

ANDRÉ WILLIAM PEREIRA MENEZES

ENDURECIMENTO DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO ENDURECÍVEL POR
PRECIPITAÇÃO EM DIFERENTES CONDIÇÕES INICIAIS

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da
Escola Politécnica da USP

São Paulo

2019

ANDRÉ WILLIAM PEREIRA MENEZES

ENDURECIMENTO DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO ENDURECÍVEL POR
PRECIPITAÇÃO EM DIFERENTES CONDIÇÕES INICIAIS

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo

Área de concentração:
Engenharia Metalúrgica e Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Eduardo Franco de Monlevade

São Paulo

2019

TF-2019

M 5252

H-2019-B

2925975

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800009426

8758174

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Menezes, André William

ENDURECIMENTO DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO ENDURECÍVEL POR
PRECIPITAÇÃO EM DIFERENTES CONDIÇÕES INICIAIS / A. W. Menezes --
São Paulo, 2019.

53 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Laminação 2.Tratamento Térmico I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais d-1
Escola Politécnica da USP

Aos meus Pais,

À minha irmã,

À minha noiva,

*E a todos que direta ou indiretamente
participaram da realização deste trabalho.*

Resumo

A liga de alumínio ASTM 6063 possui comportamentos muito interessantes para a indústria metalúrgica, como por exemplo, seu endurecimento por precipitação, que possibilita a utilização de tratamentos termomecânicos para formatar as características desejáveis ao material. Este tipo de liga apresenta também elevada ductilidade, permitindo ao material ser submetido a elevados graus de deformação. Por esse motivo, as ligas Al-Mg-Si apresentam a maior parte do volume de ligas extrudadas. Por meio destas características apresentadas, este trabalho tem como finalidade estudar a caracterização microestrutural e mecânica da liga Al-6063, por meio de ensaios de microdureza (Vickers), microscopia (ótica e eletrônica de varredura), tratamentos térmicos (envelhecimento e solubilização) e tratamentos mecânicos (laminação). Para a análise do endurecimento, foram realizadas laminações a frio (30%, 60% e 90% de redução em área) a partir de duas condições iniciais: envelhecida (T5); e solubilizada (521°C; 3600s; resfriamento em água). As análises microestruturais foram realizadas em microscópio ótico e eletrônico de varredura, e a caracterização mecânica foi realizada por meio de um durômetro. A partir dos procedimentos experimentais, verifica-se que tanto as amostras envelhecidas quanto as amostras solubilizadas apresentam em sua curva característica de dureza pela deformação plástica um comportamento convergente entre si até uma taxa de aproximadamente 60% de redução em área. Após 60% estes materiais apresentam divergências comportamentais quanto à taxa de endurecimento. Esta diferença comportamental muito provavelmente está ligada a diferentes mecanismos de endurecimento: além do processo de encruamento, presente nos dois tipos de amostras, há também um indicativo de que as amostras solubilizadas apresentam um endurecimento por precipitação de segunda fase.

Abstract

The aluminum alloy ASTM 6063 has very interesting behaviors for the metallurgical industry, such as its hardening by precipitation, that allows the use of thermomechanical treatments to format the desirable characteristics to the material. This type of alloy also presents high ductility, allowing the material to be submitted to high degrees of deformation. For this reason, Al-Mg-Si alloys have the bulk of the extruded alloy volume. The Al-6063 alloy is characterized by its microhardness (Vickers), microscopy (optical and scanning electron microscopy), thermal treatments (aging and solubilization) and mechanical treatments (lamination). For the hardening analysis, cold laminations (30%, 60% and 90% reduction in area) were performed from two initial conditions: aged (T5); and solubilized (521 ° C, 3600s, cooling in water). The microstructural analyzes were performed in scanning optical and electronic microscopes, and the mechanical characterization was performed using a durometer. From the experimental procedures, it is verified that both the aged samples and the solubilized samples present in their characteristic hardness curve by the plastic deformation a convergent behavior between them until a rate of approximately 60% reduction in area. After 60%, these materials exhibit behavioral differences regarding the rate of hardening. This behavioral difference is most likely linked to different hardening mechanisms: in addition to the hardening process, present in both types of samples, there is also an indication that the solubilized samples have a second stage precipitation hardening.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
2. Objetivo.....	14
3. Revisão Bibliográfica.....	15
3.1. Liga de Alumínio - Série 6XXX (Al-Mg-Si).....	17
3.2. Estado Encruado.....	19
3.3. Recuperação.....	19
3.4. Recristalização.....	20
3.5. Laminação.....	21
3.5.1. Laminação a Quente.....	22
3.5.2. Laminação a Frio.....	22
3.6. Endurecimento das ligas da série 6XXX.....	23
3.6.1. Solubilização.....	23
3.6.2. Têmpera.....	24
3.6.3. Envelhecimento.....	24
4. Procedimentos Experimentais.....	25
4.1. Preparação das Amostras.....	25
4.2. Solubilização.....	27
4.3. Dureza Vickers (HV).....	27
4.4. Redução de Área (laminação).....	28
4.5. Preparação Metalográfica.....	32
4.5.1. Embutimento.....	32
4.5.2. Lixamento e Polimento.....	33
4.5.3. Ataque Metalográfico.....	33
4.5.4. Microscopia Ótica e Eletrônica.....	34
5. Resultados e Discussões.....	36
5.1. Curva de Caracterização.....	39
5.2. Ensaio Metalográficos.....	42
5.2.1. Microscopia Ótica.....	42
5.2.2. Frequência dos Precipitados.....	45
5.2.3. EDS.....	51
6. Conclusão.....	52
7. Referências Bibliográficas.....	53

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –Propriedades do alumínio.....	16
TABELA 2–Nomenclatura das ligas de alumínio.....	16
TABELA 3–Composição química padrão da liga Al 6063.....	17
TABELA 4– Elementos de liga e contaminantes.....	18
TABELA 5–Valores da dureza Vickers das amostras do grupo A.....	36
TABELA 6–Valores da dureza Vickers das amostras do grupo B.....	37
TABELA 7–Valores da dureza Vickers das amostras envelhecidas.....	38
TABELA 8–Valores da dureza Vickers das amostras solubilizadas.....	38
TABELA 9 – Incidência dos precipitados de acordo com a deformação.....	49

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Desenho ilustrativo do processo de laminação.....	21
FIGURA 2 – Desenho ilustrativo do processo de recristalização na laminação.....	22
FIGURA 3 – Desenho ilustrativo do processo de laminação	23
FIGURA 4 – Amostra do corpo de prova.....	25
FIGURA 5 – Fluxograma dos procedimentos experimentais	26
FIGURA 6 – Forno utilizado no tratamento de solubilização.....	27
FIGURA 7 – Durômetro utilizado no ensaio de dureza Vickers.....	28
FIGURA 8 – Laminador utilizado no processo de laminação.....	29
FIGURA 9 – Corpo de prova com 30% de redução em área.....	29
FIGURA 10 – Desenho ilustrativo da seção longitudinal da amostra.....	30
FIGURA 11 – Corpo de prova com 60% de redução em área.....	30
FIGURA 12 – Desenho ilustrativo da seção longitudinal da amostra.....	31
FIGURA 13 – Corpo de prova com 90% de redução em área.....	31
FIGURA 14 – Desenho ilustrativo da seção longitudinal da amostra.....	32
FIGURA 15 – Amostras preparadas para análise microscópica.....	33
FIGURA 16 – Microscópio ótico utilizado.....	34
FIGURA 17 – Microscópio eletrônico utilizado.....	35
FIGURA 18 – Média da dureza Vickers em relação à redução em área.....	40
FIGURA 19 – Endurecimento em relação à redução em área.....	41
FIGURA 20 – Amostra envelhecida (T5), com 0% de redução em área, 1000x.....	42
FIGURA 21 – Amostra envelhecida (T5), com 30% de redução em área, 1000x.....	42

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 22 – Amostra envelhecida (T5), com 60% de redução em área, 1000x.....	43
FIGURA 23 – Amostra envelhecida (T5), com 90% de redução em área, 1000x.....	43
FIGURA 24 – Amostra solubilizada, com 0% de redução em área, 1000x.....	43
FIGURA 25 – Amostra solubilizada, com 30% de redução em área, 1000x.....	44
FIGURA 26 – Amostra solubilizada, com 60% de redução em área, 1000x.....	44
FIGURA 27 – Amostra solubilizada, com 90% de redução em área, 1000x.....	44
FIGURA 28 – Contagem manual de pontos da amostra A1.....	45
FIGURA 29 – Contagem manual de pontos da amostra A6.....	46
FIGURA 30 – Contagem manual de pontos da amostra A11.....	46
FIGURA 31 – Contagem manual de pontos da amostra A14.....	47
FIGURA 32 – Contagem manual de pontos da amostra B1.....	47
FIGURA 33 – Contagem manual de pontos da amostra B6.....	48
FIGURA 34 – Contagem manual de pontos da amostra B11.....	48
FIGURA 35 – Contagem manual de pontos da amostra B14.....	49
FIGURA 36 – Fração em área dos precipitados em relação à redução em área.....	50
FIGURA 37 – Ensaio de EDS sobre os precipitados.....	51

SIGLAS E ABREVIações

a	Parâmetro de rede
Al	Alumínio
cal	Caloria
B	Boro
CFC	(Estrutura Cristalina) Cúbica de Face Centrada
cm	Centímetro
Cu	Cobre
Cr	Cromo
EDE	Energia de falha de empilhamento
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
Fe	Ferro
g	Gramma
HV	Dureza Vickers
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
kgf	Quilo.grama.força
kWh	Quilo.Watt.hora
LPM	Laboratório de Processos Metalúrgicos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mg	Magnésio
Mn	Manganês

SIGLAS E ABREVIações

MPa	Mega.Pascal
POLI	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
PMT	Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
s	Segundos
Si	Silício
t	Tonelada
Ti	Titânio
Ts	Temperatura de solubilização
Zn	Zinco
°C	Graus Celsius
µm	Micrometro

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico tem proporcionado o desenvolvimento de materiais cada vez mais dinâmicos, resistentes e duradouros. Dentre esses materiais, as ligas de alumínio destacam-se entre as ligas metálicas pela sua conformabilidade, resistência à corrosão, resistência mecânica específica (relação resistência/peso), e reciclabilidade (economia de energia elétrica).

Sua aplicabilidade apresenta uma lista consideravelmente vasta, bem como no ramo de bens de consumo (artigos esportivos, eletrodomésticos, eletroeletrônicos e móveis), construção civil (boxes de banheiro, cantoneiras, janelas e portas), eletricidade (cabos condutores, capacitores, eletrodutos e lâmpadas), energético (combustíveis de foguetes e mísseis, explosivos, e redutor siderúrgico), e transporte (aeronáutico, automobilístico, espacial, metroviário e naval).

Quanto à caracterização microestrutural, o alumínio apresenta estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), parâmetro de rede (a) $\approx$ 0,4041nm, e resistência à corrosão devido à formação de camada passivadora. A inclusão de determinados elementos de liga (Cu, Mg, Mn, Ni, Zn, por exemplo), ou a aplicação de conformações mecânicas (extrusão, laminação, por exemplo) podem proporcionar o aumento de dureza e de resistência mecânica das ligas de alumínio.

As ligas de alumínio da série 6XXX destacam-se devido sua facilidade de serem trabalhadas, quando comparadas com as demais ligas termicamente (Al-Zn-Mg e Al-Cu), sendo as ligas Al-Mg-Si as que apresentam maior resistência à corrosão e soldabilidade.

A liga a ser estudada é a Al6063, na qual apresenta duas características que justificam o uso mais frequente na fabricação de perfilados quando comparada às demais liga de alumínio: a capacidade de endurecimento por precipitação (tratável termicamente); e elevada ductilidade, permitindo seu emprego em operações com elevados graus de deformação.¹

2. OBJETIVO

Este trabalho possui como finalidade estudar o endurecimento de uma liga de alumínio ASTM 6063(Al-Mg-Si)T5 e também desta liga na condição solubilizada. Tanto o grupo de amostras envelhecidas quanto o grupo de amostras solubilizadas foram submetidos a diferentes condições de conformação a frio (laminação). Para ambos os grupos serão analisadas suas curvas característica da dureza de acordo com as taxas de deformação, de acordo com aspectos mecânicos e microestruturais.

O processo de endurecimento do material pôde ser acompanhado por meio de ensaios de microdureza Vickers (HV), além de análises em microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O alumínio, na forma de óxido, é o metal mais abundante na crosta terrestre. Todavia, seu estado elementar ocorre apenas em pequenas quantidades, fazendo com que fosse pouco conhecido até o início do século XIX, quando estudos independentes de Hall, nos Estados Unidos, e de Heroult, na França, desenvolveram um método de extração eletrolítica, permitindo que a produção de alumínio se tornasse economicamente viável. Desde então, as características do alumínio e suas respectivas ligas têm sido estudadas e aprimoradas, e a oferta do alumínio como metal comercial tem sido função da disponibilidade de grandes quantidades de energia elétrica, e da reciclabilidade, reduzindo o consumo de energia em torno de 90%.^{1,2}

O alumínio metálico é obtido principalmente por meio da bauxita, composto por 40 - 60% de alumina hidratada e impurezas como óxidos de ferro, sílica e titânio. A bauxita é formada principalmente em solos de rochas cristalinas, como por exemplo, basalto e granito, possuindo as maiores reservas em países como Austrália, Guiné, Vietnam, Jamaica e Brasil.

A produção de alumínio ocorre basicamente em duas etapas: produção de alumina por meio da bauxita; e extração de alumínio da alumina por eletrólise. A produção de uma tonelada de alumínio requer em média 1,9t de alumina, que requer 4t de bauxita. Outros componentes também são consumidos significativamente neste processo: 0,3t de óleo combustível; 0,45t de carbono; e 14.000 kWh de energia elétrica, considerado o fator mais crítico na produção.

Quanto às propriedades metalúrgicas, o alumínio apresenta estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), parâmetro de rede (a) $\approx 0,4041\text{nm}$, e características de destaque em relação à maioria dos outros metais bem como baixa densidade, sendo utilizado em estruturas aeronáuticas, considerável condutividade elétrica e térmica, sendo utilizado como fios de alta tensão, conformabilidade, sendo utilizada na indústria automobilística na fabricação de peças estampadas, resistência à corrosão, devido à formação da camada passivadora, entre outras características apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do alumínio

Propriedades Físicas	
Coeficiente de expansão linear	$23 \cdot 10^{-6} \text{ L/}^\circ\text{C}$
Condutibilidade elétrica	62 (IACS)%
Condutibilidade térmica	$0,56 \text{ cal/cm} \cdot ^\circ\text{C} (25^\circ\text{C})$
Densidade	$2,71 \text{ g/cm}^3 (20^\circ\text{C})$
Módulo de elasticidade	69 GPa
Temperatura de fusão	$660 \text{ }^\circ\text{C}$

Espósito, Iara Maria.³

A nomenclatura das ligas de alumínio de produção comercial faz indicação a uma série de características do material: o primeiro dígito indica o grupo da liga; o segundo dígito indica as modificações da liga original ou limites da pureza; e os dois últimos dígitos identificam a liga de alumínio ou sua pureza. Dessa forma, temos as seguintes nomenclaturas para as ligas de alumínio, apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Nomenclatura para ligas de alumínio

Série	Principais Elementos de Liga
1XXX	-
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outras ligas (Lítio, Estanho, ...)

Espósito, Iara Maria.³

3.1. LIGA DE ALUMÍNIO - SÉRIE 6XXX (Al-Mg-Si)

Em 1921 foi estabelecida comercialmente a liga Al 6051, apresentando 0,5%Mg e 1%Si, sendo um dos primeiros casos de sucesso de ligas envelhecíveis sem Cu como elemento de liga. Em 1928, foi estabelecida uma otimização da liga Al 6151, com 1%Mg e 0,6%Si (além de 0,25%Cu e 0,05-0,35%Cr), conferindo maior resistência mecânica e ductilidade, pois apresenta a exata proporção de magnésio e silício para a formação de Mg_2Si (composto intermetálico responsável pelo endurecimento), sendo utilizada para fins estruturais.

A liga de alumínio Al 6063, apresentando 0,67%Mg e 0,4%Si, foi estabelecida comercialmente em 1944, sendo muito utilizada em extrudados. Outras ligas contendo teores de liga maiores foram desenvolvidas sequencialmente em 1954 (Al 6066), em 1962 (Al 6070) e em 1983 (Al 6013).

As ligas Al 6009 e Al 6010 foram estabelecidas em 1976, de forma a suprir a necessidade do setor automobilístico por uma liga conformável numa condição específica de têmpera, que envelhecesse durante a secagem da pintura de automóveis.¹

A Tabela 3 apresenta a composição química padrão da liga Al 6063.

Tabela 3 - Composição química padrão da liga Al 6063

Elemento	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Outros
% Máx.	0,10	0,10	0,35	0,90	0,10	0,60	0,10	0,10	0,15
% Mín.	-	-	-	0,45	-	0,20	-	-	-

Espósito, Iara Maria.³

A Tabela 4 apresenta diferentes elementos de liga ou contaminantes e seus respectivos efeitos e características nas ligas de alumínio.

Tabela 4 – Elementos de liga e contaminantes.

Elemento	Características
Cobre (Cu)	• Impureza na liga Al6063. • Endurecimento por precipitação durante o processo de envelhecimento.
Cromo (Cr)	• Impureza nas ligas da série 1XXX. • Aumento da resistividade elétrica e da resistência à corrosão.
Ferro (Fe)	• Impureza de maior incidência no alumínio. • Formação de intermetálicos grosseiros.
Magnésio (Mg)	• Aumento da resistência mecânica • Precipitação de Mg_2Si (fase endurecedora).
Manganês (Mn)	• Endurecimento da liga e aumento da resistência mecânica. • Dificulta a recristalização e o crescimento de grão.
Níquel (Ni)	• Aumento da resistência mecânica e da dureza.
Silício (Si)	• Impureza na liga de alumínio. • Precipitação de Mg_2Si (fase endurecedora).
Titânio (Ti)	• Refino de grão em peças fundidas.
Zinco (Zn)	• Aumento da resistência mecânica.

Espósito, Iara Maria.³

Nas ligas de alumínio da série 6XXX ocorre a formação de precipitados de segunda fase a partir da combinação dos elementos magnésio e silício em Mg_2Si , responsável pelo endurecimento da liga antes de atingir o equilíbrio no processo de superenvelhecimento. Os tratamentos térmicos de envelhecimento artificial e solubilização permitem esta precipitação, com granulometria refinada e uniformemente distribuída, proporcionando o aumento na dureza do material. Estas mudanças ocorrem por meio de transformações de fase envolvendo fenômenos de crescimento de grão e de precipitados, recristalização e solubilização de precipitados.

O endurecimento do material de acordo com o tempo e a temperatura de envelhecimento está relacionado com o crescimento dos precipitados de Mg_2Si . Seu crescimento excessivo, devido a altas temperaturas, proporciona efeito oposto (amolecimento), no qual beneficia o movimento das discordâncias na conformação mecânica.

3.2. ENCRUAMENTO

No processo de conformação mecânica do material ocorre o aumento da dureza influenciada pela deformação plástica, denominado "encruamento". Neste processo, cerca de 2-10% da energia aplicada fica retida no material na forma de energia relacionada ao excesso de defeitos cristalinos, refletindo o grau de desordem produzido. Esta energia constitui no potencial termodinâmico atuante nos processos de recuperação e recristalização.

As discordâncias e as lacunas são os defeitos cristalinos de maior importância nos processos de conformação: a primeira representa aproximadamente 90% da energia armazenada durante a deformação; a segunda atua na cinética das reações de recuperação e recristalização. A densidade e a distribuição destes defeitos dependem de fatores como, por exemplo, tamanho de grão, temperatura, tipo de deformação sofrida e tipo de material.⁴

3.3. RECUPERAÇÃO

O processo de recuperação consiste na restauração parcial das propriedades mecânicas e microestruturais, que por meio de tratamentos térmicos, proporciona a diminuição da energia interna (anteriormente aumentada no processo de encruamento). Esta diminuição ocorre pela migração dos defeitos puntiformes para os contornos de grão e para as discordâncias, e pela recuperação dos intersticiais com as lacunas, que facilitarão o processo de recristalização.⁴

3.4. RECRISTALIZAÇÃO

O processo de recristalização consiste na eliminação de defeitos cristalinos formados na migração dos contornos de grão no processo de deformação. Ela inicia-se com a nucleação de uma região livre de defeitos por meio de mecanismos de rearranjo de discordâncias. Esta região é delimitada por um contorno de grão de alto ângulo e com alta mobilidade sobre a matriz encruada ou previamente recuperada. As heterogeneidades de deformação são locais preferenciais para a nucleação da recristalização.

O processo de recristalização ocorre a partir da nucleação por meio da migração dos contornos de grão de alto ângulo sobre a matriz encruada. Esta migração pode ser amenizada por meio da dispersão dos precipitados e dos átomos de soluto, agindo como forças retardadoras. A dispersão de precipitados é influenciada pelo diâmetro médio das partículas e pelo espaçamento entre as partículas, em que quanto maior for o diâmetro médio das partículas e quanto menor for o espaçamento entre elas, maior será a força retardadora.

Átomos de soluto como, por exemplo, Cr, Mg, Mn, Si e Zn influenciam na diminuição da energia de falha de empilhamento (EDE), inibindo a recristalização devido à precipitação nos contornos de grão.⁵

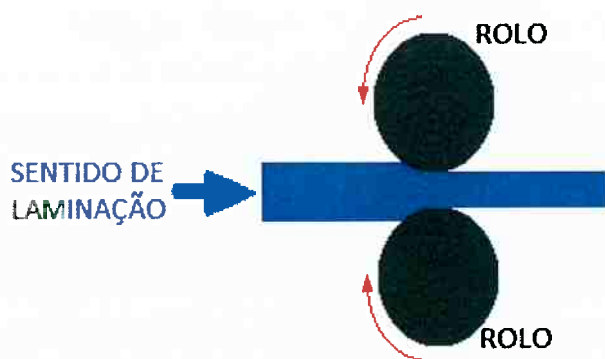
Um material que se encontra no estado supersaturado e deformado plasticamente pode se recristalizar em temperaturas similares às de precipitação de partículas de segunda fase. A temperatura de recristalização é determinante nos tipos de fenômenos que ocorrem no processo: em temperaturas abaixo da temperatura de recristalização há apenas a formação de partículas de segunda fase por precipitação, além do rearranjo das discordâncias e dos subgrãos de recuperação; em temperaturas intermediárias (entre temperatura de recristalização e de solubilização) ocorre a recristalização seguida da precipitação; e em temperaturas superiores à temperatura de solubilização ocorre a recristalização sem ocorrer precipitação.

A precipitação no processo de recristalização pode ocorrer também por precipitação descontínua, que ocorre junto à frente de reação da recristalização. Em temperaturas inferiores à de solubilização há interação entre o processo de precipitação descontínua e o processo de recristalização, no qual a cinética de reação é acelerada pelo aumento do potencial termodinâmico devido a migração de contornos. Em temperaturas ainda mais inferiores à de solubilização ocorrem os processos de precipitação contínua e descontínua de forma intensa a ponto de impedir a migração dos contornos de grão de alto ângulo, inibindo assim a recristalização contínua. Em temperaturas próximas à de solubilização este tipo de precipitação não influencia na recristalização do material.

3.5. LAMINAÇÃO

O processo de laminação de um material consiste na redução da secção transversal do material por compressão, por meio de sua passagem entre dois ou mais cilindros (rolos) de aço ou ferro fundido, com eixos paralelos, esquematizado na ilustração da figura 1. Esta secção é do tipo retangular e refere-se, por exemplo, a produtos planos de alumínio como placas, chapas e folhas.⁶

Figura 1 – Desenho ilustrativo do processo de laminação.

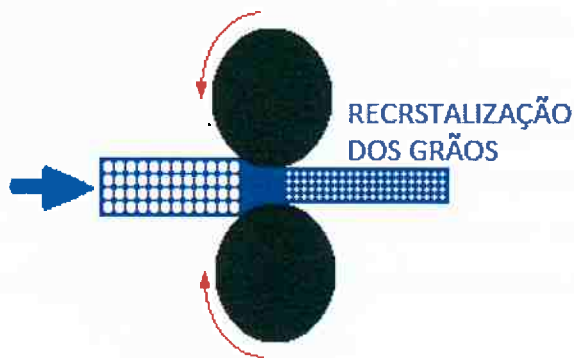


Autoria própria.

3.5.1. LAMINAÇÃO A QUENTE

O processo de laminação a quente do alumínio consiste no trabalho a temperaturas de aproximadamente 350°C, em que devido à proximidade com a temperatura de recristalização, e à máxima ductilidade que esta temperatura proporciona no material, é possível realizar elevadas reduções da secção transversal (redução em área), além de ocorrer a recristalização dinâmica na deformação plástica⁶. A figura 2 ilustra a microestrutura antes e depois (recristalizada) da laminação.

Figura 2 – Desenho ilustrativo do processo de recristalização na laminação.

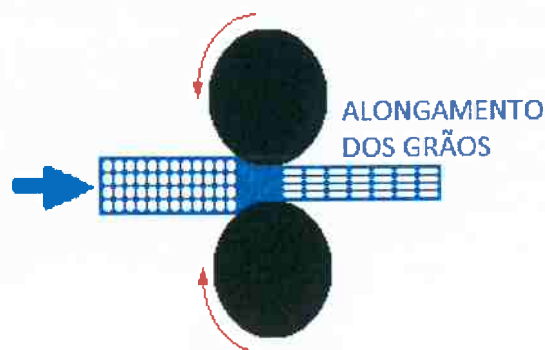


Autoria própria.

3.5.2. LAMINAÇÃO A FRIO

O processo de laminação a frio do alumínio consiste no trabalho em temperaturas consideravelmente inferior à temperatura de recristalização, de forma a favorecer o processo de encruamento do material, além do alongamento dos contornos de grão na direção de laminação, como mostrado no desenho ilustrativo da figura 3. Este encruamento faz com que as porcentagens de reduções transversais sejam limitadas (em relação à laminação a quente), necessitando em muitos casos recorrer à laminação a quente anteriormente à laminação a frio⁶.

Figura 3 – Desenho ilustrativo do processo de laminação.



Autoria própria.

3.6. ENDURECIMENTO DAS LIGAS DA SÉRIE 6XXX

O endurecimento das ligas da série 6xxx ocorre devido à precipitação de um composto intermetálico (Mg_2Si) por fatores como a temperatura (envelhecimento artificial por tratamento térmico) e o tempo (envelhecimento natural). Inicialmente é realizada a solubilização, seguida de têmpera e posteriormente o envelhecimento.

3.6.1. SOLUBILIZAÇÃO

O processo de solubilização é considerada a etapa de maior importância no processo de endurecimento pois proporciona ao material as condições necessárias para a precipitação no processo de envelhecimento. A temperatura de solubilização, $521^{\circ}C$ para a liga de alumínio 6063, situa-se entre as temperaturas *solvus* e *solidus*, no qual promove o processo de difusão no estado sólido, diluindo os elementos de liga na matriz de alumínio. Para que a difusão seja completa é necessário que a liga permaneça tempo suficiente, que varia de acordo com o tipo e a massa do material, caso contrário, a dissolução dos elementos de liga pode ser incompleta, prejudicando posteriormente a formação dos precipitados.

Além do tempo, temperatura está diretamente ligada à solubilidade dos elementos de liga na matriz, sendo determinante na obtenção da solubilização máxima. Em algumas ligas a temperatura de máxima solubilidade corresponde à temperatura eutética. Entretanto, as temperaturas de solubilização devem ser limitadas a fim de se evitar o superaquecimento e possíveis fusões parciais.⁷

3.6.2. TÊMPERA

O Processo de têmpera consiste no resfriamento rápido de forma a manter, posteriormente à solubilização, os elementos de liga em solução sólida e a concentração de lacunas. Estas possuem elevada importância no processo de difusão dos átomos de soluto, favorecendo a precipitação no envelhecimento.

A velocidade de resfriamento deve ser controlada a ponto de ser suficientemente elevada para não ocorrer precipitação inicial de precipitados indesejados, além de promover melhores propriedades mecânicas.⁷

3.6.3. ENVELHECIMENTO

O processo de envelhecimento consiste na etapa posterior à solubilização e têmpera, sendo responsável pela precipitação de estruturas que proporcionarão o endurecimento do material. Este processo pode ocorrer de maneira natural, no qual a cinética de precipitação ocorre em temperatura ambiente ao decorrer do tempo, ou de maneira artificial, por meio de tratamento térmico.

Neste processo, o material se encontra inicialmente num estado metastável e de elevada energia, que será a força motriz para a precipitação de fases estáveis. A solução sólida supersaturada dará origem a agrupamentos de átomos segregados, chamados de zonas de Guinier-Preston (precipitação), que serão enriquecidas por átomos de soluto da matriz, originando precipitados metastáveis e de granulometrias maiores.⁷

4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho, os materiais metálicos utilizados são constituídos de liga de alumínio ASTM6063 T5, fornecidos pela Votorantim Metais na forma de placas extrudadas, que serão submetidos a tratamentos térmicos de solubilização, e conformação mecânica por laminação.

4.1. PREPARAÇÃO INICIAL DAS AMOSTRAS

A partir de uma placa metálica homogênea (composição e propriedades), foram preparados corpos-de-prova de iguais dimensões (20x25x5,35mm), figura 4, por meio de uma serra fita. As amostras foram divididas em 2 grupos: A e B, com 16 amostras respectivamente (A1,A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11, A12, A13, A14, A15 e A16) e (B1, B2, B3, B4, B5 B6, B7, B8, B9, B10, B11, B12, B13, B14, B15 e B16).

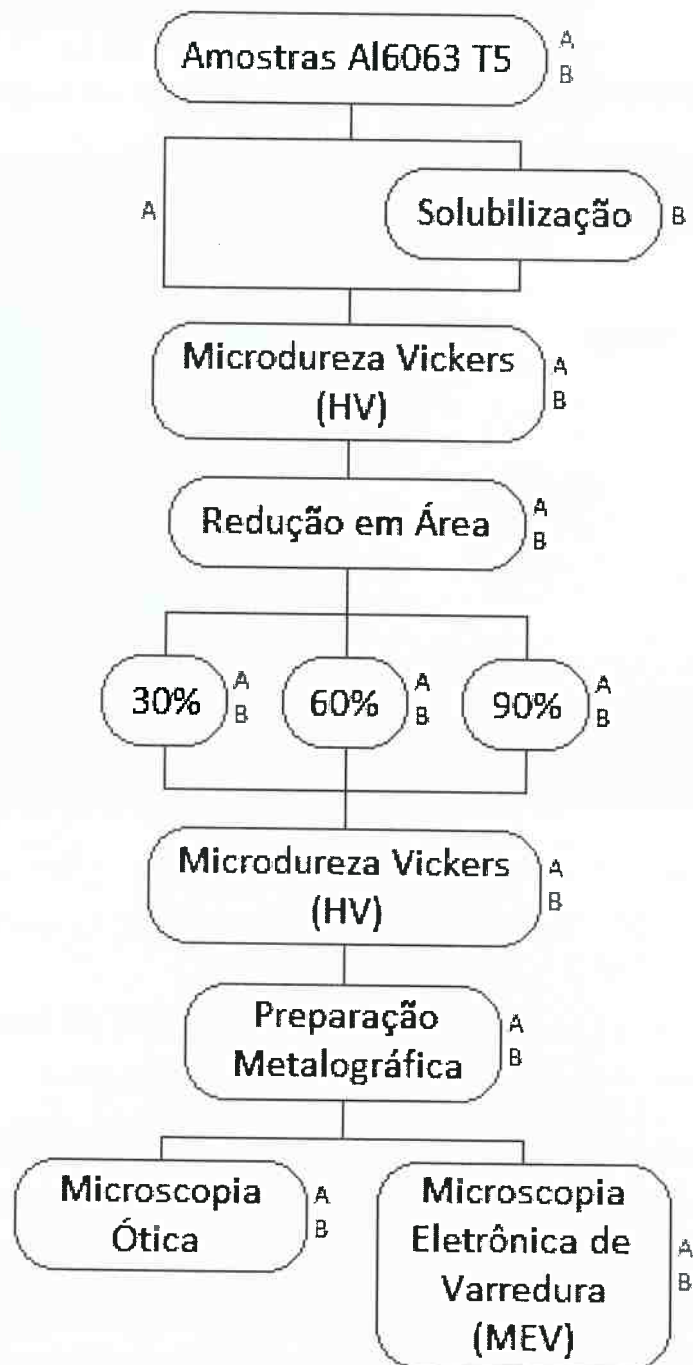
Figura 4 – Amostra do corpo de prova.



Autoria própria.

A figura 5 a seguir apresenta um fluxograma mais detalhado dos procedimentos experimentais para os grupos "A" e "B" a serem realizados, respectivamente.

Figura 5 – Fluxograma dos procedimentos experimentais.



Autoria própria.

4.2. SOLUBILIZAÇÃO

O tratamento de solubilização do alumínio foi realizado em um forno elétrico à resistência tipo mufla apresentado na figura 6, marca Brasimet, nos corpos-de-prova do grupo B. A temperatura utilizada foi de 521°C, por 3600s. O resfriamento foi realizado em água em temperatura ambiente.

Figura 6 – Forno utilizado no tratamento de solubilização.



Autoria própria.

4.3. ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado no Laboratório de Metalografia do Departamento de Metalurgia e Materiais (PMT-POLI), por meio do durômetro Otto Wolpert-Werke, modelo Dia Testor 2Rc, apresentado na figura 7. As endentações foram realizadas de forma regularmente distribuída pela amostra a fim de atenuar erros de medições por possíveis heterogeneidades de laminação. Foi utilizada carga de 5kgf.

Figura 7 – Durômetro utilizado no ensaio de dureza Vickers.



Autoria própria.

4.4. CONFORMAÇÃO MECÂNICA POR LAMINAÇÃO

As amostras do grupo A e B foram laminadas em temperatura ambiente, obtendo-se amostras com redução em área de 30% (A5, A6, A7, A8, B5, B6, B7 e B8), redução de 60% (A9, A10, A11, A12, B9, B10, B11 e B12), e redução de 90% (A13, A14, A15, A16, B13, B14, B15 e B16). Algumas amostras envelhecidas (A1, A2, A3 e A4) e solubilizadas (B1, B2, B3 e B4) não foram laminadas, sendo estabelecidas como “grupo de controle”.

Para o processo de laminação foi utilizado um laminador Eletrauri duo reversível, figura 8, disponível no Hall Tecnológico do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT-POLI).

Figura 8 – Laminador utilizado no processo de laminação.



Autoria própria.

Inicialmente, todas as amostras apresentaram mesmos valores de espessura (5,35mm), conferindo assim a regularidade dimensional por parte do fabricante. Dessa forma, para uma redução de 30% em área, foi calculada uma espessura final de 3,75mm. Considerando a dificuldade de se obter exatamente este valor na laminação, foram considerados os valores obtidos experimentalmente em cada amostra, sendo denominados “redução efetiva”. A figura 9 apresenta o aspecto da amostra após o processo de laminação.

Figura 9 – Corpo de prova com 30% de redução em área.



Autoria própria.

Após a laminação, as amostras apresentaram uma discreta curvatura (forma de “C”) de acordo com o desenho ilustrativo da figura 10.

Figura 10 – Desenho ilustrativo da seção longitudinal da amostra.



Autoria própria.

Para uma redução de 60% em área, foi calculada uma espessura final de 2,14mm, sendo consideradas as respectivas reduções efetivas. A figura 11 apresenta o aspecto da amostra após o processo de laminação.

Figura 11 – Corpo de prova com 60% de redução em área.



Autoria própria.

Após a laminação, as amostras apresentaram uma discreta ondulação (forma de “S”) de acordo com o desenho ilustrativo da figura 12.

Figura 12 – Desenho ilustrativo da seção longitudinal da amostra.



Autoria própria.

Para uma redução de 90% em área, foi calculada uma espessura final de 0,54mm, sendo consideradas as respectivas reduções efetivas. A figura 13 apresenta o aspecto da amostra após o processo de laminação.

Figura 13 – Corpo de prova com 90% de redução em área.



Autoria própria.

Após a laminação, as amostras apresentaram uma discreta curvatura (forma de "C"), desta vez lateralmente, de acordo com o desenho ilustrativo da figura 14. Este efeito de encurvamento lateral se deve a um mínimo desalinhamento dos rolos que o laminador utilizado apresenta. Dessa forma, as amostras de 30% e 60% de redução também possuem este encurvamento lateral, mas não são perceptíveis por possuírem comprimentos menores. As alterações de espessura nos materiais devido a estes encurvamentos foram insignificantes.

Figura 14 – Desenho ilustrativo da seção longitudinal da amostra.



Autoria própria.

A redução de espessura por passe era de 0,4mm (equivalente a uma volta inteira na manivela de abertura dos rolos), sendo, portanto aplicados 4 passes na redução em área de 30%, 8 passes na redução de 60% e 12 passes na redução de 90% (em alguns casos foi realizado um passe a mais sem alterar a abertura dos rolos, visando um ajuste fino da espessura).

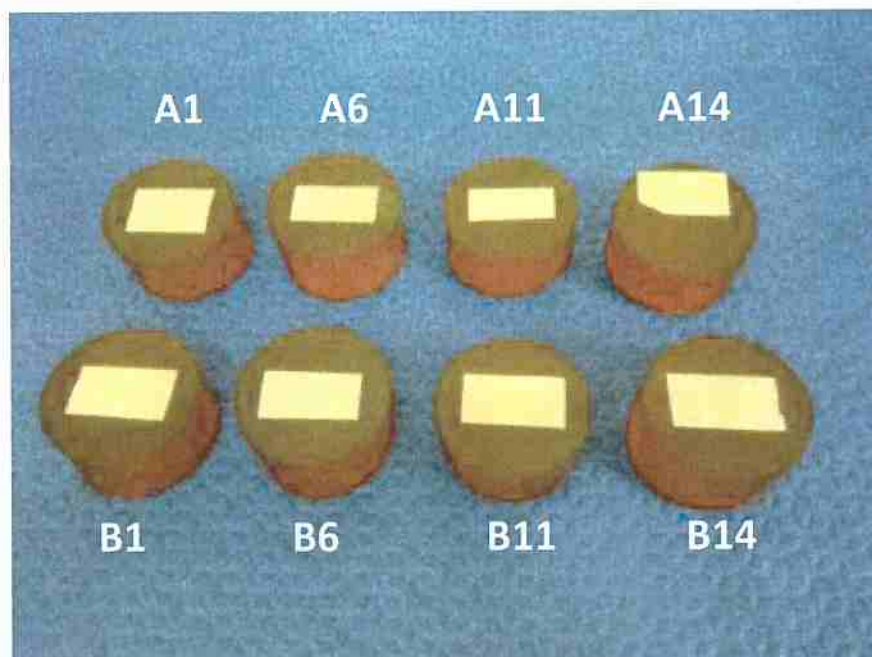
4.5. PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA

Esta etapa consiste no embutimento das amostras visando sua melhor manuseabilidade e conservação das propriedades, de forma a garantir o cumprimento das análises necessárias. Por se tratar de um material com temperaturas de transformação microestrutural relativamente baixas, como por exemplo, a temperatura de envelhecimento (175°C para a liga ASTM6063), é necessário realizar o embutimento a frio para não ocorrer alteração das propriedades a serem analisadas.

4.5.1. EMBUTIMENTO

Para análise em microscopia ótica e de varredura, foi realizado o embutimento das amostras em Resina Poliéster Orto-Tereftálica (L120), curada com 1% em massa de catalisador butanox. Esta resina possui coloração âmbar, tempo de gel de 10-15min, tempo de cura total de 10-12h e temperatura máxima de cura de 145°C.⁸ A figura 15 apresenta as amostras após o preparo.

Figura 15 – Amostras preparadas para análise microscópica.



Autoria própria

4.5.2. LIXAMENTO E POLIMENTO

O lixamento foi realizado numa politriz metalográfica, utilizando sequencialmente, lixas n° 180, 220, 320, 400, 600 e 1200, sob lubrificação em água, e aplicação de força manualmente.

O polimento foi realizado também numa politriz metalográfica, utilizando sequencialmente, panos com pastas de diamante de granulometrias de 6 μ m, 3 μ m e 1 μ m, sob lubrificação em álcool, e aplicação de força manualmente. As amostras foram limpas em álcool e imediatamente secadas em secador.

4.5.3. ATAQUE METALGRÁFICO

O ataque metalográfico foi realizado no Laboratório de Processos Metalúrgicos (LPM-IPT), utilizando, de acordo com a literatura, solução ácida (1mL HF 48%+ 200mL H₂O) por imersão de 30s.⁹

4.5.4. MICROSCOPIA ÓTICA E ELETRÔNICA

Para análise microestrutural foi utilizado um microscópio ótico Olympus, modelo BX60MF, figura 7, disponível no Laboratório de Metalografia (PMT-POLI).

Figura 16 – Microscópio ótico utilizado.



Autoria própria.

Foi realizado o ensaio de EDS, visando a análise qualitativa da composição dos precipitados, em microscópio eletrônico de varredura com canhão de efeito de campo FEI, modelo Inspect 50, figura 8, realizado no Laboratório de microscopia eletrônica e de Força Atômica (PMT-POLI).

Para este ensaio foram utilizadas as amostras envelhecidas (A1, A6, A11 e A14) e as amostras solubilizadas (B1, B6, B11 e B14).

Figura 17 – Microscópio eletrônico utilizado.



Autoria própria.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores das tabelas 5 e 6 correspondem às medidas a dureza Vickers (HV) das amostras envelhecidas (grupo A) e solubilizadas (grupo B), respectivamente, antes do processo de laminação. Foi obtido um valor médio de $(53,3 \pm 1,1)$ HV para as amostras envelhecidas, e $(46,3 \pm 0,7)$ HV para as amostras solubilizadas.

Tabela 5 – Valores da dureza Vickers das amostras do grupo A.

AMOSTRA	ENVELHECIMENTO (T5)					
	DUREZA VICKERS (HV)			MÉDIA		
A1	53,9	53,9	52,6	53,5	±	0,8
A2	52,6	52,1	53,9	52,9	±	0,9
A3	53,9	52,6	52,6	53,0	±	0,8
A4	53,9	51,8	52,6	52,8	±	1,1
A5	50,2	54,4	53,9	52,8	±	2,3
A6	52,6	56,5	55,2	54,8	±	2,0
A7	52,6	51,3	52,6	52,2	±	0,8
A8	52,6	53,9	52,6	53,0	±	0,8
A9	53,9	55,7	52,6	54,1	±	1,6
A10	53,9	54,4	53,9	54,1	±	0,3
A11	52,6	53,9	53,9	53,5	±	0,8
A12	53,1	53,1	53,9	53,4	±	0,5
A13	53,9	53,9	53,9	53,9	±	0,0
A14	52,6	52,6	53,9	53,0	±	0,8
A15	51,3	52,6	53,9	52,6	±	1,3
A16	52,6	52,6	52,6	52,6	±	0,0
MÉDIA GERAL						
53,3 ± 1,1						

Autoria própria.

Para cada amostra (corpo-de-prova), em todos os ensaios (todas as tabelas de HV) foram realizadas 4 medições, sendo descartada a com maior divergência a fim de garantir a maior acurácia possível.

Tabela 6 – Valores da dureza Vickers das amostras do grupo B.

	SOLUBILIZAÇÃO (521°C ; 3600s)				
AMOSTRA	DUREZA VICKERS (HV)			MÉDIA	
B1	46,8	45,8	45,8	46,1	± 0,6
B2	46,8	46,8	47,0	46,9	± 0,1
B3	47,0	46,8	46,8	46,9	± 0,1
B4	45,8	45,8	44,8	45,5	± 0,6
B5	47,0	45,8	46,8	46,5	± 0,6
B6	47,0	46,8	45,8	46,5	± 0,6
B7	46,8	45,8	47,0	46,5	± 0,6
B8	46,8	47,0	45,8	46,5	± 0,6
B9	47,0	45,8	46,8	46,5	± 0,6
B10	46,8	47,0	45,8	46,5	± 0,6
B11	45,8	45,8	46,8	46,1	± 0,6
B12	46,8	45,8	45,8	46,1	± 0,6
B13	45,8	45,8	46,8	46,1	± 0,6
B14	45,8	46,8	45,8	46,1	± 0,6
B15	46,8	45,8	45,8	46,1	± 0,6
B16	45,8	44,8	44,8	45,1	± 0,6
				MÉDIA GERAL	
				46,3 ± 0,7	

Autoria própria.

Foi medida a microdureza Vickers (HV) das amostras envelhecidas (grupo A) e solubilizadas (grupo B), e os dados obtidos são expressos nas tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 7 – Valores da dureza Vickers das amostras envelhecidas.

	ENVELHECIMENTO (T5) + LAMINAÇÃO					
AMOSTRA	REDUÇÃO (%)	RED. EFETIVA (%)	DUREZA			MÉDIA
A1	0	0	52,6	53,9	53,9	53,5 ± 0,8
A2	0	0	52,6	53,9	52,6	53,0 ± 0,8
A3	0	0	52,6	52,6	53,9	53,0 ± 0,8
A4	0	0	52,6	53,9	52,6	53,0 ± 0,8
A5	30	29	87,8	87,8	85,2	86,9 ± 1,5
A6	30	28	83,6	85,2	85,2	84,7 ± 0,9
A7	30	29	85,2	85,2	87,8	86,1 ± 1,5
A8	30	29	85,2	87,8	85,2	86,1 ± 1,5
A9	60	58	96,5	96,5	96,5	96,5 ± 0,0
A10	60	59	96,5	96,5	97,8	96,9 ± 0,8
A11	60	59	95,3	96,5	94,6	95,5 ± 1,0
A12	60	59	96,5	95,3	96,5	96,1 ± 0,7
A13	90	90	103	103	103	103,0 ± 0,0
A14	90	92	103	101	103	102,3 ± 1,2
A15	90	90	103	102	104	103,0 ± 1,0
A16	90	90	103	103	103	103,0 ± 0,0
	REDUÇÃO (%)	RED. EFETIVA (%)	ENDURECIMENTO(%)			MÉDIA GERAL
	0	0	0,0			53,1 ± 0,7
	30	28,8	61,7			85,9 ± 1,5
	60	58,75	81,1			96,3 ± 0,8
	90	90,5	93,5			102,8 ± 0,7

Autoria própria.

Tabela 8– Valores da dureza Vickers das amostras solubilizadas.

	SOLUBILIZAÇÃO (521°C ; 3600s) + LAMINAÇÃO					
AMOSTRA	REDUÇÃO (%)	RED. EFETIVA (%)	REDUÇÃO			MÉDIA
B1	0	0	46,8	45,8	45,8	46,1 ± 0,6
B2	0	0	46,8	46,8	47,0	46,9 ± 0,1
B3	0	0	47,0	46,8	46,8	46,9 ± 0,1
B4	0	0	45,8	45,8	44,8	45,5 ± 0,6

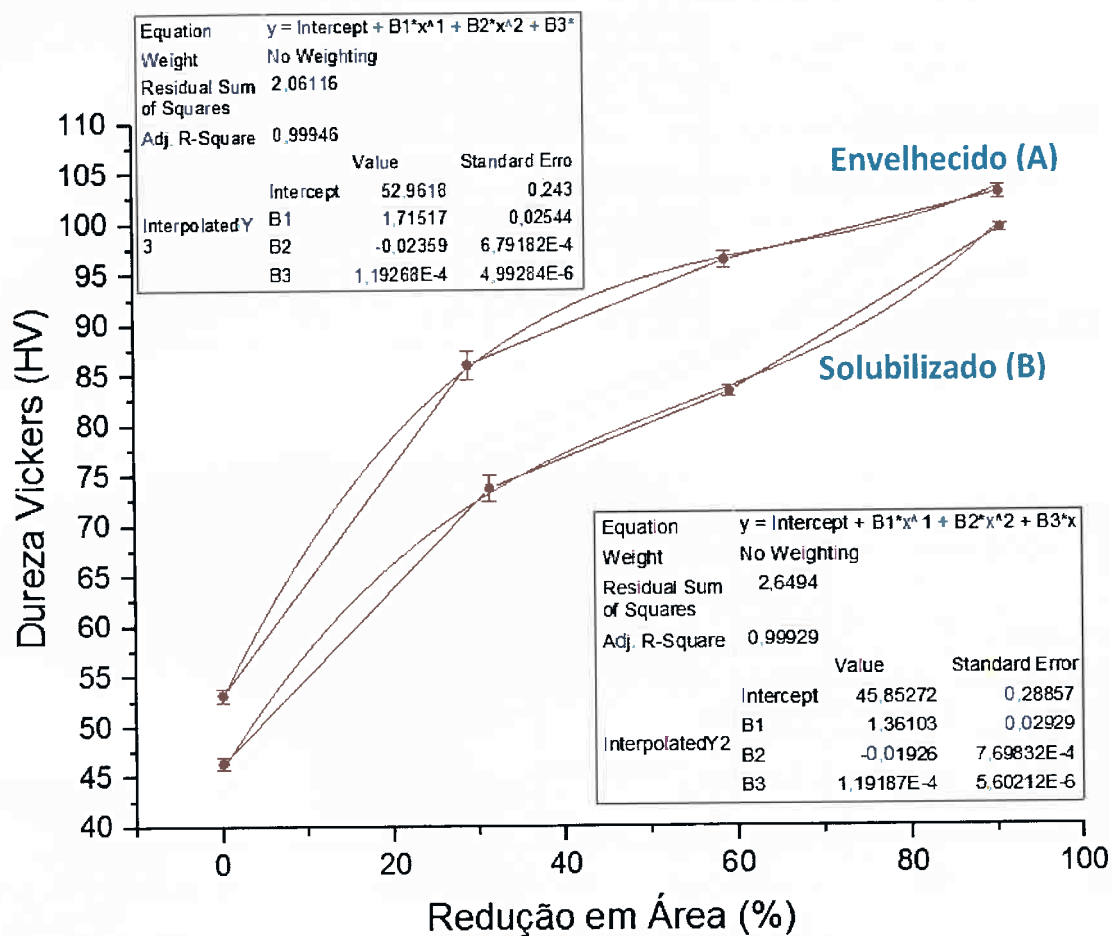
AMOSTRA	REDUÇÃO (%)	RED. EFETIVA (%)	REDUÇÃO			MÉDIA
B5	30	32	72,0	71,6	73,6	72,4 ± 1,1
B6	30	32	71,6	73,6	73,6	72,9 ± 1,2
B7	30	30	75,7	74,0	75,7	75,1 ± 1,0
B8	30	31	72,4	74,9	75,7	74,3 ± 1,7
B9	60	59	80,2	85,2	82,6	82,7 ± 2,5
B10	60	60	82,6	83,6	82,6	82,9 ± 0,6
B11	60	60	82,6	83,6	85,2	83,8 ± 1,3
B12	60	58	82,6	82,6	85,2	83,5 ± 1,5
B13	90	90	99,7	99,7	100,0	99,8 ± 0,2
B14	90	90	99,7	99,7	99,0	99,5 ± 0,4
B15	90	91	99,7	101,0	96,5	99,1 ± 2,3
B16	90	92	99,7	98,4	98,4	98,8 ± 0,8
	REDUÇÃO (%)	RED. EFETIVA (%)	ENDURECIMENTO (%)			MÉDIA GERAL
	0	0	0,0			46,3 ± 0,7
	30	31,25	59,1			73,7 ± 1,3
	60	59,25	79,6			83,2 ± 0,5
	90	90,75	114,3			99,3 ± 0,4

Autoria própria.

5.1. CURVA DE CARACTERIZAÇÃO

A partir dos valores das tabelas 7 e 8, obtidos experimentalmente, foram plotados os gráficos 1 e 2, de forma a compreender de forma mais didática o comportamento dos materiais envelhecidos (A) e solubilizados (B) referente à dureza Vickers (HV), em relação a porcentagem de endurecimento, de acordo com a porcentagem de redução em área no processo de laminação. Para cada curva característica foi plotada uma linha de tendência para analisar matematicamente o desempenho do material.

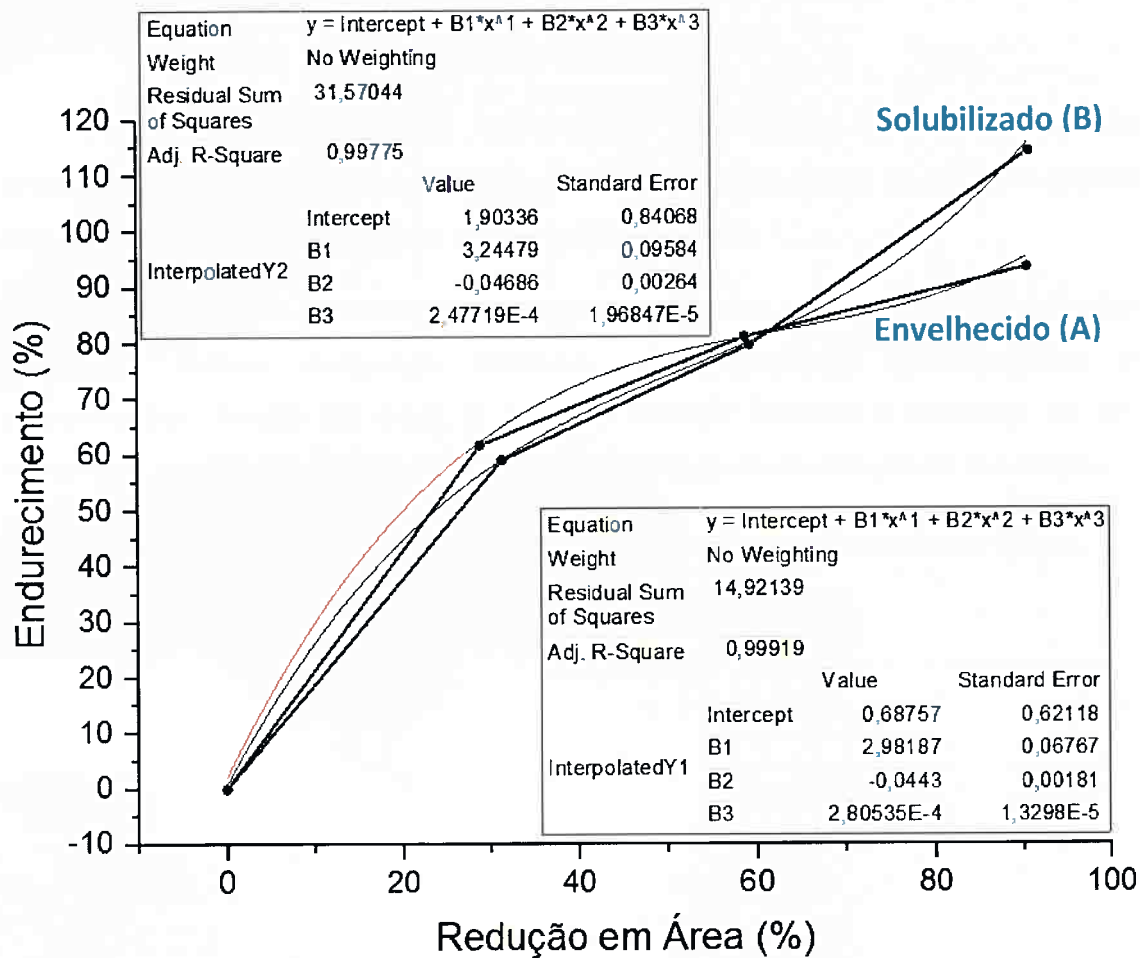
Figura 18 – Média da dureza Vickers em relação à redução em área.



Autoria própria.

Analisando inicialmente o gráfico 1, tanto as amostras envelhecidas quanto as amostras solubilizadas apresentam inicialmente um aumento de dureza acentuado, no qual essa taxa de crescimento vai diminuindo e tendendo à estabilização ao decorrer do avanço da porcentagem de redução em área na laminação até aproximadamente 60%. Posteriormente a 60% os materiais possuem divergências comportamentais quanto à taxa de crescimento: as amostras envelhecidas continuam com uma taxa de crescimento tendendo à estabilização; já as amostras solubilizadas apresentam uma retomada de crescimento.

Figura 19 – Endurecimento em relação à redução em área.



Autoria própria.

Quando levado em consideração a porcentagem de endurecimento das amostras em relação à redução em área, gráfico 2, a análise fica mais evidente: até 60% de redução em área o grupo de amostras envelhecidas e o grupo de amostras solubilizadas apresentam convergência em sua curva característica; e após 60% de redução as amostras envelhecidas apresentam uma tendência de estabilização de sua taxa de crescimento, atingindo um aumento de dureza na casa dos 90%, enquanto as amostras solubilizadas apresentam uma inflexão na curva de porcentagem de endurecimento, retomando uma taxa de crescimento ascendente e atingindo porcentagens de endurecimento superiores a 110%.

5.2. ENSAIOS METALOGRAFICOS

5.2.1. MICROSCOPIA ÓTICA

Foram obtidos resultados referentes à microscopia ótica dos materiais envelhecidos, figura 20 a 23, e dos materiais solubilizados, figura 24 a 27, de acordo com as porcentagens de redução em área na laminação.

De acordo com as micrografias, todas as amostras apresentaram precipitados (pontos e formas poligonais marrons), com diferentes granulometrias e concentrações (fração em área). É possível verificar também a presença de um relevo com aspecto de “linhas paralelas”, no qual trata-se da direção de laminação.

Figura 20 – Amostra envelhecida (T5), com 0% de redução em área, 1000x.



Autoria própria.

Figura 21 – Amostra envelhecida (T5), com 30% de redução em área, 1000x.



Autoria própria.

Figura 22 – Amostra envelhecida (T5), com 60% de redução em área, 1000x.



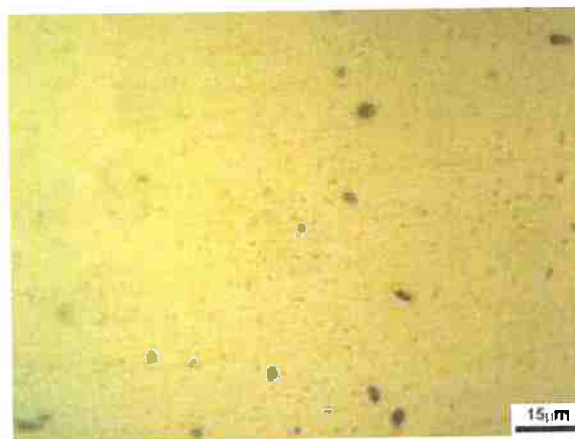
Autoria própria.

Figura 23 – Amostra envelhecida (T5), com 90% de redução em área, 1000x.



Autoria própria.

Figura 24 – Amostra Solubilizada, com 0% de redução em área, 1000x.



Autoria própria.

Figura 25 – Amostra Solubilizada, com 30% de redução em área, 1000x.



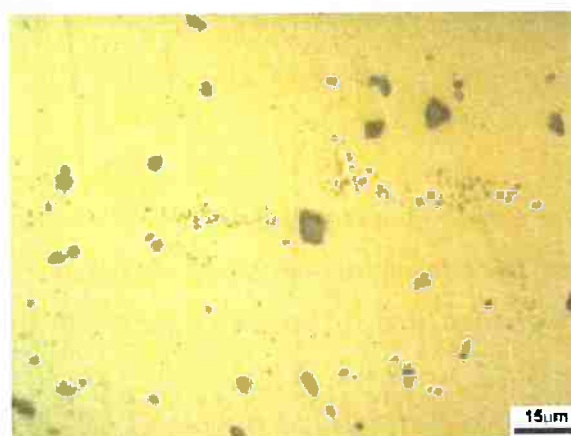
Autoria própria.

Figura 26 – Amostra Solubilizada, com 60% de redução em área, 1000x.



Autoria própria.

Figura 27 – Amostra Solubilizada, com 90% de redução em área, 1000x.



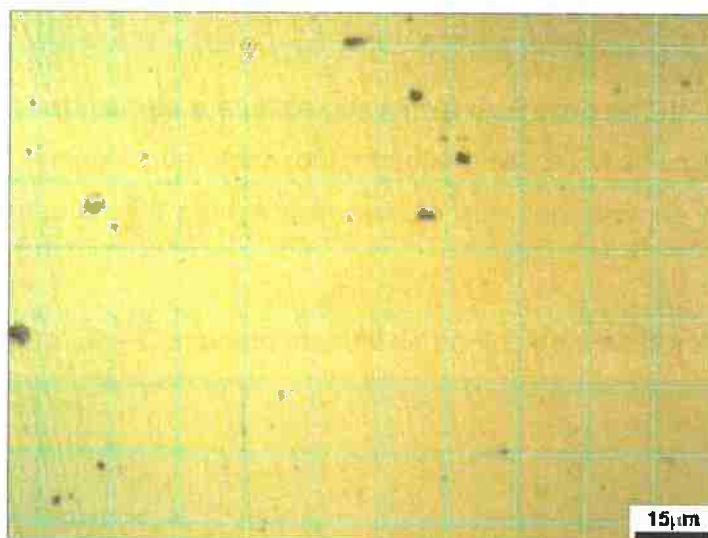
Autoria própria.

5.2.2. FREQUÊNCIA DOS PRECIPITADOS

Para uma análise quantitativa dos precipitados, foram calculadas as frações em área por meio do método de contagem manual de pontos. Este método consiste na contagem dos precipitados coincidentes aos pontos de cruzamento de uma malha quadriculada (cor ciano), em relação a todos os pontos de cruzamento da malha, fornecendo assim uma porcentagem de incidência.

A figura 28 apresenta a análise qualitativa da fração em área de precipitados na amostra A1 (envelhecida, sem conformação plástica). A micrografia apresentou um ponto incidente em 88 pontos possíveis, o que corresponde a 1,1% ($1/88$) de precipitado.

Figura 28 – Contagem manual de pontos da amostra A1.



Autoria própria.

A figura 29 apresenta a análise qualitativa da fração em área de precipitados na amostra A6 (envelhecida, sem conformação plástica). A micrografia apresentou 2 pontos incidentes em 88 pontos possíveis, o que corresponde a 2,3% ($2/88$) de precipitado.

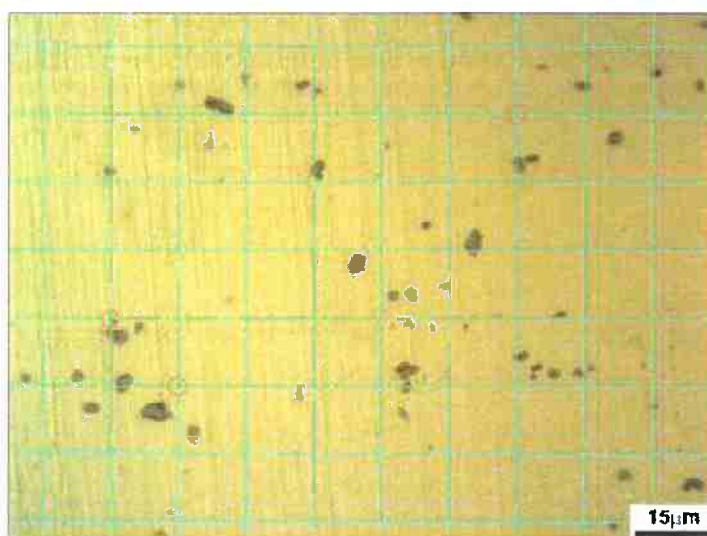
Figura 29 – Contagem manual de pontos da amostra A6.



Autoria própria.

A figura 30 apresenta a análise qualitativa da fração em área de precipitados na amostra A11 (envelhecida, sem conformação plástica). A micrografia apresentou 3 pontos incidentes em 88 pontos possíveis, o que corresponde a 3,4% (3/88) de precipitado.

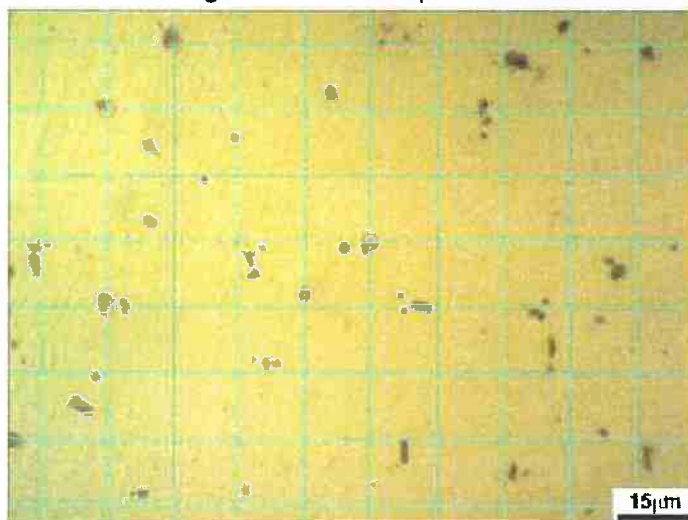
Figura 30 – Contagem manual de pontos da amostra A11.



Autoria própria.

A figura 31 apresenta a análise qualitativa da fração em área de precipitados na amostra A14 (envelhecida, sem conformação plástica). A micrografia apresentou 4 pontos incidentes em 88 pontos possíveis, o que corresponde a 4,5% (4/88) de precipitado.

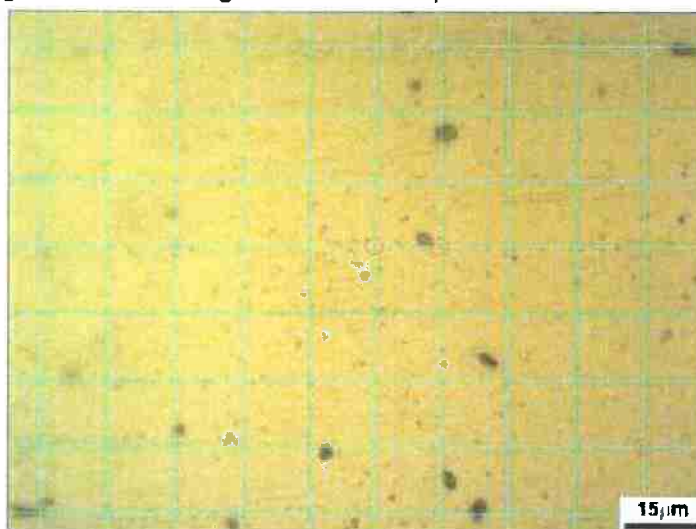
Figura 31 – Contagem manual de pontos da amostra A14.



Autoria própria.

A figura 32 apresenta a análise qualitativa da fração em área de precipitados na amostra B1 (solubilizada, sem conformação plástica). A micrografia apresentou 3 pontos incidentes em 88 pontos possíveis, o que corresponde a 3,4% (3/88) de precipitado.

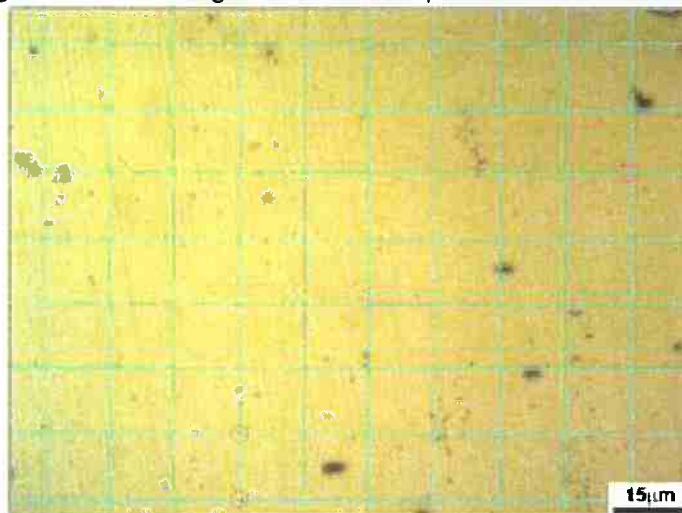
Figura 32 – Contagem manual de pontos da amostra B1.



Autoria própria.

A figura 33 apresenta a análise qualitativa da fração em área de precipitados na amostra B6 (solubilizada, sem conformação plástica). A micrografia apresentou 4 pontos incidentes em 88 pontos possíveis, o que corresponde a 4,5% (4/88) de precipitado.

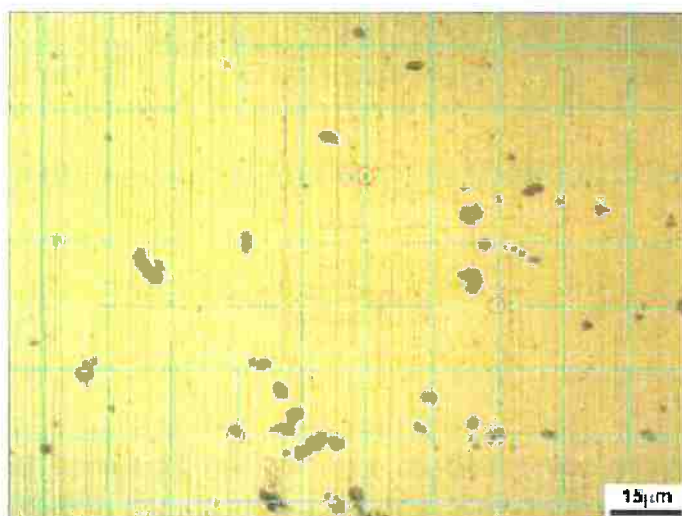
Figura 33 – Contagem manual de pontos da amostra B6.



Autoria própria.

A figura 34 apresenta a análise qualitativa da fração em área de precipitados na amostra B11 (solubilizada, sem conformação plástica). A micrografia apresentou 5 pontos incidentes em 88 pontos possíveis, o que corresponde a 5,7% (5/88) de precipitado.

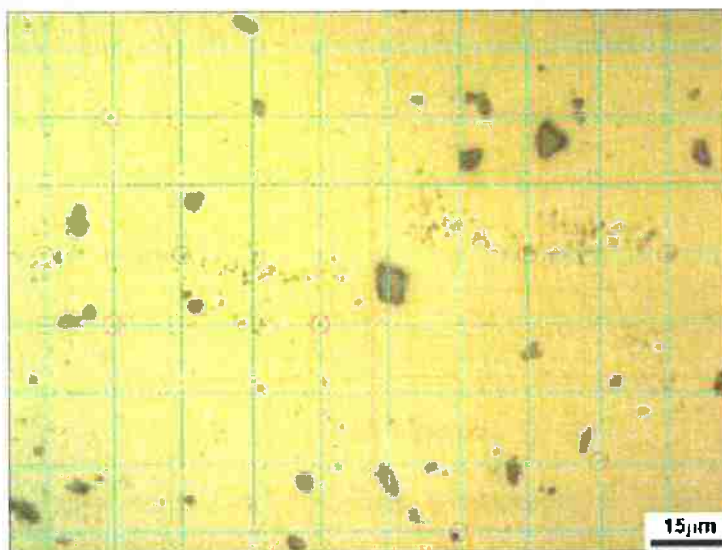
Figura 34 – Contagem manual de pontos da amostra B11.



Autoria própria.

A figura 35 apresenta a análise qualitativa da fração em área de precipitados na amostra B14 (solubilizada, sem conformação plástica). A micrografia apresentou 10 pontos incidentes em 88 pontos possíveis, o que corresponde a 11,4% (10/88) de precipitado.

Figura 35 – Contagem manual de pontos da amostra B14.



Autoria própria.

Os valores calculados referentes as 8 amostras foram organizados na tabela 9.

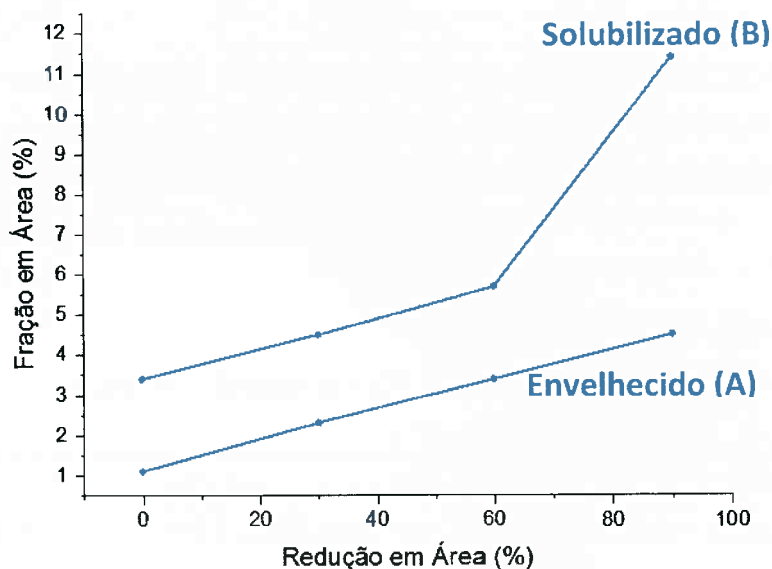
Tabela 9 – Incidência dos precipitados de acordo com a deformação.

Deformação em área (%)	Fração em área dos precipitados (%)	
	Envelhecida (A)	Solubilizada (B)
0	1,1	3,4
30	2,3	4,5
60	3,4	5,7
90	4,5	11,4

Autoria própria.

A figura 36 apresenta graficamente os dados da tabela x, visando uma formatação mais didática para análise dos resultados.

Figura 36 – Fração em área dos precipitados em relação à redução em área.



Autoria própria.

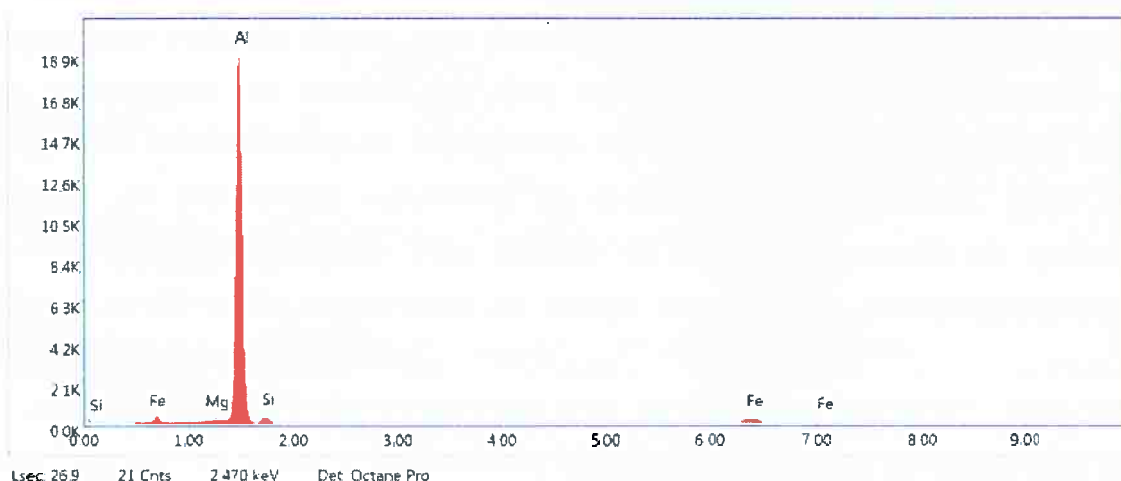
Verifica-se que tanto as amostras envelhecidas quanto as amostras solubilizadas apresentam o mesmo ritmo de crescimento da fração em área para valores de redução em área de até 60%. Após 60% de redução as amostras envelhecidas mantêm o mesmo ritmo de crescimento da densidade de precipitados, enquanto as amostras solubilizadas apresentam um salto considerável na densidade de precipitados. Estas curvas característica convergem de alguma forma com o desempenho dos materiais apresentados no gráfico da figura x, apontando uma possível interação entre a frequência de precipitados e o endurecimento dos materiais.

Por se tratar de um método simplório, e devido ao tamanho da malha utilizada fornecer uma quantidade relativamente limitada de pontos (88 pontos), a análise possui incertezas de medições. Dessa forma, os valores obtidos representam apenas um indicativo (uma tendência), não podendo afirmar que há um crescimento substancial na densidade de precipitados nas amostras até 60%. Apenas o crescimento da densidade de precipitados da amostra solubilizada de 60% para 90% em redução em área merece de fato uma consideração de aumento substancial.

5.2.3. EDS

Os ensaios de EDS foram realizados na amostra B14 e os realizados mostram que os precipitados possuem em sua composição elementos como Al, Fe, Mg e Si. Outra análise importante está na possível ausência de oxigênio. Dados da análise quantitativa são expressos na figura 37.

Figura 37 – Ensaio de EDS sobre os precipitados.



Autoria própria.

Considerando que a ausência de um determinado elemento no EDS não necessariamente exclui de fato sua possível presença na composição da microestrutura, não se pode concluir assertivamente quanto à presença/ausência de óxidos. Todavia, a análise apresenta um indicativo dos precipitados serem regiões de segunda fase. Outra análise a ser considerada é a incidência predominante de Al no precipitado, indicando possível incidência da gota de interação sobre a matriz e/ou tensão de aceleração (2470keV) muito acima do indicado.

6. CONCLUSÃO

Por meio dos procedimentos experimentais empregados neste trabalho, juntamente com os dados da literatura disponíveis, pode-se concluir que as ligas de alumínio comercial 6063 com diferentes graus de deformação plástica (0%, 30%, 60%, e 90%), sob diferentes condições iniciais (envelhecida e solubilizada), apresentam comportamentos convergentes até certo grau de porcentagem de redução em área, na ordem de 60% de redução em área: tanto os materiais envelhecidos quanto os materiais solubilizados apresentam um acentuado crescimento inicial da dureza, com diminuição da taxa de crescimento ao decorrer da porcentagem de redução em área na laminação. Este comportamento é decorrente principalmente do encruamento do material, dado que a princípio não ocorreu um crescimento substancial da densidade de precipitados, como foi analisado quantitativamente pelo método de contagem manual de pontos, caracterizando assim o aumento de dureza como sendo predominantemente mecânico (deformação plástica).

Posterior a 60% de redução em área, os materiais apresentam diferentes desempenhos: as amostras envelhecidas tendem à estabilização do crescimento da dureza Vickers, atingindo valores na casa dos 90% de endurecimento, enquanto que as amostras solubilizadas apresentam uma inflexão na curva de crescimento, tornando o crescimento ascendente, atingindo valores superiores a 110% de endurecimento. Esta retomada do ritmo de crescimento na amostra solubilizada apresenta ligação com o aumento da densidade (fração em área) dos precipitados, de acordo com o método de contagem manual de pontos. Dessa forma, considerando que as composições qualitativas dos precipitados apontam um indicativo de segunda fase, as amostras solubilizadas apresentam, além do encruamento, um segundo mecanismo de endurecimento: químico, por meio da transformação de fase.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ferrari, Ricardo Bulcão. Caracterização de Liga Metálica a base de Alumínio – Magnésio Obtida por Método Convencional após Tratamentos Termomecânicos Visando Estruturas Microcristalinas. 2008. 85p. Mestrado – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo.
- [2] de Souza, Saul Hissaci. Cinética de Amolecimento da Liga de Alumínio AA 7075 Durante Recozimento Após Laminação a Frio. 2018. 94p. Mestrado - Escola Politécnica - Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [3] Espósito, Iara Maria. Caracterização e Cinética de Recristalização da Liga de Alumínio 6063 após Tratamentos Termomecânicos. 2006. 82p. Mestrado – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo.
- [4] Simielli, E. A. Influência do Tempo de aquecimento na Recristalização de Duas Ligas de Alumínio. 1986. 93p. Mestrado - Escola Politécnica - Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [5] Poetscher, F. Efeito do Número de Passes e do Tratamento Térmico Pós-Soldagem de Liga de Alumínio AA 6063 Soldada por Atrito Linear com Mistura (FSW). 2009. 190p. Mestrado - Escola Politécnica - Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [6] Associação Brasileira de Alumínio. Guia Técnico de Laminação. Outubro/1994.
- [7] Maia, A. M. P. Efeito dos ciclos de solubilização e envelhecimento no comportamento da liga de alumínio 6101. 2012. 84p. Mestrado – Faculdade de Engenharia (FEUP) - Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade do Porto, Porto.
- [8] (Resinas. Disponível em: < <http://www.avipol.com.br/resinas.html> >. Acesso em: 17/agosto/2018).
- [9] ASM Metals HandBook Volume 9 – Metallography and Microstructures.