

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS  
CAMPUS POÇOS DE CALDAS - MG

**GUILHERME RINALDI PERINOTI**

**EFEITO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS DE SOLUBILIZAÇÃO E  
ENVELHECIMENTO NA MICROESTRUTURA E NA RESISTÊNCIA  
MECÂNICA DAS LIGAS DE ALUMÍNIO A354 E 2024 FUNDIDAS**

Poços de Caldas/ MG  
2020

**GUILHERME RINALDI PERINOTI**

**EFEITO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS DE SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO NA MICROESTRUTURA E NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS LIGAS DE ALUMÍNIO A354 E 2024 FUNDIDAS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, pelo programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Alfenas *campus* Poços de Caldas. Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.  
Orientadora: Prof(a). Dr(a). Erika Coaglia Trindade Ramos.  
Co-orientador: Prof(a). Dr(a). Renato Chaves Souza.

Poços de Caldas/ MG  
2020

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca campus Poços de Caldas

- Perinoti, Guilherme Rinaldi.
- P445e Efeito dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento na microestrutura e na resistência mecânica das ligas de alumínio A354 e 2024 fundidas / Guilherme Rinaldi Perinoti. – Poços de Caldas/MG, 2020.
- 78 f. –
- Orientador(a): Erika Coaglia Trindade Ramos.  
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, 2020.  
Bibliografia.
1. Ligas de alumínio. 2. Resistência de materiais. 3. Metais - Tratamento térmico. 4. Microscopia. 5. Microestrutura. I. Ramos, Erika Coaglia Trindade. II. Título.
- CDD – 620.11

## GUILHERME RINALDI PERINOTI

### EFEITO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS DE SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO NA MICROESTRUTURA E NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS LIGAS DE ALUMÍNIO A354 E 2024 FUNDIDAS

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.

Aprovada em: 18 de março de 2020

Prof(a). Dr(a). Erika Coaglia Trindade Ramos  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof(a). Dr(a). Danieli Aparecida Pereira Reis  
Instituição: Universidade Federal de São Paulo

Prof(a). Dr(a). Alfeu Saraiva Ramos  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Alfeu Saraiva Ramos, Professor do Magistério Superior**, em 08/04/2020, às 10:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Danieli Aparecida Pereira Reis, Usuário Externo**, em 08/04/2020, às 11:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Erika Coaglia Trindade Ramos, Professor do Magistério Superior**, em 08/04/2020, às 11:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0280840** e o código CRC **CC47CF03**.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus e Nossa Senhora Aparecida, por minha vida e por sempre tornar possível a conquista de meus sonhos, apresentando sempre pessoas de boa índole em meu caminho, me auxiliando nessa caminhada.

A minha esposa Lívia, pelo seu amor, incentivo e paciência nesses anos, para que eu pudesse concluir mais essa etapa.

Ao meu avô Américo, meus pais Ana e Claudinei, que nunca mediram esforços para que eu fosse uma pessoa realizada, por me proporcionarem amor, educação e apoio incondicional, sempre acreditando no meu potencial.

Especialmente a minha orientadora Prof(a). Dr(a). Erika Coaglia Trindade Ramos, por sempre acreditar em minha capacidade, por sua confiança, parceria e principalmente amizade. Agradeço imensamente por todo conhecimento transmitido e incentivo que sempre me deu. Obrigado por sua disponibilidade em esclarecer dúvidas e resolver os obstáculos que apareceram ao longo dessa jornada.

À Universidade Federal de Alfenas pela oportunidade de cursar a pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais rodeada por pessoas competentes e pelos recursos fornecidos.

Agradeço à empresa MGFC, pelo total apoio, oportunidade, fornecimento do material de pesquisa, análises de espectrômetro, dureza, tratamentos térmicos e recursos fornecidos.

Ao Nelson Damásio Ferreira, por usar os corpos de prova de tração da liga de alumínio A354.

Ao Sr. José Fornazeiro, pela usinagem das amostras para ensaio de análise química, ensaio de dureza e resistência.

Ao professor Marcelo Martins, pelo total apoio e ajuda na preparação das amostras para microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e difratometria de raios X.

Ao Instituto Federal de São João da Boa Vista, por realizar o ensaio de tração, principalmente ao professor Renato Chaves Souza, ao aluno Márcio Sangali, ao professor Roberto Nunes Duarte e aos seus alunos de IC.

Aos meus amigos, por total apoio e incentivo aos estudos e desenvolvimento desse projeto.

A instituição EEL-USP- Lorena e ao Prof. Dr. Carlos Angelo Nunes, pela utilização do microscópio eletrônico de varredura.

À CAPES, FAPEMIG, FAPESP E CNPq pelo aporte educacional e financeiro.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Para você que está chegando agora, criticando o que está feito, deveria estar aqui na hora de fazer. Não sejas um especialista em usar a crítica ao que está feito como pretexto para nada fazer. Assina, aquele que fez, quando no momento de fazer, não sabia-se como”.

(Abraham Lincoln)

## RESUMO

O alumínio possui diversas aplicações em vários seguimentos do mercado. Na engenharia, como uma alternativa de material, três setores emergentes contribuíram para alavancar a aplicabilidade das ligas de alumínio em diversos setores, como no de eletricidade e equipamentos eletrônicos, automotivo, aeronáutico e aeroespacial. No setor automotivo, as ligas de alumínio em geral, são utilizadas em diferentes componentes da linha automotiva leve e pesada, como por exemplo: em motores a combustão, componentes de direção e amortecimento e turbo-compressor. A liga A354 é aplicada em rotores de turbo compressores, devido à sua baixa densidade e alta resistência mecânica. Existem algumas limitações de aplicações, por apresentarem um limite de resistência à tração, em torno de 390 MPa, o que torna inviável o seu uso, devido às solicitações recorrentes em um curto prazo de tempo, principalmente em veículos de perímetro urbano. Contudo, o presente trabalho objetivou a avaliação do efeito dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas de tração das ligas A354 e 2024 fundidas à vácuo. As amostras da liga A354 fundidas foram tratadas por solubilização a 526° C por 10 h e envelhecidas por 160°C por 10h. Para as amostras da liga 2024 fundida, os tratamentos de solubilização foram realizados a 490° C, 500° C e 510°C e mantidas 1 h, e resfriadas em água, e os tratamentos de envelhecimento foram realizados nas temperaturas de 190°C, 200°C e 210°C por 1 h, por períodos de 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h e 48 h. Posteriormente, os corpos de prova foram resfriados ao ar. Os procedimentos para análise das amostras das ligas A354 e 2024, foram constituídos por análise de composição química, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia por energia dispersiva, difratometria de raios X, análise térmica, dureza e ensaio de tração. Os resultados indicaram que a liga A354 solubilizada a 526 °C e envelhecida a 160 °C por 10 h, não apresentou aumento no limite de resistência à tração. A liga 2024 solubilizada a 510° C por 1 h e envelhecida a 210°C por 1 h, apresentou maior limite de resistência à tração, quando comparado com a liga A 354, alcançando um limite de resistência à tração de 460 MPa. A liga 2024 apresenta potencial para substituição da liga A354, atualmente aplicada para a produção de rotores de turbo compressores.

**Palavras-chave:** Ligas de alumínio. Resistência Mecânica. Liga A354. Liga 2024. Microestrutura.

## ABSTRACT

Aluminum has several applications in various segments of the market. In engineering, as a material alternative, three emerging sectors contributed to leverage the applicability of aluminum alloys in several sectors, such as electricity and electronic equipment, automotive, aeronautics and aerospace. In the automotive sector, aluminum alloys in general are used in different components of the light and heavy automotive line, for example: in combustion engines, steering and damping components and turbo-compressor. The A354 alloy is used in turbocharger rotors, due to its low density and high mechanical resistance. There are some application limitations, as they present a limit of tensile strength, around 390 MPa, which makes its use impracticable, due to the recurring requests in a short period of time, mainly in urban perimeter vehicles. However, the present work aimed to evaluate the effect of heat treatments of solubilization and aging on the microstructure and on the mechanical tensile properties of the A354 and 2024 vacuum-cast alloys. The samples of the molten A354 alloy were treated by solubilization at 526°C for 10 h and aged at 160°C for 10 h. For the samples of the molten 2024 alloy, the solubilization treatments were carried out at 490 ° C, 500°C and 510°C and maintained for 1 h, and cooled in water, and the aging treatments were carried out at temperatures of 190°C, 200°C and 210°C for 1 h, for periods of 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h and 48 h. Subsequently, the specimens were cooled in the air. The procedures for analyzing the samples of alloys A354 and 2024, consisted of chemical composition analysis, optical microscopy, scanning electron microscopy, dispersive energy spectroscopy, X-ray diffraction, thermal analysis, hardness and tensile test. The results indicated that the A354 alloy solubilized at 526°C and aged at 160°C for 10 h, did not show an increase in the tensile strength limit. The alloy 2024 solubilized at 510°C / 1 h and aged at 210°C for 1 h, presented a higher limit of tensile strength when compared to alloy A 354, reaching a limit of tensile strength of 460 MPa. Alloy 2024 has the potential to replace alloy A354 currently applied for the production of turbocharger rotors.

**Keywords:** Aluminum alloys. Mechanical strength. A354 Alloy. 2024 Alloy. Microstructure.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Efeito do tempo e da temperatura de recozimento na liga Cu-5Zn trabalhada com 60% de redução de área .....29
Figura 2 –	Diagrama de fases alumínio-cobre, contendo faixas de temperaturas de processos de tratamentos térmicos .....30
Figura 3 –	Influência do tempo e temperatura de envelhecimento nas propriedades mecânicas da liga de alumínio 2024 .....33
Figura 4 –	Solubilidade sólida em função da temperatura de elementos de liga mais frequentemente adicionados ao alumínio.....34
Figura 5 –	Diagrama de blocos da metodologia utilizada nesse trabalho .....36
Figura 6 –	Dimensões dos corpos de provas fundidos em molde de gesso .....37
Figura 7 –	Representação esquemática dos tratamentos térmicos de solubilização da liga 2024, realizados a $x = 490^{\circ}\text{C}$ , $x = 500^{\circ}\text{C}$ e $x = 510^{\circ}\text{C}$ .....38
Figura 8 –	Esquema do corpo de prova utilizado no ensaio de tração, conforme ASTM-E-8 .....40
Figura 9 –	Micrografias da liga de alumínio A354 na condição de bruta fundição, obtidas por MO .....45
Figura 10 –	Micrografias da liga de alumínio A354 na condição de bruta fundição, por MEV .....45
Figura 11 –	Espectro de difração de raios X da liga A354 na condição de bruta fundição .....47
Figura 12 –	Micrografias da liga de alumínio A354 na condição solubilizada a $526^{\circ}\text{C}$ , por MO .....48
Figura 13 –	Micrografia da liga de alumínio A354 na condição solubilizada a $526^{\circ}\text{C}$ , por MEV .....49
Figura 14 –	Espectro de difração de raios X da liga A354 solubilizada a $526^{\circ}\text{C}$ .50
Figura 15 –	Micrografias da liga de alumínio A354 na condição solubilizada a $526^{\circ}\text{C}$ e envelhecida a $160^{\circ}\text{C}$ durante 10 h, por MO .....51
Figura 16 –	Micrografias da liga de alumínio A354 na condição solubilizada a $526^{\circ}\text{C}$ e envelhecida a .....52
Figura 17 –	Espectro de difração de raios X, da liga A354 solubilizada a $526^{\circ}\text{C}$ e envelhecida a $160^{\circ}\text{C}$ durante 10 h.....53

Figura 18 –	Curva tensão versus deformação obtida no ensaio de tração da liga A354 solubilizada a 526°C e envelhecida a 160°C por 10 h .....	54
Figura 19 –	Curvas de DSC e TG realizada de 30°C até 900°C, da liga de alumínio A354 bruta de fusão, utilizando argônio como gás de arraste com taxa de aquecimento de 10°C/min.....	55
Figura 20 –	Espectro de difração de raios X, da liga de alumínio 2024 fundida .	56
Figura 21 –	Micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 490°C por 1 h e envelhecida a 190°C por 1 h, obtidas por MO .....	57
Figura 22 –	Micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 490°C por 1 h e envelhecida a 190°C por 1 h, obtidas por ME ..	57
Figura 23 –	Micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 500°C por 1 h e envelhecida a 200°C, obtidas por MO .....	60
Figura 24 –	Micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 500°C por 1 h e envelhecida a 200°C por 1h, obtidas por MEV .....	61
Figura 25 –	Micrografia das ligas de alumínio 2024 na condição solubilizada a 510°C por 1 h, obtida por MO .....	64
Figura 26 –	Micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 510°C por 1 h, obtidas por MEV .....	64
Figura 27 –	Espectro de difração de raios X, da liga de alumínio 2024 solubilizada a 510°C por 1 h.....	65
Figura 28 –	Micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 510°C por 1 h e envelhecida a 210°C por 1 h, obtida por MO .....	66
Figura 29 –	Micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 510°C por 1 h e envelhecida a 210°C por 1 h, obtida por MEV .....	66
Figura 30 –	Espectro de difração de raios X, da liga de alumínio 2024 solubilizada a 510° C por 1 h e envelhecida a 210° C por 1 h.....	67
Figura 31 –	Curva tensão versus deformação obtida do ensaio de tração da liga 2024 solubilizada a 510°C por 1 h e envelhecida a 210°C por 1 h ..	70
Figura 32 –	Curvas de DSC e TG realizada de 30°C até 900°C da liga de alumínio 2024 fundida, utilizando argônio como gás de arraste com taxa de aquecimento de 10°C/min.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Propriedades das ligas de alumínio .....	20
Tabela 2 –	Sistema de designação do alumínio e ligas de alumínio trabalhadas .....	23
Tabela 3 –	Sistema de designação do alumínio e ligas de alumínio fundidas ...	24
Tabela 4 –	Comparação de propriedades, entre a liga de alumínio A354 e demais ligas da série 3xxx, vazadas em molde permanente, sendo 1 = Excelente; 5 = Ruim .....	25
Tabela 5 –	Influência da temperatura nas propriedades da liga de alumínio A354 fundida em molde de areia.....	26
Tabela 6 –	Composição química, propriedades térmicas e densidade da liga de alumínio 2024 .....	26
Tabela 7 –	Designações e denominações dos tratamentos térmicos realizados nas ligas de alumínio comercialmente .....	27
Tabela 8 –	Composição química das ligas A354 e 2024 condição de bruta fundição (% em massa) .....	44
Tabela 9 –	Composição química das ligas A354 e 2024 (% em massa), de acordo com a norma ABNT NBR ISO 209 (2010).....	44
Tabela 10 –	Teores de Al, Si, Cu, Fe e Mg (% atômica), das fases formadas na microestrutura da liga de alumínio A354 condição de bruta fundição, obtidos por EDS.....	46
Tabela 11 –	Valores de dureza Brinell, da liga A354 como fundida.....	47
Tabela 12 –	Teores de Al, Si, Cu e Mg (% atômica), das fases formadas na microestrutura da liga de alumínio A354 na condição solubilizada a 526°C, obtidos por EDS .....	49
Tabela 13 –	Valores de dureza Brinell, da liga A354 solubilizada a 526° C.....	50
Tabela 14 –	Teores de Al, Si, Cu e Mg (% atômica), das fases formadas na microestrutura da liga de alumínio A354 na condição solubilizada a 526°C durante e envelhecida a 160°C durante 10 h, obtidos por EDS .....	52
Tabela 15 –	Valores de dureza Brinell, da liga A354 solubilizada a 526° C e envelhecida a 160° C durante 10 h.....	53

Tabela 16 –	Propriedades mecânicas de tração da liga A354 solubilizada a 526°C e envelhecida a 160°C por 10 h.....	55
Tabela 17 –	Valores de dureza Brinell, da liga 2024 como fundida .....	56
Tabela 18 –	Teores de Al, Si, Cu e Mg (% atômica) das fases formadas na microestrutura da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 490°C por 1 h e envelhecida a 190°C por 1 h, obtidos por EDS.....	58
Tabela 19 –	Valores de dureza Brinell da liga 2024 solubilizada 490°C / 1 h e envelhecida 190°C / 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h e 48 h .....	59
Tabela 20 –	Teores de Al, Si, Cu, Fe e Mg (% atômica) das fases formadas na microestrutura da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 500°C por 1 h e envelhecida a 200°C por 1 h, obtidos por EDS.....	62
Tabela 21 –	Valores de dureza Brinell, da liga 2024 solubilizada a 500°C / 1 h e envelhecida 200°C / 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h e 48 h .....	63
Tabela 22 –	Teores de Al, Si, Cu, Fe e Mg (% atômica) das fases formadas na microestrutura da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 510°C por 1 h, obtidos por EDS.....	65
Tabela 23 –	Teores de Al, Si, Cu, Fe e Mg (% atômica) das fases formadas na microestrutura da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 510°C por 1 h e envelhecida a 210°C por 1 h, obtidos por EDS.....	67
Tabela 24 –	Valores de dureza Brinell, da liga 2024 solubilizada 510°C / 1 h e envelhecida 210°C / 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h e 48 h .....	69
Tabela 25 –	Propriedades mecânicas de tração da liga 2024 solubilizada a 510°C por 1 h e envelhecida a 210°C por 1h.....	71

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	Alumínio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina
ASM	<i>American Society Metals</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DSC	<i>Differential scanning calorimetry</i>
DRX	<i>X-Ray Diffraction</i>
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
EEL/USP	Escola de Engenharia de Lorena/ Universidade de São Paulo
GPa	Giga Pascal
h	Horas
HB	<i>Hardness Brinell</i> (Dureza Brinell)
%IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
JCPDS	<i>Joint Committee on Powder Diffraction Standards</i>
Km	Quilômetro
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MGFC	Miguel, Graziela, Filomena e Carmem, indústria, comércio, microfusão e exportação de peças automotivas - Eireli
Mg	Magnésio
min	Minutos
Mo	Molibdênio
MO	Microscopia óptica
MPa	Mega Pascal
Ti	Titânio
UNIFAL	Universidade Federal de Alfenas
V	Vanádio
W/m.K	Watts / metros.Kelvin
Zn	Zinco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
2.1	ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....	20
2.2	CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO .....	21
2.3	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO.....	22
2.3.1	Ligas conformadas ou trabalhadas mecanicamente.....	22
2.3.2	Ligas fundidas .....	23
2.4	PROPRIEDADES DA LIGA DE ALUMÍNIO A354.....	24
2.5	PROPRIEDADES DA LIGA DE ALUMÍNIO 2024 .....	26
2.7	TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	27
2.7.1	Solubilização .....	29
2.7.2	Envelhecimento .....	31
2.7.3	Transformações de fases .....	33
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
3.1	ANÁLISE QUÍMICA .....	35
3.2	FUNDIÇÃO DAS LIGAS .....	37
3.3	TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	37
3.3.1	Tratamentos de Solubilização .....	37
3.3.2	Tratamento de Envelhecimento.....	38
3.4	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	39
3.4.1	Ensaio de Dureza .....	39
3.4.2	Ensaio de Tração.....	40
3.5	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	41
3.5.1	Microscopia Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura .....	41
3.5.2	Difratometria de raios X.....	42
3.6	ANÁLISE TÉRMICA .....	42

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	44
5	CONCLUSÃO.....	73
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
	<u>REFERÊNCIAS.....</u>	75

## 1 INTRODUÇÃO

O alumínio é considerado um elemento metálico extremamente vasto na superfície terrestre, correspondente em torno de 8%, ficando atrás somente para o oxigênio e o silício, quando comparado entre os três elementos. Em relação à sua massa, é considerado o terceiro material mais abundante localizado na crosta terrestre, sendo encontrado em grande parte em rochas e depósitos minerais. O alumínio é constituído do minério da bauxita, onde o minério primário constitui-se de óxidos impuros, localizados em rochas deterioradas nos trópicos (BROE; COBURN, 1990; SCHLESINGER, 2006).

O grande passo para aplicação do alumínio foi por meio das peças fundidas, como consequência da redução eletrolítica do processo de produção, denominado como *Hall-Heroult*. No início, as aplicações do alumínio eram limitadas apenas a utensílios domésticos, mas no final do século XIX, as aplicações para engenharia tornaram-se viáveis financeiramente (KAUFMAN; ROOY, 2004).

As propriedades mecânicas do alumínio estão diretamente relacionadas aos elementos de liga que são acrescentados no processo de fusão, podendo ser utilizados mais de cem elementos de liga. Esses elementos são adicionados ao alumínio para que ocorra um aumento da resistência mecânica dos materiais. Além disso, existem mais dois métodos para que ocorra o aumento da resistência mecânica das ligas de alumínio, por dispersão dos elementos de ligas ou elementos em solução sólida e trabalho à frio da liga (ligas de trabalho-endurecimento) e pela dissolução dos elementos de liga em solução sólida e precipitá-los como partículas sub-microscópicas coerentes (ligas de envelhecimento-endurecimento) (HATCH, 1984).

O alumínio possui diversas aplicações em vários seguimentos do mercado. Na engenharia, como uma alternativa de material, três setores emergentes contribuíram para alavancar a aplicabilidade das ligas de alumínio em diversos setores como o de eletricidade e equipamentos eletrônicos, automotivo, aeronáutico e aeroespacial (KAUFMAN; ROOY, 2004).

As ligas de alumínio são utilizadas em diferentes componentes, como por exemplo: em motores a combustão, componentes de direção e amortecimento e turbo compressor. A liga A354 é aplicada em rotores de turbo compressores, principalmente no rotor do compressor, devido à sua baixa densidade e alta resistência mecânica. Porém, existem algumas limitações de aplicações, por apresentarem um limite de

resistência à tração em torno de 390 MPa, o que torna inviável o seu uso, devido às solicitações impostas, principalmente em veículos de perímetro urbano, onde as solicitações são recorrentes em um curto prazo de tempo. Sendo assim, para aplicações na indústria automotiva, a liga A354 é substituída por ligas de Titânio, que suportam as solicitações esperadas, sem que ocorra a fratura (ENGELS, 2002).

Os materiais típicos de aplicação para rotores de turbo compressor são as ligas de alumínio C355 e A354, pois além de apresentar baixa densidade e alta resistência, também possui boa fluidez na fundição. Mas existem outros materiais que podem substituir as ligas de alumínio C355 e A354, dependendo da aplicação, como: liga de alumínio 2618, forjada com palhetas fresadas; Aço 42CrMo4V; e liga de titânio Ti6Al4V fundida. A determinação do material está diretamente relacionada com a aplicação do turbo compressor, onde que a liga de alumínio C355 ou A354 possui um ciclo de carga em rodovia de 750.000 km e rodovia rural 1.012.000 km. Porém, para ônibus rodoviário e perímetro urbano onde a solicitação é maior, seu ciclo de carga é de 247.000 km e somente para ônibus com perímetro urbano seu ciclo é de 98.000 km. A liga de titânio é aplicada nas duas últimas condições, devida à alta solicitação mecânica imposta, onde seu ciclo de vida se torna infinito (ENGELS, 2002).

Para atender as aplicações de motores que transitam pelo perímetro urbano, onde a solicitação do rotor compressor é de 420 MPa, o processo de fabricação gera um custo alto em seu produto final. Esse processo consiste da compra de chapas de liga de alumínio 7075 laminada, posteriormente cortada em tarugos e usinadas em máquina de cinco eixos, totalizando um custo final apenas do rotor compressor de R\$ 136,40.

O processo de fundição dos rotores que utilizam a liga de alumínio A354, consiste na fusão de matéria prima proveniente de sucata, fundição à vácuo em molde de gesso, tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, usinagem em torno CNC de dois eixos e balanceamento, totalizando um custo final do rotor compressor fundido de R\$ 26,10. O rotor compressor com a liga de alumínio A354 atende praticamente 80% das aplicações da liga de motores automotiva pesada, não se aplicando apenas a motores de perímetro urbano, devido sua solicitação mecânica não suportar.

Com o intuito de substituir a liga A354 utilizada em rotores de admissão de turbo compressores que possuem aplicações em veículos de perímetro urbano, por uma liga que apresenta um limite de resistência à tração superior a 420 MPa, o

presente trabalho objetivou a avaliação do efeito dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas de tração das ligas A354 e 2024 fundidas à vácuo. A caracterização microestrutural das amostras das ligas A354 e 2024, na condição bruta fusão e após tratamentos térmicos foram realizadas por microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS), difratometria de raios X. As ligas também foram caracterizadas por análise química e análise térmica. As propriedades mecânicas das ligas A354 e 2024 foram determinadas com o auxílio das técnicas de dureza e ensaio de tração.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio considerado como puro (Al>99,00%), aplica-se somente quando a resistência à corrosão e a aplicação, são mais importantes do que se tratando da resistência mecânica e a dureza (ZAHARESCU, 2009).

As ligas de alumínio são comercializadas de acordo com a classificação da Associação de Alumínio, que são denominadas de acordo com os padrões CEN EN 1706, “*Aluminium and Aluminum Alloys Castings*”.

A composição química e as propriedades mecânicas, são determinadas pelos padrões da norma *American Society for Testing and Materials* (ASTM), que corresponde ao método obtido de fundição, que são, ASTM B 26/B 26 M, “Determinação para fundição de areia de liga de alumínio”; ASTM B 85, “Determinação para fundição em alumínio-liga” e ASTM B 108, “Determinação para moldagem permanente em molde de alumínio e liga” (WARMUZEK, 2004).

Existe uma versatilidade de 100 composições de ligas registradas na Associação de Alumínio, onde existem mais de 300 aplicações internacionais, em que as propriedades em geral estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades das ligas de alumínio

<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidade</b>
Resistência à tração	70 a 505	MPa
Limite de escoamento	20 a 455	MPa
Alongamento	1 a 30	Adimensional
Condutividade elétrica	18 a 60	%IACS
Condutividade térmica	85 a 175	W/m.K à 25°C
Coefficiente linear de expansão térmica	17,6 a 24,7	$\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$
Força de cisalhamento	42 a 325	MPa
Módulo de elasticidade	65 a 80	GPa
Gravidade específica	2,57 a 2,95	Adimensional
Dureza	30 a 150	HB
Ponto de fusão	540 a 600	°C

Fonte: Adaptado de KAUFMAN; ROOY (2004).

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

Em relação a classificação das ligas de alumínio, corresponde a uma quantidade de ligas mestres para alumínio e ligas de alumínio, onde dependem principalmente do elemento principal (ZAHARESCU, 2009).

Segundo a norma ASTM B179 (2018), as ligas de alumínio são classificadas em séries, que correspondem a quatro algarismos, em que o primeiro dígito corresponde aos principais elementos de liga, conforme apresentado abaixo.

1xxx – Alumínio puro (Al) – Considerado como alumínio extremamente puro, possui baixa resistência mecânica (por não possuir elementos de liga), mas possui uma elevada resistência à corrosão;

2xxx – Ligas de alumínio-cobre (Al-Cu) – Possui uma elevada resistência mecânica, que pode ser comparada com alguns aços, mas por outro lado possuem baixa resistência à corrosão e baixa soldabilidade. Sua aplicabilidade está voltada principalmente para construção aeronáutica, sendo usuais como uniões mecânicas (rebites e parafusos);

3xxx – Ligas de alumínio-manganês (Al-Mn) – Considerada como a liga de alumínio que possui maior resistência mecânica e alta resistência à corrosão. Essas ligas são utilizadas principalmente quando há necessidade de conciliar elevada resistência à tração e corrosão. Possui grande aplicação em processos de fundição por moldes de areia e gesso, devido apresentar boa fluidez na fase líquida, preenchendo por completo moldes que apresentam paredes finas;

4xxx – Ligas de alumínio-silício (Al-Si) – Essas ligas possuem propriedades semelhantes a série 3xxx, sendo muito aplicada em processos de fundição em molde;

5xxx – Ligas de alumínio-magnésio (Al-Mg) – Esta série não possibilita tratamento térmico e as propriedades mecânicas são obtidas por meio do trabalho à frio. Possui uma excelente resistência à corrosão e uma boa soldabilidade. Sua aplicação está voltada para ambiente marítimo, veículos, indústria alimentícia e construção civil;

6xxx – Ligas de alumínio-magnésio-silício (Al-Mg-Si) – Possui uma alta facilidade de laminação e extrusão, e fácil soldagem. Suas propriedades, correspondem a uma boa resistência à corrosão, excelente resistência à tração. Sua aplicação está voltada para elementos estruturais na construção civil e em outros equipamentos, como: arquitetura, decoração e quadros de bicicletas;

7xxx – Ligas de alumínio-zinco (Al-Zn) – Correspondem por uma elevada resistência mecânica e uma perfeita resistência à corrosão, sendo utilizadas em estruturas soldáveis, sendo auto temperáveis;

8xxx – Ligas de alumínio com outros elementos – Aplica-se principalmente a ligas desenvolvidas para a indústria aeroespacial, como por exemplo, a liga Al-Li (ASTM B179, 2018; FERREIRA; FERNANDES, 1997; ORTIZ, 1999).

## 2.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

Dependendo do método utilizado na fabricação, as ligas de alumínio podem ser classificadas em dois grupos, como: ligas trabalhadas mecanicamente e ligas para fundição.

### 2.3.1 Ligas conformadas ou trabalhadas mecanicamente

Devido as diferentes características exigidas pelo processo de fabricação, as ligas de alumínio trabalhadas são obtidas através do processo de conformação mecânica, que são deformadas plasticamente, onde a composição e a microestrutura são respectivamente diferentes das ligas destinadas ao processo de fundição (ASKELAND; WRIGHT, 2015).

As ligas conformadas ou trabalhadas mecanicamente são aquelas em que a forma final do produto é conseguida através da transformação de laminas, chapas, folhas, perfil, vergalhão ou forjados, ou também pode ser obtido por transformações mecânicas a frio ou a quente de um tarugo ou placa produzida pela solidificação do metal líquido (ABAL, 2011).

O sistema de designação, apresentado pela *The Aluminum Association*, para os materiais trabalhados é composto de quatro dígitos, conforme mostrado na Tabela 2. O primeiro classifica a liga pela série segundo o principal elemento adicionado; o segundo, se diferente de zero, indica a modificação na liga básica; e o terceiro e o quarto indicam para o alumínio o teor mínimo deste metal, e, para as ligas, identificam as de composição específica (THE ALUMINUM ASSOCIATION, 2020; ASKELAND; WRIGHT, 2015).

Tabela 2 – Sistema de designação do alumínio e ligas de alumínio trabalhadas

ALUMÍNIO E SUAS LIGAS – TRABALHÁVEIS	
Designação da série	Indicação da composição
1XXX	99,00% mín. de alumínio
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
9XXX	Série não utilizada

Fonte: Adaptado de THE ALUMINUM ASSOCIATION (2020).

No entanto, o método de trabalho a frio das ligas de alumínio, provoca uma deformação nos grãos caracterizando uma distorção, que pode ser ocasionado dependendo do tipo de deformação realizada, tais como: laminação, estampagem, extrusão e assim sucessivamente. A microestrutura após esta deformação nota que os grãos se tornam alongados na direção de processamento.

Também pode ocorrer o aparecimento de estrias ou também denominadas como bandas de deformação, que são fileiras de sulcos de corrosão, ou ranhuras gravadas, que ocorrem no coletor de metal (durante o processamento do material), removendo material em locais de superfície em que as luxações aparecem. O resultado desse fenômeno são ligas linhas retas cruzando os grãos, tornando-se tortos, distorcidos e fragmentados (ASM HANDBOOK, 1991).

### 2.3.2 Ligas fundidas

As ligas obtidas pelo processo de fundição, em grande parte possuem silício de modo a promover uma reação eutética, resultando em um baixo ponto de fusão, excelente fluidez e excelente fundibilidade. Para que o metal líquido escoje pelo molde sem se solidificar, de maneira prematura, o metal deve apresentar boa fluidez, resultando em uma excelente fundibilidade, para obter peças a partir da liga de alumínio (ASKELAND; WRIGHT, 2015).

Os materiais para fundição são designados por três dígitos separados de um quarto dígito por um ponto, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Sistema de designação do alumínio e ligas de alumínio fundidas

ALUMÍNIO E SUAS LIGAS – FUNDIDAS	
Designação da série	Indicação da composição
1XX.X	99,00% mín. de alumínio
2XX.X	Cobre
3XX.X	Silício e cobre e/ou magnésio
4XX.X	Silício
5XX.X	Magnésio
6XX.X	Série não utilizada
7XX.X	Zinco
8XX.X	Estanho
9XX.X	Outros elementos

Fonte: Adaptado de THE ALUMINUM ASSOCIATION (2020).

O primeiro dígito indica a liga pela série segundo o elemento principal adicionado; o segundo e o terceiro dígitos caracterizam as ligas de composição específica; e o quarto, que segue o ponto, indica: se for dígito 0, peça fundida em moldes, se for dígito 1, material na forma de lingote.

As possíveis modificações que podem acontecer nas ligas já classificadas ou nos limites de impurezas são indicadas por uma sequência de letras, após o sistema de classificação. A sequência inicia-se com a letra A e omitem-se as letras I, O, Q e X, que são reservadas para as ligas experimentais (ALONSO *et al.*, 1993).

## 2.4 PROPRIEDADES DA LIGA DE ALUMÍNIO A354

A liga de alumínio A354 na condição fundida, corresponde às designações das ligas que possuem em sua composição química Al-Si-Cu-Mg, possibilitando o aumento da resistência mecânica, através do processo de tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, devido a presença de Cu e Mg na composição química dessa série (BEVILAQUA, 2016; KAUFMAN; ROOY, 2004).

Outro fator relevante dessa liga, é que de acordo com o limite de impurezas, pode ser caracterizado como uma liga de fundição *premium*, que consiste de uma propriedade mecânica e microestruturais com um alto grau de refinamento. Por apresentar o silício em sua composição química, permite exibir excelente fluidez, possibilitando a fundição de peças complexas com a presença de paredes finas,

principais características de uma de suas aplicações que se usa em rotores de turbo compressor (BEVILAQUA, 2016; KAUFMAN; ROOY, 2004).

A Tabela 4 apresenta a comparação de propriedades entre a liga de alumínio A354 e ligas da série 3XXX, vazadas em molde permanente, e que apresentam aplicações em componentes automotivos, como as ligas 319 e A390, conforme ASM HANDBOOK (1990). Observa-se que as ligas 332, 356 e 357 apresentam as melhores propriedades comparadas as demais ligas.

Tabela 4 – Comparação de propriedades, entre a liga de alumínio A354 e demais ligas da série 3xxx, vazadas em molde permanente, sendo 1 = Excelente; 5 = Ruim

Liga	Resistência à trinca a quente <sup>(a)</sup>	Fluidez <sup>(b)</sup>	Tendência a contração <sup>(c)</sup>	Usinabilidade <sup>(d)</sup>	Soldabilidade <sup>(e)</sup>
319	2	2	2	3	2
332	1	1	2	4	2
354	2	2	2	3	2
356	1	1	1	3	2
357	1	1	1	3	2
359	1	1	1	3	1
A390	2	2	3	4	2

Fonte: Adaptado de ASM HANBOOK (1990).

Legenda: (a) Capacidade da liga em resistir a tensões de contração enquanto resfria através de uma faixa de temperatura de fragilização.

(b) Capacidade do líquido de fluir rapidamente no molde e preencher seções finas.

(c) Redução do volume durante o resfriamento da liga, medido pela quantidade de material requerido de compensação na alimentação em forma de massalotes.

(d) Classificação baseada na facilidade de corte, qualidade do acabamento, formação de cavaco e vida de ferramenta.

(e) Baseado na habilidade do material em ser soldado por fusão com material de adição da mesma liga.

Quando adicionado o cobre, observa-se que as propriedades, como soldabilidade e resistência à corrosão, são reduzidas pela presença desse elemento. Também, por apresentar o silício em sua composição química, quando usinado, a liga apresenta um alto índice de desgaste em ferramentas de corte. Na Tabela 5, são apresentadas a influência da temperatura nas propriedades mecânicas da liga de alumínio A354 fundida em molde de areia (BEVILAQUA, 2016).

Tabela 5 – Influência da temperatura nas propriedades da liga de alumínio A354 fundida em molde de areia

Têmpera	Temperatura de ensaio (°C)	Limite de resistência à tração (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento em 50 mm (%)
T6	-196	469	338	5
	-44	400	290	5
	-8	400	290	5
	24	379	283	6
	100	414	338	6
	150	290	241	6
	205	103	76	45
	260	59	41	65

Fonte: Adaptado de BEVILAQUA (2016).

## 2.5 PROPRIEDADES DA LIGA DE ALUMÍNIO 2024

A liga de alumínio 2024 possui baixa densidade, entre 2,55 a 2,84 g/cm<sup>3</sup>, característica proveniente do alumínio, associado à dureza atribuída a adição do elemento de liga cobre (Cu). A Tabela 6 apresenta a composição química, propriedades térmicas e densidade da liga de alumínio 2024 (HUDA, 2009).

Tabela 6 – Composição química, propriedades térmicas e densidade da liga de alumínio 2024

<b>Liga de alumínio 2024</b>	
Composição química	93,5% Al, 4,5% Cu, 1,5% Mg, 0,6% Mn, pode conter outros elementos de liga na ordem de 0,05%, tais como vanádio, silício, ferro, titânio e zinco.
Propriedades Térmicas	Temperatura de fusão – 502°C Temperatura de evaporação – 638°C Calor específico – 875 J/Kg.K a 20°C
Densidade	2,77 g/cm <sup>3</sup> a 20°C

Fonte: Adaptado de HUDA (2009).

As propriedades mecânicas da liga de alumínio 2024 são superiores às do aço com médio teor de carbono, pois possuem um limite de escoamento da liga 2024 (T861), entre 462 – 490 MPa. Os aços de médio teor de carbono, como por exemplo, o aço AISI 1025 recozido possui um limite de escoamento de 248 MPa, devido ao tratamento térmico de endurecimento por envelhecimento (HUDA, 2009).

O cobre participa efetivamente no desenvolvimento dos precipitadores endurecedores, formando o  $Al_2Cu$  durante o tratamento de envelhecimento. Portanto, durante o processo de solidificação da liga de alumínio 2024, a presença de ferro como impureza implica na formação de inclusões Al-Cu-Fe-Mn e Al-Cu-Fe-Si-Mn (HUDA, 2009).

Os precipitados constituídos por cobre ou magnésio são responsáveis pela corrosão na liga, por induzirem o processo galvânico (HUDA, 2009).

## 2.7 TRATAMENTOS TÉRMICOS

As designações e denominações dos tratamentos térmicos realizados nas ligas de alumínio, estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Designações e denominações dos tratamentos térmicos realizados nas ligas de alumínio comercialmente

<b>Designação</b>	<b>Denominação</b>
F	Como fabricado
O	Recozido
H	Endurecimento por deformação
W	Solubilizado
T	Têmpera

Fonte: Adaptado de ROSATO JÚNIOR (2003).

Os tratamentos térmicos listados na Tabela 7 possuem subdivisões. No entanto, o tratamento mais utilizado é a têmpera (T), tratamento que consiste na solubilização, e posteriormente resfriadas bruscamente, visando a formação de soluções sólidas supersaturadas. (ROSATO JÚNIOR, 2003). Os principais tratamentos de têmpera (T) são:

- T1 – resfriada a partir da temperatura de fabricação e envelhecida naturalmente.
- T2 – resfriada a partir da temperatura de fabricação, trabalhada a frio e envelhecida naturalmente.
- T3 – solubilizada, tratada a frio e envelhecida naturalmente.
- T5 – resfriada a partir da temperatura de fabricação e envelhecida artificialmente.

- T10 – resfriada a partir da temperatura de fabricação, trabalhada a frio e envelhecida artificialmente (ASKELAND; WRIGHT, 2015).

Para o tratamento térmico de endurecimento por envelhecimento, um dos principais critérios para que uma liga de alumínio possa ser passível ao tratamento é a presença de uma redução da solubilidade sólida de um ou mais elementos presentes na liga, com redução na temperatura. Portanto, o tratamento térmico segue as seguintes fases:

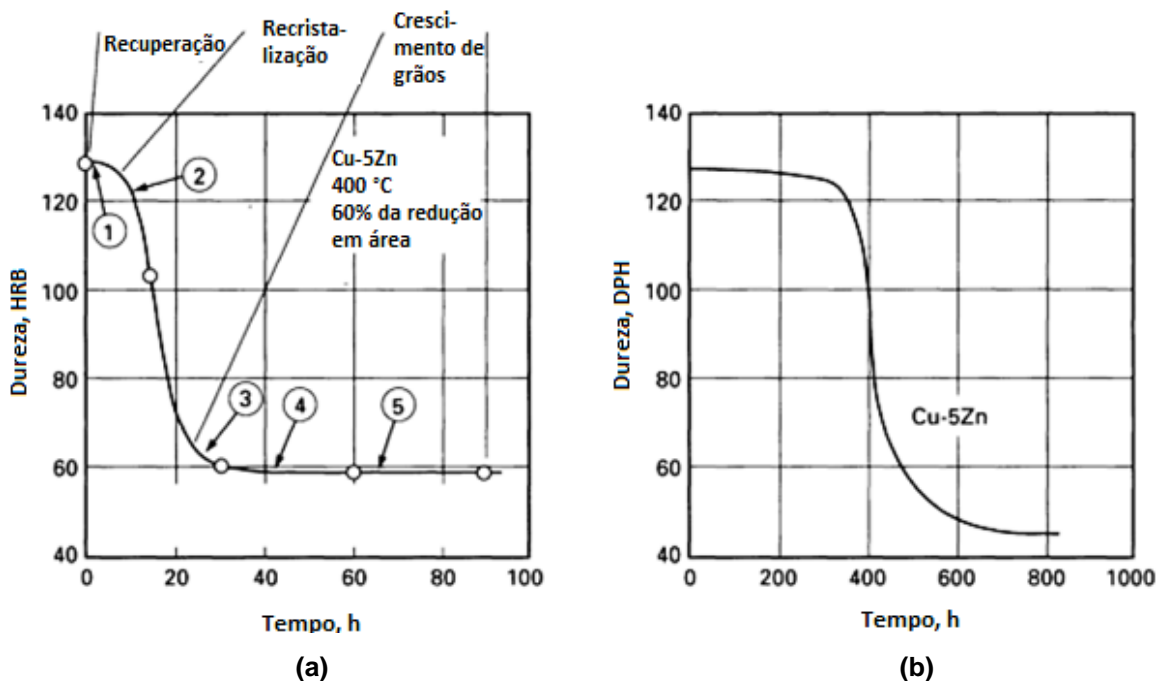
- Para que ocorra a dissolução dos elementos de liga, é necessário que o processo de tratamento térmico de solubilização ocorra em temperaturas altas dentro de uma região monofásica do diagrama de fases;
- Obtenção de uma solução sólida supersaturada dos elementos no alumínio, ocorre através de um resfriamento rápido ou têmpera, podendo ocorrer também em temperatura ambiente;
- Necessidade do controle de decomposição da solução sólida supersaturada para o aparecimento de precipitados dispersos, ocorrendo por envelhecimento em tempos com duas temperaturas intermediárias (BEVILAQUA, 2016; POLMEAR; 2005).

O tempo necessário para o tratamento térmico, de modo a efetuar um grau satisfatório de solução dos constituintes da fase solúvel não dissolvida ou precipitada, buscando alcançar homogeneidade da solução sólida, depende principalmente da microestrutura antes do tratamento térmico. Esse tempo pode variar entre 1 min para uma folha fina de alumínio e também pode alcançar um tempo de 20 h para fundição em moldes de areia ou gesso (BEVILAQUA, 2016; POLMEAR; 2005).

Outro fator muito importante para determinação da rampa de aquecimento do tratamento até a temperatura determinada, depende diretamente da espessura da seção e da carga do forno (ASM HANDBOOK, 1991).

No entanto, para as ligas de alumínio a alteração na resistência é obtida durante o recozimento, conforme demonstrado na Figura 1a. A propriedade de dureza e o aumento da resistência à tração, primeiramente permanece de maneira constante, seguido de uma redução inesperada e contínua, mas sucessivo, porém com temperatura fixa de 400°C. Na Figura 1b, é apresentado um resultado semelhante de recozimento por um tempo fixo, mas com temperatura crescente (ASM HANDBOOK, 1991).

Figura 1 – Efeito do tempo e da temperatura de recozimento na liga Cu-5Zn trabalhada com 60% de redução de área



Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK (1991).

Legenda: (a) Efeito do tempo de recozimento à temperatura fixa de 400 ° C.

(b) Efeito da temperatura de recozimento com um tempo fixo (15 min).

### 2.7.1 Solubilização

O tratamento de solubilização baseia-se no aquecimento da liga a uma temperatura suficiente alta para que possa acontecer a dissolução dos precipitados endurecedores, sendo necessário estabelecer uma temperatura máxima para não causar a fusão dos constituintes de baixo ponto de fusão nas ligas de alumínio (SJÖLANDER; SEIFEDDINE, 2010).

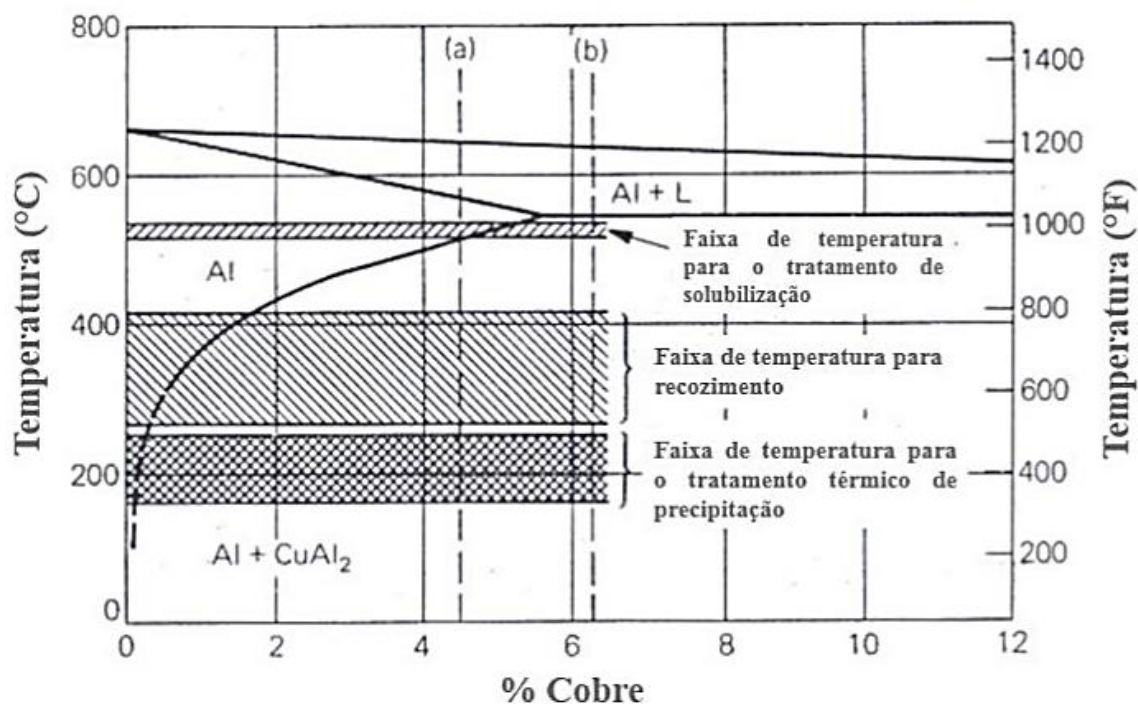
O tratamento de solubilização tem como objetivo o aumento da propriedade de resistência mecânica, que é realizado a altas temperaturas para dissolver fases que contém Cu e Mg, que estão contidas durante o processo de solidificação de uma liga (SJÖLANDER; SEIFEDDINE, 2010).

No processo realizado a alta temperatura, deve se evitar o superaquecimento da liga, o que pode ocasionar a formação de porosidades e oxidação, além da fusão parcial de algumas fases (SJÖLANDER; SEIFEDDINE, 2010).

O tipo de processamento que será realizado após a fusão, tem que ser levado em consideração para determinar a temperatura de solubilização. O diagrama de

fases Al-Cu, contendo faixas de temperaturas dos tratamentos térmicos de recozimento, solubilização e envelhecimento, está mostrado na Figura 2 (HATCH, 1984).

Figura 2 – Diagrama de fases alumínio-cobre, contendo faixas de temperaturas de processos de tratamentos térmicos



Fonte: Adaptado de HATCH (1984).

Em peças obtidas no processo de fundição, pode ocorrer a formação de uma estrutura dendrítica, que ocorre através da rejeição de soluto, resultante de um super-resfriamento. O aparecimento de uma estrutura eutética, ocorre na temperatura eutética, e por motivos de segurança, utiliza a temperatura de solubilização abaixo da temperatura eutética, impossibilitando a fusão parcial da peça.

Para tratamentos de ligas de alumínio em molde de areia ou molde permanente, a liga de alumínio A354, o tratamento térmico de solubilização deverá ocorrer na temperatura de 525-535 °C por um período de tempo de 10 a 12 h. Entretanto, para as ligas de alumínio Al-Cu-Mg, principalmente à liga 2024, o tratamento térmico de solubilização é realizado na temperatura de 495 °C (ASM INTERNATIONAL, 1991).

## 2.7.2 Envelhecimento

Considerado como um dos tratamentos mais importantes destinados às ligas de alumínio para obtenção do aumento na resistência mecânica (CHIAVERINI, 2008).

O processo de tratamento por envelhecimento caracterizado como “endurecimento por envelhecimento” ou também como “endurecimento por envelhecimento”, consiste no envelhecimento do composto metálico, onde a liga, após sofrer o processo de solubilização, é resfriada de forma muito rápida e reaquescida em temperatura entre 115 °C a 190 °C, em um período de 5 a 48 h, obtendo o envelhecimento de partículas do composto intermetálico da liga, que constituem o seu endurecimento (CHIAVERINI, 2008).

A temperatura e o tempo dependem dos elementos que constituem a liga, e do volume da peça ou amostra a ser envelhecida, pois quanto maior o volume, maior será o tempo (CHIAVERINI, 2008).

O fenômeno de endurecimento por envelhecimento, os átomos supersaturados do soluto, como por exemplo, o cobre em uma liga duralumínio, acumulam-se na direção dos planos cristalográficos (CHIAVERINI, 2008).

Com esse acúmulo, diminui-se a concentração dos átomos de cobre em outras regiões, resultando uma menor supersaturação e gerando uma estrutura mais estável. Dessa forma, se iniciam duas regiões distorcidas no reticulado, dificultando os movimentos de discordâncias, originando assim um aumento da dureza e maior resistência à deformação da liga (CHIAVERINI, 2008).

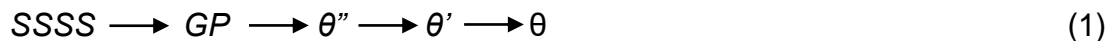
No processo de envelhecimento, por exemplo, a liga duralumínio apresenta resistência à tração superior a 400 MPa, e limite de escoamento de 300 MPa, com uma densidade um pouco superior à do alumínio puro, onde seria impossível com o alumínio no estado puro (CHIAVERINI, 2008).

O meio de obtenção de resistência mecânica obtido para as ligas de alumínio é proveniente do tratamento térmico de envelhecimento, obtido por meio das partículas de segunda fase que controlam as propriedades da liga de alumínio, como por exemplo a liga 2024, que é dividida em três categorias (MATUCHA, 1996; POLMEAR, 1995):

- Compostos intermetálicos grosseiros ou partículas constituintes (0,5 – 10 µm) constitui em sua composição química os elementos de liga Cu e Mg, bem como impurezas de Fe e Si. A origem dessas partículas ocorre durante

a solidificação original da liga, inclusive compostos como  $Al_6(Mn, Fe)$ ,  $Al_7Cu_2Fe$ ,  $Al_2CuMg$  e  $Al_2Cu$ .

- Dispersóides (0,05 – 0,5  $\mu m$ ) surgem durante a homogeneização e quase sempre apresentam elementos de transição como Cr, Mn ou Zr, como por exemplo,  $Al_{20}Mn_3Cu_2$ .
- Precipitados finos (acima de 0,1  $\mu m$ ) são provenientes do envelhecimento, os precipitados finos comprometem a resistência da liga. Na liga de alumínio 2024, apresenta dois tipos principais:  $Al_2Cu$  ( $\theta$ ) e  $Al_2CuMg$  (S) (MATUCHA, 1996; VAN HORN, 1967). No entanto, a ordem de precipitação para o  $Al_2Cu$  ( $\theta$ ), a partir de uma solução sólida supersaturada, SSSS, é conforme a equação (1) seguinte:



Sendo que,  $GP$  caracteriza às zonas de Guiner-Preston,  $\theta''$  e  $\theta'$  são fases metaestáveis.

A ordem de precipitação para o  $Al_2CuMg$  (S) é semelhante à do  $Al_2Cu$  ( $\theta$ ), conforme:

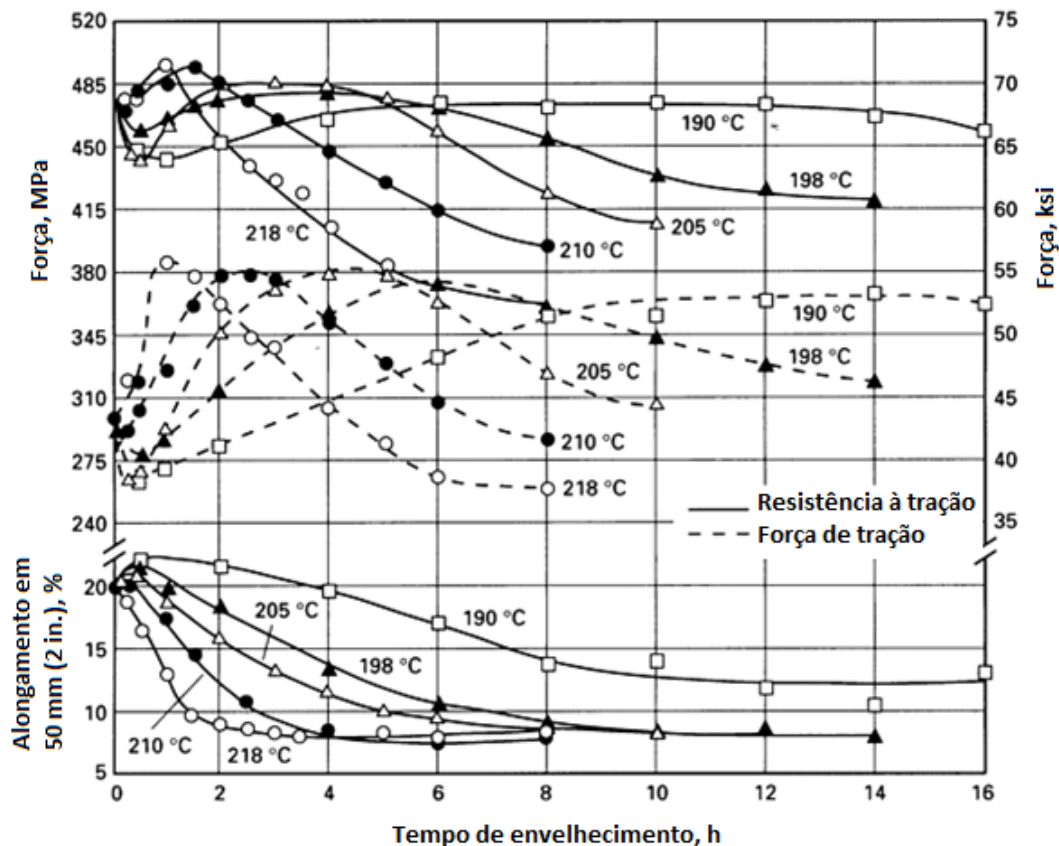


Enfim, as zonas Guinier-Preston (GP) são correlacionadas com a matriz e são modificadas nas fases metaestáveis de  $\theta''$ ,  $\theta'$  ou  $S'$ . Porém para as fases  $\theta$  e  $S$  são incoerentes com a matriz (MALAFAIA, 2009).

Para tratamentos de ligas de alumínio em molde de areia ou molde permanente, a liga de alumínio A354 por apresentar silício em sua composição química, o tratamento térmico de envelhecimento deverá ocorrer na temperatura de 180°C, temperatura em que o tratamento térmico da solução envelhece artificialmente, aquecendo de maneira uniforme à temperatura e durante o tempo necessário para obter as propriedades mecânicas desejadas.

Para a liga 2024, observa-se um conjunto de combinações de temperatura e tempo que atribuíram excelentes propriedade mecânicas desejadas, conforme apresentado na Figura 3 (ASM HANDBOOK, 1991; BEVILAQUA, 2016).

Figura 3 – Influência do tempo e temperatura de envelhecimento nas propriedades mecânicas da liga de alumínio 2024



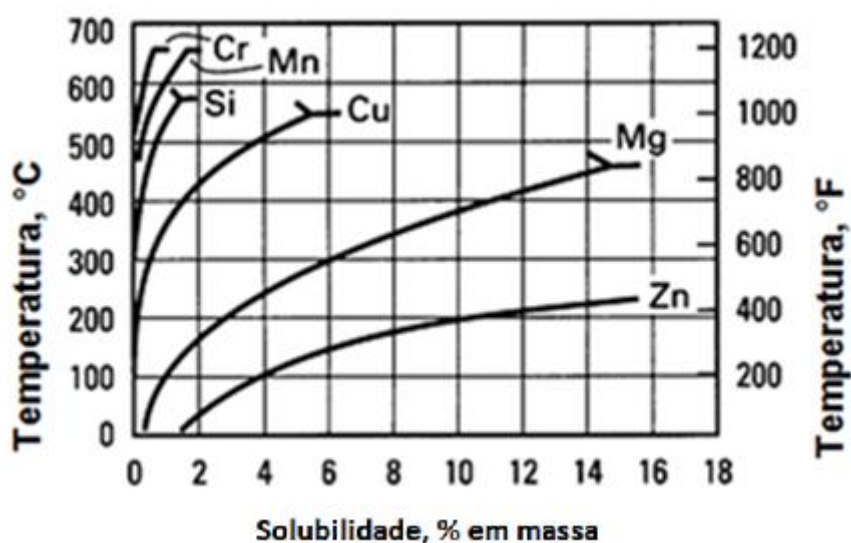
Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK (1991).

As ligas de alumínio Al-Cu-Mg, principalmente a liga 2024, o tratamento térmico de envelhecimento é realizado na temperatura de 190°C, por um período de 12 h (ASM HANDBOOK, 1991; BEVILAQUA, 2016).

### 2.7.3 Solubilidade

Nas ligas comerciais de alumínio que necessitam em sua aplicação alta resistência mecânica, oriunda de endurecimento por deformação a frio ou por tratamento térmico, requer de elementos combinados de cobre, magnésio, manganês, silício e zinco, onde todos esses elementos possuem solubilidade sólida em alumínio, com o aumento da temperatura, conforme Figura 4 (ASM HANDBOOK, 1990).

Figura 4 – Solubilidade sólida em função da temperatura de elementos de liga mais frequentemente adicionados ao alumínio



Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK (1990).

O elemento zinco e o magnésio, possuem a maior solubilidade (máximo de 15% em peso), em segundo o cobre (máximo de 6% em peso) e os demais elementos como o silício e o manganês (máximo de 2% em peso) (ASM INTERNATIONAL, 1990).

As ligas de alumínio absorvem a máxima solubilidade sólida, na temperatura eutética, peritética ou monotética. Reduzindo a temperatura, proporcionalmente os limites de solubilidade diminuem, o elemento de base para o aumento de dureza e resistência das ligas, pelo processo de tratamento térmico em solução e envelhecimento por precipitação (ASM INTERNATIONAL, 1990).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse trabalho as ligas de alumínio A354 e 2024 foram produzidas e fornecidas pela empresa MGFC, localizada em São João da Boa Vista- SP. A liga A354 é utilizada pela empresa para fabricação de rotores de admissão do turbo compressor com aplicações para carros e caminhões.

As ligas foram fundidas à vácuo e caracterizadas quanto a composição química, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, DSC, dureza e ensaio de tração. Para o ensaio de tração da liga 2024, foram utilizadas as amostras solubilizadas e envelhecidas que apresentaram maior valor de dureza.

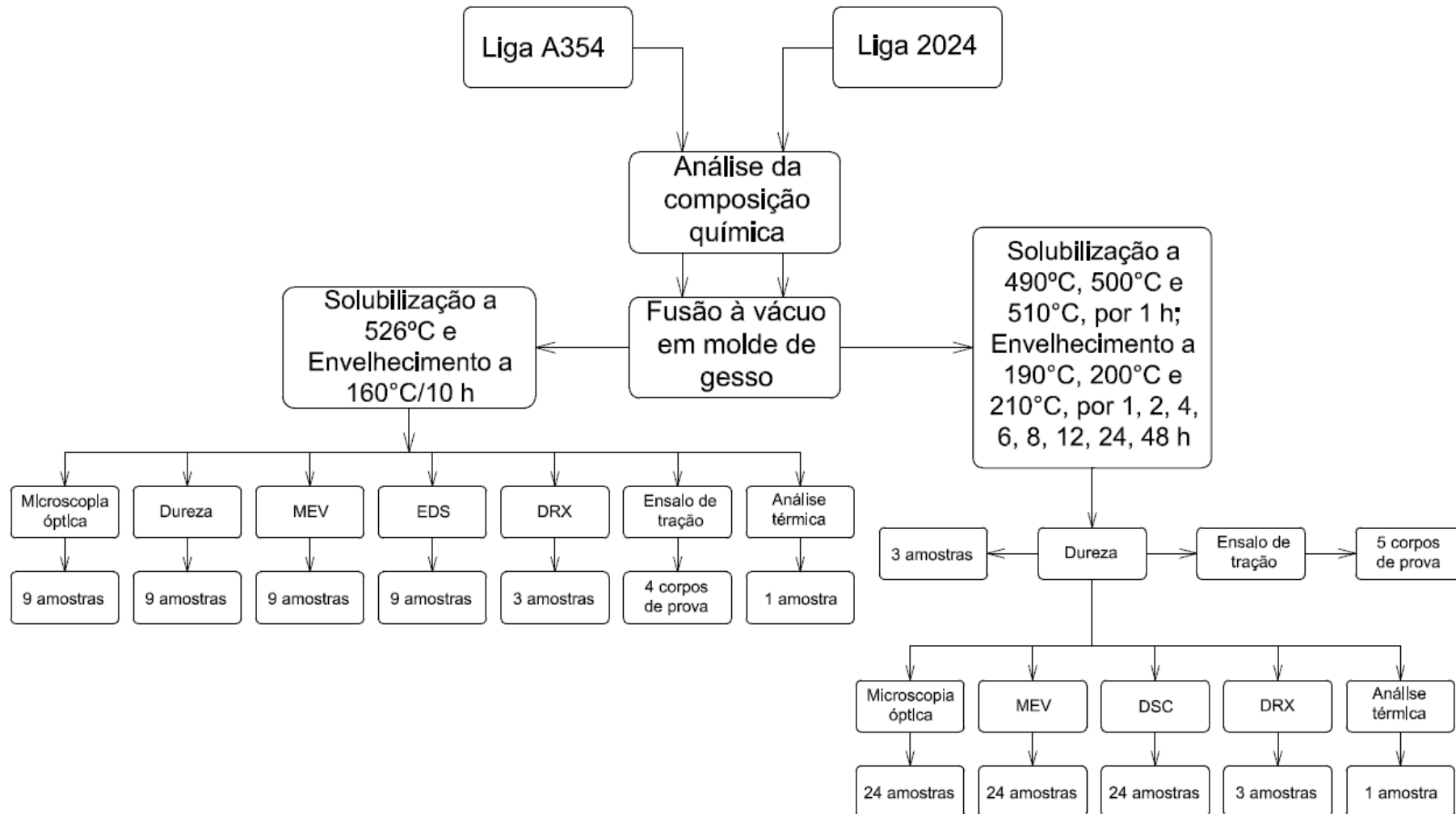
O procedimento experimental desenvolvido neste projeto está representado pelo diagrama de blocos, conforme mostrado na Figura 5.

#### 3.1 ANÁLISE QUÍMICA

As análises de composição química foram realizadas nas amostras das ligas A354 e 2024, retiradas durante a fundição destinada exclusivamente para esse projeto. As dimensões dos corpos de prova utilizados para as análises da composição química foram de 15 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento.

As análises foram realizadas de acordo com a Norma ASTM E415-15, em um espectrômetro de emissão óptico multimatriz, modelo 75-80, da marca Metallab, instalado na empresa MGFC.

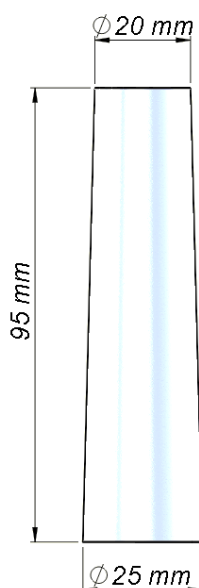
Figura 5 – Diagrama de blocos da metodologia utilizada nesse trabalho



### 3.2 FUSÃO DAS LIGAS

Após obter a composição química especificada, as ligas A354 e 2024 fundidas foram vertidas em molde de gesso em forno à vácuo. As dimensões dos corpos de provas, estão mostradas na Figura 6.

Figura 6 – Dimensões dos corpos de provas fundidos em molde de gesso



Fonte: Do autor.

### 3.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os corpos de prova obtidos em molde de gesso, conforme apresentado na Figura 6, foram utilizados para os tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento. Os tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento foram realizados no forno RFAIO, modelo ELGE de 380 Volts, 9 kW e 13 ampères, sem controle de atmosfera ao ar, com variação de temperatura de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , instalado na empresa MGFC.

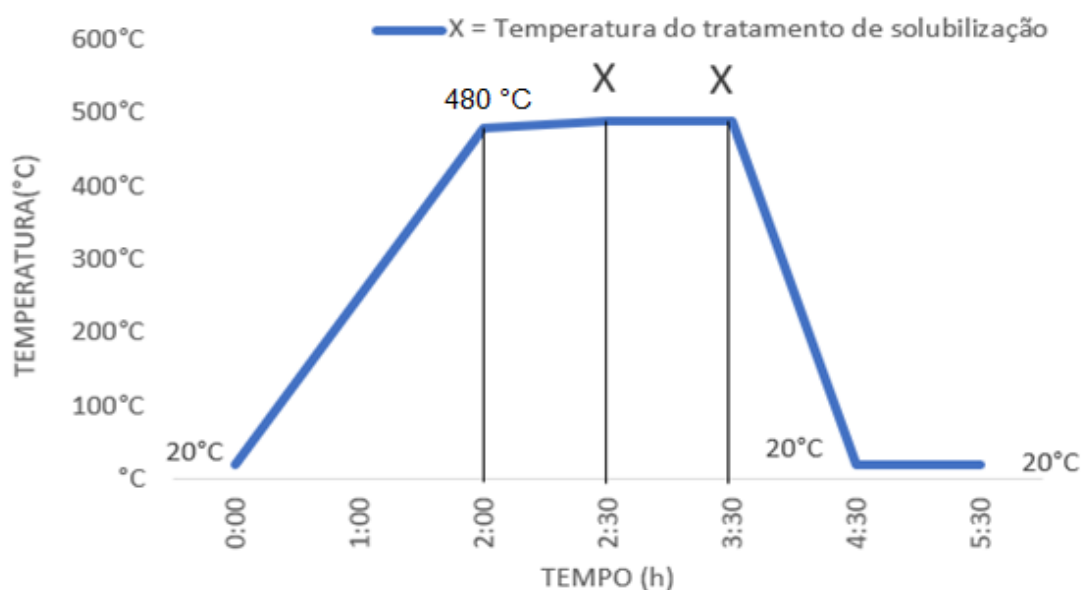
#### 3.3.1 Tratamentos de Solubilização

O tratamento de solubilização da liga A354 foi realizado de acordo com a curva de aquecimento, onde as amostras foram aquecidas até  $526^{\circ}\text{C}$  por um período de 30 min e então, resfriados em água até  $20^{\circ}\text{C}$ , conforme *ASM Handbook* (1991),

em que a temperatura de solubilização recomendada encontra-se na faixa de 525 a 535 °C, por um período de tempo de 10 a 12 h.

Para a liga 2024, os tratamentos de solubilização, foram realizados nas temperaturas de 490°C, 500°C e 510°C, conforme apresentado na Figura 7. Para cada tratamento as amostras foram aquecidas até 480°C por um período de 2 h e posteriormente até a temperatura de tratamento (490°C, 500°C e 510°C) por um tempo de 30 min e mantidas por um período de 1 h, e então, resfriados em água até 20°C, e mantidas por uma 1 h, conforme *ASM Handbook* (1990), em que a temperatura de solubilização recomendada encontra-se na faixa de 480 a 520 °C, por um período de tempo de 1 h a 2 h.

Figura 7 – Representação esquemática dos tratamentos térmicos de solubilização da liga 2024, realizados a  $x = 490^{\circ}\text{C}$ ,  $x = 500^{\circ}\text{C}$  e  $x = 510^{\circ}\text{C}$



Fonte: Do autor.

### 3.3.2 Tratamentos de Envelhecimento

O tratamento de envelhecimento para liga A354 foi realizado, conforme a *ASM Handbook* (1991), em que a temperatura de envelhecimento indicada, encontra-se na faixa de 140°C a 200°C, por um período de tempo de 1 h a 12 h. Foi realizada na temperatura de 160°C por 10 h. Em seguida, os corpos de prova foram resfriados ao ar.

Os tratamentos de envelhecimento da liga 2024, foram realizados conforme a *ASM Handbook* (1990), em que a temperatura de envelhecimento recomendada é na faixa de 140°C a 220°C, por um período de tempo de 1 h a 48 h. Desse modo, foram realizados nas temperaturas de 190°C, 200°C e 210°C por 1 h, permanecendo nas temperaturas de 190°C, 200°C e 210°C, por períodos de 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h e 48 h. Posteriormente, os corpos de prova foram resfriados ao ar.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

#### 3.4.1 Ensaio de Dureza

Os valores de dureza, foram determinados utilizando uma esfera de diâmetro de 1/16", carga de 100 kg por 60 segundos. Os ensaios de dureza foram realizados, no durômetro de bancada *Rockwell/Brinell*, marca *Sussem Wolpert*, modelo HT1-A, instalado na empresa MGFC.

As amostras das ligas A354 e 2024 foram usinadas com dimensões de 15 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento e submetidas ao ensaio de dureza, de acordo com a Norma ASTM E10-15.

No ensaio de dureza da liga A354 foram preparados três corpos de prova na condição de bruta fusão, três para condição de solubilização e três corpos de prova para condição de solubilização e precipitação. Os valores médios de dureza foram determinados a partir de quatro identificações em cada amostra.

No ensaio de dureza da liga de alumínio 2024 foram preparados três corpos de prova na condição de bruta fusão e os valores médios de dureza foram determinados a partir de quatro identificações em cada amostra. Na condição de solubilização, os ensaios de dureza foram realizados, conforme descrição abaixo.

Foram solubilizadas sessenta e três amostras na temperatura de 490° C / 1 h, sendo que as mesmas foram divididas em grupos para o tratamento térmico de envelhecimento com sete amostras cada, nas temperaturas de 190° C, nos respectivos tempos: 0 h, 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h e 48 h.

Posteriormente foram solubilizadas sessenta e três amostras na temperatura de 500° C / 1 h, sendo que as mesmas foram divididas em grupos para o tratamento térmico de envelhecimento com sete amostras cada, nas temperaturas de 200° C, nos respectivos tempos: 0 h, 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h e 48 h.

Finalmente foram solubilizadas sessenta e três amostras na temperatura de 510° C / 1 h, sendo que as mesmas foram divididas em grupos para o tratamento térmico de envelhecimento com sete amostras cada, nas temperaturas de 210°C, nos respectivos tempos: 0 h, 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h e 48h. Devido a quantidade de amostras disponíveis para cada condição, o valor de dureza foi determinado a partir de uma única identificação em cada amostra.

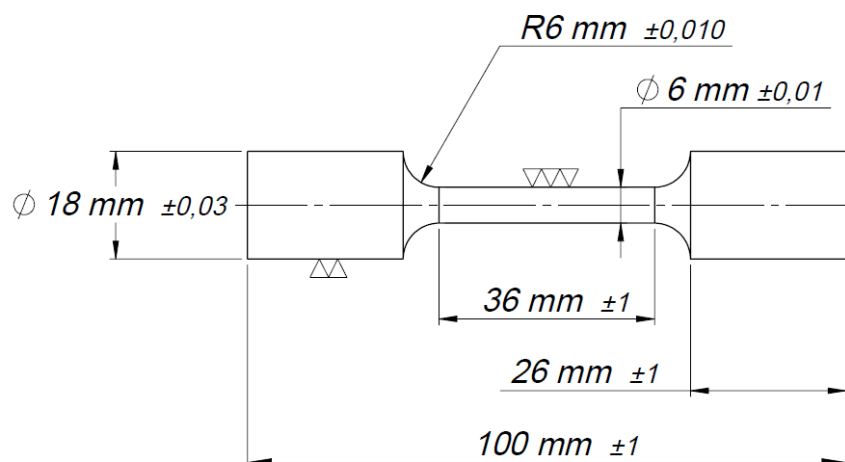
### 3.4.2 Ensaio de Tração

As dimensões dos corpos de prova destinados ao ensaio de tração das ligas A354 e 2024, foram utilizadas de acordo aos critérios impostos na Norma ASTM-E-8. Para a liga A354 foi realizado somente nas amostras solubilizadas e envelhecidas.

Para o ensaio da liga 2024, foi selecionada a condição que apresentou maior valor de dureza após o tratamento de solubilização e envelhecimento.

Os corpos de prova destinados ao ensaio de tração, foram usinados na empresa MGFC, utilizando o mesmo torno de Comando Numérico Computadorizado (CNC) para preparação das amostras dos corpos de prova para ensaio de dureza, de acordo com as dimensões apresentadas na Figura 8, atendendo aos critérios impostos na norma ASTM-E-8.

Figura 8 – Esquema do corpo de prova utilizado no ensaio de tração, conforme ASTM-E-8



Valores médios obtidos a partir do ensaio de tração foram determinados a partir de quatro corpos de prova para a liga A354 e cinco corpos de prova para a liga 2024.

Foram determinados o limite de resistência máxima, tensão de escoamento, tensão de ruptura, região de endurecimento por deformação e região de “estricção”. Os ensaios de tração, foram realizados à temperatura ambiente no equipamento universal de ensaios mecânicos estáticos de 300 kN WAW-300C, instalado no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, *campus* de São João da Boa Vista- SP.

Foi utilizada deformação padrão de 0,2%, o alongamento até à fratura foi calculado pela porcentagem de alongamento (%E1), subtraindo o valor registrado pelo extensômetro do comprimento inicial. O valor da resistência à tração final (UTS), foi obtido a partir dos resultados fornecidos pela máquina universal de ensaio.

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

#### 3.5.1 Microscopia Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura

A preparação das amostras das ligas A354 e 2024, para análise microestrutural, foi realizada de acordo com a Norma ASTM E112-12. As amostras brutas de fusão e tratadas termicamente foram analisadas por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. As amostras foram usinadas com dimensões de 15 mm de diâmetro por 25 mm de espessura. Devido à essas dimensões, não houve necessidade de embutir as amostras. Todas as amostras foram lixadas com lixa d'água de granulometria de 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 e 2200 mesh, com uma rotação de 100 rpm.

O polimento foi utilizado um pano extremamente macio e solução de alumina de 1  $\mu\text{m}$ . A Politriz utilizada foi da marca Metkon, modelo FORCIPOL 1V – *Grinder Polisher*. O ataque químico para revelar a microestrutura da liga de alumínio 2024, no estado como fundido (tamanho e distribuição dos grãos), e para identificar os precipitados após tratamentos térmicos, foi o *Poulton* modificado (40 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  + 30 ml de HCl + 2,5 ml de HF + 42,5 ml de  $\text{H}_2\text{O}$ ).

As imagens foram realizadas em microscópio óptico com analisador de imagens da marca *Zeiss*, modelo *Axio Scope A1*, acoplado à câmera de vídeo *Axio*

Cam ICC3 e placa digitalizadora conectada a um computador equipado com software *Axio Vision 4.8.2 SP2*, instalado no LABMAT, na Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), *campus* de Poços de Caldas, e no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus de São João da Boa Vista- SP.

As imagens no microscópio eletrônico de varredura foram obtidas no equipamento da marca Hitachi modelo TM 3000, com detector para microanálise via EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) instalado na EEL/USP Lorena- SP.

### 3.5.2 Difractometria de raios X

As análises por difração de raios X foram utilizadas para identificar as fases presentes na liga A354 e na liga 2024, na condição apenas fundidas e após os tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento propostos. As análises foram realizadas no difratômetro da marca Siemens D5005 instalado no Laboratório de Cristalografia da UNIFAL, *campus* Alfenas, utilizando radiação de Cu K $\alpha$ .

A varredura foi feita num intervalo de  $10^{\circ} \leq 2\theta \leq 90^{\circ}$ , com passo de  $0,01^{\circ}$  por segundo. A preparação das amostras foi efetuada por lixamento da superfície (até a granulometria de 600 mesh).

As fases foram indexadas com o auxílio dos dados cristalográficos contidos nos registros JCPDS (JCPDS, 1988), *Pearson's Crystal Data* (VILLARS; CENZUAL, 2007) e com o auxílio do programa de computador *Powdercell*<sup>®</sup> (KRAUS; NOLZE, 1999).

## 3.6 ANÁLISE TÉRMICA

As amostras das ligas A354 e 2024, na condição fundida foram analisadas quanto ao comportamento térmico, utilizando calorimetria exploratória diferencial (DSC) e termogravimetria (TG) para analisar os eventos físico-químicos endo/exotérmicos e possíveis alterações na massa em função da temperatura.

As amostras utilizadas para análise térmica foram removidas das amostras obtida da Figura 6. Devido o alumínio possuir alta ductilidade, com o auxílio de um alicate, foi removido uma amostra de aproximadamente 7 a 10 mg, de cada liga.

Os parâmetros para à taxa de aquecimento foi de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , com temperatura inicial para ambas as ligas, partindo de  $0^{\circ}\text{C}$  até  $900^{\circ}\text{C}$ , o gás foi argônio e cadinho de

alumina. O equipamento de DSC e TG utilizado na análise é da marca *Netzsch*, modelo Júpiter STA 449F3, instalado no LABMAT, na UNIFAL-MG, *campus* Poços de Caldas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para a caracterização química, dureza, microestrutural, difração de raios X, mecânica e análise térmica, das ligas A354 e 2024, nas condições: bruta de fundição; solubilizadas e envelhecidas são apresentados a seguir.

Os resultados das análises química obtidos por espectrometria de emissão óptica, das ligas A354 e 2024 na condição de bruta fundição (% em massa), estão apresentados na Tabela 8.

Observa-se, que as composições químicas das ligas A354 e 2024 estão de acordo com a norma ABNT NBR ISO 209 (2010), conforme apresentadas na Tabela 9. Entretanto, na norma, o elemento ferro (Fe) é uma impureza indesejável encontrada em ligas de alumínio, pois o ferro junto com o alumínio e outros elementos de liga formam fases intermediárias que podem ser prejudiciais ao processo e às propriedades do material.

Tabela 8 – Composição química das ligas A354 e 2024 condição de bruta fundição (% em massa)

<b>Composição</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Zn</b>	<b>Ti</b>	<b>Cr</b>	<b>Al</b>
A354	9,09	0,082	1,750	0,017	0,585	0,025	0,169	-	Bal.
2024	0,488	0,145	4,803	0,837	1,563	0,004	0,017	0,022	Bal.

Fonte: Do autor.

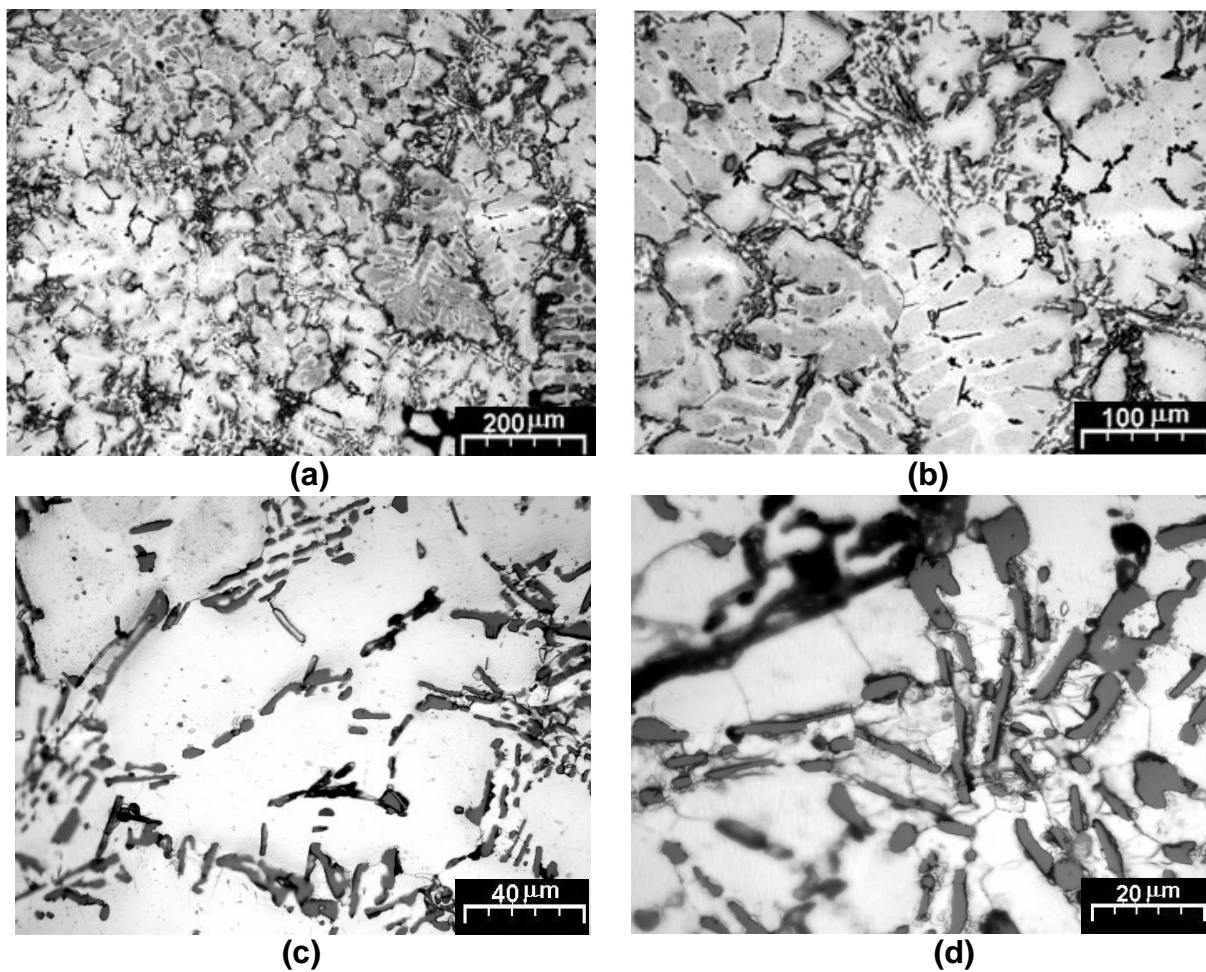
Tabela 9 – Composição química das ligas A354 e 2024 (% em massa), de acordo com a norma ABNT NBR ISO 209 (2010)

<b>Composição</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Zn</b>	<b>Ti</b>	<b>Cr</b>	<b>Al</b>
A354	9	<0,2	1,8	<0,1	0,5	<0,1	<0,2	-	Bal.
2024	0,5	0,5	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,25	0,15	0,10	Bal.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR ISO 209 (2010).

As micrografias da liga de alumínio A354, na condição de bruta fundição, caracterizadas por microscopia óptica (MO) e por microscopia eletrônica de varredura (MEV) estão apresentadas nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

Figura 9 – Micrografias da liga de alumínio A354 na condição de bruta fundição, obtidas por MO

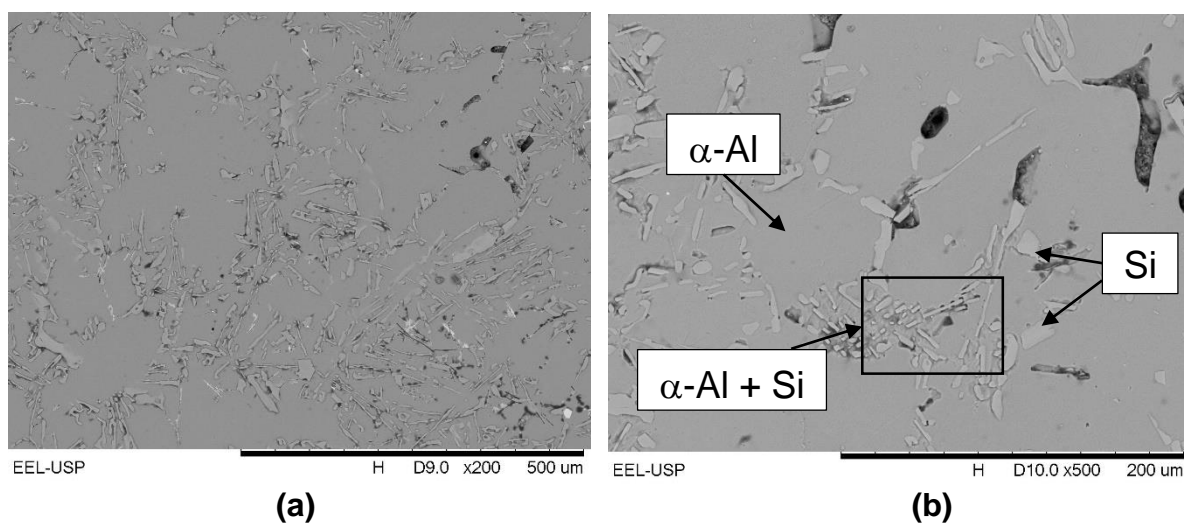


Fonte: Do autor.

Legenda: (a) Visão geral.

(b), (c) e (d) Em detalhes.

Figura 10 – Micrografias da liga de alumínio A354 na condição de bruta fundição, por MEV



Fonte: Do autor.

Legenda: (a) Visão geral.

(b) Em detalhes.

Na microestrutura da liga A354 na condição de bruta fundição (Figura 9), observa-se a precipitação primária fase  $\alpha$ -Al com morfologia dendrítica, seguido da precipitação do Si, entre os ramos dendríticos aciculares, na última região a solidificar, conforme também observado por Peres *et al.* (2005) e Yanlei *et al.* (2012).

Essa estrutura heterogênea está relacionada a fatores como a diferença entre os pontos de fusão do Al e do Si, a diferença na proporção relativa de tais constituintes (88,28% da fase  $\alpha$ -Al e 9,09% de Si) e a diferença na entropia que ocorre no momento da fusão de ambos (1,35 para o Al e 7,15 J.mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> para o Si) segundo Fisher e Kurz (1980). Devido a elevada entropia de fusão da fase facetada, o Si nucleia e cresce antes que o Al inicie a solidificação no ponto eutético.

A Tabela 10 apresenta os resultados das microanálises semiquantitativas por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da liga de alumínio A354, condição de bruta fundição. Observa-se que a fase  $\alpha$ -Al dissolve Si e Cu, em torno de 1,00 %-at., e o Si dissolve 2,141 %-at. de Al. De acordo com o diagrama de fases Al-Si, não se observa a formação de Si como solução sólida.

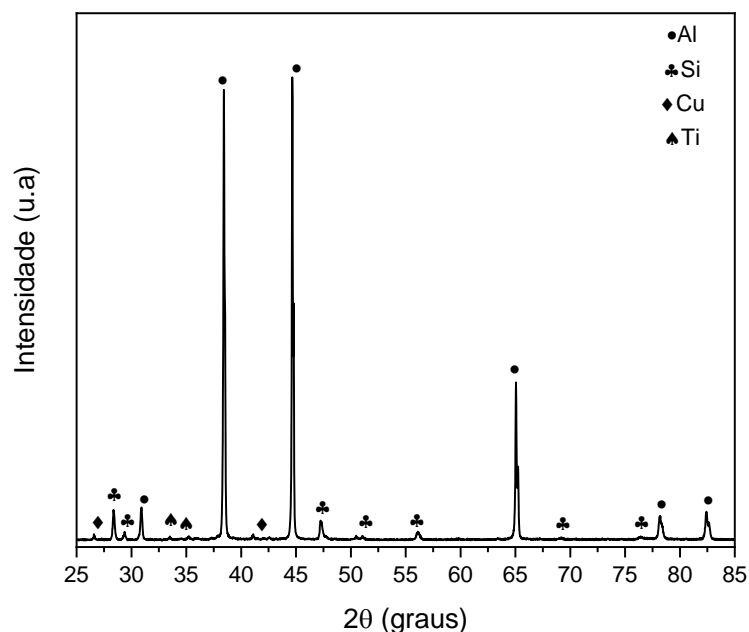
Tabela 10 – Teores de Al, Si, Cu, Fe e Mg (% atômica), das fases formadas na microestrutura da liga de alumínio A354 condição de bruta fundição, obtidos por EDS

Fases	Elementos (%-at)				
	Al	Si	Cu	Fe	Mg
$\alpha$ -Al	97,629	1,261	1,110	-	-
Si	2,141	97,859	-	-	-

Fonte: Do autor.

O espectro de difração de raios X, da liga A354 na condição de bruta fundição, está apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Espectro de difração de raios X da liga A354 na condição de bruta fundição



Fonte: Do autor.

No espectro de difração de raios X, da liga A354 (Figura 11), na condição bruta fundição, observa-se, a presença de Al, Si, Ti e Cu, entretanto os elementos Ti e Cu não foram observados nas micrografias obtidas por microscopia óptica e eletrônica de varredura.

Os resultados obtidos nos ensaios de dureza Brinell, na liga de alumínio A354, na condição como fundida estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores de dureza Brinell, da liga A354 como fundida

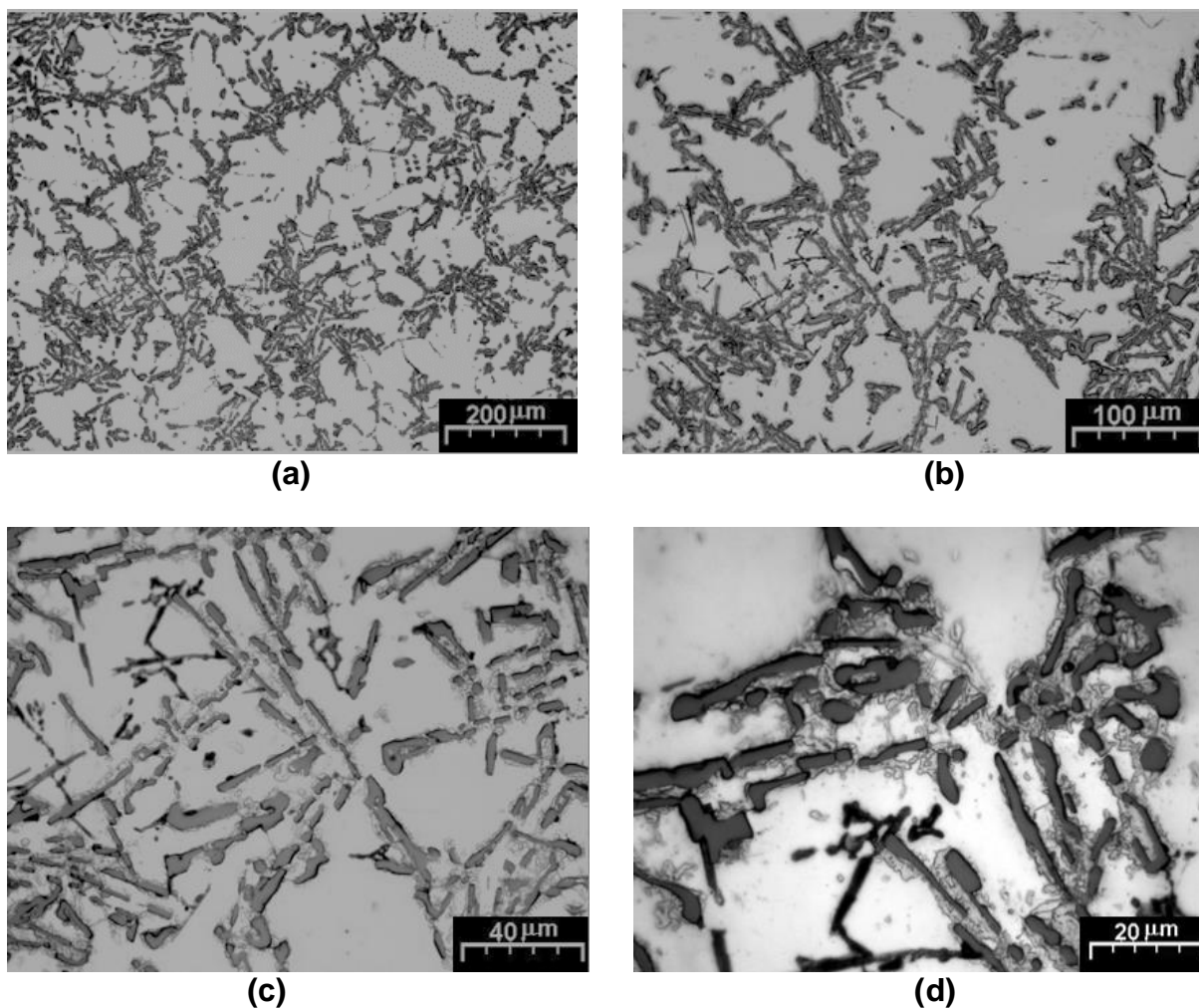
Liga A354 Medição	Corpos de prova		
	01	02	03
01	72,60	99,99	113,00
02	94,10	99,99	106,00
03	77,90	99,99	110,00
04	75,70	99,99	108,00
Média	80,07	99,99	109,00
Desvio Padrão	9,60	0	2,98

Fonte: Do autor.

Na Tabela 11, nota-se que os valores estão entre 80 e 109 HB, resultados similares ao obtido por Tash *et al.* (2007). A microestrutura composta pela fase  $\alpha$ -Al majoritária, justifica o baixo valor de dureza. No entanto, na condição solubilizada há um aumento na quantidade do eutético Al-Si, apresentando um aumento da dureza.

As Figuras 12 e 13, apresentam as micrografias da liga de alumínio A354, na condição de solubilizada a 526°C, caracterizadas por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, respectivamente.

Figura 12 – Micrografias da liga de alumínio A354 na condição solubilizada a 526°C, por MO

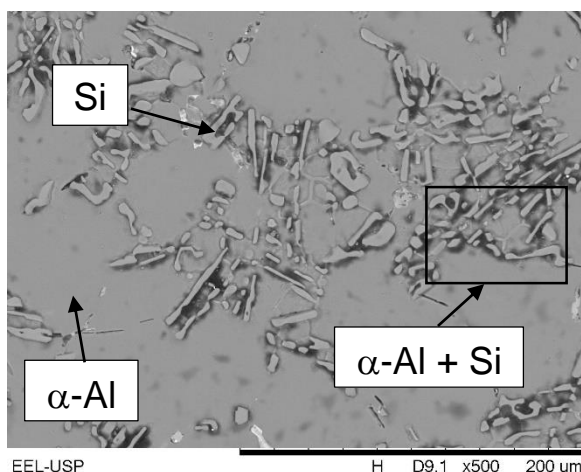


Fonte: Do autor.

Legenda: (a) e (c) Visão geral.

(b) e (d) Em detalhes.

Figura 13 – Micrografia da liga de alumínio A354 na condição solubilizada a 526°C, por MEV



Fonte: Do autor.

Nas micrografias da liga A354, na condição solubilizada a 526°C, apresentadas nas Figuras 12 e 13, observa-se o mesmo caminho de solidificação, precipitação primária da fase  $\alpha$ -Al com morfologia dendrítica, seguido da precipitação do Si na última região a se solidificar.

A Tabela 12 apresenta os resultados das microanálises semiquantitativas realizadas por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da liga de alumínio A354 na condição solubilizada a 526°C. O teor de 3,663 %-at. Al dissolvido na estrutura do Si pode estar associado ao efeito matriz, devido ao pequeno tamanho da fase analisada, tendo em vista que o Si não apresenta solução sólida com o alumínio.

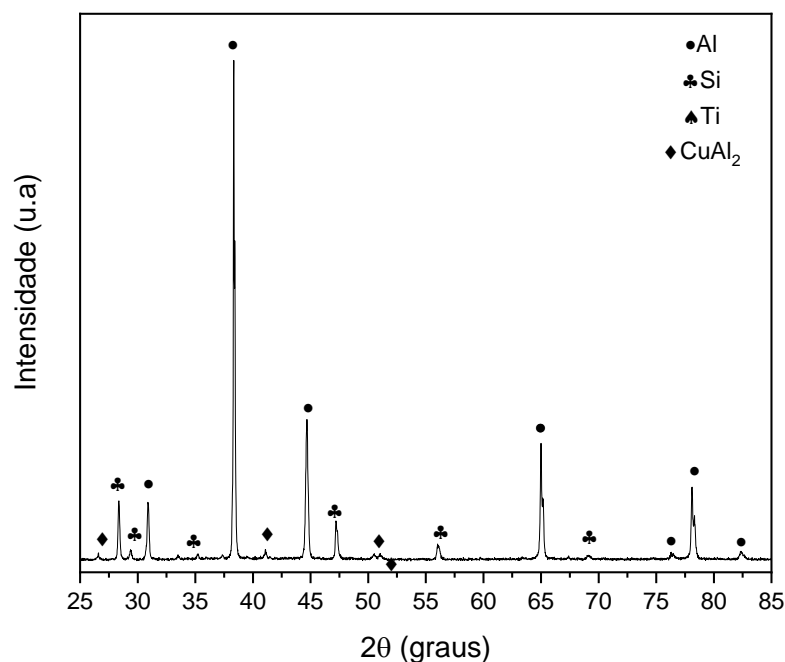
Tabela 12 – Teores de Al, Si, Cu e Mg (% atômica), das fases formadas na microestrutura da liga de alumínio A354 na condição solubilizada a 526°C, obtidos por EDS

Fases	Elementos (%-at)			
	Al	Si	Cu	Mg
$\alpha$ -Al	97,383	0,924	1,107	0,586
Si	3,663	96,337	-	-

Fonte: Do autor.

A Figura 14, apresenta o espectro de difração de raios X da liga A354 solubilizada a 526°C. Observa-se a presença das fases, Al, Si, Ti e  $Al_2Cu$ .

Figura 14 – Espectro de difração de raios X da liga A354 solubilizada a 526°C



Fonte: Do autor.

Os resultados obtidos nos ensaios de dureza Brinell, na liga de alumínio A354, na condição solubilizada a 526°C, estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores de dureza Brinell, da liga A354 solubilizada a 526° C

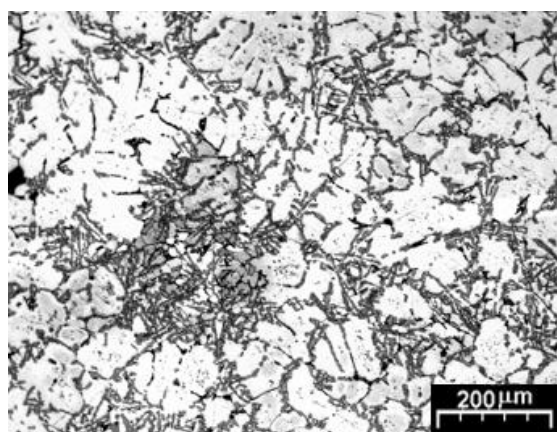
A354 Medição	Corpos de prova		
	01	02	03
01	90,00	106,00	92,70
02	95,50	105,00	99,90
03	101,00	98,40	98,40
04	88,70	105,00	96,90
Média	93,80	103,60	96,97
Desvio Padrão	5,63	3,49	3,10

Fonte: Do autor.

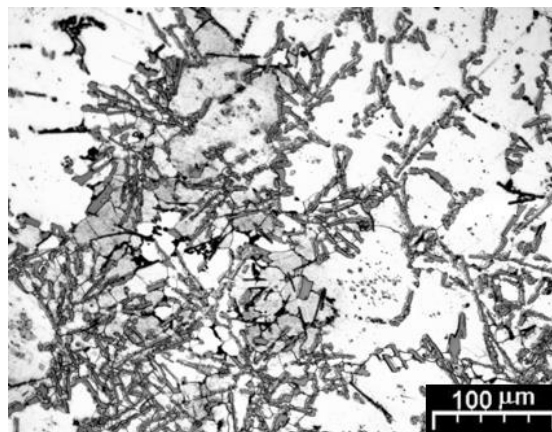
Os valores de dureza da liga A354 na condição solubilizada 526°C variou entre 94 a 104 HB. Observa-se que não houve variação significativa em relação a liga na condição bruta de fusão, devido as microestruturas em ambas as condições serem compostas pelas mesmas fases. A pequena variação na dureza pode estar associada a dissolução dos elementos de liga na estrutura do alumínio.

As Figuras 15 e 16 apresentam as micrografias da liga de alumínio A354, na condição de solubilizada a 526°C e envelhecida a 160°C por 10 h, caracterizadas por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, respectivamente.

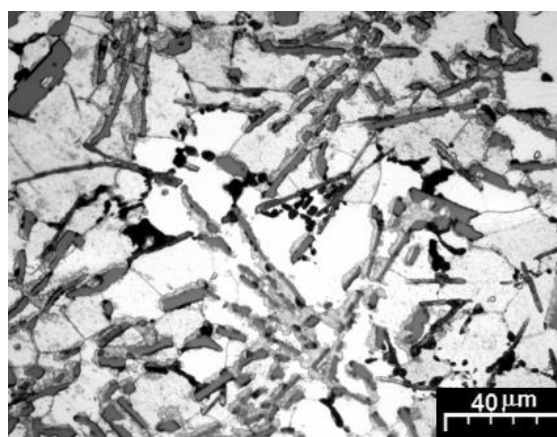
Figura 15 – Micrografias da liga de alumínio A354 na condição solubilizada a 526°C e envelhecida a 160°C durante 10 h, por MO



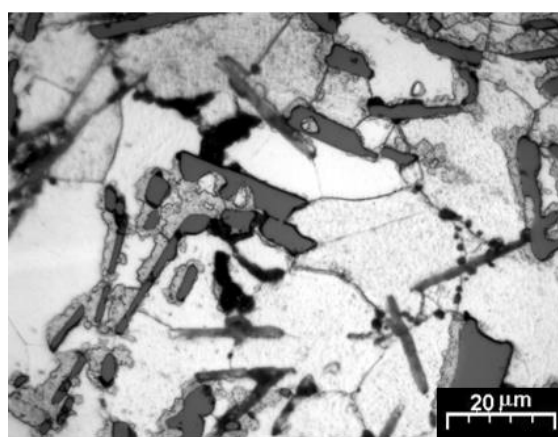
(a)



(b)



(c)



(d)

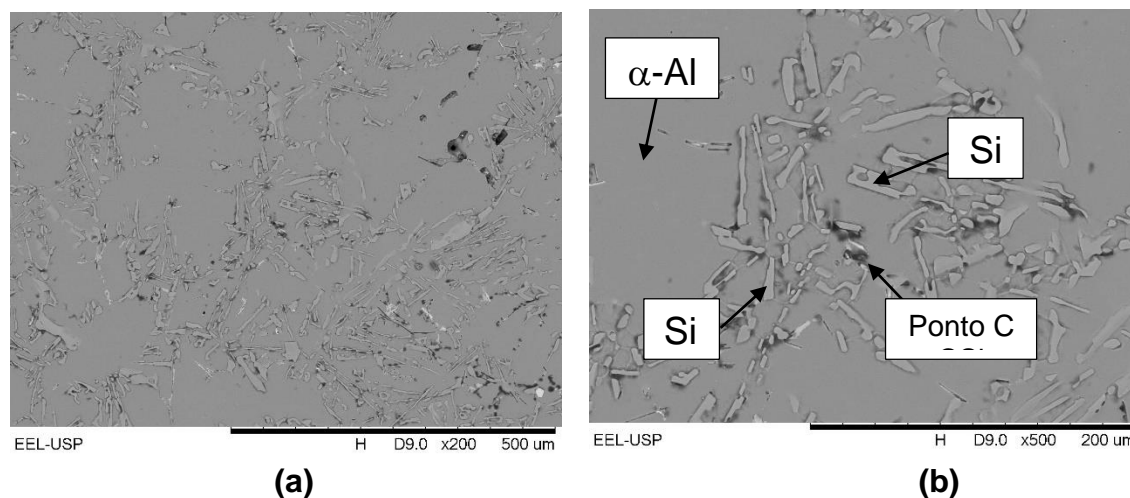
Fonte: Do autor.

Legenda: (a) e (b) Visão geral.

(c) Visão geral do eutético Al-Si.

(d) Em detalhes.

Figura 16 – Micrografias da liga de alumínio A354 na condição solubilizada a 526°C e envelhecida a 160°C durante 10 h, por MEV



Fonte: Do autor.

Legenda: (a) Visão geral.

(b) Em detalhes.

Observa-se, na microestrutura uma fase de coloração preta (ponto C), com morfologia acicular, entre a fase  $\alpha$ -Al e o Si. Também é possível observar um aumento no eutético binário Al-Si, quando comparada com as condições de bruta fusão e apenas solubilizada a 526°C, resultados similares aos obtidos por Malavazi (2013).

A Tabela 14 apresenta os resultados das microanálises semiquantitativas realizadas por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da liga de alumínio A354 na condição solubilizada 526°C e envelhecida a 160°C durante 10 h.

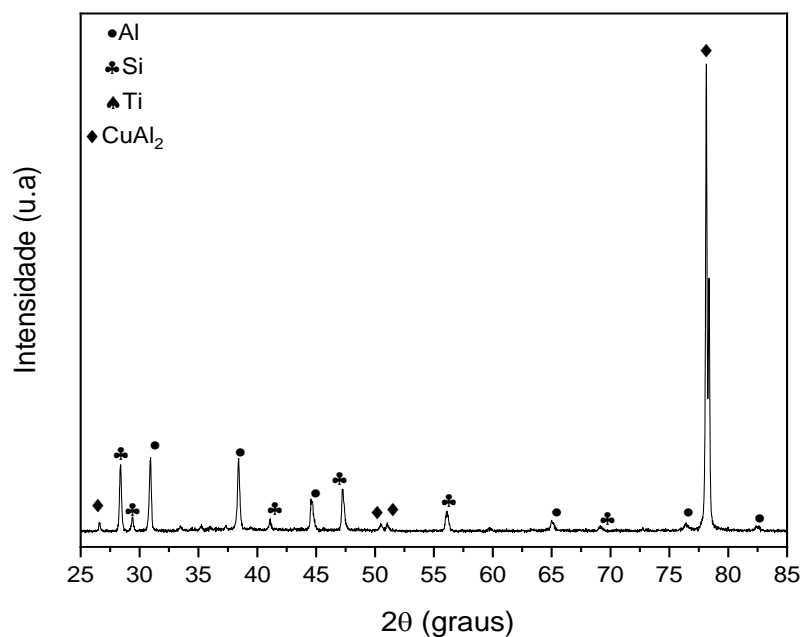
Tabela 14 – Teores de Al, Si, Cu e Mg (% atômica), das fases formadas na microestrutura da liga de alumínio A354 na condição solubilizada a 526°C durante e envelhecida a 160°C durante 10 h, obtidos por EDS

Fases	Elementos (%-at)			
	Al	Si	Cu	Mg
$\alpha$ -Al	96,991	1,228	1,296	0,486
Si	4,105	95,895	-	
Ponto C	35,426	28,094	12,337	24,142

Fonte: Do autor.

A Figura 17, apresenta o espectro de difração de raios X da liga A354 solubilizada a 526°C e envelhecida a 160°C, durante 10 h. Observa-se a presença do  $\alpha$ -Al, Si, Ti e a fase  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , diferente do observado nas micrografias da liga.

Figura 17 – Espectro de difração de raios X, da liga A354 solubilizada a 526°C e envelhecida a 160°C durante 10 h



Fonte: Do autor.

Os resultados obtidos nos ensaios de dureza Brinell, na liga de alumínio A354, na condição solubilizada a 526°C e envelhecida a 160°C por 10 h, estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores de dureza Brinell, da liga A354 solubilizada a 526° C e envelhecida a 160° C durante 10 h

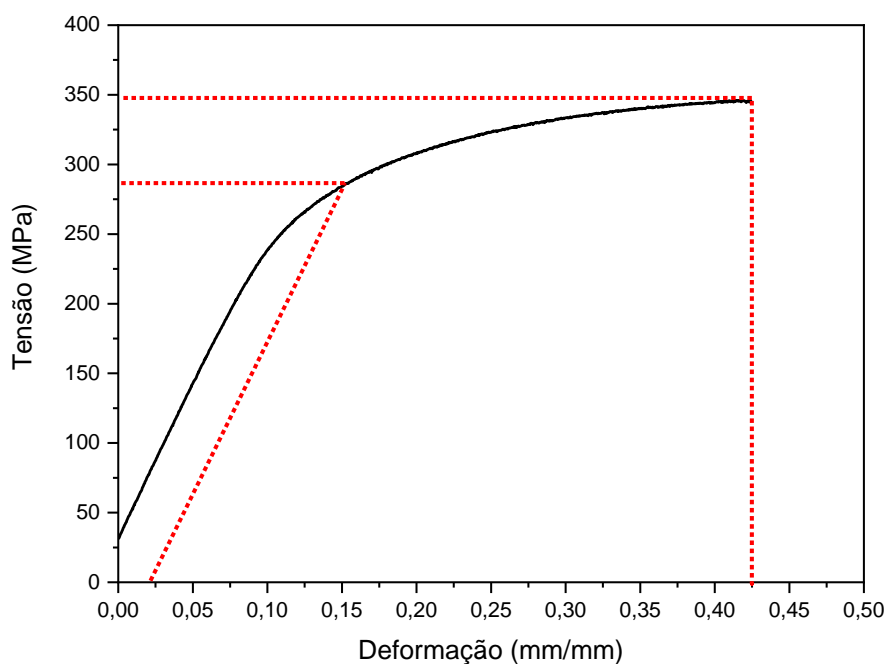
Liga A354 Medição	Corpos de prova		
	01	02	03
01	131,00	135,00	135,00
02	95,50	129,00	133,00
03	74,50	131,00	131,00
04	125,00	133,00	131,00
Média	106,50	132,00	132,50
Desvio Padrão	26,38	2,58	1,95

Fonte: Do autor.

Os valores de dureza da liga A354 na condição solubilizada a 526°C e envelhecida a 160°C por 10 h variou entre 107 a 133 HB. Nota-se um aumento significativo na dureza, devido a presença da fase Al<sub>2</sub>Cu, conforme observado no espectro de difração de raios X, o que corrobora com aumento da dureza da liga.

A curva tensão *versus* deformação típica da liga A354 solubilizada a 526°C e envelhecida a 160°C por 10 h, está mostrada na Figura 18, e as propriedades mecânicas de tração obtidas à temperatura ambiente estão apresentadas na Tabela 16. Os resultados obtidos mostram uma tensão de escoamento média de 282 MPa, limite de ruptura igual ao limite de resistência na faixa de 349 - 365 MPa e deformação de 0,44 mm/mm, resultados similares ao obtido por Couto *et al.* (2012), em amostras solubilizadas a 505° C, seguida de têmpera e envelhecida por 190° C durante 6 h.

Figura 18 – Curva tensão versus deformação obtida no ensaio de tração da liga A354 solubilizada a 526°C e envelhecida a 160°C por 10 h



Fonte: Do autor.

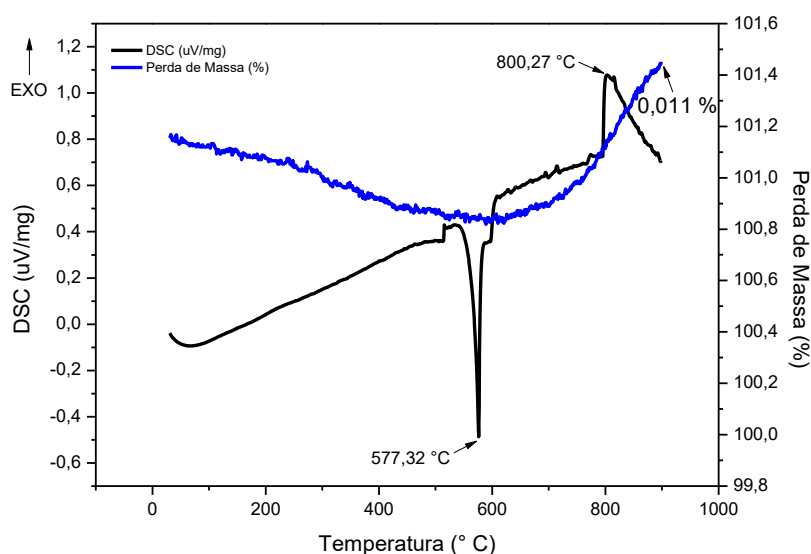
Tabela 16 – Propriedades mecânicas de tração da liga A354 solubilizada a 526°C e envelhecida a 160°C por 10 h

Corpos de prova	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência máxima (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Deformação (mm/mm)
01	273,00	365,00	365,00	0,45
02	274,00	360,00	360,00	0,46
03	283,00	349,00	349,00	0,42
04	300,00	362,50	362,50	0,42
Média	282,50	359,12	359,12	0,44
Desvio padrão	12,50	7,05	7,05	0,02

Fonte: Do autor.

As curvas de DSC e TG realizadas de 30°C até 900°C, da liga de alumínio A354 bruta de fusão, utilizando argônio como gás de arraste com taxa de aquecimento de 10°C/min estão mostradas na Figura 19. Observa-se a presença do pico endotérmico a 577,3°C relacionado a fusão do alumínio, associado a perda de massa entre 30°C e 577,32 °C. No entanto, a 800,27°C observa-se a formação de fase relacionada ao pico exotérmico, associado ao ganho de massa de 0,011%, corroborando com os resultados obtidos para a liga A356 nos estudos realizados por Peres *et al.* (2005).

Figura 19 – Curvas de DSC e TG realizada de 30°C até 900°C, da liga de alumínio A354 bruta de fusão, utilizando argônio como gás de arraste com taxa de aquecimento de 10°C/min

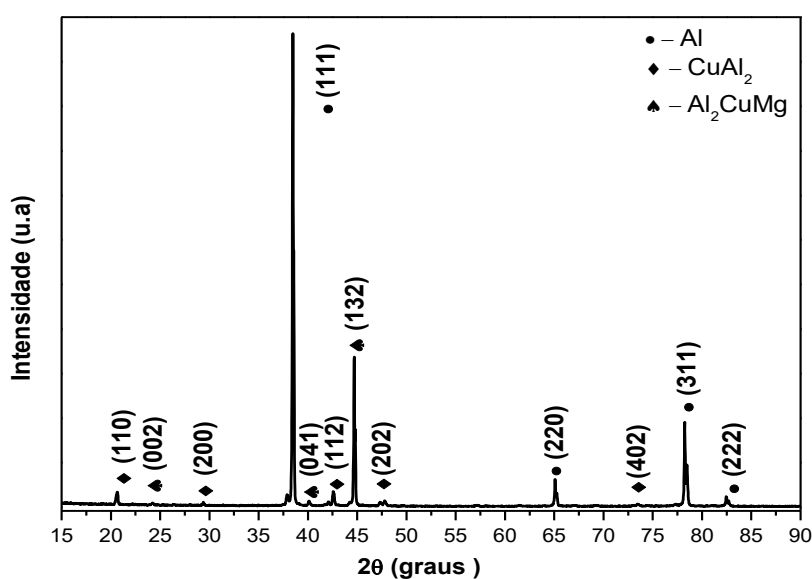


Fonte: Do autor.

A seguir serão apresentados os resultados referentes a liga 2024.

O espectro de difração de raios X da liga 2024 fundida, está apresentado na Figura 20. Nota-se a presença do alumínio (Al) e das fases intermetálicas  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , e  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ . Observa-se uma maior intensidade dos picos do alumínio (Al) e da fase intermetálica  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ , quando comparado a fase presente  $\text{Al}_2\text{Cu}$ . Há formação da fase intermetálica  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  é prejudicial as propriedades mecânicas reduzindo a dureza e a resistência mecânica.

Figura 20 – Espectro de difração de raios X, da liga de alumínio 2024 fundida



Fonte: Do autor.

Os resultados obtidos nos ensaios de dureza Brinell, na liga de alumínio 2024, na condição bruta de fusão, estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Valores de dureza Brinell, da liga 2024 como fundida

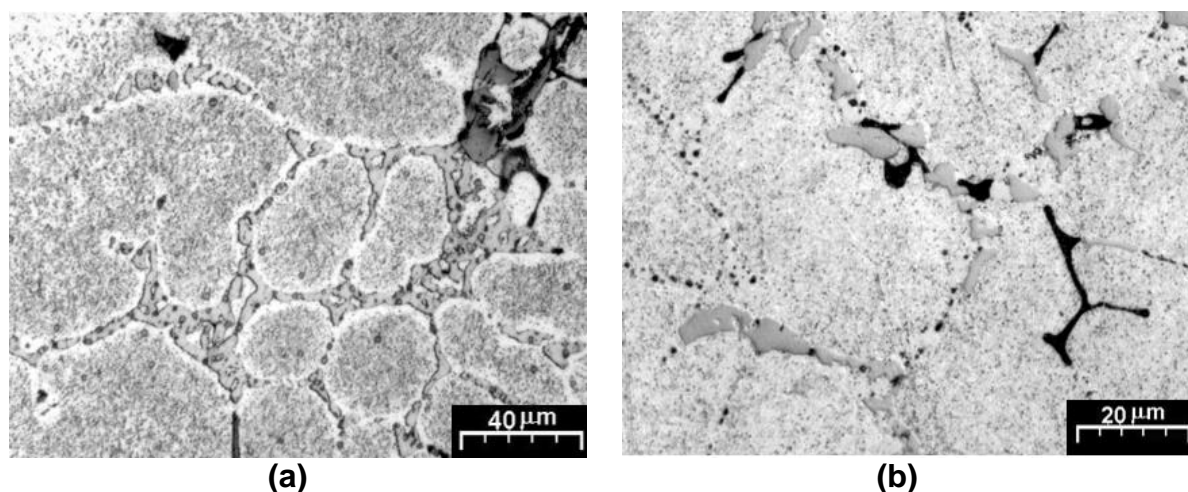
Liga 2024	Corpos de prova			
	Medição	01	02	03
01		103,00	106,00	101,00
02		101,00	96,90	101,00
03		99,90	106,00	96,90
04		98,40	101,00	96,9
Média		100,57	102,47	98,95
Desvio Padrão		1,42	3,525	2,05

Fonte: Do autor.

De acordo com a Tabela 17, os valores de dureza para a liga na condição bruta de fusão variaram entre 98 a 102 HB. A liga na condição bruta de fusão apresenta menor dureza quando comparada as condições de solubilização, conforme apresentado nas Tabelas 19, 21 e 24. O aumento nos valores de dureza está relacionado a precipitação de fases.

As Figuras 21 e 22, apresentam as micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 490°C por 1 h e envelhecida a 190°C por 1 h, obtidas por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, respectivamente.

Figura 21 – Micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 490°C por 1 h e envelhecida a 190°C por 1 h, obtidas por MO

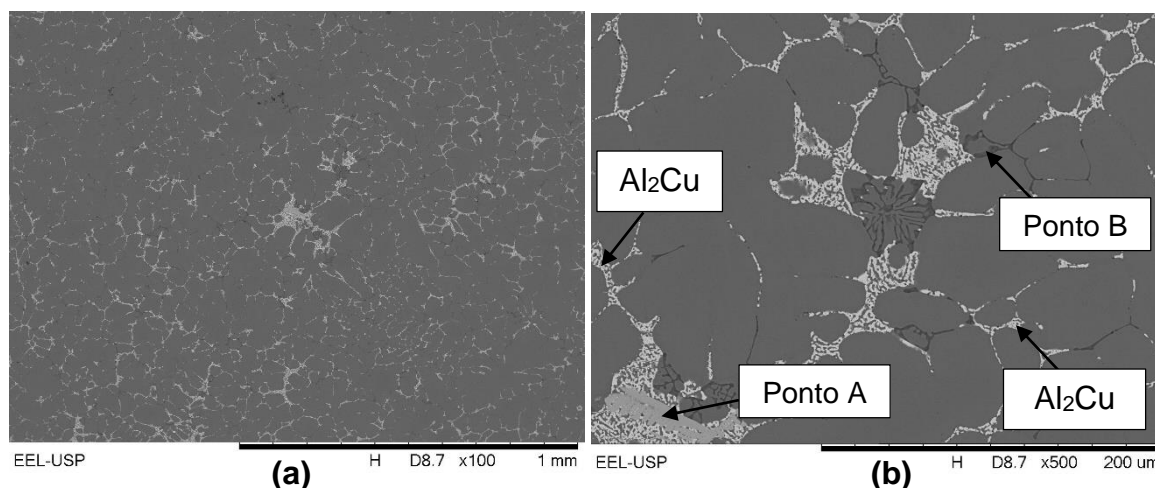


Fonte: Do autor.

Legenda: (a) Vista geral.

(b) Em detalhes.

Figura 22 – Micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 490°C por 1 h e envelhecida a 190°C por 1 h, obtidas por ME



Fonte: Do autor.

Legenda: (a) Vista geral.

(b) Em detalhes.

Nas micrografias da liga 2024 é possível observar uma microestrutura heterogênea relacionada ao tamanho dos grãos da fase  $\alpha$ -Al, em formato de glóbulos irregulares, a presença das fases  $\text{Al}_2\text{Cu}$  e  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  em pequena quantidade numa coloração mais escura, corroborando com os resultados obtidos por Li *et al.* (2003) e Morando (2018).

A Tabela 18 apresenta os resultados das microanálises semiquantitativas realizadas por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da liga de alumínio de alumínio 2024 na condição solubilizada a 490°C por 1 h e envelhecida a 190°C por 1 h. Observa-se que a fase  $\alpha$ -Al dissolve em torno de 1,731%-at. de Cu e 0,891% -at. de Mg em sua estrutura. De acordo com os diagramas de fases dos sistemas Al-Cu e Al-Mg, a fase  $\alpha$ -Al dissolve em torno de 5,7 %-at. de Cu a 548,2°C, e 14,9%-at. de Mg a 451°C.

Tabela 18 – Teores de Al, Si, Cu e Mg (% atômica) das fases formadas na microestrutura da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 490°C por 1 h e envelhecida a 190°C por 1 h, obtidos por EDS

Fases	Elementos (%-at)			
	Al	Si	Cu	Mg
$\alpha$ -Al	97,378	-	1,731	0,891
Ponto A	61,290	20,996	1,359	16,3556
Ponto B	86,299	7,734	1,891	4,076

Fonte: Do autor.

Os resultados obtidos nos ensaios de dureza Brinell, na liga de alumínio 2024, na condição solubilizada a 490°C por 1 h e envelhecidas a 190°C variando o tempo nas condições de 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h e 48 h, estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Valores de dureza Brinell da liga 2024 solubilizada 490°C / 1 h e envelhecida 190°C / 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h e 48 h

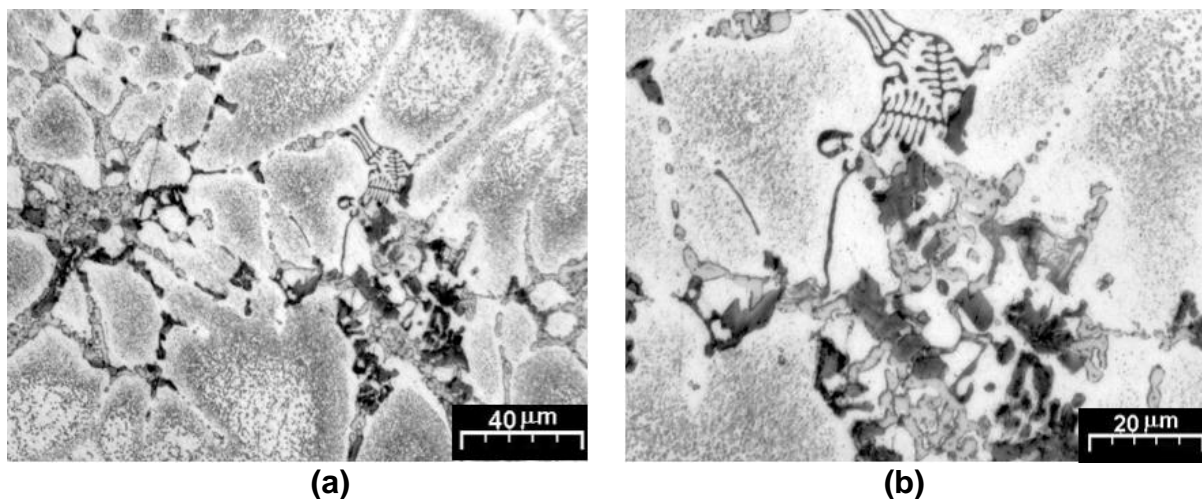
<b>Liga 2024</b>		<b>Corpos de Prova</b>							
Horas	01	02	03	04	05	06	07	Média	Des. Padrão
0	130,00	129,00	132,00	130,00	135,00	131,00	133,00	131,88	2,29
1	128,00	128,50	129,00	127,50	129,50	127,00	130,00	128,44	1,01
2	131,00	130,00	130,50	132,00	129,50	130,50	131,00	130,44	0,94
4	138,00	138,00	136,00	137,00	124,00	130,00	132,00	132,88	5,22
6	135,00	134,50	135,00	135,50	126,00	128,00	130,00	132,06	3,63
8	140,00	141,00	140,50	137,00	135,00	138,00	137,50	138,06	2,25
12	138,00	133,00	135,00	134,00	131,00	136,00	137,00	134,94	2,24
24	136,00	132,00	134,00	130,00	124,00	133,00	129,00	131,06	3,64
48	131,00	129,00	130,50	120,00	114,00	125,00	119,00	123,75	6,14

Fonte: Do autor.

Verifica-se que os valores de dureza não variam significativamente em relação as amostras somente solubilizadas (0 h) e solubilizadas e envelhecidas até 6 h. Para o tratamento de envelhecimento por 8 h, observa um pequeno aumento da dureza para 138 HB, relacionado com o aumento da quantidade da fase  $Al_2Cu$ . A partir de 12 h de envelhecimento, nota-se uma redução nos valores de dureza em relação a 8 h. O menor valor de dureza observado foi de 123,75 HB para o tempo de envelhecimento de 48 h, relacionado ao aumento das fases prejudiciais as propriedades.

As Figuras 23 e 24, apresentam as micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a  $500^\circ C$  por 1 h e envelhecida a  $200^\circ C$  por 1 h, caracterizadas por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, respectivamente.

Figura 23 – Micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a  $500^\circ C$  por 1 h e envelhecida a  $200^\circ C$ , obtidas por MO

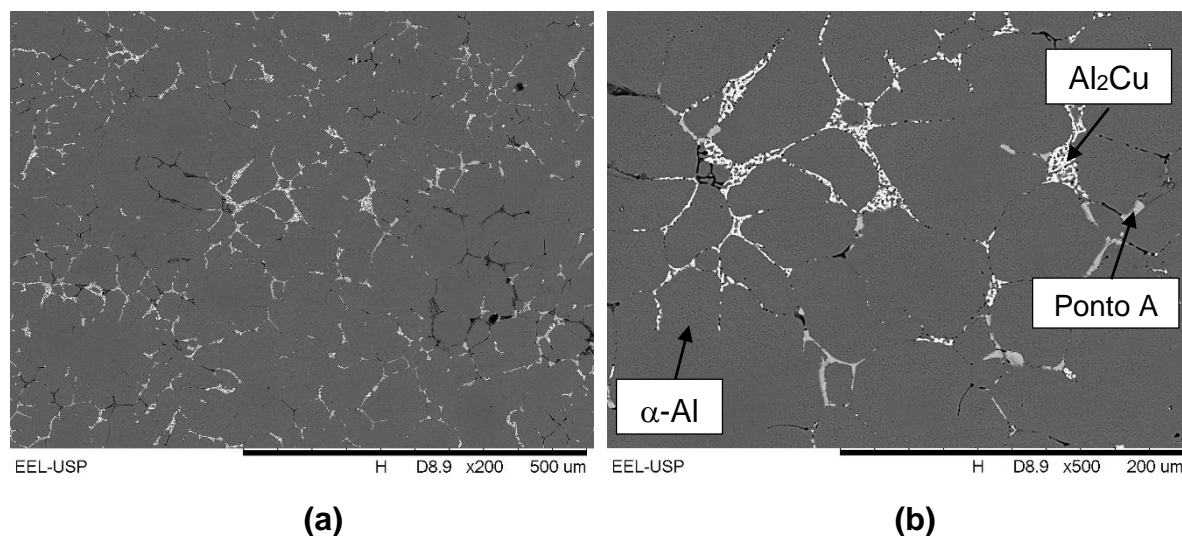


Fonte: Do autor.

Legenda: (a) Vista geral.

(b) Em detalhes a fase  $CuAl_2$ .

Figura 24 – Micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 500°C por 1 h e envelhecida a 200°C por 1h, obtidas por MEV



Fonte: Do autor.

Legenda: (a) Vista geral.

(b) Em detalhes.

Na liga 2024, na condição de solubilizada a 500°C por 1 h e envelhecida a 200°C por 1 h, observa-se uma micrografia semelhante a condição solubilizada a 490°C por 1 h e envelhecida a 190°C por 1 h, apresentando uma microestrutura heterogênea em relação ao tamanho das fases, entretanto na amostra solubilizada a 500°C por 1 h e envelhecida a 200°C por 1 h, obteve-se grãos maiores da fase  $\alpha$ -Al em formato de glóbulos irregulares, além da presença das fases,  $\text{Al}_2\text{Cu}$  em um formato acicular, e da fase  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  em pequena quantidade numa coloração mais escura. Os resultados obtidos corroboram aos obtidos por Li *et al.* (2003).

A Tabela 20 apresenta os resultados das microanálises semiquantitativas realizadas por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da liga de alumínio de alumínio 2024 na condição solubilizada a 500°C por 1 h e envelhecida a 200°C por 1h. Observa-se que a fase  $\alpha$ -Al dissolve 2,651%-at. Cu, o que corrobora com o diagrama de fases do sistema Al-Cu, em que o alumínio dissolve em torno de 5,7% -at. de Cu a 548,2°C. A fase  $\text{Al}_2\text{Cu}$  indica uma solubilidade em torno 1,243 %-at. de Cu na estrutura do alumínio.

Tabela 20 – Teores de Al, Si, Cu, Fe e Mg (% atômica) das fases formadas na microestrutura da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 500°C por 1 h e envelhecida a 200°C por 1 h, obtidos por EDS

Fases	Elementos (%-at)				
	Al	Si	Cu	Fe	Mg
$\alpha$ -Al	94,189	1,311	2,651	0,038	0,458
Al <sub>2</sub> Cu	63,344	1,243	32,775	-	2,638

Fonte: Do autor.

Os resultados obtidos nos ensaios de dureza Brinell, na liga de alumínio 2024, na condição solubilizada a 500°C por 1 h e envelhecida a 200°C, variando o tempo nas condições de 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h e 48 h, estão apresentados na Tabela 21. As amostras solubilizadas a 500°C por 1 h e envelhecidas a 200°C nas condições de 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h e 48 h, apresentaram valores médios de dureza menores do que na condição somente solubilizada a 500°C (0 h) com valor igual a 133,10 HB.

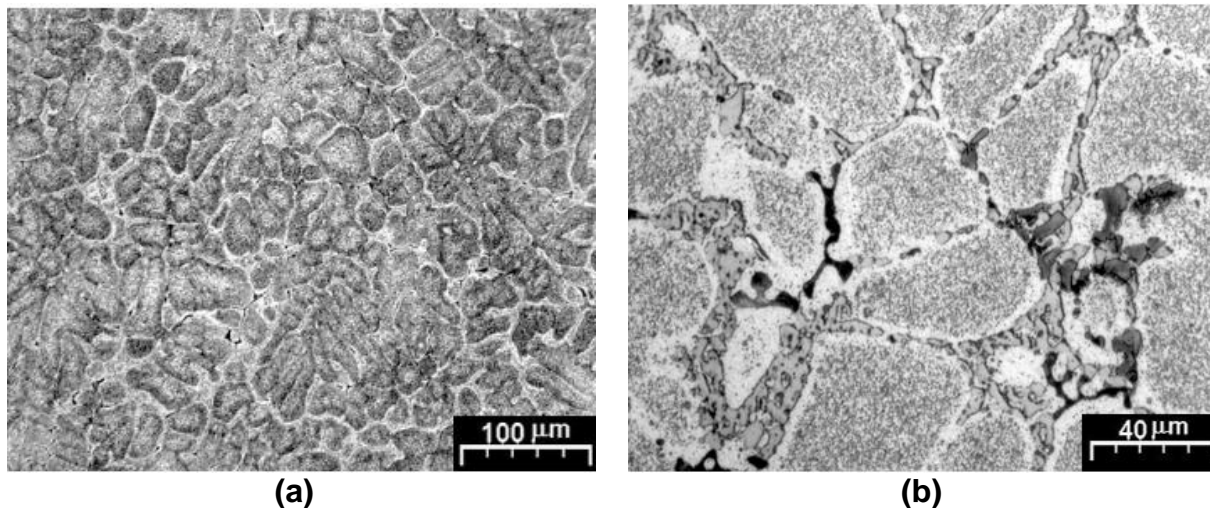
Tabela 21 – Valores de dureza Brinell, da liga 2024 solubilizada a 500°C / 1 h e envelhecida 200°C / 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h e 48 h

Liga 2024	Corpos de Prova								Des. Padrão
	Horas	01	02	03	04	05	06	07	
0	135,00	132,50	133,00	135,00	131,00	135,00	132,00	133,06	1,74
1	128,00	120,00	125,00	125,50	118,00	119,50	123,00	123,00	3,49
2	135,00	130,00	125,50	133,00	124,00	127,00	129,00	129,19	3,68
4	128,00	128,50	129,00	126,00	128,00	127,50	126,00	127,81	1,28
6	121,00	120,00	122,00	121,50	121,00	120,50	121,00	121,06	0,62
8	121,00	121,50	122,00	119,00	121,00	120,50	122,00	120,88	1,02
12	110,00	110,50	110,00	111,00	112,00	112,00	110,00	111,00	1,03
24	115,00	115,50	113,00	116,00	115,00	116,50	115,00	114,75	1,51
48	104,00	104,50	103,00	105,00	107,00	105,00	107,00	105,19	1,41

Fonte: Do autor.

As Figuras 25 e 26, apresentam as micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 510°C por 1 h, caracterizadas por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, respectivamente.

Figura 25 – Micrografia das ligas de alumínio 2024 na condição solubilizada a 510°C por 1 h, obtida por MO

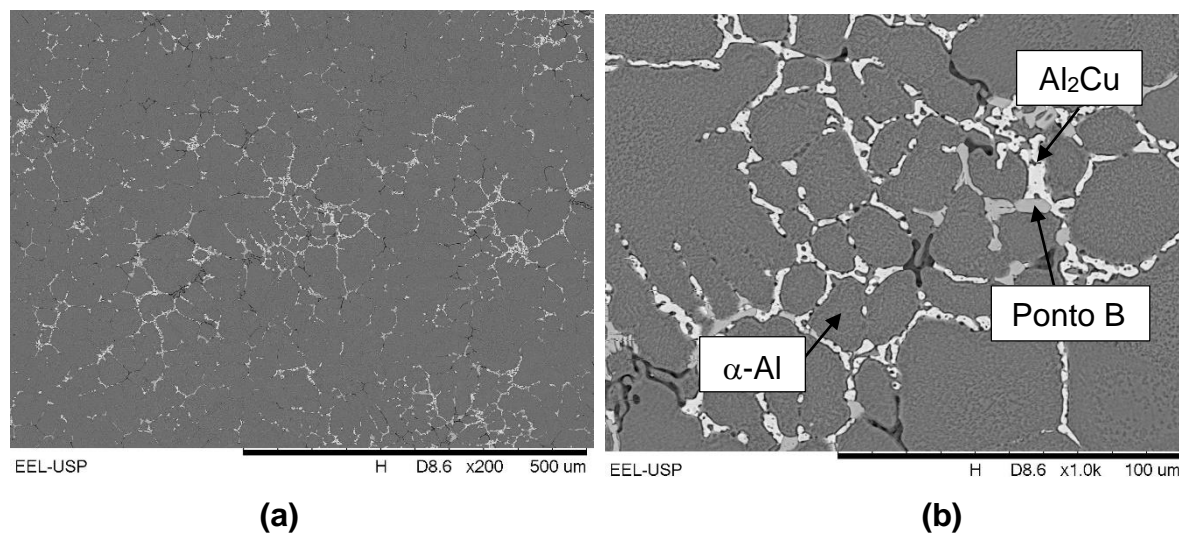


Fonte: Do autor.

Legenda: (a) Vista geral.

(b) Em detalhes.

Figura 26 – Micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 510°C por 1 h, obtidas por MEV



Fonte: Do autor.

Legenda: (a) Vista geral.

(b) Em detalhes.

As micrografias (Figuras 25 e 26) apresentam as mesmas fases das condições anteriores, porém observa uma maior quantidade da fase  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , devido aumento de temperatura de solubilização, onde há maior precipitação dessa fase em temperaturas próximas a  $510^\circ\text{C}$ .

A Tabela 22 apresenta os resultados das microanálises realizadas por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da liga de alumínio de alumínio 2024 na condição solubilizada a  $510^\circ\text{C}$  por 1 h. Nessa condição, a fase  $\text{Al}_2\text{Cu}$  não apresenta solubilidade de Si e Mg.

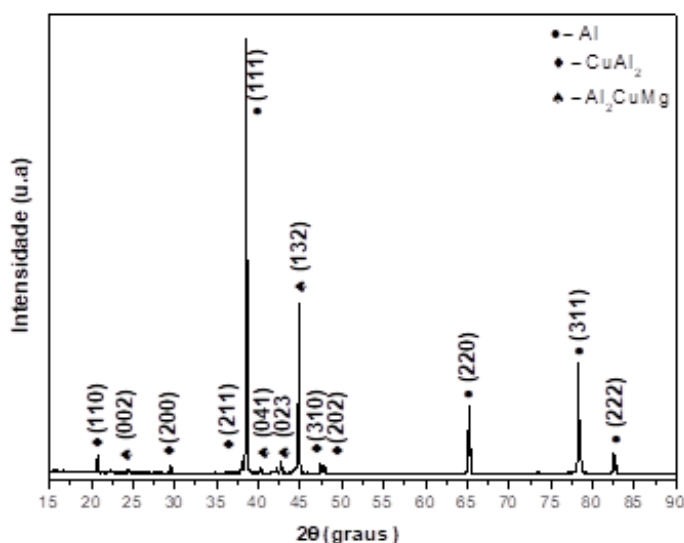
Tabela 22 – Teores de Al, Si, Cu, Fe e Mg (% atômica) das fases formadas na microestrutura da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a  $510^\circ\text{C}$  por 1 h, obtidos por EDS

Fase	Elementos (%-at)				
	Al	Si	Cu	Fe	Mg
Al	96,740	0,307	2,029	0,033	0,892
$\text{Al}_2\text{Cu}$	65,494	-	34,506	-	-

Fonte: Do autor.

A Figura 27, apresenta o espectro de difração de raios X da liga 2024 solubilizada a  $510^\circ\text{C}$ , durante 1 h. Nota-se um aumento na intensidade do pico do Al e a presença das fases intermetálicas  $\text{CuAl}_2$  e  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  que são prejudiciais a resistência mecânica e reduzem a dureza. Observa-se uma maior intensidade nos picos da fase  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  quando comparado com os picos da fase  $\text{CuAl}_2$ , corroborando com os resultados obtidos por Ferrarini (2016) e Yanlei *et al.* (2012).

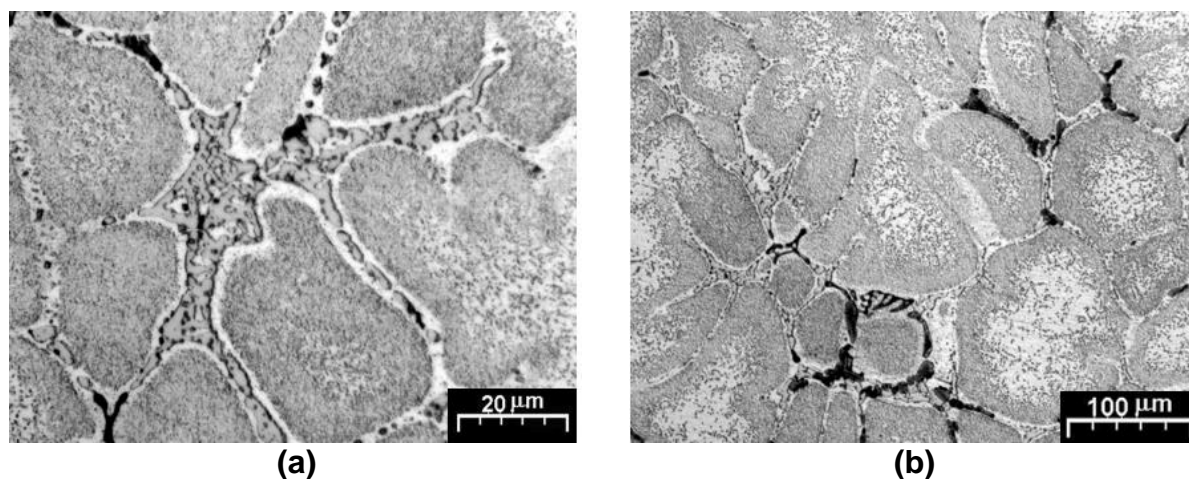
Figura 27 – Espectro de difração de raios X, da liga de alumínio 2024 solubilizada a  $510^\circ\text{C}$  por 1 h



Fonte: Do autor.

As Figuras 28 e 29, apresentam as micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 510°C por 1 h e envelhecida a 210°C por 1 h, caracterizadas por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, respectivamente. As micrografias apresentaram um aumento da fase  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , devido ao aumento da temperatura de envelhecimento.

Figura 28 – Micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 510°C por 1 h e envelhecida a 210°C por 1 h, obtida por MO

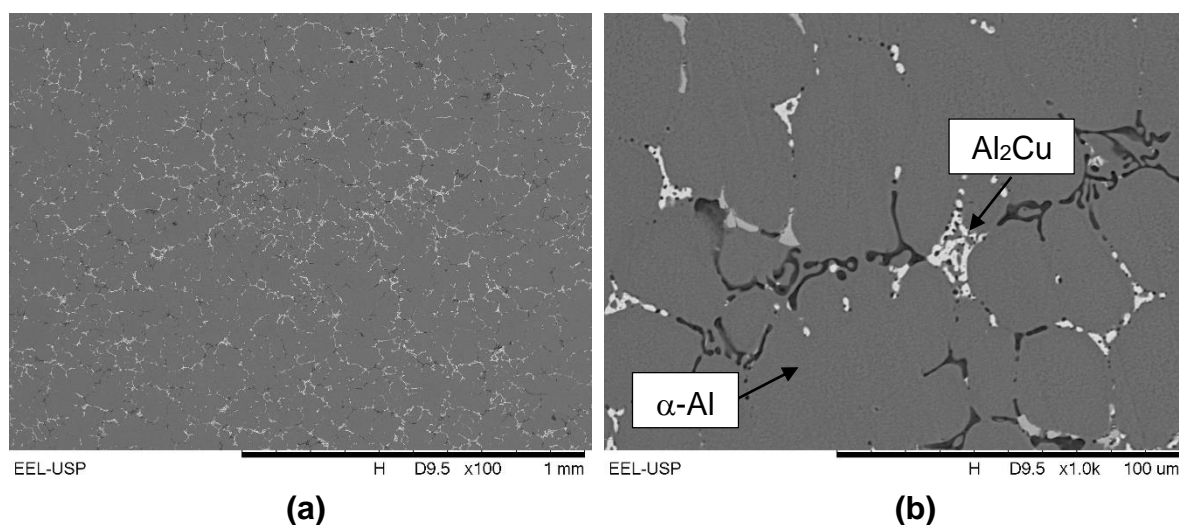


Fonte: Do autor.

Legenda: (a) Em detalhes.

(b) Em detalhes com a fase.

Figura 29 – Micrografias da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 510°C por 1 h e envelhecida a 210°C por 1 h, obtida por MEV



Fonte: Do autor.

Legenda: (a) Vista geral.

(b) Em detalhes.

A Tabela 23 apresenta os resultados das microanálises realizadas por espectroscopia por energia dispersiva (EDS) da liga de alumínio de alumínio 2024 na condição solubilizada a 510°C por 1 h e envelhecida a 210°C por 1 h. Novamente, a fase  $\text{Al}_2\text{Cu}$  não apresenta solubilidade de Si e Mg.

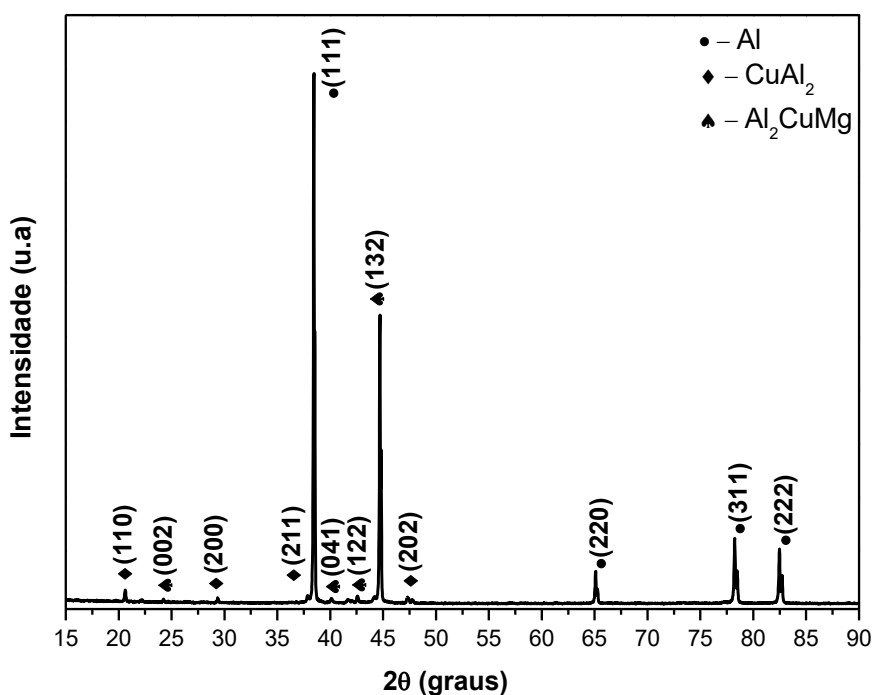
Tabela 23 – Teores de Al, Si, Cu, Fe e Mg (% atômica) das fases formadas na microestrutura da liga de alumínio 2024 na condição solubilizada a 510°C por 1 h e envelhecida a 210°C por 1 h, obtidos por EDS

Fase	Elementos (%-at)				
	Al	Si	Cu	Fe	Mg
Al	96,717	-	1,734	-	1,549
$\text{Al}_2\text{Cu}$	67,755	-	32,245	-	-

Fonte: Do autor

A Figura 30, apresenta o espectro de difração de raios X da liga de alumínio 2024 solubilizada a 510° C por 1 h e envelhecida a 210° C por 1 h. Observa-se a presença das fases,  $\text{Al}_2\text{Cu}$  e  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ , não houve variação na intensidade dos picos e o resultado obtido foi semelhante ao da condição apenas solubilizada a 510°C, durante 1 h.

Figura 30 – Espectro de difração de raios X, da liga de alumínio 2024 solubilizada a 510° C por 1 h e envelhecida a 210° C por 1 h



Fonte: Do autor.

Os resultados obtidos nos ensaios de dureza Brinell, na liga de alumínio 2024, na condição solubilizada a 510°C por 1 h e envelhecida a 210°C, variando o tempo nas condições de 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h e 48 h, estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Valores de dureza Brinell, da liga 2024 solubilizada 510°C / 1 h e envelhecida 210°C / 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h e 48 h

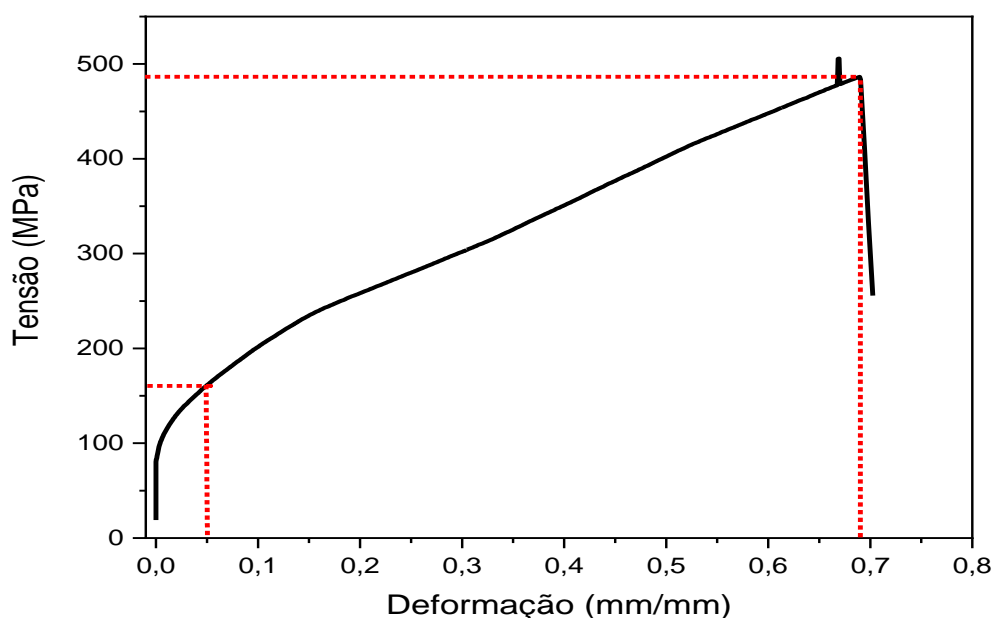
<b>Liga 2024</b>		<b>Corpos de Prova</b>							
Horas	01	02	03	04	05	06	07	Média	Des. Padrão
0	135,00	132,00	133,50	130,00	131,00	136,00	136,50	133,50	2,34
1	155,00	156,00	157,00	154,50	150,00	149,00	150,50	152,75	3,18
2	142,00	142,50	141,00	136,00	135,00	134,00	135,50	138,5	3,67
4	142,00	145,00	141,00	139,00	135,00	142,00	130,00	138,38	5,18
6	131,00	131,50	129,50	122,00	121,00	125,00	126,50	126,69	3,90
8	135,00	137,00	134,50	135,00	135,00	136,50	137,00	135,38	1,38
12	121,00	122,00	118,00	117,00	121,00	119,00	121,00	120,00	1,77
24	124,00	122,00	120,00	125,00	121,00	121,50	122,00	122,31	1,62
48	112,00	115,00	112,50	113,00	121,00	119,00	123,00	116,94	4,31

Fonte: Do autor.

Na Tabela 24, a liga solubilizada a 510° C por 1 h apresenta valor médio de 133 HB, valor igual ao observado na condição solubilizada a 500° C por 1h. A liga 2024 solubilizada a 510° C por 1 h e envelhecida por 1 h apresenta o maior valor médio de dureza de 152,75 HB. Os valores médios de dureza foram diminuindo com o tempo de tratamento de envelhecimento, a partir de 2 h. A liga envelhecida por 48 h apresenta o menor valor de dureza de 116,94 HB.

A curva tensão *versus* deformação obtida no ensaio de tração para a liga 2024 solubilizada a 510°C por 1 h e envelhecida a 210°C por 1 h, está mostrada na Figura 31, e as propriedades mecânicas de tração da liga mostradas na Tabela 25. A liga apresenta uma tensão de ruptura de 468,5 MPa e deformação de 0,675 mm/mm. A liga 2024, possui o elemento Cu em sua composição, que através do tratamento térmico de envelhecimento é responsável pelo endurecimento da liga. Resultados semelhantes foram obtidos por Cavalcante (2016), em que a liga 2024 envelhecida por 3 h apresenta alta ductilidade e resistência mecânica.

Figura 31 – Curva tensão versus deformação obtida do ensaio de tração da liga 2024 solubilizada a 510°C por 1 h e envelhecida a 210°C por 1 h



Fonte: Do autor.

Tabela 25 – Propriedades mecânicas de tração da liga 2024 solubilizada a 510°C por 1 h e envelhecida a 210°C por 1h

<b>Corpos de prova</b>	<b>Limite de escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de resistência máxima (MPa)</b>	<b>Tensão de ruptura (MPa)</b>	<b>Deformação (mm/mm)</b>
01	222,14	465,00	465,00	0,65
02	220,00	462,00	462,00	0,66
03	221,00	461,00	461,00	0,67
04	256,00	468,50	468,50	0,67
05	221,56	462,00	462,00	0,65
Média	228,14	463,70	463,70	0,65
Desvio padrão	15,59	3,07	3,07	0,08

Fonte: Do autor.

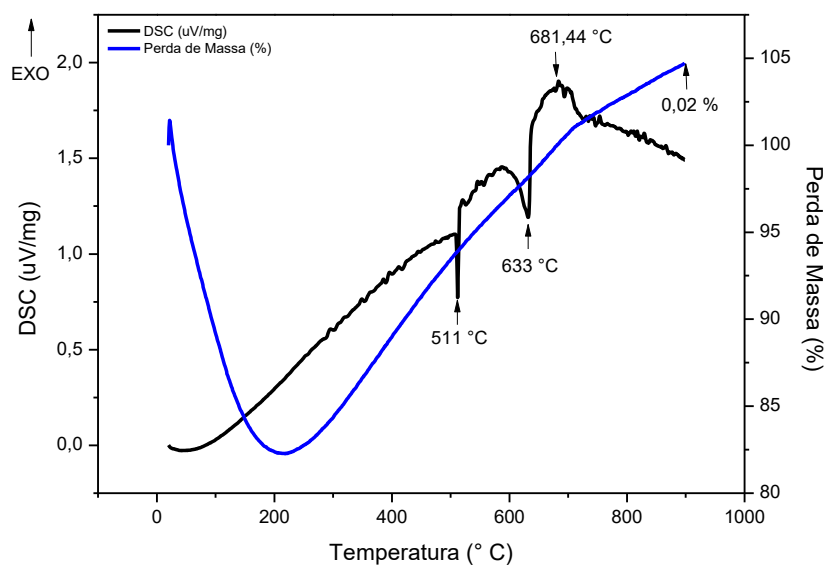
É possível notar que possui limite elástico em 283 MPa, maior comparado a liga 2024 que obteve 256 MPa. Entretanto, a fratura oriunda da deformação plástica é similar em ambas as ligas com valor de aproximadamente 468 MPa. E a liga 2024 possui maior alongamento comparado a liga A354. Há formação da fase AlCuSi, possui o efeito de ampliar o volume de micro porosidades uma vez que interrompem o fluxo dos líquidos eutéticos para o interior destes vazios e, conseqüentemente, ocorre uma redução das propriedades mecânicas da liga segundo Moustafa (2009).

As curvas de DSC e TG da liga 2024 fundida, na qual utilizou-se o argônio como gás de arraste, na curva do ensaio de termogravimetria (TG) é possível compreender o comportamento da liga 2024 em relação a sua resistência a oxidação, conforme Figura 32.

Posteriormente há um ganho de massa devido a oxidação pela camada de óxido formada. Nos picos exotérmicos na faixa de temperatura entre 511°C e 633°C ocorreu a dissolução de precipitados e em 681,44°C aconteceu a fusão do alumínio com um pico endotérmico, ao final da análise observou-se um ganho de massa de 0,02%, corroborando com os resultados obtidos por Abreu (2016).

A liga A354 apresentou perda de massa menor, e temperatura de fusão inferior à da liga 2024. No fenômeno da liga A354 o pico endotérmico é mais intenso comparado a liga 2024 devido a composição das ligas serem diferentes.

Figura 32 – Curvas de DSC e TG realizada de 30°C até 900°C da liga de alumínio 2024 fundida, utilizando argônio como gás de arraste com taxa de aquecimento de 10°C/min



Fonte: Do autor.

## 5 CONCLUSÕES

- A liga 2024 fundida à vácuo foi produzida com tecnologia nacional;
- Para a liga A354, os tratamentos térmicos de solubilização a 526°C e envelhecimento a 160°C por 10 h, não permitiram o aumento no limite de resistência à tração da liga;
  - A liga 2024 apresentou maior dureza, nos tratamentos térmicos de solubilização a 510°C por 1 h, quando comparado com as condições de tratamento de solubilização à 490°C / 1h e 500°C / 1 h;
  - A liga 2024 solubilizada a 510° C/1 h e envelhecida a 210°C/1 h, apresentou maior limite de resistência (468 MPa) do que para a liga A354 (359 MPa) solubilizadas a 526° C/ 10 h e envelhecidas a 160° C/10 h;
  - A liga 2024 solubilizadas a 510°C/1 h e envelhecidas a 210°C/1 h, apresentou menor limite de escoamento (256 MPa) do que para a liga A354 (282 MPa) solubilizadas a 526°C/ 10 h e envelhecidas a 160°C/10 h;
  - A liga 2024 apresentou maior deformação do que a liga A354;
  - A liga 2024 apresenta potencial para substituir a liga A354 atualmente aplicada para a produção de rotores para turbo compressor, principalmente para veículos de perímetro urbano onde as solicitações são recorrentes em um curto prazo de tempo.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento de futuros trabalhos, destaca-se as seguintes possibilidades, sendo:

- Realizar microscopia eletrônica de transmissão;
- Estudar o efeito da adição do zircônio na liga de alumínio A354, no limite de escoamento;
- Analisar o custo de produção da liga 2024 obtida por fundição à vácuo e tratada termicamente;
- Realizar ensaio de fadiga nas ligas de alumínio A354 e 2024;
- Realizar teste de sollicitação mecânica em rotores produzidos a partir da liga 2024, solubilizada a 510°C/1h e envelhecidas a 210°C/1h;
- Estudar o processamento da liga 2024 obtida por fundição à vácuo;
- Avaliar o efeito dos tratamentos de solubilização e envelhecimento na liga 2024 processada;
- Estudo da viabilidade da substituição da liga A354 pela liga 2024.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 209**. Alumínio e suas ligas – Composição química. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia técnico do alumínio**: características físico- químicas. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio, 2011.

ABREU, Caio Palumbro. **Caracterização da reatividade das ligas alumínio AA2024- T3 e AA7475- T651 soldadas por fricção (FSW)**. 2016. Tese (Doutorado em Ciência na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

ALONSO, A. *et al.* Evaluation of the wettability of liquid aluminum with ceramic particulates (SiC, TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) by means of pressure infiltration. **MTA**, v. 24, p. 1423–1432, 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- ASTM. **ASTM E8/E8M-09**: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. Pensilvânia: ASTM, s. a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- ASTM. **ASTM E10-15**: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. Pensilvânia: ASTM, s. a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- ASTM. **ASTM E112-12**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. Pensilvânia: ASTM, s. a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- ASTM. **ASTM E415-15**: Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry. Pensilvânia: ASTM, s. a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- ASTM. **ASTM E 466**: Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. Pensilvânia: ASTM, s. a.

AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. **Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials**. United States of America: ASM International, 1990.

AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. **Heat treating**. United States of America: ASM International, 1991.

AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. **Metallography and microstructures**. United States of America: ASM International, 1992.

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. 2 ed. Toronto: Thomson, 2015.

BEVILAQUA, William Lemos. **Caracterização microestrutural e mecânica da liga 354.0 com adições de cério e zircônio**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2016.

BROE, M. E.; COBURN, J. W. **Aluminum and renal failure**. London: Kluwer Academic Publishers, 1990.

CAVALCANTE, F. F.; SILVA, W. S. Comportamento mecânico da liga de alumínio 2024 submetida a diferentes tempos de envelhecimento. **Rev. Holos**, Natal, v. 8, p. 86-100, dez. 2016.

CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. São Paulo: Tec Art Editora LTDA, 2008.

COUTO, Antônio Augusto *et al.* Estudo das propriedades mecânicas em fadiga da liga de alumínio 2024 envelhecida artificialmente para aplicações aeronáuticas. *In: EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL DO ALUMÍNIO*, 7, 2012, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio, 2012. p. 1-14.

ENGELS, Bertold. Lifetime prediction for turbocharger compressor wheels - why use titanium? *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TURBOCHARGERS AND TURBOCHARGING*, 7, 2002, St. Edmunds. **Anais [...]**. St. Edmunds: Institute of Mechanical Engineers (IMEchE), 2002, p. 297- 309.

FERRARINI, Cleyton Fernandes. **Microestrutura e propriedades mecânicas de ligas Al-Si hipoeutéticas conformadas por spray**. 2016. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2016.

FERREIRA, M. G. S.; FERNANDES, J. C. S. Corrosão atmosférica do alumínio. **Corrosão atmosférica - mapas de Portugal**, Lisboa, p. 87-98, 1997.

FISHER, D.J.; KURZ, W. A theory of branching limited growth of irregular eutectics. **Acta Metallurgica**, v. 28, n. 6, p.777- 794, jun.1980.

HATCH, J. E. **Aluminum properties and physical metallurgy**. United States of America: ASM International, 1984.

HUDA, Z.; TAIB, N. I.; ZAHARINIE, T. Characterization of 2024-T3: An aerospace aluminum alloy. **Materials Chemistry and Physics**, v. 113, n. 2 -3, p.515-517, fev. 2009.

JCPDS. Powder Diffraction File Inorganics Phases: alphabetical index, inorganics phases. Swathmore, Pennsylvania: **Joint Committee on Powder Diffraction Standards/International Centre for Diffraction Data**, 1988.

KAUFMAN, J. G.; ROOY, E. L. **Aluminum alloy castings - properties, processes and applications**. United States of America: ASM International, 2004.

KRAUS, W.; NOLZE, G. PowderCell for Windows (version 2.3): Berlin: **Federal Institute for Materials Research and Testing**, 1999.

LI, Z. *et al.* Effect of alloying elements on the segregation and dissolution of CuAl<sub>2</sub> phase in Al-Si-Cu 319 alloys. **Journal of Materials Science**, v. 38, p.1203-1218, 2003.

MALAFAIA, Artur Mariano de Sousa. **Avaliação das propriedades mecânicas de tração e fadiga, com monitoramento de trincas, de juntas de A1 AA2024-T3 soldadas a ponto por fricção- mistura**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2009.

MALAVAZI, Jefferson. **Caracterização microestrutural dos compostos intermetálicos e seu efeito no comportamento mecânico nas ligas de Al-9%Si com adições de Fe e Mn**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2013.

MATUCHA, K. H. **Materials science and technology. A comprehensive treatment**. 8 ed. Alemanha: VCH, 1996.

MORANDO, C.; FORNARO, O. Morfologia e formação de fases durante a solidificação de sistemas eutéticos ternários Al-Cu-Si e Al-Ag-Cu. **Esteira. Res.**, São Carlos, v. 21, n. 2, 2018.

MOUSTAFA, M.A, "Effect of iron content on the formation of  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi and porosity in Al-Si eutectic alloys". **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 1, p. 605-610, jan. 2009.

ORTIZ, J. L. R. El Eurocódigo 9 "Proyecto de estructuras de aluminio". **Informes de la construcción**, v. 51, n. 461, p. 31- 37, jun. 1999.

PERES, M.M. *et al.* Caraterização da liga de alumino A356 solidificada rapidamente por centrifugação e fundida em areia. **Projeções**, v.23, p.55-62, jan./dez.2005.

POLMEAR, I. J. **Light Alloys: metallurgy of the light metals**. 3. ed. Londres: Arnold, 1995.

POLMEAR, I. J. **Light Alloys: from traditional alloys to nanocrystals**. 4. ed. Amsterdã: Elsevier, 2005.

ROSATO JÚNIOR, Abel. **Estrutura integral por soldagem por atrito Friction Stir Welding -FSW: requisitos básicos para o projeto estrutural**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutico, São José dos Campos, SP, 2003.

SCHLESINGER, M. E. **Aluminun recycling**. London: CRC Press, 2006.

SJÖLANDER, E.; SEIFEDDINE, S. The heat treatment of Al-Si-Cu-Mg casting alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 10, p. 1249- 1259, jul. 2010.

TASH, M. *et al.* Effect of metallurgical parameters on the hardness and microstructural characterization of as-cast and heat-treated 356 and 319 aluminum alloys. **Materials Science and Engineering A**, v. 443, n. 1-2, p. 185–201, jan. 2007.

THE ALUMINUM ASSOCIATION. **Alluminum Alloys 101**. 2020. Disponível em: <https://www.aluminum.org/resources/industry-standards/aluminum-alloys-101>. Acesso em: 10 fev. 2020.

VAN HORN, K. R. **Aluminum: Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams**. Ohio: ASM International, 1967.

VILLARS, P.; CENZUAL, K. **Pearson's Crystal Data: Crystal Structure Database for Inorganic Compounds**. Ohio: ASM International, 2007.

WARMUZEK, M. **Aluminum- silicon casting alloys**. United States of America: ASM International, 2004.

YANLEI, L. *et al.* Microstructure characteristics and solidification behavior of wrought aluminum alloy 2024 rheo-diecast with self-inoculation method. **China Foundry**, v. 9, n. 4, p. 328–336, 2012.

ZAHARESCU, M. M. *et al.* SiO<sub>2</sub> based hybrid inorganic–organic films doped with TiO<sub>2</sub>\_CeO<sub>2</sub> nanoparticles for corrosion protection of AA2024 and Mg-AZ31B alloys. **Corrosion Science**, v. 51, n. 9, p. 1998- 2005, set. 2009.