



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AMAZONAS

IGOR REIS BARROS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS TÊMPERAS T4 E T6 NA DUREZA DE UMA LIGA
DE ALUMÍNIO 6061**

MANAUS - AM

2017



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AMAZONAS

IGOR REIS BARROS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS TÊMPERAS T4 E T6 NA DUREZA DE UMA LIGA
DE ALUMÍNIO 6061**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), Campus Manaus Centro para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. MSc. Alberto de Castro Monteiro.

MANAUS - AM

2017



IGOR REIS BARROS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS TÊMPERAS T4 E T6 NA DUREZA DE UMA LIGA
DE ALUMÍNIO 6061**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), Campus Manaus Centro para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. MSc. Alberto de Castro Monteiro e coorientação do Prof. MSc. Cristóvão Américo Ferreira de Castro.

Aprovado em / / 2017

BANCA EXAMINADORA:

Prof. MSc. Alberto de Castro Monteiro
Instituto Federal do Amazonas - IFAM
Presidente Banca Examinadora

Prof. MSc. Cristóvão Américo Ferreira
de Castro
Instituto Federal do Amazonas - IFAM
Membro Examinador

Prof^a. MSc. Andréa Regina L. Nascimento
Instituto Federal do Amazonas – IFAM
Membro Examinador



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AMAZONAS

DEDICATÓRIA

*Dedico a meus pais Paulo Silva Barros e
Magna dos Reis Barros que sempre me
educaram com amor e respeito.*



AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar forças e saúde para prosseguir.

A meus pais, Paulo Silva Barros e Magna dos Reis Barros pelo constante incentivo nos estudos e pelo apoio e amor.

À Cláudia da Costa Campos, por todo o amor e paciência ao longo dos anos, me apoiando e incentivando a ser uma pessoa melhor.

Ao professor Alberto de Castro Monteiro, por ter aceitado orientar este trabalho.

A professora Andréa Regina L. Nascimento e o professor Cristóvão Américo F. de Castro que me coorientaram na realização deste trabalho.

Aos meus colegas que me apoiaram e compartilharam diversos momentos agradáveis e até mesmo difíceis ao longo dos anos da graduação.

Aos meus amigos e técnicos da Universidade Federal do Amazonas, que tenho o prazer de conviver diariamente e inclusive me ajudaram em algumas etapas deste trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM por todo o ensino, desde os tempos do ensino médio-técnico, onde tive a oportunidade de fazer boas e verdadeiras amizades.

A todos os professores do curso, que foram essenciais para a formação de Engenheira Mecânica.

Obrigado a todos vocês.



RESUMO

Sabemos que o alumínio apresentado em seu estado puro possui propriedades mecânicas como dureza e resistência a tração muito baixas, impedindo o seu uso na engenharia desta forma. Para se obter um aumento de propriedades, o mesmo é utilizado na forma de liga. As ligas de alumínio têm como objetivo melhorar as suas propriedades e são formadas com a adição de outros materiais, os chamados elementos de liga. A liga utilizada neste trabalho é a 6061, uma liga que tem como principais elementos de liga o silício e o magnésio e a propriedade mecânica a ser melhorada é a sua dureza. A principal forma de se aumentar a dureza de uma liga de alumínio é o chamado endurecimento por precipitação, processo que é dividido em três etapas: solubilização, têmpera e envelhecimento (que pode ocorrer de forma natural ou artificial). Diferentes temperaturas e tempos de endurecimento resultam em diferentes resultados de dureza e o objetivo deste trabalho é avaliar algumas temperaturas e tempos de envelhecimento, determinando qual ocasiona um maior aumento de dureza.

Palavras chaves: alumínio; tratamentos térmicos; dureza; envelhecimento artificial.



ABSTRACT

We know that the aluminum presented in its pure state has weak mechanical properties such as hardness and tensile strength, preventing its use in engineering in this way. To obtain an improvement in properties, it is used in the form of an alloy. Aluminum alloys aim to improve their properties and are formed with the addition of other materials, the so-called alloying elements. The alloy used in this work is the 6061, an alloy that has as main alloying elements silicon and magnesium and the mechanical property to be improved is its hardness. The main way to increase the hardness of an aluminum alloy is called precipitation hardening, a process that is divided into three stages: solubilization, quenching and aging (which can occur naturally or artificially). Different temperatures and aging times result in different hardness results and the objective of this work is to evaluate some temperatures and aging times, determining which causes a greater increase of hardness.

Keywords: aluminum; Heat treatments; hardness; artificial aging.



SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
OBJETIVOS	14
OBJETIVO GERAL	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
1.1 Ligas de alumínio	15
1.1.1 <i>Características do alumínio</i>	15
1.1.2 <i>Composição química e classificação das ligas</i>	16
1.1.3 <i>Ligas de alumínio tratáveis termicamente</i>	17
1.1.4 <i>Têmperas</i>	19
1.1.5 <i>Propriedades e aplicações das ligas de alumínio</i>	20
1.1.6 <i>Diagrama de fases do alumínio</i>	22
1.2 Tratamento térmico de ligas de alumínio	25
1.2.1 <i>Endurecimento por precipitação</i>	26
1.2.2 <i>Tratamento térmico de solubilização</i>	27
1.2.3 <i>Têmpera</i>	28
1.2.4 <i>Envelhecimento</i>	29
1.3 Propriedades mecânicas	31
1.3.1 <i>Resistência a tração</i>	32
1.3.2 <i>Dureza</i>	33
1.3.3 <i>Tenacidade</i>	34
1.4 Ensaios mecânicos dos materiais metálicos	36
1.4.1 <i>Classificação dos ensaios mecânicos</i>	36



1.4.2	<i>Normatização técnica dos ensaios mecânicos</i>	37
1.4.3	<i>Ensaios destrutivos</i>	38
1.4.3.1	<i>Ensaio de tração</i>	38
1.4.3.2	<i>Considerações sobre o ensaio de tração</i>	41
1.4.3.3	<i>Ensaio de compressão</i>	41
1.4.3.4	<i>Ensaio de dureza</i>	43
1.4.3.5	<i>Ensaio de fluência</i>	44
1.4.3.6	<i>Ensaio de fadiga</i>	45
1.4.3.7	<i>Ensaio de impacto de Charpy</i>	46
1.4.4	<i>Ensaos não destrutivos</i>	48
2.	Materiais e métodos	50
2.1	Materiais	50
2.1.1	<i>Liga de alumínio 6061</i>	50
2.1.2	<i>Amostras</i>	51
2.2	Método	51
2.2.1	<i>Tratamento térmico das amostras</i>	52
2.2.2	<i>Ensaio de dureza</i>	53
3.	Resultados e discussões	54
3.1	Análise do material em seu estado comercial	54
3.2	Análise da amostra envelhecida naturalmente	55
3.3	Análise das amostras envelhecidas artificialmente	56
3.3.1	<i>Envelhecimento artificial a 120°C</i>	56
3.3.2	<i>Envelhecimento artificial a 160°C</i>	57
3.3.3	<i>Envelhecimento artificial a 220°C</i>	57
3.4	Análise comparativa entre todas as amostras	58



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AMAZONAS

CONSIDERAÇÕES FINAIS 61

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 62



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura CFC do alumínio.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 2 - Diagrama de fase de uma liga alumínio-silício	23
Figura 3 -Diagrama de fases de uma liga alumínio-magnésio	23
Figura 4 - Diagrama de fase ternário de uma liga de alumínio-silício-magnésio.....	25
Figura 5 - Representação esquemática da variação de temperatura em função do tempo durante as etapas do endurecimento por precipitação	26
Figura 6 - Diagrama pseudo-binário Al-Mg ₂ -Si.....	28
Figura 7 - Curva TTT de uma liga de alumínio 6082	29
Figura 8 - Variação da resistência mecânica e dureza ao longo do envelhecimento.....	30
Figura 9 - Variação da dureza com o tempo de envelhecimento artificial em diferentes temperaturas	30
Figura 10 - Curva tensão-deformação de engenharia.....	32
Figura 11- Esquema de máquina utilizada no ensaio de tração.....	36
Figura 12 – Corpos de prova para ensaio de tração	39
Figura 13 – (a) Esboço do ensaio de compressão em corpo de prova cilíndrico. (b) Resultado da fratura observada em materiais frágeis. (c) Resultado do embarrilhamento observado e materiais dúcteis	42
Figura 14 - Comparação entre os comportamentos à tração e à compressão de dois materiais frágeis (ferro fundido cinzento e concreto, respectivamente)	43
Figura 15 - Tipos de ensaios de penetração e suas características	45
Figura 16 - Curva característica de ensaios de fadiga para materiais ferrosos e não ferrosos ...	46
Figura 17 - Equipamento de ensaio de impacto	47
Figura 18 - Representação do corpo de prova do tipo Charpy	48
Figura 19 - Ensaios não-destrutivos mais utilizados	49
Figura 20 – Amostras cortadas para análise (Fonte: Autor)	51
Figura 21 – Forno tipo mufla utilizado nos tratamentos (Fonte: Autor)	52
Figura 22 - Estufa utilizada no envelhecimento artificial das amostras (Fonte: Autor)	53
Figura 23 – Durômetro utilizado para os ensaios de dureza Rockwell B (Fonte: Autor)	54
Figura 24 – Gráfico do aumento de dureza em função do tempo de envelhecimento natural ...	56
Figura 25 – Gráfico comparativo dos valores obtidos de dureza em função do tempo	59



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Designação das ligas trabalháveis de alumínio	17
Tabela 2 - Composição química de algumas ligas de alumínio da série 6xxx	17
Tabela 3 - Divisão dos grupos das ligas de alumínio	18
Tabela 4 – Designações básicas de têmperas de ligas de alumínio	19
Tabela 5 – Subdivisões dos tratamentos térmicos T	20
Tabela 6 - Algumas características e aplicações de ligas de alumínio	21
Tabela 7 - Algumas características e aplicações de ligas de alumínio (continuação)	22
Tabela 8 - Efeito da temperatura de solubilização na tensão máxima de uma liga 6061 após o envelhecimento	27
Tabela 9 - Módulo de elasticidade de alguns materiais a temperatura ambiente	40
Tabela 10: Algumas propriedades mecânicas de uma liga 6061 de alumínio	50
Tabela 11: Composição química da liga 6061	51
Tabela 12: Dureza ao longo do envelhecimento natural da amostra AN	55
Tabela 13: Resultados do envelhecimento artificial a 120°C	57
Tabela 14: Resultados do envelhecimento artificial a 160°C	57
Tabela 15: Resultados do envelhecimento artificial a 220°C	58
Tabela 16 – Nomenclatura das amostras e respectivos valores de dureza	58

INTRODUÇÃO

O alumínio é um dos metais com a utilização mais recente, se comparado com outros como cobre e o ferro, mesmo sendo um dos mais abundantes: com mais de 5% da crosta terrestre sendo composta por ele. O fato dele não aparecer como um elemento isolado e sim combinado a outros materiais contribui para isto, somente com o desenvolvimento de novas técnicas de separação foi possível utilizá-lo a nível industrial.

Atualmente o alumínio é altamente consumido, cerca de 24 milhões de toneladas por ano (Martins, 2008) em diversas aplicações que vão desde a construção civil, processos industriais e aviação. O grande consumo e aplicação do alumínio se deve muito ao fato de se desenvolverem diversas ligas diferentes com variadas composições químicas, que conferem ao mesmo material um leque de diversas propriedades e características diferentes.

A grande versatilidade do alumínio e o seu custo benefício faz com que cada vez mais ele venha substituindo até mesmo o aço em suas aplicações e um fator que vem contribuindo para isto é que muitas de suas ligas podem ser tratadas termicamente, obtendo características semelhantes ou até mesmo superiores.

Algumas ligas de alumínio podem ser tratadas termicamente, como as das séries 2xxx, 6xxx, 7xxx e algumas da 8xxx. Em geral um tratamento térmico é um processo de aquecimento e resfriamento controlado que tem o objetivo de alterar ou melhorar propriedades mecânicas, microestruturas ou o estado de tensão de um material. No caso do alumínio, tem como principal objetivo o aumento da dureza e/ou resistência mecânica. (Soares, 2009).

A principal motivação deste trabalho é o estudo da liga de alumínio 6061, tratável termicamente, facilmente comercializada, em solubilização e posterior envelhecimento, analisando a modificação na sua dureza.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre os envelhecimentos artificial e natural da liga de alumínio 6061 e suas influências na modificação das propriedades mecânicas, mais especificamente a dureza do material, a diferentes temperaturas e tempos de duração.

Objetivo Específico

- Auxiliar no estudo da solubilização do alumínio e suas influências nas propriedades mecânicas levantando dados de dureza em diferentes temperaturas e tempos de tratamento,
- Determinar o envelhecimento ideal a ser feito com o maior ganho de dureza de acordo com os resultados obtidos experimentalmente.
- Analisar o envelhecimento natural ao longo do tempo e a sua influência na dureza da liga estudada.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo descreve os principais conceitos encontrados na literatura para o tema proposto.

1.1 Ligas de Alumínio

Assim como no aço, as ligas de alumínio são classificadas em um grande número de ligas, cada uma com diferentes combinações de elementos de ligas e tratamentos com o objetivo de adquirir propriedades para as aplicações desejadas.

As ligas de alumínio são obtidas a partir da refusão de alumínio primário, elementos de liga refinadores de grão e sucata de alumínio selecionada. A reciclagem de sucata para a obtenção de alumínio secundário é uma das vantagens importantes da utilização deste metal e tornou-se praticamente indispensável, já que o processo para obtenção do alumínio secundário exige apenas 5% da energia gasta na produção do primário. (SCHUITEK, 1997)

1.1.1 Características do Alumínio

Os átomos dos metais sólidos geométricos assumem um determinado arranjo ou estrutura cristalina. No caso do alumínio, os átomos se arranjam em uma estrutura cúbica de face centrada (CFC). Esta é uma estrutura cristalina típica de metais muito dúcteis. (WEB SITE AFSA, 2010).

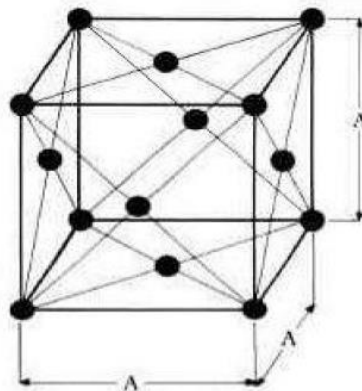


Figura 1 - Estrutura CFC do alumínio (WEB SITE AFSA, 2010).

Segundo Hatch (1990), as ligas de alumínio se caracterizam por apresentarem o elemento Al associado com outros elementos, por exemplo, Mn, Cu, Si, Mg, Zn e Li, isto forma materiais cujas propriedades mecânicas, tais como a resistência mecânica, resistência a fluência e a alta contração volumétrica durante a solidificação são melhoradas mediante a adição de elementos de liga, criando-se as ligas de alumínio Mn, Cu, Si, Mg-Si, Zn e Li.

Para Kolososki e Filho (1994) se justifica a formação destes compostos metálicos devido a baixa resistência à tração do alumínio puro (Al 99,99%), que se situa entre 40 a 50 Mpa. A adição de elementos de liga faz com que a resistência e a dureza se elevem, mesmo no estado recozido ou através de tratamentos térmicos podendo chegar a uma resistência a tração de 500 Mpa e dureza 100 HV. As ligas de alumínio são divididas convenientemente em dois grupos: as ligas tratáveis termicamente, que proporcionam maior resistência, e as ligas não tratáveis termicamente, cuja resistência só pode ser aumentada através do trabalho a frio.

1.1.2 Composição química e classificação das ligas

Segundo Schuitek, 1997, os elementos de ligas mais comuns são o cobre, silício, magnésio, zinco e manganês e são responsáveis por conferir as principais características das ligas de alumínio. Outros elementos como cromo, níquel, vanádio, chumbo, bismuto, prata, zircônio e lítio conferem propriedades especiais às ligas básicas, como melhor usabilidade e resistência a corrosão, por exemplo. Podemos considerar como impurezas elementos como ferro, titânio, sódio, estrôncio e antimônio.

O sistema utilizado para classificar as ligas de alumínio adotado na maior parte do mundo foi estabelecido pela Aluminum Association – USA (A.A.). Ele utiliza um número de 4 dígitos para as ligas e alumínio trabalháveis e para as ligas fundidas são utilizados 3 dígitos seguidos por um ponto e um quarto dígito. O primeiro dígito em ambos os casos identifica o principal elemento de liga enquanto os dígitos seguintes determinam cada liga em particular.

Tabela 1 - Designação das ligas trabalháveis de alumínio

Série	Teor de Al ou Principal Elemento de Liga
1XXX	Mínimo de 99,00%
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros
9XXX	Não usado

Fonte: adaptado de SCHUITEK, 1997.

Tabela 2 - Composição química de algumas ligas de alumínio da série 6xxx

Liga	%Mg	%Si	%Cu	%Mn	%Cr	%Al
6101	0,6	0,5	-	-	-	Base
6201	0,8	0,7	-	-	-	Base
6009	0,6	0,8	0,37	0,5	-	Base
6010	0,8	1,0	0,37	0,5	-	Base
6013	1,0	0,8	0,9	0,6	-	Base
6022	0,58	1,28	0,07	0,08	-	Base
6151	0,6	0,9	-	-	0,25	Base
6351	0,6	1,0	-	0,6	-	Base
6951	0,6	0,35	0,28	-	-	Base
6053	1,2	0,7	-	-	0,25	Base
6061	1,0	0,6	0,2	0,28	0,2	Base
6262	1,0	0,6	0,28	-	0,09	Base
6063	0,7	0,4	-	-	-	Base
6066	1,1	1,3	1,0	0,8	-	Base
6070	0,8	1,3	0,28	0,7	-	Base

Fonte: Adaptado de SCHUITEK, 1997

1.1.3 Ligas de alumínio tratáveis termicamente

Podemos adequar materiais metálicos para determinados processos ou uso alterando suas propriedades mecânicas, como dureza e tenacidade, sem a alteração de sua composição química.

As ligas de alumínio trabalháveis são geralmente divididas em dois grupos: ligas tratáveis e não tratáveis termicamente. Nas ligas não tratáveis, o endurecimento é obtido pela conformação mecânica a frio (laminação ou trefilação). O grupo de ligas não tratáveis termicamente compreende as séries 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX. (SCHUITEK, 1997)

As ligas tratadas termicamente têm em sua composição elementos que aumentam sua solubilidade no alumínio com a temperatura e, em temperaturas ambientes, essa solubilidade é mínima. Com isto, a ação de elementos como o cobre, magnésio-silício e magnésio-zinco melhoram as propriedades mecânicas das ligas através de um ciclo de tratamento térmico de solubilização e envelhecimento (SOARES, 2009).

Com o aquecimento do material a temperaturas da ordem de 500°C, os elementos de liga entram em estado de solução sólida, que pode ser mantida se houver um resfriamento brusco do material. O tratamento de solubilização pode ser realizado em forno ou em alguns casos, em uma prensa. (MARTINS, 2008)

Após o processo de solubilização, o metal se encontra em um estado instável, com os elementos de liga tendendo a sair da solução, criando precipitados responsáveis por bloquear os movimentos das discordâncias, endurecendo assim o material. Essa precipitação, ou envelhecimento, pode ocorrer a temperatura ambiente, levando um tempo mais longo (dias ou meses), ou pode ser acelerada pelo aquecimento durante algumas horas na faixa de 150 a 200°C, ocorrendo o chamado envelhecimento artificial.

O grupo das ligas de alumínio tratáveis termicamente compreende as séries 2XXX (Al-Cu), 6XXX (Al-Mg-Si), 7XXX (Al-Mg-Zn) e algumas ligas do grupo 8XXX.

Tabela 3 - Divisão dos grupos das ligas de alumínio.

Tratáveis Termicamente	Não Tratáveis Termicamente
2XXX	1XXX
6XXX	3XXX
7XXX	4XXX
	5XXX

Fonte: Manual de soldagem ALCAN, 2010

1.1.4 Têmperas

Como têmpera, podemos entender como uma condição ou estado produzido no metal ou liga por tratamento térmico ou mecânico e que produz estrutura e propriedades mecânicas características. O sistema de nomenclatura de têmperas se baseia em letras e as subdivisões destas são indicadas por um ou mais números, que especificam as operações básicas que o material deve sofrer. (SCHUITEK, 1997)

Tabela 4 – Designações básicas de têmperas de ligas de alumínio

Designação	Estado de Fornecimento
F	Como fabricada: não se aplica qualquer controle sobre as condições térmicas ou de encruamento.
O	Recozida: aplica - se a produtos trabalháveis para obter menor valor de resistência mecânica.
H	Encruada: aplica - se após o recozimento ou trabalho a frio ou estabilização, para atingir as propriedades mecânicas especificadas.
W	Solubilização: têmpera instável. Aplica – se as ligas para posterior envelhecimento.
T	Tratado Termicamente: tempera estável. Usado para obter melhores propriedades mecânicas.

Fonte: adaptado de SCHUITEK, 1997

Segundo Schuitek (1997), as têmperas mais utilizadas em ligas de alumínio trabalháveis são as “H” e “T” e essas também apresentam algumas subdivisões. Para as ligas tratáveis termicamente, por exemplo, as especificações de têmperas “T” são sempre seguidas de um ou mais dígitos, que determinam as diferenças entre os tratamentos, conforme tabela a seguir.

Tabela 5 – Subdivisões dos tratamentos térmicos T.

Tratamento	Estado
T1	Resfriado após o processo de conformação e envelhecido naturalmente até uma condição substancialmente estável.
T2	Resfriado após o processo de conformação, encruado e envelhecido naturalmente até uma condição substancialmente estável.
T3	Solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente até uma condição substancialmente estável.
T4	Solubilizado e envelhecido naturalmente até uma condição substancialmente estável.
T5	Resfriado após o processo de conformação e envelhecido artificialmente.
T6	Solubilizado e envelhecido artificialmente.
T7	Solubilizado e sobreenvelhecido/estabilizado.
T8	Solubilizado, encruado e depois envelhecido artificialmente.
T9	Solubilizado, envelhecido artificialmente e depois encruado.
T10	Resfriado após o processo de conformação, encruado e envelhecido artificialmente.

Fonte: Adaptado de SCHUITEK, 1997.

1.1.5 Propriedades e aplicações das ligas de alumínio

Segundo Schuitek (1997) as ligas de alumínio vêm sistematicamente ampliando a sua participação entre os materiais oferecidos no mercado, ocupando o segundo lugar em consumo, atrás apenas do aço. As razões para o alto emprego destas ligas são as propriedades do material de base aliadas a uma ampla variedade de propriedades conseguidas através dos elementos de liga. Dentre as propriedades importantes do alumínio e suas ligas, podemos citar:

- Densidade: as ligas de alumínio possuem baixa densidade, aproximadamente 1/3 da densidade do aço e do latão.
- Resistência mecânica: algumas ligas de alumínio possuem resistência mecânica equivalente ou superior a determinados aços, obtendo assim uma boa relação resistência-peso.
- Condutibilidade térmica: inferior apenas à da prata, do cobre e do ouro, sendo uma opção mais barata para aplicações em equipamentos destinados a troca de calor.
- Condutibilidade elétrica: apresentam alta condutibilidade elétrica, aliada a neutralidade magnética podem ser utilizadas em cabos condutores;
- Usinabilidade: a elevada velocidade de corte permite tempos de usinagens curtos.
- Conformabilidade: a sua alta ductilidade permite a sua fácil conformação, possibilitando a fabricação de perfis e tubos de diversas formas.
- Soldabilidade: todos os métodos usuais de soldagem são aplicáveis às ligas de alumínio.

Tabela 6 - Algumas características e aplicações de ligas de alumínio.

Grupo	Liga	Elementos de liga	Características	Aplicações Típicas
1XXX	1050	99% de Al (mínimo)	Baixa resistência mecânica, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade, fácil de soldar, apropriada para anodização decorativa.	Indústria química, farmacêutica e alimentícia; utensílios domésticos. Refrigeração (trocadores de calor em geral).
	1350	99% de Al (mínimo)	Alta condutividade elétrica, boa conformabilidade.	Liga especial para condutores elétricos.
2XXX	2011	Cobre	Excelente usinabilidade, alta resistência mecânica, média resistência à corrosão.	Peças usinadas em torno automático. Excelente alternativa para o latão de corte livre.
	2014	Cobre	Elevada resistência mecânica e alta ductilidade, média resistência à corrosão. Boa usinabilidade.	Indústria aeronáutica, transporte, máquinas e equipamentos.
	2017	Cobre	Boa usinabilidade, alta resistência mecânica e elevada ductilidade. Média resistência à corrosão, boa conformabilidade.	Peças usinadas. Indústria aeronáutica, transporte, máquinas e equipamentos.
	2024	Cobre	Elevada resistência mecânica e alta ductilidade, média resistência à corrosão, média conformabilidade. Boa usinabilidade.	Peças usinadas e forjadas. Indústria aeronáutica, transporte, máquinas e equipamentos.
3XXX	3003	Manganês	Média resistência mecânica, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade, boa soldabilidade.	Tubos para trocadores de calor (radiadores automotivos). Antenas.
4XXX	4043 e 4047	Silício	Ligas de silício utilizadas em varetas de solda.	Soldagem dos grupos de liga 1000, 3000 e 6000.
5XXX	5052	Magnésio	Boa resistência mecânica, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade.	Vergalhões para rebites, transporte e equipamentos.
	5356	Magnésio	Resistência mecânica superior ao 5052, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade.	Rebites. Solda, especialmente 5052 e 5083 entre si e com ligas dos grupos 1000, 3000 e 6000.
6XXX	6060 e 6063	Magnésio e Silício	Média resistência mecânica, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade. Apropriada para anodização decorativa fosca.	Perfis para construção civil, caixilharia em geral, tubos de irrigação, móveis e iluminação.
	6061	Magnésio e Silício	Boa resistência mecânica, boa resistência à corrosão, boa conformabilidade. Média usinabilidade.	Estruturas, construção naval, veículos e rebites. Indústria moveleira.
	6101	Magnésio e Silício	Alta condutividade elétrica, média resistência mecânica, boa resistência à corrosão.	Liga especial para fins elétricos e barramentos (estruturas).

Fonte: Bueno, 2010.

Tabela 7 - Algumas características e aplicações de ligas de alumínio (continuação)

Grupo	Liga	Elementos de liga	Características	Aplicações Típicas
	6261	Magnésio e Silício	Boa resistência mecânica, boa resistência à corrosão, boa conformabilidade. Média usinabilidade.	Carrocerias de veículos, estruturas e equipamentos.
	6262	Magnésio e Silício	Ótima usinabilidade, alta resistência mecânica, alta resistência à corrosão, apropriada para anodização decorativa.	Peças usinadas em torno automático. Excelente alternativa para o latão de corte livre.
	6351	Magnésio e Silício	Boa resistência mecânica, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade, média usinabilidade.	Engenharia estrutural, construção de navios, veículos e equipamentos. Peças usinadas em tornos não automáticos. Forjamento a frio.
	X6463	Magnésio e Silício	Média resistência mecânica, boa resistência à corrosão, boa conformabilidade, apropriada para anodização decorativa de alto brilho.	Painéis e frisos para eletrodomésticos, automóveis e armários.
7XXX	7075	Zinco	Os mais altos valores de resistência mecânica, média resistência à corrosão, boa forjabilidade e usinabilidade.	Peças sujeitas aos mais altos esforços mecânicos em indústria aeronáutica, militar, máquinas e equipamentos. Moldes para injeção de plástico.
	7104	Zinco	Alta resistência mecânica, boa resistência à corrosão, boa conformabilidade, apropriada para anodização decorativa.	Estruturas soldadas.

Fonte: Bueno, 2010.

Segundo Bueno (2010), as ligas do sistema Al-Si (Série 4XXX), são muito mais utilizadas como ligas para a fabricação de peças fundidas, como por exemplo, pistões para motores de automóveis e aviões e também algumas aplicações como produtos trabalhados, como metais de adição para soldagem. Além do ganho de resistência mecânica, o magnésio permite as ligas Al-Mg (série 5XXX) manterem um elevado nível de ductilidade, assim como excelente resistência à corrosão e soldabilidade.

1.1.6 Diagrama de Fases do Alumínio

Segundo Hatch (1990), o silício é usado em teores entre 12 a 13% e aumenta a fluidez do alumínio líquido permitindo que o mesmo flua melhor e também propicia a redução da contração durante o resfriamento e a porosidade nas peças fundidas, reduzindo o coeficiente de expansão térmica e melhorando a soldabilidade. O silício em teores maiores que 13% dificulta a usinagem destas ligas.

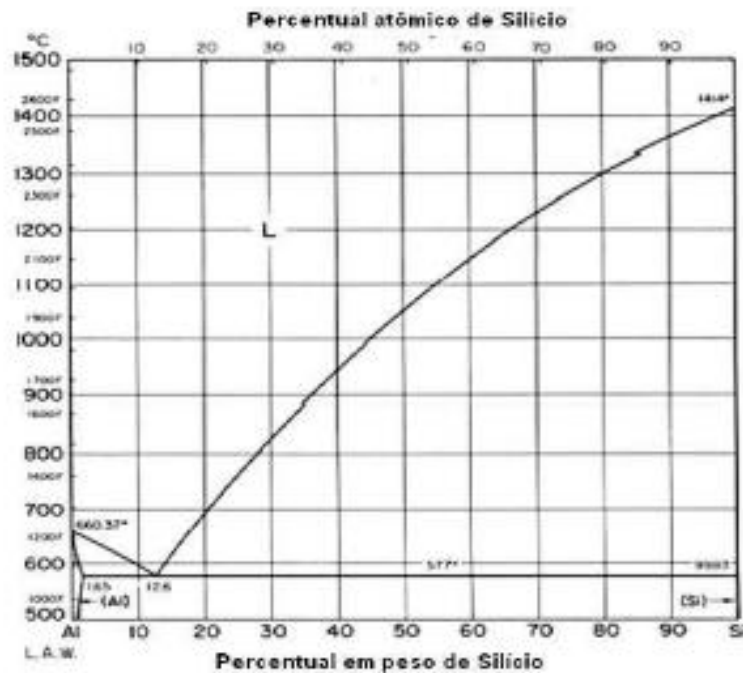


Figura 2 - Diagrama de fase de uma liga alumínio-silício (4XXX) (Hatch, 1990).

No sistema Al-Si, a fluidez máxima é encontrada na composição hipereutética. A máxima fluidez ocorre para composição contendo 18% de silício (comparado ao eutético com 12% de silício). A mínima fluidez ocorre aproximadamente com 5 ou 6% de silício. (BUENO, 2010).

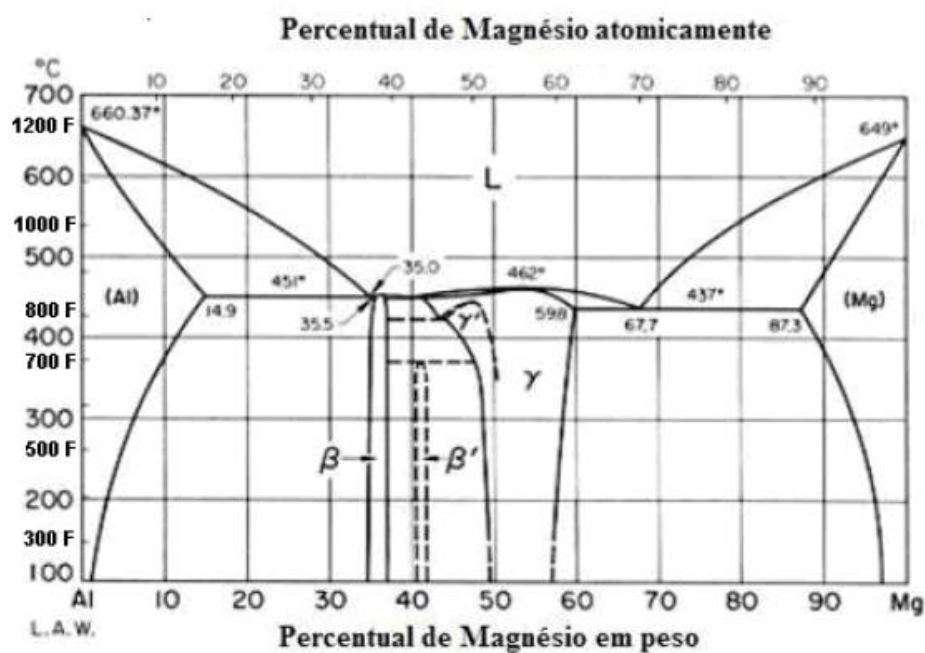


Figura 3 -Diagrama de fases de uma liga alumínio-magnésio (5XXX) (Web Site Infomet, 2010).

Segundo Bueno (2010), a temperatura eutética das ligas Al-Mg é 450°C e o teor de magnésio que corresponde ao ponto eutético é de 35%. A fase em equilíbrio com o alumínio é a Al_3Mg_2 (37,3% de magnésio), embora esta composição esteja um pouco fora da faixa que corresponde a essa estequiometria (34,8 a 37,1%). A fase Al_8Mg_5 (36% de magnésio) é a composição da fase sólida sendo encontrada muito facilmente nas ligas Al-Mg. As condições de não equilíbrio na solidificação leva à segregação, com a fase Al_8Mg_5 aparecendo em teores de magnésio com 4 ou 5 abaixo de 330°C, esta fase é frágil, porem em temperaturas muito altas apresenta alguma plasticidade.

A solubilidade do magnésio no alumínio é elevada, na maioria das vezes o alumínio permanece em solução sólida no magnésio, embora à medida que o teor de magnésio aumenta o mesmo passa a aparecer no eutético contendo Al_3Mg_2 . Quando o teor de silício nas ligas Al-Mg é relativamente alto (cerca de 0,5% por exemplo), forma-se a fase Mg_2Si , a mesma responsável por precipitação nas ligas Al-Mg-Si. (Martin, 1976).

Segundo Van Horn (1967), as ligas Al-Mg que possuem um teor de magnésio acima de 3,5% apresentam a fase Al_3Mg_2 , que pode precipitar nos contornos de grão ou dentro dos grãos, o que geralmente ocorre mediante aquecimento a temperaturas relativamente baixas. O trabalho a frio de ligas Al-Mg produz acentuadas bandas de deformação, decoradas por precipitados ricos em magnésio.

Conforme Bueno (2010), o magnésio e o silício combinam-se para formar o composto intermetálico Mg_2Si , que antes de atingir o equilíbrio no superenvelhecimento, é o responsável pelo endurecimento das ligas da série 6XXX. A solubilidade da fase Mg_2Si (fase beta) na matriz rica em alumínio (fase alfa) aumenta com a elevação da temperatura. O tratamento de envelhecimento artificial controlado e solubilização permitem a precipitação da segunda fase (beta) partindo de uma solução sólida supersaturada. Este fator favorece a formatação de precipitados finos juntamente com a distribuição uniforme dos mesmos, que acarretam um aumento na dureza do material.

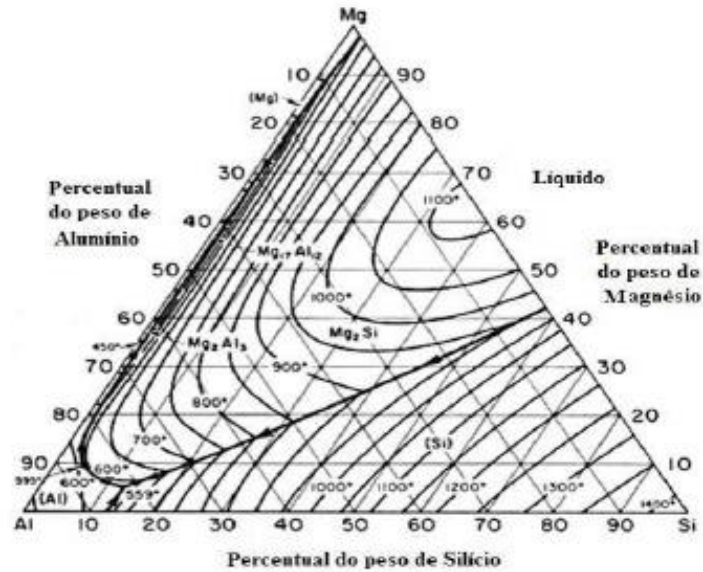


Figura 4 - Diagrama de fase ternário de uma liga de alumínio-silício-magnésio (Web Site Infomet, 2010)

Segundo Lutts (1961) e Shercliff & Ashby (1990), os longos tempos de envelhecimento e/ou altas temperaturas que ocorre para tratamentos térmicos proporcionam a queda de dureza e está relacionada com o crescimento excessivo dos precipitados, favorecendo o movimento das discordâncias quando de uma solicitação mecânica, o que possibilita o amolecimento da liga e que caracteriza o superenvelhecimento. Segundo Ozawa & Kimura (1970), as temperaturas de envelhecimento de 200 °C, fazem a precipitação nas ligas da série 6xxx ter uma cinética relativamente rápida. A solubilidade do silício no alumínio é menor do que a do magnésio, que causa um processo de precipitados através da formação de aglomerados de átomos de silício. A matéria possui estes aglomerados distribuídos homoganeamente. O aumento da difusividade dos átomos de silício ocorre através das lacunas retidas, que com o resfriamento rápido acelera o processo.

1.2 Tratamento térmico de ligas de alumínio

Existem ligas de alumínio que podem ser tratadas termicamente, como as ligas das séries 2xxx, 6xxx, 7xxx e algumas da 8xxx. De forma resumida, um tratamento térmico é o processo de aquecimento e resfriamento realizado objetivando alterar propriedades mecânicas, microestruturas ou estado de tensão de um material. Em se tratando de alumínio, um tratamento térmico tem como objetivo exclusivo aumentar a resistência mecânica ou dureza das ligas. (ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, 1990).

1.2.1 Endurecimento por precipitação

O método mais eficaz para se obter um aumento de resistência em ligas de alumínio é o chamado endurecimento por precipitação. Uma liga de alumínio pode ser endurecida por precipitação de forma eficaz se a solubilidade de um ou mais elementos de liga da mesma diminuir com a redução de temperatura. Tal processo envolve algumas etapas: tratamento de solubilização a uma temperatura elevada, têmpera e envelhecimento (natural ou artificial). (BUHA, 2004).

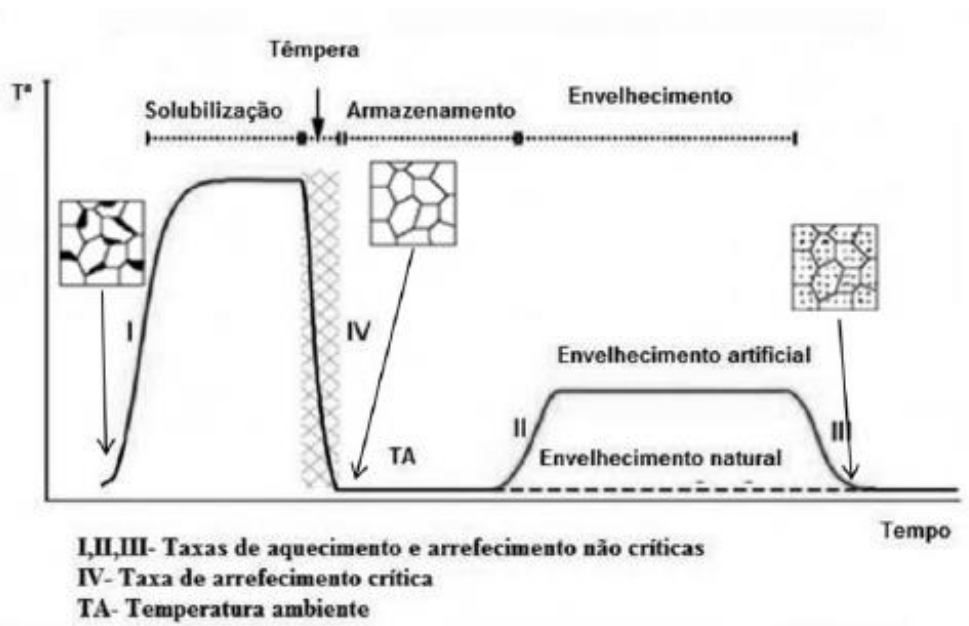


Figura 5 - Representação esquemática da variação de temperatura em função do tempo durante as etapas do endurecimento por precipitação. (Martins, 2008).

O tratamento de solubilização acontece a uma elevada temperatura e tem como finalidade dissolver os elementos de liga na matriz de alumínio alcançando uma solução sólida. A têmpera é o rápido resfriamento da temperatura de solubilização até a temperatura ambiente. Tal processo permite obter a fixação da solução sólida na temperatura ambiente, em outras palavras, obter uma solução sólida sobre-saturada. Ao final o envelhecimento ocasiona a decomposição controlada da solução e a criação de precipitados endurecedores. (MARTINS, 2008).

Ao final do processo objetiva-se conseguir uma dispersão densa e fina de precipitados na matriz do alumínio. O tamanho, o formato e a distribuição dos precipitados resultantes são parâmetros que dependem do sucesso do processo e são

responsáveis por alterar as propriedades mecânicas finais do material. Nas ligas das séries 6xxx o Mg e o Si se unem para formar um chamado composto intermetálico, o Mg_2Si , que é responsável pelo endurecimento das ligas. (SOARES, 2009).

1.2.2 Tratamento térmico de solubilização

Segundo Soares (2009), o tratamento térmico de solubilização consiste no aquecimento da liga a uma temperatura elevada, em geral próximo do ponto de fusão da liga e manutenção a esta temperatura durante um certo período de tempo. Como os coeficientes de difusão dos elementos de liga aumentam com a temperatura, a esta temperatura a difusão destes elementos é facilitada proporcionando a dissolução das fases secundárias, inicialmente presentes na liga, após algum tempo de permanência a esta temperatura. É fundamental a total solubilização para garantir que o posterior envelhecimento, em temperaturas mais baixas e durante tempos maiores, é completamente controlado.

Segundo Totten (2003), a temperatura mínima de solubilização deve ser determinada pela composição da liga. Uma temperatura de solubilização baixa pode gerar produtos com resistências mecânicas baixas. Porém, temperaturas muito altas, maiores que o ponto eutético, podem originar fusão parcial das ligas, o que também é prejudicial para as propriedades mecânicas dos produtos.

Tabela 8 - Efeito da temperatura de solubilização na tensão máxima de uma liga 6061 após o envelhecimento

Temperatura de Solubilização (°C)	Tensão Máxima
493	301
504	316
516	333
527	348

Fonte: Adaptado de Soares, 2009.

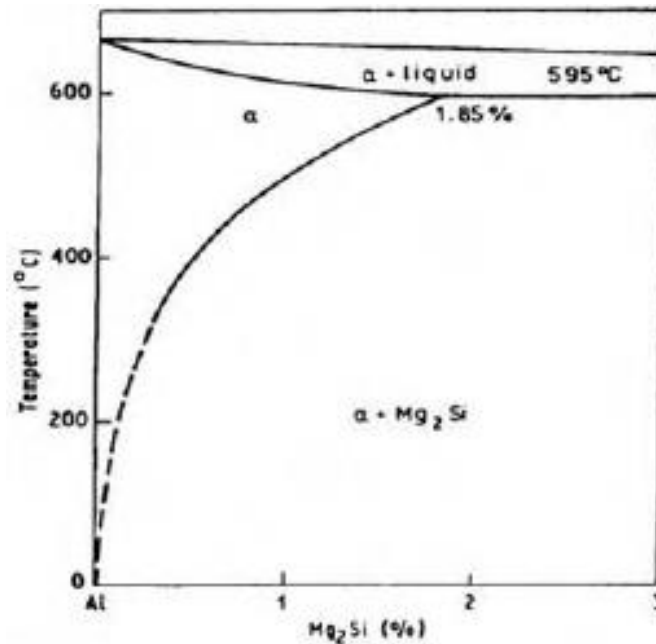


Figura 6 - Diagrama pseudo-binário Al-Mg₂Si (Martins, 2008).

De acordo com o diagrama pode-se observar que a quantidade máxima do composto intermetálico Mg₂Si que é possível dissolver na matriz de alumínio é 1,85% (em peso) à temperatura de 595 °C, correspondente a temperatura do ponto eutético. (MARTINS, 2008).

1.2.3 Têmpera

O objetivo da têmpera é basicamente fixar a solução sólida que foi obtida a uma temperatura elevada, obtendo-se uma solução sólida sobre-saturada. Isso ocorre ao se resfriar rapidamente o material da alta temperatura até a temperatura ambiente, não dando tempo assim para que os processos de difusão dos elementos de liga ocorram. O resfriamento é um fator muito importante no endurecimento por precipitação. Em velocidades muito baixas podem provocar precipitação indesejada, afetando negativamente as propriedades das ligas. Já em velocidades muito rápidas, podem causar problemas como aumento da tendência para distorções. (SOARES, 2009).

Segundo Soares (2009), a velocidade de difusão e precipitação varia de uma liga para outra, permitindo que a mesma taxa de resfriamento resulte em diferentes propriedades mecânicas finais. É importante que a velocidade de resfriamento seja

suficientemente alta para se reduzir a precipitação. A tendência de um material formar precipitados não endurecidos durante a têmpera varia de acordo com a sua sensibilidade à têmpera. Podemos analisar a sensibilidade de uma liga à têmpera por meio da sua curva TTT (tempo – temperatura – transformação). (MARTINS, 2008).

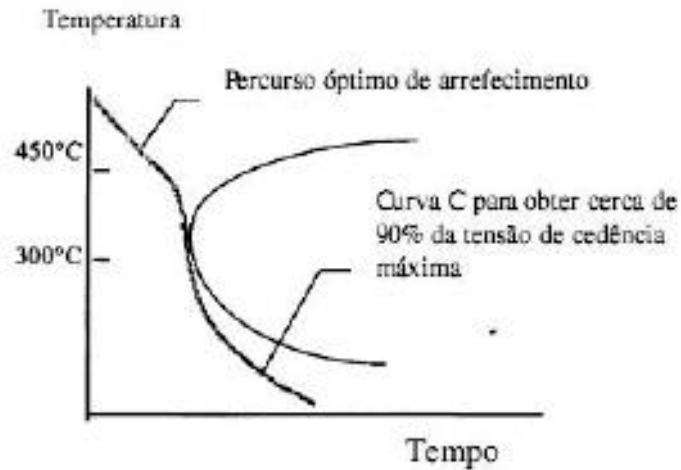


Figura 7 - Curva TTT de uma liga de alumínio 6082 (Martins, 2008).

1.2.4 Envelhecimento

O tratamento de envelhecimento tem como objetivo conseguir uma dispersão mais fina e densa dos precipitados na matriz da liga. A solução sólida que é resultante da têmpera é instável, com gradual precipitação dos seus constituintes. Os precipitados dificultam o movimento das deslocações durante uma deformação, forçando-as a cortar ou rodear as partículas precipitadas, aumentando assim a dureza e resistência mecânica. O tamanho dos precipitados, as suas formas e distribuições são o que definem o endurecimento da liga envelhecida. (OLIVEIRA, 2008).

Segundo Martins (2008), as ligas de alumínio da série 6xxx (compostas de Al-Mg-Si) são envelhecidas a uma temperatura aproximada de 170°C, possuindo um processo complicado de precipitação.

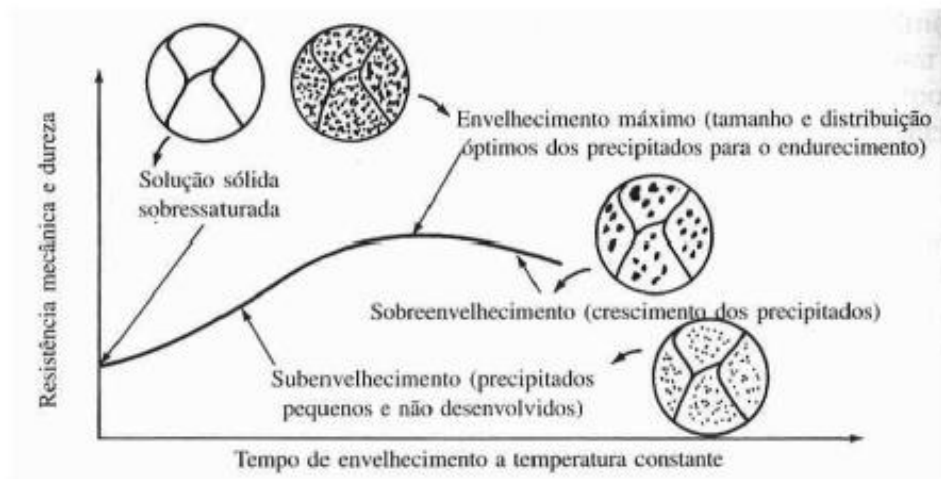


Figura 8 - Variação da resistência mecânica e dureza ao longo do envelhecimento (Smith, 1996)

Segundo G. Mrówka (2006), a dureza de uma liga aumenta com o tempo de envelhecimento até um certo valor máximo chamado de pico de envelhecimento, voltando a decrescer. É importante notar que para maiores temperaturas, o pico de envelhecimento é atingido em tempos mais curtos, no entanto, o aumento de dureza é menor.

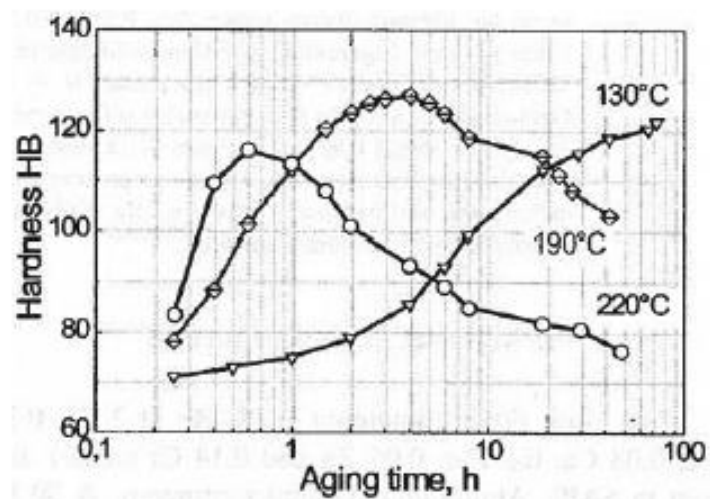


Figura 9 - Variação da dureza com o tempo de envelhecimento artificial em diferentes temperaturas em uma liga 6082 (Mrówka, 2006).

O envelhecimento também pode ocorrer de forma natural. O envelhecimento natural ocorre à temperatura ambiente, enquanto o artificial é realizado a altas temperaturas. Algumas ligas conseguem obter estados de propriedades mecânicas interessantes apenas com o envelhecimento natural, outras apenas atingem os mesmos estados, ou estados superiores, apenas com um aumento na temperatura de envelhecimento. A temperatura do envelhecimento artificial corresponde à 15 - 25% da diferença da temperatura ambiente e a temperatura de solubilização, geralmente em torno de 115°C a 190°C, com um ciclo que varia de 5 a 48 horas. (MARTINS, 2008)

1.3 Propriedades Mecânicas

Para a fabricação e projeto dos produtos deve-se levar em consideração as propriedades mecânicas dos materiais, que constituem uma das características mais importantes dos metais em suas várias aplicações na engenharia. As propriedades mecânicas a serem levadas em consideração na escolha de um determinado material metálico dependem, principalmente, do tipo de solicitação a que estará submetido o mesmo. Determinam-se as propriedades mecânicas por meio de ensaios padronizados em corpos de prova ou até mesmo no próprio produto final.

É importante notar que os valores obtidos para as propriedades mecânicas são muito dependentes das condições de realização dos ensaios, o que conduz a certo grau de incerteza quanto ao comportamento em serviço do material ensaiado. (FIGUEIREDO, 2004).

1.3.1 Resistência a Tração

O ensaio de tração é comumente utilizado para obter-se informações básicas sobre as resistências de um material e como um ensaio de controle de qualidade. Durante um ensaio de tração, um corpo de prova é submetido a uma força de tração uniaxial contínua e crescente enquanto são feitas observações do alongamento do corpo de prova. Uma curva de engenharia tensão-deformação é construída a partir de medidas da carga e do alongamento. (DIETER, 1981).



Figura 10 - Curva tensão-deformação de engenharia (Dieter, 1981 – Adaptado).

Segundo Dieter, 1981, o formato e o tamanho de uma curva tensão-deformação de um metal dependerá de sua composição, do seu tratamento térmico, da história anterior a deformação plástica, da sua taxa de deformação, temperatura e estado dos esforços durante o ensaio realizado.

Os principais parâmetros utilizados para descrever a curva tensão-deformação de um metal são: resistência a tração, limite de escoamento, alongamento percentual e redução de área. Os dois primeiros são considerados parâmetros de resistência e os outros dois são uma indicação de ductilidade, que é uma propriedade qualitativa do material. As medidas de ductilidade que podem ser observadas no ensaio de tração são o alongamento e a redução de área na fratura, obtidas após a fratura.

A curva tensão-deformação e as propriedades de escoamento e fratura derivadas do ensaio de tração são fortemente dependentes da temperatura em que se realiza o ensaio. Normalmente, a resistência cai e a ductilidade sobe com o aumento da temperatura do ensaio (DIETER, 1981).

Entretanto, mudanças estruturais tais como precipitação, envelhecimento por deformação, ou recristalização podem ocorrer em certas faixas de temperatura, alterando

esse comportamento geral. Processos termicamente ativados favorecem a deformação e reduzem a resistência em temperaturas elevadas (DIETER, 1981).

Geralmente, os materiais, dependendo do campo de tensões aplicadas, podem apresentar comportamento elástico ou plástico. De acordo com Meguid (1989), a plasticidade pode ser descrita como sendo o comportamento reversível dos sólidos, que retorna à sua forma original imediatamente após removidas as cargas externas. Com isso, podemos dizer que a tensão que separa o comportamento elástico do plástico do material é o seu limite de escoamento (ASKELAND, 1994).

1.3.2 Dureza

A dureza de um determinado material é um termo que pode ter diversas conotações, dependendo da pessoa e da área da atuação. Em geral, a dureza nos remete a uma resistência à deformação, e para os metais é uma medida da sua resistência à deformação plástica, ou permanente. (DIETER, 1981).

No que tange os ensaios mecânicos, a dureza é a resistência à penetração de um material duro em outro, e para a engenharia representa uma quantidade específica facilmente medida que fornece algumas informações sobre a resistência de um material ou seus tratamentos térmicos.

Resumidamente, existem três tipos de dureza, dependendo da maneira que o ensaio é realizado: (1) dureza ao risco, (2) dureza à penetração e (3) dureza dinâmica ou de rebote. Para fins de projeto de engenharia, a dureza de penetração é a mais importante.

Há várias maneiras diferentes de se determinar a dureza de um material, sendo a mais utilizada, em materiais metálicos, aquela que corresponde de maneira direta ou indireta, a resistência à penetração que o material oferece a uma ponta esférica, cônica ou piramidal constituída de um material indeformável durante a realização do ensaio de dureza. (BRESCIANI F., 1986).

A carga aplicada é relacionada através da ponta com a sua forma e dimensão e da impressão deixada no corpo-de-prova, obtendo-se um número que expressa, em uma escala de unidades, a dureza do corpo ensaiado. Os métodos mais utilizados são: Brinell, Rockwell e Vickers. Pode-se estabelecer relações entre a dureza e as outras propriedades mecânicas. Contudo, deve-se notar que a dureza é apenas uma propriedade da superfície

do corpo de prova, não sendo, portanto, o comportamento de todo o volume. (Figueiredo, 2004).

1.3.3 Tenacidade

A tenacidade de um material pode ser entendida como a energia absorvida antes e durante um processo de fratura. Em outras palavras, é a quantidade de trabalho que pode ser realizado sobre um material ou peça até que ocorra a sua fratura. Matematicamente, ela é quantificada através da integração da área sob o diagrama tensão-deformação.

São utilizados os termos denominações frágil e dúctil para distinguir falhas ou tipos de materiais em termos de baixa ou alta tenacidade. A fratura de clivagem é a forma mais frágil de fratura que pode ocorrer em aços. (BROEK, 1984).

Um material é considerado tenaz, ou dúctil, quando absorve uma boa quantidade de energia antes de se romper e a sua curva tensão-deformação apresenta uma região com escoamento plástico bem distinguível. Já um material que absorve uma pequena quantidade de energia antes da sua fratura e possui uma curva tensão tensão-deformação com um baixo ou quase inexistente escoamento plástico é considerado pouco tenaz ou frágil.

A chance de se encontra fratura frágil, ou por clivagem, aumenta para temperaturas menores e maiores taxas de deformação, ocorrendo uma transição que nos aços é chamada de dúctil-frágil. Abaixo da transição, a fratura necessita de pouca energia e o aço comporta-se de uma maneira frágil.

Segundo Ivankovic e Willians (1995), podem ocorrer mudanças repentinas no comprimento de trinca e na tensão aplicada, causando defeitos chamados de fraturas dinâmicas. O fenômeno da fratura dinâmica pode ser caracterizado por vários estados dinâmicos da ponta da trinca, que são introduzidos por cargas de impacto aplicadas no sólido trincado, ou por rápidas movimentações da ponta da trinca propriamente dita (NISHIOKA, 1995).

Uma propriedade importante na mecânica da fratura é a resistência dinâmica da trinca. Ela é a resistência de uma trinca a se propagar, portanto é relacionada com a instabilidade das trincas. Existem vários métodos para se efetuar a medida experimental da tenacidade à fratura dinâmica. O mais amplamente utilizado é o ensaio Charpy instrumentado, devido a sua simplicidade e economia. O martelo de impacto do pêndulo

do ensaio Charpy é um medidor de deformação, que leva em consideração a força exercida sobre o corpo de prova.

O ensaio de Charpy instrumentado, além da energia absorvida, fornece-nos a variação da carga aplicada com o tempo. Tal curva pode fornecer informações sobre a carga de escoamento generalizado, carga máxima, entre outros.

Segundo Fedelinski, 1995, o objetivo principal da mecânica da fratura é analisar o crescimento, a interrupção e a ramificação do movimento das trincas em estruturas sujeitas a cargas dinâmicas. Geralmente a vizinhança da trinca sofre de fatores caracterizados por tensão dinâmica que normalmente são em função do tempo.

Para entendermos melhor a mecânica da fratura é necessário compreendermos os tipos de fratura dúctil e fratura frágil. A fratura dúctil pode ser compreendida como uma deformação plástica seguida pela ruptura do material, podendo ser observada antes da sua ruptura. A fratura frágil pode ser entendida como uma propagação rápida de uma trinca instável, ou também chamada de clivagem. Os ensaios devem ser cuidadosamente analisados para reproduzirem fielmente o comportamento da estrutura e os seus resultados em laboratório devem ser interpretados com cautela.

A fratura dúctil ocorre principalmente em metais puros, com deformações plásticas visíveis antes da fratura. Ela consome uma grande energia devido ao seu trabalho de deformação. Pode-se observar antes da sua ruptura uma falha na estrutura e uma deformação plástica, além de possuir uma lenta propagação de trinca.

Já na fratura frágil, os metais e ligas fraturam não apresentando uma deformação plástica microscópica. É importante saber que a fratura é sempre iniciada e acompanhada por uma deformação plástica localizada. Neste tipo de fratura observa-se dois aspectos preocupantes:

- 1- Ela ocorre sobre tensões inferiores ao escoamento generalizado;
- 2- Ocorre de maneira súbita ou catastrófica.

Segundo Kobayashi 1993, devemos detectar inicialmente o ponto de propagação da trinca de modo a avaliar a tenacidade à fratura dinâmica. Existem diversos métodos para a detecção do ponto de início da trinca de um corpo de prova sob carregamento estático, porém em um carregamento dinâmico existem muitos problemas para a aplicação de tais métodos.

1.4 Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos

Os projetos no ramo da engenharia mecânica requerem cada vez mais um vasto conhecimento das características, propriedades e comportamento dos materiais a serem utilizados. Os critérios de especificação dos materiais geram a necessidade da realização de ensaios através de métodos normalizados, visando levantar as propriedades mecânicas e comportamentos sob determinados esforços de um material.

Os ensaios mecânicos são realizados pela aplicação, em um material, de um dos tipos de esforços possíveis (tração, compressão, flexão, torção, cisalhamento e pressão interna) para determinar a resistência do material a cada um desses esforços. (SOUZA, 1982).

Segundo Garcia (2012), os ensaios mecânicos nos permitem determinar propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços e que são expressas em função de tensões e/ou deformações. Como principais propriedades dos materiais obtidas por ensaios, podemos citar:

- Resistência: representada por tensões, definidas em condições particulares.
- Elasticidade: propriedade do material segundo a qual a deformação que ocorre em função da aplicação de tensão desaparece quando a tensão é retirada.
- Plasticidade: capacidade de o material sofrer deformação permanente sem se romper.
- Resiliência: capacidade de absorção de energia no regime elástico.
- Tenacidade: reflete a energia total necessária para provocar a fratura do material, desde sua condição de tensão nula
- Dureza: resistência a penetração de um material.

1.4.1 Classificação dos ensaios mecânicos.

Segundo Garcia (2012), os ensaios mecânicos podem ser classificados de duas formas:

1. Quanto a integridade geométrica e dimensional da peça ou componente:
 - destrutivos: provocam a inutilização parcial ou total da peça. (Exemplo: ensaio de tração, dureza, fadiga, fluência, torção, flexão, tenacidade à fratura;)

- não destrutivos: não comprometem a integridade da peça. (Exemplo: ensaio de raios x, ultrassom, partículas magnéticas, líquidos penetrantes.)

2. Quanto à velocidade de aplicação da carga:

- estáticos: carga aplicada de maneira suficientemente lenta, induzindo a uma sucessão de estados de equilíbrio. (Exemplo: tração, compressão, flexão, dureza, torção).

- dinâmicos: carga aplicada rapidamente ou ciclicamente; (Exemplo: fadiga e impacto).

- carga constante: carga aplicada durante um longo período; (Exemplo: fluência).

1.4.2 Normatização técnica dos ensaios mecânicos

Existem diversas normas técnicas responsáveis por padronizar os ensaios mecânicos e seus métodos. Segundo Souza (1982) um método descreve o correto procedimento para se efetuar um determinado ensaio mecânico. Deste modo, seguindo sempre o mesmo método, os resultados obtidos para um mesmo material são semelhantes e reproduzíveis onde quer que o ensaio seja executado. O método de ensaio define também os conceitos importantes relacionados ao ensaio em questão e menciona como os resultados devem ser fornecidos em um relatório final.

As normas técnicas mais utilizadas pelos laboratórios de ensaios pertencem às seguintes associações: ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), ASTM (American Society for Testing and Materials), DIN (Deutsches Institut für Normung), AFNOR (Association Française de Normalisation), BSI (British Standards Institution), ASME (American Society of Mechanical Engineers), ISO (International Organization for Standardization), JIS (Japanese Industrial Standards), SAE (Society of Automotive Engineers), além de diversas normas particulares de indústrias ou companhias governamentais.

1.4.3 Ensaios Destrutivos

1.4.3.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é sem dúvida o mais utilizado na avaliação dos materiais, nos dando a possibilidade de obtermos diversas propriedades mecânicas. O ensaio basicamente consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova até a sua ruptura, medindo a variação de comprimento (L) em função da carga aplicada (P). Após ser feito um tratamento adequado dos dados, obtém-se uma curva que relaciona a tensão (σ) com a deformação (ϵ) do corpo de prova. Os ensaios de tração permitem conhecer como os materiais reagem aos esforços de tração, quais os limites de tração que suportam e a partir de que momento se rompem. (PERINI, 2008).

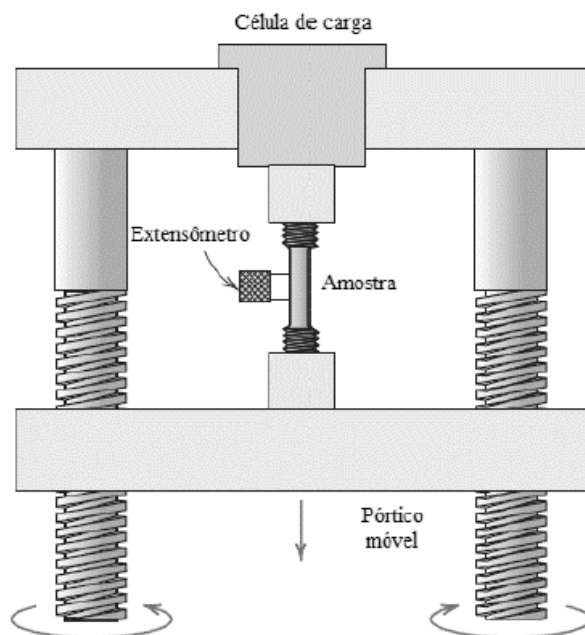


Figura 11- Esquema de máquina utilizada no ensaio de tração. (CALLISTER, 2002)

Determina-se as propriedades mecânicas de um metal por tração ensaiando-se um corpo de prova retirado de uma peça. Os ensaios de tração são feitos em corpos de prova normalizados pelas várias associações de normas técnicas. Um corpo de prova pode ter sua parte útil com seção circular ou retangular, dependendo da forma e tamanho do produto acabado do qual foi retirado. Em particular, corpos de prova retirados de placas, chapas ou lâminas têm seção retangular com a espessura igual à espessura da placa ou

chapa ou lâmina e corpos de prova circulares são feitos se o produtor acabado for de seção circular ou irregular. (SOUZA, 1982).

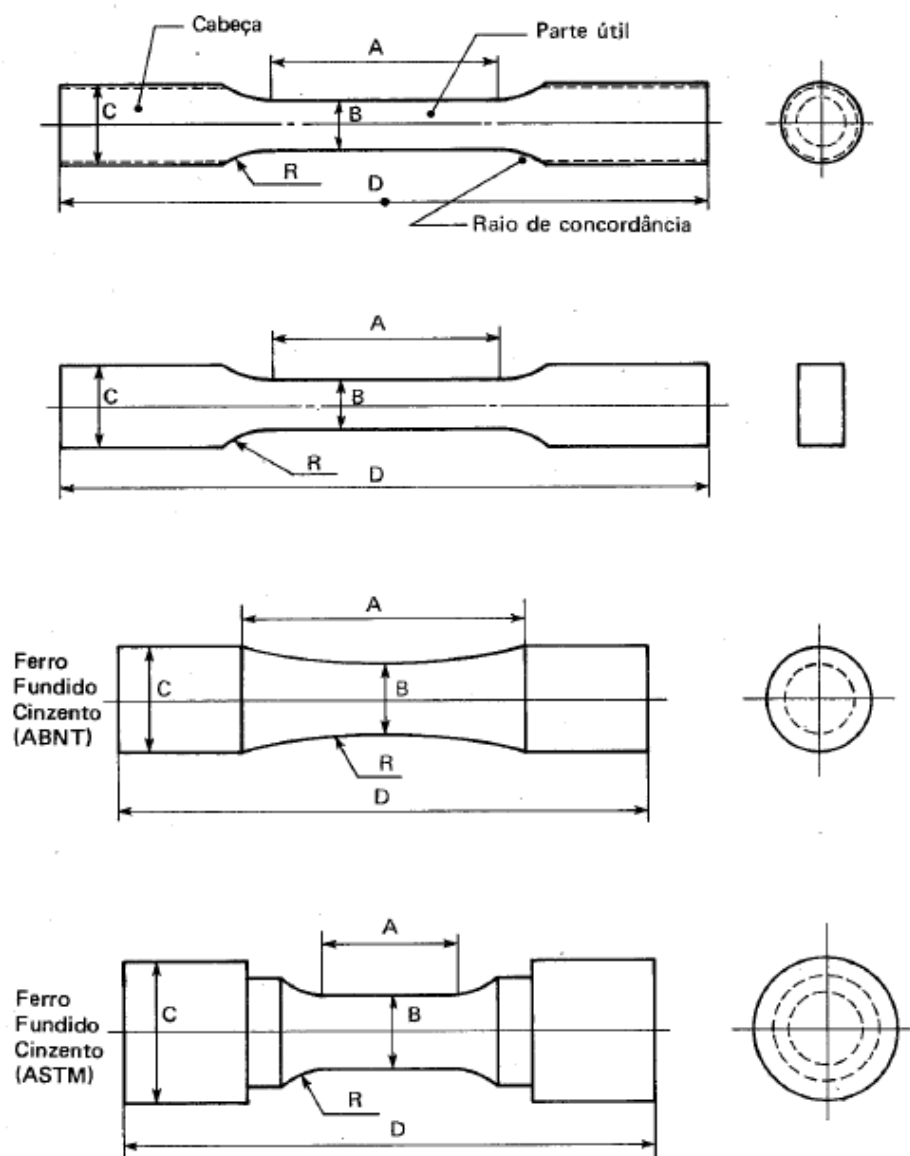


Figura 12 – Corpos de prova para ensaio de tração (SOUZA, 1982).

Segundo Garcia (2012), o módulo de elasticidade é constante para cada metal ou liga metálica. O módulo de elasticidade é a medida da rigidez do material, quanto maior o módulo, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma tensão e mais rígido será o metal. Comparando-se por exemplo, os módulos de elasticidade do aço e de uma liga de alumínio, nota-se que o aço é cerca de três vezes mais rígido que a liga de

alumínio, isto é, a deformação do aço é cerca de 1/3 da deformação da liga para a mesma tensão na zona elástica.

Tabela 9 - Módulo de elasticidade de alguns materiais a temperatura ambiente.

Metá	Módulo de elasticidade (kgf/mm ²)	Liga	Módulo de elasticidade (kgf/mm ²)
Ferro, níquel, cobalto	21 000	Aços-carbono e aços-liga em geral	21 000
Moibdênio, tungstênio	35 000	Aços inoxidáveis austeníticos	19 600
Cobre	11 900	Ferro fundido nodular	14 000
Alumínio	7 000	Bronzes e latões	(média)
Magnésio	4 550	Bronzes de manganês e ao silício	7 700-11 900
Zinco	9 800	Bronzes de alumínio	10 500
Zircônio	10 150	Ligas de alumínio	8 400-13 300
Estanho	4 200	Monel (liga de níquel)	7 000- 7 450
Berílio	25 700	Hastelloy (liga de níquel)	13 000-18 200
Ósmio	56 000	Invar (liga níquel-ferro)	18 900-21 500
Titânio	10 000	Inconel (liga de níquel)	14 000
Chumbo	1 750	Illum (liga de níquel)	16 000
Ródio	29 750	Ligas de titânio	18 700
Nióbio	10 500	Ligas de magnésio	11 200-12 100
Ouro, prata	7 850	Ligas de estanho	4 550
Platina	15 800	Ligas de chumbo	(média)
			5 100- 5 400
			1 400- 2 950

Fonte: SOUZA, 1982.

O módulo de elasticidade é determinado pelas forças de ligação entre os átomos de um metal. Como essas forças são constantes para cada estrutura que apresente o metal, o módulo de elasticidade é uma das propriedades mais constantes dos metais, embora possa ser levemente alterado por adições de elementos de liga. A medida do módulo de elasticidade (E) é feita pela tangente da reta característica da zona elástica, traçando-se a curva tensão-deformação na zona elástica com a maior precisão possível em corpos de prova feitos conforme os métodos de ensaio das normas técnicas. (Souza, 1982).

1.4.3.2 Considerações sobre o resultado do ensaio de tração

Segundo Garcia (2012), os resultados apresentados pelo ensaio de tração podem variar em função de uma série de fatores, como a temperatura de execução do ensaio, o teor de soluto da liga, os tratamentos térmicos utilizados e o tamanho do grão do material.

Os tratamentos térmicos devem influenciar de modo a alterar as características mecânicas, e os tratamentos térmicos que objetivam elevar a dureza do material têm como consequência direta a elevação das tensões de escoamento e máxima, reduzindo também a ductilidade do material, diminuindo os valores do alongamento, da deformação e da estricção. O tamanho de grão também deve influenciar de forma significativa os resultados gerados no ensaio de tração, uma vez que os contornos de grão devem representar um obstáculo ao escorregamento de planos. (Garcia, 2012).

1.4.3.3 Ensaio de Compressão

O ensaio de compressão consiste na aplicação de carga de compressão uniaxial crescente em um corpo de prova. A deformação linear obtida medindo-se a distância entre as placas que comprimem o corpo e a carga de compressão, consiste na resposta deste ensaio, utilizado amplamente na indústria da construção civil e de materiais cerâmicos.

Segundo Garcia (2012), quando um material é submetido a cargas de compressão, as relações entre tensão e deformação são similares às obtidas no ensaio de tração, com a sua tensão de escoamento comportando-se elasticamente, ocorrendo uma deformação plástica ao se ultrapassar este valor. A medida que a deformação aumenta ocorre um encruamento e um aumento no diâmetro da seção transversal do corpo de prova.

O ensaio de compressão pode ser executado em máquina universal de ensaios, a mesma que se utiliza no ensaio de tração, com a adaptação de duas placas (também chamadas de cabeçotes) lisas e de superfície perpendicular ao eixo de aplicação de carga. O seu corpo de prova possui a sua forma cilíndrica. No ensaio de materiais frágeis, como ferro fundido e concreto, a fratura ocorre preferencialmente em plano a 45° do eixo de aplicação da carga, com uma pequena deformação do diâmetro. Em materiais dúcteis, em função do efeito do atrito entre a placa de aplicação de carga e o corpo de prova, ocorre

o chamado embarilhamento, em que se observa a deformação pronunciada no centro do comprimento do corpo de prova. (GARCIA, 2012).

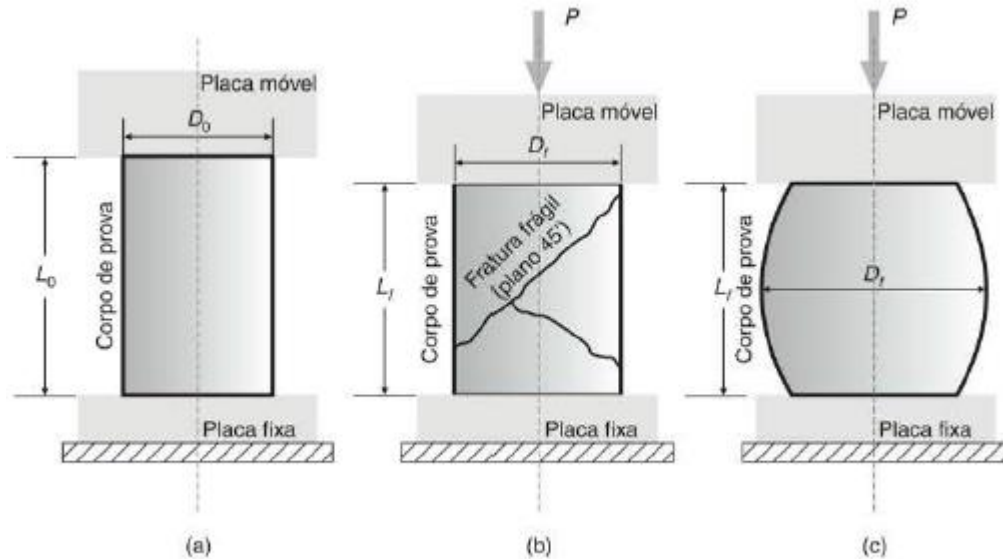


Figura 13 – (a) Esboço do ensaio de compressão em corpo de prova cilíndrico. (b) Resultado da fratura observada em materiais frágeis. (c) Resultado do embarilhamento observado em materiais dúcteis. (Garcia, 2012).

Um das preocupações a se ter na realização do ensaio é o dimensionamento do corpo de prova, que deve ter uma relação entre comprimento e seção transversal adequada para resistir a flambagem, ou seja, o encurvamento do corpo de prova devido ao efeito de flexão. Em um ensaio de compressão, evita-se a flambagem (instabilidade na compressão de um metal dúctil) dimensionando-se o corpo de prova de modo a obter uma tensão máxima menor que a tensão crítica que provocaria a flambagem. (SOUZA, 1982).

Materiais frágeis, como o concreto e o ferro fundido, em função da presença de trincas microscópicas, são geralmente fracos em relação a tração, pois as suas trincas tendem-se a se propagar. Por outro lado, esses materiais são resistentes à compressão.

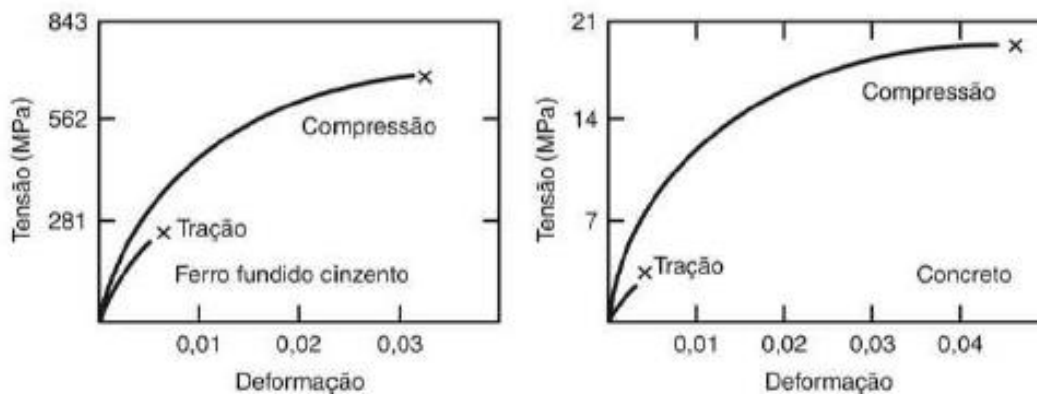


Figura 14 - Comparação entre os comportamentos à tração e à compressão de dois materiais frágeis (ferro fundido cinzento e concreto, respectivamente). (Garcia, 2012).

1.4.3.4 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza consiste na aplicação de uma carga na superfície do material empregando um penetrador padronizado, produzindo uma marca superficial ou impressão. A medida da dureza do material ou a dureza superficial é dada como função das características da marca de impressão e da carga aplicada em cada tipo de ensaio realizado. Esse ensaio é amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos e elétricos, tratamentos superficiais, vidros e laminados, devido a sua vantagem de fornecer dados quantitativos das características de resistência à deformação permanente das peças produzidas. (GARCIA, 2012).

Segundo Souza (1982), a propriedade mecânica denominada dureza é largamente utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas e na comparação de diversos materiais. Entretanto o conceito físico de dureza pode variar de significado dependendo do contexto em que é aplicado. Na metalúrgica a dureza pode ser compreendida como a resistência à deformação plástica permanente, já na engenharia mecânica pode ser compreendida como a resistência a penetração de um material duro em outro, por exemplo. Podemos dividir o ensaio de dureza em três tipos principais que dependem de como o ensaio é conduzido: 1) dureza por penetração; 2) dureza por choque e 3) dureza por risco.

O tipo de dureza mais utilizado na engenharia mecânica é a dureza por penetração, onde um material (sua geometria varia conforme o tipo de ensaio) é comprimido em um

corpo de prova deixando uma impressão marcada na peça, a dureza é relacionada com as características da marca de impressão.

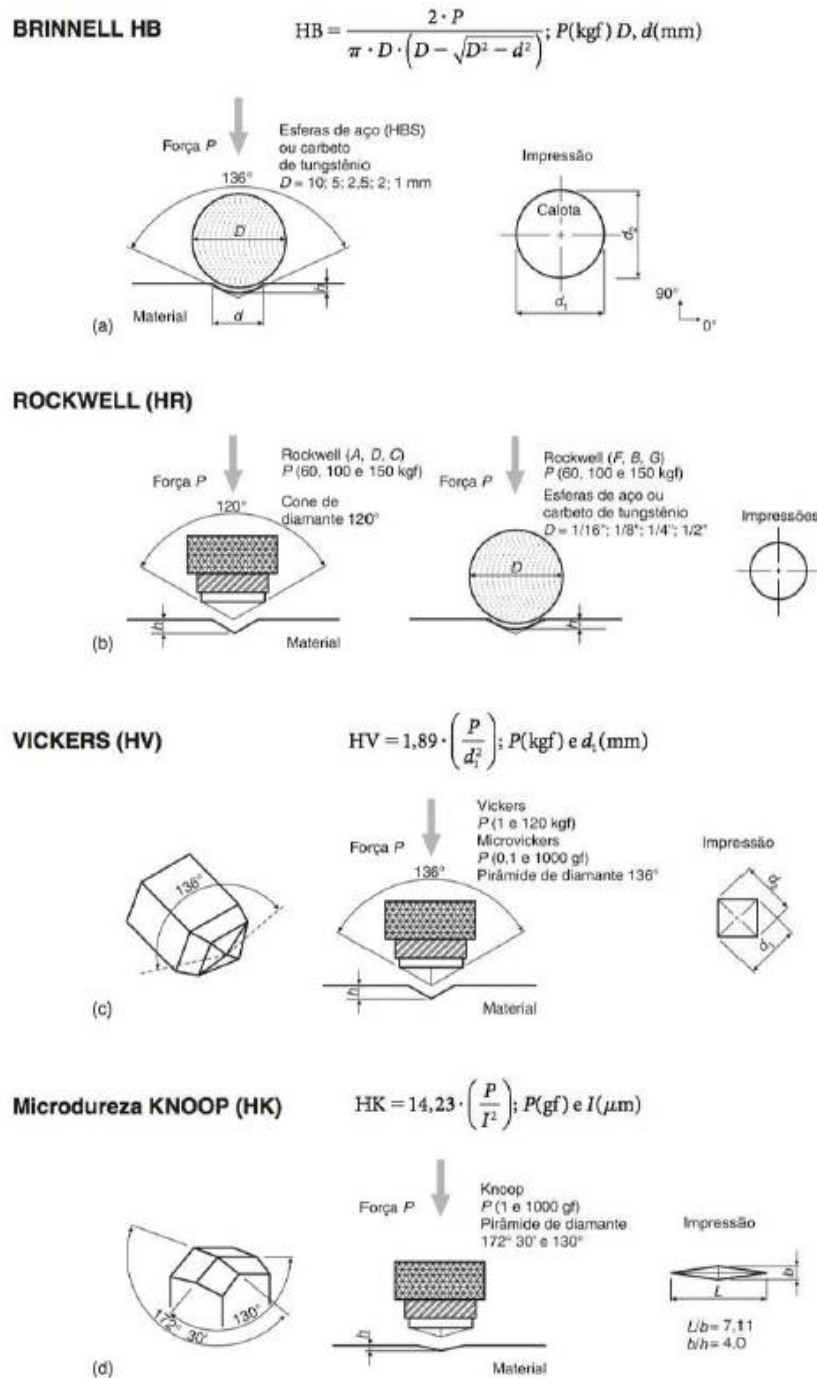


Figura 15 - Tipos de ensaios de penetração e suas características (GARCIA, 2012).

1.4.3.5 Ensaio de Fluência

Segundo Souza (1982), define-se fluência como sendo a deformação plástica que ocorre em um material sob tensão constante ou praticamente constante em função do tempo. Particularmente em relação aos materiais metálicos, a temperatura exerce uma

enorme influência no fenômeno. O esforço aplicado ao metal também influi nos resultados de fluência. Quanto maior a tensão aplicada, maior será a velocidade de deformação que sofrerá o metal numa dada temperatura.

O ensaio de fluência é executado pela aplicação de uma carga uniaxial constante a um corpo de prova de mesma geometria dos utilizados no ensaio de tração, a uma temperatura elevada e constante. O tempo de aplicação da carga é principalmente em função da esperada vida útil do componente que será fabricado com o material submetido ao ensaio. As deformações que ocorrem no corpo de prova são medidas em função do tempo de realização do ensaio e indicadas na forma de uma curva com deformação apresentada na ordenada e o tempo na abcissa. (GARCIA, 2012).

1.4.3.6 Ensaio de Fadiga

O ensaio de fadiga, de forma resumida, é o resultado da aplicação cíclica de uma carga em um corpo de prova. A apresentação dos dados experimentais de ensaios de fadiga pode se dar através da curva S-N, também conhecida como curva de Wohler, onde se plota a tensão (S) em relação ao número de ciclos necessários para a fratura (N), normalmente em escala logarítmica, para vários corpos de prova. A plotagem de uma curva S-N permite identificar o limite de resistência à fadiga do material, ou seja, o nível de carregamento cíclico abaixo do qual o material terá vida em fadiga infinita, quando existente

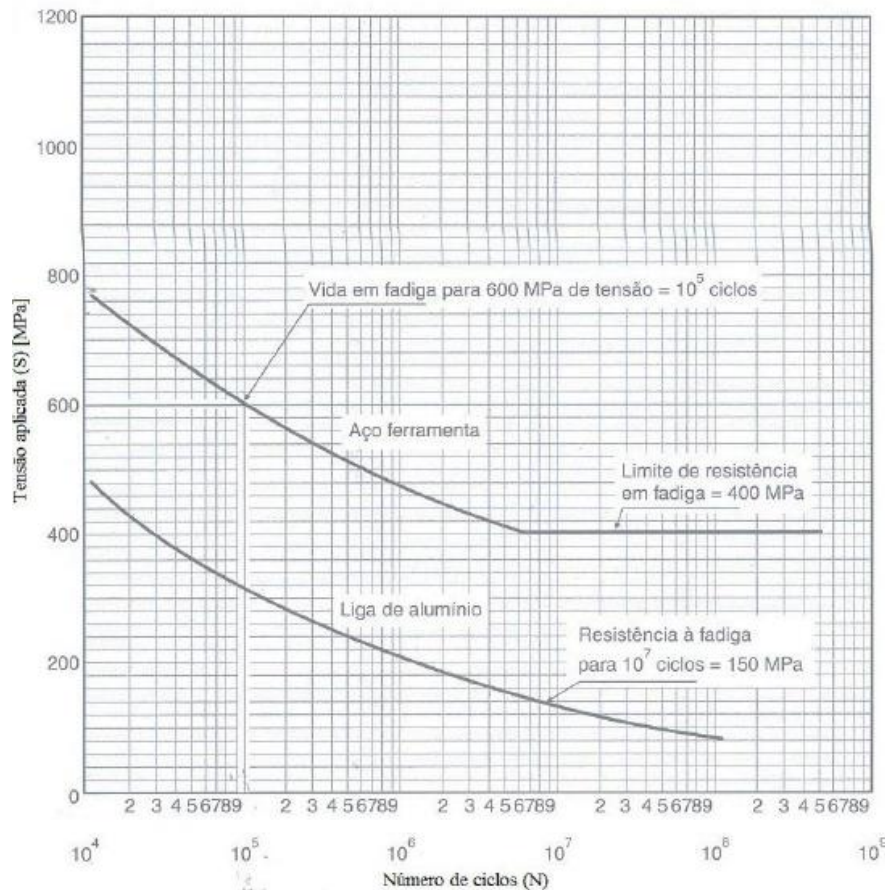


Figura 16 - Curva característica de ensaios de fadiga para materiais ferrosos e não ferrosos (GARCIA, 2012).

A região na qual ocorre a falha em menos de 10^4 ciclos é denominada de fadiga de baixo ciclo, e a região de maior resistência é denominada fadiga de alto ciclo. A norma ASTM E466-07 indica que o ensaio de fadiga axial é utilizado para determinar o efeito de fatores como material, geometria, acabamento superficial e carga na resistência à fadiga de materiais metálicos sujeitos a tensões repetidas.

1.4.3.7 Ensaio de Impacto de Charpy

O ensaio de impacto amplamente utilizado na análise do comportamento à fratura de materiais devido à sua facilidade de execução. Normalmente, o resultado é representado pela medida da energia absorvida do material até a sua fratura, utilizando-se de corpo de provas padronizados com entalhe em dimensões definidas. Apesar de não fornecer informações quantitativas a respeito do comportamento de estruturas nas condições de serviço, o resultado do ensaio de impacto pode ser utilizado para o controle

de qualidade de processos. Podemos afirmar então que se trata de um ensaio qualitativo para avaliação da tenacidade do material.

A norma ASTM E23-12c indica os requisitos relacionados ao corpo de prova, procedimento, equipamentos, entre outros, para a execução de ensaios de impacto em materiais metálicos. As figuras a seguir apresentam um equipamento de ensaio de impacto e a configuração de carregamento e posicionamento do corpo de prova do tipo Charpy no suporte rígido.

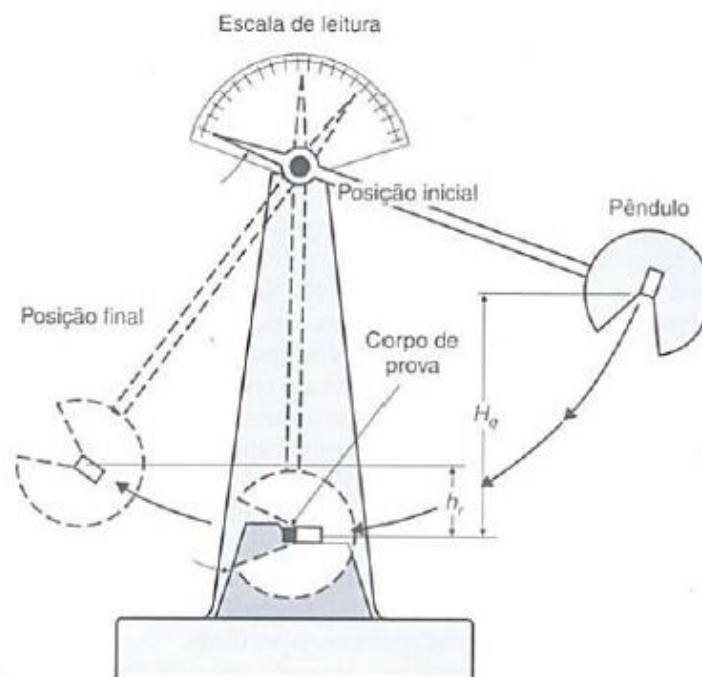


Figura 17 - Equipamento de ensaio de impacto (GARCIA, 2012).

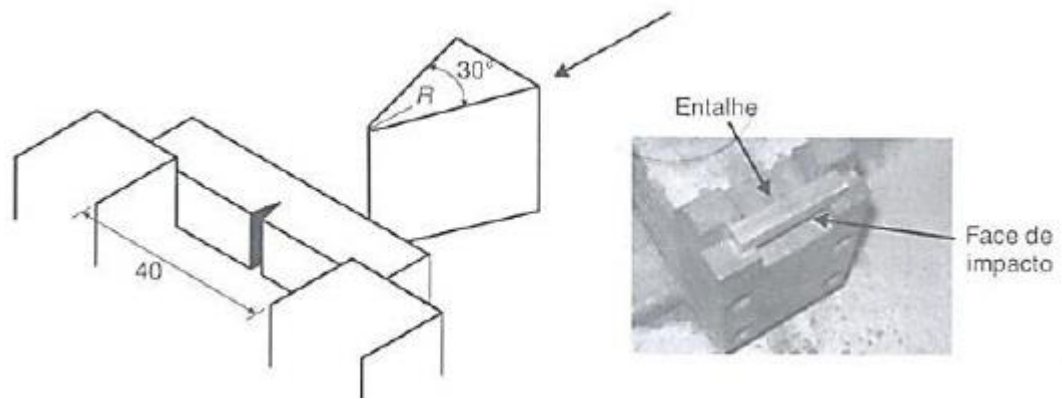


Figura 18 - Representação do corpo de prova do tipo Charpy (GARCIA, 2012).

1.4.4 Ensaios não-destrutivos

Segundo Garcia (2012), em alguns casos onde não é possível a destruição da peça ou do componente a ser testado, como peças aeronáuticas durante a sua vida útil, deve-se recorrer aos ensaios não-destrutivos. Tais ensaios permitem avaliar a peça obtendo informações tanto quantitativas quanto qualitativas sobre a integridade de um componente mecânico, permitindo ao profissional realizar a sua substituição antes que tal componente falhe em operação. Os ensaios não destrutivos permitem a inspeção de uma peça antes de sua utilização inicial ou também inspeções contínuas ao longo da vida útil.

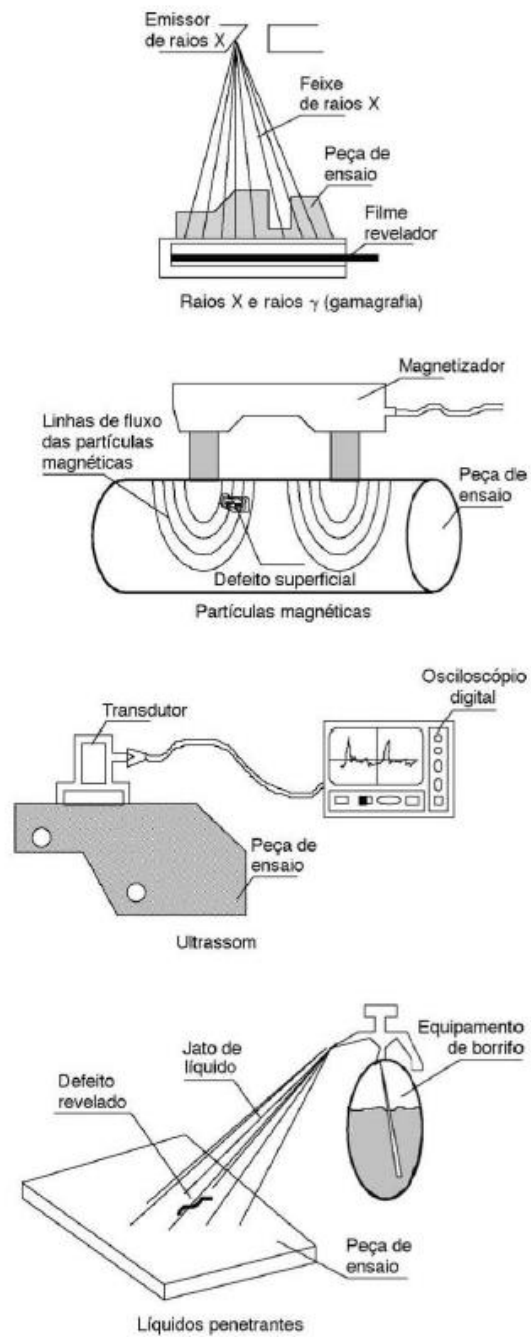


Figura 19 - Ensaios não-destrutivos mais utilizados. (GARCIA, 2012)

Capítulo 2

2. Materiais e métodos

Neste capítulo são abordados os materiais e métodos (metodologia experimental) utilizados neste trabalho para a realização do endurecimento por precipitação e posterior análise de dureza de uma liga de alumínio 6061.

2.1 Materiais

Nesta seção serão apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1.1 Liga de alumínio 6061

Para a realização dos tratamentos e posterior análise de dureza, foi utilizada a liga de alumínio 6061, que tem como principais elementos de liga o silício e o magnésio, muito utilizada em aplicações navais, sendo até comumente chamada de “alumínio naval”. A liga foi adquirida na empresa Alumínio & Cia, localizada em Manaus. A composição química da liga e suas principais propriedades mecânicas serão apresentadas em tabelas a seguir.

Tabela 10: Algumas propriedades mecânicas de uma liga 6061 de alumínio.

Liga	DIN	Têmpera	Limite de resistência a tração mínimo (Mpa)	Dureza (HRb)
6061	Al Si Mg Cu	T4	180	33,5
		T6	260	54

Fonte: Adaptado de ALUMICOPPER, 2017

Tabela 11: Composição química da liga 6061

Elemento	Quantidade (%)
Titânio	0,15
Zinco	0,25
Cromo	0,04/0,35
Magnésio	0,80 / 1,20
Manganês	0,15
Cobre	0,15 / 0,40
Ferro	0,7
Silício	0,40 / 0,80
Outros (cada)	0,05
Alumínio	RESTANTE

Fonte: Adaptado de ALUMICOPPER, 2017

2.1.2 Amostras

O material adquirido veio em barras com o comprimento de 2 metros, sendo necessária o corte em amostras menores. Ao se analisar o volume do forno a ser utilizado para os tratamentos térmicos, concluiu-se que as amostras deveriam ter como dimensões 120 x 50 x 7,93 mm. A espessura das barras adquiridas eram de 5/16", ou aproximadamente 7,93 mm. Foram separadas 10 amostras, 9 para o tratamento T6 e 1 para o tratamento T4.



Figura 20 – Amostras cortadas para análise.

2.2 Método

Nesta seção é relatada a metodologia experimental dos procedimentos de solubilização, envelhecimento artificial/natural e análise de dureza.

2.2.1 Tratamento térmico das amostras

Inicialmente todas as 10 amostras passaram pelo tratamento de solubilização, em uma temperatura de 570°C por um período de 2 horas, sendo resfriadas de forma rápida na água. Uma amostra foi separada para sofrer envelhecimento natural (amostra An) e as demais sofreram envelhecimento artificial. O envelhecimento artificial foi feito em três temperaturas diferentes: 120°C, 160°C e 220°C e em cada temperatura, três amostras foram envelhecidas com tempos diferentes: 1 hora, 3 horas e 5 horas, totalizando 9 amostras. A amostra envelhecida naturalmente foi analisada ao longo de períodos pré-definidos de tempo: 1 dia, 3 dias, 5 dias, 10 dias, 15 dias, 20 dias e 25 dias. A taxa de aquecimento do forno foi de aproximadamente 15 °C/min.

O equipamento utilizado para a solubilização foi o forno do tipo mufla GP Científica Modelo 200B, localizado no laboratório de metalografia do IFAM, e para agilizar o processo, o envelhecimento artificial ocorreu em uma estufa de secagem da marca Medicate, modelo MD 1.1, localizada no laboratório de controle de qualidade da Universidade Federal do Amazonas.



Figura 21 – Forno tipo mufla utilizado nos tratamentos.



Figura 22 - Estufa utilizada no envelhecimento artificial das amostras.

2.2.2 Ensaio de dureza

Inicialmente foi feito o ensaio de dureza de uma amostra no estado em que foi comprada, com o objetivo de comparar a sua dureza real com a fornecida pelo fabricante. Todas as amostras foram então, posteriormente ao respectivo tratamento, preparadas para o ensaio de dureza. Para a verificação de dureza foi utilizado o método Rockwell B com o durômetro TIME, modelo TH 320, localizado no laboratório de metrologia da Universidade Federal do Amazonas, com o penetrador de ponta esférica de diamante com o tamanho de 1/16, a carga inicial de 100 kgf e o tempo de penetração foi de 10 segundos e a leitura de 5 segundos, obtendo assim os resultados em escala HRB.



Figura 23 – Durômetro utilizado para os ensaios de dureza Rockwell B.

3.Resultados e discussões

Neste tópico são apresentados os resultados e discussões adquiridos da aplicação da metodologia mencionada anteriormente.

3.1 Análise do material no seu estado comercial

Segundos dados do fornecedor, a liga 6061 apresenta o valor de até aproximadamente 53 HRB, sendo fornecida com o tratamento T6. Após o material ser comprado, foi separada uma amostra padrão (chamada de AR) que não passou por nenhum tratamento, mantendo as mesmas características do seu estado comercializado, ela serviu como base para uma futura comparação com os resultados dos tratamentos térmicos. A dureza obtida foi de 47,8 HRB, valor abaixo do fornecido pelo fabricante. Esse valor menor pode ser resultado de uma menor concentração de elementos de liga ou até mesmo um tratamento feito de forma ineficaz.

3.2 Análise da amostra envelhecida naturalmente

Uma outra amostra foi separada com o objetivo de avaliar a dureza obtida através de um envelhecimento natural, comparando a mesma com as durezas obtidas nos envelhecimentos artificiais, a amostra foi denominada AN. Após a mesma sofrer a solubilização, os seus valores de dureza foram acompanhados ao longo de determinados períodos de tempo pré-estabelecidos: 1, 3, 5, 10, 15, 20 e 25 dias. Os valores obtidos são mostrados na tabela seguinte. A amostra foi solubilizada a 570 °C, por duas horas e resfriada naturalmente.

Tabela 12: Dureza ao longo do envelhecimento natural da amostra AN.

Tempo de envelhecimento	Dureza (HRB)
Após a solubilização (8 horas)	14,5
1 dia	27,3
3 dias	32,5
5 dias	34,7
10 dias	36,8
15 dias	37,2
20 dias	37,1
25 dias	37,4

Com o passar do tempo ocorre o envelhecimento natural, aumentando a dureza da amostra conforme os precipitados de Mg_2Si se desenvolvem, dificultando cada vez mais os movimentos de discordâncias. Podemos observar que com o passar dos dias a dureza da amostra se estabilizou e praticamente não aumentou entre os 10 e 25 dias, embora isto não signifique que a mesma não continue aumentando em períodos de tempo maiores.

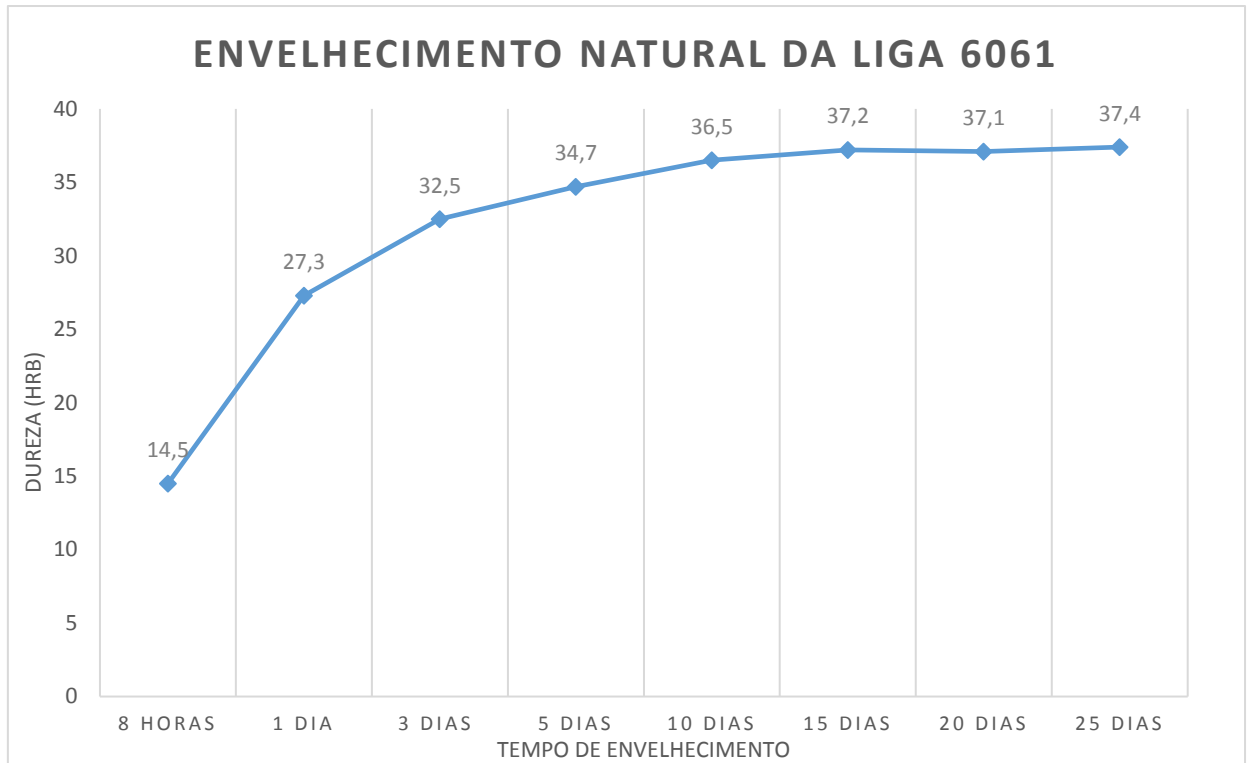


Figura 24 – Gráfico do aumento de dureza em função do tempo de envelhecimento natural.

3.3 Análise de dureza das amostras envelhecidas artificialmente

As 9 amostras envelhecidas artificialmente foram submetidas ao mesmo processo de solubilização, permanecendo à 570 °C por duas horas e sendo resfriadas a água. Como já mencionado anteriormente, três temperaturas diferentes de envelhecimento foram analisadas: 120°C, 160°C e 220°C, cada uma em três tempos diferentes: 1, 3 e 5 horas.

3.3.1 Envelhecimento artificial a 120°C

As três amostras foram solubilizadas no forno tipo mufla do laboratório de metalografia do Instituto Federal do Amazonas e posteriormente envelhecidas em uma estufa de secagem do laboratório de controle de qualidade da Universidade Federal do Amazonas. Após as amostras resfriarem naturalmente, foi feita a análise de dureza no micrômetro digital e os valores obtidos constam na tabela 13.

Tabela 13: Resultados do envelhecimento artificial a 120°C

Tempo de Envelhecimento	Dureza (HRB)
1 hora	32,1
3 horas	35,3
5 horas	38,2

Podemos notar que as durezas obtidas com este envelhecimento foram baixas se comparadas com a amostra padrão AR, obtendo um valor de dureza apenas levemente superior a amostra envelhecida naturalmente, apenas com a vantagem de conseguir tal valor de forma muito mais rápida. Isso nos mostra que a temperatura utilizada de 120 °C não foi suficiente para o desenvolvimento dos precipitados de Mg₂Si de uma forma mais completa.

3.3.2 Envelhecimento artificial a 160 °C

A tabela a seguir apresenta os dados obtidos das amostras submetidas ao mesmo processo, com envelhecimento artificial a 160 °C.

Tabela 14: Resultados do envelhecimento artificial a 160°C

Tempo de Envelhecimento	Dureza (HRB)
1 hora	42,3
3 horas	60,2
5 horas	67,2

Este envelhecimento apresentou os maiores valores de dureza, superando a amostra AR em duas ocasiões: em 3 e 5 horas. É importante ressaltar que o envelhecimento sugerido pelo ASM International Handbook deve ocorrer a 160°C por um período de 8 horas, 3 horas a mais do que o realizado, porém com uma temperatura inferior de solubilização, de 540°C, enquanto a solubilização realizada no trabalho foi de 570°C.

3.3.3 Envelhecimento artificial a 220°C

As amostras foram submetidas aos mesmos processos anteriores, variando apenas a sua temperatura de envelhecimento, a tabela a seguir apresenta os dados obtidos de dureza.

Tabela 15: Resultados do envelhecimento artificial a 220°C

Tempo de Envelhecimento	Dureza (HRB)
1 hora	62,3
3 horas	56,3
5 horas	42,5

Podemos notar que para a temperatura de 220°C obtemos resultados maiores do que a amostra padrão AR, em 1 e 3 horas. Notou-se também que a partir da primeira a mostra de 1 hora a dureza sofreu uma diminuição com o passar do tempo, ocorrendo um fenômeno chamado de superenvelhecimento, onde os precipitados crescem em tamanhos além dos desejados, resultando em uma queda de dureza. Tal fenômeno deve ser evitado.

3.4 Análise comparativa entre todas as amostras

Para uma melhor organização, as amostras foram nomeadas de acordo com o tratamento sofrido e os seus resultados foram organizados em um gráfico para melhor compreensão

Tabela 16 – Nomenclatura das amostras e respectivos valores de dureza.

Amostra	Temperatura de envelhecimento (°C)	Tempo de Envelhecimento	Dureza (HRB)
A120 – I	120	1 hora	32,1
A120 – III	120	3 horas	35,3
A120 – V	120	5 horas	38,2
A160 – I	160	1 hora	42,3
A160 – III	160	3 horas	60,2
A160 – V	160	5 horas	67,2
A220 - I	220	1 hora	62,3
A220 - III	220	3 horas	56,3
A220 - V	220	5 horas	42,5
AN	Ambiente	25 dias	35,3
AR	-	-	47,8

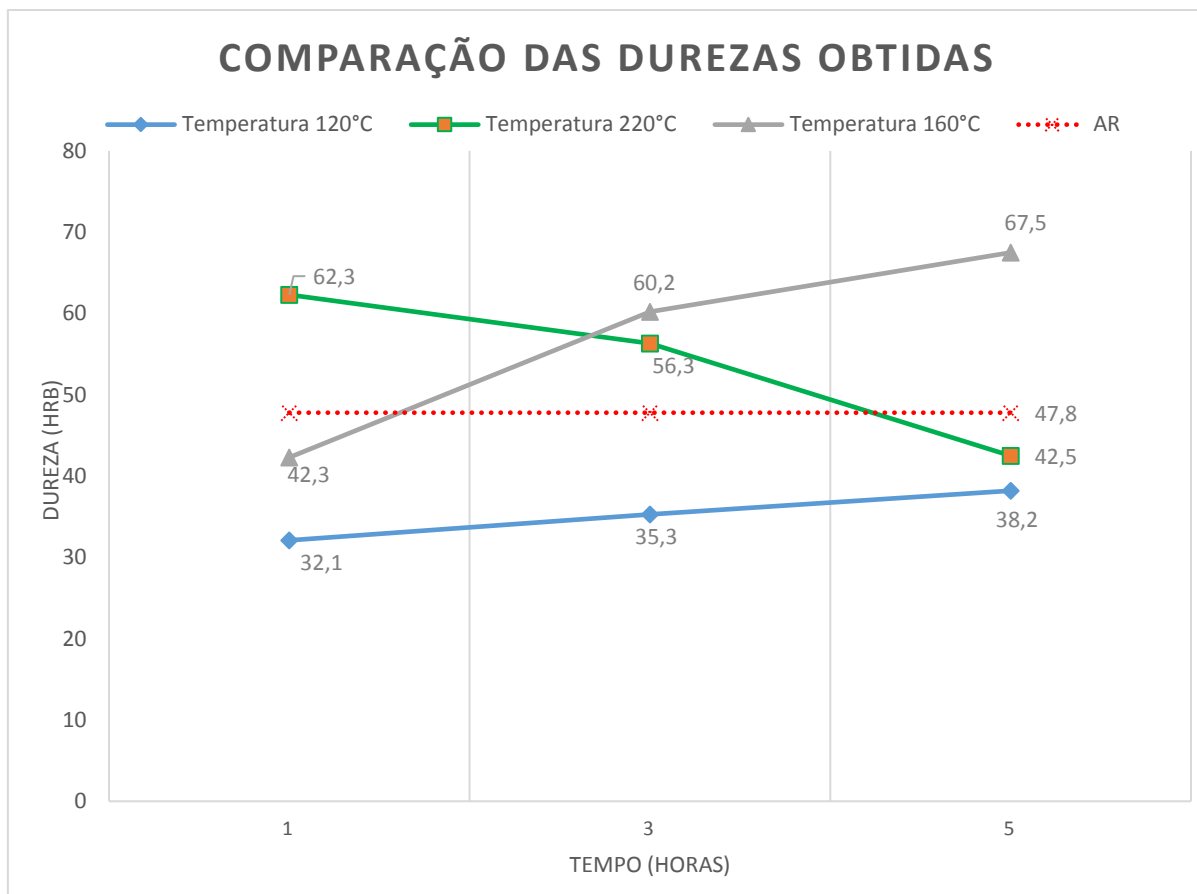


Figura 25 – Gráfico comparativo dos valores obtidos de dureza em função do tempo.

O gráfico apresenta os valores de dureza em função dos tempos de todas as amostras, além de ter uma reta de referência, com o valor de dureza da amostra AN para facilitar a comparação dos resultados.

Pode-se observar que os valores obtidos dos ensaios são semelhantes ao de Mrówka (2006), na figura 9 deste trabalho. Apesar de os resultados corresponderem a uma diferente liga da mesma série, o comportamento analisado para temperaturas e tempos semelhantes foram semelhantes, ocorrendo um subenvelhecimento a temperaturas mais baixas (120°C e 130°C) e tempos pequenos de envelhecimento (menor que 10 horas) e um sobre-envelhecimento a temperaturas mais altas (220°C) e tempos maiores que uma hora. Apesar do trabalho realizado não possuir a mesma quantidade de tempos diferentes analisado, foi possível observar como se comporta o material a diferentes temperaturas de envelhecimento.

Da mesma forma, os dados analisados nos trabalhos de Martins (2008) e Soares (2009) também são semelhantes. Em ambos os trabalhos na realização do tratamento T6 as amostras tendem a alcançar um pico de dureza máxima e a partir do mesmo diminuem

a sua dureza com o aumento do tempo. Com o aumento da temperatura do envelhecimento, podemos observar que tal pico é atingido de forma mais rápida, como foi possível notar nas amostras envelhecidas a 220°C neste trabalho, onde o pico de dureza foi atingido em torno de 1 hora e partir daí houve um decréscimo dos valores. Para as amostras ensaiadas em outras temperaturas não foi possível perceber tal pico nos tempos analisados, pois os mesmos segundo os dados de Mrówka (2006) são da ordem de mais de 10 horas.

Em relação ao envelhecimento natural, pode-se observar que com o passar dos dias a dureza analisada do material estabilizou-se em um determinado valor e partir daí não foi possível observar um aumento. De forma semelhante, tal fenômeno pôde ser observado em Jacinto (2017), ao analisar sob circunstâncias semelhantes a liga 6351 que foi tratada com o tratamento T4. Da mesma forma em Dolan (2004), pôde-se observar uma tendência a se estabilizar a dureza de um material envelhecido naturalmente.

Foi observado que neste trabalho o melhor resultado de dureza obtido foi o da amostra A160-V, que foi solubilizada a 570°C e envelhecida a 160°C por 5 horas. Em Jacinto (2017), porém, os melhores resultados obtidos para a liga 6351 estudada ocorreram com a amostra solubilizada a 540°C e envelhecida a 195°C por 5 horas. Podemos observar então que diferentes elementos de liga, ainda que em duas ligas da mesma série, podem ter resultados diferentes em relação aos tratamentos térmicos.

É importante citar a amostra A220-I, que resultou em valores muito próximos da A160-V em apenas 1 hora de envelhecimento, o que nos dá uma economia de tempo de 4 horas, o que na indústria é muito importante.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo estudar a influência do tratamento térmico na liga de alumínio 6061, tendo como objetivo o aumento de dureza, realizando diversos envelhecimentos a fim de se encontrar o mais adequado.

Com a realização da solubilização, foram obtidos resultados razoáveis tanto no envelhecimento natural (T4) quanto no artificial (T6). Foi observada a variação de dureza ao longo do tempo da amostra AN que ocorreu de forma lenta, estabilizando os valores entre 10 e 15 dias. Já nas amostras envelhecidas naturalmente, obtemos valores superiores de dureza em tempos muito menores, superando o valor da amostra padrão AR.

Apenas o envelhecimento a 120°C não obteve resultados muito interessantes, obtendo em todos os tempos analisados com valores de dureza inferiores a amostra AR padrão. Isto não significa, porém, que para maiores tempos de envelhecimento não se possa obter valores mais altos, apenas que o tempo analisado não foi suficiente para o desenvolvimento dos precipitados.

A amostra com o maior valor de dureza obtido foi a A160-V, que foi envelhecida a 160°C por um tempo de 5 horas, resultando em um valor de dureza de 67,2 HRB, bem superior aos 47,8 HRB da amostra padrão AR.

É importante citar a amostra A220-I, que obteve um valor de dureza de 62,3 HRB, inferior ao da amostra A160-V, porém com a vantagem do tempo, sendo obtido de um envelhecimento de apenas 1 hora a temperatura de 220°C.

Um fenômeno interessante ocorrido foi o do superenvelhecimento, nas amostras A220-III e A220-V, onde os precipitados cresceram demais e ao contrário do objetivo do tratamento, a dureza diminuiu.

Pode-se concluir que para a liga analisada no trabalho, os envelhecimentos mais interessantes foram o da amostra A160-V, por obter o maior valor de dureza e o da amostra A220-I, por obter um semelhante valor de dureza, em um tempo significativamente menor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCAN – Alumínio do Brasil S/A. **Manual de Soldagem**. Disponível em: <http://mkmouse.com.br/livros/soldaemaluminiomanual-Alcan.pdf>. Acesso em: 28/08/2016.
- ALUMICOPPER – **Comércio de metais LTDA. Manual técnico**. Disponível em: <http://www.alumicopper.com.br> Acesso em: 21/03/2017.
- ASKELAND, R. D.; PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo, 1994.
- ASM INTERNACIONAL – **The Materials Information Company**, ASM Metals Handbook Volume 9B – Metallography and Microstructures, 1992.
- ASM International Handbook Committee, **Heat treating**, in ASM Handbook, vol.4, American Society for Metals, USA, pg. 850-927, (1990).
- BRESCIANI F. E., **Seleção de Materiais Metálicos**, Editora da UNICAMP, Campinas, 1986.
- BROEK, D., **Elementary Engineering Fracture Mechanics**, Martinus Nijhoff Publishers, 3^o revised edition, 1984.
- BUENO, Alex Fabiano. **Determinação do coeficiente de atrito para as ligas de alumínio AA6351e de titânio Ti6Al4V pelos métodos do anel e tubo cônico**. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, 2010.
- BUHA, J., **Interrupted ageing of Al-Mg-Si-Cu alloys**, PhD Thesis, University of New South Wales (2004).
- BUHA, J., LUMLEY, L.N., CROSKY, A.G. **TEM analysis of an interrupted aged 6061 alloy**, Materials Forum, pg.1167-1172, (2004).
- CALLISTER, J.W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução – 7.Ed.**-Rio de Janeiro; LTC, 2002.
- CUNHA, E. A. **Usinagem da liga de alumínio ASTM AA 7050 por torneamento**. Dissertação (Mestrado em engenharia). UNESP – Faculdade de Engenharia – Campus Guarantiguetá, 2005.
- DELFORGE, Daniel Yvan Martin. **Instrumentação de um Pêndulo para Ensaio de Impacto Charpy**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 1994.
- DIETER, G.E., **Metalurgia Mecânica**, Guanabara Dois, segunda edição, Rio de Janeiro, 1981.
- DOLAN, G.P., ROBINSON, J.S. **Residual stress reduction in 7175-T73, 6061-T6 and 2017 A-T4 aluminium alloys using quench factor analysis**, Journal of Materials Processing Technology, pg. 153-154, 356-351, 2004.

FIDELINSKI, P., ALIABADI, M. H. and ROOKE, D. P., **Boundary element formulations for the dynamic analysis of cracked structures**, *Dynamic Fracture Mechanics*, Editor: M. H. Aliabadi, Computational Mechanics Publications, p. 61-100, 1995.

FIGUEIREDO, Kleber Mendes. **Aplicação de ensaio de impacto Charpy instrumentado no estudo da tenacidade à fratura dinâmica nas soldas a arco submerso em aços para caldeiras**. Dissertação (Doutorado em ciência e engenharia de materiais) – Universidade de São Carlos, 2004.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre. **Ensaaios dos Materiais** – 2ª Edição. Rio de Janeiro, LTC. 2012.

HATCH, J. E. Aluminum: **Properties and Physical Metallurgy**. ASM, USA, 1990.

IVANKOVIC, A. and Williams, J.G., **The finite volume analysis of linear elastic dynamic fracture problems**, *Dynamic Fracture Mechanics*, Editor: M. H. Aliabadi, Computational Mechanics Publications, p. 101-135, 1995.

JACINTO, Fabrício de Lira. **Influência do tratamento térmico nas têmperas T4 e T6 na liga de alumínio 6351**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2017.

KOLOSOSKI, J., FILHO, F.A. **Curso de Metalografia do Alumínio e Suas Ligas**. São Bernardo do Campo, FEI, 1994.

LUTTS, A. **Pre-precipitation in Al-Mg-Ge and Al-Mg-Si**, *Acta Metallurgica*, v.9, Junho de 1961, p. 577-586.

MARTIN, J. W. **Precipitation Hardening**, Pergamon Press, Oxford, UK, 1976, first edition. Cambridge, p. 148-152.

MARTINS, M. M. M., **Estudo do comportamento das ligas de alumínio 6061 e 6082**, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro (2008).

MRÓWKA, Nowotnik, G., J. Sieniawski, A. Nowotnik, **Influence of Precipitation Strengthening Process on the Mechanical Properties of 6082 wrought Aluminium Alloy**, *Archives of Metallurgy and Materials*, pg. 33-36 (2006).

N.R. Oliveira, **Transformações microestruturais nas ligas de alumínio arrefecidas desde o domínio semi-sólido**, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro (2008).

NISHIOKA, T., **Recent developments in computational dynamic fracture mechanics**, *Dynamic Fracture Mechanics*, Editor: M. H. Aliabadi, Computational Mechanics Publications, p. 1-60, 1995.

OZAWA, E. & KIMURA, H. – **Excess Vacancies and the Nucleation of Precipitates in Aluminum-Silicon**, Acta Metallurgica, v.18. 1970, September. P.995-1004.

PERINI, Felipe Gustavo. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados**. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

SCHUITEK, Aloisio José. **Usinabilidade de ligas de alumínio tratáveis termicamente**. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 1997.

SHERCLIFF, H.R. & ASHBY, M.F. **A Process for Age Hardening of Aluminum Alloys**, Acta Metallurgica et Materialia. V.38, 1990, n° 10, p. 1789 – 1802.

SHOCKMETAIS – Indústria de Metais. **Manual Técnico**. Disponível em: <http://www.shockmetais.com.br/especificacoes/aluminio/pmec>. Acesso em: 21/03/2017.

SOARES, Maria Rosa Nunes. **Efeitos dos ciclos de envelhecimento no comportamento de ligas de alumínio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade de Aveiro, 2009.

SOUZA, Sérgio Augusto. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos – 5ª Edição**. São Paulo, Blucher. 1984.

TOKIMATSU, R.C. e Ferreira, i., Ensaio Charpy – **Limitações e Campo de Aplicação**, In: Anais 54º Congresso da ABM, São Paulo, 1999.

TOTTEN, G., MACKENZIE, S., **Handbook of Aluminum**, vol 1, pg. 887-895, USA (2003).

VAN HORN, K.R. – **Aluminum**, v.1, ASM, 1st printing, Metals Park, Ohio, 1967.

WEB SITE AFSA. **Propriedades e características de uma liga 6061**. Disponível em: <http://www.afsa.org.za/Portals/0/Documents/aluminium%20and%20its%20alloys/Intro-second-edition.pdf>. Acesso em 01/08/2016.

WEB SITE INFOMET. **Diagrama de fases dos materiais**. Disponível em: <http://www.infomet.com.br/site/diagrama-de-fases.php>. Acesso em 23/07/2016.