



PROJETO DE GRADUAÇÃO

ESTUDO SOBRE A CURVA S-N PARA ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À FADIGA DA LIGA DE ALUMÍNIO 7075-T651

Por
Victoria Venceslau Silva Costa

Brasília, 20 de Novembro de 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO SOBRE A CURVA S-N PARA ANÁLISE
DE RESISTÊNCIA À FADIGA DA LIGA DE
ALUMÍNIO 7075-T651**

POR

Victoria Venceslau Silva Costa

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. José Alexander Araújo, UnB/ ENM (Orientador) _____

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, UnB/ ENM _____

Prof. Fábio Comes de Castro, UnB/ ENM _____

Brasília, 20 de Novembro de 2019

Dedicatória

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, que tem me guiado. E à minha família, que tem me apoiado em toda essa jornada que vem chegando ao fim.

Victoria V. S. Costa

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus por mais esta benção em minha vida;

Agradeço à minha querida mãe, que sempre me incentivou a ser a melhor naquilo que me propunha a fazer;

Agradeço à minha estimada Dulcinéia Marques, que me deu os meios necessários para eu chegar onde estou hoje;

Agradeço à querida Cida, que me ajudou a me manter no caminho correto, estando sempre atenta às minhas necessidades;

Agradeço ao querido Bernardo, pela sua paciência e incentivo;

Agradeço aos amigos, que em muitos momentos me deram o apoio necessário para continuar,

Agradeço ao professor Alex pela oportunidade de aprender mais e mais ao realizar este trabalho.

Victoria V. S. Costa

RESUMO

O presente trabalho visa estudar o comportamento, sob carregamentos cíclicos, da liga de alumínio 7075-T651, que é uma liga submetida à solubilização, têmpera, envelhecimento artificial e tem suas tensões aliviadas por estiramento. Para caracterização do material, foram feitos a análise metalográfica, o ensaio de dureza e o ensaio de tração em amostras da liga. A partir da análise metalográfica da liga Al 7075-T651, observou-se que a morfologia dos grãos varia, conforme a direção analisada (T, S, L), sendo bastante alongados na direção longitudinal (L), ou seja, na direção de laminação da liga. O ensaio de dureza superficial realizado em amostras do material resultou em valores dentro do esperado para a liga estudada. A partir do ensaio de tração, foram obtidos os valores de tensão de escoamento, limite de resistência à tração e módulo de elasticidade do material, estes bastante acurados em relação aos valores tabelados para a liga de alumínio analisada. Por fim, o estudo do comportamento em fadiga da liga foi feito utilizando o método da tensão-vida, obtendo-se a curva S-N, a partir do ensaio de fadiga com carregamentos cíclicos completamente reversos, ou seja, $R = -1$; foram utilizados corpos de prova com seção circular para os ensaios de fadiga e foi observado um comportamento de vida infinita para a liga Al 7075-T651 em amplitudes de tensão menores que 200 MPa.

ABSTRACT

The present work aims to study the behavior, under cyclic loading, of the 7075-T651 aluminum alloy, which is solution heat treated, artificially aged and stress-relieved by stretching. For the characterization of the material, the metallographic analysis, the hardness test and the tensile test were performed on alloy samples. From the metallographic analysis of the Al 7075-T651 alloy, it was observed that the grain morphology varies, according to the analyzed direction (T, S, L), being quite elongated in the longitudinal direction (L), that is, in the direction of alloy lamination. From the hardness test, accurate values of Rockwell hardness were found for the alloy. From the tensile test, the yield strength, ultimate tensile strength and modulus of elasticity values of the material were very accurate. Finally, the study of alloy fatigue behavior was performed using the stress-life method, obtaining the S-N curve with $R = -1$; circular section specimens were used for fatigue tests and an infinite life was observed for Al 7075-T651 at stress amplitudes less than 200 MPa.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. O ALUMÍNIO	4
2.1.1 Ligas de Alumínio.....	4
2.2. FADIGA.....	10
2.2.1 Estágios da falha por fadiga	12
2.2.2 Carregamento cíclico.....	13
2.2.3 Tipos de abordagem de fadiga.....	15
2.2.4 Curva S-N.....	17
3. MATERIAL E CORPO DE PROVA	21
3.1 LIGA DE ALUMÍNIO 7075-T651	21
3.2 CORPO DE PROVA.....	21
3.2.1 Fabricação	22
4. METODOLOGIA	25
4.1 ANÁLISE METALOGRAFICA	25
4.2 ENSAIOS MECÂNICOS	26
4.2.1 Ensaio de Dureza	26
4.2.2 Ensaio de Tração.....	26
4.2.3 Ensaio de Fadiga.....	27
Estimativa da Curva S-N	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 MORFOLOGIA DOS GRÃOS.....	32
5.2 DUREZA ROCKWELL	34
5.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS MONOTÔNICAS	34
5.4 CURVA S-N LIGA DE ALUMÍNIO 7075-T651	36
6. CONCLUSÃO	41
6.1 TRABALHOS FUTUROS	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquemático dividindo as Ligas Trabalhadas em ligas tratáveis termicamente e não-tratáveis termicamente.	7
Figura 2.2 Diagramas de fases	10
Figura 2.3. Tratamento térmico T6	10
Figura 2.4. Representação dos três estágios da falha por fadiga.	12
Figura 2.5. Representações Esquemáticas das Superfícies de Fratura de Fadiga para Tração-Tração e Tração-Compressão em superfícies circulares e retangulares.	13
Figura 2.6. Carregamento Cíclico de Amplitude Constante (onde 'a' é um carregamento completamente reverso).....	14
Figura 2.7. Curva S-N para teste de fadiga por flexão rotativa para Liga de Alumínio sem entalhe.....	18
Figura 2.8. Curva S-N para teste de fadiga por flexão rotativa para Aço sem entalhe, com limite de fadiga definido.	20
Figura 3.1 Geometria do Corpo de Prova	22
Figura 3.2. Dimensões do Corpo de Prova.....	22
Figura 3.3. Bloco de Alumínio com 64 divisões.	23
Figura 3.4. Corpos de prova obtidos dos 64 blocos.....	23
Figura 3.5. Mapeamento dos Corpos de Prova.	23
Figura 3.6. Posição dos corpos de prova L1-C2.8 e L2-C1.4.	24
Figura 4.1. Pequenos Cubos de Alumínio Embutidos em Resina	25
Figura 4.2 Durômetro Zwick Roell ZHU 250.....	26
Figura 4.3. Corpo de Prova Para Ensaio de Tração	27
Figura 4.4. Máquina servo-hidráulica MTS 810	28
Figura 4.5. Curvas S-N generalizadas para aço para diferentes tipos de carregamentos	30
Figura 4.6. Curva S-N Estimada	31
Figura 5.1. Três faces de um cubo com imagens obtidas na metalografia para cada uma das direções (T, S, L).....	32
Figura 5.2. Micrografia da liga de Alumínio 7075-T651, na direção L, com aumento de 200x	33
Figura 5.3. Micrografia da liga de Alumínio 7075-T651, na direção S, com aumento de 200x	33
Figura 5.4. Micrografia da liga de Alumínio 7075-T651, na direção T, com aumento de 200x	34
Figura 5.5. Curva Tensão-Deformação Monotônica Para Liga Al 7075-T651	35
Figura 5.6. Curva Tensão-Deformação Monotônica Para Liga Al 7075-T651 com Dados do Extensômetro.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 5.7. Curva S-N liga de Alumínio 7075-T651 (log)	37
Figura 5.8. Comparação entre curvas S-N para a liga Al 7075-T651	38
Figura 5.9. Curva S-N relacionada à Fratura Observada dos Corpos de Prova	39
Figura 5.10. Imagens da Fratura dos CPs para Cada Nível de Amplitude de Tensão.....	40
Figura 5.11. Corpo de Prova com Fratura fora do Comprimento útil	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Designação das Ligas de Alumínio Trabalhadas.....	5
Tabela 2.2. Classificação das Têmperas ou Estado nas Ligas de Alumínio.....	8
Tabela 2.3. Designação de Tratamento Térmico para Liga de Alumínio 7075-T651.....	8
Tabela 3.1. Composição química da Liga de Alumínio 7075-T651 (%peso).....	21
Tabela 4.1. Relações de material e tipo de carregamento com o valor de tensão para 10^3 ciclos.	29
Tabela 4.2. Valores de tensão para 10^3 e 10^8 ciclos.....	30
Tabela 4.3. Valores recomendados de corpos de prova para ensaio de fadiga.....	31
Tabela 5.1. Dureza Rockwell Medida e Tabelada	34
Tabela 5.2. Propriedades Monotônicas da Liga de Alumínio 7075-T651	36
Tabela 5.3. Relação nome do CP, Tensão, Frequência e Ciclos até a Falha	37

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

N_f	Ciclos até a falha	
S_u	Limite máximo de resistência à tração	[MPa]
S_{1000}	Tensão para mil ciclos	[MPa]
S_e	Limite de fadiga	[MPa]
S_{be}	Limite de fadiga para flexão	[MPa]
S_{10^8}	Tensão para 10^8 ciclos	[MPa]
S_a	Tensão Nominal	[MPa]

Símbolos Gregos

Δ	Variação entre duas grandezas similares	
σ_{min}	Limite mínimo de tensão	[MPa]
σ_{max}	Limite máximo de tensão	[MPa]
σ_m	Tensão média	[MPa]
σ_q	Amplitude de tensão	[MPa]
σ_f, A	Coefficiente de resistência à fadiga	

Grupos Adimensionais

R	Razão de tensões
A	Razão de amplitude
b	Expoente de resistência à fadiga

Subscritos

min	mínimo
max	máximo
a	amplitude
e	fadiga
be	fadiga para flexão

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASM	American Society for Metals
S-N	Tensão-vida
PIB	Produto Interno Bruto
EUA	Estados Unidos da América
CFC	Cúbica de Face Centrada

1. INTRODUÇÃO

O Alumínio é considerado o metal mais abundante na Crosta Terrestre, sendo encontrado principalmente sob a forma de Bauxita. Apesar de sua utilização em escala industrial ser relativamente recente (150 anos), o óxido de alumínio (alumina) se mostra presente em cerâmicas produzidas pelos Persas e em cosméticos e produtos medicinais produzidos pelos egípcios e babilônios (Associação Brasileira do Alumínio).

Atualmente, o Alumínio é um metal de ampla utilização, sendo aplicado, principalmente, nas indústrias automotiva, aeronáutica e naval (Associação Brasileira do Alumínio). A liga de Alumínio 7075-T651, investigada no presente trabalho, é utilizada em partes estruturais de aeronaves (asas, trem de pouso, fuselagem) (Callister, 2009), como nos aviões de uso militar CP-140 Aurora e CC-130 Hercules (Chlistovsky, Heffernan, & DuQuesnay, 2007). Muitas são as características atrativas das Ligas de Alumínios, tais como a relação peso-resistência mecânica, resistência à corrosão, resistência à fadiga e tenacidade à fratura; além disso, devido à disponibilidade de técnicas e manufatura consolidadas, ao conhecimento dos custos de fabricação e à existência de métodos de projeto bem desenvolvidos, há muita credibilidade no uso das Ligas de Alumínio (Starke Jr & Staley, 1996). A utilização do Alumínio (e suas ligas) influencia, também, a economia do País: no ano de 2012, a indústria brasileira do alumínio registrou faturamento de 3.8 bilhões de reais, o que representou 3.9 por cento do PIB Industrial do País (Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços).

A partir da grande utilização e relevância das Ligas de Alumínio na Indústria, o estudo do comportamento desse material sob fadiga se mostra de suma importância, tanto no aspecto econômico, quanto no aspecto de saúde pública (poupar vidas). Para a *American Society for Testing and Materials*, a definição de fadiga é: “Processo progressivo e localizado de modificações estruturais permanentes ocorridas em um material submetido a condições que produzam tensões e deformações cíclicas que pode culminar em trincas ou fratura após certo número de ciclos.” (ASTM E1823-13, 2013).

O problema da fadiga dos materiais foi observado pela primeira vez em 1842, no que ficou conhecido como “A catástrofe ferroviária de Meudon”, quando um trem retornando de Paris sofreu um acidente devido à fratura por fadiga do eixo frontal da locomotiva, matando de 55 a 200 passageiros. No ano de 1945, em dois episódios distintos (10 de janeiro e 8 de abril), o primeiro avião comercial a jato fabricado no mundo, o Havilland Comet, despedaçou-se no ar devido a falhas por fadiga em sua fuselagem, decorrentes dos ciclos de pressurização e

despressurização da cabine. Recentemente, em 17 de abril de 2018, uma passageira foi sugada pela janela de um Boeing 737-700 da Southwest Airlines, quando uma das pás do motor se soltou e atingiu a janela onde ela estava; uma perícia preliminar indicou evidências de fadiga do metal no local onde houve a ruptura da pá (G1, 2018).

Além disso, quando se considera o aspecto econômico das falhas por fadiga, percebe-se há um custo financeiro significativo em relação à fadiga para a economia de um país. Nos Estados Unidos, estimou-se que o impacto econômico da fratura de componentes e estruturas, em sua maioria causada por fadiga, foi da ordem de 119 bilhões de dólares em 1982, quantia que equivale a, aproximadamente, 4% do PIB dos EUA no ano de referência (Reed & Smith, 1983).

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem o objetivo de investigar o comportamento em fadiga da liga de alumínio 7075-T651. Para tal, os espécimes desse material serão submetidos a ensaios de fadiga com carga axial e completamente reversos, a fim de se obter a curva S-N dessa liga. Assim, poder-se-á analisar como essa liga se comporta para determinados ciclos de carregamento.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho se encontra dividido em seis capítulos. No capítulo 2, denominado “Revisão Bibliográfica”, é feita uma revisão das características mecânicas principais do alumínio, assim como da designação de suas ligas e das têmperas empregadas para melhoria das características desse material; além disso, é feita uma revisão a respeito do conceito de fadiga, dos estágios da falha por fadiga, dos métodos para análise da fadiga dos materiais.

No capítulo 3, denominado “Material e Corpo de Prova”, há uma abordagem da composição química da liga de alumínio 7075-T651. Além disso, nesse capítulo, são abordadas as características do corpo de prova a ser utilizado para os ensaios de fadiga, explicando como esses espécimes serão extraídos do bloco original de alumínio adquirido e seu sistema de localização dentro desse bloco.

No capítulo 4, denominado “Metodologia”, é explicado como o ensaio para obtenção da curva S-N será feito, calculando a carga inicial a ser utilizada para tal e o número de corpos de prova necessários para se atingir o objetivo do presente trabalho.

Além de explicar como serão feitos os ensaios de dureza, de tração e a análise metalográfica da liga de Al 7076-T651.

No capítulo 5, “Resultados e discussão”, encontram-se os resultados dos ensaios realizados ao longo do presente trabalho. Assim, nesse capítulo há a micrografia da liga para cada uma das direções analisadas; as propriedades mecânicas monotônicas referentes ao material, a curva S-N obtida pelos ensaios de fadiga, além da medida de dureza da liga analisada.

Por fim, no capítulo 6, há a conclusão da investigação realizada ao longo do presente trabalho; além de sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O ALUMÍNIO

O Alumínio é o terceiro elemento mais abundante na Crosta Terrestre, ficando atrás apenas do Oxigênio e do Silício (Taylor, 1964). Esse elemento faz parte do grupo dos metais não-ferrosos e as suas principais características são: resistência à corrosão, inclusive em contato com o ar atmosférico; elevada condutividade térmica e elétrica; relação resistência-peso vantajosa em relação a outros metais, alta ductilidade; aspecto cinza prateado e fosco, devido à fina camada protetora de óxidos formada quando exposto ao ar. Além disso, o alumínio não é tóxico como metal, não é magnético e não cria faíscas quando em atrito, além de possuir cerca de um terço da rigidez do aço (Budynas & Nisbett, 2016).

Como o alumínio possui uma Estrutura Cristalina CFC (Cúbica de Face Centrada) sua ductilidade é mantida, inclusive, em temperaturas baixas. A maior limitação em relação ao seu uso se dá, então, por conta de sua temperatura de fusão de 660°C, de forma que ele não pode ser utilizado acima dessa temperatura.

Por outro lado, a resistência à tração do alumínio pode ser elevada consideravelmente por trabalho a frio e também por meio de ligas com outros materiais (Cobre; Magnésio; Silício; Manganês e Zinco); no entanto, ambos os processos diminuem a sua resistência à corrosão.

Devido ao fato de que o alumínio possui cerca de um terço da densidade do aço, ele se mostra uma escolha ótima no quesito economia de combustível em máquinas como automóveis e aviões; dessa forma, sua utilização diminui a emissão de gases causadores do efeito estufa, como o CO_2 . Somando isso ao fato de ele ser de fácil reciclagem, o alumínio é uma escolha bastante sustentável para um projeto de engenharia (Callister & Rethwish, 2009).

2.1.1 Ligas de Alumínio

As ligas de alumínio podem ser classificadas em ligas Trabalhadas e Ligas Fundidas. As ligas trabalhadas passam por processo de laminação, extrusão, forjamento, estiramento. Já as Ligas Fundidas são ligas binárias ou ligas ternárias ou com mais elementos, fabricadas por fundição em areia, fundição sob pressão, e fundição com

molde permanente. Como no presente trabalho será dado foco à Liga de Alumínio 7075-T651, que é considerada uma liga trabalhada, apenas as características específicas das Ligas Trabalhadas serão aqui abordadas.

2.1.1.1 Ligas de Alumínio Trabalhadas

A fim de manter um padrão para a designação das Ligas de Alumínio, em 1954, a *Aluminum Association* (Associação Norte Americana do Alumínio) criou regras para nomenclatura dessas ligas, tais que englobam tanto as Ligas Trabalhadas, quanto as Ligas Fundidas e podem ser encontradas nos documentos *Aluminum Standards and Data* e ANSI H35.1. Vendo a necessidade de um padrão pra comércio entre nações, outros países se utilizaram esses documentos como base para criação de suas próprias normas, como é o caso da EN 573 (European Aluminium, 2002) e da ABNT NBR ISO 209:2010.

No caso das Ligas de Alumínio Trabalhadas, a identificação se dá por meio de quatro dígitos, como é mostrado na Tab. (2.1).

Tabela 2.1. Designação das Ligas de Alumínio Trabalhadas.

Série	Elemento(s) de Liga Principal(is)	Outros Elementos de Liga
1xxx	99% mínima pureza Al	-
2xxx	Cu	Mg, Li
3xxx	Mn	Mg
4xxx	Si	-
5xxx	Mg	-
6xxx	Mg, Si	-
7xxx	Zn	Cu, Mg, Cr, Zr
8xxx	Sn, Li, Fe, Cu, Mg	-

O primeiro dígito da Liga de Alumínio se refere ao principal elemento (elemento majoritário) contido na liga e é comumente utilizado para descrever a Série da Liga, como Série 1000, Série 2000, etc.

Se o segundo dígito das ligas 1xxx for diferente de zero, então, há uma variante específica da liga normal (teor mínimo e máximo de determinado elemento, por exemplo). Nos outros casos (2xxx-8xxx), o segundo dígito indica uma modificação na liga.

O terceiro e quarto dígitos são números utilizados apenas para identificar a Liga dentro de uma série, ou seja, têm a função de diferenciar as várias ligas do grupo. A única exceção a essa regra acontece na Série 1xxx, onde os dois últimos dígitos (xxXX) indicam a porcentagem de pureza acima de 99% da liga; no caso da liga de alumínio 1350, por exemplo, há um mínimo de 99,50% de Alumínio (ASM Handbook Volume 2, 1990).

Além da designação feita considerando o principal elemento químico da liga, é importante, também, analisar a resposta da liga a tratamentos térmicos. Sabe-se que muitas ligas metálicas, de forma geral, respondem bem a tratamentos térmicos, mas isso não se aplica a todas as ligas de alumínio; por isso, criou-se uma subdivisão, em dois grupos, dentro das Ligas de Alumínio Trabalhadas: há um grupo de ligas que são tratáveis termicamente, possuindo ótimas propriedades mecânicas obtidas por tratamento térmico em solução; e um grupo de ligas trabalhadas não-tratáveis termicamente (ou ligas encruáveis), que não respondem a tratamento térmico, tendo suas propriedades mecânicas determinadas pelo grau de trabalho a frio/encruamento. O esquema contido na Fig. (2.1) mostra de forma clara como essa subdivisão acontece, especificando quais séries de ligas trabalhadas são termicamente tratáveis (2xxx; 6xxx; 7xxx e 8xxx) e quais não são termicamente tratáveis (1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx).

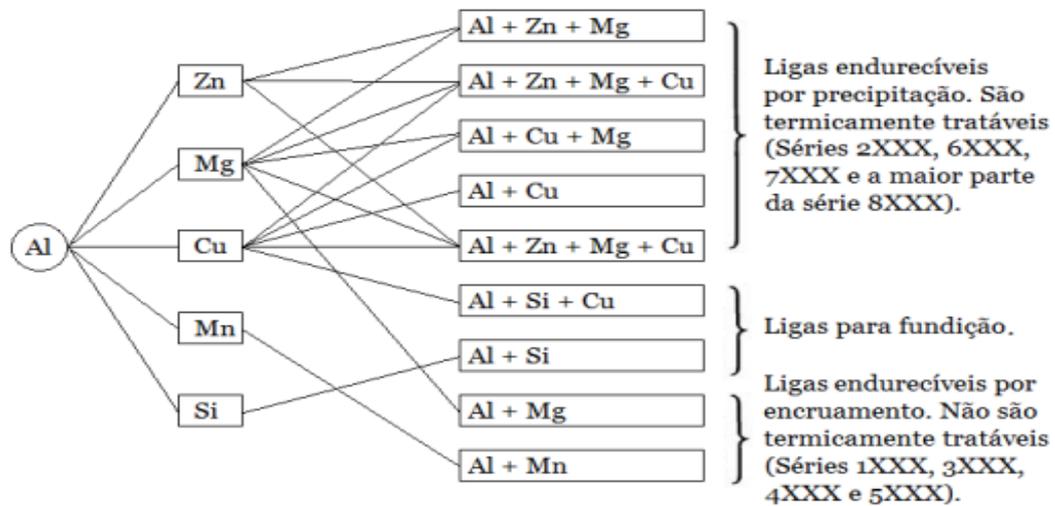


Figura 2.1 Esquemático dividindo as Ligas Trabalhadas em ligas tratáveis termicamente e não-tratáveis termicamente.

(Melado, M.C., estudo das tensões residuais e caracterização das propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas de liga de alumínio AA 5086)

Dessa forma, como as Ligas de Alumínio das séries 2000, 6000, 7000 e 8000 podem ser submetidas a tratamento térmico para melhorar suas propriedades mecânicas, então, escolhe-se uma têmpera para ser feita no material, dependendo da necessidade da aplicação. A têmpera (ou estado) corresponde a uma condição aplicada ao material (metal ou liga), por meio de deformação plástica a frio ou a quente, de tratamento térmico ou pela combinação de ambos, propiciando-lhe estrutura e propriedades mecânicas características (ABNT 6835, 2000).

As têmperas ou Estados no alumínio e suas ligas têm a capacidade de endurecer e aumentar a resistência a partir dos trabalhos a frio, mas quando se pode aplicar o tratamento térmico, adquire-se resistências maiores do que as obtidas no trabalho a frio (Associação Brasileira do Alumínio).

As têmperas ou Estados são classificadas conforme os processos a que se submete o metal ou liga. Essa classificação é dada pela ABNT 6835 e pode ser vista na Tab. (2.2).

Tabela 2.2. Classificação das Têmperas ou Estado nas Ligas de Alumínio

Letra	Significado	Descrição
F	Como fabricado	Aplica-se aos produtos resultantes de conformação mecânica (laminação, extrusão) em que não se emprega qualquer controle especial sobre as condições térmicas ou de encruamento. Não se especificam limites para as propriedades mecânicas.
O	Recozido	Aplica-se aos produtos inicialmente trabalhados e depois recozidos para obter a resistência mecânica mais baixa, e aos produtos fundidos que são recozidos com o objetivo de aumentar a ductilidade e a estabilidade dimensional.
H	Encruado	Aplica-se aos produtos em que se aumentou a resistência mecânica por deformação plástica a frio e que podem ou não ser submetidos a um recozimento complementar para produzir amolecimento parcial ou a um processo de estabilização. É utilizado para as ligas não tratáveis termicamente.
W	Solubilizado	Aplica-se somente às ligas que envelhecem naturalmente na temperatura ambiente após solubilização. É especificada somente quando o período de envelhecimento natural, após o resfriamento brusco, é indicado.
T	Termicamente tratado	Aplica-se aos produtos que sofrem tratamento térmico com ou sem deformação plástica complementar, produzindo propriedades físicas estáveis e diferentes de F, O ou H.

Tanto as têmperas (ou Estado) H (encruada), quanto as T (tratamento térmico) podem ser seguidas de 2 (ou mais dígitos) e 1 (ou mais dígitos), respectivamente. Esses dígitos servem para indicar de forma mais detalhada os processos pelos quais o metal ou liga passou. A liga de alumínio 7075-T651 possui a designação de tratamento térmico, T, seguido de três dígitos, esses dígitos possuem significados como mostrado na Tab. (2.3).

Tabela 2.3. Designação de Tratamento Térmico para Liga de Alumínio 7075-T651

Designação	Significado
T6	Solubilizado e depois envelhecido artificialmente.
T51	Alívio de tensões por estiramento, após tratamento térmico de solubilização.

ABNT 6835

Dessa forma, as ligas de alumínio com designação T651 passaram pelos tratamentos de solubilização, envelhecimento artificial e posterior alívio de tensões por estiramento (ABNT 6835, 2000)

2.1.1.2 Têmpera ou Estado T651

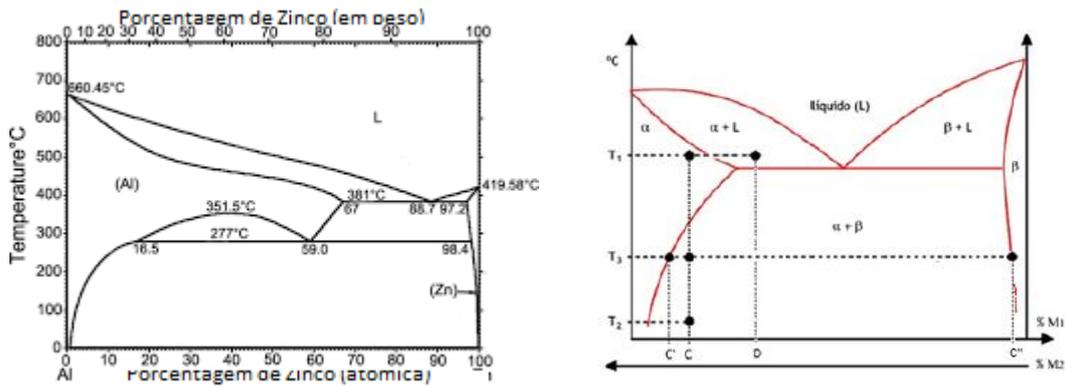
A solubilização é a primeira etapa do tratamento térmico T6 e tem o intuito de solubilizar a fase endurecedora e produzir uma solução sólida, mantendo a liga em uma condição metaestável. Assim, a solubilização consiste em aquecer a liga até uma temperatura dentro do campo monofásico e aguardar até que toda a fase β (Fig. (2.2b)) presente seja completamente dissolvida, ou seja, mantém-se uma temperatura elevada no metal até que a maior parte dos solutos se dissolva e se obtenha uma solução sólida homogênea (ou quase homogênea) (ASM International, 1991b).

A partir da Fig. (2.2b), tem-se a linha vertical que passa pelo ponto D, que é considerada como representação da liga em tratamento, onde são destacadas as temperaturas T2 e T3 (baixas temperaturas) e T1 (temperatura de solubilização e acima da linha solvus). Em T2 e T3, têm-se duas fases distintas, α e β . Na Fig. (2.2b), quando a temperatura é elevada até T1, a fase β não existe, então, ela estará totalmente dissolvida; além disso, a essa mesma temperatura, não se tem uma fase líquida, pois T1 está abaixo da linha sólida. Assim, o que se tem nesse ponto é uma solução sólida homogênea da liga (Hatch, 1984).

Além disso, não se deve aplicar temperaturas de solubilização muito altas na liga, já que pode haver a fundição das fases eutéticas de baixo ponto de fusão, resultando numa peça quebradiça após o resfriamento; por outro lado, temperaturas muito baixas também não devem ser aplicadas, pois podem resultar em propriedades mecânicas reduzidas após o envelhecimento.

A solubilização é seguida de um resfriamento rápido até a temperatura ambiente, para prevenir qualquer difusão ou formação da fase β (retida), o que é chamado de têmpera (tratamento térmico) na Fig. (2.3).

Após a têmpera (tratamento térmico), inicia-se o processo de envelhecimento, onde se aquece a liga até uma região intermediária, localizada dentro da região bifásica $\alpha+\beta$. O objetivo do envelhecimento é a precipitação controlada da fase endurecedora na matriz anteriormente solubilizada. Após um tempo de envelhecimento apropriado, a liga é resfriada até a temperatura ambiente.



(a) Diagrama de fases para liga de alumínio. (b) Diagrama de fase geral para ligas metálicas gerais.

Figura 2.2 Diagramas de fases

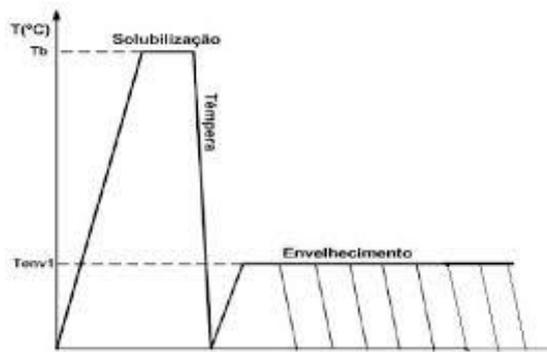


Figura 2.3. Tratamento térmico T6

O estiramento é um método de conformação mecânica bastante utilizado em ligas de alumínio, a fim de melhorar suas propriedades mecânicas (Ostermann & Reimann, 1970), podendo ser realizado a quente ou a frio, durante ou após o tratamento térmico de envelhecimento por precipitação. A partir do estiramento, espera-se que as ligas apresentem uma subestrutura de discordâncias e uma distribuição de precipitados mais homogêneos e, conseqüentemente, uma melhora na resistência em tração e em fadiga. Como a tenacidade à fratura varia inversamente com a resistência mecânica em tração, então, a tenacidade diminui com a aplicação do estiramento (Liaw & Landes, 1988).

2.2. FADIGA

Diferentemente das falhas estáticas, as falhas por fadiga são súbitas e totais, tornando extremamente difícil estimar quando algum componente de máquina falhará devido a esse fenômeno (Budynas & Nisbett, 2016). Assim, o estudo da fadiga dos

materiais se mostra de grande importância em diversas indústrias de engenharia. As aeronaves, por exemplo, estão sujeitas à falha por fadiga, devido a sua frequente decolagem/aterrissagem e pressurização/despressurização.

Para Dowling, a fadiga pode ser considerada um processo de dano e falha devido a carregamentos cíclicos. Assim, os carregamentos repetidos (cíclicos) em estruturas, como veículos e aeronaves, e o esforço cíclico resultante desse carregamento podem levar a danos físicos microscópicos na estrutura do material; esse fenômeno pode acontecer em amplitudes de tensões relativamente baixas em relação à Resistência Máxima à Tração do material. Esses carregamentos podem levar ao surgimento de trincas e danos macroscópicos no material, causando a falha de componentes, após certo número de ciclos. Assim, a fadiga é caracterizada pela geração e/ou propagação gradativa de trincas, até uma possível ruptura.

Além disso, a fadiga se mostra um fenômeno complexo, caracterizado pela redução gradual da capacidade de um comportamento estrutural de suportar cargas cíclicas (Dowling, 2013).

A primeira vez que a falha por fadiga foi observada ocorreu em meados de 1800, num episódio em que os eixos de um vagão ferroviário começaram a falhar, após um pequeno período em serviço. Apesar de esses eixos serem feitos de aço dúctil (material que se deforma sob tensão de tração), eles exibiam características de fraturas frágeis e repentinas. Rankine começou a estudar esse fenômeno e, em 1843, publicou um artigo denominado “As Causas da Ruptura Inesperada de Munhões de Eixos Ferroviários”, no qual dizia que o material havia “cristalizado” e se tornado frágil devido às tensões flutuantes. Os eixos haviam sido projetados de acordo com a engenharia disponíveis na época, que se baseava em experiências decorrentes de estudos com estruturas carregadas estaticamente; cargas dinâmicas se mostraram, então, um fenômeno novo, resultante da introdução das máquinas movidas a vapor. Esses eixos estavam fixos às rodas e giravam em conjunto com elas. Desse modo, a tensão de flexão em qualquer ponto da superfície do eixo variava ciclicamente entre valores positivos e negativos, o que é chamado de carregamento alternado.

Dando continuidade à investigação da chamada “falha por fadiga”, o engenheiro alemão August Wöhler realizou a primeira investigação científica sobre esse tipo de falha, testando, em laboratório, eixos até a falha sob carregamento alternando. Suas descobertas, publicadas em 1870, identificavam o número de ciclos de tensão variante no tempo como os causadores do colapso e a descoberta da existência de uma tensão

limite de resistência à fadiga para aços, ou seja, um nível de tensão que toleraria milhões de ciclos de uma tensão alternada.

O diagrama S-N (ou curva de Wöhler) tornou-se a forma-padrão para caracterizar o comportamento dos materiais submetidos a solicitações alternadas e ainda é utilizado atualmente, apesar de outras medidas sobre a resistência dos materiais submetidos a cargas dinâmicas estarem disponíveis (Norton, 2013).

2.2.1 Estágios da falha por fadiga

As falhas por fadiga podem ser caracterizadas pelo fato de sempre se iniciarem com uma pequena trinca. Todas as partes de uma estrutura possuem descontinuidades introduzidas nos seus processos de fabricação ou manufatura, estas que podem ser microscópicas ou macroscópicas; assim, a trinca que gera a falha por fadiga pode tanto estar presente no material devido à sua manufatura ou quanto se desenvolver ao longo do tempo por conta das deformações cíclicas ao redor das concentrações de tensões (Norton, 2013). Dessa forma, falha por fadiga surge de três estágios de desenvolvimento (Estágio I, Estágio II e Estágio III). Os estágios I, II e III são representados na Fig. (2.4) pelas letras A, B e C, respectivamente.

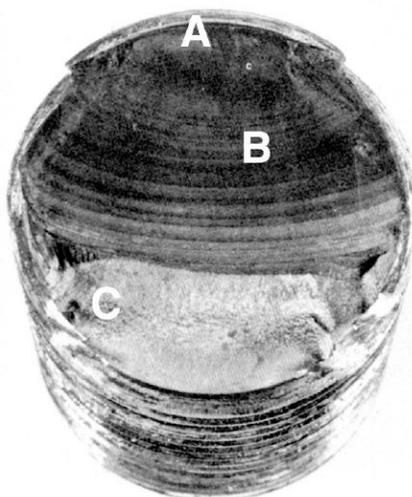


Figura 2.4. Representação dos três estágios da falha por fadiga.
(ASM HandBook, 1992)

O Estágio I da falha por fadiga se caracteriza pela iniciação de uma ou mais microtrincas, devido à deformação plástica cíclica seguida de propagação

crystallográfica. Geralmente, as trincas do Estágio I não são discerníveis a olho nu, ou seja, só podem ser vistas com o auxílio de microscópicos.

No Estágio II, ocorre a progressão de microtrincas a macrotrincas, formando superfícies de fratura como platôs paralelos, separados por sulcos paralelos. Essas superfícies podem ter bandas onduladas escuras e claras, conhecidas como marcas de praia ou marcas de concha de ostra, como mostra a região B da Fig. (2.4). Durante o carregamento cíclico, essas superfícies fissuradas abrem e fecham, encostando umas nas outras, e a aparência das marcas de praia dependem das mudanças no nível e na frequência do carregamento e da natureza corrosiva do meio.

O Estágio III ocorre no ciclo de tensão final, quando o material remanescente não consegue mais suportar as cargas, resultando em uma fratura frágil e repentina, que pode ser vista na região C da Fig. (2.4). Uma falha de Estágio III pode ser frágil, dúctil ou uma combinação de ambas, e sua aparência é como a “superfície de fratura” da Fig. (2.5). Frequentemente, as marcas de praia, se existentes, e possíveis padrões na fratura de Estágio III, chamadas linhas de insígnia (em V), apontam para as origens das trincas iniciais (Budynas & Nisbett, 2016).

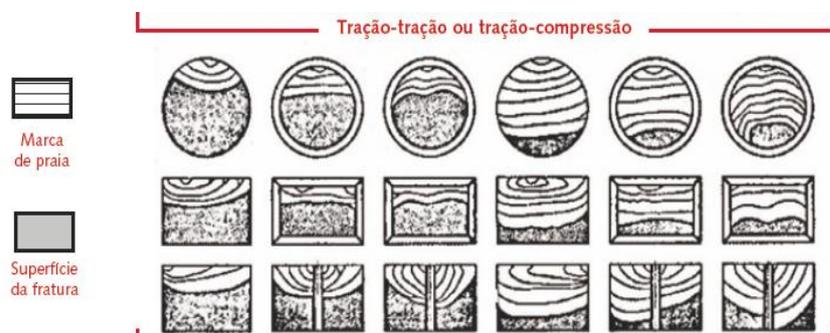


Figura 2.5. Representações Esquemáticas das Superfícies de Fratura de Fadiga para Tração-Tração e Tração-Compressão em superfícies circulares e retangulares. (Modificado de Metals HandBook, 1975)

2.2.2 Carregamento cíclico

O carregamento cíclico consiste em variar o carregamento entre os limites mínimo (σ_{min}) e máximo σ_{max} de tensão, ou seja, esses limites são mantidos constantes, enquanto o carregamento varia (sem ultrapassá-los), como em uma função senoidal. Esse carregamento é chamado de Carregamento de Amplitude Constante e pode ser visto nos casos da Fig. (2.6). O carregamento Cíclico está presente em algumas aplicações práticas e também em testes de fadiga em materiais.

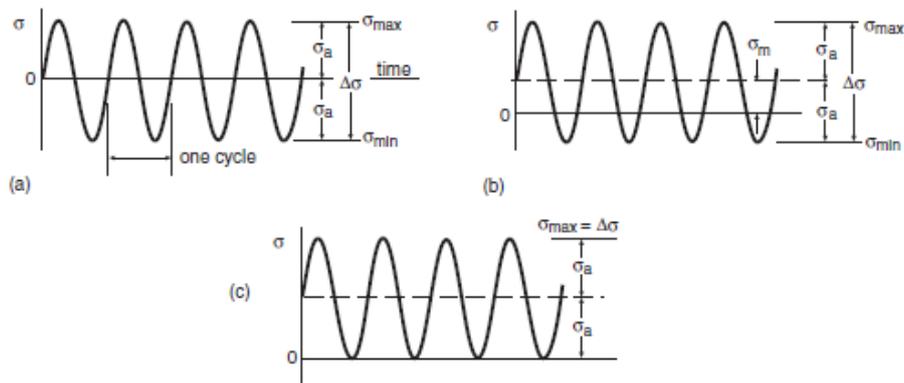


Figura 2.6. Carregamento Cíclico de Amplitude Constante (onde ‘a’ é um carregamento completamente reverso)
(Dowling, Norman E., Mechanical Behavior of Materials)

A faixa de tensão, dada pela Eq. (2.1),

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.1)$$

é a diferença entre os valores máximos e mínimos de tensões.

Além disso, ao tirar a média aritmética dos valores máximo e mínimo de tensão, tem-se a tensão média, σ_m , dada pela Eq. (2.2):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$

A tensão média pode ser igual a zero, como na Fig. (2.6a); ou diferente de zero, como na Fig. (2.6b).

A metade da faixa de tensão é chamada de amplitude de tensões, σ_a , que é a variação a respeito da média. Essa amplitude é dada pela Eq. (2.3).

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.3)$$

Somando-se as Eq.(2.1) e Eq. (2.2), obtém-se a Eq. (2.4):

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a \quad (2.4)$$

Subtraindo-se as Eq. (2.1) e Eq.(2.2), tem-se a Eq.(2.5):

$$\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a \quad (2.5)$$

Os sinais de σ_a e $\Delta\sigma$ são sempre positivos, pois $\sigma_{max} > \sigma_{min}$, onde as tensões são consideradas positivas. Já as quantidades σ_{max} , σ_{min} e σ_m podem ser tanto positivas, quanto negativas.

As razões R e A podem ser também utilizadas para especificar o carregamento e são dadas pelas Eq. (2.6) e Eq.(2.7), respectivamente.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.6)$$

Sendo “R” a razão de tensões.

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (2.7)$$

E “A” a razão de amplitude.

Carregamentos cíclicos com média nula podem ser especificados pela amplitude de tensões, σ_a , ou pelo valor máximo de tensão, σ_{max} , que é igual, numericamente, à amplitude de tensões. Se a tensão média não é zero, necessita-se de duas variáveis independentes para especificar o carregamento, como σ_a e σ_m , σ_{max} e R. O termo carregamento cíclico completamente reverso é usado para descrever uma situação em que $\sigma_m = 0$ ou R = -1, com na Fig. (2.6a). Por outro lado, um ciclo de mínimo nulo se refere ao caso em que $\sigma_{min} = 0$ e R= 0, como na Fig. (2.6c).

2.2.3 Tipos de abordagem de fadiga

Os três métodos principais para o projeto e análise de fadiga são os métodos tensão-vida, deformação-vida e o da mecânica da fratura linear elástica. Esses métodos tentam estimar a vida, em número de ciclos até a ocorrência de falha N, para um nível

especificado de carregamento. É importante definir os conceitos de fadiga de baixo ciclo, que ocorre para vida de até 10^3 ciclos, e fadiga de alto ciclo, que ocorre para vida maior que 10^3 ciclos (Budynas & Nisbett, 2016).

Método da Tensão – Vida

É o mais antigo dos modelos citados e ainda é o mais frequentemente utilizado nas aplicações que envolvem fadiga de alto ciclo. Essa abordagem proporciona melhores resultados quando as amplitudes das solicitações são conhecidas e consistentes ao longo da vida da peça. Trata-se de um modelo baseado na tensão, que busca determinar a resistência à fadiga e/ou limite de fadiga para o material, de modo que as tensões cíclicas possam ser mantidas abaixo deste nível e, com isso, evita-se a falha para o número de ciclos requerido.

É uma abordagem razoavelmente fácil de ser implementada e há a disponibilidade de uma elevada quantidade de dados relevantes de resistência, devido ao longo período de tempo de utilização desse modelo. Entretanto, este é o mais empírico e menos preciso dos três modelos, em termos da definição dos estados verdadeiros de tensão/deformação locais na peça, especialmente para situações de vida finita na fadiga de baixo ciclo (Norton, 2013).

Método da Deformação – Vida

Devido ao fato de a iniciação de uma trinca envolver escoamento, uma aproximação baseada na tensão é incapaz de modelar adequadamente esse estágio do processo de fadiga. Um modelo baseado na deformação fornece uma visão razoavelmente precisa do estágio de iniciação da trinca. Essa abordagem também pode esclarecer os danos cumulativos devido às variações na carga cíclica ao longo da vida da peça, como sobrecargas, que podem introduzir tensões residuais favoráveis ou desfavoráveis na região de falha. Combinações de cargas de fadiga e temperatura elevada são modeladas com maior segurança nesse caso, porque os efeitos de fluência podem ser incluídos na formulação matemática. Este método é aplicado com maior frequência em regimes de fadiga de baixo ciclo e em problemas de vida finita, nos quais as tensões cíclicas são elevadas o suficiente para causarem escoamento no local (Norton, 2013).

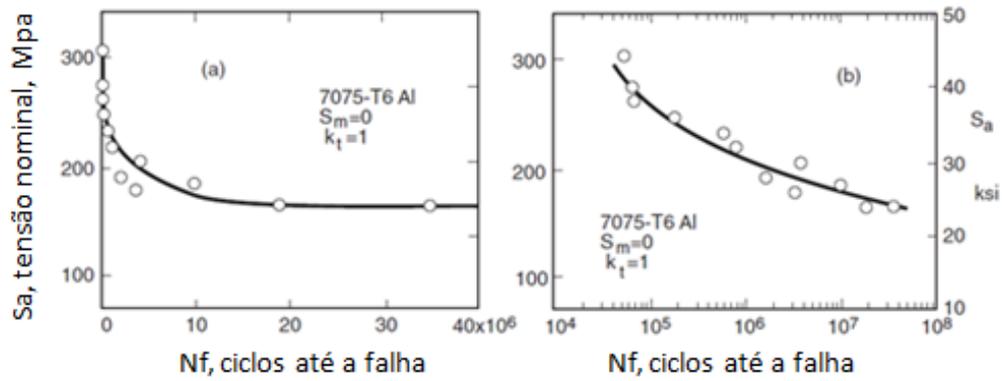
Método da mecânica da fratura linear elástica

A teoria da mecânica da fratura fornece o melhor modelo para o estágio de propagação da trinca do processo de fadiga. Este método, bastante utilizado para prever o tempo de vida restante em peças trincadas durante serviço, é aplicado em regimes de fadiga de baixo-ciclo e em problemas de vida finita nos quais as tensões cíclicas são conhecidas por serem elevadas o suficiente para causarem a formação de trincas. Esta abordagem é frequentemente utilizada em conjunto com ensaios não destrutivos (END) em programas periódicos de inspeção de serviço, especialmente na indústria aeronáutica/aeroespacial. A aplicação do método é razoavelmente direta, mas depende de precisão da expressão para o fator geométrico de intensidade de tensão e, também, na estimativa do tamanho da trinca inicial a requerida para o processamento computacional. Na ausência de uma trinca, uma aproximação consiste em assumir a existência de uma trinca, menor do que a mínima trinca detectável pelos instrumentos adequados, para o início dos cálculos (Norton, 2013).

2.2.4 Curva S-N

A curva S-N é uma curva experimental que caracteriza o método da Tensão-Vida, citado na Seção 2.3. Se o corpo de prova de um material ou um componente de uma máquina é submetido a um ciclo de tensões suficientemente alto, a trinca por fadiga ou outro dano se desenvolverá, levando à completa falha do componente. Se o teste é repetido a uma amplitude de tensão maior, o número de ciclos até a falha será ainda menor.

O resultado desses testes para valores diferentes de tensão podem ser plotados num gráfico para obter a curva de tensão-vida, conhecida como Curva S-N. A tensão nominal, S_a , é comumente plotada em função do número de ciclos até a falha, N_f , como mostrado na Fig. (2.7).



(a) Ciclos em escala linear

(b) Ciclos em escala logarítmica

Figura 2.7. Curva S-N para teste de fadiga por flexão rotativa para Liga de Alumínio sem entalhe.

(Modificado de Dowling, Norman E., Mechanical Behavior of Materials)

O número de ciclos até a falha se altera rapidamente com os valores de tensão e pode ter um grande intervalo de ordens de magnitude. Por isso, o número de ciclos é, normalmente, representado graficamente na escala logarítmica. A dificuldade ligada ao emprego da escala linear é ilustrada na Fig. (2.7a), onde os mesmos dados S-N são traçados tanto na escala linear (Fig. (2.7a)), quanto na logarítmica (Fig. (2.7b)). No caso da escala linear, os números de ciclos para as vidas mais curtas não podem ser lidos adequadamente. Além disso, é comum, também, a utilização da escala logarítmica para o eixo das ordenadas (eixo de tensão).

Se os dados da curva S-N tem uma distribuição que se aproxima de uma linha reta num gráfico log-linear, a Eq.(2.8) pode ser usada para o ajuste dos dados, obtendo, assim, uma representação matemática da curva.

$$\sigma_a = C + D \log N_f \quad (2.8)$$

Nessa equação, C e D são constantes do material obtidas pelo método de regressão. Para dados que se aproximam de uma linha reta num gráfico log-log, a Eq. (2.9) é utilizada.

$$\sigma_a = AN_f^B \quad (2.9)$$

A Equação (2.9) é, muitas vezes, utilizada na forma da Eq.(2.10):

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (2.10)$$

Onde as constantes de regressão para as duas formas se relacionam da forma vista na Eq.(11)

$$A = \sigma'_f 2^b, B = b \quad (2.11)$$

Em que σ'_f é o coeficiente de resistência à fadiga e b é o expoente de resistência à fadiga.

As constantes para as Eq. (2.9) e Eq. (2.10) são tabeladas para vários metais. Os dados tabelados foram obtidos a partir da regressão dos dados de testes uniaxiais com corpos de prova sem entalhe e testados sob carregamento completamente reverso ($\sigma_m = 0$).

Além disso, no caso de alguns materiais, como o aço-carbono comum e de baixa liga, parece haver um nível de tensão distinto abaixo do qual a falha por fadiga não ocorre em condições normais. Isso não se aplica aos casos da ligas de alumínio, como pode ser visto na Fig. (2.7). A existência do limite de fadiga pode ser vista na Fig. (2.8), onde a curva S-N parece tornar-se plana e se aproximar assintoticamente da amplitude de tensão designada, S_e . Tais limites inferiores de tensão são chamados limites de fadiga e podem ser estimados através de métodos como o método da escada e os métodos acelerados. Para corpos de prova sem entalhes e com um acabamento superficial liso, esses limites são indicados como σ_e e são muitas vezes considerados propriedades do material.

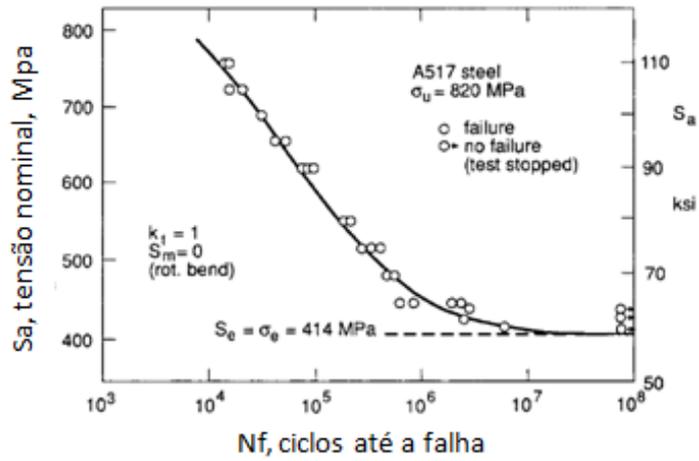


Figura 2.8. Curva S-N para teste de fadiga por flexão rotativa para Aço sem entalhe, com limite de fadiga definido.
(Modificado de Dowling, Norman E., Mechanical Behavior of Materials)

O termo resistência a fadiga é usado para especificar um valor de amplitude de tensão a partir de uma curva S-N para uma vida de particular interesse. Assim, a resistência à fadiga em 10^3 ciclos é simplesmente a amplitude de tensão correspondente à $N_f = 10^3$ (Dowling, 2013).

3. MATERIAL E CORPO DE PROVA

3.1 LIGA DE ALUMÍNIO 7075-T651

A liga de alumínio 7075, na condição T651, é o material investigado neste trabalho. A liga 7075 foi originalmente desenvolvida pela empresa japonesa Sunimoto Metal, antes de 1940, para ser utilizada na fuselagem do caça Mitsybishu A6M2 Reisen “zero” (STARKE JR e HORNBOGEN, 2008), mas só teve sua introdução real na indústria pela ALCOA em 1943 (ALCOA, 2012). Sua principal aplicação ainda é na indústria aeronáutica, devido a sua alta resistência mecânica com pouca massa (quando comparada ao aço). A composição química da Liga de Alumínio 7075-T651 está contida na Tab. (3.1).

Tabela 3.1. Composição química da Liga de Alumínio 7075-T651 (%peso)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	Outros
0,4	0,5	1,2-2,0	0,3	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	0,2	87,17-99,00	0,05-0,15

ASM International

Como já visto na Seção 2.1, a obtenção da Liga de Alumínio 7075-T651 se dá pelos processos de solubilização, envelhecimento artificial e alívio de tensões por estiramento. O tratamento térmico empregado nessa liga especificamente consiste em aquecê-la até a temperatura de 480°C, resfriá-la e depois reaquecê-la a temperatura de 120°C, a fim de envelhecê-la artificialmente, como ilustrado na Fig. (2.3). Por fim, tem-se o alívio de tensões por estiramento. (ASM Aerospace specification metals INC 2001).

3.2 CORPO DE PROVA

O corpo de prova utilizado no ensaio de fadiga tem seção circular e possui a geometria e as dimensões mostradas na Fig. (3.1) e na Fig. (3.2), respectivamente.

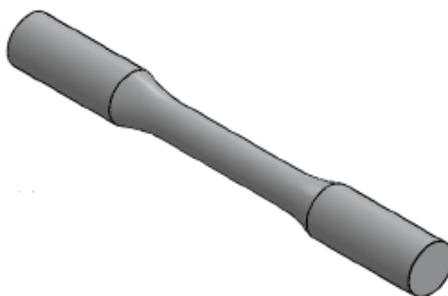


Figura 3.1 Geometria do Corpo de Prova

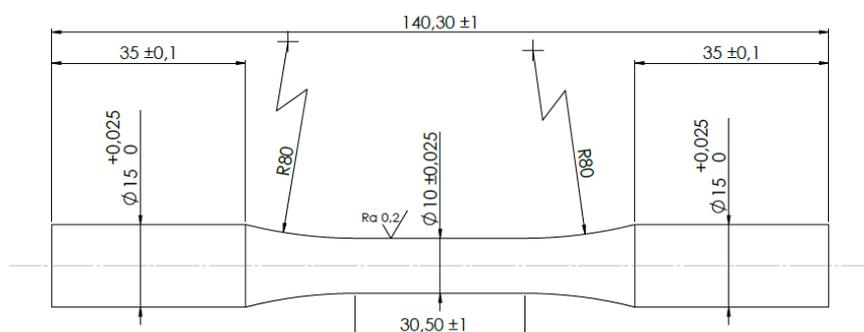


Figura 3.2. Dimensões do Corpo de Prova.

As dimensões do corpo de prova estão de acordo com a Seção 5.2.1.1 da norma ASTM E466-15.

3.2.1 Fabricação

A fabricação dos corpos de prova se dará a partir do fracionamento de um bloco de alumínio de dimensões 300 mm x 63.5 mm x 360 mm em 64 blocos menores, com dimensões 20 mm x 145 mm x 20 mm, como mostrado na Fig. (3.3).

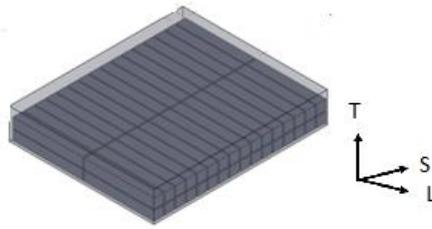


Figura 3.3. Bloco de Alumínio com 64 divisões.

Destes, serão fabricados os corpos de prova para o ensaio de fadiga, como mostrado na Fig. (3.4).



Figura 3.4. Corpos de prova obtidos dos 64 blocos.

Além disso, é importante garantir que os blocos e os corpos de prova sejam usinados no sentido LT (Fig. (3.3)), ou seja, no sentido de laminação da liga.

Deve-se garantir, também, a identificação da posição do CP no bloco original. Com esse intuito, as camadas serão numeradas, C1 e C2, e um segundo número identificará a posição do CP na camada correspondente, como mostra as Fig. (3.5) e Fig. (3.6).

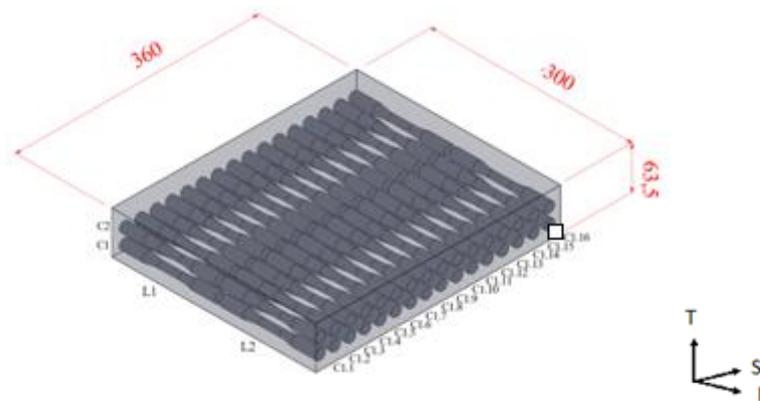


Figura 3.5. Mapeamento dos Corpos de Prova.

Um exemplo desse mapeamento para um corpo de prova pode ser visto na Fig. (3.6), onde se tem a posição dos corpos de prova L1-C2.8 e L2-C1.4.

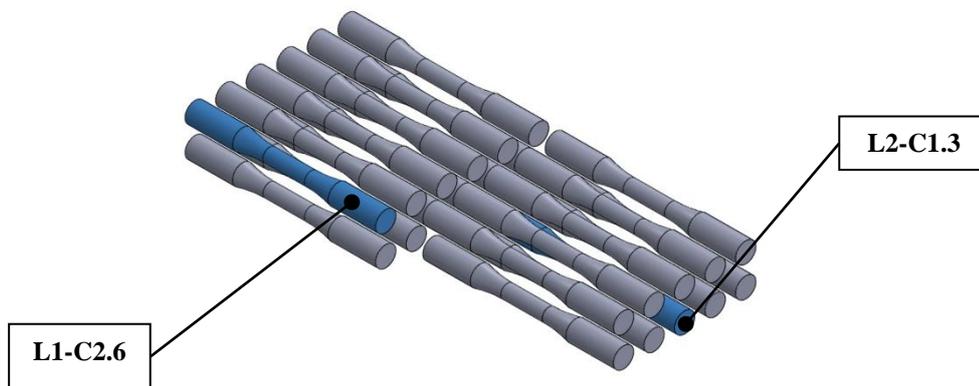


Figura 3.6. Posição dos corpos de prova L1-C2.8 e L2-C1.4.

4. METODOLOGIA

4.1 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Para a realização da análise metalográfica da liga de alumínio 7075-T651, foram retirados pequenos cubos de um dos blocos de alumínio (Al 7075-T651) adquiridos (Fig. (3.3)).

Em seguida, embutiu-se a frio as amostras (cubos) em resina transparente, deixando expostas as faces a serem analisadas, estas perpendiculares às direções L, S e T, como mostra a Fig. (4.1).



Figura 4.1. Pequenos Cubos de Alumínio Embutidos em Resina

Além disso, a superfície das amostras foi preparada se utilizando a politriz manual modelo Polipan-U, da marca Pantec. O processo de preparação da superfície consiste em duas etapas: lixamento e polimento. As amostras foram lixadas utilizando as lixas d'água de Carbetto de Silício com granulometrias 220, 320, 400, 600, 800, 1200 e 2000. E, em seguida, foram polidas com pasta de diamante ($3\mu\text{m}$).

Após o lixamento e polimento das amostras, foi possível a realização do ataque químico em suas superfícies, obedecendo à norma ASTM E407-07. O reagente utilizado para tal foi o Keller ($2\text{ mL HF} + 3\text{ mL HCl} + 5\text{ mL HNO}_3 + 190\text{ mL H}_2\text{O}$). O ataque químico teve duração entre 10 e 20 segundos para cada amostra.

Por fim, foi feita a aquisição das imagens da microestrutura de cada amostra por meio de um microscópio confocal a laser Olympus, modelo OLS4100, com o auxílio do aplicativo Olympus Stream.

4.2 ENSAIOS MECÂNICOS

4.2.1 Ensaio de Dureza

A dureza é uma propriedade bastante utilizada na especificação de materiais. Dessa forma, com o intuito de medir a dureza da liga de alumínio 7075-T651, foi feito um ensaio de dureza por penetração numa pequena amostra desse material, utilizando o durômetro Zwick Roell ZHU 250 (Fig. (4.2)).



Figura 4.2. Durômetro Zwick Roell ZHU 250

O ensaio de dureza por penetração (Rockwell, Vickers, Brinell) consiste em aplicar uma carga na superfície do material, com a ponta de penetração (indentador), deixando uma impressão/marca na amostra, cujo formato vai depender do indentador utilizado. A dureza medida foi a Dureza Rockwell, e o ensaio foi feito em conformidade com a norma ASTM E18-19. Sendo assim, como o material estudado é uma liga de alumínio, utilizou-se para o ensaio a escala B da Dureza Rockwell, um indentador esférico com ponta de diamante de 1/16 in (1.588 mm) para deixar a impressão na peça e, além disso, foi aplicada uma carga de 100 kgf na amostra. Cada amostra teve sua dureza medida cinco vezes.

4.2.2 Ensaio de Tração

A fim de se obter as propriedades mecânicas monotônicas da liga de Alumínio 7075-T651, foram realizados três ensaios de tração. Para isso, foi utilizada a máquina servo hidráulica MTS 810 (Fig. (4.4)). Os corpos de prova ensaiados foram fabricados de acordo com a norma ASTM E8/E8M-16, e usinados no sentido de laminação da liga; sua geometria e dimensões, em milímetros, podem ser vistos na Fig. (4.3).

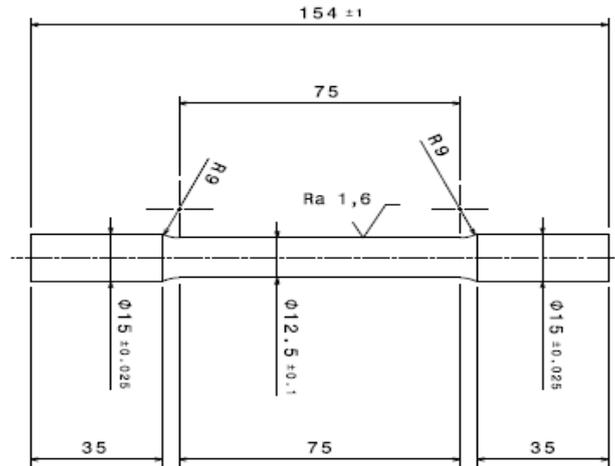


Figura 4.3. Corpo de Prova Para Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram conduzidos, inicialmente, com controle de deformação, utilizando um extensômetro do tipo *clip gage*; e, depois, com controle de deslocamento, feito pela própria MTS. Assim, levando em consideração que o uso do *clip gage* durante todo o ensaio poderia danificá-lo, ele foi empregado apenas até uma deformação de 1% do corpo de prova, ou seja, até que se observasse o início do escoamento do material. Retirado o extensômetro, o ensaio continuou até o rompimento do corpo de prova.

4.2.3 Ensaio de Fadiga

A fim de obter a curva S-N da liga de alumínio 7075-T651, serão realizados ensaios mecânicos de fadiga, utilizando para tal fim a máquina servo-hidráulica axial-torcional MTS 810, mostrada na Fig. (4.4). A MTS 810 tem a capacidade de ± 100 kN na direção axial.



Figura 4.4. Máquina servo-hidráulica MTS 810

Os comandos necessários para que o ensaio ocorra são enviados à máquina por meio da utilização do Multitasking, desenvolvido pela MTS. Assim, utiliza-se o software para controle dos experimentos, de forma que se faz possível definir a frequência do carregamento, a deformação máxima aceita no experimento, assim como a detecção dos limites de segurança. Dessa forma, o software disponibiliza a opção de customização da configuração de controle do ensaio, a aquisição de dados e o *input* dos critérios de parada.

Estimativa da Curva S-N

A curva S-N de um material pode ser obtida experimentalmente a partir do ensaio de fadiga. Porém, uma estimativa dessa curva pode ser obtida a partir do limite último do material a ser estudado, esse limite pode ser obtido a partir da literatura ou experimentalmente.

Com o valor do limite último de resistência à tração, faz-se possível a determinação da tensão para os valores de ciclo de 10^3 e da tensão para o número de ciclos correspondente ao limite de fadiga, que corresponde a 10^6 ciclos, no caso de aços, por exemplo. Esses valores de resistência podem ser modificados posteriormente ao se considerar outros fatores como carregamento, acabamento superficial.

Segundo Lee et al, empiricamente, o valor da tensão para 10^3 ciclos, S_{1000} , é observado como sendo de, aproximadamente, 90% do limite último de resistência à tração do material no caso de flexão; enquanto que, no caso de carregamento axial, o valor de S_{1000} corresponde a 75% do limite de resistência à tração, S_u . Essas relações são mostradas na Tab. (4.1).

Tabela 4.1. Relações de material e tipo de carregamento com o valor de tensão para 10^3 ciclos.

Tipo de Material	Tipo de Carregamento	S_{1000}
Ferrosos e não-ferrosos	Flexão	$0,9 S_u$
Ferrosos e não-ferrosos	Axial	$0,75 S_u$

Além disso, como dito anteriormente, o limite de fadiga pode ser determinado utilizando o valor do limite de resistência à tração do material. Assim, considerando o carregamento axial, a equação para o limite de fadiga é dado pela Eq. (4.1), mostrada na Fig. (4.5).

$$S_e = 0,90 \times S_{be} \quad (4.1)$$

Onde S_{be} é o limite de fadiga para flexão.

Assim, para o caso de aços e outros metais ferrosos, o limite de fadiga, S_e , pode ser estimado pela modificação do limite de fadiga para flexão, S_{be} . Porém, como o presente trabalho estuda o comportamento de uma liga de alumínio, um metal não-ferroso, considerar-se-á que a Eq. (4.2) se refere à tensão para 10^8 ciclos, pois, segundo Lee a relação mostrada na Eq. (4.3) é válida para ligas de alumínio submetidas a 5×10^8 ciclos.

$$S_{10^8} = 0,90 \times S_{be} \quad (4.2)$$

E o limite de fadiga para flexão será dado pela Eq. (4.3).

$$S_{be} = 130 \text{ MPa}, \text{ para } S_u \geq 336 \text{ MPa} \quad (4.3)$$

$$S_{be} = 0,4 S_u, \text{ para } S_u < 336 \text{ MPa}$$

Como no caso da liga 7075-T651 S_u maior que 336MPa, tem-se que S_{be} será 130 MPa.

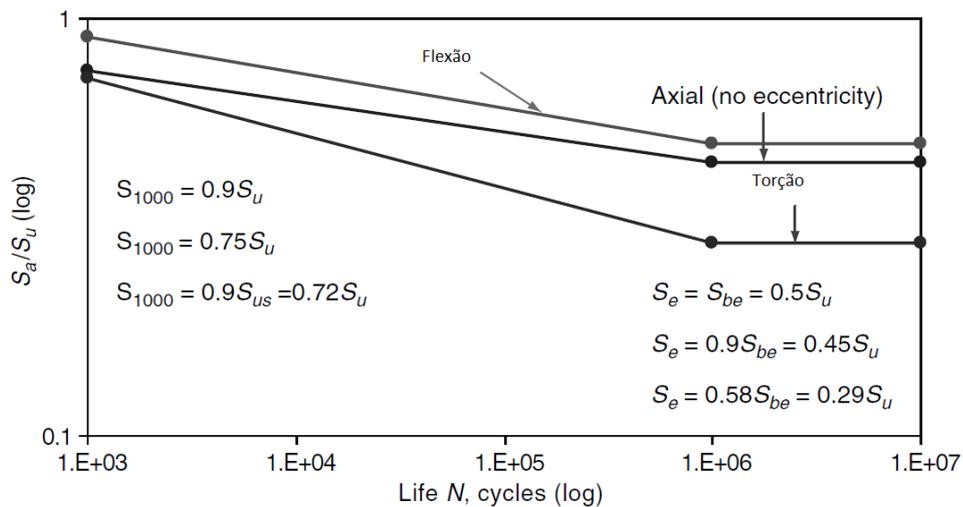


Figura 4.5. Curvas S-N generalizadas para aço para diferentes tipos de carregamentos (Lin, Lee, & Lu, 2001).

Assim, os valores de tensão para 10^3 e 10^8 ciclos são os mostrados na Tab. (4.2).

Tabela 4.2. Valores de tensão para 10^3 e 10^8 ciclos.

S_{1000} (MPa)	S_{10^8} (MPa)
429	130

Tais valores de tensão estão próximos aos encontrados na Fig. (2.7) para a curva S-N da liga 7075-T6, extrapolando-se o gráfico para os números de ciclos em questão.

Utilizando os valores contidos na Tab. (4.2), fez-se uma curva S-N estimada da liga estudada (Fig. (4.6))

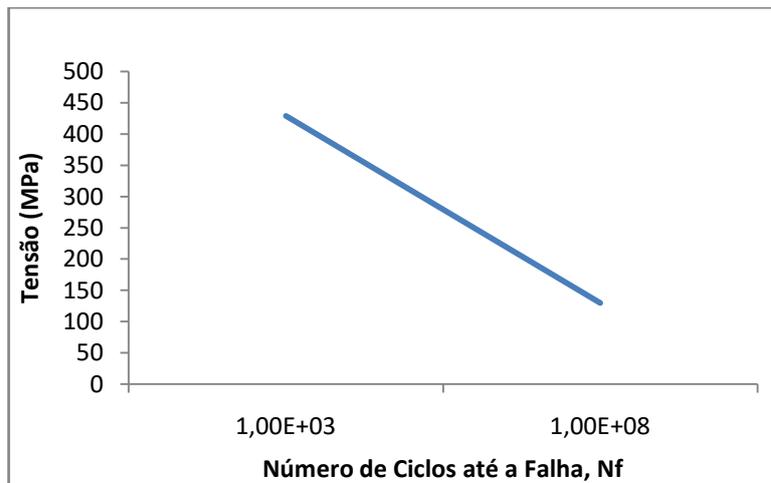


Figura 4.6. Curva S-N Estimada

Dessa forma, considerando-se os requisitos da norma ASTM E466-15 para o ensaio de fadiga e as estimativas contidas na Tab. (4.2), é possível a obtenção de uma carga inicial para o ensaio de fadiga.

Além disso, decidiu-se a quantidade de corpos de prova a serem utilizados no ensaio de fadiga. A norma ASTM E739 sugere as quantidades de corpos de prova utilizados a partir da finalidade da curva a ser gerada pelo ensaio; assim, a Tab. (4.3) mostra essas finalidades e suas respectivas quantidades de corpos de prova.

Tabela 4.3. Valores recomendados de corpos de prova para ensaio de fadiga.

Tipo de Ensaio	Quantidade mínima de corpos de prova
Preliminar	6 a 12
Pesquisa e desenvolvimento de componentes e corpos de prova	6 a 12
Dados utilizáveis em projeto	12 a 24
Dados com confiabilidade estatística	12 a 24

ASTM E739

Tem-se, então, que devem ser utilizados de 6 a 12 corpos de prova para a obtenção da Curva S-N no presente trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MORFOLOGIA DOS GRÃOS

Como visto na seção 4.1, amostras foram retiradas próximas à superfície de um bloco de alumínio (Al 7075-T651) laminado, perpendiculares às direções T, S e L; e passaram pelo processo de preparação metalográfica, ou seja, foram lixadas, polidas e atacadas quimicamente. As Fig. (5.2) a (5.4) mostram as morfologias de grãos do Al 7075-T651 que puderam ser vistas após esse processo.

A fim de visualizar de forma clara como a morfologia dos grãos varia com a direção analisada, as imagens obtidas com microscópio para cada uma das direções foram colocadas em três faces de um cubo (Fig. (5.1)). Assim, pode se observar como os grãos estão dispostos na liga de alumínio analisada.

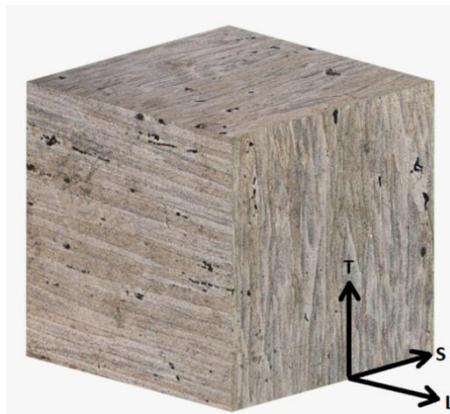


Figura 5.1. Três faces de um cubo com imagens obtidas na metalografia para cada uma das direções (T, S, L)

Na Fig. (5.2), tem-se a micrografia no sentido de laminação da liga, onde se pode observar grãos longitudinalmente alongados, decorrentes do processo de laminação ao qual o bloco de alumínio foi submetido.

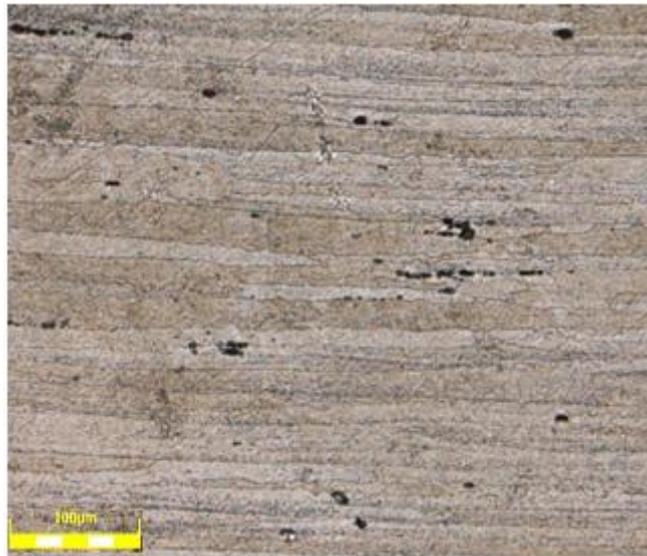


Figura 5.2. Micrografia da liga de Alumínio 7075-T651, na direção L, com aumento de 200x

Nas Fig. (5.3) e (5.4), os grãos não são tão alongados e há a presença de grãos menores, obtidos a partir dos tratamentos aos quais o material foi submetido.



Figura 5.3. Micrografia da liga de Alumínio 7075-T651, na direção S, com aumento de 200x

Como foi feito o estiramento na liga, há uma distribuição de precipitados mais homogênea. De acordo com Zhao & Jiang (2008), esses precipitados (pontos pretos) são partículas de $Cr_2Mg_3Al_{18}$ e $(Fe, Mn) Al_6$.



Figura 5.4. Micrografia da liga de Alumínio 7075-T651, na direção T, com aumento de 200x

5.2 DUREZA ROCKWELL

O ensaio de dureza foi realizado em duas amostras da liga de alumínio. Cada amostra teve sua dureza medida cinco vezes, em pontos aleatórios sobre a superfície do plano L-T. Pelo ensaio, percebeu-se pouca variação dos valores encontrados para dureza nesses pontos. Calculando-se a média desses valores, tem-se que a dureza da liga de alumínio estudada é de 88.7 HRB. A Tab. (5.1) mostra a comparação entre o valor encontrado e o valor tabelado (ASM 1990) para a Dureza Rockwell da liga de Alumínio 7075 T-651.

Tabela 5.1. Dureza Rockwell Medida e Tabelada

Dureza Rockwell	Medida	ASM (1990)
	88.7 HRB	87 HRB

Esse valor é apenas 1% maior que o valor de 87 HRB (ASM 1990), então, obteve-se um resultado acurado no ensaio de dureza. Esse valor pode, ainda, ser convertido para escalas de outros tipos de dureza, como Brinell ou Vickers, para fins de comparação com outros materiais.

5.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS MONOTÔNICAS

No ensaio de tração, aplica-se uma força no material, de forma que ele é tracionado e se deforma até fraturar.

O ensaio de tração foi realizado três vezes, com corpos de prova próprios para tal (Fig. (4.3)). Na primeira etapa do ensaio, ele foi realizado em controle de deformação, utilizando um *clip gage* até uma deformação de, aproximadamente, 1%.

No gráfico da Fig. (5.5), constam tanto os dados de controle de deformação (na série “Controle de Deformação”), quanto os de controle de deslocamento (na série “Controle de Deslocamento”). Para que os dados de deslocamento pudessem ser usados no gráfico, eles foram convertidos em deformação, a partir do comprimento inicial e da deformação sofrida pelo corpo de prova. Observando-se o gráfico, percebe-se que os valores das duas séries, até uma deformação de 0,01, são muito próximos, de forma que a curva obtida pela conversão do deslocamento em deformação pode ser usada para descobrir algumas propriedades mecânicas monotônicas da liga de Alumínio 7075-T651.

No caso em que não se observa de forma nítida o fenômeno de escoamento, a tensão de escoamento é aquela necessária para promover uma deformação permanente de 0,2% (0,002) no corpo de prova. Assim, a partir dos dados obtidos e dos gráficos gerados, tem-se que a tensão de escoamento do material estudado é de 523 MPa.

Além disso, pode-se descobrir, também, o limite de resistência à tração a partir do gráfico da Fig. (5.5). Esse limite corresponde ao ponto máximo da curva Tensão-Deformação, sendo a máxima tensão que uma estrutura sob tração suporta. Então, pelos dados e curvas encontrados, o limite de resistência à tração, S_u , é de 570 MPa.

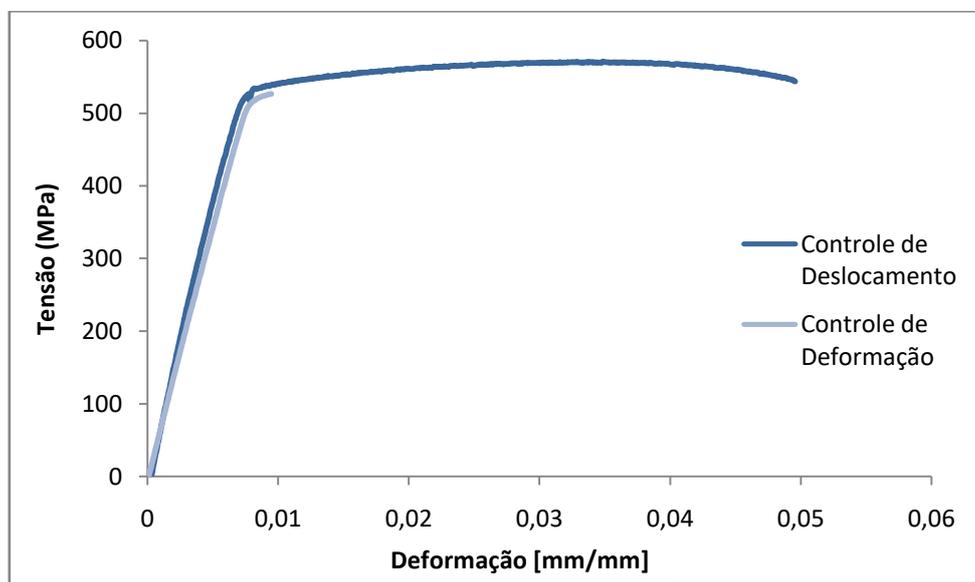


Figura 5.5. Curva Tensão-Deformação Monotônica Para Liga Al 7075-T651

Ainda pelo gráfico da Fig. (5.5), e analisando os dados do extensômetro, consegue-se obter outra propriedade mecânica monotônica importante, o Módulo de Elasticidade do

material. Assim, pela angulação da linha de Tensão-Deformação em regime elástico, obteve-se o Módulo de Elasticidade dessa liga, que é de 68,3 GPa.

As propriedades mecânicas monotônicas obtidas a partir do ensaio de tração estão na Tab. (5.2). Para fins de comparação, também foram colocados os dados da ASM na Tab. (5.2). Dessa forma, percebe-se que os valores encontrados no ensaio estão coerentes com a literatura.

Tabela 5.2. Propriedades Monotônicas da Liga de Alumínio 7075-T651

Propriedade Mecânica Monotônica	Presente Relatório	ASM (1990)
Módulo de Elasticidade, E (GPa)	68,2	71,7
Tensão de Escoamento, $\sigma_{y0,2\%}$ (MPa)	523	503
Limite de resistência à tração, Su (MPa)	570	572

5.4 CURVA S-N LIGA DE ALUMÍNIO 7075-T651

Com o intuito de se obter a curva S-N da liga de Alumínio 7075-T651, para posterior análise de seu comportamento em fadiga, foram feitos ensaios de fadiga em corpos de prova com geometria e dimensões vistos na Fig. (3.1). O carregamento utilizado nos ensaios foi o cíclico completamente reverso, ou seja, com $R = -1$ (sendo R a razão de tensões).

Foram utilizados, no total, 12 corpos de prova para a obtenção da Curva S-N da liga estudada. A relação de Corpo de Prova (nome), Tensão, Frequência e Número de Ciclos pode ser visto na Tab. (5.3).

Tabela 5.3. Relação nome do CP, Tensão, Frequência e Ciclos até a Falha

Nome CP	Tensão (MPa)	Frequência (Hz)	Nf, Ciclos até a Falha
C1.11-L2	460	0,5	1485
C3.6-L4	460	0,5	4613
C3.17-L1	460	0,5	5768
C2.14-L2	280	7,5	229502
C2.2-L2	280	7,5	232139
C1.4-L2	280	7,5	458310
C2.12-L2	230	7,0	947223
C2.13-L1	230	7,0	$10^6 >$
C2.9-L2	230	7,0	$10^6 >$
C2.18-L2	204	8,0	904680
C1.13-L1	204	8,0	$10^6 >$
C2.2-L1	204	8,0	$10^6 >$

Com os dados de Tensão e Ciclos até a Falha, contidos na Tab. (5.3), foi possível construir a Curva S-N, utilizando um gráfico mono-log, como pode ser visto na Fig. (5.6).

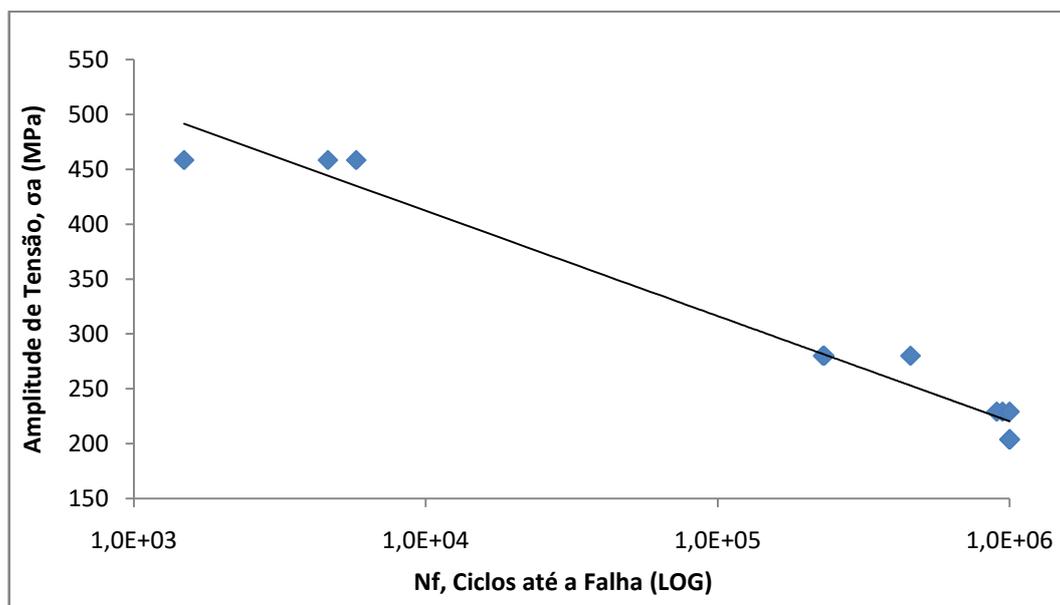


Figura 5.6. Curva S-N liga de Alumínio 7075-T651 (log)

Como esperado, a curva obtida tem a forma característica de curvas S-N de metais não-ferrosos, não possuindo, então, um limite de fadiga (como é o caso dos aços).

Em Zhao & Jiang (2008), a curva S-N obtida para a liga de alumínio 7075-T651 é a mostrada em vermelho na Fig. (5.7). Comparando-se a curva obtida no presente trabalho (azul) com a curva S-N em vermelho, percebe-se que elas têm um formato semelhante para fadiga de alto ciclo ($N_f > 10^3$), e se interceptam nos pontos de menor amplitude de tensão, ou seja, em valores de, aproximadamente, 200 MPa. Porém, a curva obtida está deslocada para cima, em relação ao eixo das ordenadas (Ciclos até a

Na Fig. (5.8), tem-se as imagens da fratura de corpos de prova para cada nível de amplitude de tensão ensaiado. Assim, é possível observar as diferenças na fratura, de acordo com o carregamento aplicado. A legenda para cada caso de amplitude de tensão está ao lado direito de cada imagem da Fig. (5.8).

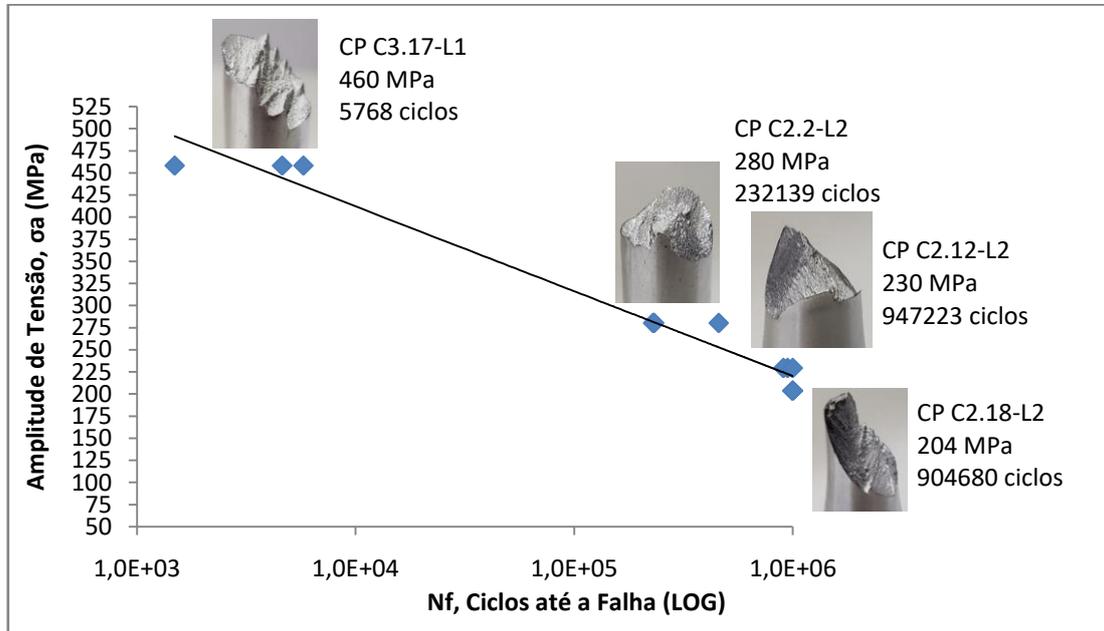


Figura 5.8. Curva S-N relacionada à Fratura Observada dos Corpos de Prova

As imagens ampliadas da Fig. (5.8) estão na Fig. (5.9). Vê-se que para cada amplitude de tensão, tem-se uma fratura com característica diferente da outra. As fraturas em ‘a’ e ‘d’ estão inclinadas num ângulo de, aproximadamente, 45° no sentido anti-horário em relação à direção de laminação da liga, enquanto a fratura observada em ‘b’ se aproxima mais da direção perpendicular à aplicação da carga nos ensaios.

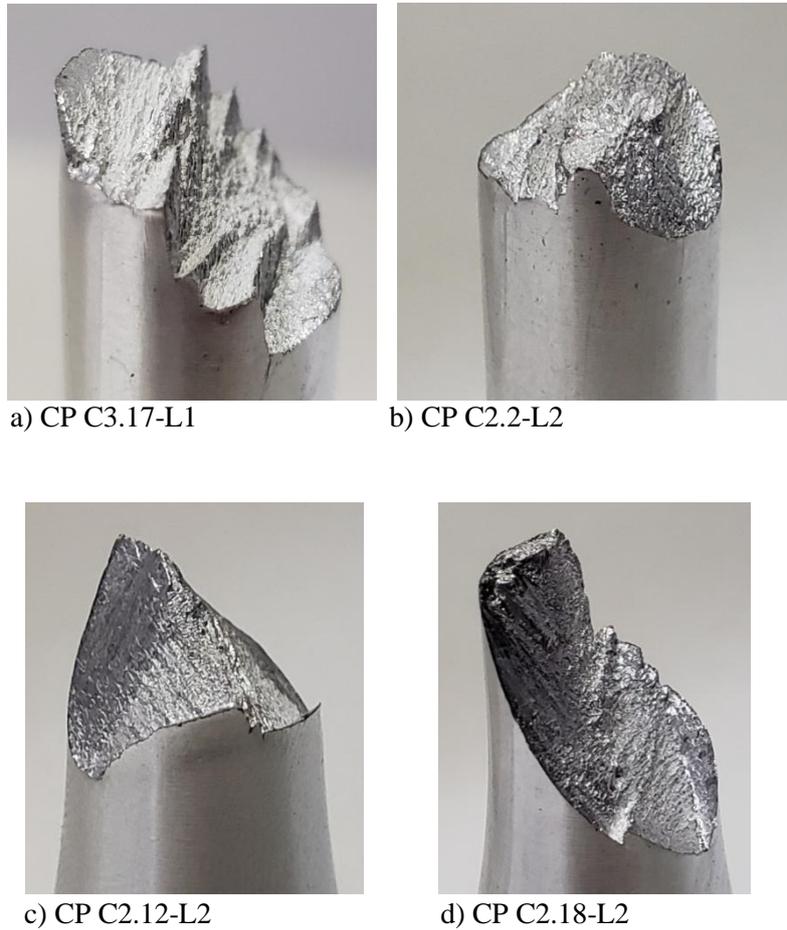


Figura 5.9. Imagens da Fratura dos CPs para Cada Nível de Amplitude de Tensão

Considerando os perfis de fratura obtidos nos ensaios e suas particularidades, não foi possível realizar a análise factográfica do material, por ser frequentemente difícil visualizar os estágios da falha por fadiga nos corpos de prova ensaiados.

Além disso, para a obtenção da curva S-N, 12 corpos de prova foram utilizados; porém, muitos dos corpos de prova ensaiados estavam rompendo fora do comprimento útil, como pode ser visto na Fig. (5.10). O que tornou o processo de obtenção da curva S-N mais difícil e demorado. Acredita-se que essa falha ocorreu por conta de escorregamento do corpo de prova durante o ensaio de fadiga, formando pequenas trincas na garra e provocando a ruptura do material em local inadequado.



Figura 5.10. Corpo de Prova com Fratura fora do Comprimento útil

6. CONCLUSÃO

A partir do trabalho realizado, fez-se possível a caracterização da liga de Alumínio 7075-T651. Na análise metalográfica realizada, viu-se que a estrutura dos grãos e sua morfologia são diferentes para cada direção analisada (L, S, T), sendo claramente mais alongados na direção longitudinal (L); além disso, observando-se os grãos das amostras, percebe-se indícios dos tratamentos pelos quais a liga passou, como as partículas precipitadas.

O ensaio de dureza mostrou que o material está dentro das especificações internacionais (ASM), tendo seu valor de dureza Rockwell muito próximo do encontrado na literatura, de forma que os processos de solubilização, têmpera (tratamento térmico), envelhecimento artificial e estiramento para alívio de tensões feitos garantiram, realmente, características melhores à liga, considerando as objetivos visados com esses processos.

Por meio do ensaio de tração, as propriedades monotônicas da liga de alumínio foram analisadas e comparadas, também, aos dados da literatura. Dessa forma, os dados encontrados estão em conformidade com os valores de Módulo de Elasticidade, Tensão de Escoamento e Limite de Resistência à Tração esperados para a liga Al 7075-T651, podendo ser considerados nos estudos desse material.

Por fim, submetida a ensaios de fadiga, a liga de alumínio 7075-T651 mostrou ter vida infinita em amplitudes de tensão menores ou iguais a 200 MPa; além disso, em comparação com a liga 7075, que não passou pelo processo de envelhecimento e estiramento, mostrou suportar maiores tensões para um mesmo número de ciclos. Porém, durante os ensaios de fadiga, o corpo de prova do material estudado rompeu fora do comprimento de seu comprimento útil (na garra). Ainda assim, a liga estudada mostrou comportamento em fadiga semelhante a outros trabalhos com mesmo material, sendo esses dados, então, válidos para compreensão do comportamento da liga de alumínio 7075-T651 em fadiga.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Considerando as rupturas dos corpos de prova que aconteceram fora do seu comprimento útil, é de suma importância que a causa dessa falha seja investigada mais a fundo, evitando que se repita. Para evitar o acontecido, sugere-se que corpos de prova com perfil de ampulheta possam ser utilizados no futuro, de forma a facilitar a ruptura do corpo de prova dentro do comprimento adequado para isso. Embora isso torne o processo de fabricação do corpo de prova mais caro e complicado, garante uma maior probabilidade do corpo romper no local correto, devido à geometria mais favorável; e utiliza menos material na fabricação de cada corpo de prova.

Uma análise da composição química dos blocos de alumínio deve ser feita, para fins de comparação com a composição química tabelada para esse mesmo material. Além disso, seria interessante fazer uma análise factográfica nos corpos de prova, para tentar se descobrir o local de origem das microtrincas, visualizar as marcas de praia e a região de fratura frágil no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Por fim, em projetos futuros, a obtenção da curva ϵ -N (Deformação-Vida) seria interessante para análise mais profunda do comportamento da liga Al 7075-T651 em fadiga, de forma a observar de forma mais precisa o estágio de iniciação das trincas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT 6835. (2000). *Alumínio e Suas Ligas - Classificação das Têmperas*.
- ASM Handbook Volume 2. (1990). *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*.
- ASM International. (1991b). *Engineered Materials Handbook, Vol 4*.
- Associação Brasileira do Alumínio. (s.d.). *História do Alumínio*. Acesso em 3 de Outubro de 2018, disponível em ABAL: <http://abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>
- Associação Brasileira do Alumínio. (s.d.). *Outros meios de transporte*. Acesso em 3 de Outubro de 2018, disponível em ABAL: <http://abal.org.br/aplicacoes/automotivo-e-transportes/outros-meios-de-transporte/>
- ASTM E1823-13. (2013). *American Society of Testing and Materials*. Pennsylvania.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2016). *Elementos de Máquinas de Shigley*. AMGH Editora LTDA.
- Callister, W. D., & Rethwish, D. G. (2009). *Materials Science and Engineering An Introduction*. New Jersey, United States of America: John Willy & Sons, Inc.
- Chlistovsky, R., Heffernan, P., & DuQuesnay, D. (15 de January de 2007). Corrosion-fatigue behaviour of 7075-T651 aluminum alloy subjected to periodic overloads. *International Journal of Fatigue* .
- Dowling, N. E. (2013). *Mechanical Behavior of Materials* (4th ed. ed.). E1823-13, A. (2013). Pennsylvania/USA.
- European Aluminium. (2002). *The Aluminium Automotive Manual*. Acesso em 15 de Outubro de 2018, disponível em European Aluminium: <https://www.european-aluminium.eu/media/1533/aam-materials-3-designation-system.pdf>
- G1. (18 de Abril de 2018). *Casos como o da passageira americana sugada por janela de avião são muito raros*. Acesso em 6 de Outubro de 2018, disponível em G1: <https://g1.globo.com/mundo/noticia/casos-como-o-da-passageira-americana-sugada-por-janela-de-aviao-sao-muito-raros-entenda.ghtml>
- Hatch, J. E. (1984). *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*.
- Lee, Y.-L., Pan, J., Hathaway, R. B., & Barkey, M. E. (s.d.). *Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice)*. Elsevier Butterworth-Heinemann .
- Liaw, P., & Landes, J. (1988.). “*Effects of Monotonic and Cyclic Prestrain on Fracture Toughness: A Summary*”. ASTM-STP 945.
- Lin, S.-K., Lee, Y.-L., & Lu, M.-W. (2001). Evaluation of the staircase and the accelerated test methods for fatigue limits distributions. *International Journal of Fatigue* , pp. 75-83.
- Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. (s.d.). *Alumínio*. Acesso em 3 de Outubro de 2018, disponível em mdic: <http://www.mdic.gov.br/noticias/9-assuntos/categ-comercio-exterior/479-metallurgia-e-siderurgia-3>
- Norton, R. L. (2013). *Machine Design* (4th ed.). Massachusetts, United States of America: TechBooks.
- Ostermann, F., & Reimann, W. (1970). “*Thermomechanical Processing and Fatigue of Aluminum Alloys*”. ASTM-STP 467.
- Reed, R., & Smith, J. C. (1983). The economic effects of fracture in the United States. *National Buereau of Standards* (Special Publication 647-1).
- Starke Jr, A. E., & Staley, J. T. (1996). Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Progress in Aero*
- Zhao, T., & Jiang, Y. (2008). Fatigue of 7075-T651 aluminum alloy. *International Journal of Fatigue* , pp. 834-849.

space Sciences.

Taylor, S. R. (22 de Janeiro de 1964). Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. p. 1274.

Wirshing, P. H. (1983). Statistical summaries of fatigue data for design puporses. *NASA Contract Report 3697, N83-29731* .