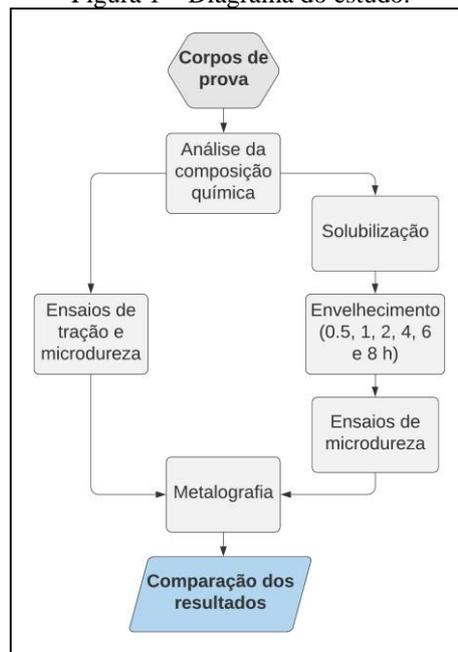
2 METODOLOGIA

Inicialmente, foram obtidos corpos de prova das ligas de alumínio sem tratamento térmico. Uma parte dos corpos de prova foi submetida à análise de composição química, ensaios de tração, microdureza e metalografia. Os demais corpos de prova foram tratados termicamente com solubilização e diferentes tempos de envelhecimento artificial, e em seguida, foram também submetidos à ensaios de microdureza e análise metalográfica.

Os resultados obtidos foram analisados para fins de comparação das propriedades mecânicas de pré e pós tratamento térmico dos materiais.

Todos os processos foram realizados no LEME (Laboratório de Estudo dos Materiais e Ensaio) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Cornélio Procópio. A Figura 1 exibe o diagrama das atividades do estudo:

Figura 1 – Diagrama do estudo.

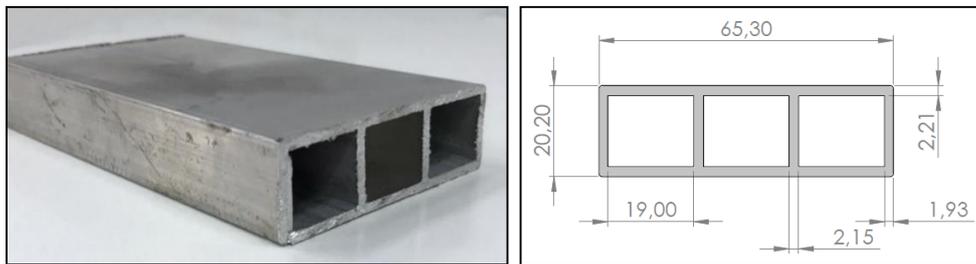


Fonte: Autora (2024).

2.1 MATERIAIS

Os corpos de prova foram obtidos a partir de dois perfis estruturais extrudados de diferentes ligas de Al-Mg-Si. Estes perfis são utilizados para produção de tanques de rede para piscicultura. A Figura 2 mostra o tipo de perfil e o Quadro 1 mostra a identificação dos corpos de prova

Figura 2 – Tipo de perfil estrutural Al-Mg-Si e dimensões.



Fonte: Autora (2024).

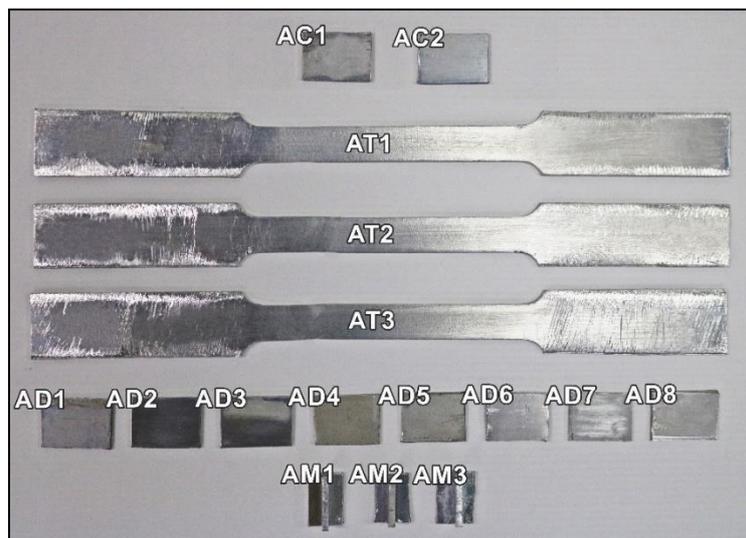
Quadro 1 – Identificação dos corpos de prova.

Corpo de prova	Identificação	
	Liga A	Liga B
Composição química	AC1, AC2	BC1, BC2
Tração	AT1, AT2, AT3	BT1, BT2, BT3
Microdureza	AD1, AD2, AD3, AD4, AD5, AD6, AD7, AD8	BD1, BD2, BD3, BD4, BD5, BD6, BD7, BD8
Metalografia	AM1, AM2, AM3	BM1, BM2, BM3

Fonte: Autora (2024).

Os corpos de prova para a liga A são exibidos na Figura 3. Os corpos de prova da liga B são semelhantes.

Figura 3 – Corpos de prova utilizados no estudo.



Fonte: Autora (2024).

2.2 ENSAIOS PRÉ TRATAMENTOS TÉRMICOS

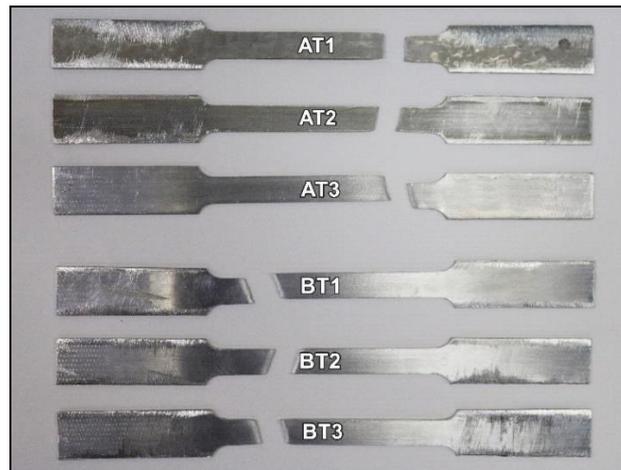
2.2.1 Análise de composição química

As amostras AC1, AC2, BC1 e BC2 dos materiais foram preparadas de acordo com a norma NBR 15693 para identificação da composição química da liga. As análises foram realizadas no Espectrômetro Bruker Q4 Tasman do LEME.

2.2.2 Tração

Os ensaios de tração foram realizados nos corpos de prova AT1, AT2, AT3, BT1, BT2 e BT3 no LEME, através da máquina de ensaios universal WDW-100E. A Figura 4 mostra os corpos de prova ensaiados:

Figura 4 – Corpos de prova ensaiados.



Fonte: Autora (2024).

2.2.3 Microdureza Vickers

Os corpos de prova AD1 e BD1 foram preparados em conformidade com a norma NBR ISO 6507-1 e ensaiados quanto à microdureza Vickers no microdurômetro de bancada Panatec HV-1000B do LEME. A carga aplicada nos ensaios foi de 0,2 kgf durante 10 segundos, utilizando o penetrador padrão Vickers: piramidal de diamante com 136° entre faces opostas. Foram obtidas 10 medidas de microdureza para cada corpo de prova.

2.2.4 Metalografia

As superfícies a serem observadas das amostras AM1 e BM1 foram lixadas e polidas de acordo com a norma NBR 13284 e quimicamente atacadas. A observação e captura de imagens foi realizada utilizando o microscópio óptico Olympus BX53M do LEME.

2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS

2.3.1 Solubilização

Os corpos de prova AD2-AD8, BD2-BD8, AM2, AM3, BM2 e BM3 foram solubilizados durante 40 minutos à temperatura de 530° C. Estes parâmetros foram definidos com base na norma NBR 12315, considerando ligas de alumínio da série 6000 e a espessura do material. O tratamento



de solubilização foi realizado no forno industrial Sanchis Novus N1100 do LEME. Após o tempo de solubilização, os corpos de prova foram retirados do forno e imediatamente submersos em água fria (6° C) para o resfriamento brusco.

2.3.2 Envelhecimento artificial

Após a solubilização, os corpos de prova da seção anterior (com exceção dos AD2 e BD2) foram submetidos ao envelhecimento artificial. O Quadro 2 mostra o tempo de envelhecimento designado para amostra:

Quadro 2 – Tempo de envelhecimento para os corpos de prova.

Corpo de prova	Tempo de envelhecimento (h)
AD3, BD3	0,5
AD4, BD4	1
AD5, BD5	2
AD6, BD6, AM2, BM2	4
AD7, BD7	6
AD8, BD8, AM3, BM3	8

Fonte: Autora (2024).

A temperatura definida para o envelhecimento foi de 180° C, também com base na norma NBR 12315 para ligas da série 6000. Os tempos foram variados de 0,5 até 8 horas para obtenção de dados para a plotagem das curvas de envelhecimento dos materiais. Após cada tempo designado ter sido atingido, os corpos de prova foram retirados do forno e imediatamente resfriados em água em temperatura ambiente.

2.4 ENSAIOS PÓS TRATAMENTOS TÉRMICOS

Para avaliar os efeitos dos tratamentos térmicos nos corpos de prova, foram realizados os ensaios de microdureza Vickers e análise via metalografia.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As composições químicas obtidas das análises das amostras AC1, AC2, BC1 e BC2 e as respectivas médias das ligas A e B são exibidas nos Quadros 3 e 4:

Quadro 3 – Composição química da liga A.

Amostra	% de elementos em massa							
	Al	Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Ti
AC1	98,59	0,446	0,355	0,330	0,065	0,051	0,047	0,022
AC2	98,61	0,438	0,348	0,320	0,063	0,052	0,047	0,023
Média	98,60	0,442	0,351	0,325	0,064	0,051	0,047	0,022

Fonte: Autora (2024).

Quadro 4 – Composição química da liga B.

Amostra	% de elementos em massa							
	Al	Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Ti
BC1	98,88	0,420	0,363	0,195	0,0016	0,0045	0,047	0,026
BC2	98,88	0,427	0,363	0,193	0,0014	0,0048	0,047	0,025
Média	98,88	0,423	0,363	0,194	0,0015	0,0046	0,047	0,025

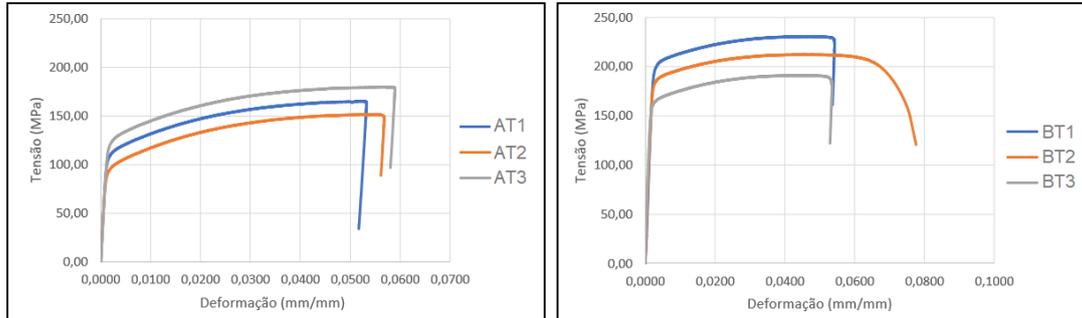
Fonte: Autora (2024).

3.2 ENSAIOS MECÂNICOS

3.2.1 Tração

A Figuras 5 exibem os gráficos de tensão-deformação obtidos dos ensaios dos corpos de prova das ligas A e B (sem tratamento térmico)

Figura 5 – Gráfico tensão-deformação obtido dos ensaios de tração.



Fonte: Autora (2024).

As propriedades mecânicas da liga A obtidas através dos ensaios de tração são mostradas no Quadro 5:

Quadro 5 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração para a liga A.

Propriedade	AT1	AT2	AT3	Média	Desvio padrão
Módulo de elasticidade (MPa)	77793,34	68738,64	79579,50	75370,49	5812,37
Limite de escoamento (MPa)	115,35	100,60	127,83	114,60	13,63
Limite de resistência (MPa)	165,13	151,45	179,55	165,38	14,5
Alongamento (%)	5,32	5,68	5,90	5,63	0,29

Fonte: Autora (2024).

As propriedades mecânicas da liga B obtidas através dos ensaios de tração são mostradas no Quadro 6:

Quadro 6 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração para a liga B.

Propriedade	BT1	BT2	BT3	Média	Desvio padrão
Módulo de elasticidade (MPa)	82708,39	82325,91	71160,12	78731,47	6559,77
Limite de escoamento (MPa)	198,50	184,67	164,95	182,71	16,86
Limite de resistência (MPa)	230,73	212,32	191,21	212,42	19,76
Alongamento (%)	5,43	7,76	5,35	6,18	1,37

Fonte: Autora (2024).

3.2.2 Microdureza Vickers

O Quadro 7 exibe as medidas de microdureza Vickers obtidas nos ensaios para os corpos de prova da liga A:

Quadro 7 – Medidas de microdureza Vickers obtidas nos ensaios da liga A.

Medida	Microdureza Vickers (HV0,2)							
	AD1	AD2	AD3	AD4	AD5	AD6	AD7	AD8
1	56,60	36,70	55,70	50,10	76,20	81,10	81,70	61,70
2	57,80	36,40	52,70	48,40	79,00	80,80	83,60	65,50
3	600	36,20	56,50	48,40	81,70	81,70	78,80	60,60
4	58,70	35,00	51,00	48,00	77,60	82,30	83,20	66,80
5	59,10	32,40	54,80	49,90	81,40	79,30	80,80	67,30
6	54,70	36,80	51,80	50,10	76,00	79,60	81,70	66,80
7	56,70	37,90	55,00	53,00	77,30	84,20	82,30	64,20
8	56,00	41,50	54,70	49,60	79,90	84,20	82,60	64,70
9	58,30	39,50	54,50	48,90	77,10	81,70	84,80	63,40
10	56,70	38,8	53,00	50,40	76,8	84,8	80,80	66,00
Média	57,46	37,12	53,97	49,68	78,3	81,97	82,03	64,70
Desvio padrão	1,60	2,51	1,77	1,44	2,08	1,92	1,69	2,25

Fonte: Autora (2024).

O Quadro 8 exibe as medidas de microdureza Vickers obtidas nos ensaios para os corpos de prova a liga B:

Quadro 8 – Medidas de microdureza Vickers obtidas nos ensaios da liga B.

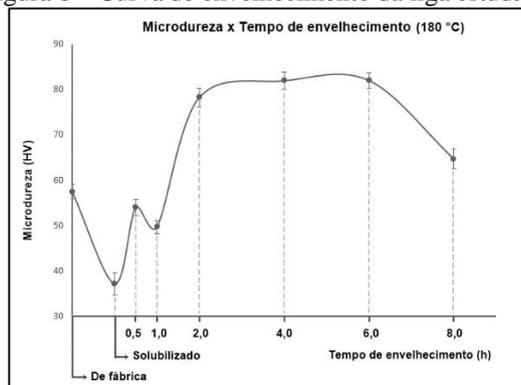
Medida	Microdureza Vickers (HV0,2)							
	BD1	BD2	BD3	BD4	BD5	BD6	BD7	BD8
1	78,20	41,10	42,30	44,20	45,50	63,40	73,80	59,80
2	74,40	37,60	42,30	46,00	45,90	64,00	72,50	61,90
3	83,60	38,60	43,80	45,20	46,00	64,00	74,60	57,10
4	77,10	37,30	42,70	45,00	46,40	62,80	75,20	58,30
5	76,00	39,10	43,30	45,90	45,70	61,60	73,80	60,60
6	80,50	39,50	41,10	44,90	46,70	62,60	73,10	59,40
7	80,80	36,70	44,50	44,20	46,80	63,00	72,30	59,60
8	81,40	39,60	43,10	45,20	47,20	62,40	74,40	61,60
9	75,70	40,00	43,20	46,20	45,70	63,40	73,30	60,80

10	77,90	37,80	43,70	46,70	48,30	61,90	71,50	60,60
Média	78,56	38,73	43,00	45,35	46,42	62,91	73,45	59,97
Desvio padrão	2,92	1,38	0,95	0,84	0,86	0,81	1,14	1,47

Fonte: Autora (2024).

A partir dos dados obtidos, foi possível plotar o gráfico das curvas de envelhecimento das ligas, mostrado na Figura 6:

Figura 6 – Curva de envelhecimento da liga estudada.



Fonte: Autora (2024).

3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Com as medidas médias de microdureza Vickers obtidas, foi possível estimar os limites de resistência a tração e os limites de escoamento das ligas através das equações de Petty.

O Quadro 8 exhibe os resultados estimados para a liga A:

Quadro 8 – Limites de resistência estimados pelas equações de Petty para a liga A.

Propriedade	Tempo de envelhecimento (h)						
	Solub.	0,5	1	2	4	6	8
Limite de escoamento (MPa)	60,29	98,81	89,00	154,42	162,81	162,95	123,34
Limite de resistência (MPa)	87,07	136,23	123,71	207,25	217,96	218,14	167,55

Fonte: Autora (2024).

O Quadro 9 exhibe os resultados estimados para a liga B:

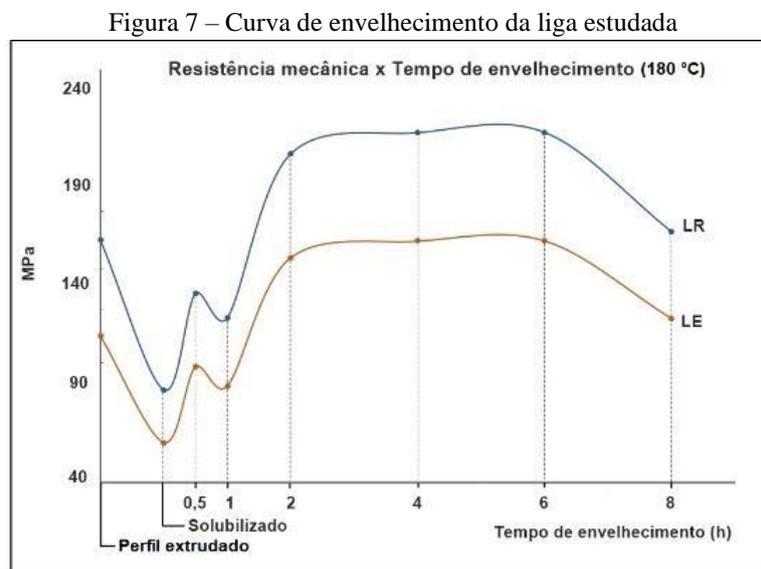
Quadro 9 – Limites de resistência estimados pelas equações de Petty para a liga B.

Propriedade	Tempo de envelhecimento (h)						
	Solub.	0,5	1	2	4	6	8
Limite de escoamento (MPa)	60,29	98,81	89,00	154,42	162,81	162,95	123,34
Limite de resistência (MPa)	87,07	136,23	123,71	207,25	217,96	218,14	167,55

Fonte: Autora (2024).

Os resultados obtidos pelas equações de Petty foram coerentes com a realidade, considerando que para o material do perfil extrudado, os limites de escoamento e resistência ensaiados obtiveram as médias de 114,60 e 165,38 MPa, respectivamente, resultando valores intermediários entre os tempos de 1 e 2 horas de envelhecimento, da mesma forma que a dureza do material medido do perfil extrudado.

Para melhor ilustrar a relação entre a microdureza e a resistência mecânica da liga, a Figura 7 exibe um gráfico considerando os limites de escoamento e resistência ensaiados para o material do perfil extrudado e os valores obtidos através da dureza e das equações de Petty após os tratamentos térmicos:



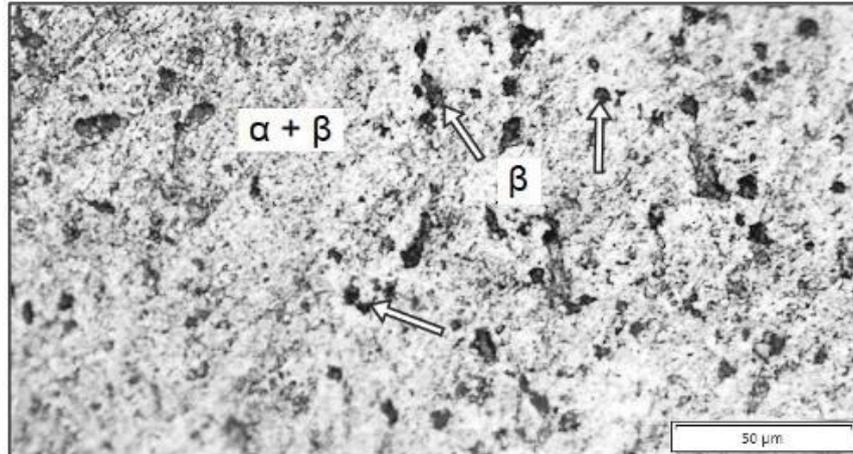
Fonte: Autora (2024).

As curvas para o limite de escoamento e limite de resistência se assemelham muito à curva de microdureza apresentada na Figura 6, desta maneira, é possível evidenciar a relação diretamente proporcional entre a dureza e a resistência mecânica da liga.

3.4 METALOGRAFIA

A Figura 8 exibe a micrografia obtida do corpo de prova M1 (material direto do perfil extrudado).

Figura 8 – Micrografia do material do perfil extrudado (aproximação de 20x).



Fonte: Autora (2024).

É possível observar a fase α com uma distribuição fina e uniforme de precipitados β , além de diversos aglomerados de precipitados β (indicados pelas setas) formando partículas maiores. Considerando a microestrutura e dureza do material da barra extrudada, pode-se afirmar que esta liga foi submetida a um tratamento térmico de cerca de 8 horas de envelhecimento para ser comercializada. A micrografia do corpo de prova M2 (solubilizado e submetido à 0,5 h de envelhecimento) é mostrada na Figura 9:

Figura 9 – Micrografia da liga submetida à solubilização e 0,5 h de envelhecimento (aproximação de 20x).

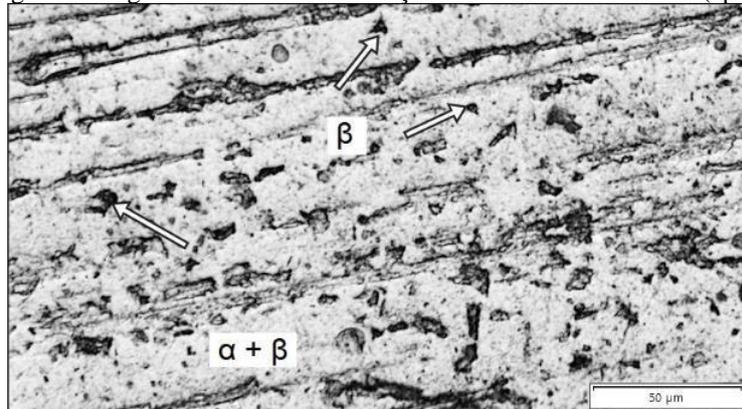


Fonte: Autora (2024).

Como o corpo de prova M2 possui dureza relativamente baixa, ocorreu o deslocamento de partículas do material (proveniente do processo de preparação para metalografia), formando diversos buracos na superfície e impossibilitando a observação da real microestrutura da amostra.

A Figura 10 mostra a micrografia obtida para o corpo de prova M3 (solubilizado e submetido à 6 h de envelhecimento).

Figura 10 – Micrografia da liga submetida à solubilização e 6 h de envelhecimento (aproximação de 20x).



Fonte: Autora (2024).

Apesar das marcas deixadas pelo lixamento da amostra, é possível observar aglomerados de precipitados β (indicados pelas setas), e a fase α com menor proporção de precipitados β nela distribuídos (comparado ao corpo de prova M1), o que é coerente, pois significa que os precipitados se concentraram mais nas partículas de aglomerados, justificando a maior dureza para o material envelhecido por 6 horas.

4 CONCLUSÃO

Através dos resultados da composição química, foi possível observar que o material trata-se de uma liga da série 6XXX com adição de ferro em quantidade considerável, além de algum cobre, zinco, manganês e titânio.

A partir da curva de envelhecimento, constatou-se que a microdureza do material atingiu os maiores valores no intervalo entre 4 e 6 horas de tratamento, com pico em 6 horas (82,03 HV0,2), havendo apenas 4,5% de diferença na microdureza entre os tempos de 2 e 6 horas, o que mostra que o tempo de envelhecimento mais vantajoso para aplicações industriais é de 2 horas.

Além disso, foi possível observar que após 6 horas de envelhecimento para a temperatura estudada, o material passou a sofrer superenvelhecimento, ou seja, teve suas propriedades mecânicas reduzidas, evidenciando que não há utilidade em manter o tratamento térmico por mais tempo.

As estimativas para limites de escoamento e resistência à tração do material por meio da equação de Petty mostram que as propriedades mecânicas da liga aumentaram a partir de 2 horas de envelhecimento com relação ao material de fábrica, de maneira proporcional à microdureza.

A boa resposta para o endurecimento por precipitação do material pode ser resultado da influência da presença de ferro, manganês e cobre na liga, que agem aumentando a resistência



mecânica e melhorando a sensibilidade do material à tratamentos térmicos.

As micrografias obtidas na análise metalográfica confirmam a presença de precipitados β em meio a fase α da liga. Comparando as micrografias e as propriedades mecânicas do material do perfil extrudado e após solubilização e envelhecimento por 6 horas, pode-se perceber que quando os precipitados se concentram nas partículas de aglomerados, até certo ponto, a dureza e a resistência mecânica do material tendem a aumentar.



REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 7549: alumínio e suas ligas — produtos laminados, extrudados, fundidos, forjados e sinterizados – ensaio de tração. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT. NBR 12315: ligas de alumínio trabalháveis – tratamento térmico – requisitos. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT. NBR 13284: preparação de corpos de prova para análise metalográfica. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT. NBR 15693: ensaios não destrutivos – teste por pontos – identificação de materiais e ligas metálicas. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT. NBR ISO 6507: materiais metálicos – ensaio de dureza Vickers parte 1: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

ASM HANDBOOK. Properties and selection: nonferrous alloys special-purpose materials. v. 2, ASM Internacional Handbook Committee, 1992.

BHADURI, Amit. Mechanical properties and working of metals and alloys. Singapore: Springer, 2018.

CALLISTER Jr., William D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

CAHOON, J. R. An improved equation relating hardness to ultimate strength. Metallurgical Transactions, v. 3, 1972.

CHIAVERINI, Vicente. Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento. v. 2. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

CHIAVERINI, Vicente. Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento. v. 3. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

DOWLING, Norman E. Comportamento mecânico dos materiais: análises de engenharia aplicadas a deformação, fratura e fadiga. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

PETTY, E. R. Relationship between hardness and tensile properties over a wide range of temperature for aluminium alloys. Metallurgia 65, 25-26 (1962).

SANTOS, Genivaldo Alves dos. Tecnologias mecânicas: materiais, processos e manufatura. São Paulo: Érica, 2021.

TABOR, D. The hardness of metals. New York: Oxford University Press, 1951.