

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPMec

MÁRCIO ULGUIM OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO NO GRAU DE DEFORMAÇÃO EM UMA LIGA DE
ALUMÍNIO 6063 NAS PROPRIEDADES MECÂNICO-METALÚRGICAS**

Rio Grande – Rio Grande do Sul
2015

MÁRCIO ULGUIM OLIVEIRA

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO NO GRAU DE DEFORMAÇÃO EM UMA LIGA DE
ALUMÍNIO 6063 NAS PROPRIEDADES MECÂNICO-METALÚRGICAS

Dissertação apresentada à Universidade Federal
Do Rio Grande – FURG, como parte das
exigências para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, na área de Fabricação
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl

Rio Grande – Rio Grande do Sul

2015

Márcio Ulguim Oliveira

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO NO GRAU DE ENCRUAMENTO EM
UMA LIGA DE ALUMÍNIO 6063 NAS PROPRIEDADES MECÂNICO-
METALÚRGICAS**

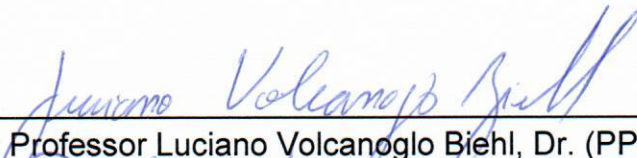
Dissertação apresentada à
Universidade Federal do Rio Grande
– FURG, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica.

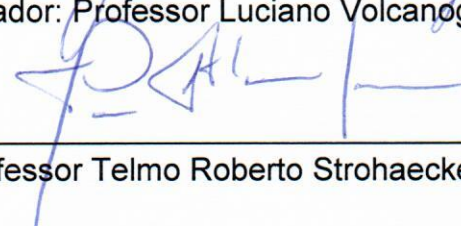
Área de concentração: Engenharia
de Fabricação

Data: 26/02/2015

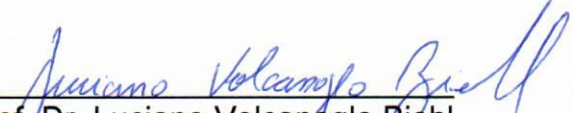
Resultado: Aprovado

Banca Examinadora:


Orientador: Professor Luciano Volcanoglo Biehl, Dr. (PPMec/FURG)


Professor Telmo Roberto Strohaecker, Dr. (PPGE3M/UFRGS)


Professora Alice Gonçalves Osório, Dra. (PPMec/ UFPel)


Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl
Coordenador do PPMec/FURG

À minha esposa Fabiane Ulquim.

Ao meu filho que está por vir.

À memória dos meus pais.

Agradecimentos

À minha esposa pelo apoio incondicional e pelo incentivo dado à realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luciano Biehl pelo apoio em todos os momentos da realização deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, pelos ensinamentos.

Aos técnicos dos laboratórios de Metalurgia e do Centro de Microscopia da Região Sul, ambos da Universidade Federal do Rio Grande – FURG.

Aos bolsistas Edis Antunes e Érico Duarte, pelo na preparação dos corpos de prova e ensaios.

Aos colegas de curso, pelo apoio e incentivo na elaboração deste trabalho.

À Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica – CEEE-D, pelo apoio dado, enquanto funcionário da mesma, na alteração do horário de trabalho, pela cedência de materiais utilizados neste trabalho e pelo apoio e incentivo de seus funcionários.

Ao Sr. Rafael Nunes, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo apoio nos ensaios de raio X.

Ao Prof. Me. Carlos Casanova, da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, pelo apoio nos ensaios de microdureza.

Aos professores da banca avaliadora, Dra. Alice Osório e Dr. Telmo Strohaecker, além do meu orientador.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, pela oportunidade.

À Universidade Federal do Rio Grande – FURG.

RESUMO

O alumínio, produzido a partir do beneficiamento da bauxita, é o terceiro elemento químico mais abundante na Terra, favorecendo desta forma a construção de estruturas mais leves e com maior potencial de resistência à corrosão. Um exemplo disto, são as estruturas metálicas que constituem as redes de distribuição de energia elétrica, em regiões com altos índices de corrosividade, como atmosferas marinhas e carboníferas. Outra aplicação para este material são nas empresas que armazenam e beneficiam o petróleo, na construção de partes de seus tanques. O objetivo deste trabalho é avaliar o grau de deformação da liga de alumínio 6063 T9 em cinco níveis e observar seu comportamento diante suas propriedades mecânico-metalúrgicas resultantes dos tratamentos térmicos, sucedidos de trabalho mecânico à frio e compará-los com o mesmo material apenas tratado termicamente. Para tal, foram utilizadas técnicas de ensaio para avaliação de sua estrutura cristalina, comprovando a existência dos tratamentos térmicos e mecânicos. A partir do material recebido, foi realizada espectrometria, para verificação da composição química da liga. Posteriormente o material recebeu os tratamentos térmicos e mecânicos, conforme a necessidade, de acordo com tipo de ensaio a ser realizado. Foram adquiridas imagens das amostras por microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. Também foram medidas as variações da dureza e da taxa de corrosão com a variação do tratamento mecânico. A comprovação do material da matriz dos corpos de prova, bem com sua estrutura cristalina, foi realizada via difratometria de raio X e cálculos complementares. Os principais resultados indicaram que as variações de dureza e do grau de corrosividade tiveram relação direta com a variação no grau de deformação. Também foi verificada a presença de recuperação dinâmica para graus de deformação acima de 10%.

Palavras chaves: alumínio; tratamento térmico; encruamento.

ABSTRACT

The aluminum produced from the processing of bauxite, is the third most abundant chemical element on Earth, making it propitious for the construction of lighter structures and with a greater corrosion resistance potential. An example of this are the metal structures that constitute the electrical distribution networks in regions with a high corrosive incidence, such as marine and coal atmospheres. Other customers for these materials are companies that store and treat petroleum and the building of its tank parts. The objective of this study is to evaluate the hardening rate of the aluminum alloy 6063 T9 in five levels and to observe its behavior against its mechanical and metallurgical properties resulted from thermal treatments, after cold mechanical work and comparing them with the same materials only thermally treated. To this end, there were performed procedures tests to evaluate its crystalline structure, confirming the presence of the thermal and mechanical treatments. Starting from the material received, it was performed a spectrometry test to verify the alloy chemical composition. After that the material received the thermal and mechanical treatment, as required, according to the kind of test to be performed. Images of the samples were obtained by an optical microscope and a scanning electron microscope. Hardness variations were also measured as well the corrosion rate changed by the mechanical treatment. A verification of the specimens material matrix and its crystalline structure was performed by x-rays diffraction and complementary calculations. The main results indicated that hardness variations and corrosive rate were directly related to the variation in the hardening degree. The presence of dynamic recovery rates for hardening above 10% was also observed.

Keywords: Aluminium; thermal treatment; hardening.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Identificação das ligas de fundição.	20
Figura 2 – Identificação das ligas para trabalho mecânico.....	21
Figura 3 – Sequência de tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento artificial...25	
Figura 4 – Diagrama de equilíbrio de fases do sistema alumínio-silício-magnésio.....	26
Figura 5 – Exemplo do precipitado Mg_2Si em uma liga de alumínio 6063.	27
Figura 6 – Variação da dureza com o tempo e temperatura de solubilização para uma liga 6063 – T9 com redução de área de 90%.....	28
Figura 7 – Variação da dureza com o tempo e temperatura de envelhecimento para uma liga 6061 – T6.....	28
Figura 8 – Detalhe do precipitado de Fe_3SiAl_{12} formado no tratamento térmico da liga 6063.	29
Figura 9 – Variação das propriedades com a quantidade de trabalho à frio.....	29
Figura 10 – Diferentes tipos de laminadores: (a) duo; (b) trio; (c) quadro; (d) sendzimir.....	31
Figura 11 – Marca impressa no metal pela ação de um indentador Vickers.	32
Figura 12 – Diagonais do losango impresso pelo indentador.....	33
Figura 13 – Diagrama de Pourbaix do sistema alumínio água.	34
Figura 14 – Curvas de polarização anódica.	35
Figura 15 – Esquema de uma célula eletroquímica.	36
Figura 16 – Disposição de um eletrodo de calomelano num capilar de Luggin.	37
Figura 17 – Imagens de precipitados (pontos pretos) de Mg_2Si em ligas de alumínio 6063 T6, obtidas por microscopia ótica.	37
Figura 18 – Exemplo de um microscópio ótico.....	38
Figura 19 – Exemplo de imagem obtida em: (a) MEV e (b) EDS.	39
Figura 20 – Difração de raio X.....	41
Figura 21 – Difratoograma do alumínio.	43
Figura 22 – Fluxograma de ensaios 1.	44
Figura 23 – Fluxograma de ensaios 2.	45
Figura 24 – Forno EDG, modelo EDG10P-S.....	47
Figura 25 – Calandra piramidal utilizada no tratamento mecânico das amostras.	48
Figura 26 – Corpo de prova para MO (superfície ainda não trabalhada).....	50
Figura 27 – Microscópio ótico Olympus GX51.	50

Figura 28 - Microscópio Eletrônico de Varredura Jeol, modelo JSM 6610LV.	51
Figura 29 – Microdurômetro Shimadzu HMV 2T.	52
Figura 30 – Corpo de prova para ensaio potenciodinâmico: (a) detalhe do metal embutido; (b) detalhe da vedação.....	53
Figura 31 – Potenciostato PalmSens EmStat2 e a tela do <i>software</i> PsTrace.....	53
Figura 32 – Corpo de prova para ensaios DRX: (a) dimensões; (b) imagem.....	54
Figura 33 – Difratorômetro de raio X MRL Philips X’PERT MPD.	55
Figura 34 – Imagem da liga 6063 T6, ampliada 100x.....	56
Figura 35 – Imagem da liga 6063 T9 encruada 10%, ampliada 100x.....	57
Figura 36 – Imagem da liga 6063 T9 encruada 25%, ampliada 100x.....	57
Figura 37 – Imagem da liga 6063 T9 encruada 40%, ampliada 100x.....	58
Figura 38 – Imagem da liga 6063 T9 encruada 55%, ampliada 100x.....	59
Figura 39 – Imagem da liga 6063 T9 encruada 70%, ampliada 100x.....	60
Figura 40 – Imagens obtidas por MEV e EDS da liga de alumínio 6063: (a) T6, 500x; (b) T9 encruada 10%, 300x; (c) T9 encruada 25%, 300x; (d) T9 encruada 40%, 300x; (e) T9 encruada 55%; (f) T9 encruada 70%; (e) T9 encruada 55%, 500x; (f) T9 encruada 70%, 500x.....	61
Figura 41 – Imagem obtida por MEV para liga 6063 T6 aumentada 1000 vezes.....	63
Figura 42 – Análise por filtro de elementos para liga 6063 T9 10%.....	64
Figura 43 – Marcas de indentação para liga 6063 T6.....	65
Figura 44 – Curva com os resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T6...	66
Figura 45 – Marcas de indentação para liga 6063 T9 encruada 10%.....	67
Figura 46 – Curva com os resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 10%.	68
Figura 47 – Marcas de indentação para liga 6063 T9 encruada 25%.....	68
Figura 48 – Curva com os resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 25%.	69
Figura 49 – Marcas de indentação para liga 6063 T9 encruada 40%.....	70
Figura 50 – Curva com os resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 40%.	71
Figura 51 – Marcas de indentação para liga 6063 T9 encruada 55%.....	71
Figura 52 – Curva com os resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 55%.	72
Figura 53 – Marcas de indentação para liga 6063 T9 encruada 70%.....	73

Figura 54 – Curva com os resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 70% .	74
Figura 55 – Comparativo de dureza para todas as ligas.	74
Figura 56 – Comparativo entre as durezas médias de cada liga.	75
Figura 57 – Disposição dos componentes utilizados no ensaio potenciodinâmico.	76
Figura 58 – Curva de polarização potenciodinâmica para liga 6063 T6.	76
Figura 59 – Curva de polarização potenciodinâmica para liga 6063 T9 encruada 10%.	77
Figura 60 – Curva de polarização potenciodinâmica para liga 6063 T9 encruada 25%.	77
Figura 61 – Curva de polarização potenciodinâmica para liga 6063 T9 encruada 40%.	77
Figura 62 – Curva de polarização potenciodinâmica para liga 6063 T9 encruada 55%.	78
Figura 63 – Curva de polarização potenciodinâmica para liga 6063 T9 encruada 70%.	78
Figura 64 – Comportamento da corrente com a variação do tratamento termomecânico.	79
Figura 65 – Difratoograma para liga de alumínio 6063 T6.	80
Figura 66 – Zoom no Difratoograma da Figura 64.	81
Figura 67 – Difratoograma da liga de alumínio 6063 T6 envelhecida artificialmente por 5 min.	82
Figura 68 – Zoom no Difratoograma da Figura 62.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algumas propriedades do alumínio.	19
Tabela 2 – Influência dos elementos nas propriedades das ligas de alumínio.	20
Tabela 3 – Classificação e principais elementos de liga para as ligas de fundição.	21
Tabela 4 – Classificação, principais elementos de liga, propriedades e aplicações para as ligas para trabalho mecânico.	22
Tabela 5 – Tratamentos térmicos aplicáveis às ligas de alumínio.	23
Tabela 6 – Designação da complementação na classificação do tratamento T.	24
Tabela 7 – Equivalências entre diferentes designações da liga de alumínio 6063.	25
Tabela 8 – Composição química da liga de alumínio 6063.	26
Tabela 9 – Composição química da liga estudada.	46
Tabela 10 – Quantidades percentuais atômica e de peso dos principais elementos da liga de alumínio 6063, obtidos por EDS.	63
Tabela 11 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T6.	66
Tabela 12 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 10%.	67
Tabela 13 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 25%.	69
Tabela 14 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 40%.	70
Tabela 15 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 55%.	72
Tabela 16 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 70%.	73
Tabela 17 – Média dos dados obtidos nos ensaios de dureza Vickers.	75
Tabela 18 – Comportamento da corrente com a variação do tratamento termomecânico.	79
Tabela 19 – Relatório de espectrometria da liga 6063.	94

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a – parâmetro de rede

A.C. – antes de Cristo

A₀ – área antes da deformação

A₁ – área após a deformação

Ag – prata

AgCl – cloreto de prata

Al – alumínio

Al₂O₃ – óxido de alumínio

B – boro

Ba[Pt(CN)₄] - tetracianoplatinato de bário

Be – berílio

Bi – bismuto

Ca – cálcio

CCC – cúbica de corpo centrado

Cd – cádmio

Ce – cério

CEEE-D – Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica

CEME-SUL – Centro de Microscopia Eletrônica da Região Sul

CFC – cúbica de face centrada

Cl – cloro

Co – cobalto

Cr – cromo

CRLS – Centro Regional Litoral Sul da CEEE-D

C.V. – cavalo a vapor (equivalente a 736 W)

Cu – cobre

\bar{d} – média das diagonais da marca de indentação [μm]

d_1 – primeira diagonal medida na marca de indentação [μm]

d_2 – segunda diagonal medida na marca de indentação [μm]

d_{hkl} – distância interplanar [nm]

DRX – difratômetro de raio X

EDE – energia de deformação de empilhamento

EDS – espectroscopia de energia dispersiva
F – carga aplicada pelo indetador [N ou kgf]
Fe – ferro
FEPA – Federação Europeia de Fabricantes de Produtos Abrasivos
FURG – Universidade Federal do Rio Grande
G – tamanho de grão ASTM E 112-96^{e3}
Ga – gálio
h, k, l – índices de Miller
HF – ácido fluorídrico
Hg – prata
Hg₂Cl₂ – cloreto de mercúrio
In – índio
La – lantânio
Li – lítio
KCl – cloreto de potássio
M - amplificação do microscópio
MA - Maranhão
MEV – microscopia eletrônica de varredura
MG – Minas Gerais
Mg – magnésio
Mg₂Si – silicieto de magnésio
Mn – manganês
MO – microscopia ótica
N – número de grãos por unidade linear
Na – sódio
Ni – níquel
N_L – número de interceptos por unidade de comprimento
p – comprimento da linha sobre a micrografia
P – fósforo
PA - Pará
Pb – chumbo
PVC – cloreto de polivinila
r – raio atômico [nm]
RS – Rio Grande do Sul

Sb – antimônio

Si – silício

Sn – estanho

SP – São Paulo

Sr – estrôncio

Ti – titânio

V – vanádio

Zn – zinco

Zr – zircônio

λ – comprimento de onda [μm]

θ – ângulo de difração [$^\circ$]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Alumínio	18
2.2 Ligas de alumínio	19
2.3 Tratamentos térmicos das ligas de alumínio.....	23
2.4 Liga 6063	25
2.4.1 Endurecimento por precipitação da liga 6063	27
2.5 Tratamento mecânico a frio	29
2.5.1 Processo de conformação mecânica de laminação	31
2.6 Dureza.....	31
2.6.1 Dureza Vickers	32
2.7 Corrosão do alumínio e suas ligas	33
2.8 Ensaio eletroquímico	34
2.9 Microscopia ótica.....	37
2.10 Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva	38
2.11 Raio X.....	39
2.11.1 Difratomia de raio X.....	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 Matéria prima.....	45
3.2 Tratamentos térmicos.....	46
3.3 Tratamento mecânico.....	47
3.4 Preparação da superfície	49
3.5 Microscopia ótica.....	49
3.6 MEV/EDS	51
3.7 Ensaio de microdureza Vickers.....	51
3.8 Ensaio potenciodinâmico.....	52
3.9 Difratomia de raio X.....	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1 Microscopia ótica.....	56

4.2	Microscopia eletrônica de varredura/Espectroscopia de energia dispersiva	60
4.3	Ensaio de dureza Vickers	65
4.4	Ensaio potenciodinâmico.....	76
4.5	Difratometria de raio X.....	80
5.	CONCLUSÕES.....	84
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
	APÊNDICE A – RELATÓRIO COMPLETO DO ENSAIO DE ESPECTROMETRIA	94

1. INTRODUÇÃO

Com a consolidação quanto às características mecânicas de estruturas e equipamentos que nos rodeiam, nas últimas décadas o que se vem buscando gira muito em torno da otimização destes elementos. Uma forma de alcançar este objetivo é a utilização de materiais construtivos cada vez mais leves. Aliada a esta leveza, o quesito resistência mecânica se faz muito importante. Um material que possibilita a obtenção destas características é o alumínio e suas ligas.

Uma grande vantagem no uso do alumínio é sua abundância na crosta terrestre, sendo o terceiro elemento mais encontrado, com cerca de 34 bilhões de toneladas espalhadas pelo globo terrestre. Sua produção supera todos os metais não ferrosos em quantidade. Mundialmente, as maiores reservas deste material se encontram nas regiões tropicais, com 57% do total [01], destacando-se a [02] Austrália e Guiné como detentoras das maiores quantidades, seguido do Mediterrâneo, com 33% as regiões de clima subtropical, com 10%.

No ano 2008 [01], a produção mundial foi de 60 milhões de toneladas, onde deste total, 92% supre a demanda de produção do alumínio primário. Os 8% restantes atenderam outros diversos setores, na forma de hidratos ou de aluminas especiais. Os maiores produtores mundiais de alumínio são as empresas Alcan e Alcoa, neste ano.

Um fato [03] que vem causando preocupação no mercado internacional do alumínio é superprodução da indústria chinesa, a qual provoca uma queda nos preços de produto ao redor do mundo.

No Brasil [04], a produção do metal vem crescendo a uma taxa de 3,9% ao ano, com uma projeção de 4,1% para 2015, sendo que cerca de 10% desta produção tem origem na reciclagem. Os maiores Estados produtores do alumínio primário [05] são o Pará, com cerca de 30,7% do total produzido, seguido de SP, com 30,3%, MA com 28,9% e MG com 10,1%.

O Brasil é o terceiro maior produtor de Minério de Bauxita com produção em 2008 estimada em 26,6 milhões de ton., o que significa 13% da produção mundial, que foi de 205 milhões de ton. A Austrália é líder em produção, com 64 milhões de ton. em 2007, que correspondem a 33% da produção global, seguida da China com 17%. [02]

Devido ao alto índice de corrosão, da região litorânea, no sul do RS, devido à atmosfera marinha, juntamente com a presença do enxofre, oriundo das indústrias de fertilizantes, muitas estruturas metálicas são construídas utilizando o alumínio e suas ligas como matéria prima.

Exemplo disto são as redes de distribuição de energia elétrica e componentes de tanques de armazenamento de fluidos derivados do petróleo.

O local de realização deste trabalho é a cidade de Rio Grande, situada na região sul litorânea do Estado do Rio Grande do Sul. Outra particularidade desta cidade é a presença de indústrias de fertilizantes, favorecendo ainda mais a presença do fenômeno da corrosão. Potencializando a atmosfera marinha com presença de enxofre, soma-se a alta umidade relativa do ar, justificando a realização deste trabalho.

A principal motivação na realização deste trabalho, principalmente na escolha da liga é a minha experiência em redes de distribuição de energia elétrica, oriunda de aproximadamente dez anos trabalhando na CEEE-D. Esta liga, 6063 – T9, é utilizada em redes de distribuição de energia elétrica em regiões com altos índices de corrosão, como as regiões carboníferas, litorâneas e onde há a presença de indústrias de produção de fertilizantes.

Este trabalho estudou o grau de deformação da liga de alumínio 6063 – T9 em cinco níveis e observou seu comportamento diante suas propriedades mecânico-metalúrgicas, com o objetivo de avaliar os aspectos microestruturais e mecânicos, resultantes dos tratamentos térmicos, sucedidos de trabalho mecânico à frio e compará-los com o mesmo material apenas tratado termicamente.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Alumínio

A história do alumínio se inicia [06] em torno de 6.000 A.C, onde os Persas utilizavam argila com certas quantidades de óxido de alumínio na fabricação de potes e recipientes diversos de argila. Posteriormente, em 3.000 A.C., esta mesma argila era utilizada como cosmético, medicamento e corante de tecidos pelos povos Egípcios e Babilônicos.

Algum tempo depois, em 1808, o inglês Humphry Davy [07] fez tentativas de extração do alumínio através de eletrólise. Mesmo sem sucesso em seus experimentos, Davy batizou o metal como se conhece hoje.

Em 1821, o francês Pierre Berthier [07], no sul da França, encontrou um minério de coloração avermelhada, o qual continha cerca de 52% de óxido de alumínio. Este minério era a bauxita¹.

Somente em 1825 [06, 07, 08] o alumínio foi de fato isolado. O responsável por tal feito foi o dinamarquês Hans Christian Oersted, através da interação do Cl com uma mistura de Al_2O_3 e carvão. Sua descoberta foi publicada em uma revista pouco conhecida e seus experimentos encerrados. Após 18 anos [07], o alemão Friedrich Wöhler, em continuidade ao trabalho de Oersted, produziu o primeiro lingote de alumínio.

Atualmente, no refino da bauxita, é utilizado o processo Bayer [08, 09], o qual é uma adaptação do processo Le Chatelier. Este processo foi concebido devido a uma demanda da indústria têxtil. Para fins metalúrgicos, o processo Bayer foi associado ao processo Hall-Heroult, antecessor ao Bayer [07].

No início do século XX [07], a produção mundial de alumínio girava em torno de 8.000 toneladas do metal. Cem anos mais tarde, esta produção deu um salto para uma média de 60 milhões de toneladas.

Embora hoje a forma mais conhecida do alumínio seja a metálica, o metal já foi considerado tão raro e precioso antes das descobertas de Charles Martin Hall e Paul-Louis-Toussaint Héroult (1888), que chegou a ser exibido ao lado de jóias da coroa e utilizado em lugar do ouro em jantares da nobreza no século XIX. Os compostos de alumínio, por outro lado, servem a humanidade há mais de 4000 anos. Os egípcios já empregavam o alúmen como mordente e os gregos e os romanos também o usavam para fins medicinais, como adstringente, na Antigüidade. [10].

¹ A bauxita [10] se forma a partir dos intemperismos lixiviação sobre várias rochas, com ocorrências principais nas regiões de climas tropical e subtropical, com grande destaque ao Brasil.

O alumínio é um material que apresenta inúmeras características benéficas à construção mecânica, onde pode-se destacar [11, 12] a alta resistência à corrosão, o tornando ideal [13] em construções de redes de distribuição de energia elétrica em ambientes hostis, onde também se aplica sua boa condutividade elétrica; alta condutividade térmica, sendo utilizado em equipamentos eletrônicos [14] na dissipação de calor de componentes semicondutores, como processadores de computador; boa razão resistência/peso, com uma densidade média [15, 16] de $2,7 \text{ g/cm}^3$, promovendo a construção de estruturas leves e resistentes; baixa toxidez, permitindo seu uso em utensílios domésticos, como painéis. Também se destacam [11, 12, 17] a boa refletividade à luz, fácil manuseio, ciclo infinito de reciclagem e sua aparência.

Na produção agrícola, o alumínio traz algumas desvantagens, como [18] a redução no crescimento do café e deficiência de fósforo no metabolismo da planta, prejudicando o seu crescimento.

Na forma pura, o alumínio apresenta baixa densidade e estrutura CFC. Algumas de suas propriedades são expostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Algumas propriedades do alumínio.

Propriedades físicas	Intensidade	Propriedades físicas	Intensidade
Densidade	$2,71 \text{ g/cm}^3$ a 20°C	Ponto de fusão	660°C
Módulo de elasticidade	69 GPa	Coefficiente de expansão linear	$23 \times 10^{-6} \text{ L}/^\circ\text{C}$
Condutividade térmica	$0,56 \text{ cal/cm}^\circ\text{C}$ (25°C)	Condutividade elétrica	62 (IACS)%

Fonte: Adaptado de [15, 16].

2.2 Ligas de alumínio

As propriedades mecânicas do alumínio puro o tornam inadequado [19] para uso em estruturas, sendo este utilizado [20] basicamente em aplicações onde a resistência à corrosão e sua maleabilidade são os fatores mais relevantes. No intuito de se obter melhorias em suas características, assim como se faz com o ferro, alguns elementos químicos podem ser adicionados.

Ao alumínio, podem ser adicionados [21] Cu, Si, Mg, Mn e Zn, onde cada elemento acrescido altera as características do metal, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Influência dos elementos nas propriedades das ligas de alumínio.

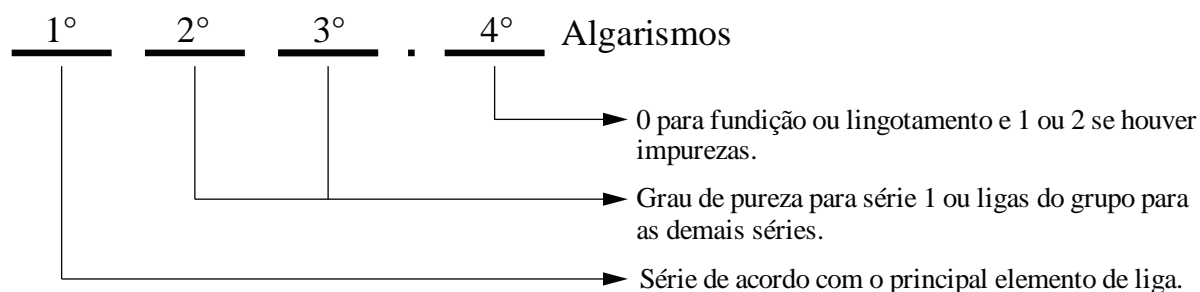
Elemento de liga	Influência do elemento de liga
Cobre	Aumenta a resistência mecânica.
Manganês	Aumenta a resistência mecânica e ligeiramente a resistência à corrosão, em particular a resistência à corrosão sob tensão.
Silício	Aumenta a resistência à corrosão e melhora a característica de fundição.
Magnésio	Aumenta a resistência mecânica e resistência à corrosão em geral e proporciona maior soldabilidade.
Zinco	Aumenta a resistência mecânica e a resistência à corrosão em meios alcalinos e maior soldabilidade.

Fonte: [21].

De acordo com a resposta aos tratamentos térmicos e mecânicos ou ao elemento de liga adicionado, a *Aluminium Association* estabelece uma nomenclatura às ligas de alumínio [22], a qual é aceita no meio científico e industrial. Tais ligas [22, 23] são classificadas da seguinte forma:

- ☐ Ligas de fundição:** utilizadas no estado vazado, estas ligas são classificadas [22, 23, 24] com base no elemento de liga de maior quantidade, através da utilização de quatro dígitos, sendo o quarto algarismo separado dos demais por um ponto. A identificação destas ligas se dá conforme a Figura 1.

Figura 1 – Identificação das ligas de fundição.



Fonte: adaptado de [16, 22, 25].

A identificação das séries da liga fundida, com base nos principais elementos de liga é definida conforme a Tabela 3.

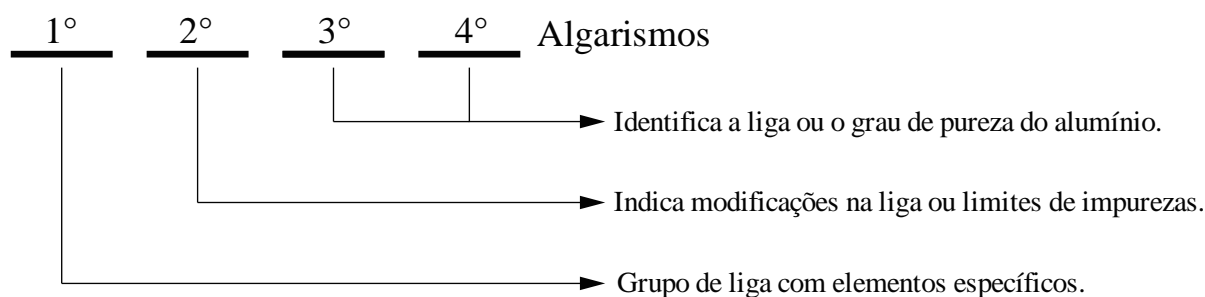
Tabela 3 – Classificação e principais elementos de liga para as ligas de fundição.

Série	Principais elementos de liga
1xx.x	Mínimo de 99% de alumínio
2xx.x	Cobre
3xx.x	Silício com adição de cobre e/ou magnésio
4xx.x	Silício
5xx.x	Magnésio
6xx.x	Série não utilizada
7xx.x	Zinco
8xx.x	Estanho
9xx.x	Outros

Fonte: [16, 23, 25].

- Ligas para trabalho mecânico:** materiais que após o vazamento [23] são sujeitos a deformação plástica. Também são identificadas [22, 23, 24] através da utilização de quatro algarismos, porém sem a utilização do ponto. A identificação deste tipo de liga é representada na Figura 2.

Figura 2 – Identificação das ligas para trabalho mecânico.



Fonte: adaptado de [16, 22, 25, 26].

A representação das ligas para trabalho mecânico se dá de forma análoga às ligas de fundição. A Tabela 4 demonstra, além das séries e os principais elementos de liga, algumas propriedades e aplicações das ligas para trabalho mecânico.

Tabela 4 – Classificação, principais elementos de liga, propriedades e aplicações para as ligas para trabalho mecânico.

Série	Principais elementos de liga	Propriedades	Aplicações
1xxx	Pureza mínima de 99%	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Alta resistência à corrosão, condutividade térmica e elétrica. 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Indústria química; ☐ Equipamentos elétricos (condutores).
2xxx	Cobre	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Requer tratamento térmico para otimização das propriedades; ☐ Mecanicamente semelhante ao aço de baixo carbono; ☐ Baixa resistência à corrosão. 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Indústrias aeronáutica, principalmente em uniões mecânicas (rebites, parafusos, etc.).
3xxx	Manganês	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Não tratável termicamente; ☐ 20% menos resistente que a série 1xxx. 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Painéis e coberturas; ☐ Indústria alimentícia.
4xxx	Silício	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Não tratável termicamente. 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Fundição em moldes.
5xxx	Magnésio	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Não tratável termicamente; ☐ Moderada a alta resistência mecânica. 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Estruturas navais; ☐ Indústria automotiva; ☐ Indústria alimentícia; ☐ Construção civil.
6xxx	Magnésio e silício	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Boa soldabilidade, maleabilidade e resistência mecânica e a corrosão. 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Construção civil; ☐ Redes de distribuição de energia elétrica; ☐ Indicada para anodização.
7xxx	Zinco	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Excelente resistência mecânica. 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Uniões soldadas.
8xxx	Lítio, ferro e magnésio	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Boa resistência mecânica. 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Indústria aeroespacial.
9xxx	Reservado para futuras ligas	-----	-----

Fonte: [12, 15, 16, 20, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30].

2.3 Tratamentos térmicos das ligas de alumínio

As ligas de alumínio, no que tange os tratamentos térmicos, podem ser divididas em ligas tratáveis termicamente (ligas das séries 2xxx, 6xxx, 7xxx e algumas da série 8xxx), ou seja, ligas que tem sua dureza aumentada por tratamento térmico, e as não tratáveis termicamente, as quais apresentam aumento de dureza apenas com tratamentos de deformação à frio. [30, 31, 32]

A classificação dos tratamentos térmicos destinados às ligas de alumínio tratáveis termicamente é designada [33, 34, 35, 36] através de uma letra, separada por um traço e após o nome da liga, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Tratamentos térmicos aplicáveis às ligas de alumínio.

Classificação	Definição
F	<u>Como fabricado</u> : obtido por deformação plástica, sem controle de temperatura e grau de deformação no processo.
H	<u>Encruado</u> : produtos endurecidos por deformação plástica, passíveis de tratamento posterior de recozimento ou estabilização. Deve ser acompanhada de um ou dois dígitos.
O	<u>Recozido</u> : usado após tratamento de deformação plástica, no intuito de reduzir a dureza após tratamento ou melhorar a estabilidade dimensional de peças usinadas.
T	<u>Tratado termicamente</u> : produtos que sofrem tratamento térmico, com ou sem deformação à frio, produzindo propriedades diferentes das obtidas com os tratamentos F, H e O. Deve ser seguida de um dois algarismos, os quais indicam a sequência dos tratamentos térmicos e mecânicos (se houver).
W	<u>Solubilizado</u> : aplicado às ligas que envelhecem de forma natural após tratamento de solubilização. Deve ser sucedida do tempo necessário ao envelhecimento.

Fonte: [31, 32, 33, 34, 35, 37].

Como descrito na Tabela 5, as classificações H e T devem ser sucedidos de um ou dois algarismos, mas como neste trabalho foram utilizados os tratamentos térmicos T6 e T9, a complementação numérica é apresentada na Tabela 6 apenas para a classificação T.

Tabela 6 – Designação da complementação na classificação do tratamento T.

Classificação	Tratamento
T1	Deformação plástica à quente, seguida de resfriamento brusco e envelhecimento natural.
T2	Deformação plástica à quente, seguida de resfriamento brusco, encruamento e envelhecimento natural.
T3	Solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente.
T4	Solubilizado e envelhecido naturalmente.
T5	Deformação plástica à quente, seguida de resfriamento brusco e envelhecimento artificial.
T6	Solubilizado e envelhecido artificialmente.
T7	Solubilizado e superenvelhecido.
T8	Solubilizado, encruado e envelhecido artificialmente.
T9	Solubilizado, envelhecido artificialmente e encruado.
T10	Deformação plástica à quente, seguida de resfriamento brusco, encruamento e envelhecimento artificial.

Fonte: [32, 33, 35, 36, 38].

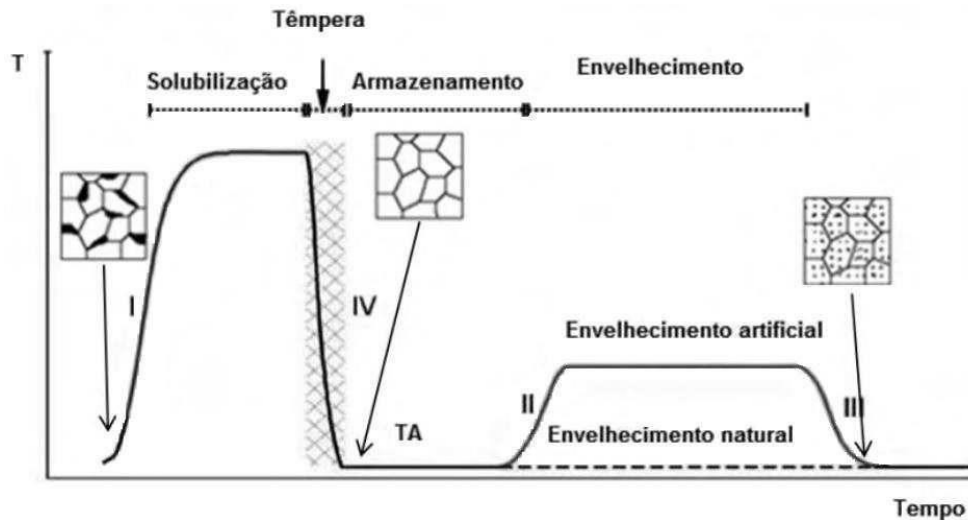
Os tratamentos térmicos utilizados na formação da liga 6063, utilizada neste trabalho, são o de solubilização e envelhecimento artificial, conforme segue:

- ☐ **Tratamento de solubilização:** consiste em [11, 24, 39, 40-43] aquecer a liga até uma determinada temperatura, próxima ao ponto fusão do metal, fazendo com que a segunda fase se dissolva na matriz de alumínio. A temperatura deve ser mantida até a total dissolução e posteriormente o material deve ser resfriado de forma brusca, isto é, temperado, permitindo a manutenção da solução sólida à temperatura ambiente.
- ☐ **Envelhecimento artificial:** também consiste [11, 24, 40, 43-46] no aquecimento da liga, porém a uma temperatura menor do que a praticada na solubilização. O alumínio deve ser mantido nesta temperatura até que se atinja o endurecimento por precipitação adequado.

De forma ilustrativa, os tratamentos de solubilização e envelhecimento artificial ocorrem, no tempo, conforme a Figura 3. Inicialmente o material é aquecido a alta temperatura, mantido por um determinado tempo, resfriado rapidamente (têmpera). Posteriormente é

aquecido até a temperatura de envelhecimento artificial, sendo posteriormente resfriado à temperatura ambiente. Esta sequência de tratamentos fará com que a liga de alumínio endureça por precipitação.

Figura 3 – Sequência de tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento artificial.



Fonte: [40].

2.4 Liga 6063

Pertencente à série 6xxx [47, 48], a liga 6063, assim designada pela *Aluminium Association*, é uma das mais populares e apresenta uma boa capacidade de deformação plástica, soldabilidade, resistência à corrosão² (mesmo em ambientes marinhos), média a elevada resistência mecânica, além da possibilidade de serem tratadas termicamente. Outra vantagem é sua alta condutividade térmica, justificando seu uso na dissipação de calor em equipamentos eletrônicos. Esta liga também recebe outras designações, conforme norma ou país, de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 – Equivalências entre diferentes designações da liga de alumínio 6063.

Aluminium Association	ISO	Espanha	Canadá	França	Reino Unido	Itália
6063	AlMg0,5Si	L-3441 38,337	GS10	QQ-A-200/9	H9	3569

Fonte: [28].

² Obtida através da formação de uma camada de Al₂O₃, chamada camada passivadora ou protetora, que se forma em um curto espaço de tempo, após o contato do metal com o ambiente [38].

A composição química desta liga é distribuída conforme a Tabela 8.

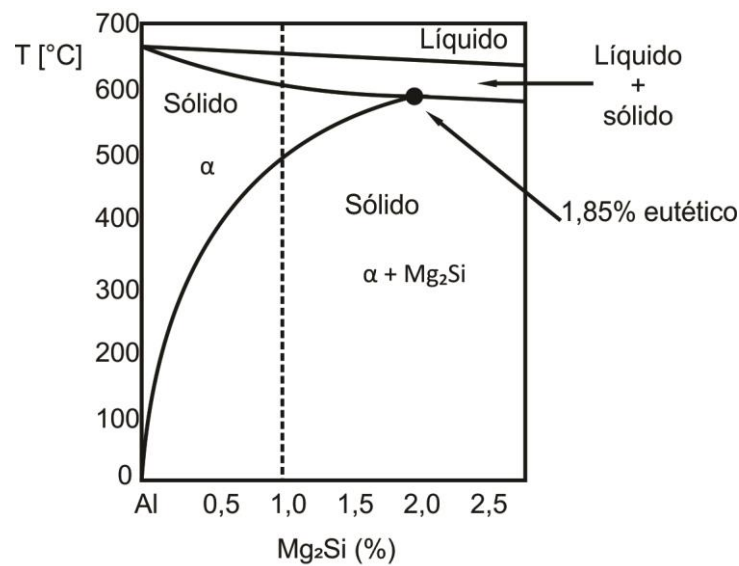
Tabela 8 – Composição química da liga de alumínio 6063.

Composição percentual em peso da liga 6063										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros		Al
								elementos não especificados		
								Cada	Total	
0,20				0,45						
a	0,35	0,10	0,10	a	0,10	0,10	0,10	0,05	0,15	Restante
0,60				0,9						

Fonte: [28, 39].

A liga 6063 pode se apresentar [12, 28, 40, 46, 49] de duas formas estequiométricas, balanceadas ou desbalanceadas. As ligas balanceadas ocorrem na proporção atômica de dois átomos de Mg para um de Si, 1,73% de Mg em peso em relação ao Si, possibilitando a dissolução de máxima de 1,85% de intermetálico na matriz do Al, conforme o diagrama de equilíbrio de fases representado na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama de equilíbrio de fases do sistema alumínio-silício-magnésio.

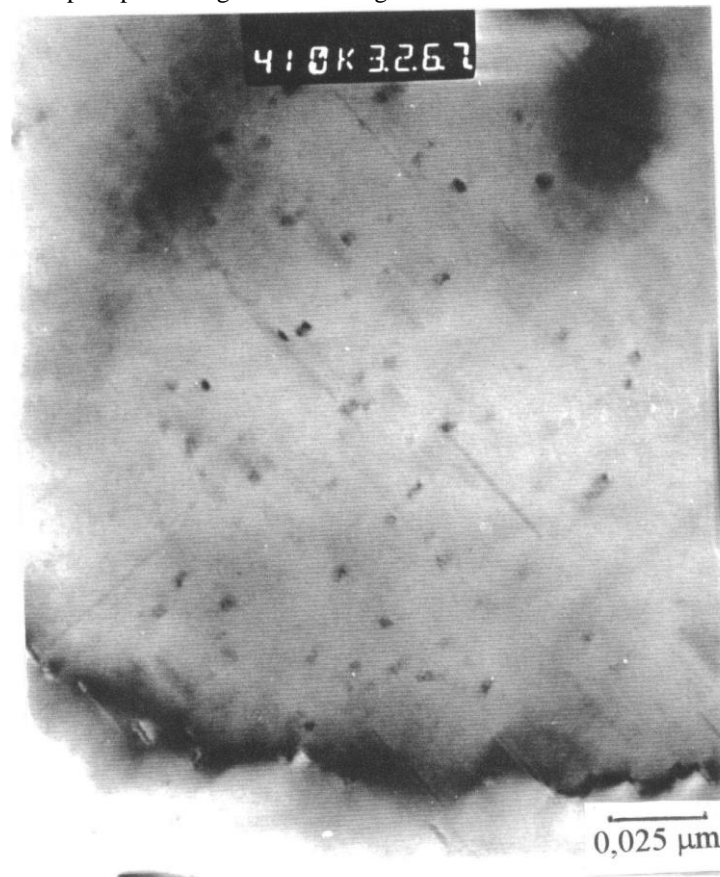


Fonte: adaptado de [40, 49].

2.4.1 Endurecimento por precipitação da liga 6063

O endurecimento [15, 22, 30, 50, 51] das ligas da série 6xxx decorre da formação do intermetálico Mg_2Si , ilustrado pelos pontos pretos da Figura 5, antes que o equilíbrio seja atingido pelo superenvelhecimento. Com a elevação da temperatura, a solubilidade do Mg_2Si na matriz rica em alumínio cresce, permitindo a formação de precipitados finos e uniformes, aumentando a dureza da liga, [40] obstruindo ou retardando o movimento das discordâncias. Porém, uma longa exposição à temperaturas elevadas (superenvelhecimento) favorece o movimento das discordâncias, amolecendo o material. Portanto, deve haver um controle de tempo e temperatura no processo de formação do intermetálico, através de um tratamento térmico adequado.

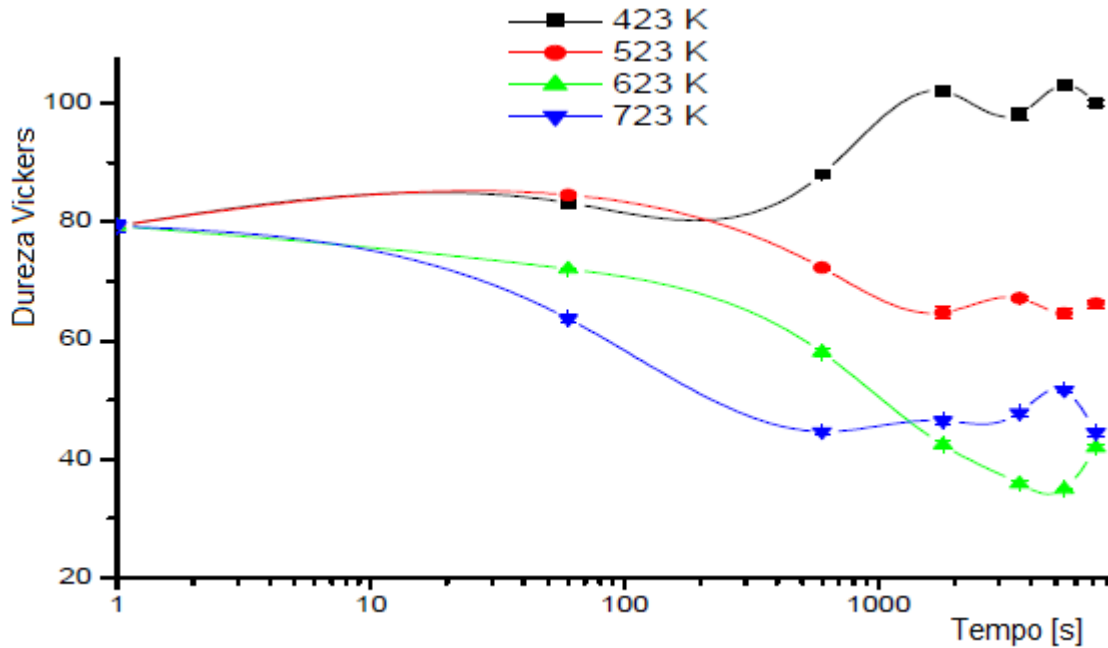
Figura 5 – Exemplo do precipitado Mg_2Si em uma liga de alumínio 6063.



Fonte: [52]

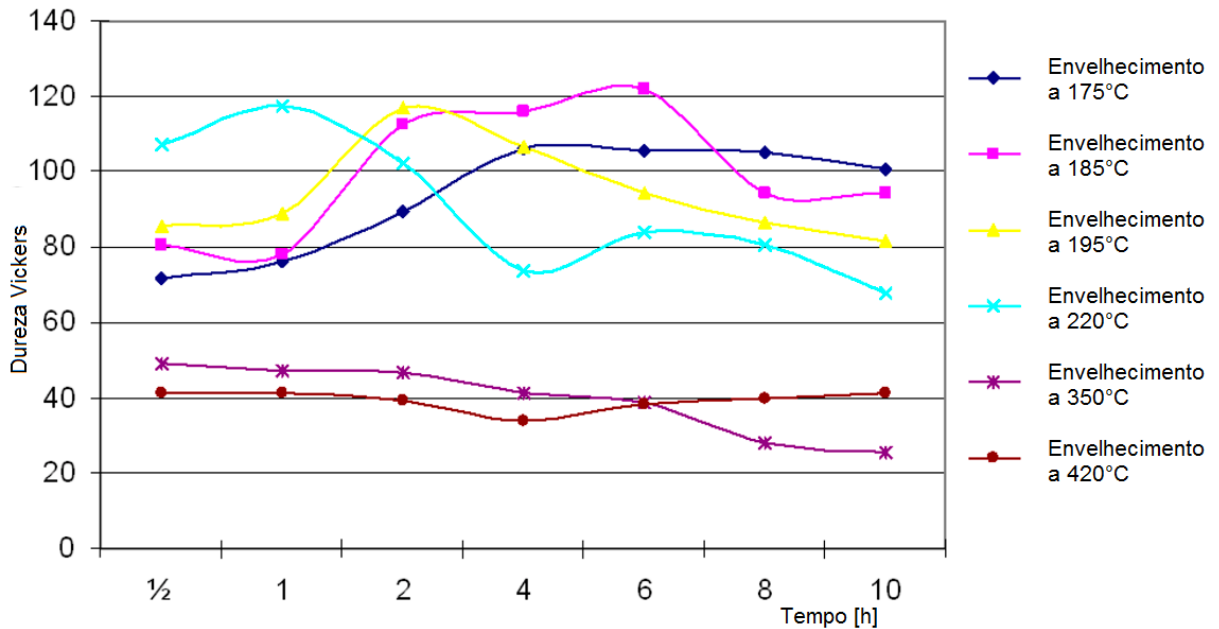
O nível de dureza obtido pelo endurecimento por precipitação varia [30, 45, 53, 54] com a temperatura do tratamento, tanto de solubilização quanto de envelhecimento, e também com o tempo de exposição, como ilustrado nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 – Variação da dureza com o tempo e temperatura de solubilização para uma liga 6063 – T9 com redução de área de 90%.



Fonte: [30].

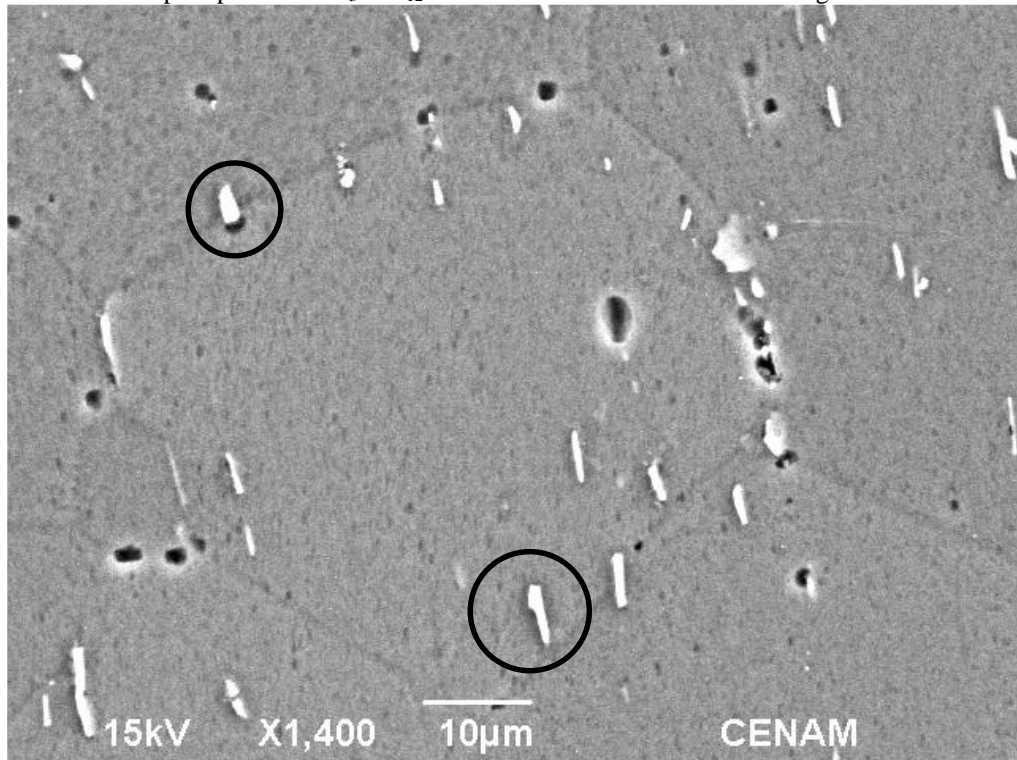
Figura 7 – Variação da dureza com o tempo e temperatura de envelhecimento para uma liga 6061 – T6.



Fonte: adaptado de [53].

No processo de endurecimento por precipitação também pode ocorrer o surgimento de outros intermetálicos [55] baseados em AlFeSi , como o [56] $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$, conforme ilustrado pela Figura 8.

Figura 8 – Detalhe do precipitado de $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$ formado no tratamento térmico da liga 6063.

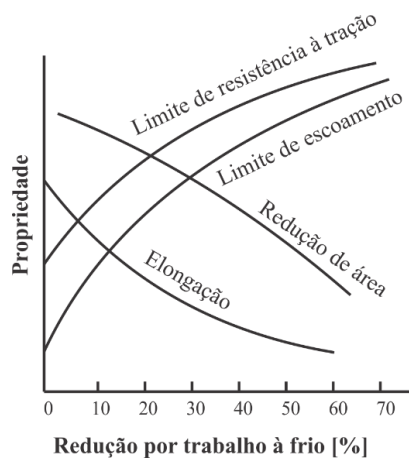


Fonte: adaptado de [56].

2.5 Tratamento mecânico a frio

Os tratamentos mecânicos a frio visam aumentar [15, 16, 30, 57, 58] a dureza de um material, quando o aumento obtido por tratamento térmico é insuficiente ou impossível. Além do aumento na dureza, obtém-se aumentos nas tensões limite de escoamento, resistência a tração e cisalhante do material, em detrimento da ductilidade do mesmo, conforme Figura 9.

Figura 9 – Variação das propriedades com a quantidade de trabalho à frio.



Fonte: adaptado de [59].

A redução percentual da área da seção transversal, promovida pelo trabalho mecânico a frio, leva em conta as áreas inicial e final do material e é dada pela Equação 1 [16, 57].

$$\text{Redução \% de área} = \left(\frac{A_0 - A_1}{A_0} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Uma grande desvantagem no processo de tratamento mecânico a frio é a baixa eficiência, devido a maior parte da energia aplicada ao processo ser dissipada na forma de calor [15, 30, 58].

Durante o processo de encruamento [15, 30], a microestrutura do material sofre algumas alterações. A mais significativa consiste no alongamento dos grãos, tornando sua área substancialmente maior. Esta transformação na estrutura de grãos faz com que no contorno de grão haja um incremento na quantidade de discordâncias. No interior dos grãos se desenvolvem subestruturas não existentes antes da deformação plástica.

Um dos processos utilizados no processo de endurecimento mecânico de um metal [16, 59] é o processo de conformação mecânica de laminação. Também são utilizados a extrusão à quente, trefilação à frio e forjamento à frio ou à quente.

Durante estes processos de endurecimento de um metal [15, 30, 60, 61] principalmente sob altas taxas de deformação e com tempos curtos, podem surgir bandas de cisalhamento. Sua característica microestrutural consiste na formação de uma estrutura lamelar, sem orientação preferencial em relação à direção da deformação plástica, atravessando uma grande quantidade de grãos. Na formação das bandas de cisalhamento [60] não há tempo suficiente para a dissipação do calor gerado, acarretando em uma elevação considerável da temperatura na região cisalhada.

O processo de formação de bandas de cisalhamento [15, 60] recebe o nome de recuperação dinâmica e ocorre durante a deformação plástica em temperatura ambiente. Este fenômeno é típico de materiais com alta EDE e estrutura CFC [61, 62].

Vários autores sugerem que este aquecimento localizado pode disparar o processo de recristalização no interior destas bandas. Além dos aspectos ligados à recristalização, o estudo da evolução microestrutural das bandas de cisalhamento adiabáticas tem abordado com bastante ênfase os fenômenos de recuperação dinâmica, amorfização e transformação de fases em diversos materiais, tais como: cobre de alta pureza, ferro, metais refratários, as ligas de alumínio, cerâmicas e alguns tipos de aços ao carbono e ligados. [60]

2.5.1 Processo de conformação mecânica de laminação

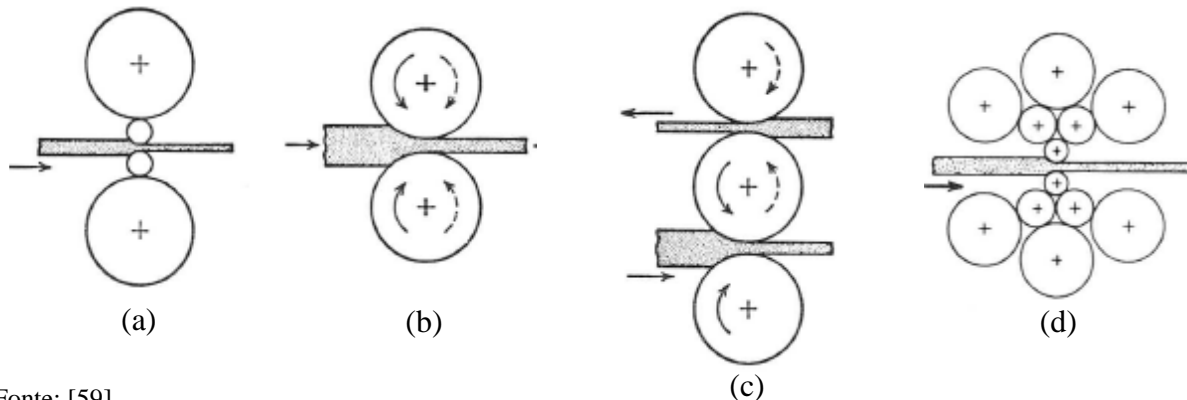
O processo de conformação mecânica de laminação [16, 24, 59] consiste a passagem do material, geralmente na forma de chapa, entre dois rolos ou cilindros, separados por uma distância inferior a espessura da chapa.

Os cilindros [24, 59] movem-se em sentidos opostos, permitindo a passagem do material sem a necessidade de esforço externo.

A ferramenta [24, 59] que executa este trabalho recebe o nome de laminador. O laminador pode ser formado por dois, três ou quatro cilindros, chamados de laminadores duos, trios e quadruos, respectivamente, além da possibilidade da inversão no sentido de rotação dos rolos. Um tipo especial de laminador é o sendzimir, o qual é formado por um conjunto de cilindros montados de forma a reduzir de forma significativa a flexão dos rolos de trabalho.

Os vários tipos de laminadores são exemplificados na Figura 10.

Figura 10 – Diferentes tipos de laminadores: (a) duo; (b) trio; (c) quadruo; (d) sendzimir.



Fonte: [59].

2.6 Dureza

Uma das propriedades mecânicas mais importante [15, 24] na especificação dos materiais de engenharia mecânica é a dureza, sendo esta definida [59] como a resistência de um material à deformação plástica.

A dureza de um material pode ser especificada de três formas, de acordo com o tipo de ensaio realizado. São elas [15, 16, 30, 59, 63, 64]:

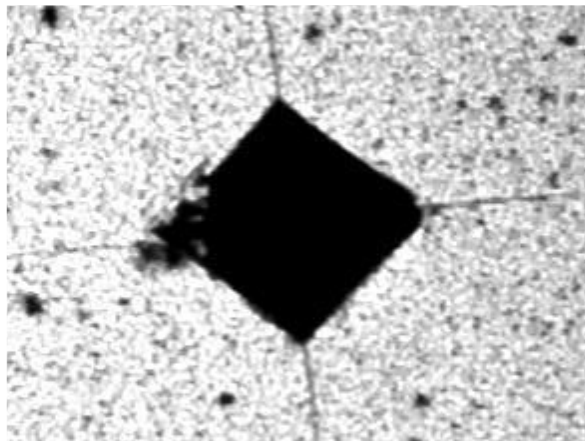
- ❑ **Dureza ao risco:** medida de acordo com a escala Mohs³, este tipo de ensaio é realizado geralmente em minerais, relacionado suas capacidades de uns riscar os outros.
- ❑ **Dureza dinâmica ou de rebote:** expresso como energia de impacto, neste teste uma bilha é lançada contra o corpo de prova e, na sua forma mais comum, a dureza é medida através da altura de rebote da bilha.
- ❑ **Dureza à penetração:** a dureza é determinada através da divisão da carga aplicada pela superfície deformada pela impressão da carga aplicada. Esta superfície pode se apresentar em três formas, de acordo com a forma do penetrador (piramidal, esférico ou cônico).

2.6.1 Dureza Vickers

Este método de dureza é baseado na relação [24, 59, 63] entre a carga aplicada por um penetrador ou indentador e a superfície impressa no material.

O indentador tem forma [30, 33] piramidal, com um ângulo interno de 136° entre duas superfícies opostas. A marca imposta pelo penetrador no metal tem forma [15] de losango regular, conforme Figura 11.

Figura 11 – Marca impressa no metal pela ação de um indentador Vickers.



Fonte: [21].

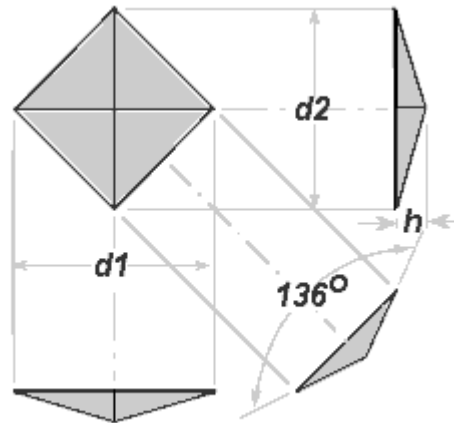
O valor da dureza Vickers é dado pela Equação 2 [15, 30, 33, 57, 63, 65].

³ “Consiste num grupo de 10 minerais, ordenados de 1 a 10. O diamante é classificado como o mais duro e possui o índice 10; o mais mole é o talco, classificado com o índice 1. Cada mineral da escala pode riscar todos aqueles abaixo do seu índice.” [46]

$$HV = \frac{2 \cdot F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{\bar{d}^2} \quad (2)$$

O valor de \bar{d} é definido a partir da Equação 3 [57, 63], conforme a Figura 12.

Figura 12 – Diagonais do losango impresso pelo indentedor.



Fonte: [65].

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3)$$

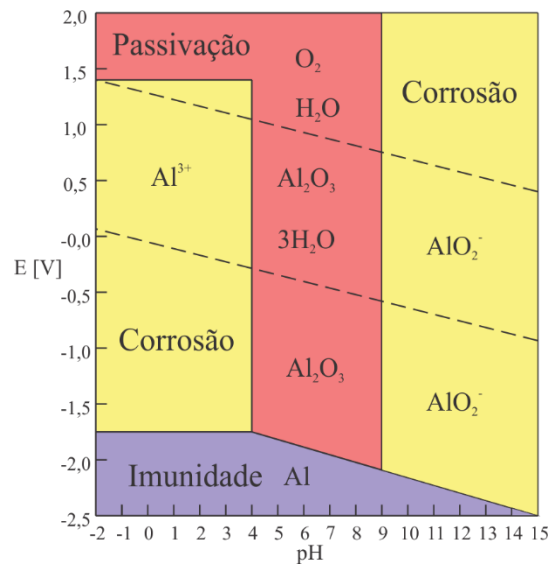
O processo de determinação de dureza Vickers apresenta algumas vantagens [15, 20], tais como a existência de apenas uma escala contínua de dureza, aplicável a toda gama de dureza e de materiais, não deformação do indentedor, impressões extremamente pequenas, podendo ser utilizados em amostras muito finas, além da grande precisão na medida.

2.7 Corrosão do alumínio e suas ligas

Apesar de suas propriedades de resistência à corrosão [20, 66, 67], o alumínio e suas ligas são passíveis de sofrer corrosão. Sua corrosão pode se dar tanto em meio ácido como alcalino, porém quando o pH do meio se situa na faixa $4 < \text{pH} < 9$, a oxidação do alumínio gera uma camada passivadora, a qual desacelera o processo corrosivo de forma significativa. A espessura desta camada varia de acordo com os elementos de liga e da temperatura do meio, ficando compreendida entre 2 nm e 3 nm para temperatura ambiente e pode chegar até 20 nm quando o metal é exposto à temperaturas acima de 400°C.

Para outros valores de pH, o alumínio se comporta de forma diferente. Quando o pH foge desta faixa, ocorre a solubilização do oxigênio e formação de íons Al^{3+} , quando o pH < 4 (meio é ácido), ou a formação de íons AlO_2^- quando o pH > 9 (meio é básico). Estas situações são evidenciadas no Diagrama de Pourbaix da Figura 13.

Figura 13 – Diagrama de Pourbaix do sistema alumínio água.



Fonte: adaptado de [20].

As formas mais corriqueiras de corrosão no alumínio e suas ligas [26] são:

- ❑ **Corrosão por pites:** surge na forma de pontos localizados, com cavidades superiores ao diâmetro, na superfície do metal, propagando-se tridimensionalmente.
- ❑ **Corrosão filiforme:** ocorre na forma de finos filamentos de baixa profundidade que se propagam ao longo da superfície do metal.

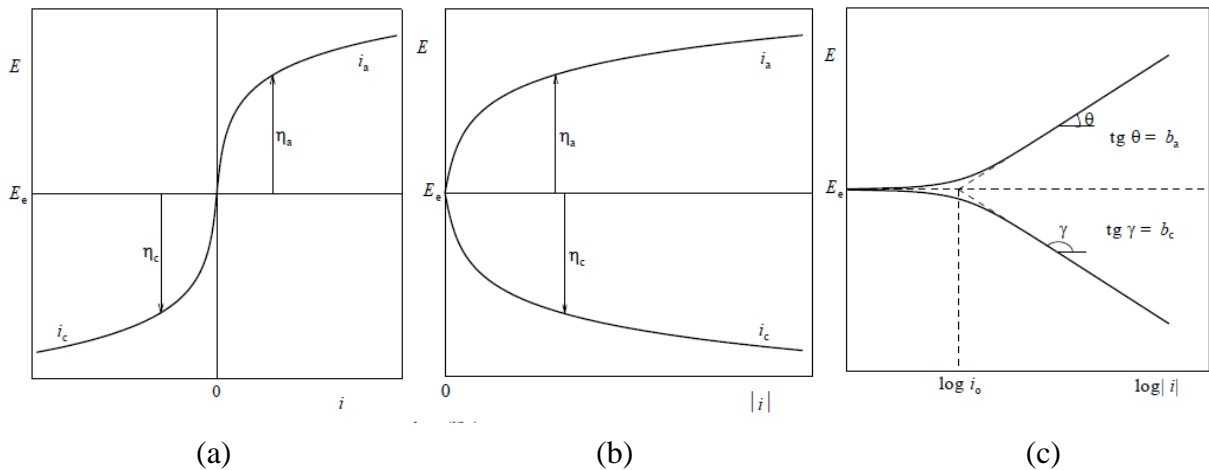
2.8 Ensaio eletroquímico

Dentre as técnicas mais utilizadas na determinação das características comportamentais de um metal [68], quanto à corrosão eletroquímica é a determinação das curvas de polarização através de técnicas potenciodinâmicas.

O potencial de corrosão de um metal [12, 69, 70] surge quando este, em um meio de baixa resistividade elétrica, assume um potencial elétrico. Tal potencial pode ser modificado mediante a um estímulo externo, alterando seu ponto de equilíbrio, podendo passar de catódico para anódico e vice-versa. Este potencial pode ser representado graficamente em potencial de

eletrodo *versus* densidade de corrente elétrica e consiste no ponto de intersecção das curvas de polarização anódica e catódica. Estas curvas podem ser representadas em valores absolutos, relativos ou em função do logaritmo da corrente elétrica, como ilustrado nas Figuras 14a-14c, respectivamente.

Figura 14 – Curvas de polarização anódica.

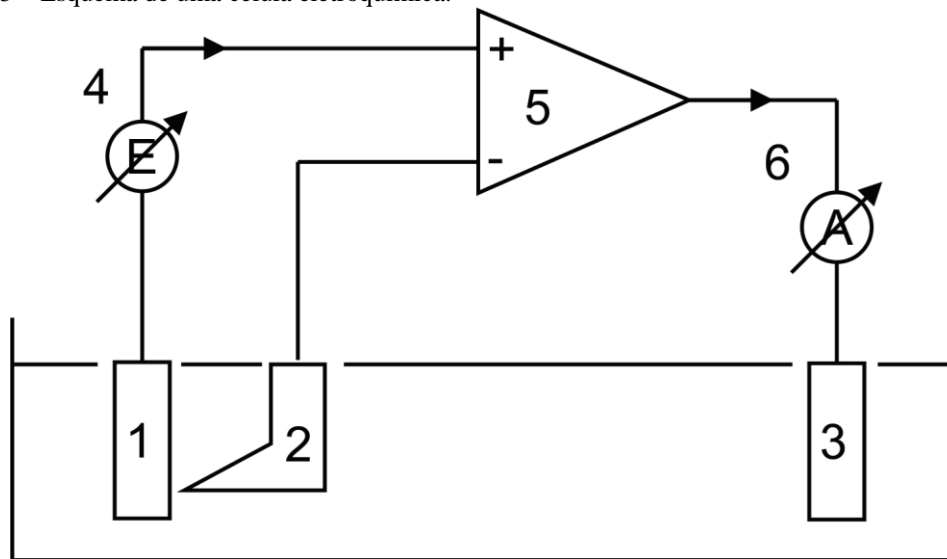


Fonte: [12, 70]

O equipamento capaz de gerar dados, a partir de um ensaio eletroquímico, para obtenção das curvas representadas na Figura 14, é o potenciostato. O potenciostato consiste em uma fonte de tensão elétrica externa variável, que em uma montagem adequada pode alterar o potencial de equilíbrio de forma forçada, de um metal em teste. Os terminais de um potenciostato são conectados aos eletrodos de trabalho ou corpo de prova, eletrodo de referência e contra eletrodo.

Internamente, o potenciostato funciona [71] de forma semelhante a um amplificador diferencial, onde apenas a diferença entre o potencial de trabalho (+) e o potencial de referência (-) é amplificada. Quando esta diferença é nula o ponto de equilíbrio foi alcançado. No eletrodo de trabalho é conectado uma fonte variável de tensão elétrica, a qual faz uma varredura de 0,17 mV, a partir do potencial de equilíbrio. Como a varredura acontece de forma suave, a polarização do corpo de prova segue da mesma forma, com um gradativo aumento da corrente elétrica. Quando o potencial de pite é atingido, a corrente elétrica cresce de forma repentina e o eletrodo de trabalho atinge a região transpassiva. A partir daí, a corrosão se inicia com a formação de pites. A medição de tensão elétrica é realizada sobre o corpo de prova e a medição de corrente elétrica é feita na saída do amplificador diferencial, medindo a corrente elétrica entre o corpo de prova e o contra eletrodo, [69] geralmente de platina ou grafite. Esquematicamente, o potenciostato é representado na Figura 15.

Figura 15 – Esquema de uma célula eletroquímica.

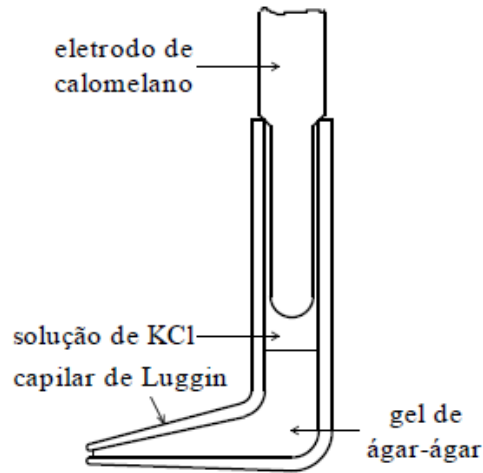


- 1 – eletrodo de trabalho
- 2 – eletrodo de referência
- 3 – contra eletrodo
- 4 – fonte de tensão variável
- 5 – potenciostato
- 6 – amperímetro

Fonte: adaptado de [71].

O eletrodo de referência [70] pode ser de calomelano (mercúrio coberto por uma pasta de Hg_2Cl_2 , imerso em um eletrólito contendo íons cloreto, normalmente KCl), prata-cloreto de prata (prata revestida de AgCl), cobre-sulfato de cobre (barra de cobre eletrolítico imersa numa solução saturada de sulfato de cobre) ou sulfato de potássio imerso em um composto de K_2SO_4 saturado. Este deve ficar a distância do eletrodo de trabalho entre 1 mm e 2 mm. A Figura 16 representa um eletrodo de calomelano.

Figura 16 – Disposição de um eletrodo de calomelano num capilar de Luggin.

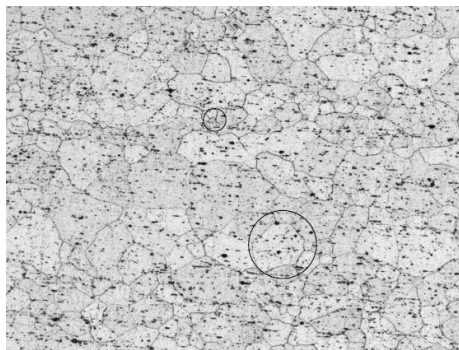


Fonte: [70].

2.9 Microscopia ótica

A microscopia ótica [15, 20, 34, 56] é uma das técnicas mais utilizadas na visualização da microestrutura, porosidades, inclusões, e contornos de subgrãos (em alguns casos). Também é possível a visualização de precipitados [29, 36, 72, 73], como exemplificado na Figura 17.

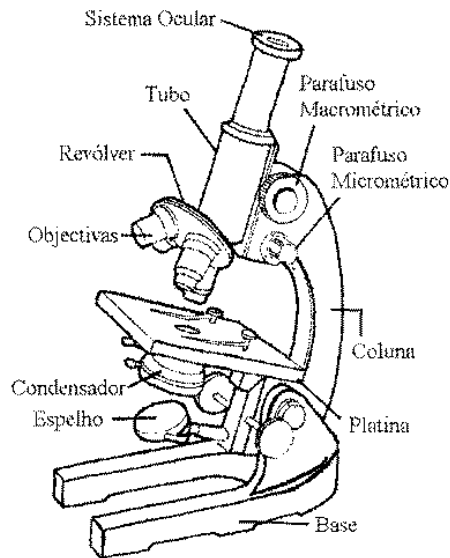
Figura 17 – Imagens de precipitados (pontos pretos) de Mg_2Si em ligas de alumínio 6063 T6, obtidas por microscopia ótica.



Fonte: [56].

Esta técnica possibilita [30] a ampliação de amostras ou suas partes através da incidência de luz sobre o material. O reflexo desta luz passa por um conjunto de lentes, que amplia a imagem, aumentando o poder de resolução do olho humano. A capacidade de ampliação de uma amostra, ou parte dela, do microscópio ótico é da ordem de [15] 1500 vezes ou [30] 0,2 μm . A Figura 18 exemplifica um microscópio ótico.

Figura 18 – Exemplo de um microscópio ótico.



Fonte: [30].

As amostras metálicas para microscopia ótica devem possuir superfície com o melhor acabamento possível, seguidas de um ataque químico para revelar a microestrutura em análise.

O acabamento das amostras metálicas [15, 30, 34] se dá por sucessivas operações de lixamento, com lixas de diferentes granulometrias, de forma crescente. Logo após as amostras são polidas e atacadas quimicamente.

2.10 Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva

A MEV [26, 33] permite a caracterização e a observação de estruturas em escala nanométrica, da ordem de 2 nm a 5nm, através de um bombardeio da amostra por um feixe de elétrons que varre a área em análise. Permite a caracterização [76] tridimensional de uma amostra e o exame com grande profundidade de foco em pequenos aumentos.

A interação do feixe eletrônico com o corpo de prova [26, 33] produz alguns tipos de sinais, como elétrons secundários, de Auger⁴ e retroespalhados e também raio X. O MEV faz uso dos elétrons secundários e retroespalhados, os quais interagem na superfície, permitindo, por exemplo, a identificação de partículas de segunda fase nas ligas de alumínio.

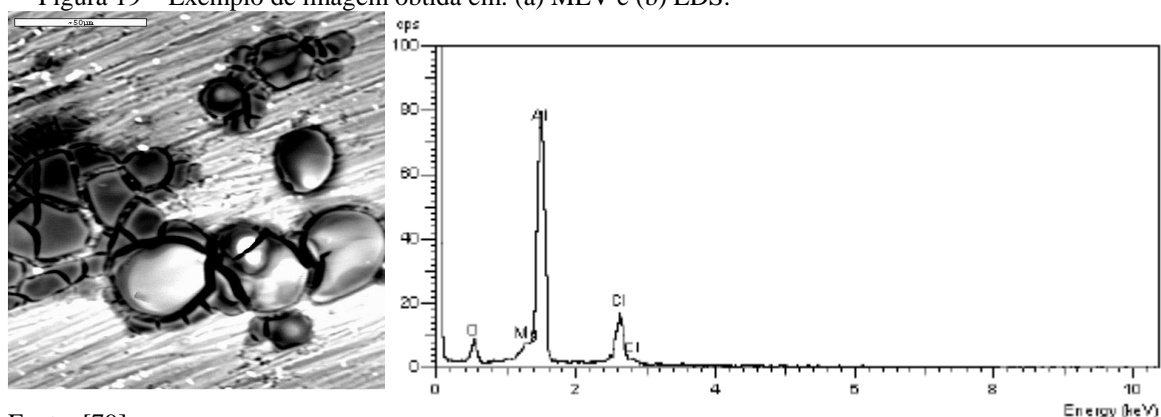
Geralmente acoplada à MEV, a EDS [26, 33] é uma técnica de caracterização qualitativa da composição química de uma amostra através da análise dos sinais de raio X emitidos.

⁴ Em homenagem ao físico francês Pierre Victor Auger (1899 – 1993), consiste no elétron que liberado pela energia transmitida por um elétron anteriormente liberado. [77, 78]

Na EDS, a excitação atômica se dá quando o feixe eletrônico atinge a amostra, emitindo fótons quando retornam ao estado fundamental. A identificação destes fótons é quantificada e mensurada por um detector de raios X, localizado no interior de uma câmara de vácuo. A partir da aquisição desta quantidade de energia, um sistema de *hardware* e *software* representa graficamente esta energia, em keV, em função de sua quantidade, desta forma identificando a composição química da amostra.

Na Figura 19 estão representados uma imagem de MEV e outra de EDS.

Figura 19 – Exemplo de imagem obtida em: (a) MEV e (b) EDS.



Fonte: [79].

2.11 Raio X

A descoberta dos raios X [65, 80, 81] pelo físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923), na tentativa de detectar a radiação eletromagnética de alta frequência, a qual foi prevista por outro físico alemão, Heinrich Rudolf Hertz (1857-1854), se deu através da repetição do experimento de Joseph John Thompson (1856-1940), na tentativa de determinar o alcance dos raios catódicos, emitidos pelos tubos de Crookes⁵. Roentgen percebeu que mesmo cobrindo o tubo de raios catódicos com um papelão pintado de preto, em uma sala escura, ainda assim a fluorescência de uma placa revestida com $\text{Ba}[\text{Pt}(\text{CN})_4]$, em uma das faces, se iluminava, independentemente de sua posição.

Roentgen [79], após algumas observações, concluiu que sua descoberta consistia em um novo tipo de luz invisível, com poder de penetração tal que a mesma poderia atravessar corpos opacos.

Ela produzia luminescência em certos materiais fluorescentes, sensibilizava chapas fotográficas, mas em si era invisível ao olho humano, não parecia sofrer refração, nem

⁵ Em homenagem ao cientista William Crookes (1832-1919). [80, 84]

reflexão, nem polarização. Não se tratava de luz (por ser invisível e atravessar grandes espessuras de madeira ou papel), não era igual aos raios catódicos (não sofria desvio com ímãs e tinha poder de penetração muito superior), nem aos raios ultravioleta ou infravermelho (pelo seu poder de penetração). [79]

Os raios X são [65, 81, 82] radiações eletromagnéticas de alta energia, com comprimento de onda [83] cerca de mil vezes menor que o da luz visível, com origem nas transições eletrônicas de níveis e subníveis mais internos de um átomo. Estas radiações podem se apresentar de duas formas: interações nucleares e freamento.

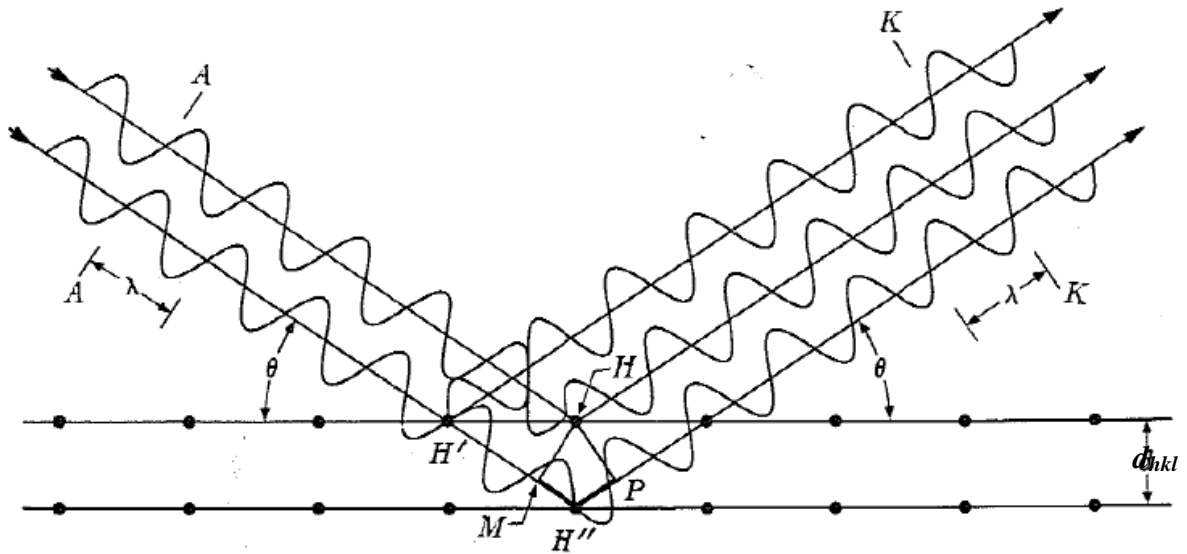
2.11.1 Difratometria de raio X

Para que ocorra a difração [65, 85], uma onda de raios X, ao encontro de um obstáculo, deve ser dispersada com espaçamentos dimensionalmente compatíveis com o comprimento da onda. Quando estas ondas se reencontram e há uma correspondência de um número inteiro entre seus comprimentos de onda, ocorre um reforço em sua amplitude, manifestando assim o fenômeno da difração.

Considerando dois planos atômicos paralelos entre si e com o mesmo índice de Miller⁶ h, k e l , separados por uma distância interplanar d_{hkl} , conforme a Figura 20, onde há a difração de ondas em fase em A, as quais podem ser refletidas em H ou H' e ainda permanecendo em fase em K, mesmo sendo também refletidas em planos subsuperficiais. Isto ocorrerá somente se a distância MH'P for um múltiplo inteiro do comprimento de onda dos raios X.

⁶ Define as famílias de planos em uma rede de Bravais (Auguste Bravais, 1811-1863), que é a combinação de células unitárias de uma rede cristalina, as quais apresentam as mesmas características de um sólido formado pela combinação de várias destas células. [86]

Figura 20 – Difração de raio X.



Fonte: adaptado de [85].

Através de uma análise da geometria destes pontos, se estabelece a Lei de Bragg, como representado na Equação 6.

$$\lambda = 2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin \theta \quad (6)$$

A distância entre estes planos [74], assim como os parâmetros de rede, se CCC ou CFC, são funções dos índices de Miller. A distância entre os planos pode ser determinada através da Equação 7, para uma estrutura cúbica.

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (7)$$

Uma forma de simplificar a análise dos resultados de difração de raio X em células cúbicas unitárias é através da combinação das Equações 6 e 7, obtendo-se a Equação 8.

$$\lambda = \frac{2 \cdot a \cdot \sin \theta}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (8)$$

A Equação 8 pode ser usada na determinação da estrutura cristalina, ou seja, se é cúbica simples, CCC ou CFC. Na rede cúbica simples, são possíveis reflexões por todos os planos, diferenciando-se das estruturas CCC, onde a difração ocorre pelos planos cuja soma dos índices de Miller seja um número par, e da estrutura CFC, onde os planos difratores são aqueles cujos

índices de Miller são todos pares (inclusive zero) ou todos ímpares. Para a determinação da estrutura cristalina rearranjam-se os termos da Equação 6 e posteriormente eleva-se ambos lados da equação ao quadrado, conforme a Equação 9.

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2 \cdot (h^2 + k^2 + l^2)}{4 \cdot a^2} \quad (9)$$

Através da análise de dados [86, 87] obtidos em um ensaio de difração de raio X, uma certa quantidade de planos difratores são reveladas, cada uma representada por um ângulo duplo. Como o comprimento de onda da radiação incidente e o parâmetro de rede são constantes, pode-se associar dois planos difratores, através do quociente entre os termos previstos na Equação 7, respectivos a cada plano. O resultado desta divisão revelará se a estrutura cristalina é do tipo CCC, se for 0,5, ou CFC, se for 0,75. Esta análise é descrita pela Equação 10.

$$\frac{\sin^2 \theta_A}{\sin^2 \theta_B} = \frac{h_A^2 + k_A^2 + l_A^2}{h_B^2 + k_B^2 + l_B^2} \quad (10)$$

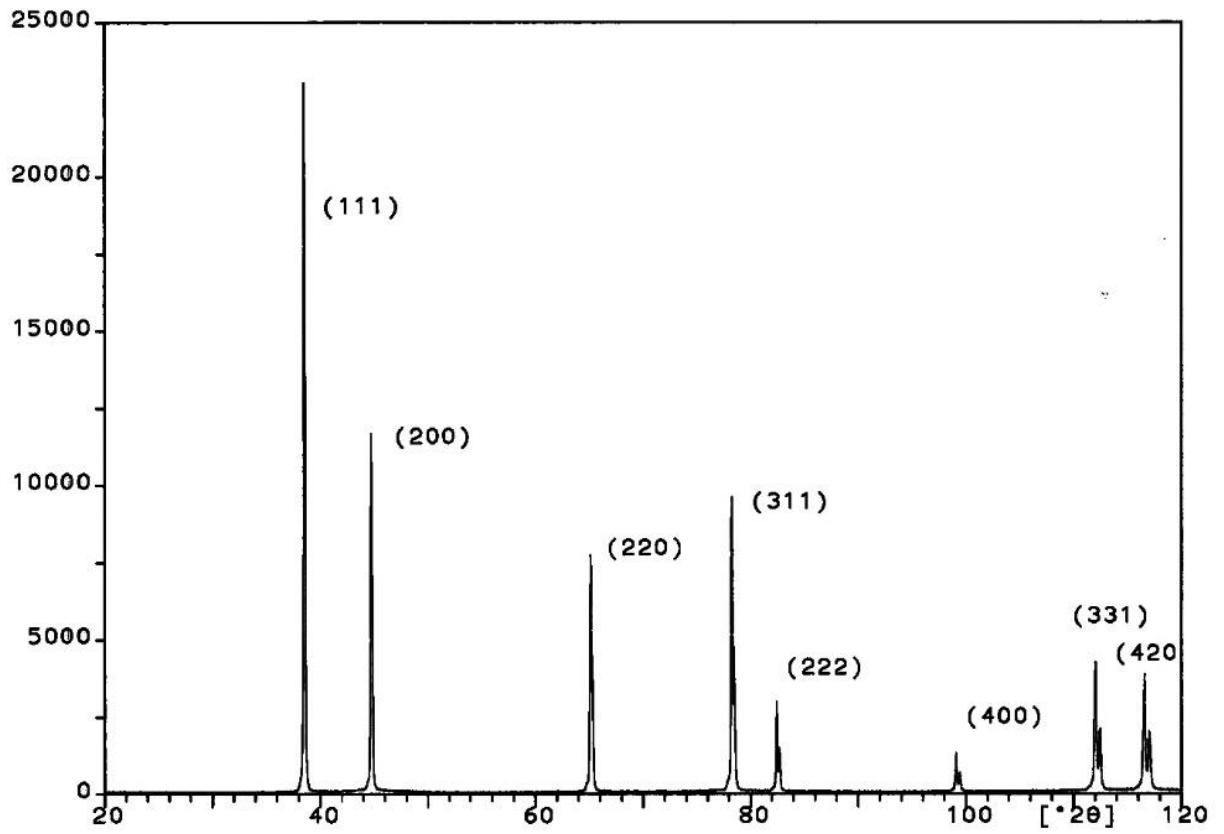
Os parâmetros de rede dos reticulados estão relacionados com o raio atômico e são determinados pelas Equações 11 (CCC) e 12 (CFC).

$$a = \frac{4 \cdot r}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

$$a = \frac{4 \cdot r}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

Um resultado de DRX para o alumínio, com seus respectivos índices de Miller, é exemplificado na Figura 21.

Figura 21 – Difratoograma do alumínio.

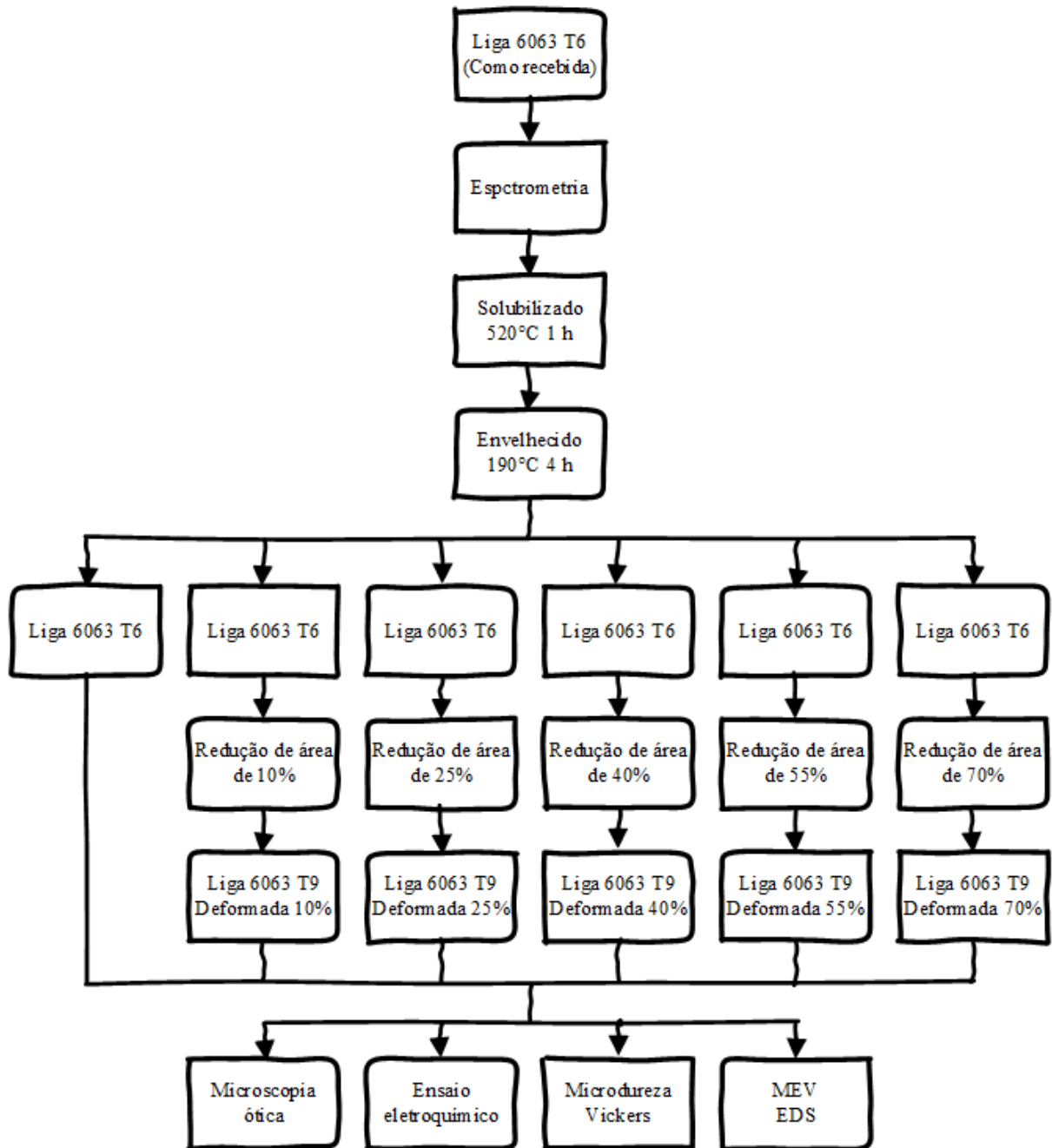


Fonte: adaptado de [88].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado conforme a sequência apresentada nas Figuras 22 e 23. O fluxograma da Figura 23 não contempla os ensaios de DRX.

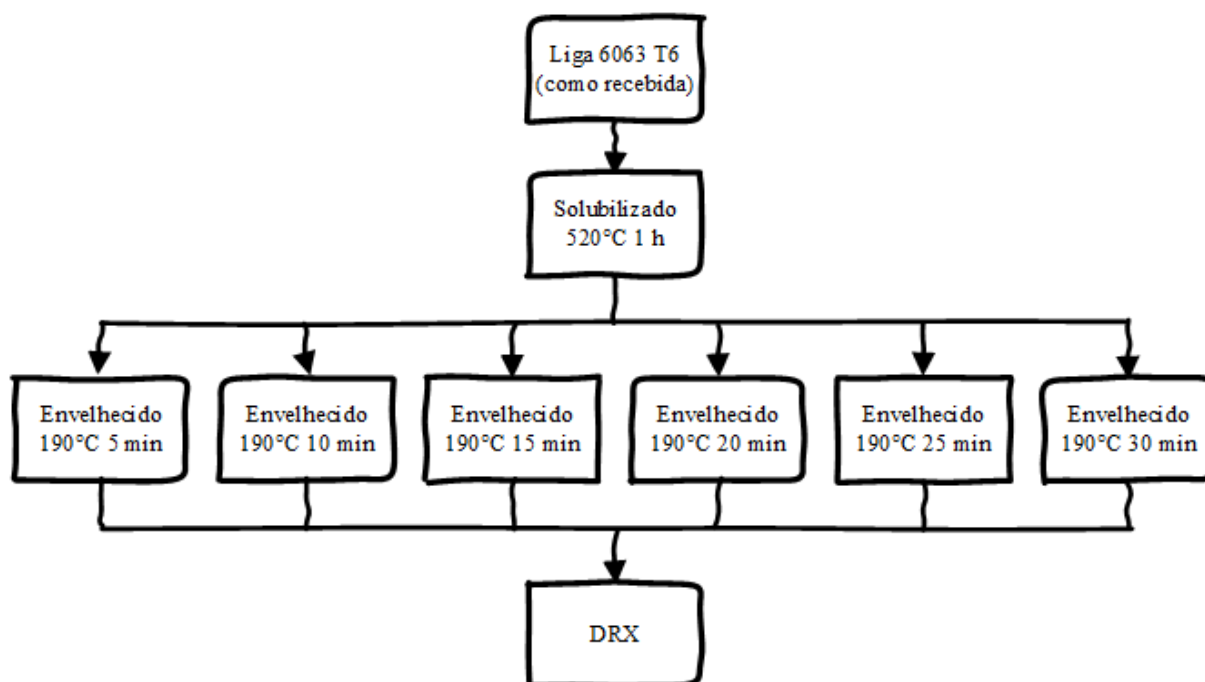
Figura 22 – Fluxograma de ensaios 1.



Fonte: próprio autor.

Os ensaios de difratometria de raio X, por apresentarem um foco diferente, não atrelado aos aspectos superficiais da liga, ocorreram conforme a sequência exposta no fluxograma da Figura 23.

Figura 23 – Fluxograma de ensaios 2.



Fonte: próprio autor.

3.1 Matéria prima

A matéria prima para os corpos de prova são constituídas de barras com 35 mm de largura, 6 mm de espessura e 760 mm de comprimento, fabricadas de uma liga de alumínio 6063.

A comprovação dos elementos constituintes da liga foram realizados no espectrômetro da marca Oxford, modelo Foundry-Master Pro, pertencente ao Laboratório de Inspeção da Escola de Engenharia da FURG.

A Tabela 9 mostra a composição química da liga de alumínio 6063. O relatório completo do ensaio de espectrometria se encontra no Apêndice A deste documento.

Tabela 9 – Composição química da liga estudada.

Composição percentual em peso da liga 6063									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	Restante
0,594	0,231	0,009	0,016	0,390	0,004	0,007	0,022	98,70	0,027

Fonte: próprio autor.

Conforme os dados da Tabela 9, constata-se que a liga estudada possui excesso de Si, o qual é compensado pela adição de Mn, Cr e Zn. A quantidade de Mg_2Si é inferior a 1,5%, conforme se espera de uma liga de alumínio 6063. Também percebe-se a quantidade significativa de ferro na composição química da liga.

Para confecção das amostras, as barras foram cortadas conforme a necessidade dimensional para cada tipo de ensaio. Os cortes foram realizados no Laboratório de Usinagem da Escola de Engenharia da FURG.

3.2 Tratamentos térmicos

Após o corte, as amostras passaram por tratamentos térmicos de solubilização a $520^{\circ}C$ pelo tempo de 1 h, seguido de resfriamento rápido em água em grande quantidade, para assegurar a manutenção da temperatura.

Como os tratamentos térmicos foram realizados em um único forno, após a têmpera os corpos de prova foram levados à um freezer e lá mantidos até o resfriamento do forno a uma temperatura abaixo dos $190^{\circ}C$.

Reduzida a temperatura no forno, as amostras receberam o tratamento térmico de envelhecimento artificial, à uma temperatura de $190^{\circ}C$ por 4 h. Decorrido o tempo de envelhecimento, as amostras resfriaram em temperatura ambiente. Para o toque, foram necessários menos de 3 min de resfriamento, possibilitando levar as amostras para o tratamento mecânico a frio.

O aumento da temperatura, para ambos tratamentos térmicos, se deu a uma taxa de $20^{\circ}C/min$.

Depois de resfriados, parte dos corpos de prova foram separados, pois neste estágio já constituem a liga de alumínio 6063 T6. Estes foram armazenados em um freezer para desacelerar ao máximo o processo de envelhecimento natural.

O forno utilizado nos tratamentos térmicos foi da marca EDG, modelo EDG10P-S, ilustrado na Figura 24, pertencente ao Laboratório de Metalurgia da Escola de Engenharia da FURG.

Figura 24 – Forno EDG, modelo EDG10P-S.



Fonte: próprio autor.

3.3 Tratamento mecânico

O material que seguiu para o tratamento mecânico passou por laminação entre dois rolos de uma calandra piramidal, com motor de 10 CV, rolo superior de 140 mm de diâmetro e rolos inferiores de 120 mm de diâmetro, ilustrada na Figura 25. Os rolos possuem 2 m de comprimento e a movimentação do rolo superior se dá de forma manual. Os corpos de prova tiveram reduções de área da seção transversal de 10%, 25%, 40%, 55% e 70%. Para a medição da altura das amostras, antes e depois da laminação, foram utilizados um paquímetro e um micrômetro.

Figura 25 – Calandra piramidal utilizada no tratamento mecânico das amostras.



Fonte: próprio autor.

Após o tratamento mecânico, as amostras passaram do tratamento T6 para o T9, com seus respectivos graus de deformação.

Cada grupo de corpo de prova foi construído levando em consideração cada ensaio, sendo os mesmos tratados termicamente e mecanicamente de forma a ficarem o menor tempo possível prontos e parados, devido ao processo de envelhecimento natural do alumínio.

Durante a laminação, as peças que tiveram uma redução maior de área apresentaram um empenamento. Após uma análise do processo, verificou-se que este fenômeno se deu devido à diferença de diâmetros dos cilindros da calandra utilizada como laminadora. Este fato foi corrigido com utilização de menores reduções por passe, juntamente com a rotação nas direções paralela e perpendicular ao eixo dos cilindros, de forma alternada, uma rotação em uma direção a cada passe.

Das amostras que apresentaram maior empenamento, foram utilizadas as regiões centrais, as quais apresentaram um empenamento muito reduzido em relação às extremidades. O empenamento que se manteve presente, após o corte das amostras, foi removido no processo de lixamento. As amostras com menor grau de deformação (10% e 25%) não apresentaram empenamento.

Os tratamentos mecânicos foram realizados no Laboratório de Conformação da Escola de Engenharia da FURG.

3.4 Preparação da superfície

Terminados os tratamentos térmicos e mecânicos, as amostras foram preparadas de forma a obter uma superfície plana e brilhante, através de lixamento de desbaste e acabamento, com lixas de granulometrias FEPA 120, 240, 400, 1000 e 2000, respectivamente. Para prover um melhor acabamento aos corpos de prova, com a eliminação dos riscos do processo anterior de lixamento, para o lixamento seguinte as amostras eram rotacionadas em 90°, até a última lixa.

Após a lixamento, as amostras foram polidas com grãos abrasivos de diamante, de granulometria 1 µm e 0,6 µm, lubrificados com lubrificante vermelho. O polimento na maioria das vezes foi executado por politrizes da marca Buehler, modelo MiniMet™ 1000 Grinder-Polisher e uma da marca Prazis. Também algumas amostras passaram pelo polimento manual, com pasta 0,6 µm e algodão.

A preparação da superfície dos corpos de prova foram realizadas no Laboratório de Metalografia da Escola de Engenharia da FURG.

3.5 Microscopia ótica

Os corpos de prova destinados aos ensaios eletroquímicos e microscopia ótica foram embutidos (à frio) em resina, antes de passarem pelas operações de lixamento e polimento, para que os efeitos térmicos do embutimento em baquelite, o qual requer uma temperatura de 120°C para processar o embutimento, permanecendo em uma temperatura elevada por mais de uma hora, não alterassem, de forma significativa, a estrutura cristalina obtida pelos tratamentos térmicos e mecânico. O processo de embutimento à frio também envolve uma certa elevação na temperatura do corpo de prova no momento da polimerização, porém está se dá forma menos intensa e em um menor espaço de tempo.

Para o ataque das amostras, inicialmente foram utilizados alguns reagentes Keller [9] e o Barker [20], os quais não apresentaram um resultado satisfatório. Com um ataque de um composto de 3 ml de HF diluído em 98 ml de água se obteve o resultado desejado. Quanto mais encruada a amostra, maior foi o tempo necessário ao ataque químico, que durou entre 3 min e 20 s e 5 min.

A Figura 26 ilustra uma destas amostras antes de ser dado o acabamento necessário.

Figura 26 – Corpo de prova para MO (superfície ainda não trabalhada).



Fonte: próprio autor.

Foram obtidas imagens com ampliações de 50x, 100x, 200x e 500x.

O equipamento utilizado foi um microscópio ótico de luz refletida com aquisição de imagens da marca Olympus, modelo GX51, representado na Figura 27. O *software* utilizado foi o *analySIS FIVE function*. Este equipamento pertence ao Laboratório de Metalografia da FURG.

Figura 27 – Microscópio ótico Olympus GX51.



Fonte: [89].

3.6 MEV/EDS

As amostras destinadas aos ensaios de MEV e EDS foram as mesmas utilizadas na MO, porém com a resina removida. Estas amostras também tiveram a superfície polida e atacada novamente. O ataque para as amostras sem tratamento mecânico e as com tratadas mecanicamente com os graus de deformação de 10%, 25% e 40% foram atacadas da mesma forma do que as amostras destinadas à MO. Já a amostra com grau de deformação de 55% foi atacada com uma solução de 20 ml de HF e 80 ml de H₂O, durante 55 s. A última amostra, com grau de deformação de 70%, foi atacada com uma solução composta por 20 ml de HF e 120 ml de H₂O, por 1 min e 10 s.

O equipamento utilizado, tanto para MEV, quanto para EDS, foi o Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Jeol, modelo JSM 6610LV, com *software* próprio, ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - Microscópio Eletrônico de Varredura Jeol, modelo JSM 6610LV.



Fonte: [90].

3.7 Ensaios de microdureza Vickers

Os corpos de prova para os ensaios de microdureza foram preparados conforme descrito no item 3.1, porém um cuidado foi tomado devido às características do equipamento.

Como o equipamento é altamente sensível ao movimento da amostra durante o ensaio, com risco de quebra do indentador, as amostras foram lixadas com o cuidado de girar 180° a cada determinado número de passes, em uma mesma lixa, no intuito de eliminar desvios decorrentes da não homogeneidade na pressão exercida sobre a lixa, já que o lixamento se deu

de forma manual. Desta forma, o paralelismo entre as superfícies superior e inferior foram mantidas o mais próximo do ideal possível.

A carga utilizada foi de 0,2 kg, durante 10 s e suas marcas ficaram distantes de 250 μm .

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados no microdurômetro da marca Shimadzu, modelo HMV 2T, ilustrado na Figura 29 pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos da Escola de Engenharia da FURG.

Figura 29 – Microdurômetro Shimadzu HMV 2T.



Fonte: [91].

3.8 Ensaio potenciodinâmico

Para este ensaio, os corpos de prova, após o embutimento, foram furados axialmente para instalação de um condutor para a conexão com o equipamento, conforme Figura 30. Após a instalação do condutor o furo foi fechado e vedado com massa epóxi bicomponente da marca Poxilina®.

Figura 30 – Corpo de prova para ensaio potenciodinâmico: (a) detalhe do metal embutido; (b) detalhe da vedação.



(a)

(b)

Fonte: próprio autor.

O tipo de ensaio com uma varredura linear, após a estabilização do potencial aberto do sistema. O potencial de partida para a varredura foi -2 V, finalizando em 2 V. A velocidade de varredura foi $0,01$ V/s, com um passo de $0,001$ V. O tempo aproximado de cada ensaio foi de 6 min e 40 s.

O eletrólito utilizado foi NaCl com concentração de $0,5$ mol/dm³. O eletrodo de referência de K₂SO₄ conectado ao eletrólito principal através de um capilar de Luggin, que continha um composto saturado de K₂SO₄. O contra eletrodo de platina, formado por com área exposta equivalente ao triplo da área dos eletrodos de trabalho.

O equipamento utilizado foi o potenciostato da marca PalmSens, modelo EmStat2, ilustrado na Figura 31. O *software* responsável pela compilação dos dados foi o PsTrace.

Figura 31 – Potenciostato PalmSens EmStat2 e a tela do *software* PsTrace.



Fonte: [92].

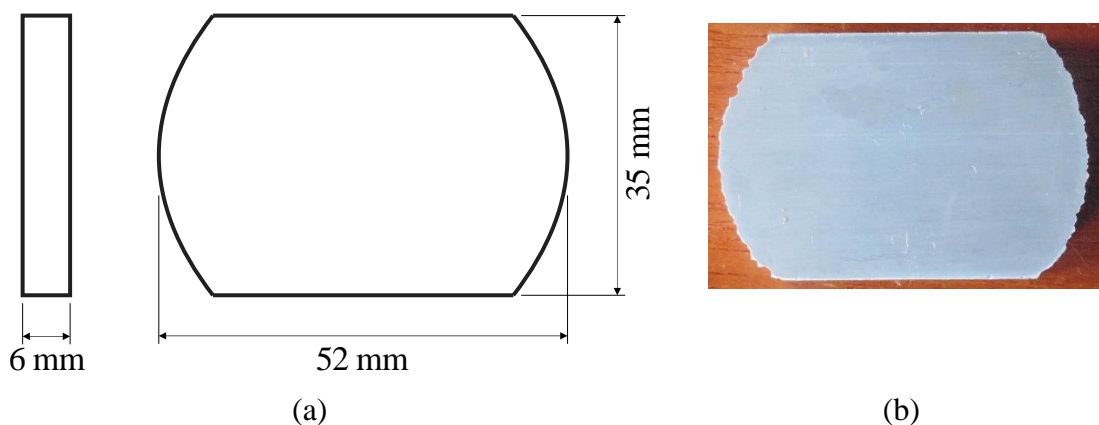
3.9 Difractometria de raio X

A diferenciação quanto à difratometria de raio X, Figura 23, foi devido ao processamento dos corpos de prova possuírem um caráter diferente.

Em uma primeira análise este problema foi resolvido com a fabricação de um molde de PVC para embutimento das amostras com as dimensões da base para colocação dos pós. Foi embutida uma amostra de uma liga de alumínio 6063 T6 e o ensaio foi realizado com sucesso.

Posteriormente ficou constatado a não necessidade de embutimento dos corpos de prova, já que as matérias primas para os corpos de prova são barras de 6 mm de espessura, 35 mm de largura e 760 mm de comprimento e o base para os pós do difratômetro possui 51,6 mm de diâmetro e a área ensaiada 25 mm de diâmetro. Como o suporte do equipamento possui abas na parte superior para fixar o porta amostras original e abaixo deste há uma base plana que pressiona o porta amostras contra as abas (por ação de uma mola), foi possível a elaboração de corpos de prova, conforme a Figura 32, com dimensões que pudessem ser suportadas de forma rígida pelo equipamento, sem a necessidade do embutimento inicial, facilitando o trabalho. O corte das extremidades foi realizado em serra de fita, já que a qualidade do corte não influenciaria o resultado do ensaio.

Figura 32 – Corpo de prova para ensaios DRX: (a) dimensões; (b) imagem.



Fonte: próprio autor.

O passo utilizado nos ensaios foi de $0,1^\circ$, variando 20° a 80° , com um tempo de 9 min 34,44 s. O comprimento de onda foi 0,15418 nm.

O equipamento utilizado foi difratômetro de raio X da marca MRL, modelo Philips X'PERT MPD, representado na Figura 33, o qual fica acondicionado em uma sala com controle

de temperatura e umidade relativa do ar. O difratômetro de raio X fica no CEME-SUL da FURG.

Figura 33 – Difratômetro de raio X MRL Philips X'PERT MPD.



Fonte: [93].

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cada ensaio foi realizado com todos os tipos de corpos de prova, exceto o DRX, pois seu resultado não depende dos tratamentos mecânicos sofridos pela liga.

Os resultados obtidos em cada tipo de ensaio serão representados nos subitens que segue.

4.1 Microscopia ótica

As imagens obtidas por microscopia ótica se encontram nas Figuras 34-39.

A Figura 34 consiste na liga de alumínio 6063 com tratamento térmico T6 (sem tratamento mecânico), ampliada 100 vezes.

Figura 34 – Imagem da liga 6063 T6, ampliada 100x.

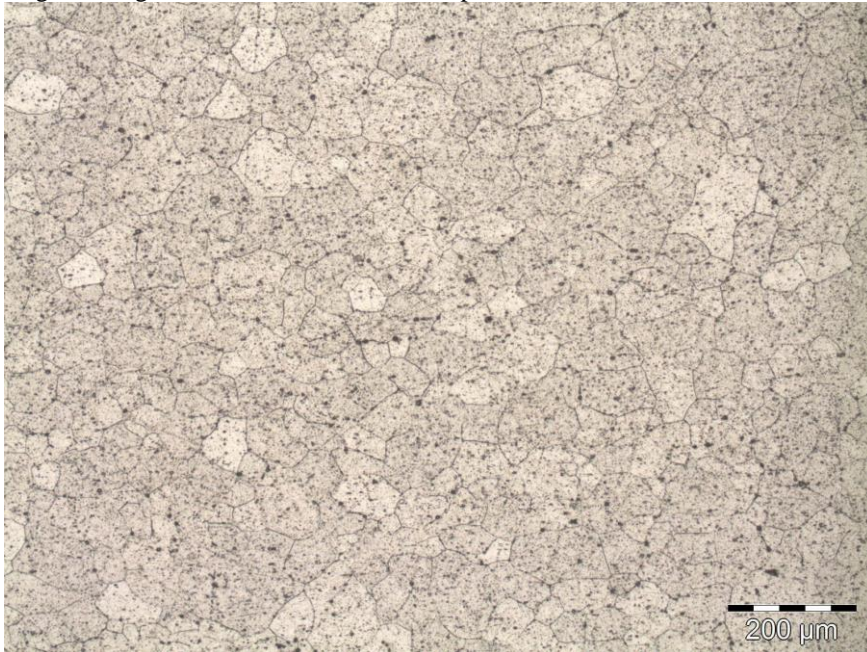


Fonte: próprio autor.

A Figura 34 apresenta tamanho e forma de grãos semelhantes aos apresentados por Alejandro (2007) [56]. Também fica evidente a formação dos precipitados de Mg₂Si, representados pelos pontos pretos.

A Figura 35 consiste na liga de alumínio 6063 com tratamento térmico T9, com grau de deformação de 10%, ampliada 100 vezes.

Figura 35 – Imagem da liga 6063 T9 encruada 10%, ampliada 100x.

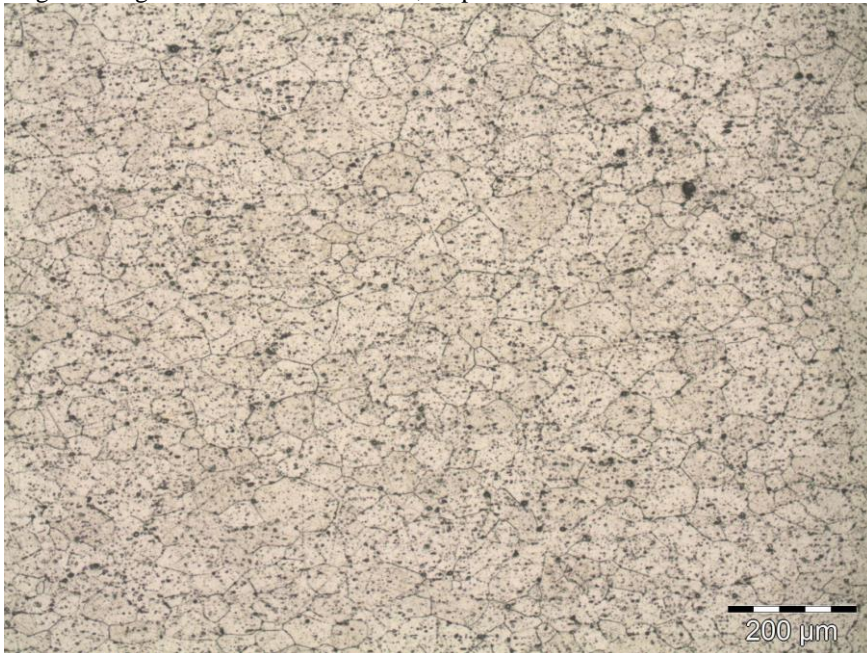


Fonte: próprio autor.

Comparando-se as Figuras 34 e 35, não é possível verificar a diferença entre as dimensões dos grãos, bem como a direção da laminação.

A Figura 36 consiste na liga de alumínio 6063 com tratamento térmico T9, com grau de deformação de 25%, ampliada 100 vezes.

Figura 36 – Imagem da liga 6063 T9 encruada 25%, ampliada 100x.



Fonte: próprio autor.

Comparando-se as Figuras 34, 35 e 36, ainda não é possível verificar a diferença entre as dimensões dos grãos, bem como a direção da laminação.

A Figura 37 consiste na liga de alumínio 6063 com tratamento térmico T9, com grau de deformação de 40%, ampliada 100 vezes.

Figura 37 – Imagem da liga 6063 T9 encruada 40%, ampliada 100x.



Fonte: próprio autor.

Com um grau de deformação de 40%, percebe-se claramente a direção da laminação, a partir da orientação dos grãos da Figura 37.

Verifica-se, na Figura 37, um início de deficiência na visualização da amostra por MO, devido à dificuldade crescente no ataque da liga com o aumento do grau de deformação.

A Figura 38 consiste na liga de alumínio 6063 com tratamento térmico T9, com grau de deformação de 55%, ampliada 100 vezes.

Figura 38 – Imagem da liga 6063 T9 encruada 55%, ampliada 100x.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 38 percebe-se a direção da orientação dos grãos para um grau de deformação de 55%. Também verifica-se um pequeno alongamento dos intermetálicos de Mg_2Si .

A continuidade no aumento da taxa de deformação torna ainda mais difícil a visualização da amostra por MO.

A Figura 39 consiste na liga de alumínio 6063 com tratamento térmico T9, com grau de deformação de 70%, ampliada 100 vezes.

Figura 39 – Imagem da liga 6063 T9 encruada 70%, ampliada 100x.



Fonte: próprio autor.

Nota-se na evolução da deformação na Figura 39, bem como a perda de qualidade da imagem, devido à deformação.

Comparando as Figuras 34-39, percebe-se um aumento gradativo da elongação média dos grãos, comprovando a existência do encruamento, como Espósito (2006) e Ferrari (2008) [15, 30].

4.2 Microscopia eletrônica de varredura/Espectroscopia de energia dispersiva

Na Figura 40 estão representados os resultados obtidos por MEV e EDS, para todas as ligas trabalhadas.

Figura 40 – Imagens obtidas por MEV e EDS da liga de alumínio 6063: (a) T6; (b) T9 encruada 10%; (c) T9 encruada 25%; (d) T9 encruada 40%; (e) T9 encruada 55%; (f) T9 encruada 70%; (g) T9 encruada 55%; (h) T9 encruada 70%.

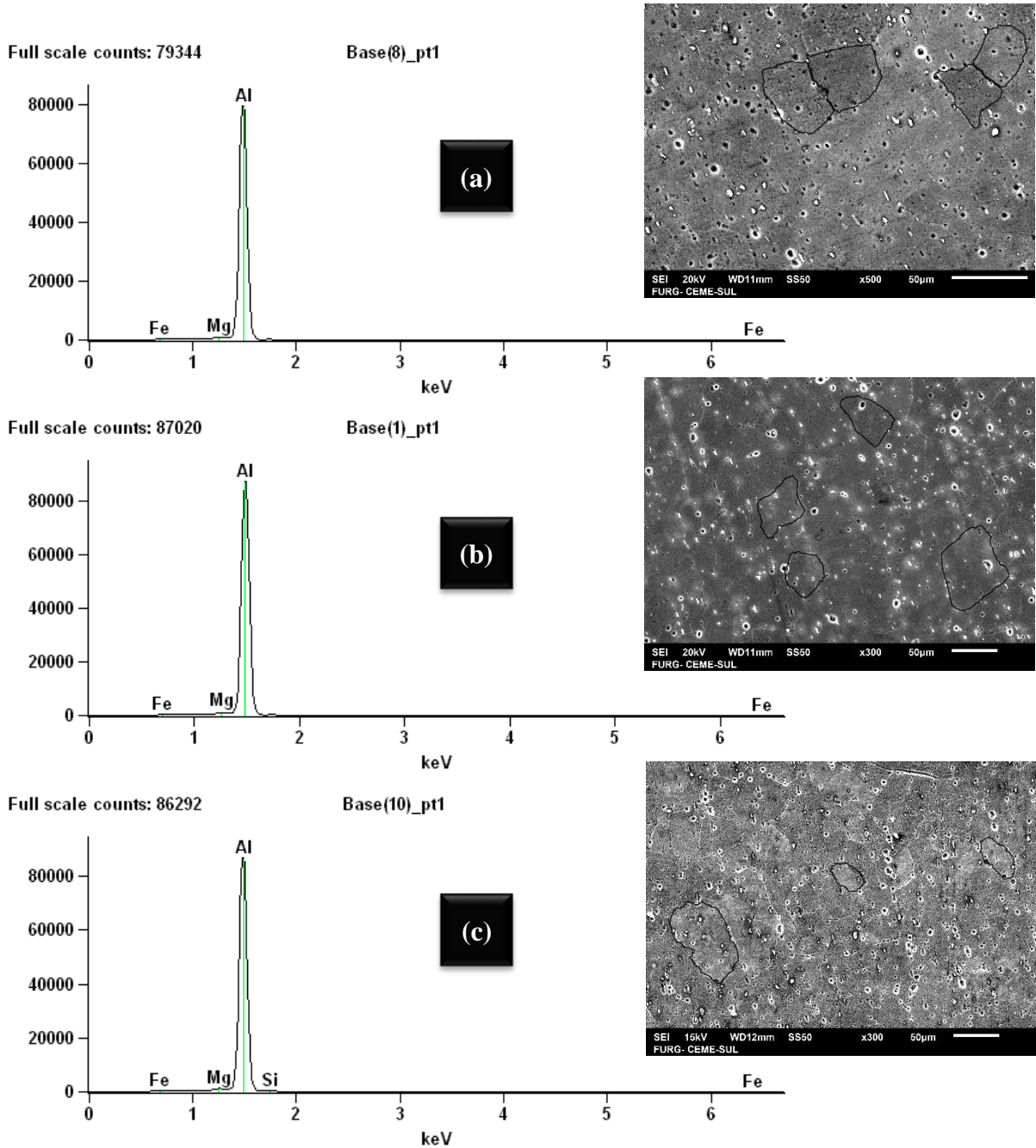
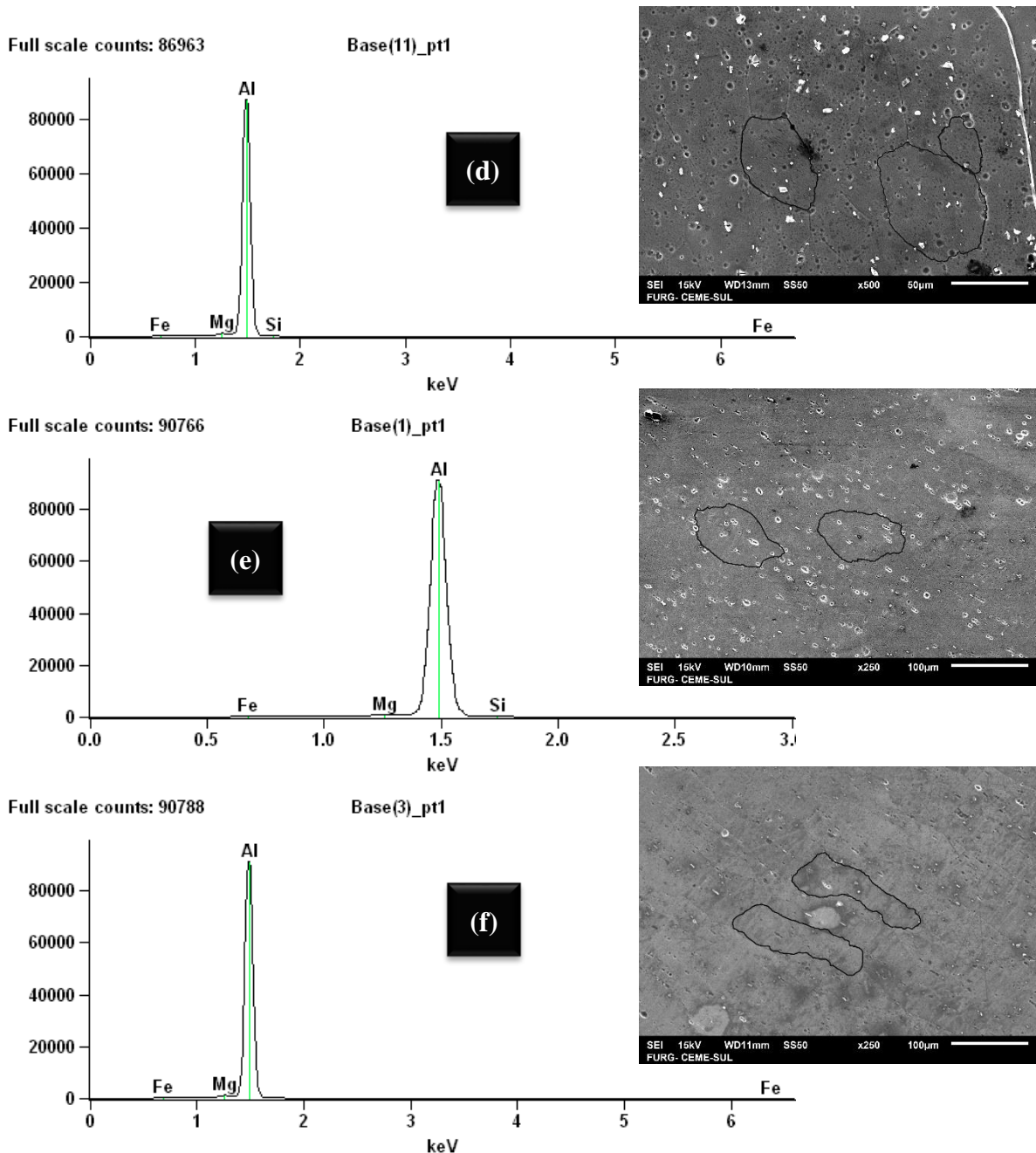


Figura 40 – Imagens obtidas por MEV e EDS da liga de alumínio 6063: (a) T6; (b) T9 encruada 10%; (c) T9 encruada 25%; (d) T9 encruada 40%; (e) T9 encruada 55%; (f) T9 encruada 70%; (e) T9 encruada 55%; (f) T9 encruada 70%. (continuação)

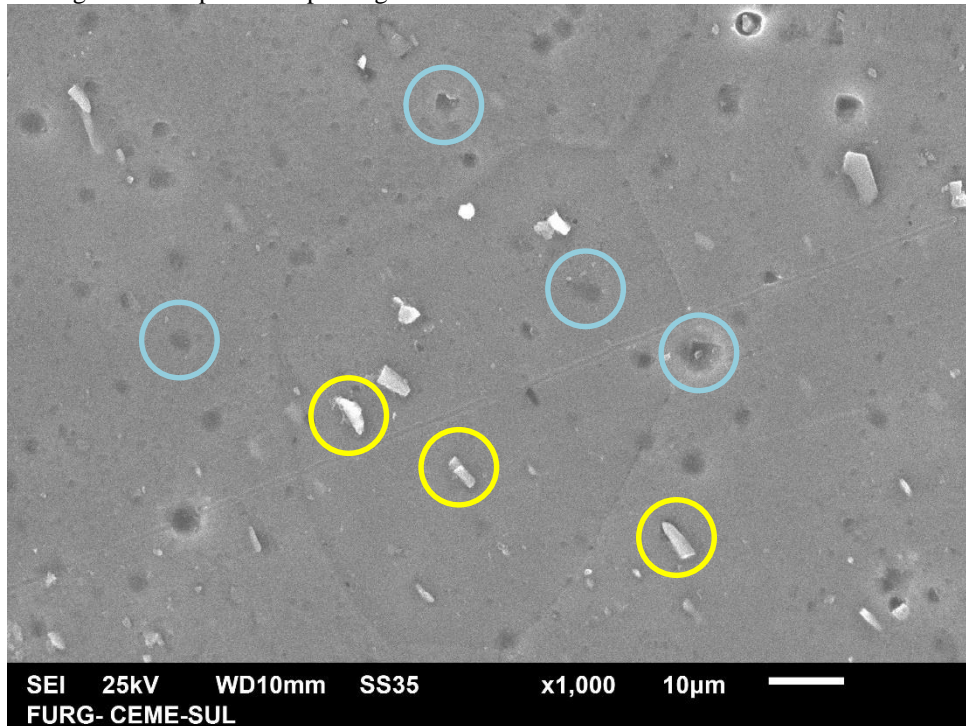


Fonte: próprio autor.

As imagens obtidas por MEV e EDS reforçam os resultados obtidos por MO. Percebe-se na Figura 40 a variação na geometria dos grãos, devido à variação no grau de deformação.

A Figura 41 consiste em uma imagem obtida por MEV para a liga de alumínio 6063 T6, por se tratar da liga que onde a imagem obtida apresentou uma maior qualidade.

Figura 41 – Imagem obtida por MEV para liga 6063 T6 aumentada 1000 vezes.



Fonte: próprio autor.

Destacados por círculos azuis, na Figura 41, estão os intermetálicos Mg_2Si e por círculos amarelos são os precipitados Fe_3SiAl_{12} , segundo Alejandro (2007) [56] e Silva (2013) [40].

Na Tabela 11 um relatório detalhado da composição química de cada liga, conforme ensaio qualitativo de EDS.

Tabela 10 – Quantidades percentuais atômica e de peso dos principais elementos da liga de alumínio 6063, obtidos por EDS.

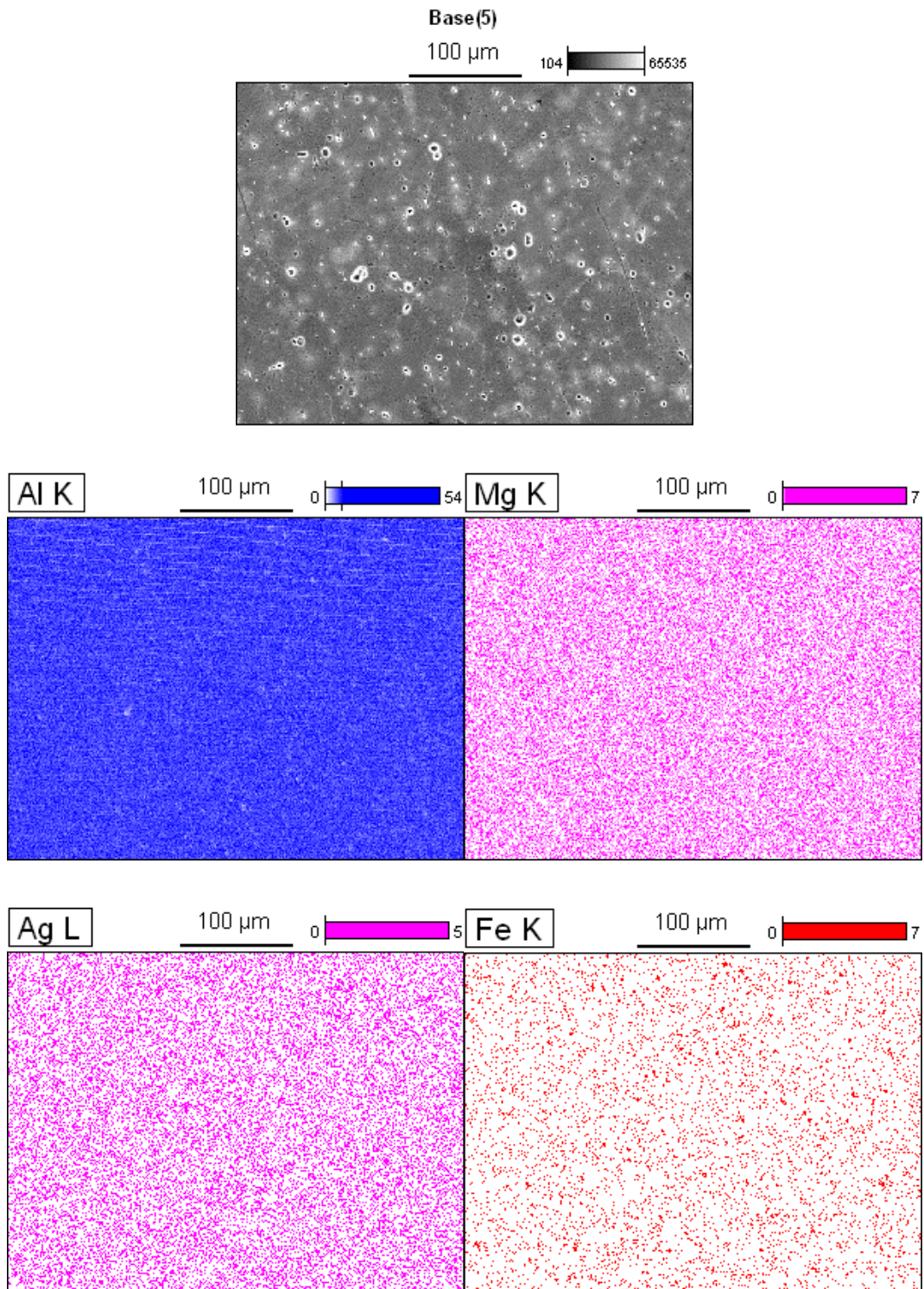
Liga	Elemento							
	% peso				% atômico			
	Al	Mg	Si	Fe	Al	Mg	Si	Fe
T6	99,26	0,22	0,00	0,51	99,50	0,25	0,00	0,25
T9 10%	99,29	0,27	0,00	0,44	99,49	0,30	0,00	0,21
T9 25%	99,14	0,24	0,04	0,57	99,41	0,27	0,04	0,28
T9 40%	99,18	0,21	0,09	0,52	99,43	0,23	0,09	0,25
T9 55%	99,22	0,28	0,03	0,47	99,44	0,31	0,03	0,23
T9 70%	99,37	0,24	0,00	0,39	99,54	0,27	0,00	0,19

Fonte: próprio autor.

A Figura 40 e a Tabela 11 não apresentam quantidades de Si para todas as ligas, devido à natureza deste tipo de ensaio ser qualitativo, conforme Moreira (2012) [26]. Também a região da amostra analisada apresenta grande influência neste resultado.

Na Figura 42 está demonstrado o resultado da análise por filtro de elementos no EDS.

Figura 42 – Análise por filtro de elementos para liga 6063 T9 10%.



Fonte: próprio autor.

Nota-se que não se observou o elemento silício através do EDS na liga de alumínio 6063 T9 10%, como indica a Figura 42. Na EDS, este elemento aparecera apenas nas ligas com tratamento mecânico de grau de deformação 25%, 40% e 55%.

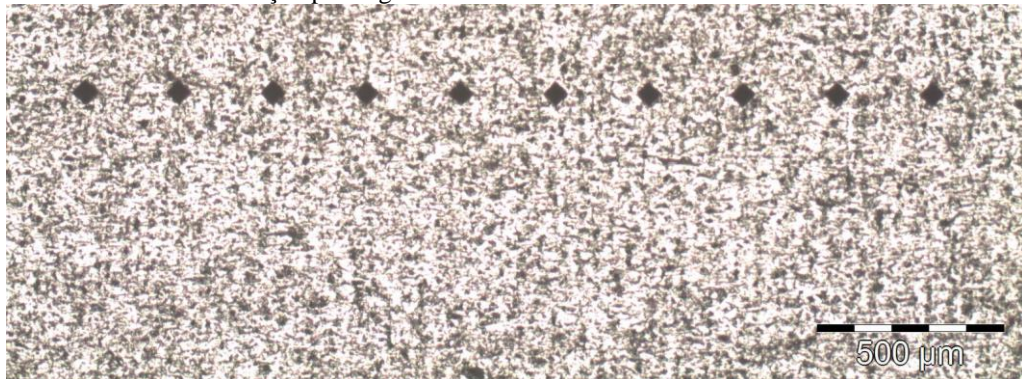
Como todas as amostras são partes de uma mesma chapa, o elemento silício deveria aparecer em todas, evidenciando assim o característica qualitativa do ensaio.

4.3 Ensaios de dureza Vickers

Antes de proceder com a tomada de dados de dureza, foram experimentadas outras cargas de indentação, porém com uma carga de 0,2 kg foi obtido uma menor deformação na marca de indentação.

As indentações, para todos os ensaios, foram realizadas em dez pontos em linha, distantes de 250 μm , conforme as Figuras 43, 45, 47, 49, 51 e 53.

Figura 43 – Marcas de indentação para liga 6063 T6.



Fonte: próprio autor.

A Tabela 11 resume os dados obtidos para as diagonais e durezas pontuais, bem como suas médias, para a liga 6063 T6.

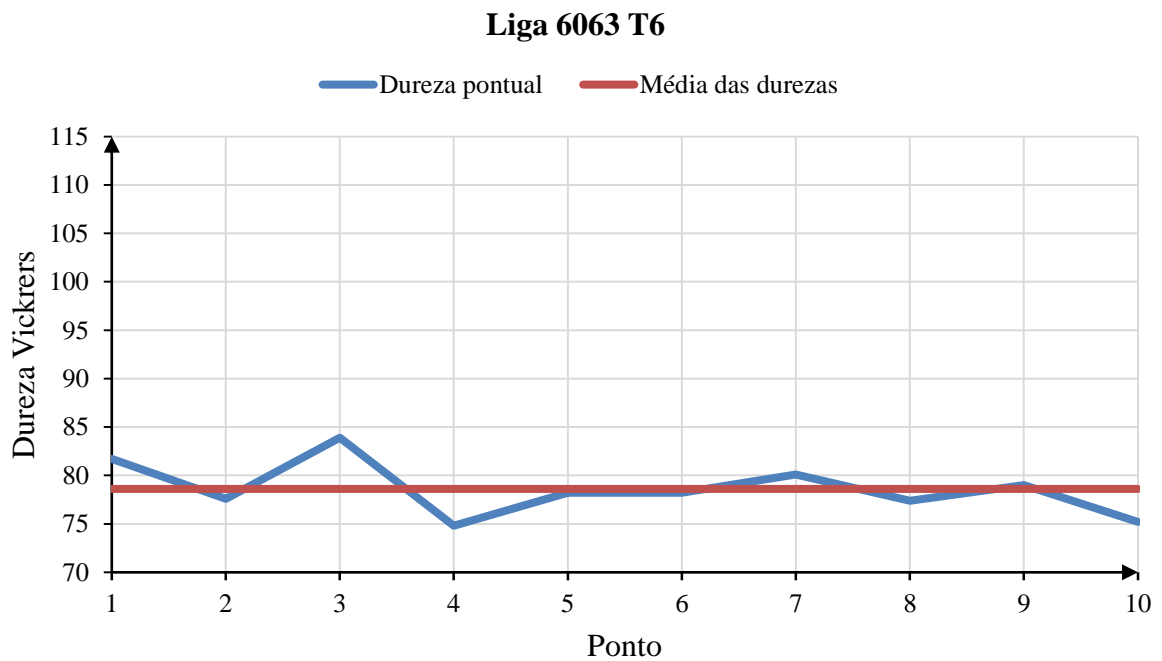
Tabela 11 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T6.

	Ponto				
	1	2	3	4	5
d1 [μm]	62,27	71,57	66,99	71,28	70,64
d2 [μm]	65,46	66,63	65,91	69,46	67,02
Dureza [$\text{HV}_{0,2}$]	81,70	77,60	83,90	74,80	78,20
	Ponto				
	6	7	8	9	10
d1 [μm]	69,08	66,41	69,44	69,95	72,51
d2 [μm]	68,59	69,60	68,90	67,03	67,87
Dureza [$\text{HV}_{0,2}$]	78,20	80,10	77,40	79,00	75,20
Médias					
d1 [μm]	69,01	d2 [μm]	67,65	Dureza [$\text{HV}_{0,2}$]	78,61

Fonte: próprio autor.

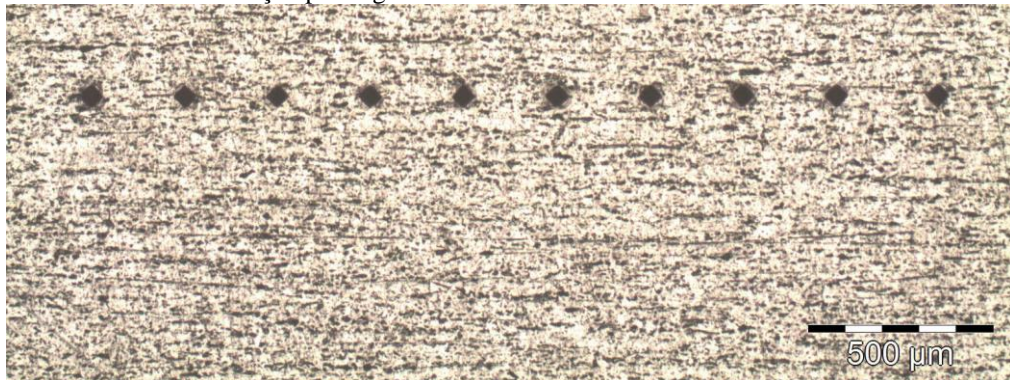
Na Figura 44 está a representação gráfica dos dados da Tabela 11.

Figura 44 – Curva com os resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T6.



Fonte: próprio autor.

Figura 45 – Marcas de indentação para liga 6063 T9 encruada 10%.



Fonte: próprio autor.

A Tabela 12 resume os dados obtidos para as diagonais e durezas pontuais, bem como suas médias, para a liga 6063 T9 encruada 10%.

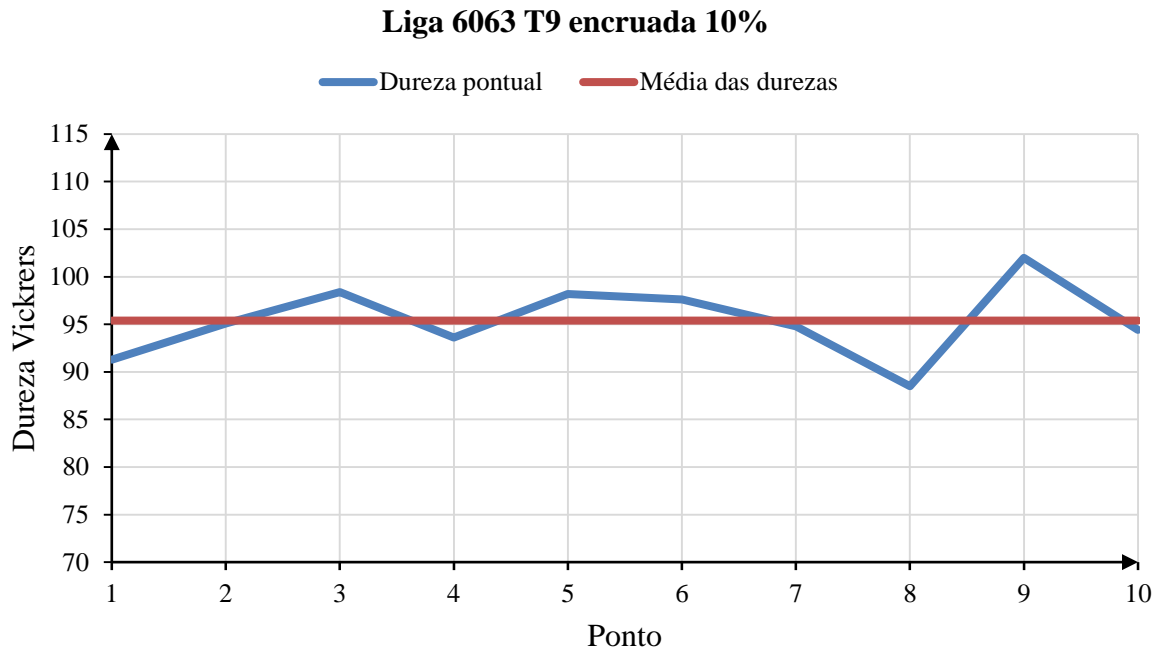
Tabela 12 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 10%.

	Ponto				
	1	2	3	4	5
d1 [μm]	64,29	62,69	61,66	62,05	62,19
d2 [μm]	63,16	62,15	61,07	63,81	60,66
Dureza [HV_{0,2}]	91,30	95,10	98,40	93,60	98,20
	Ponto				
	6	7	8	9	10
d1 [μm]	61,03	61,94	65,56	58,15	62,59
d2 [μm]	62,23	63,10	63,85	62,45	62,70
Dureza [HV_{0,2}]	97,60	94,80	88,50	102,00	94,40
Médias					
d1 [μm]	62,22	d2 [μm]	62,52	Dureza [HV_{0,2}]	95,39

Fonte: próprio autor.

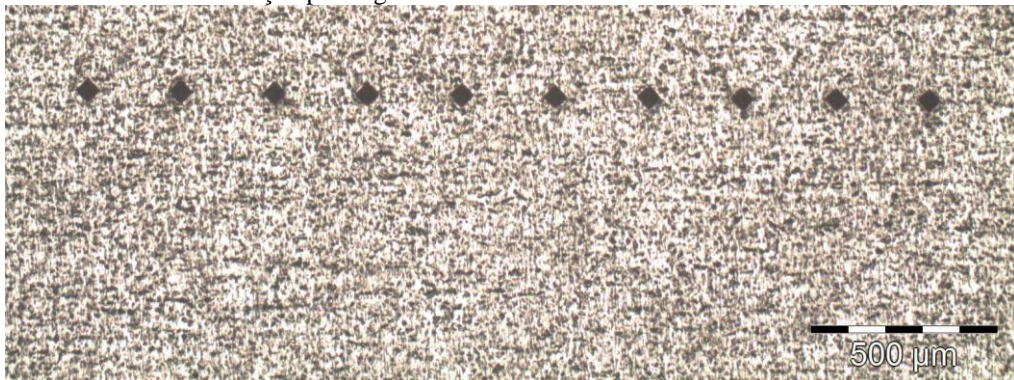
Na Figura 46 está a representação gráfica dos dados da Tabela 12.

Figura 46 – Curva com os resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 10%.



Fonte: próprio autor.

Figura 47 – Marcas de indentação para liga 6063 T9 encruada 25%.



Fonte: próprio autor.

A Tabela 13 resume os dados obtidos para as diagonais e durezas pontuais, bem como suas médias, para a liga 6063 T9 encruada 25%.

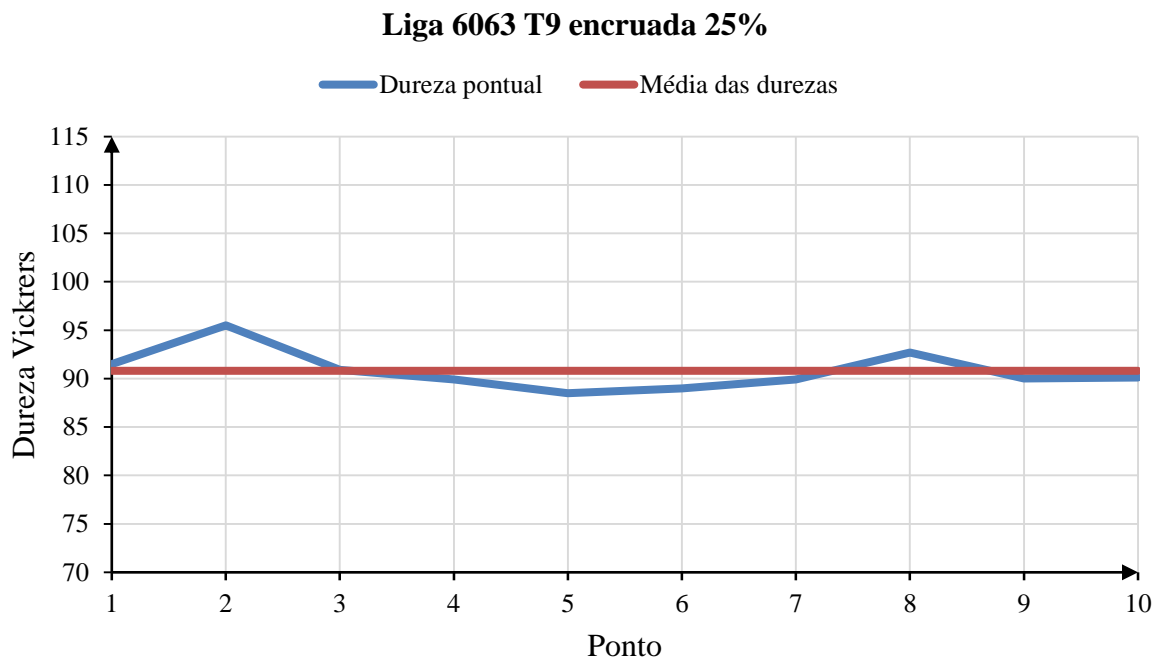
Tabela 13 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 25%.

	Ponto				
	1	2	3	4	5
d1 [μm]	63,49	59,17	63,21	65,52	63,87
d2 [μm]	63,76	65,39	64,52	62,90	65,54
Dureza [$\text{HV}_{0,2}$]	91,50	95,50	90,90	89,90	88,50
	Ponto				
	6	7	8	9	10
d1 [μm]	62,81	62,84	60,10	64,07	62,34
d2 [μm]	66,24	65,59	66,38	64,29	65,95
Dureza [$\text{HV}_{0,2}$]	89,00	89,90	92,70	90,00	90,10
Médias					
d1 [μm]	62,74	d2 [μm]	65,06	Dureza [$\text{HV}_{0,2}$]	90,80

Fonte: próprio autor.

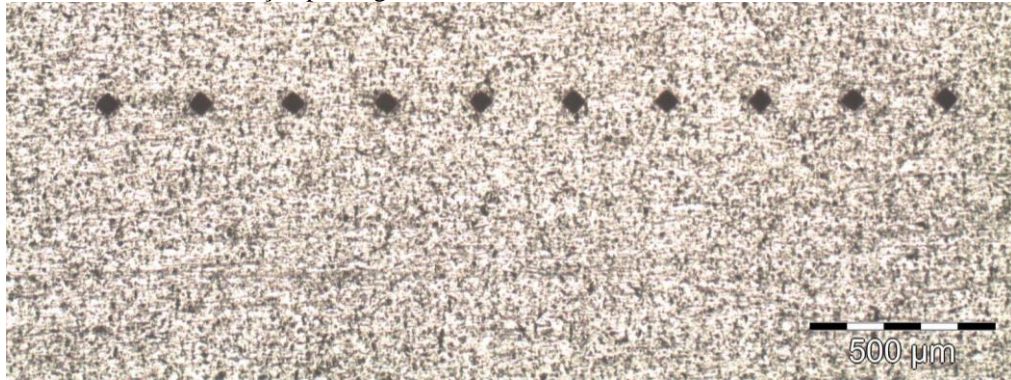
Na Figura 48 está a representação gráfica dos dados da Tabela 13.

Figura 48 – Curva com os resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 25%.



Fonte: próprio autor.

Figura 49 – Marcas de indentação para liga 6063 T9 encruada 40%.



Fonte: próprio autor.

A Tabela 14 resume os dados obtidos para as diagonais e durezas pontuais, bem como suas médias, para a liga 6063 T9 encruada 40%.

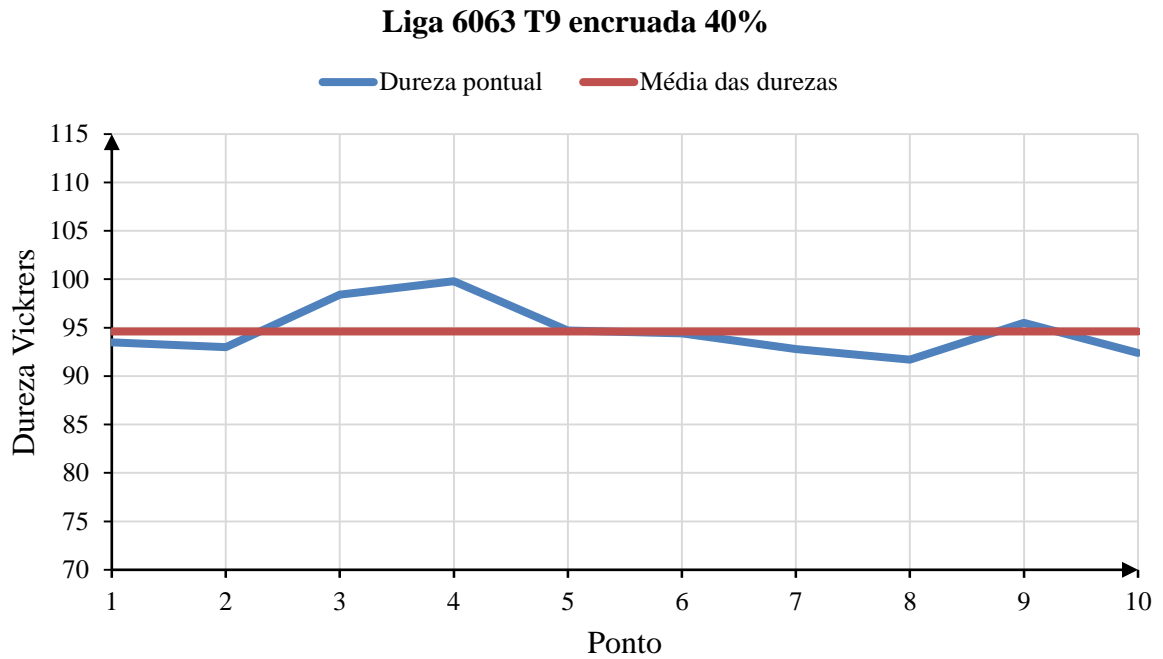
Tabela 14 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 40%.

	Ponto				
	1	2	3	4	5
d1 [μm]	63,51	62,51	60,41	65,22	62,82
d2 [μm]	62,38	62,73	62,30	56,68	62,30
Dureza [HV_{0,2}]	93,50	93,00	98,40	99,80	94,70
	Ponto				
	6	7	8	9	10
d1 [μm]	63,20	64,40	63,98	63,58	62,96
d2 [μm]	62,08	62,02	63,18	61,03	63,69
Dureza [HV_{0,2}]	94,40	92,80	91,70	95,50	92,40
Médias					
d1 [μm]	63,26	d2 [μm]	61,84	Dureza [HV_{0,2}]	94,62

Fonte: próprio autor.

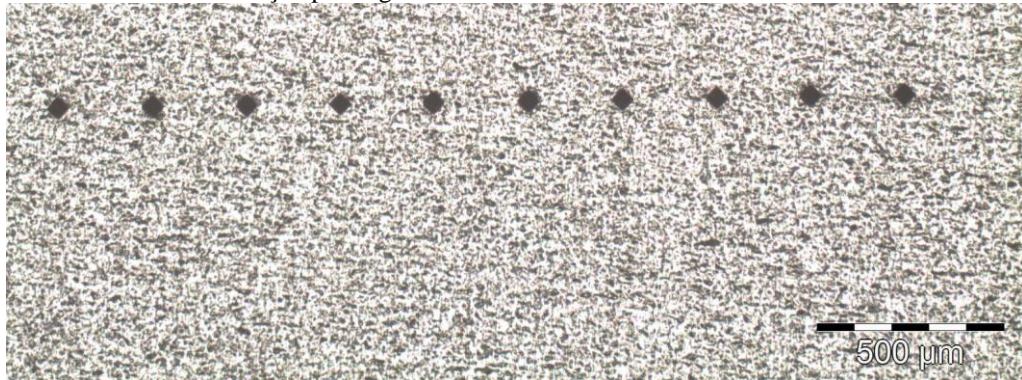
Na Figura 50 está a representação gráfica dos dados da Tabela 14.

Figura 50 – Curva com os resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 40%.



Fonte: próprio autor.

Figura 51 – Marcas de indentação para liga 6063 T9 encruada 55%.



Fonte: próprio autor.

A Tabela 15 resume os dados obtidos para as diagonais e durezas pontuais, bem como suas médias, para a liga 6063 T9 encruada 55%.

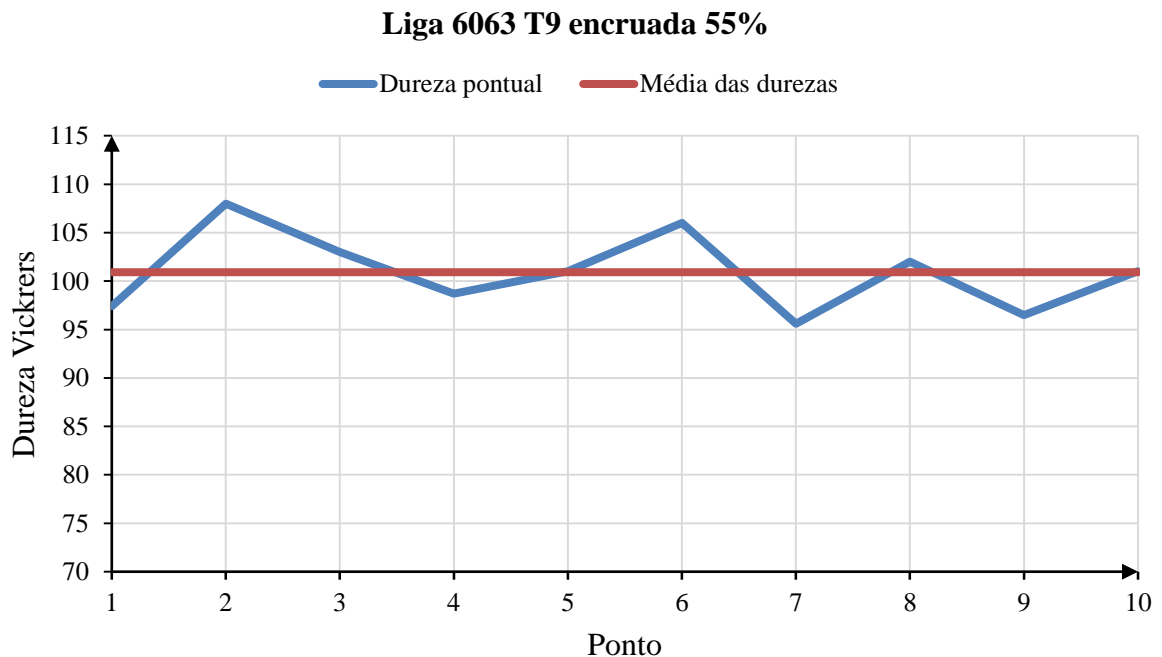
Tabela 15 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 55%.

	Ponto				
	1	2	3	4	5
d1 [μm]	60,88	58,77	57,30	61,52	60,28
d2 [μm]	62,51	58,67	61,69	61,05	60,93
Dureza [$\text{HV}_{0,2}$]	97,40	108,00	103,00	98,70	101,00
	Ponto				
	6	7	8	9	10
d1 [μm]	55,43	62,24	58,06	62,34	57,71
d2 [μm]	62,97	62,27	62,70	61,58	63,19
Dureza [$\text{HV}_{0,2}$]	106,00	95,60	102,00	96,50	101,00
Médias					
d1 [μm]	59,45	d2 [μm]	61,76	Dureza [$\text{HV}_{0,2}$]	100,92

Fonte: próprio autor.

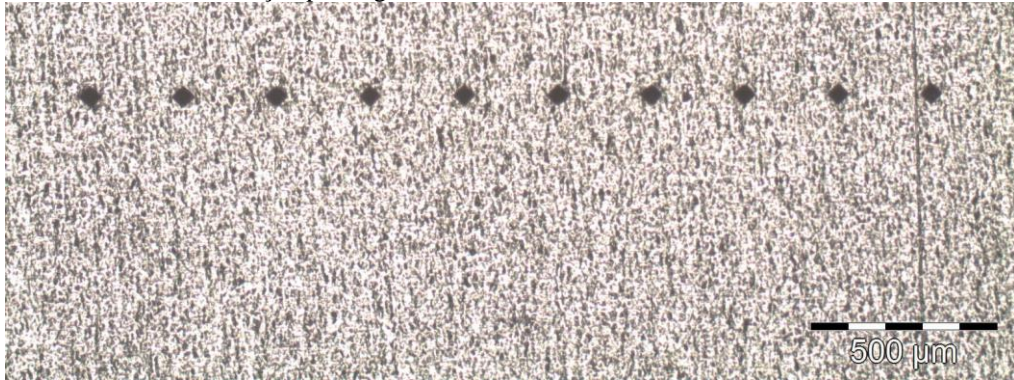
Na Figura 52 está a representação gráfica dos dados da Tabela 15.

Figura 52 – Curva com os resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 55%.



Fonte: próprio autor.

Figura 53 – Marcas de indentação para liga 6063 T9 encruada 70%.



Fonte: próprio autor.

A Tabela 16 resume os dados obtidos para as diagonais e durezas pontuais, bem como suas médias, para a liga 6063 T9 encruada 70%.

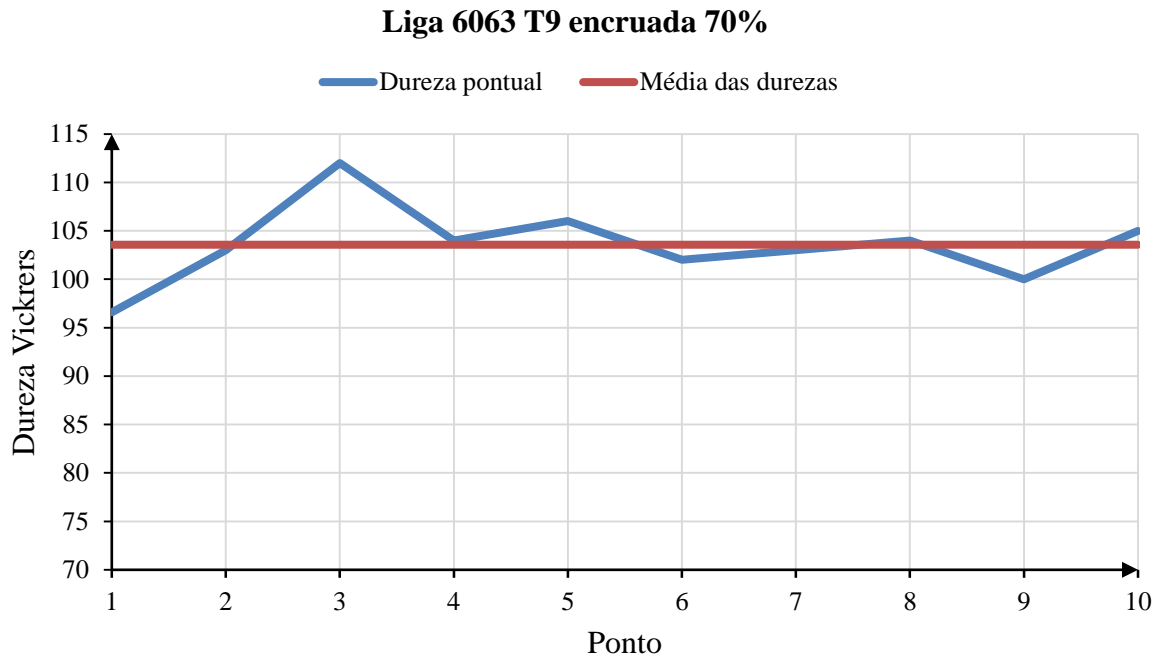
Tabela 16 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 70%.

	Ponto				
	1	2	3	4	5
d1 [μm]	62,91	60,25	58,94	60,42	59,10
d2 [μm]	60,99	59,73	56,09	59,17	59,08
Dureza [HV_{0,2}]	96,60	103,00	112,00	104,00	106,00
	Ponto				
	6	7	8	9	10
d1 [μm]	61,33	60,33	61,57	62,33	60,65
d2 [μm]	59,55	59,75	58,12	59,20	58,47
Dureza [HV_{0,2}]	102,00	103,00	104,00	100,00	105,00
Médias					
d1 [μm]	60,78	d2 [μm]	59,02	Dureza [HV_{0,2}]	103,56

Fonte: próprio autor.

Na Figura 54 está a representação gráfica dos dados da Tabela 16.

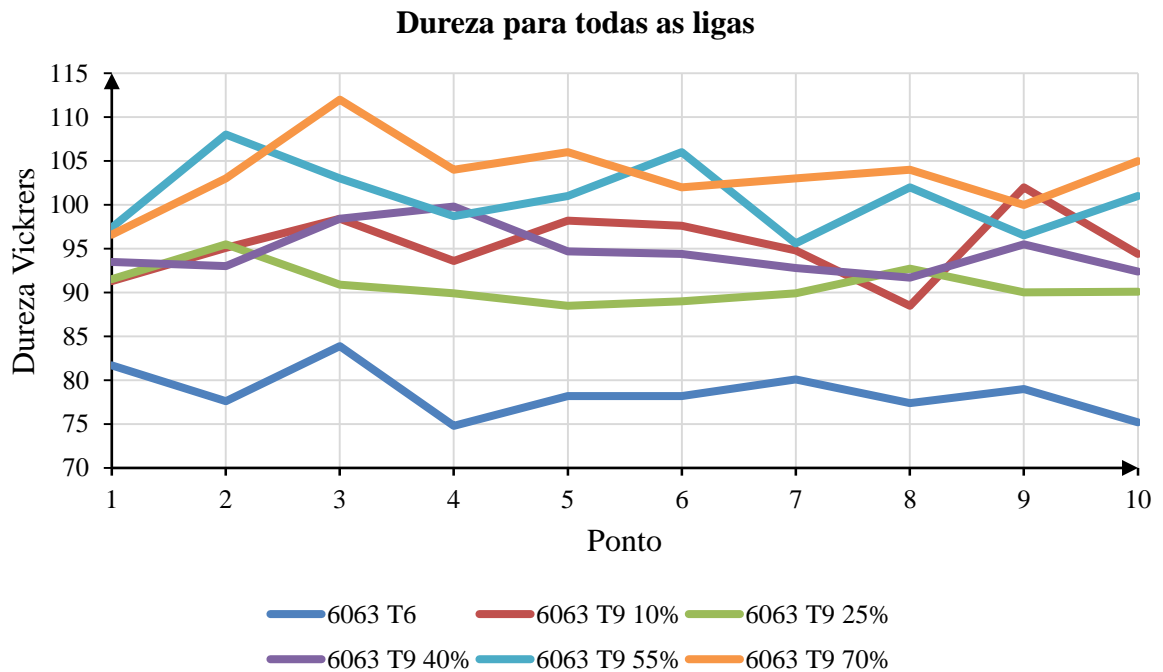
Figura 54 – Curva com os resultados do ensaio de microdureza Vickers para liga 6063 T9 encruada 70%.



Fonte: próprio autor.

A Figura 55 compara os resultados de dureza obtidos em cada ponto entre todas as ligas.

Figura 55 – Comparativo de dureza para todas as ligas.



Fonte: próprio autor.

A Tabela 17 contempla a média dos resultados obtidos nos ensaios de dureza.

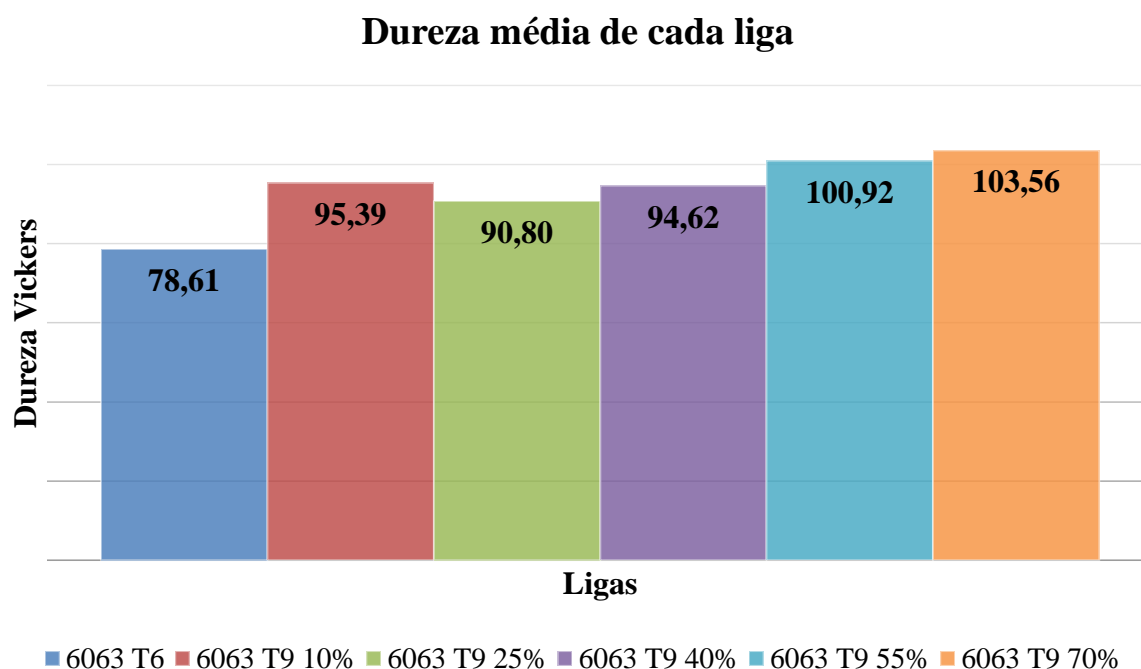
Tabela 17 – Média dos dados obtidos nos ensaios de dureza Vickers.

Dados médios	Liga	Liga 6063 T9 encruada				
	6063 T6	10%	25%	40%	55%	70%
d1 [μm]	69,01	62,22	62,74	63,26	59,45	60,78
d2 [μm]	67,65	62,52	65,06	61,84	61,76	59,02
Dureza [HV_{0,2}]	78,61	95,39	90,80	94,62	100,92	103,56

Fonte: próprio autor.

A Figura 56 compara os dados de dureza média para todas as ligas ensaiadas, conforme os dados agrupados na Tabela 17.

Figura 56 – Comparativo entre as durezas médias de cada liga.



Fonte: próprio autor.

A dureza para a liga 6063 T6 é praticamente a mesma apresentada por Alejandro (2007) [56], Garza (2009) [65] e Gonçalves (2012) [36].

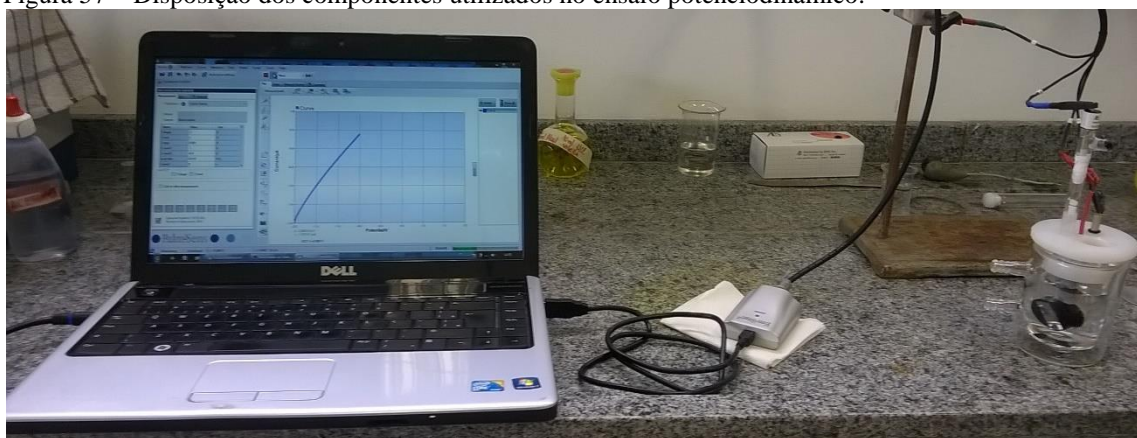
O comportamento da dureza em relação ao tratamento mecânico apresentou uma característica relativa ao efeito do amolecimento por recuperação dinâmica, como apresentado por Lins (2006) [60] e Oliveira (2004) [61], a partir dos 25% de grau de deformação, já que durante o processo de laminação os corpos de prova apresentaram uma considerável elevação

de temperatura. Como o efeito da recuperação dinâmica permaneceu a partir deste ponto e a taxa de deformação aumentou, a dureza do material passou a crescer novamente, conforme Espósito (2006) [15], Ferrari (2008) [30] e Tan (2006) [35].

4.4 Ensaios potenciodinâmicos

Os componentes utilizados neste ensaio foram montados conforme ilustrado na Figura 57.

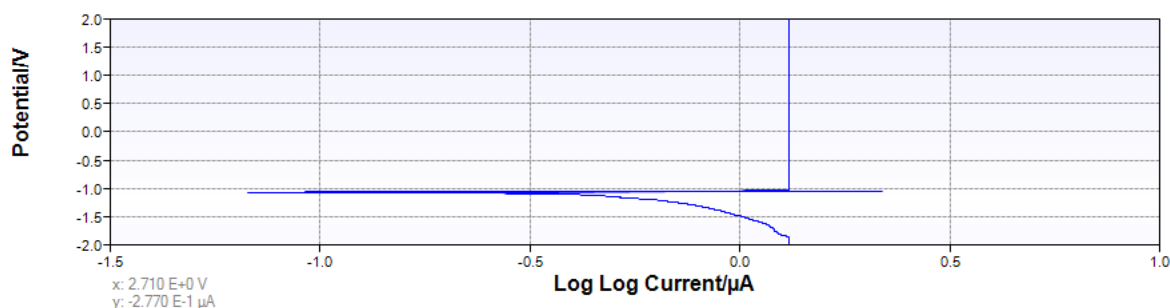
Figura 57 – Disposição dos componentes utilizados no ensaio potenciodinâmico.



Fonte: próprio autor.

Os resultados obtidos nos ensaios potenciodinâmicos geraram as curvas de polarização, conforme as Figura 58.

Figura 58 – Curva de polarização potenciodinâmica para liga 6063 T6.

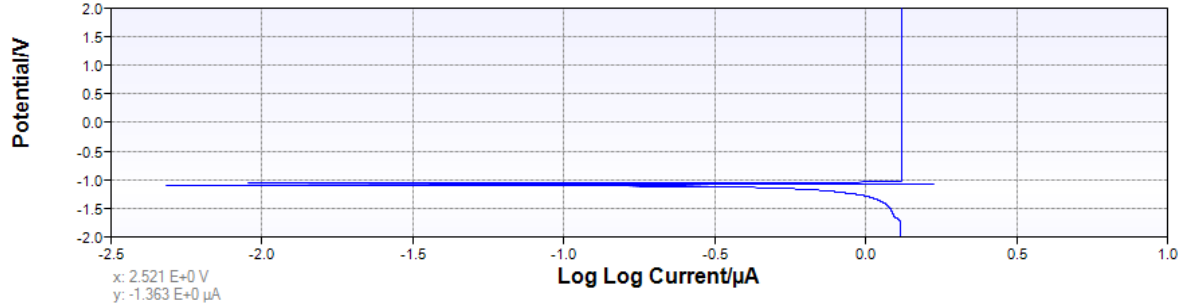


Fonte: próprio autor.

A curva de polarização da Figura 58, para da liga 6063 T6, apresenta-se de resultado similar ao obtido por Padmalatha (2013) [14].

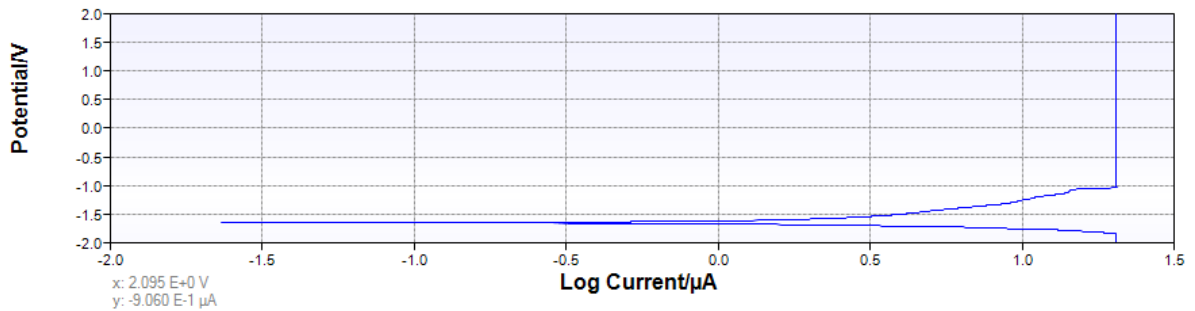
Nas Figuras 59-63 estão apresentadas as curvas de polarização da liga 6063 T9, para diversos graus de encruamento

Figura 59 – Curva de polarização potenciodinâmica para liga 6063 T9 encruada 10%.



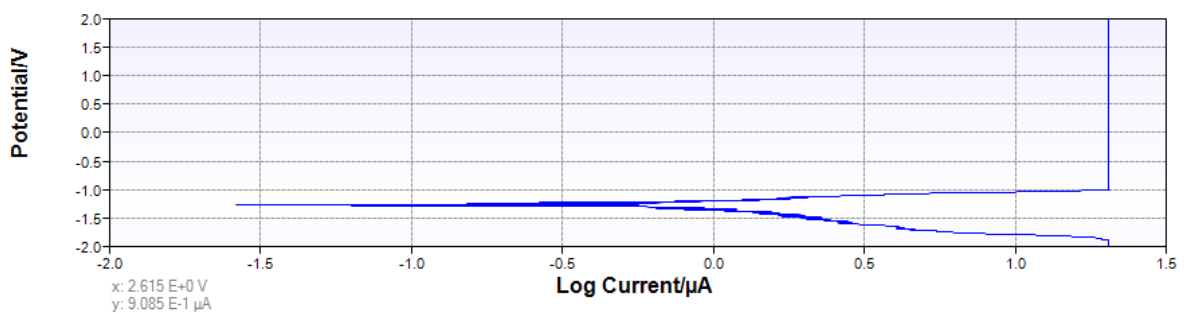
Fonte: próprio autor.

Figura 60 – Curva de polarização potenciodinâmica para liga 6063 T9 encruada 25%.



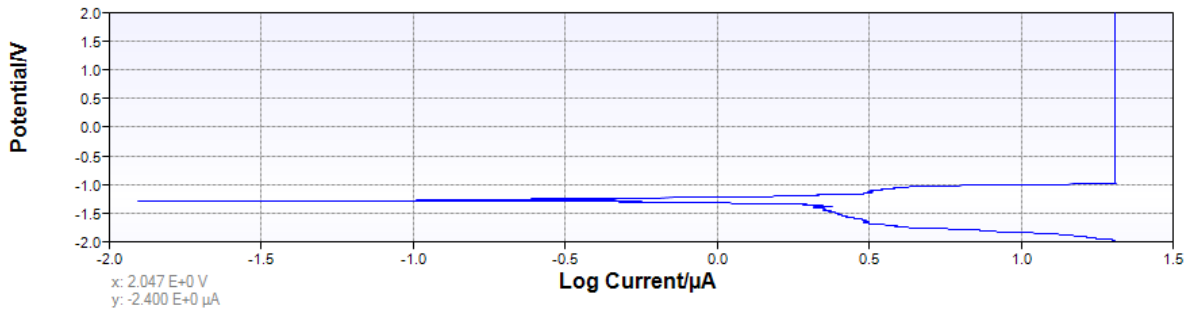
Fonte: próprio autor.

Figura 61 – Curva de polarização potenciodinâmica para liga 6063 T9 encruada 40%.



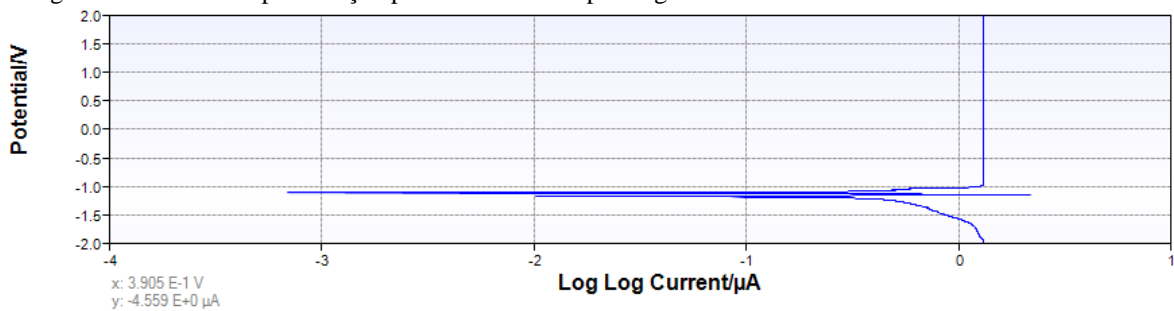
Fonte: próprio autor.

Figura 62 – Curva de polarização potenciodinâmica para liga 6063 T9 encruada 55%.



Fonte: próprio autor.

Figura 63 – Curva de polarização potenciodinâmica para liga 6063 T9 encruada 70%.



Fonte: próprio autor.

Os resultados obtidos no ensaio potenciodinâmico mostraram o início da formação do pite com um potencial de -1 V para todas as amostras, semelhante aos resultados obtidos por Holzle (2005) [66]. As variações percebidas foram nos valores de corrente, as quais estão indicadas na Tabela 18 e representados graficamente, em módulo, na Figura 64.

Esta característica também foi notada no trabalho de Bodunrin (2011) [39], sendo que ele analisou dois graus de encruamento, 20% e 35%. O que se pode concluir com o estudo é que esta corrosividade se acentua quando se passa do índice de 55% de encruamento para o índice de 70% de encruamento.

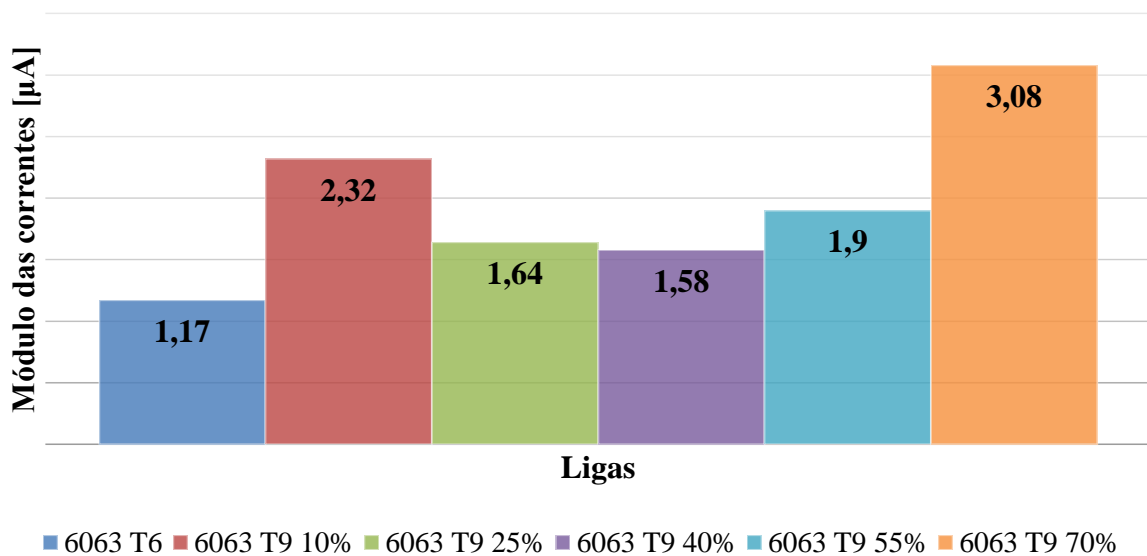
Tabela 18 – Comportamento da corrente com a variação do tratamento termomecânico.

Liga	Potencial de pite [V]	Corrente [μA]
6063 T6	-1,0	-1,17
6063 T9 10%	-1,0	-2,32
6063 T9 25%	-1,0	-1,64
6063 T9 40%	-1,0	-1,58
6063 T9 55%	-1,0	-1,90
6063 T9 70%	-1,0	-3,08

Fonte: próprio autor.

Figura 64 – Comportamento da corrente com a variação do tratamento termomecânico.

Comportamento das correntes com a variação do tratamento termomecânico



Fonte: próprio autor.

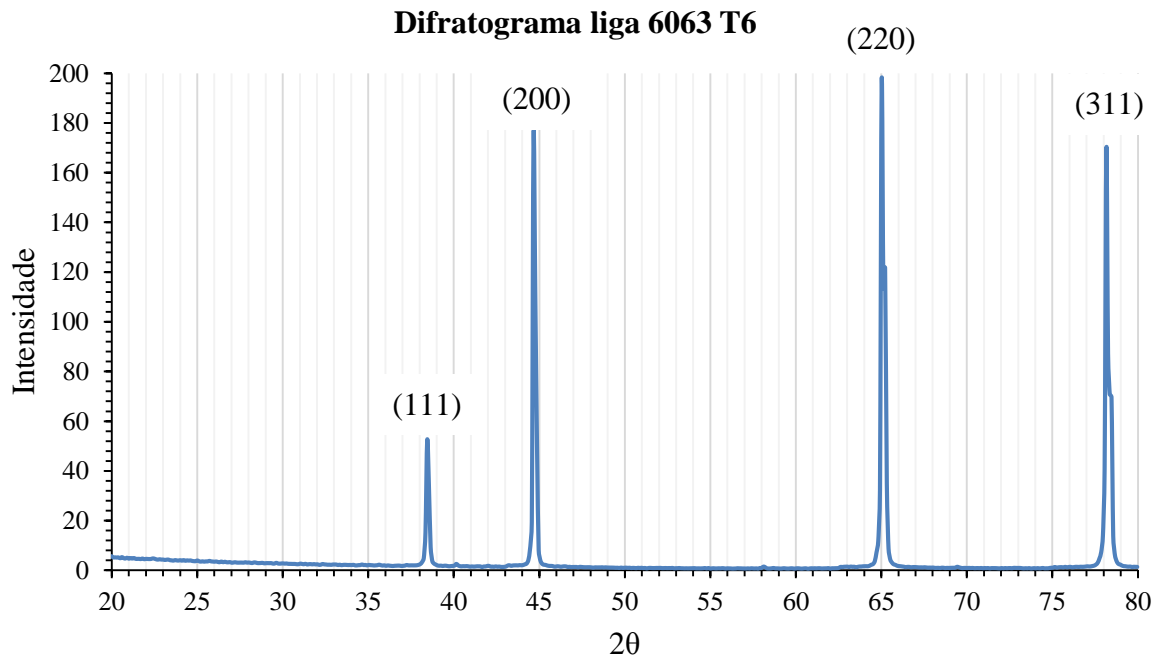
Os dados da Tabela 18 e da Figura 64 remetem ao fenômeno do amolecimento por recuperação dinâmica, a partir dos 25% de encruamento, fazendo com que a severidade na corrosão caísse. Permanecendo a recuperação dinâmica, a partir deste grau de deformação, porém com o aumento da dureza, a corrosividade do metal voltou a crescer.

4.5 Difractometria de raio X

Inicialmente a proposta era realizar um ensaio curto no intuito de se verificar a possível necessidade da utilização de filtros. Como no primeiro teste o resultado foi satisfatório, os mesmos parâmetros foram utilizados para os ensaios decorrentes.

A Figura 65 mostra o resultado do DRX para liga 6063 T6, solubilizada e envelhecida artificialmente por 4 h e os respectivos índices de Miller associados aos picos principais.

Figura 65 – Difratograma para liga de alumínio 6063 T6.



Fonte: próprio autor.

O difratograma de raio X da Figura 65 permitiu a identificação da estrutura cristalina, a partir dos índices de Miller, semelhante a Freitas (2009) [51], Jacumasso (2014) [43] e Garza (2009) [65] do elemento, através da Equação 10.

$$\frac{\text{sen}^2 \theta_A}{\text{sen}^2 \theta_B} = \frac{\text{sen}^2 19,23^\circ}{\text{sen}^2 22,33^\circ} \cong 0,75$$

$$\frac{h_A^2 + k_A^2 + l_A^2}{h_B^2 + k_B^2 + l_B^2} = \frac{1^2 + 1^2 + 1^2}{2^2 + 0^2 + 0^2} = 0,75$$

A identificação do parâmetro de rede, através da Equação 9, permitiu a identificação do elemento pelo raio atômico calculado pela Equação 12.

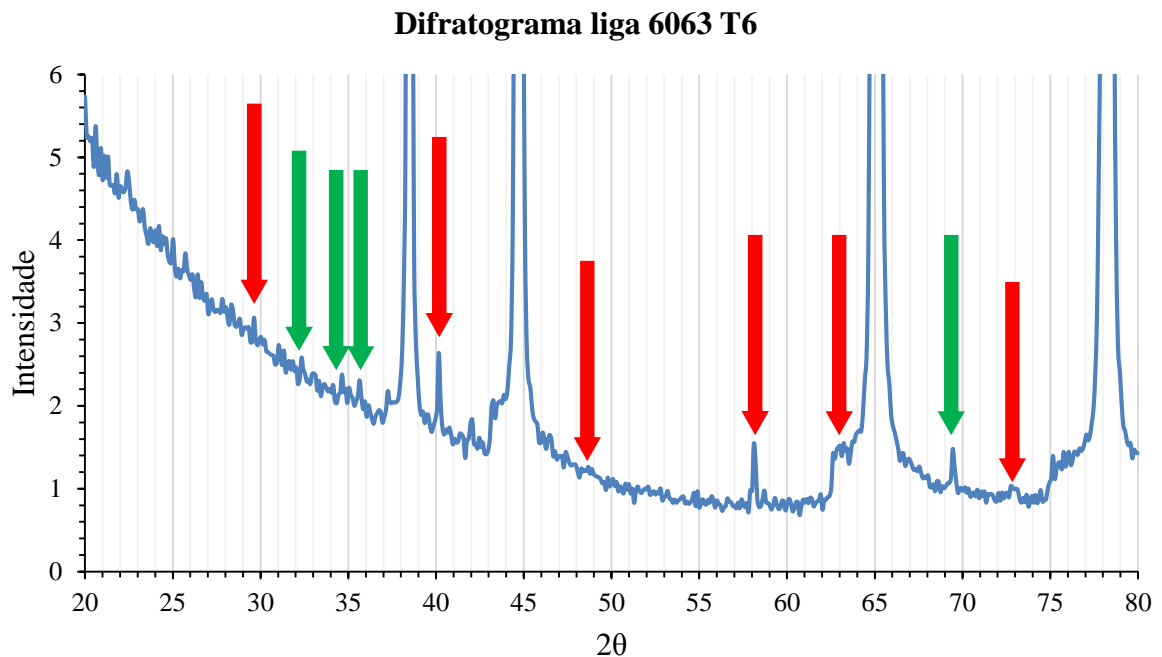
$$a = \frac{\lambda}{2} \cdot \sqrt{\frac{h_A^2 + k_A^2 + l_A^2}{\sin^2 \theta_A}} = \frac{0,154}{2} \cdot \sqrt{\frac{1^2 + 1^2 + 1^2}{\sin^2 19,23^\circ}} \therefore a = 0,405 \text{ nm}$$

$$r = \frac{a \cdot \sqrt{2}}{4} = \frac{0,405 \cdot \sqrt{2}}{4} \therefore r = 0,143 \text{ nm}$$

O elemento químico que possui raio atômico igual a 0,143 nm é alumínio.

Na Figura 66 se encontra o mesmo resultado mostrado na Figura 65, mas com um zoom para identificação de picos menores, associados aos precipitados de Mg_2Si .

Figura 66 – Zoom no Difratoograma da Figura 64.

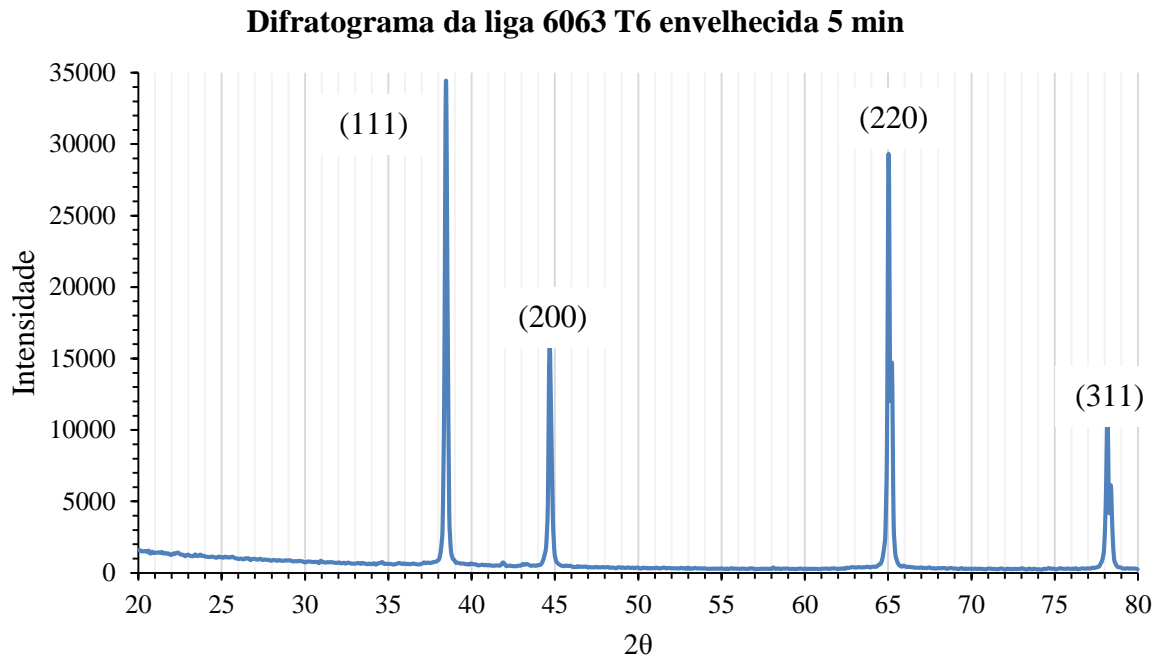


Fonte: próprio autor.

Na Figura 66 estão apresentados os ângulos de difração para Mg e os precipitados de Mg_2Si , onde as setas verdes indicam o Mg e as vermelhas os precipitados, conforme apresentado por Kondoh [94] (2003).

A Figura 66 mostra o resultado do DRX para liga 6063 T6, solubilizada e envelhecida artificialmente por 5 min e os índices de Miller associados à matriz de alumínio.

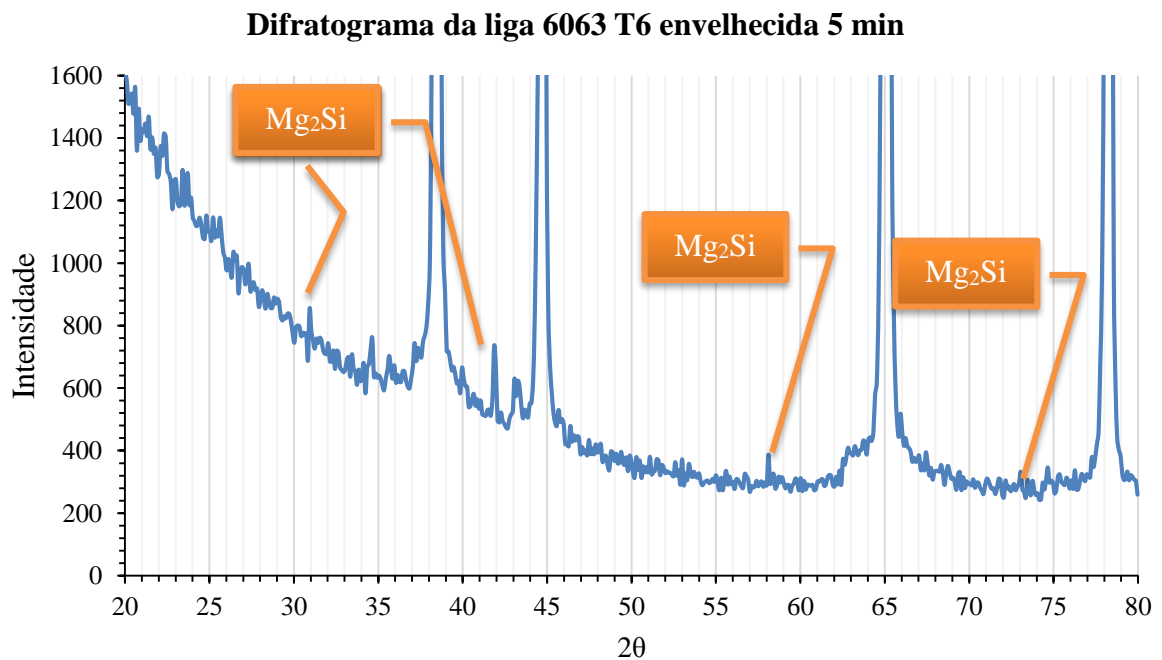
Figura 67 – Difratoograma da liga de alumínio 6063 T6 envelhecida artificialmente por 5 min.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 68 se encontra o mesmo resultado mostrado na Figura 67, mas com um zoom para identificação de picos menores, associados aos precipitados de Mg_2Si .

Figura 68 – Zoom no Difratoograma da Figura 62.



Fonte: próprio autor.

Como no tratamento térmico de envelhecimento por 5 min já se obteve a formação do intermetálico Mg_2Si , os testes com tratamentos térmicos com tempos superiores não foram realizados.

5. CONCLUSÕES

Os ensaios de microscopia ótica revelaram uma dificuldade na visualização da microestrutura, conforme o grau de deformação aumenta.

A dificuldade na visualização das amostra por MEV apresentaram a mesma dificuldade na visualização das amostras obtidas pela MO, confirmando a influência do tratamento mecânico na obtenção de imagens, mesmo com ataques químicos diferentes para as amostras mais influenciadas.

Através da MEV foi possível confirmar a presença dos precipitados de Mg_2Si e também verificar a presença do intermetálico Fe_3SiAl_{12} , através da comparação com os resultados obtidos por Alejandro (2007) [56].

O efeito da recuperação dinâmica é bastante pronunciado a partir de um grau de deformação de 25%, percebido nos ensaios de dureza e potenciodinâmico.

O comportamento do material, referente à recuperação dinâmica, a qual ocorreu a partir de 10% de redução de área, se reflete nos dados obtidos na variação da dureza e da corrente elétrica para o ensaio potenciodinâmico no momento do rompimento da camada passivadora, culminando na formação do pite.

Através dos resultados obtidos nos difratogramas de raio X, foi possível a comprovação de que a matriz do material dos corpos de prova era composta por alumínio e que sua estrutura cristalina é CFC.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ▣ Analisar o efeito de outros graus de deformação, entre os tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento, para melhor precisar o início da recuperação dinâmica;
- ▣ Determinar o grau de deformação por passe que acarreta na recuperação dinâmica, através do uso de diferentes reduções por passe para diferentes graus de deformação;
- ▣ Realização de ensaios de corrosão *in loco*;
- ▣ Avaliar o comportamento da liga em outras temperaturas e tempos de solubilização e envelhecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] SINDICATO DAS INDÚSTRIAS MINERAIS DO ESTADO DO PARÁ. **Alumínio**. Disponível em: <www.simineral.org.br/arquivos/Economia_Mineral_Do_Brasil_2009_-_Aluminio_-_DNPM.pdf>. Acesso em 18/01/2015.
- [02] INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Bauxita – produção**. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00000033.pdf>>. Acesso em: 18/01/2015.
- [03] KUZMIN, V. Superprodução de alumínio provoca queda mundial de preços. **Gazeta Russa**. Seção Ciência e Tecnologia. 08/05/2013. Disponível em: <br.rbth.com/ciencia/2013/05/08/superproducao_de_aluminio_provoca_queda_mundial_de_precos_19103.html>. Acesso em: 18/01/2015
- [04] PERSPECTIVAS DO MERCADO DE ALUMÍNIO. **Inovação e Sustentabilidade – Alumínio**. 11 ed. Disponível em: <<http://www.revistaaluminio.com.br/recicla-inovacao/11/artigo210562-1.asp>>. Acesso em: 18/01/2015.
- [05] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Localização da Indústria**. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/estatisticas/nacionais/aluminio-primario/producao-por-usina/>>. Acesso em: 26/02/2015.
- [06] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **História do alumínio**. Disponível em <<http://www.abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio>>. Acesso em 10/11/2014.
- [07] ALL ABOUT ALUMINIUM. **History of the Metal**. Disponível em: <<http://www.aluminiumleader.com/en/facts/history>>. Acesso em: 10/11/2014.
- [08] JEFFERSON LAB. **The Element Aluminum: History and Uses**. Disponível em: <<http://education.jlab.org/itselemental/ele013.html>>. Acesso em: 10/11/2014.
- [09] FILHO, S.; ALVES, E. B.; DA MOTTA, M. **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas**. Revista Matéria, Recife, v. 12, n. 2, pp. 322 – 338, 2007. ISSN: 1517-7076.
- [10] SINDICATO DAS INDÚSTRIAS MINERAIS DO ESTADO DO PARÁ. **Bauxita**. Disponível em: <<http://www.simineral.org.br/mineracao/?id=3>>. Acesso em: 22/12/2014.
- [11] ALCOA. **Catálogo Geral Extrudados**. Disponível em: <https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo_extrusao2010.pdf>. Acesso em 21/12/2014.
- [12] PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra a corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. 1. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1993. ISBN: 85-09-00099-9.
- [13] COMPANHIA ESTADUAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **PTD-00.001: Materiais para redes de distribuição aérea**. Porto Alegre/RS, 2012.

- [14] PADMALATHA, D. P. **Studies of corrosion of Aluminium and 6063 aluminium alloy in phosphoric acid médium**. International Journal of ChemTest Research. Vol. 5, n.º 6, pp 2690-2705, 2013. USA. ISSN: 09744290.
- [15] ESPÓSITO, I. M. **Caracterização e cinética de recristalização da liga de alumínio 6063 após tratamentos termomecânicos**. 82 f. Dissertação (Ciência dos Materiais – Tecnologia Nuclear) - Instituto De Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2006.
- [16] ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P.; WRIGHT, W. J. **The Science and Engineering of Materials**. 6. ed. Stanford, California, USA, 2010. ISBN: 978-0495296027.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Vantagens do alumínio**. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aluminio/vantagens-do-aluminio>>. Acesso em: 21/12/2014.
- [18] PAVAN, M. A.; BINGHAN, F. T. **Toxidez de alumínio em cafeeiros cultivados em solução nutritiva**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília/DF. v.17, n.9, p.1293-1302, set. 1982.
- [19] BUZINELLI, D. V. **Dimensionamento de elementos estruturais de alumínio**. 184 f. Dissertação (Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.
- [20] FONTINHA, I. R. F. C. N. **Revestimentos nanoestruturados para proteção de liga de alumínio**. 287 f. Tese (Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de Aveiro, Portugal, 2012.
- [21] DIAS, A. M. S.; MIRANDA, J. S.; GODOY, G. C. **Avaliação da tenacidade à fratura através do ensaio de indentação em pastilhas de metal duro**. Revista Matéria, v. 14, n. 2, pp. 869 – 877, 2009.
- [22] PINTO, L. F. A. **Soldaduras de ligas dissimilares de alumínio com metal de adição**. 108 f. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal, 2008.
- [23] NOGUEIRA, J. S. S. A. **Recozimento de homogeneização da liga 6063 na empresa SAPA II Perfis**. 54 f. Dissertação (Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2012.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Fundamentos e aplicações do alumínio**. 35. F. Disponível em: <<ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM233/N%E3o%20Ferrosos/Fundamentos%20produ%E7%E3o%20e%20caracteristicas%20do%20Aluminio.pdf>>. Acesso em: 12/12/2014.
- [25] ESAB. **Understanding the Aluminum Alloy Designation System**. Disponível em: <<http://www.esab.ca/ca/en/education/blog/understanding-the-aluminum-alloy-designation-system.cfm>>. Acesso em: 12/11/2014.

- [26] MOREIRA, E. F. **Influência do pré-tratamento na ação anticorrosiva de revestimentos híbridos de sol-gel aplicados na liga EN AW-6063**. 130 f. Dissertação (Química Tecnológica) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Portugal, 2012.
- [27] PIMENTA, E. A. R. **Estudo dos processos de soldagem TIG e MIG em estruturas de alumínio 6351 T6 NBR ISO 209-2010**. 86 f. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, Taubaté/SP, 2012.
- [28] ASM HANDBOOK. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. 3470 p, vol. 2, 1990. ISBN 978-0-87170-378-1.
- [29] OLIVEIRA, R. A. **O Forjamento de Ligas de Alumínio – Um estudo para a Liga ABNT 6061**. 127 f. Dissertação (Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2001.
- [30] FERRARI, R. B. **Caracterização de uma liga metálica a base de alumínio – magnésio obtida por método convencional após tratamentos termomecânicos visando estruturas microcristalinas**. 85 f. Dissertação (Tecnologia Nuclear) – Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2008.
- [31] BUENO, A. F. **Determinação do coeficiente de atrito para as ligas de alumínio AA6351 e de titânio Ti6Al4V pelos métodos do anel e tubo cônico**. 119 f. Dissertação (Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2010.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6835: Alumínio e suas ligas – classificação das têmperas**. Rio de Janeiro, 2000.
- [33] SOARES, M. R. N. **Efeitos dos ciclos de envelhecimento no comportamento de ligas de alumínio**. 114 f. Dissertação (Engenharia de Materiais) – Universidade de Aveiro, Portugal, 2009.
- [34] MAIA, A. M. P. **Efeito dos ciclos de solubilização e envelhecimento no comportamento da liga de alumínio 6101**. 84 f. Dissertação (Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2012.
- [35] TAN, E. **The effect of hot-deformation on mechanical properties and age hardening characteristics of Al-Mg-Si based wrought Aluminium alloys**. 123 f. Dissertação (Ciência e Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Middle East Technical University, Ancara, Turquia, 2006.
- [36] GONÇALVES, R. A. **Investigação da usinabilidade das ligas de alumínio da série 6xxx**. 124 f. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Universidade de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2012.
- [37] OLIVEIRA, G. R. G. **Tratamento térmico de uma liga Al-Si-Mg-Mn**. 75 f. Dissertação (Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2012.

- [38] SILVA, D. J. **Influência do Revestimento de Nitreto de Titânio Depositado Via Feixe de Elétrons na Resistência ao Desgaste Microabrasivo das Ligas de Alumínio-magnésio-Silício Aa6101 e Aa6351**. 94 f. Dissertação (Ciências Mecânicas) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2012.
- [39] BODUNRIN, M. O.; ALANEME, K. K.; OLUSEGUN, S. J. **Influence of Thermomechanical Processing on the Corrosion Behaviour of Aluminium (6063)-SiCp Composites in NaCl and H₂SO₄ Environment**. Science Journal – Ubon Ratchathani University, vol. 2, n.º 2, pp 17-25, 2011.
- [40] SILVA, A. M. B. **Estudo do comportamento em fadiga de alto ciclo das ligas de alumínio AA6005 T6, AA6063 T6 e AA6351 T6**. 157 f. Dissertação (Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena/SP, 2013.
- [41] BRONCESVAL. **Aluminio aleación magnesio silicio 6063**. Disponível em: <http://www.broncesval.com/pt_broncesval/catalogo/index.asp?categoria=1&producto=10>. Acesso em: 11/12/2014.
- [42] ABDEL-RAHMAN, M. A.; AHMED, A. A.; BADAWI, E. A. **Testing Natural Aging Effect on Properties of 6066 & 6063 Alloys using Vickers Hardness and Positron Annihilation Lifetime Techniques**. Defect and Diffusion Forum Vols. 303-304 (2010) pp 107-112. Trans Tech Publications, Switzerland, 2010.
- [43] JACUMASSO, S. C. **Caracterização microestruturas das partículas de segunda fase de uma liga de alumínio AA7050 nas condições T7451, T6 e T6I4-65**. 114 f. Dissertação (Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa/PR, 2014.
- [44] ADEOSUN, S. O. *et al.* **Effect of Artificial Aging on Plane Anisotropy of 6063 Aluminium Alloy**. International Scholarly Research Network. Volume 2012, Article ID 639319, 5 pages. University of Lagos, Akoka, Lagos, Nigeria, 2012.
- [45] ALANEME, K. K.; ALUKO, A. O. **Production and Age-Hardening Behaviour of Borax SiC reinforced Al-Mg-Si alloy Composites developed by Double Stir-Casting Technique**. The West Indian Journal of Engineering Vol.34, Nos.1/2, January 2012, pp.80-85. ISSN 0511-5728.
- [46] POLMEAR, I. J. **Light Alloys**. 4. ed. Melbourne, Australia: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 0 7506 6371 5.
- [47] SAPA GROUP. **Extruded Aluminium Alloy 6063**. Disponível em: <<http://www.sapagroup.com/pages/522574/Brochures/Alloy%206063%20Rev2012.pdf>>. Acesso em: 30/11/2014.
- [48] SAPA GROUP. **Aluminium alloys – Alloys for extrusion**. Disponível em: <<http://www.aluminiumdesign.net/design-support/aluminium-alloys-alloys-for-extrusion/>>. Acesso em: 30/11/2014.
- [49] JACOBS, M. H. **TALAt Lecture 1204: Precipitation Hardening**. Interdisciplinary Research Centre in Materials, The University of Birmingham, United Kingdom, 1999.

- [50] TORRES, E. *et al.* **Caracterización de aleación de aluminio AA6063 T5 mediante microscopía óptica, electrónica de barrido y electrónica de transmisión.** Revista Colombiana de Materiales, Medellín, Colômbia N. 5 pp. 59-64.
- [51] FREITAS, M. *et al.* **Preparação e caracterização de materiais compósitos SiC/caulim/Al via “squeeze-casting”.** Cerâmica vol.55 no.335 São Paulo jul./set. 2009.
- [52] BARBOSA, C. **Caracterização de ligas de alumínio extrudadas e soldadas por centelhamento.** 163 f. Tese (Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2001.
- [53] TAN, C. F.; SAID, M. R. **Effect of Hardness Test on Precipitation Hardening Aluminium Alloy 6061-T6.** Chiang Mai J. Sci.; 36(3) : 276-286, 2009.
- [54] PALMERIN, J. M. *et al.* **Hardening Behavior in Aged Al-4%Cu-0.3%Mg Alloys with 0.5 and 2%Ag Additions.** The Japan Institute of Metals. Materials Transactions, Vol. 50, No. 12 pp. 2785 to 2789, 2009.
- [55] LÓPEZ E. A. T. **Soldagem por atrito com pino não consumível de chapas finas do aço 1020 e da liga de alumínio 6063 T5.** 186 f. Tese (Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2012.
- [56] ALEJANDRO, T. M. **Caracterización mecânica y microestructural de la aleación ligera de alumínio 6063-T6 de producción nacional.** 104 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Aeronáutica) – Instituto Politecnico Nacional – Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México, DF, 2007.
- [57] SANTOS, M. O. **Processamento do cobre por EACI.** 110 f. Dissertação (Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2008.
- [58] CAMILO, D. C. **Estudo da laminação criogênica e do envelhecimento natural na liga AA7050: microestrutura e propriedades.** 126 f. Dissertação (Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa/PR, 2013.
- [59] DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy.** 3. ed. McGraw-Hill, Philadelphia, USA, 1986. ISBN 978-0070168930.
- [60] LINS, J. F. C., *et al.* **Recristalização dinâmica em bandas de cisalhamento adiabáticas Induzidas num aço IF.** III Workshop sobre Textura São Paulo, 2006, pág. 47 a 60.
- [61] DE OLIVEIRA, T. R.; MONTHEILLET, F. **Estudo da recristalização dinâmica durante a deformação a quente dos aços inoxidáveis ferríticos estabilizados.** VII Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável, 23 a 25 de novembro de 2004, São Paulo/SP.
- [62] SOUZA, A. L. **Estudo da tensão média de escoamento de aços laminados em tiras a quente.** 55 f. Dissertação (Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2010.

[63] KUMAR, S. *et al.* **Hardness test**. Department of Aerospace Engineering Indian Institute of Space Science and Technology, Trivandrum, 2014.

[64] CIMM. **Teste de Dureza Mohs**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6561-teste-de-dureza-mohs#.VKhlgyvF-So>. Acesso em: 01/12/2014.

[65] GARZA, J. A. C. **Deformación plástica de una aleación de aluminio tipo 6063**. 175. F. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolas de los Garza, México, 2009.

[66] HOLZLE, L. R. B. **Comportamento eletroquímico do alumínio em misturas etilenoglicol-água. Efeito da adição de agentes quelantes**. 136. f. Tese (Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2005.

[67] SANTOS, W. I. A. **Caracterização da resistência à corrosão de ligas de alumínio após tratamentos alternativos à cromatização, com e sem revestimento orgânico**. 120 f. Dissertação (Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2011.

[68] GIORA, R. D. P. **Avaliação comparativa de barras laminadas do aço AISI 304L com e sem tratamento térmico de solubilização com foco em corrosão**. 80 f. Dissertação (Engenharia Siderúrgica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2012.

[69] LIMA, L. **Metodologia para avaliação da corrosão da zona termicamente afetada de aço inoxidável ferrítico AISI 439 soldado**. 110 f. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2007.

[70] WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. 176 p. vol. 49. EdUSP. 2013. ISBN: 9788531407499.

[71] ALMEIDA, J. C. M. *et al.* **Estudo da influência do tratamento de superfície em aço inoxidável 304, no potencial de corrosão por pite, obtido através de técnicas potencioestáticas**. VI CONNEPI. Natal/RN, 2011.

[72] SILVA, N. F. A. **Ligas de alumínio para o fabrico de rodas de bicicletas**. 69 f. Dissertação (Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2010.

[73] CAMPANA, R. C. **Parâmetros de processo, microestrutura e textura das ligas de alumínio AA6063 e AA6082 extrudadas**. 116 f. Dissertação (Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2008.

[74] CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 992 p. 8 ed. John Wiley & Sons, Inc, USA, 2010. ISBN: 9780470556733.

[75] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Designation E-112-96**⁶³. Standard test methods for detemining average grain size. International, 2004.

[76] PEREIRA, E.; DA SILVA, I. J.; DA COSTA, M. R. M. M. **Preparação de amostras para análise em microscopia eletrônica de varredura em interfaces de revestimentos cerâmicos**. Revista de Engenharia e Tecnologia. Vol. 5, n.º 1, pp 44-52, 2013. ISSN: 21767270.

[77] FAPESP. **Brasileiro ajuda a criar LED 40 vezes mais eficiente**. Instituto de Engenharia. Disponível em: <http://www.institutodeengenharia.org.br/site/noticias/print/id_sessao/4/id_noticia/8263>. Acesso em: 20/01/2015.

[78] THE PIERRE AUGER COLLABORATION. **Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects**. Science. v. 318, n. 5852, p. 938-43, 2007.

[79] SOARES, B. M. C. **Estudo da resistência à corrosão de ligas de alumínio para embalagem de bebidas carbonatadas**. 229 f. Tese (Tecnologia em Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2013.

[80] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **A descoberta dos raios-x**. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m_s01.html>. Acesso em: 15/12/2014.

[81] LIMA, R. S.; AFONSO, J. C.; PIMENTEL, L. C. F. **Raios-x: fascinação, medo e ciência**. Revista Química Nova, Vol. 32, No. 1, pp 263-270, 2009.

[82] TIJERINA, M. C. T. **Estimación de la mayoría de edad por la mineralización y el volumen de los terceros molares em una población de 14 a 22 años, em Monterrey (Nuevo León, México) por tomografía computerizada de imagenes**. 271. F. Tese (Investigação Odontológica) – Universidad de Granada, México, 2009.

[83] SPOMBERG, S. **Uso de difratometria de raios-x na quantificação de ferrita e austenita em aços inoxidáveis dúplex**. 113 f. Relatório (Programa de Bolsas de Iniciação Científica) – Faculdade de Engenharia Industrial, São Bernardo do Campo/SP, 2011.

[84] MARTINS, W. D. **Wilhelm Conrad Roentgen e a descoberta dos raios-x**. Revista Clínica e Pesquisa em Odontologia, Vol. 1, n.º 3, p. 59-63, 2005.

[85] VAN VLACK, L. H. **Elements of Materials Science and Engineering**. 610 p. 6 ed. 1989. ISBN: 9780201093148.

[86] CULLITY, B. D. **Elements of X-ray Diffraction**. 555 p. 2 ed. Publisher by Prentice Hall PTR. Department of Metallurgical Engineering and Materials Science University of Nôtre Dame, South Bend, USA, 1978. ISBN: 9780201011746.

[87] LAMAT. **Algumas técnicas de caracterização de materiais**. Disponível em: <<http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap5.pdf>>. Acesso em 15/12/2014.

- [88] INTERNET MICROSCOPE FOR SCHOOLS. **Micrographs: FCC Diffraction Spectrum**. Disponível em: <<http://pwatlas.mt.umist.ac.uk/internetmicroscope/micrographs/diffraction/fcc.html>>. Acesso em: 16/01/2015.
- [89] OLYMPUS. **Inverted Metallurgical Microscopes**. Disponível em: <<http://lri.se/pdf/olympus/GX-Series.pdf>>. Acesso em 18/01/2015.
- [90] JEOL. **JSM-IT300LV Versatile Research SEM**. Disponível em: <[http://www.jeolusa.com/PRODUCTS/ScanningElectronMicroscopes\(SEM\)/HVLVTungstenLaB6SEMs/JSM-IT300LV/tabid/1243/Default.aspx](http://www.jeolusa.com/PRODUCTS/ScanningElectronMicroscopes(SEM)/HVLVTungstenLaB6SEMs/JSM-IT300LV/tabid/1243/Default.aspx)>. Acesso em: 21/01/2015.
- [91] SHIMADZU. **Micro Hardness Tester: HMV-2 Series**. Disponível em: <shimadzu.com.br/analitica/produtos/microdurometros/catalogos/hmv-2.pdf>. Acesso em 18/01/2015.
- [92] PALMSENS. **EmStat² potentiostat**. Disponível em: <http://thasar.com/cms/images/palm/pdf/EmStat2%20description_thasar.pdf>. Acesso em: 14/01/2015.
- [93] MATERIALS RESEARCH LABORATORY AT UCSB: AN NSF MRSEC. **Philips X'PERT MPD**. Disponível em: <<http://www.mrl.ucsb.edu/x-ray-facility/instruments/philips-x%E2%80%99pert-mpd>>. Acesso em: 18/01/2015.
- [94] KONDOH, K.; OGINUMA, H.; AIZAWA, T. **Tribological Properties of Magnesium Composite Alloy with In-situ Synthesized Mg₂Si Dispersoids**. The Japan Institute of Metals. Materials Transactions, Vol. 44, No. 4 pp. 524 to 530, 2003.

APÊNDICE A – RELATÓRIO COMPLETO DO ENSAIO DE ESPECTROMETRIA

Tabela 19 – Relatório de espectrometria da liga 6063.

Teste	Elemento							
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
1	98,7	0,592	0,236	0,0098	0,0166	0,396	0,0068	0,004
2	98,7	0,595	0,232	0,0090	0,0163	0,384	0,0067	0,0037
3	98,7	0,592	0,226	0,0089	0,0162	0,396	0,0067	0,0035
4	98,7	0,597	0,232	0,0089	0,0159	0,382	0,0069	0,0032
Média	98,7	0,594	0,231	0,0092	0,0163	0,390	0,0068	0,0036

Teste	Elemento							
	Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr
1	0,0013	0,0227	<0,0001	0,0072	<0,0001	<0,0006	0,0006	0,0001
2	0,0013	0,0225	<0,0001	0,0083	<0,0001	<0,0006	0,0009	0,0001
3	0,0012	0,0211	<0,0001	0,0053	<0,0001	<0,0006	0,0011	<0,0001
4	0,0012	0,0219	<0,0001	0,0056	<0,0001	<0,0006	0,0011	<0,0001
Média	0,0012	0,0221	<0,0001	0,0066	<0,0001	<0,0006	0,0009	<0,0001

Teste	Elemento							
	V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Cd	Co
1	0,0068	<0,0001	<0,0015	0,0014	0,0036	0,0064	0,0006	<0,0010
2	0,0074	0,0002	<0,0015	0,0012	0,0035	0,0065	0,0004	<0,0010
3	0,0066	<0,0001	<0,0015	0,0006	0,0034	0,0060	0,0003	<0,0010
4	0,0066	<0,0001	<0,0015	0,0010	0,0032	0,0061	0,0003	<0,0010
Média	0,0068	<0,0001	<0,0015	0,0011	0,0034	0,0062	0,0004	<0,0010

Teste	Elemento						
	Ag	Hg	In	Sb	P	Ce	La
1	0,0009	0,0010	<0,0100	<0,0050	0,0038	<0,0006	0,0015
2	0,0008	<0,0010	<0,0100	<0,0050	0,0038	<0,0006	0,0016
3	0,0009	<0,0010	<0,0100	<0,0050	0,0031	<0,0006	0,0015
4	0,0008	<0,0010	<0,0100	<0,0050	0,0038	<0,0006	0,0016
Média	0,0008	<0,0010	<0,0100	<0,0050	0,0036	<0,0006	0,0016

Fonte: próprio autor.