

UNESP

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

ALLISON GODOI

**METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE PROBABILIDADE DE
FALHA S-N-P PARA UMA LIGA DE ALUMÍNIO SUBMETIDA A DIFERENTES
TRATAMENTOS TÉRMICOS DE SOLUBILIZAÇÃO E PRECIPITAÇÃO**

**Guaratinguetá
2012**

ALLISON GODOI

METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE PROBABILIDADE
DE FALHA S-N-P PARA UMA LIGA DE ALUMÍNIO SUBMETIDA A
DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS DE SOLUBILIZAÇÃO E
PRECIPITAÇÃO.

Trabalho de Graduação apresentado ao
Conselho de Curso de Graduação em
Engenharia de Mecânica da Faculdade
de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista, como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Graduação em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães

Guaratinguetá
2012

G588m	Godoi, Allison Metodologia de determinação das curvas de probabilidade de falha S-N-P para uma liga de alumínio submetida a diferentes tipos de tratamentos térmicos de solubilização e precipitação / Allison Godoi – Guaratinguetá : [s.n], 2012. 58 f : il. Bibliografia: f. 58 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012. Orientador: Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães 1. Ligas de alumínio 2. Fadiga I. Título CDU 669.715
-------	---

**METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE
PROBABILIDADE DE FALHA S-N-P PARA UMA LIGA DE ALUMÍNIO
SUBMETIDA A DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS DE
SOLUBILIZAÇÃO E PRECIPITAÇÃO**

ALLISON GODOI

**ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Prof. Dr. Mauro Pedro Peres
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. VALDIR ALVES GUIMARÃES
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. PETERSON FERRANDINI
UNESP-FEG


Prof. Dr. ANGELO CAPORALLI FILHO
UNESP/FEG

Setembro de 2012

*De modo especial a meu pai Benedito, cujas palavras
nutriram e ainda nutrirão muitos de meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os meus familiares de modo geral pelo carinho e paciência nesses anos de estudo, em especial a minha Mãe Maria da Penha, pela força e dedicação, a meus irmãos Thieres e Emerson pelo apoio sem o qual não teria conseguido chegar até aqui, e a minha grande companheira Tais que me ajudou muito com a execução do trabalho e nos tempos difíceis.

Agradeço ainda à dedicação do Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães que me deu grande suporte e orientação na execução deste trabalho.

Dedico também este trabalho a todos os amigos da república APAE, amigos para todos os momentos e para guardar para o resto da vida.

“A vida é uma pedra de amolar: desgasta-nos ou afia-nos,
conforme o metal de que somos feitos.”

George Bernard Shaw

GODOI, A. **Metodologia de determinação das curvas de probabilidade de falha S-N-P para uma liga de alumínio submetida a diferentes tratamentos térmicos de solubilização e precipitação.** 2012. 57 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

A abordagem do assunto em questão neste trabalho se apoia no fato de que a confiabilidade de métodos de análise de desempenho de materiais se mostra de fundamental importância para o resultado obtido. Focamos este trabalho no desenvolvimento e apresentação da metodologia para levantamento de curvas de probabilidade em ensaio de fadiga (S-N) de acordo com a norma E739, este foco é justificado pelo fato de que os resultados obtidos em ensaio de fadiga apresentam considerável dispersão tornando difícil a leitura e interpretação dos dados, esta dispersão surge, pois o fenômeno de ruptura é fortemente influenciado por características internas do material, podemos, então, ter dados variando muito de ensaio para ensaio. Desta forma partimos inicialmente de um breve estudo das ligas de alumínio em questão, bem como os tratamentos aos quais os mesmos foram submetidos. Também se estudou o comportamento dos materiais quando submetidos a cargas cíclicas, o que configura processo de falha por fadiga, e o próprio método de ensaio de fadiga em questão. Tal estudo estatístico baseia-se na norma da ASTM E739, desta forma seu conteúdo foi estudado minuciosamente de forma que pudéssemos apresentar em detalhes a metodologia e levantarmos as curvas S-N para diferentes ligas de alumínio 7012 submetidas ao ensaio de fadiga. Dados foram coletados em testes realizados no departamento de materiais a partir de duas amostras de liga de alumínio 7012 solubilizadas e precipitadas por diferentes intervalos de tempo e temperatura submetidas a ensaio de fadiga do tipo tração-compressão, posteriormente estes dados foram analisados e utilizados para levantamento das curvas utilizando-se a E739 como base. Após levantamento da curva analisou-se as características das amostras ensaiadas bem como sua correlação com o resultado dos testes. Pudemos comprovar a eficácia do método de análise estatística pela ASME E739, que possibilitou a leitura dos dados, sem este método seria muito difícil termos uma leitura e comparação dos resultados para os dois tipos de alumínio ensaiados, pois as amostras apresentaram elevado grau de dispersão. Conclui-se ainda que a decisão de qual é a liga com maior resistência a fadiga depende do nível de tensão, a liga de alumínio tratada a 180°C por 6hs apresenta maior resistência para valores maiores de tensão, para valores menores de tensão a liga de alumínio tratado a 120°C por 24hs é a mais resistente.

PALAVRAS-CHAVE: Ligas de alumínio, Fadiga, Curvas de probabilidade S-N, ASTM E739.

GODOI, A. **Method for determining the probability of failure curves for SNP an aluminum alloy subjected to different heat treatments of solubilization and precipitation.** 2012. 57f. Work Graduation (Graduation in Mechanical Engineering) - College of Engineering Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

The approach of the subject matter in this work relies on the fact that the reliability of methods for performance analysis of materials proves critical for the result. This work focused on the development and presentation of the methodology for lifting probability curves for fatigue test (SN) according to standard E739, this focus is justified by the fact that the results in fatigue test show considerable dispersion making it difficult to reading and interpretation of data, this dispersion arises because the phenomenon of rupture is strongly influenced by internal characteristics of the material, we can then have much data ranging from test to test. Thus we set out originally for a brief study of aluminum alloys in question, as well as the treatments to which they were subjected. We also studied the behavior of materials when subjected to cyclic loading, which configures process of fatigue failure, and even fatigue test method in question. This statistical analysis is based on the ASTM E739 standard, so its contents was studied in detail so that we could present in detail the methodology and raise SN curves for different aluminum alloy 7012 subjected to fatigue test. Data were collected from tests conducted in the department of materials from two samples of aluminum alloy 7012 solubilized and precipitated by different time intervals and assayed temperature fatigue-type traction-compression, these data were then analyzed and used to survey curves using the base as E739. After lifting the curve analyzed the characteristics of the test samples and their correlation with the test results. We confirmed the effectiveness of the method of statistical analysis by ASME E739, which allowed the reading of data without this method would be very difficult to have a reading and comparison of the results for the two types of aluminum assayed as samples showed high degree of dispersion. It is concluded that the decision on what is the alloy with higher fatigue resistance depends on the voltage level, the aluminum alloy treated at 180 ° C for 6hs is more resistant to higher values of voltage values for the alloy under tension Aluminum treated at 120 ° C for 24 hours is the most resistant.

KEYWORDS: aluminum alloys, fatigue, probability curves S-N, ASTM E739.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES.	27
TABELA 2: PRINCIPAIS INSUMOS PARA PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO	28
TABELA 3: TIPO DE TESTE X Nº MÍNIMO DE ELEMENTOS	32
TABELA 4: FINALIDADE DO TESTE X Nº DE CORPOS DE PROVA E REPLICAÇÃO	32
TABELA 5: VALORES DE <i>tp</i>	35
TABELA 6: FISHER-SNEDECOR	36
TABELA 7: RESULTADOS PARA ALUMÍNIO TRATADO E SOLUBILIZADO POR 24HORAS À 120°C.....	40
TABELA 8: RESULTADOS PARA ALUMÍNIO TRATADO E SOLUBILIZADO POR 6 H À 180°C	41
TABELA 9: ALUMÍNIO TRATADO E SOLUBILIZADO A 180°C POR 6H	45
TABELA 10: ALUMÍNIO TRATADO E SOLUBILIZADO A 120°C POR 24H	45
TABELA 11: VALORES PARA CÁLCULOS DE PARÂMETROS ALUMÍNIO 120°C/24H	46
TABELA 12: VALORES PARA CÁLCULOS DE PARÂMETROS ALUMÍNIO 180°C/6H	46
TABELA 13: VALORES PARA CÁLCULOS DE PARÂMETROS ALUMÍNIO 180°/6H .	48
TABELA 14: VALORES PARA CÁLCULOS DE PARÂMETROS ALUMÍNIO 120°C/ 24H.	48
TABELA 15: INTERVALO DE CONFIANÇA ALUMÍNIO 180°C/6H.....	50
TABELA 16: INTERVALO DE CONFIANÇA ALUMÍNIO 120°C/24H.....	50
TABELA 17: INTERVALO DE CONFIANÇA PARA O ALUMÍNIO 180°C/6H.	52
TABELA 18: INTERVALO DE CONFIANÇA PARA O ALUMINO 120°C/24H.	52
TABELA 19: DADOS PARA A CURVA S-N RELATIVA AO GRÁFICO DO ALUMÍNIO TRATADO A 180°C POR 6H.....	53
TABELA 20: DADOS PARA A CURVA S-N RELATIVA AO GRÁFICO DO ALUMÍNIO TRATADO A 120°C POR 24H.....	54

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: EXEMPLO DE ACIDENTE CAUSADO POR FADIGA.....	15
FIGURA 2: TENSÃO ALTERNADA – IDEAL	16
FIGURA 3: TENSÃO FLUTUANTE.....	17
FIGURA 4: TENSÃO ALEATÓRIA	17
FIGURA 5: ENSAIO DE FLEXÃO ROTATIVO	18
FIGURA 6: ENSAIO TENSÃO UNIAXIAL.	18
FIGURA 7: CURVA DE WOHLER.....	19
FIGURA 8: REPRESENTAÇÃO DOS ESTÁGIOS.....	20
FIGURA 9: MARCAS DE PRAIA.....	21
FIGURA 10: ESTRIAS.....	21
FIGURA 11: INFLUÊNCIA DA TENSÃO SOBRE O COMPORTAMENTO DE FADIGA	22
FIGURA 12: EXEMPLO DE REDUTOR DE TENSÃO	23
FIGURA 13: ENSAIO DE FADIGA COM CURVAS DE PROBABILIDADE CONSTANTE.	24
FIGURA 14: REPRESENTAÇÃO ATRAVÉS DE CURVAS LIMITES.....	25
FIGURA 15: LINGOTES DE ALUMÍNIO	26
FIGURA 16: VAZAMENTO DE ALUMÍNIO NO MOLDE.	29
FIGURA 17: REPRESENTAÇÃO DE SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO NUM DIAGRAMA DE FASES.....	30
FIGURA 18: VISTA GERAL DA MÁQUINA DE ENSAIO DE FADIGA - INSTRON 8000	37
FIGURA 19: INTERFACE DO PROGRAMA, DETALHE DOS PARÂMETROS UTILIZADOS.....	38
FIGURA 20: CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NOS TESTES.....	39
FIGURA 21: CURVA DE WHOLER (S-N).....	42
FIGURA 22: CURVA S-N PARA O ALUMÍNIO SOLUBILIZADO E PRECIPITADO A 180°C POR 6H.....	42
FIGURA 23: CURVA S-N PARA O ALUNIO SOLUBILIZADO E PRECIPITADO A 120°C POR 24H.....	43

FIGURA 24: CURVA S-N PARA O ALUMÍNIO SOLUBILIZADO E PRECIPITADO A 180°C/6H.....	53
FIGURA 25: CURVA S-N PARA O ALUMÍNIO SOLUBILIZADO E PRECIPITADO A 120°C/24H.....	54
FIGURA 26: CURVA ϵ XN.....	55

LISTA DE SÍMBOLOS

°	Grau
t	Tonelada
%	Porcentagem
ε	Deformação
mm	Milímetro
°C	Graus Celcius
cal	Caloria
±	mais ou menos
h	Hora
N	Número de ciclos
S	Tensão
kg	Quilograma

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 TIPOS DE ENSAIO DE FADIGA.....	16
2.2 PROCEDIMENTOS E PARÂMETROS DO ENSAIO DE FADIGA	17
2.3 OS MECANISMOS DE FALHA POR FADIGA.....	19
2.4 FATORES QUE AFETAM A FALHA POR FADIGA	21
2.4.1 TENSÃO MÉDIA	21
2.4.2 EFEITOS DE SUPERFÍCIE	22
2.4.3 FADIGA AFETADA POR CONDIÇÕES DO AMBIENTE	23
2.4.4 FADIGA POR CORROSÃO	23
2.5 DETERMINAÇÕES NUMÉRICAS DO ENSAIO DE FADIGA.....	24
2.6 LIGAS DE ALUMÍNIO E TIPOS DE TRATAMENTO	26
2.6.1 LIGAS DE ALUMINO	28
2.6.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS	29
2.7 NORMA ASTM E739.....	30
2.7.1 TERMINOLOGIA	31
2.7.2 AMOSTRAGEM.....	31
2.7.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	33
3. EXPERIMENTO.....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 RESULTADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE	40
4.2 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS DADOS CONFORME A NORMA E739.....	43
4.2.1 AMOSTRAGEM.....	43
4.2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	44
5 CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS	57
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	58

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades e características de um dado material que se aplicará em um determinado componente mecânico é de fundamental importância, visto que o mesmo material será passível de esforços, tensões e deformações aos quais os componentes serão submetidos quando em uso.

Pode-se destacar a importância dos ensaios no que se refere ao desenvolvimento de novas ligas e o conhecimento das propriedades da mesma, ou ainda no que se refere ao controle de propriedades rotineiras de produtos na indústria, como a plasticidade do material de um lote de chapas de aço usados em uma estamparia, por exemplo.

Dentre as principais propriedades que podem ser obtidas por ensaio, podemos destacar resistência, elasticidade, plasticidade, resiliência e tenacidade (SANTOS; GARCIA; SPIM, 2000).

Desta forma para o correto dimensionamento do elemento é imprescindível que existam informações confiáveis sobre as propriedades do mesmo.

Além disto, os ensaios de materiais em geral são de enorme importância para determinação de novas informações acerca de novos materiais, bem como seu desenvolvimento, tem grande importância também em ensaios de controle em produtos usados e produzidos na indústria em geral.

O ensaio de fadiga nos possibilita conhecer propriedades dos materiais relacionados com a aplicação de cargas dinâmicas e oscilantes em corpos de provas normatizados segundo padrões pré-estabelecidos. Tais condições de ensaio possibilitam ocorrência de falha em níveis de tensão consideravelmente inferiores aos especificados para ensaios estáticos.

A indústria faz largo uso destas informações, a maioria dos elementos de máquinas sofrem esforços cíclicos e repetitivos, isto faz do ensaio de fadiga um dos ensaios mais importantes a ser executado em uma dada amostra de material, tal comportamento culmina com rompimentos muito inferiores àqueles provocados por uma ruptura em ensaios estáticos, a ruptura por fadiga é causa de mais de 90% das falhas em serviço de componentes metálicos (SANTOS; GARCIA; SPIM, 2000), ou seja, grande parte dos acidentes são diretamente relacionados a falhas de materiais por fadiga, a figura 1 nos mostra a exemplo, falhas nos materiais dos aviões comet que culminaram em uma série de acidentes com estes aviões.

Tal ensaio nos permite determinar propriedades importantes acerca do material analisado como limite de resistência à fadiga (σ_{rf}), resistência à fadiga (σ_f), e vida em fadiga (N_f).

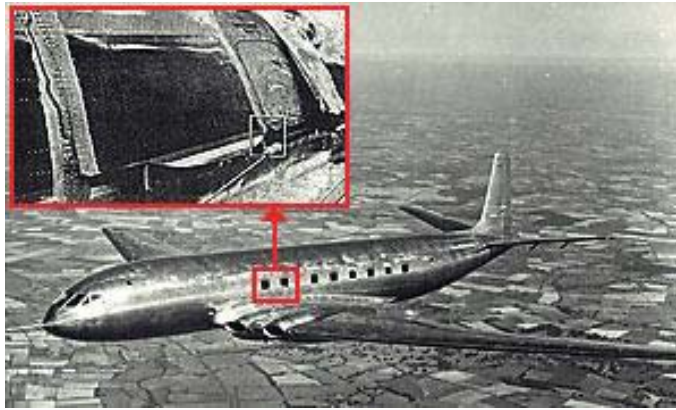


Figura 1: Exemplo de acidente causado por fadiga

1.2 Objetivos

O presente trabalho se destina a obter, através de dados experimentais, curvas de probabilidade de falha por fadiga para o alumínio submetido a dois tipos de tratamento.

Para tanto, nos utilizaremos da norma ASTM E739 “*Standard Practice Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data*”, que possibilita uma leitura e melhor compreensão dos dados envolvidos nos ensaios que serão feitos, levando em conta a natureza dos mesmos.

Pretende-se ainda explorar detalhadamente a norma em questão de forma a criar um sequenciamento lógico e de fácil compreensão para aqueles que desejarem, da mesma forma que aqui foi feito, levantar as curvas de probabilidade de falha por fadiga em futuros experimentos.

Ao fim da experimentação e do desenvolvimento da metodologia para utilização da norma com os dados obtidos, pretende-se ainda com base nos dados e nas curvas obtidas experimentalmente analisar as propriedades dos materiais em questão, bem como seu desempenho em teste.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Tipos de Ensaio de Fadiga

O fenômeno da falha por fadiga é consequência da aplicação repetitiva de esforços mecânicos, esta aplicação pode ser aplicada de diferentes formas.

As tensões cíclicas aplicadas podem ser de natureza axial (ensaios de trações-compressão), ou de natureza flexional (por dobramento), ou ainda de natureza torcional (ensaio de flexão rotativa).

A aplicação da tensão ao longo do tempo pode também ser executada das mais variadas formas, mas podemos exemplificar por três tipos básicos.

- a) A tensão pode ser aplicada de forma senoidal sem sobrecargas e com as cargas de mesma magnitude em módulo (tração igual compressão). Esta situação pode ser observada em uma situação idealizada de um eixo rotativo funcionando sem sobrecarga ao longo do tempo. A figura 2 ilustra a situação descrita.

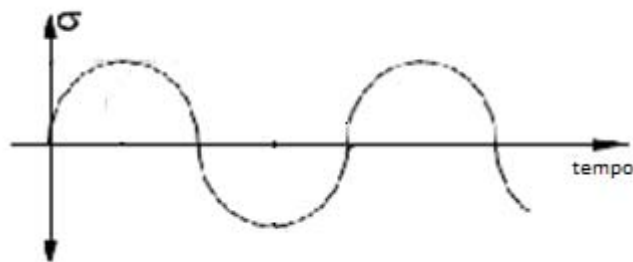


Figura 2: tensão alternada – ideal (SANTOS; GARCIA; SPIM, 2000).

- b) A tensão pode ser aplicada ao longo do tempo em torno de uma tensão média (tensão flutuante), sendo esta por compressão ou por tração, desta forma as magnitudes são diferentes ao longo do tempo. É o caso de um eixo rotativo funcionando sob uma carga constante. Podemos observar na figura 3 este comportamento através do gráfico.

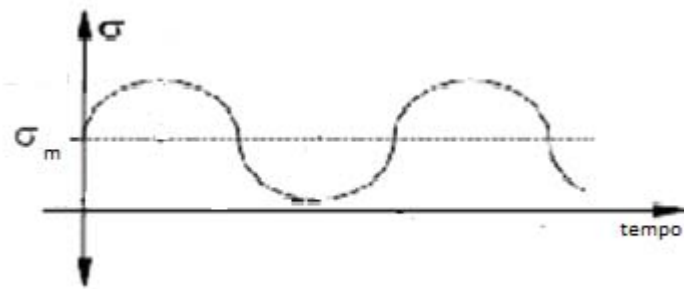


Figura 3: tensão flutuante (SANTOS; GARCIA; SPIM, 2000).

- c) Temos finalmente a terceira forma, aonde a variação ocorre aleatoriamente em diferentes graus de magnitude e direção, esta é a forma mais complexa de distribuição de cargas ao longo do tempo e pode ser amplamente observada em condições reais como suspensões de automóveis atuando sobre o piso irregular, ou asas de aviões suportando diferentes tipos de solicitações de carga em uma viagem, por exemplo. A Figura 4 resume a situação explicada.

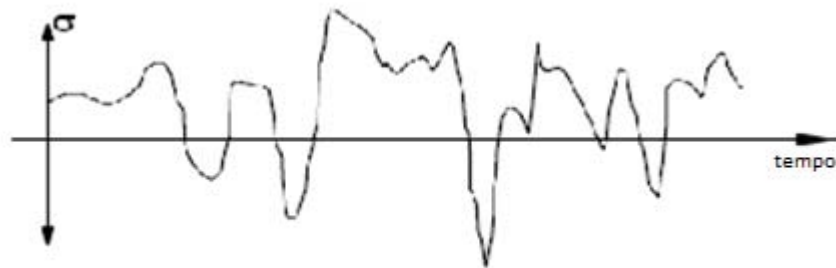


Figura 4: tensão aleatória (SANTOS; GARCIA; SPIM, 2000).

2.2 Procedimentos e parâmetros do ensaio de fadiga

Os ensaios de fadiga em materiais devem se aproximar o máximo possível das situações de tensão sofridas pelos materiais quando em serviço. Pode-se utilizar para esta finalidade tanto aparelhos rotativos como os de ensaios giratórios com dobramento como ensaios que submetem o corpo a tensões uniaxiais de tração e compressão.

O experimento realizado neste trabalho se constitui no segundo tipo de ensaio aqui descrito, ou seja, realizamos os ensaios em uma máquina do tipo tração-tração que serão mais bem detalhados mais adiante.

Na Figura 5, podemos observar uma máquina de ensaio de flexão rotativa, e na Figura 6 um esquema com as forças atuantes em um ensaio com tensão aplicada axialmente.

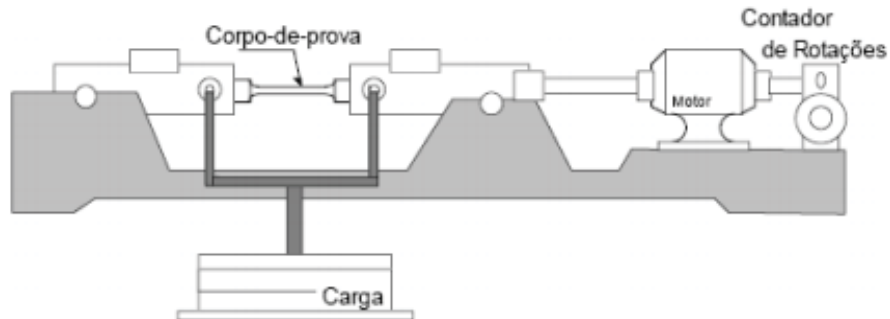


Figura 5: Ensaio de flexão rotativo (ABRAÃO, 2008).

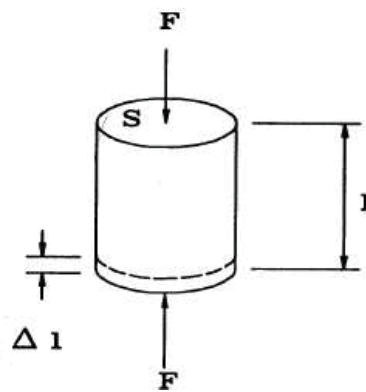


Figura 6: Ensaio tensão uniaxial (CAIRES, 2009).

Geralmente iniciam-se os ensaios com cargas de tensão máxima ($S_{\max}$) relativamente grande, da ordem de $2/3$ do limite máximo de tensão do material o corpo de prova é submetido às tensões cíclicas estabelecidas até a falha do material por fadiga repete-se o procedimento com outros corpos de prova (em número pré-estabelecido) da mesma forma, posteriormente se repete o ensaio para níveis cada vez menores de tensão e para o mesmo numero pré-determinado de corpos de prova (CALLISTER, 2002).

Com os dados em mãos monta-se um gráfico aonde se tem os valores N ou $\log$ de N para cada nível de tensão ensaiado.

O que se observa, são gráficos S-N onde maiores níveis de tensão geram menor numero de ciclos até a falha, sendo que em alguns tipos de liga (que não se aplica ao presente trabalho) apresentam um patamar de tensão constante ao longo do numero de ciclos, ou seja, existe um limite de resistência à fadiga abaixo do qual a falha por fadiga não ira ocorrer.

O que se observa é também outro parâmetro denominado resistência à fadiga, que nada mais é que o nível de tensão no qual a falha irá ocorrer para um determinado número de ciclos.

A curva resultante do ensaio de fadiga S-N, ou curva de Wohler está representada na Figura 7:

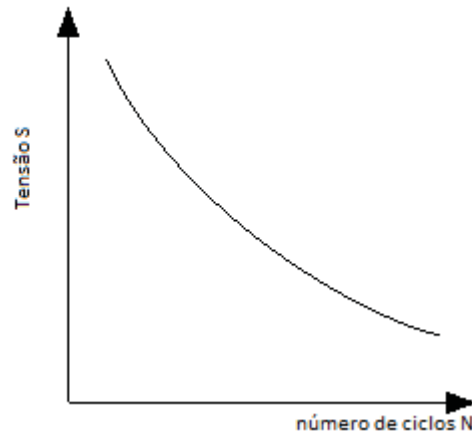


Figura 7: Curva de Wohler.

2.3 Os mecanismos de falha por fadiga

O processo de falha por fadiga quando analisado do ponto de vista microscópico consiste no surgimento e propagação de trincas microscópicas no material. Este mecanismo se divide em três etapas distintas:

- 1-Nucleação da trinca.
- 2-Propagação cíclica da trinca (fenômeno lento).
- 3-Falha catastrófica (fenômeno rápido).

A vida em fadiga total N_t é a soma do número de ciclos que ocorrem nas duas primeiras fases acima descritas (denominaremos N_1 e N_2), a terceira etapa é irrelevante, já que é muito menor do que as duas primeiras, assim:

$$N_t = N_1 + N_2$$

Em ensaios de fadiga de alto ciclo (baixo nível de tensão) a etapa de nucleação da trinca é a maior responsável pela vida em fadiga total, no ensaio de fadiga de baixo ciclo (altos níveis de tensão) a etapa predominante é a da propagação da trinca.

Estas trincas quase sempre são originadas em algum ponto de concentração de tensões do componente, ou seja, riscos na superfície, cantos vivos, rasgos de chave, entre outros. Estes produzem descontinuidades superficiais que são resultado do escorregamento de discordâncias.

Após a nucleação da trinca temos um primeiro estágio à propagação da mesma muito lentamente através dos planos cristalográficos, também chamado estágio 1, seu tempo depende do nível de tensão aplicado. Na Figura 8 podemos observar a representação dos estágios de propagação de trincas

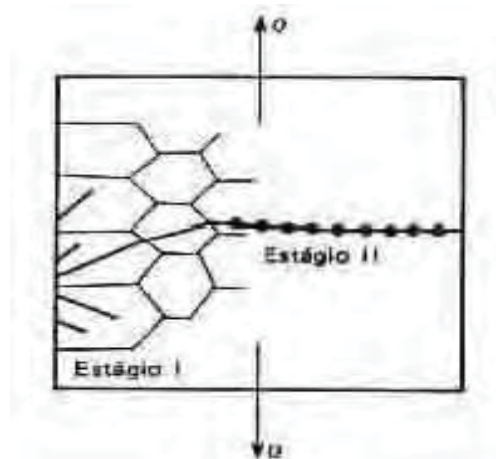


Figura 8: Representação dos estágios (CALLISTER, 2002).

No segundo estágio a taxa de extensão da trinca aumenta drasticamente, a direção também se altera, ficando praticamente paralela ao sentido da tensão aplicada. Após a propagação do estágio II podemos caracterizar a superfície com dois tipos de marcas distintos, estrias e marcas de praia, observados com frequência em padrão circular.

As marcas de praia podem ser muitas vezes observadas a olho nu e são encontradas em componentes que experimentaram propagação do estágio II com interrupção do mesmo, cada marca representa um período de propagação da trinca.

A Figura 9 representa esquematicamente as marcas de praia.

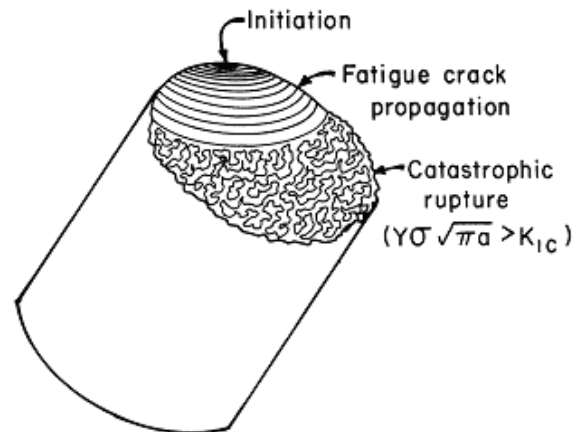


Figura 9: Marcas de praia (SANTOS; GARCIA; SPIM, 2000).

As estrias, que podem existir em grande número dentro de uma marca de praia, por exemplo, são observáveis apenas via microscópio e apresentam características semelhantes à da marca de praia.

Na Figura 10 podemos observar estrias em um material.

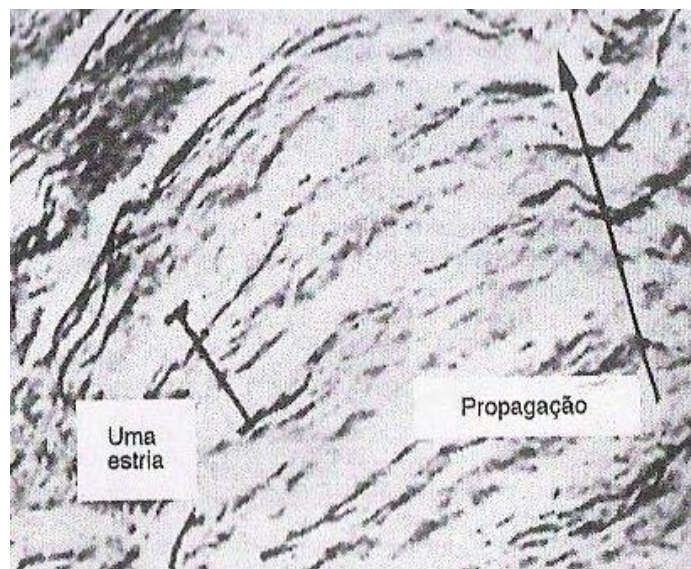


Figura 10: Estrias (ABAL, 2007).

2.4 Fatores que afetam a falha por fadiga

2.4.1 Tensão média

A tensão média é um dos fatores que tem grande influência na vida em fadiga. Como exemplo podemos tomar uma série de curvas que representam as amplitudes médias tomadas com base em uma tensão média constante igual a zero (SANTOS; GARCIA; SPIM, 2000).

Na Figura 11 fica evidente que um maior nível médio de tensão diminui a vida em fadiga.

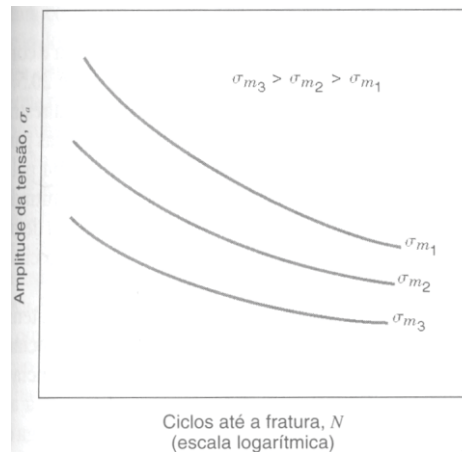


Figura 11: Influência da Tensão sobre o comportamento de fadiga (CALLISTER, 2002).

2.4.2 Efeitos de superfície

É observável que as maiores tensões às quais um corpo é submetido quando em operação ocorrem em sua superfície. Logo podemos concluir que na maioria das vezes os pontos de início das trincas se localizam justamente na superfície dos corpos.

Podemos concluir, também, que um tratamento adequado e das configurações superficiais do componente levam a uma melhoria significativa na vida em fadiga do mesmo, pode-se incluir neste ponto os tratamentos superficiais, assim como diferentes tipos de variáveis de projeto.

Entalhes ou descontinuidades geométricas, por exemplo, são grandes concentradores de tensão em um componente, ou seja, pontos em que há grande probabilidade de ocorrer início de trincas de fadiga, neste grupo podem incluir: sulcos, rasgos de chaveta, roscas, etc. A regra prática é que quanto mais afilada for a descontinuidade, maior a concentração de tensões naquele ponto. Assim, é desejável que projetos atenuem esse tipo de perfil, na busca de maior resistência à fadiga.

Na Figura 12 podemos diferenciar a mesma peça com e sem aliviador de tensões, neste caso adoçamento.

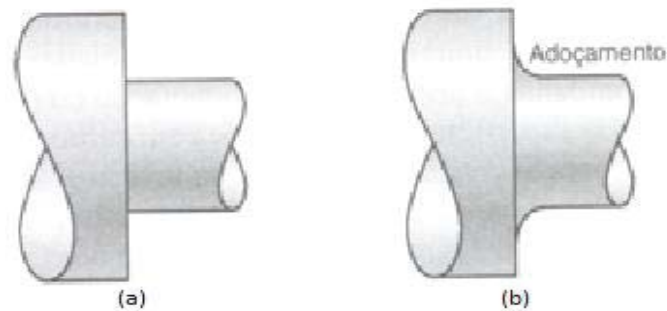


Figura 12: Exemplo de redutor de tensão: (a) aresta viva, (b) adoçamento (CALLISTER, 2002).

Ao aplicarmos tensões residuais de compressão na parte externa de um componente aumentamos seu desempenho, pois, no caso de haver uma tensão de tração sua magnitude será diminuída por essa tensão residual.

Tratamentos térmicos, componentes trabalhados a frio, componentes que receberam tratamento térmico, ou então passaram por jateamento entram nesta categoria (SANTOS; GARCIA; SPIM, 2000).

2.4.3 Fadiga afetada por condições do ambiente

Um tipo muito particular de fator que afeta a falha por fadiga são as variações de temperaturas aos quais os componentes podem vir a ser submetidos. Com esta variação temos um ciclo de contrações e expansões do material.

O aumento de temperatura faz com que o material se expanda e a diminuição com que ele se comprima. Em um material estas tensões ficam restritas pela sua estrutura rígida, isto faz com que ocorram pontos de tensão no componente, que podem originar trincas de fadiga no mesmo (SANTOS; GARCIA; SPIM, 2000).

2.4.4 Fadiga por corrosão

Ações químicas de corrosão e sucessivas tensões mecânicas sobre o material alteram negativamente a resistência à fadiga do material. Pontos superficiais denominados PITS surgem como produto das reações de oxidação do material, estes por sua vez são grandes pontos de concentração de tensão.

Adoção de materiais com maior resistência a corrosão, camadas superficiais protetoras e controle do ambiente, por exemplo, são algumas das medidas que podem Ser tomadas para minimizar o impacto da corrosão na vida em fadiga do componente (SANTOS; GARCIA; SPIM, 2000).

2.5 Determinações numéricas do ensaio de fadiga

Os resultados obtidos em ensaios de fadiga podem ser determinados de diferentes formas, através de diferentes tipos de representações gráficas que levam em conta diferentes métodos matemáticos em sua composição.

Um grande obstáculo à tomada de dados precisa é o fato de que os corpos de prova apresentam grande variação na reação aos ensaios aos quais são submetidos, isto se deve ao fato de que cada corpo tem características microscópicas muito diferentes entre si, características estas que são impossíveis de se normatizar, como estrutura interna e composição dos materiais.

Dentre estas formas de apresentação de resultados, podemos citar, por exemplo, uma série de curvas com probabilidade constante, o empecilho à utilização deste método consiste no alto número de corpos de prova que é necessário para realização do experimento. Pode-se observar pelo gráfico as diferentes faixas de probabilidade de dentro de um mesmo nível de tensão, ou então dentro de uma mesma faixa de ciclos de fadiga.

A Figura 13 está representando uma curva de tensão versus número de ciclos com escalas de probabilidade.

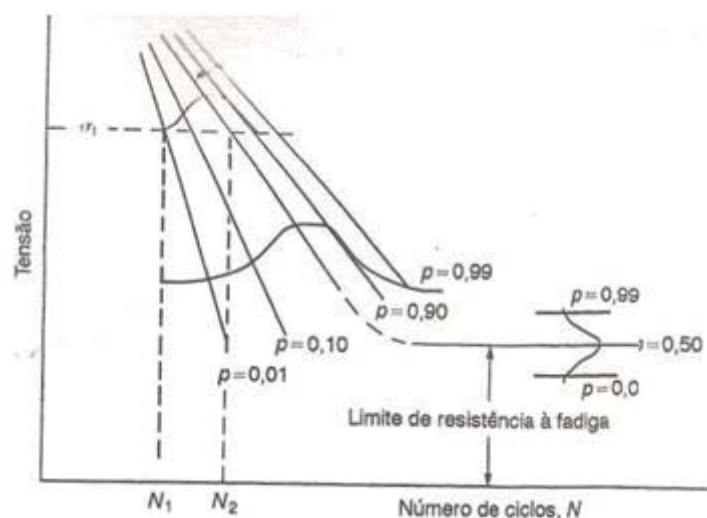


Figura 13: Ensaio de Fadiga com curvas de probabilidade constante (SANTOS; GARCIA; SPIM, 2000).

Podemos ainda, como sugere a Norma ASTM E468, representar os resultados de forma gráfica levando em consideração o espalhamento dos resultados. Tal método consiste em duas linhas que representam os níveis de tensão máxima $\sigma_{\max}$ e tensão mínima $\sigma_{\min}$ além dos pontos obtidos no ensaio. Este ensaio também necessita de um grande número de corpos de prova para sua execução.

Na figura 14 temos o gráfico de tensão versus número de ciclos com curvas limite.

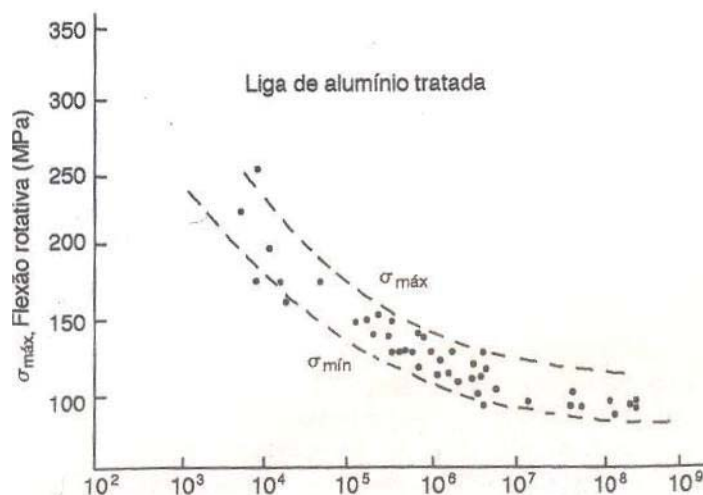


Figura 14: Representação através de curvas limites (SANTOS; GARCIA; SPIM, 2000).

O método da escada por sua vez consiste em tentar achar por tentativa o número provável de ciclos no qual ocorre a fadiga do corpo de prova, este método não exige elevado número de corpos de prova para ensaio (cerca de 25).

Temos basicamente as seguintes etapas para o ensaio:

1. Utilizamos a tensão próxima ao valor estimado da resistência à fadiga.
2. Rompendo para $N < 10^7$ diminui-se a tensão aplicada num valor fixo (chamado degrau da escada).
3. Repete-se o processo até o corpo não se romper em um número de ciclos $N = 10^7$.
4. Reverte-se o processo, desta vez aumentando a variação até que a tensão que rompa o corpo seja atingida, reverte-se o processo até que todos os corpos de prova sejam ensaiados (SANTOS; GARCIA; SPIM, 2000).

Podemos citar, ainda, como uma forma de determinação numérica de ensaios de fadiga a norma que será apresentada neste trabalho.

A norma ASTM E739 também foi feita pensando na dispersão dos resultados dos ensaios de fadiga, ela estabelece métodos baseados em análise estatística de forma a tornar a representação dos pontos do ensaio de fadiga mais plausível.

Não vamos nos prolongar por momento aos detalhes, já que, explicaremos melhor a norma ao longo deste trabalho.

2.6 Ligas de alumínio e tipos de tratamento

O alumínio e suas ligas têm alta condutividade elétrica (resistividade na casa de $2,63 \times 10^{-6} \text{ ohm/cm}^3$, em estado puro o alumínio tem condutibilidade térmica de 0,53 cal/s, ou seja, 4,5 vezes maior que o aço), têm baixa densidade (seu peso específico é de aproximadamente $2,70 \text{ g/cm}^3$ em estado puro) e também boa resistência à corrosão (quando exposto à atmosfera forma-se uma fina camada de óxido em sua superfície que o protege de oxidações posteriores). As ligas de alumínio têm ainda elevadas ductilidade proporcionando o uso de processos de conformação facilmente, esta ductilidade, inclusive, pela estrutura do alumínio se mantém em baixas temperaturas. Podemos citar, ainda, alta reflexividade, propriedade não-magnética, atoxidade e baixa absorção de nêutrons, ou seja, tem importantes características nucleares. Estes são apenas alguns motivos pelos quais o alumínio é, hoje, o metal não-ferroso mais utilizado no mundo (ABAL, 2007).

O alumínio pode ser fabricado em lingotes, que estão mostrados na Figura 15.



Figura 15: Lingotes de alumínio (ABAL, 2007)

Dentre as desvantagens podemos citar, seu baixo ponto de fusão (em estado puro seu ponto de fusão é de aproximadamente 660°C), o que restringe sua máxima temperatura de utilização. Sua resistência à tração também é um limitador para sua utilização (em estado puro, cerca de 90MPa), porém podemos melhorar estas características com adição de elementos de liga e os devidos tratamentos térmicos como trabalho a frio, por exemplo.

Uma das grandes vantagens do alumínio é sua grande capacidade de ser reciclado indefinidamente sem perda de suas propriedades físico-químicas, isto agrega grande valor a este produto por questões ambientais e ligadas à sustentabilidade.

Na Tabela 1 apresentamos uma comparação de propriedades físicas.

Tabela 1: Comparativo das Propriedades (ABAL, 2007).

Propriedades Físicas Típicas	Alumínio	Aço	Cobre
Densidade (g/cm ³)	2,7	7,86	8,96
Temperatura de fusão (°C)	660	1500	1083
Módulo de elasticidade (Mpa)	70000	205000	110000
Condutibilidade térmica a 25°C(Cal/cm/°C)	0,53	0,12	0,94
Condutibilidade elétrica (%IACS)	61	14,5	100

Existem diversas formas de se aumentar a resistência mecânica do alumínio, podemos citar dentre elas a deformação plástica a frio, também podemos aumentar a resistência mecânica mediante formação de ligas, porém elas deixam o material mais vulnerável à corrosão.

Geralmente classificamos as ligas de alumínio como fundidas ou forjadas, suas composições são designadas por um número com quatro dígitos que identifica os principais tipos de impureza e suas concentrações em alguns casos.

Importante considerarmos ainda nesta breve análise, que este metal tem alta vocação para produção em território brasileiro, uma vez que, temos abundante reserva de bauxita (principal matéria prima) e também alto potencial de geração de energia elétrica que é utilizada em larga escala no processo de eletrólise, processo pelo qual se obtém alumínio através da alumina, um dos subprodutos intermediários em sua produção.

Na Tabela 2 temos descrito os insumos para produção do alumínio.

Tabela 2: Principais insumos para produção do alumínio (ABAL, 2007).

Insumos para produção de alumínio primário	
Alumina	1919 kg/t
Energia elétrica	15,0 MWhcc/t Al
Criolita	8,0 kg/t
Fluoreto de alumínio	19,7 kg/t
Coque de petróleo	0,384 kg/kg Al
Piche	0,117 kg/kg Al
Óleo combustível	44,2 kg/t

2.6.1 Ligas de Alumino

O alumínio quando fundido tem a capacidade de dissolver outros metais e substancia metaloides, quando ele se resfria e solidifica, alguns destes constituintes podem ficar retidos em solução sólida fazendo com que a estrutura se torne mais rígida.

Como o metal tem grande capacidade de reter elementos quando fundido, ao se solidificar é normal a precipitação de parcela destes elementos, estes compostos intermetálicos são os principais responsáveis pelo ganho de dureza da liga.

Neste ponto temos uma grande vantagem do alumínio. Este material tem grande capacidade de formar liga com outros elementos, formando uma grande gama de elementos de liga.

Consequentemente temos diferentes tipos de usos para o alumínio que variam conforme as propriedades que obtemos com a adição de ligas.

É difícil descrever a função de cada elemento de liga, por que estes se alteram não só com a quantidade dos elementos presentes na liga, mas também com sua interação com outros elementos, de fuma forma geral temos elementos que são adicionados para conferirem características principais a liga (como resistência mecânica, resistência química fluidez, etc.) ou função acessória, como controle de microestrutura, de impurezas, etc.

A Figura 16 exemplifica um vazamento de alumínio fundido em moldes.



Figura 16: Vazamento de alumínio no molde (ABAL, 2007).

2.6.2 Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos têm como objetivo principal reduzir ou remover as segregações, produzir estruturas estáveis e controlar certas características metalúrgicas como propriedades mecânicas, tamanho do grão, estampabilidade, etc. A seguir alguns tipos de tratamentos térmicos abordados resumidamente:

Homogeneização: tratamento realizado em torno de 500°C tem, dentre outros, por objetivo, reduzir as segregações e produzir estruturas estáveis e controlar características metalúrgicas.

Solubilização/Envelhecimento: Ao realizarmos este tipo de tratamento buscamos basicamente maior resistência mecânica, mas também produz redução na ductilidade. Inicialmente o metal é aquecido até aproximadamente 500°C, neste momento temos dissolução dos elementos de liga na solução, posteriormente resfria-se o metal rapidamente que não deixa que esses elementos se precipitem temporariamente. Como esta condição é instável, temos os constituintes se precipitando de maneira muito fina, e desta forma obtém-se o endurecimento máximo, este tempo de formação dos precipitados finos varia de liga para liga, pode acontecer naturalmente (dentro de alguns dias em temperatura ambiente), ou pode ser necessário um reaquecimento de algumas horas.

Recozimento pleno: Tratamento térmico realizado buscando condições de plasticidade do material máximas, constituindo-se de uma recristalização total do mesmo.

Neste processo o metal é aquecido até temperaturas de aproximadamente 350°C, o que permite o rearranjo em uma nova configuração cristalina não deformada, removendo o efeito do trabalho a frio e dando uma característica dúctil ao material.

Recozimento parcial: Temos ainda o recozimento parcial que permite maior alongamento do material através da têmpera, favorecendo, desta forma, o processo de estampagem, ou seja, maior resistência mecânica. Pode ser realizado em temperaturas de 200°C a 280°C dependendo da redução aplicada na laminação a frio.

Estabilização: Para contornarmos uma possível perda de propriedades mecânicas de materiais deformados a frio recorreremos à estabilização, aonde aplicamos uma porcentagem de deformação mais alta do que a necessária para atingir-se determinado nível de propriedades mecânicas e depois aquecemos o material ao redor de 150°C. Este tratamento alivia tensões residuais e aumenta resistência a corrosão também.

Na Figura 17 apresentamos um diagrama de fases com as etapas do envelhecimento.

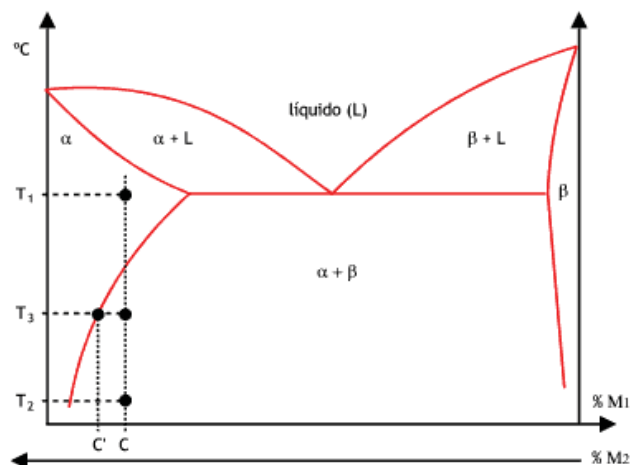


Figura 17: Representação de solubilização e envelhecimento num Diagrama de Fases (CALLISTER, 2002).

2.7 Norma ASTM E739

Normas são criadas com o objetivo de estabelecer conceitos e procedimentos fixos que sejam aplicáveis a diferentes métodos de ensaio e procedimentos, as normas têm diversas finalidades à sua aplicação, podemos destacar (propriedades dos materiais):

- Tornar as propriedades dos materiais constituintes de um determinado produto mais uniforme e consequentemente sua qualidade;

- Reduzir os tipos similares de materiais;
- Orientar o projetista na escolha adequada dos materiais;
- Permitir comparações de resultados obtidos em diferentes condições;
- Reduzir desentendimentos entre produtor e consumidor.

A norma ASTM E739 foi criada como uma ferramenta de apoio à determinação numérica dos ensaios de fadiga, constituindo uma ótima ferramenta estatística para determinação e averiguação dos resultados.

Esta norma se aplica apenas a ensaios de determinação das curvas de ensaios de fadiga do tipo S-N e ϵ -N respectivamente, para um intervalo específico de tensão ou deformação, ela pode ser aproximada por uma linha reta como poderemos ver adiante, esta linha porém não pode ser extrapolada para fora do intervalo determinado justamente pelas relações S-N e ϵ -N serem aproximadas por uma linha reta e pelo fato da verdadeira distribuição de vida em fadiga ser desconhecida.

Também não é recomendado que a vida em fadiga seja estimada para um determinado intervalo de tensão ou deformação abaixo da probabilidade 5% ($P=0,05$).

2.7.1 Terminologia

Importante atentarmos para a terminologia utilizada ao longo do estudo da norma, seguem pontos importantes a serem considerados antes da análise.

- A vida em fadiga, aqui denominada N (ou $\log N$) é a variável dependente, e é denominada com a letra Y.
- A tensão S ou a deformação ϵ representam a variável independente, a qual pode ser selecionada e controlada, e é denominada pela letra X.
- Testes replicados são testes idênticos em diferentes corpos de prova aleatoriamente selecionados para um mesmo nível da variável X.
- *Run-out* é como denomina-se a situação na qual o corpo de prova não falha em determinado número de ciclos de carga.

2.7.2 Amostragem

É extremamente importante que adotemos um procedimento que assegure a aleatoriedade do teste. A amostragem aleatória garante que o experimento represente de forma adequada o universo conceitual no qual nos basearemos para fazer as inferências estatísticas e de engenharia.

O número de amostras é reflexo do tipo de teste a ser feito, conforme Tabela 3 .

Tabela 3: Tipo de Teste X N° mínimo de elementos

Tipo de teste	Número mínimo de elementos
Pesquisa exploratória e desenvolvimento de testes	6 a 12
Pesquisa e teste em desenvolvimentos de componentes	6 a 12
Dados utilizáveis em projetos	12 a 24
Dados confiáveis	12 a 24

Lembrando que se a variabilidade for muito grande um grande intervalo de confiança será gerado, ao menos que utilizemos um maior numero de elementos no teste.

Para cálculo da repetitividade do ensaio utilizamos a fórmula que segue:

$$\%REPLICAÇÃO = 100 \left[\frac{\text{numero total de diferentes niveis de tensão ou deformação utilizados}}{\text{numero de amostras ensaiadas}} \right] \quad (1)$$

Através dos resultados obtidos temos faixas adequadas de porcentagem de replicação de testes de acordo com o tipo de testes que serão feitos. Esta análise possibilita definirmos se o número de corpos de prova e a replicação em cada faixa são apropriados para a finalidade do teste, como apresentado na tabela 4.

Tabela 4: Finalidade do Teste X N° de corpos de prova e replicação.

Tipo de teste	Percentual de replicação
Pesquisa exploratória e desenvolvimento de testes	17 a 33 mínimo
Pesquisa e teste em desenvolvimentos de componentes	33 a 50 mínimo
Dados utilizáveis em projetos	50 a 75 mínimo
Dados confiáveis	75 a 88 mínimo

2.7.3 Análise estatística

Podemos utilizar a análise que será apresentada a seguir em casos aonde a vida em fadiga é gerada por amostras aleatórias, não existem *run-outs* ou testes suspensos para o intervalo de X, o intervalo descrito pelo gráfico S-N ou ϵ -N é descrito por um modelo linear do tipo $Y=A+BX$. A variância da distribuição log-normal (que descreve a vida em fadiga N) é constante no intervalo considerado.

Seguem as fórmulas para cálculo dos estimadores $\hat{A}$ e $\hat{B}$:

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

$$\hat{A} = \bar{Y} - \hat{B}\bar{X} \quad (3)$$

Os parâmetros com barra são as medias do termo, por exemplo, $\bar{Y} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_i}{k}$ e $\bar{X} = \sum_{i=1}^k \frac{X_i}{k}$, aonde $Y_i = \log N_i$, $X_i = S_i$ ou ϵ_i , ou $\log S_i$ ou $\log \epsilon_i$, e k é o numero total de amostras de teste.

Após calcularmos os valores dos estimadores construímos a equação ajustada da curva dos pontos através da equação que segue, com os valores dos estimadores devidamente substituídos:

$$\hat{Y}_i = \hat{A} + \hat{B}X_i \quad (4)$$

A expressão que segue nos permite calcular a variância da distribuição normal de $\log N$:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{k-2} \quad (5)$$

O termo no denominador (k-2) é utilizado no lugar de k para tornar $\hat{\sigma}^2$ um estimador imparcial com relação à variância da população normal σ^2 .

O termo $\hat{\sigma}$ é dado por:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\hat{\sigma}^2} \quad (6)$$

Os parâmetros são normalmente distribuídos conforme os valores esperados de A e B quando as condições anteriormente citadas forem atendidas.

Os intervalos de confiança para $\hat{A}$ e $\hat{B}$ podem ser determinados de acordo com a distribuição de t de student (Tabela 5), seguem as equações para determinação dos intervalos de confiança A e B respectivamente:

$$\hat{A} \pm t_p \hat{\sigma} \left[\frac{1}{k} + \frac{\bar{X}^2}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$\hat{B} \pm t_p \hat{\sigma} \left[\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2 \right]^{-1/2} \quad (8)$$

O valor de t_p é obtido da Tabela 5, com o respectivo valor desejado de P, que é o nível de confiança que é associado ao intervalo de confiança, a letra n representa os graus de liberdade, ou seja, $n=k-2$, aonde k é a quantidade de corpos de prova ensaiados.

Esta medida tomada, nada mais é do que o cálculo da confiança no estimador, ou seja, se utilizarmos um $P=0,95$ para determinar t_p em uma série de análises envolvendo os estimadores B e A poderemos esperar que em uma análise prolongada o valor de B esteja 95 vezes dentro do intervalo computado em 100 e 5 vezes fora.

Tabela 5: Valores de t_p

n	P, %	
	90	95
4	2,1318	2,7764
5	2,015	2,5706
6	1,9432	2,4469
7	1,8946	2,3646
8	1,8595	2,306
9	1,8331	2,2622
10	1,8125	2,2281
11	1,7959	2,201
12	1,7823	2,1788
13	1,7709	2,1604
14	1,7613	2,1448
15	1,753	2,1315
16	1,7459	2,1199
17	1,7396	2,1098
18	1,7341	2,1009
19	1,7291	2,093
20	1,7247	2,086
21	1,7207	2,0796
22	1,7171	2,0739

Por fim calculamos o intervalo de confiança (S-N) que é o obtido pela equação que segue:

$$Y = \hat{A} + \hat{B}X_i + \sqrt{2F_p} \cdot \hat{\sigma} \left[\frac{1}{k} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \right]^{1/2} \quad (9)$$

O valor de F_p é obtido da Tabela 6, que segue.

Tabela 6: Fisher-Snedecor (Valores de Fp)

		Graus de liberdade, n1			
		1	2	3	4
Graus de Liberdade, n2	1	161,45	199,5	215,71	224,58
	2	4052,2	4999,5	5403,3	5624,6
	3	18,513	19	19,164	19,247
	4	8,503	99	99,166	99,249
	5	10,128	9,5521	9,2766	9,1172
	6	34,116	30,817	29,457	28,71
	7	7,7086	6,9443	6,5914	6,3883
	8	21,198	18	16,694	15,977
	9	6,6079	5,7861	5,4095	5,1922
	10	16,258	13,274	12,06	11,392
	11	5,9874	5,1433	4,7571	4,5337
	12	13,745	10,925	9,7795	9,1483
	13	5,5914	4,7374	4,3468	4,1203
	14	12,246	9,5466	8,4513	7,8467
	15	5,3177	4,459	4,0662	3,8378
	16	11,259	8,6491	7,591	7,006
	17	5,1174	4,2565	3,8626	3,6331
	18	10,561	8,0215	6,9919	6,4221
	19	4,9646	4,1028	3,7083	3,478
	20	10,044	7,5594	6,5523	5,9943
	21	4,8443	3,9823	3,5874	3,3567
	22	9,646	7,2057	6,2167	5,6683
	23	4,7472	3,8853	3,4903	3,2592
	24	9,3302	6,9266	5,9526	5,4119
	25	4,6672	3,8056	3,4105	3,1791
	26	9,0738	6,701	5,7394	5,2053
	27	4,6001	3,7389	3,3439	3,1122
	28	8,8616	6,5149	5,5639	5,0354
	29	4,5431	3,6823	3,2874	3,0556
	30	8,6831	6,3589	5,417	4,8932

Os valores para a equação anteriormente descrita são $n_1 = 2$, e o valor de $n_2 = k - 2$ depende da quantidade k de copos de prova ensaiados, temos dois valores de Fp nas faixas da tabela, o valor que se encontra no nível superior se refere a um nível de significância de 5% (P=95%) e as no nível inferior a um nível de 1% (P=1%) de significância.

3. EXPERIMENTO

Para o presente experimento nos utilizamos de uma máquina para análise de ensaios de tração axial com sistema servo-hidráulico Instron modelo 8801, esta máquina pertence ao departamento de engenharia de materiais (DMT) da FEG/UNESP e foi adquirida durante execução de projeto FAPESP-99/06049-5.

Na Figura 18 podemos visualizar a máquina utilizada no ensaio.



Figura 18: Vista Geral da Máquina de Ensaio de Fadiga - INSTRON 8000

Este ensaio tem como objetivo determinar como o corpo de prova se comporta quando submetido a cargas cíclicas por longos períodos de tempo com determinados níveis de tensão.

Os resultados são obtidos através de gráficos de tensão X deformação, e desta forma podemos determinar propriedades mecânicas como tensão de ruptura, limite de resistência à tração e limite de resistência ao escoamento, por exemplo.

A Figura 19 demonstra a interface do programa da máquina de ensaios de fadiga.

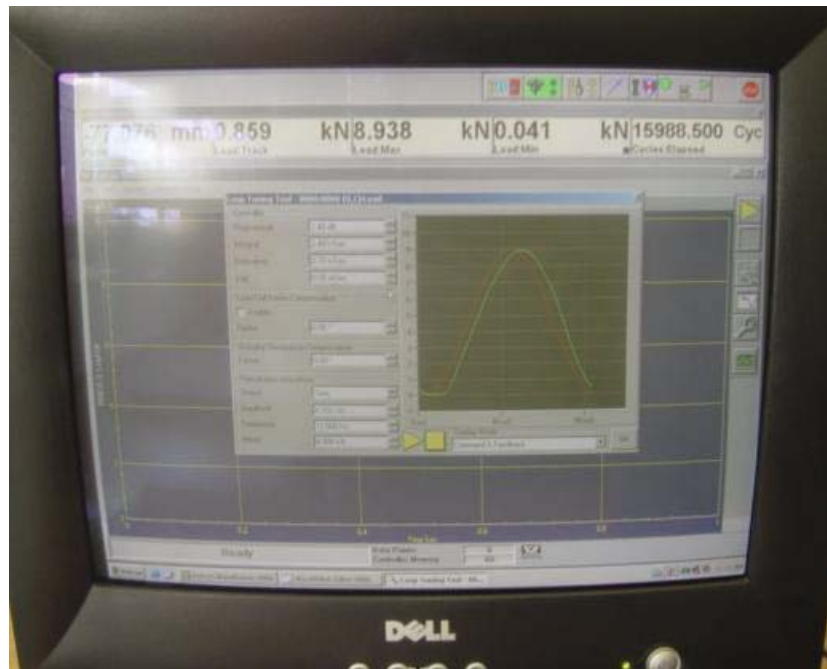


Figura 19: Interface do Programa, detalhe dos parâmetros utilizados.

Utilizamos-nos de um carregamento senoidal com controle de tensão e amplitude constante, a frequência utilizada foi de 20hz e a razão de carregamento $R=0,1$, todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, já que o laboratório não é climatizado.

Tanto para a liga de alumínio 7012 solubilizada e precipitada a 180°C por 6 horas quanto para a solubilizada e precipitada 120°C por 24 horas consideramos a tensão de escoamento igual a 495 MPa, a partir daí fomos criando níveis de tensão.

Para a liga de alumínio 7012 tratada a 120°C por 24h utilizamos 16 corpos de prova em sete diferentes níveis de tensão (0,85; 0,80; 0,78; 0,77; 0,765; 0,76; 0,75), tivemos um problema com um corpo de prova no nível 78% da tensão de escoamento, aonde houve rompimento da garra, sendo este automaticamente descartado do experimento, finalizando com apenas 15 corpos de prova.

Já para a liga de alumínio 7012 tratada a 180°C por 6h utilizamos inicialmente 13 corpos de prova e sete diferentes níveis de tensão (0,80; 0,75; 0,70; 0,65; 0,60; 0,55 0,50), porém houve rompimento da garra no nível de tensão 70% da tensão de escoamento, então finalizamos o experimento com 12 corpos de prova e seis níveis de tensão.

Maiores detalhes serão mostrados nas tabelas que se encontram na discussão dos resultados (próximo capítulo).

Aferimos o diâmetro dos corpos de prova - que são dados importantes no sentido de determinar a tensão a qual foi submetido o corpo - com paquímetro digital, e então os corpos de prova foram devidamente identificados.

Também aferimos as cargas mínima e máxima para cada situação além da carga média, amplitude e número de ciclos completam os parâmetros obtidos em ensaio.

Na Figura 20 temos os corpos de prova utilizados no ensaio, podemos observar que um deles, inclusive, não sofreu ruptura por fadiga.



Figura 20: Corpos de Prova utilizados nos testes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados obtidos experimentalmente

Após finalizarmos as partes experimentais do presente trabalho como já apresentadas anteriormente, obtemos uma série de valores que contém os corpos de prova utilizados, os níveis de tensão bem como o número de ciclos suportados pelo corpo antes da ruptura.

Antes de nos aprofundarmos na análise estatística dos dados obtidos vamos nos atentar aos resultados obtidos para cada tipo de material utilizado.

Tabela 7: Resultados para Alumínio tratado e solubilizado por 24horas a 120°C

%	cdp	Tensão [Mpa]	d [mm]	P _{máx} [KN]	P _{mín} [KN]	P _{med} [KN]	Amp [KN]	Ciclos	Data do ensaio
.85	11	420,75	5,10	8,595	0,860	4,727	3,868	34.032,00	25/08/2011
.85	12	420,75	5,14	8,731	0,873	4,802	3,929	44.588,00	25/08/2011
.80	1	396,00	5,09	8,058	0,806	4,432	3,626	90.546,00	17/08/2011
.80	2	396,00	5,09	8,058	0,806	4,432	3,626	95.367,00	18/08/2011
.78	4	386,10	5,10	7,887	0,789	4,338		801.038,00	19/08/2011
.78	5	386,10	5,12	7,949	0,795	4,372	3,577	158.567,00	20/08/2011
.78	6	386,10	5,12	7,949	0,795	4,372	3,577	79.108,00	23/08/2011
.78	10	386,10	5,04	7,703	0,770	4,237	3,466	79.463,00	24/08/2011
.77	13	381,15	5,21	8,126	0,813	4,469	3,657	76.892,00	25/08/2011
.77	15	381,15	5,23	8,188	0,819	4,504	3,685	67.392,00	25/08/2011
.76,5	7	378,67	5,12	7,796	0,780	4,288	3,508	164.304,00	23/08/2011
.76,5	8	378,67	5,12	7,796	0,780	4,288	3,508	329.778,00	23/08/2011
.76,5	9	378,67	5,13	7,827	0,783	4,305	3,522	157.790,00	24/08/2011
.76	14	376,20	5,23	8,082	0,808	4,445	3,637	52.433,00	25/08/2011
.76	16	376,20	5,23	8,082	0,808	4,445	3,637	69.728,00	26/08/2011
.75	3	371,25	5,09	7,554	0,755	4,155	3,399	1.000.000,00	18/08/2011

Na Tabela 7 temos os resultados já apresentados anteriormente na descrição da parte experimental para a liga de alumínio 7012 solubilizada e precipitada a 120°C por 24horas, importante salientar que o corpo de prova destacado em vermelho será desconsiderado em nossa análise estatística, uma vez que houve rompimento da garra no meio do ensaio de fadiga.

Observa-se, apesar de não muito claramente devido aos desvios existentes nesse tipo de ensaio, uma tendência no aumento da vida em fadiga para valores de tensão menores, ou seja, na faixa de tensão de 85% da tensão de escoamento temos um numero bem menor de ciclos computados até a ruptura do corpo do que em valores menores de tensão, como por exemplo, 75% da tensão de escoamento que é o menor valor de tensão utilizado nesse experimento.

Temos ainda os dados colhidos para liga de alumínio 7012 solubilizada e precipitada a 180°C por 6 horas na tabela 8.

Tabela 8: Resultados para Alumínio tratado e solubilizado por 6 h a 180°C

cdp	%	Tensão [Mpa]	d [mm]	P _{máx} [KN]	P _{mín} [KN]	P _{med} [KN]	Amp [KN]	Ciclos	Data do ensaio
1	.80	396,00	4,80	7,166	0,717	3,941	3,225	49.420,00	21/02/2011
14	.80	396,00	4,99	7,744	0,774	4,259	3,485	107.672,00	02/05/2011
2	.75	371,25	4,80	6,718	0,672	3,695	3,023	50.955,00	21/02/2011
12	.75	371,25	5,01	7,319	0,732	4,025	3,293	299.996,00	01/05/2011
16	.75	371,25	6,71	13,128	1,313	7,220	5,908	75.995,00	23/02/2011
15	.70	346,50	5,01	6,831	0,683	3,757		769.565,00	02/05/2011
13	.65	321,75	5,01	6,343	0,634	3,489	2,854	1.000.000,00	01/05/2011
4	.65	321,75	4,85	5,944	0,594	3,269	2,675	346.455,00	21/02/2011
3	.60	297,00	4,83	5,442	0,544	2,993	2,449	209.457,00	21/02/2011
8	.55	272,00	5,01	5,362	0,536	2,949	2,413	1.000.000,00	29/04/2011
5	.55	272,25	4,89	5,113	0,511	2,812	2,301	148.080,00	23/02/2011
6	.55	272,25	4,92	5,176	0,518	2,847	2,329	78.048,00	25/02/2011
7	.50	297,00	4,93	5,669	0,567	3,118	2,551	100.000,00	23/02/2011

Importante salientar que também tivemos rompimento de garra neste experimento, os dados referentes a este corpo de prova esta grifado em vermelho, portanto vamos desconsiderá-lo na nossa análise estatística.

Neste experimento os dados obtidos de ciclos até ruptura se apresentaram mais dispersos, o que até certo ponto tende a dificultar nossa análise. Essa dispersão é justamente uma dos maiores problemas que nos levam a recorrer á análise estatística que faremos agora.

Mas antes de fazermos a análise vamos apresentar os dados obtidos experimentalmente e também uma curva típica para o alumínio para termos uma base do grau de dispersão dos nossos dados.



Figura 21: Curva de Wohler (S-N)

Na Figura 21, temos as duas curvas S-N com o comportamento ideal para ensaios de fadiga em materiais com limite de fadiga (curva A), aonde abaixo de certo nível de tensão não temos mais falha por fadiga, e em materiais sem este limite, ou seja, sempre ocorrerá rompimento do material por fadiga, ocorrendo um numero maior de ciclos conforme estabelecermos um nível menor de tensão.

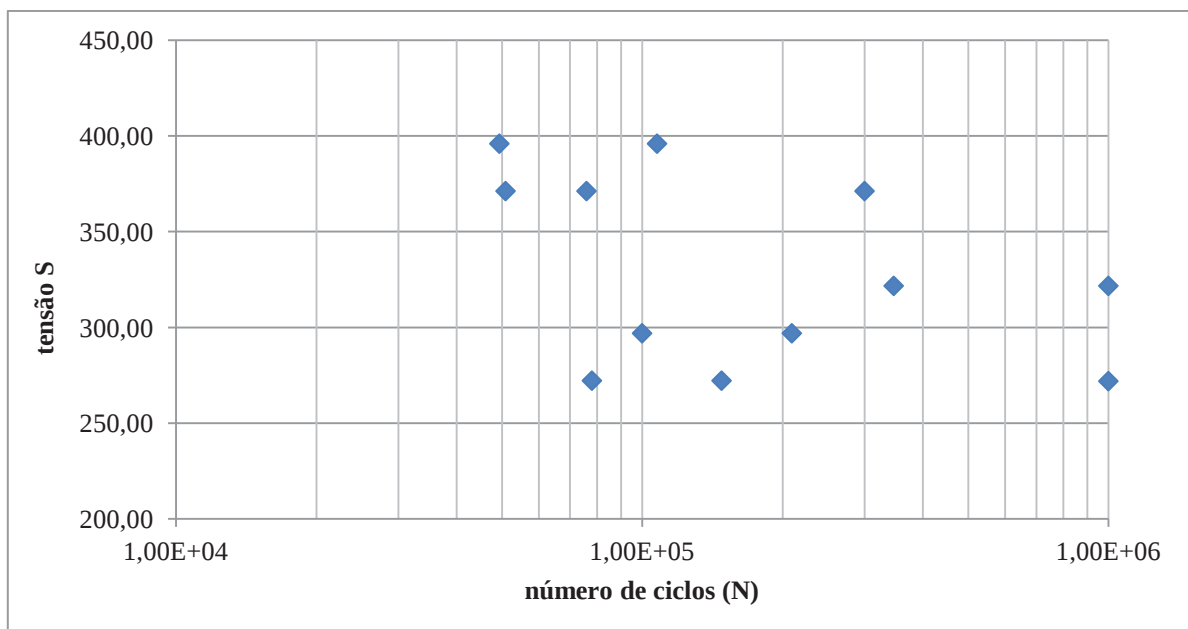


Figura 22: Curva S-N para o alumínio solubilizado e precipitado a 180°C por 6h.

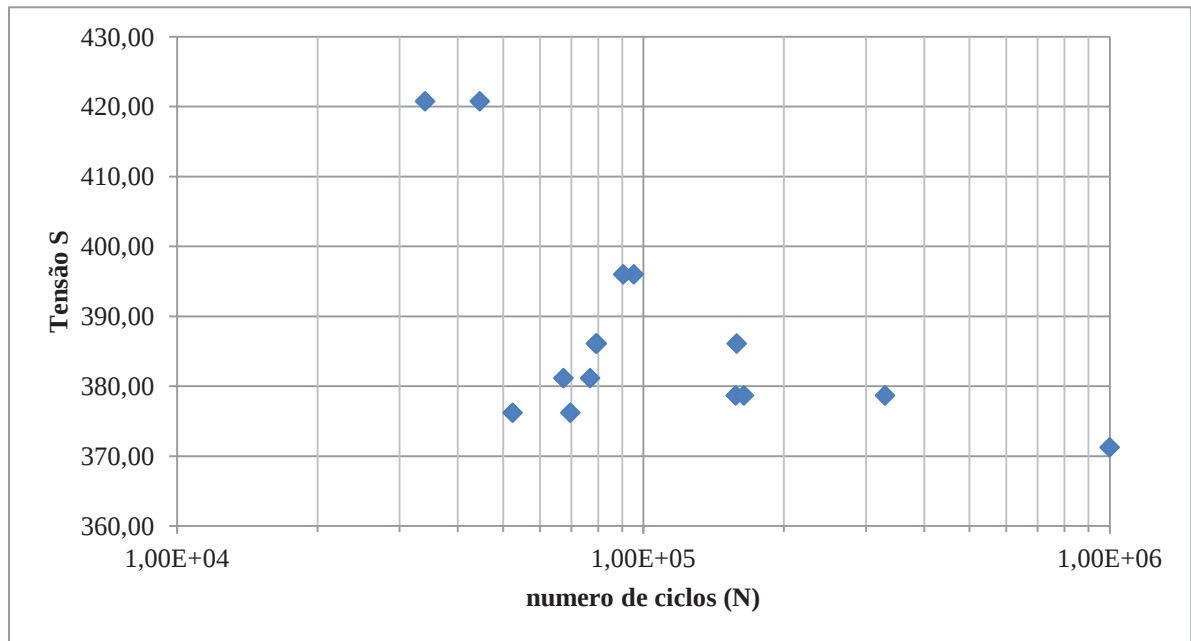


Figura 23: Curva S-N para o alumínio solubilizado e precipitado a 120°C por 24h.

Nas curvas acima (Figuras 22 e 23) notamos claramente o grau de dispersão dos pontos para os experimentos feitos com os dois tipos de ligas, ao compararmos com as curvas ideais vemos que não é possível estabelecermos uma similaridade com clareza.

Para esses casos é interessante nos valermos das ferramentas estatísticas para modelarmos de forma a estabelecer parâmetros para análise dos dados e grandezas, e relacioná-las com o material que estamos estudando.

4.2 Análises estatísticas dos dados conforme a norma E739

A partir deste ponto nos concentraremos na análise estatística dos dados obtidos em teste, seguiremos a sequência previamente estabelecida na fundamentação teórica, destacando os passos e comentando os dados obtidos.

4.2.1 Amostragem

Para garantirmos a aleatoriedade de nossos dados nos baseamos no tipo de análise a ser feita, nos baseamos na Tabela 3 que nos dá os tipos de análise que podem ser feitas e também as quantidades de corpos de prova correspondentes para cada uma.

Para a presente análise vamos considerar a faixa “dados utilizáveis em projetos”, ou seja, devemos analisar de 12 a 24 corpos de prova para garantir esta aleatoriedade dos nossos dados.

A seguir devemos calcular a repetitividade dos dados obtidos nos dois experimentos através da equação (1).

Para a liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 120°C por 24h temos um numero de níveis de tensão igual a 7, e 15 corpos de prova ensaiados, logo:

$$\%replicação = 100 \left(1 - \frac{7}{15} \right) = 53,3$$

Para a liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 180°C por 6h temos um numero de níveis de tensão igual a 6, e 12 corpos de prova ensaiados, logo:

$$\%replicação = 100 \left(1 - \frac{6}{12} \right) = 50$$

Pela Tabela 4 chegamos à conclusão de que a porcentagem de replicação é adequada nos dois casos analise com dados utilizáveis em projeto.

4.2.2 Análise estatística

Prosseguindo com a nossa análise, no próximo passo devemos calcular os estimadores $\hat{A}$ e $\hat{B}$, para tal nos utilizaremos das equações (2) e (3), e para tanto se faz necessário o cálculo de outros parâmetros.

Dentro deste contexto vamos avançando no calculo destes parâmetros até alcançarmos os estimadores previamente citados, em primeiro lugar vamos determinar os valores básicos para este calculo.

Importante frisar que no gráfico SxN para a norma o eixo vertical é representado pela letra X , X_i são as tensões para cada corpo de prova, i denota qual a qual corpo de prova estamos nos referindo.

No eixo horizontal, aqui denominado Y (e Y_i os ciclos atingidos por cada corpo) temos os números de ciclos N , aqui utilizaremos o logaritmo na base 10 de N , dado a grandeza destes números.

As Tabelas 9 e 10 apresentam estes valores e as transformações realizadas, é importante destacar que já eliminamos os ensaios que deram problemas de execução (verificar seção 4.1).

Tabela 9: Liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 180°C por 6h

CDP	Ciclos (N)	Tensão (S)	$Y_i = \log N$	$X_i = S$
7	100.000,0	247,5	5,0	247,5
6	78.048,0	272,3	4,9	272,3
5	148.080,0	272,3	5,2	272,3
8	1.000.000,0	272,0	6,0	272,0
3	209.457,0	297,0	5,3	297,0
4	346.455,0	321,8	5,5	321,8
13	1.000.000,0	321,8	6,0	321,8
16	75.995,0	371,3	4,9	371,3
12	299.996,0	371,3	5,5	371,3
2	50.955,0	371,3	4,7	371,3
14	107.672,0	396,0	5,0	396,0
1	49.420,0	396,0	4,7	396,0

Tabela 10: Liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 120°C por 24h

CDP	Ciclos (N)	Tensão (S)	$Y_i = \log N$	$X_i = S$
3	1000000,0	371,3	6,0	371,3
16	69728,0	376,2	4,8	376,2
14	52433,0	376,2	4,7	376,2
9	157790,0	378,7	5,2	378,7
8	329778,0	378,7	5,5	378,7
7	164304,0	378,7	5,2	378,7
15	67392,0	381,2	4,8	381,2
13	76892,0	381,2	4,9	381,2
10	79463,0	386,1	4,9	386,1
6	79108,0	386,1	4,9	386,1
5	158567,0	386,1	5,2	386,1
2	95367,0	396,0	5,0	396,0
1	90546,0	396,0	5,0	396,0
12	44588,0	420,8	4,6	420,8
11	34032,0	420,8	4,5	420,8

Também vamos precisar dos valores médios $\bar{X}$ e $\bar{Y}$ para cada experimento, cujo cálculo pode ser feito pelas equações já previamente apresentadas na seção 2.7.3.

	$\bar{Y}$	$\bar{X}$
120°C/24h	5,02	387,58
180°C/6h	5,2	325,9

A partir destes dados, poderemos calcular vários valores necessários para posteriormente determinarmos diversos parâmetros necessários para esta análise.

A seguir alguns destes valores nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11: Valores para Cálculos de parâmetros da liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado 120°C/24h

CDP	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$	$Y_i - \bar{Y}$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	$(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$
3	-16,3	266,8	0,98	0,96	-15,98
16	-11,4	129,6	-0,18	0,03	2,03
14	-11,4	129,6	-0,30	0,09	3,44
9	-8,9	79,5	0,18	0,03	-1,57
8	-8,9	79,5	0,50	0,25	-4,43
7	-8,9	79,5	0,19	0,04	-1,73
15	-6,4	41,4	-0,19	0,04	1,24
13	-6,4	41,4	-0,14	0,02	0,87
10	-1,5	2,2	-0,12	0,01	0,18
6	-1,5	2,2	-0,12	0,02	0,18
5	-1,5	2,2	5,20	27,04	-7,72
2	8,4	70,8	-0,04	0,00	-0,36
1	8,4	70,8	-0,06	0,00	-0,55
12	33,2	1100,0	-0,37	0,14	-12,35
11	33,2	1100,0	-0,49	0,24	-16,24
SOMATÓRIO		3195,4	5,02	28,9	-53,0

Tabela 12: Valores para Cálculos de parâmetros da liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado 180°C/6h

CDP	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$	$Y_i - \bar{Y}$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	$(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$
7	-78,4	6139,4	-0,23	0,05	17,73
6	-53,6	2873,4	-0,33	0,11	17,90
5	-53,6	2873,4	-0,06	0,00	2,99
8	-53,9	2900,3	0,77	0,60	-41,67
3	-28,9	832,6	0,09	0,01	-2,74
4	-4,1	16,8	0,31	0,10	-1,29
13	-4,1	16,8	0,77	0,60	-3,18
16	45,4	2060,8	-0,35	0,12	-15,68
12	45,4	2060,8	0,25	0,06	11,39
2	45,4	2060,8	-0,52	0,27	-23,56
14	70,1	4920,4	-0,19	0,04	-13,62
1	70,1	4920,4	-0,53	0,28	-37,34
SOMATÓRIO		31675,9	0,00	2,2	-89,1

Com esses valores em mente agora poderemos calcular os estimadores $\hat{A}$ e $\hat{B}$ através das Equações (2) e (3) previamente citadas.

Para a liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 120°C por 24h temos:

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} = \frac{-53}{3195,4} = -0,0166$$

$$\hat{A} = \bar{Y} - \hat{B}\bar{X} = 5,02 - (-0,0166 \cdot 387,58) = 11,45$$

Já para a liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 180°C por 6h temos:

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} = \frac{-89,1}{31675,9} = -0,0028$$

$$\hat{A} = \bar{Y} - \hat{B}\bar{X} = 5,2 - (-0,0028 \cdot 325,9) = 6,1$$

De forma geral temos então os valores seguintes para os estimadores:

	$\hat{A}$	$\hat{B}$
120° 24h	11,45	-0,0166
180° 6h	6,1	-0,0028

Substituindo os valores na Equação (4) temos:

$$\hat{Y}_i = 11,45 - 0,0166X_i$$

Ajustada para a liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 120°C 24h.

$$\hat{Y}_i = 6,1 - 0,0028X_i$$

E ajustada para a liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 180°C 6h

Com essas equações em mãos podemos determinar a curva ajustada dos pontos do gráfico de SxN e também determinar a variância e o desvio padrão dos dados em questão, o valor $\hat{Y}_i$ normal é o valor que será efetivamente plotado juntamente com os níveis de tensão para levantarmos a curva ajustada dos pontos.

Vamos agora construir uma tabela que vai facilitar o cálculo das grandezas necessárias para prosseguirmos com a análise (Tabela 13 e 14).

Tabela 13: Valores para cálculos de parâmetros liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado 180°/6h.

CDP	$\hat{Y}_i$	$Y_i - \hat{Y}_i$	$(Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$\hat{Y}_i - \bar{Y}$	$(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	$\hat{Y}_i$ normal
7	5,41	-0,41	0,168	0,21	0,0441	257039,5783
6	5,34	-0,45	0,200	0,14	0,0196	218776,1624
5	5,34	-0,17	0,029	0,14	0,0196	218776,1624
8	5,34	0,66	0,436	0,14	0,0196	218776,1624
3	5,27	0,05	0,003	0,07	0,0049	186208,7137
4	5,2	0,34	0,115	0,00	0	158489,3192
13	5,2	0,80	0,640	0,00	0	158489,3192
16	5,06	-0,18	0,032	-0,14	0,0196	114815,3621
12	5,06	0,42	0,174	-0,14	0,0196	114815,3621
2	5,06	-0,35	0,124	-0,14	0,0196	114815,3621
14	4,99	0,04	0,002	-0,21	0,0441	97723,7221
1	4,99	-0,30	0,088	-0,21	0,0441	97723,7221
Somatório	62,26	0,45	2,011	-0,14	0,2548	

Tabela 14: Valores para cálculos de parâmetros liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado 120°C/ 24h.

CDP	$\hat{Y}_i$	$Y_i - \hat{Y}_i$	$(Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$\hat{Y}_i - \bar{Y}$	$(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	$\hat{Y}_i$ normal
3	5,28	0,72	0,51	0,265	0,0700	192579,9296
16	5,21	-0,37	0,13	0,190	0,0361	162181,0097
14	5,21	-0,49	0,24	0,190	0,0361	162181,0097
9	5,16	0,04	0,00	0,140	0,0196	144543,9771
8	5,16	0,36	0,13	0,140	0,0196	144543,9771
7	5,16	0,06	0,00	0,140	0,0196	144543,9771
15	5,12	-0,29	0,08	0,100	0,0100	131825,6739
13	5,12	-0,23	0,05	0,100	0,0100	131825,6739
10	5,04	-0,14	0,02	0,020	0,0004	109647,8196
6	5,04	-0,14	0,02	0,020	0,0004	109647,8196
5	5,04	0,16	0,03	0,020	0,0004	109647,8196
2	4,87	0,11	0,01	-0,150	0,0225	74131,0241
1	4,87	0,09	0,01	-0,150	0,0225	74131,0241
12	4,46	0,19	0,04	-0,560	0,3136	28840,3150
11	4,46	0,07	0,01	-0,560	0,3136	28840,3150
Somatório	75,20	0,12	1,29	-0,095	0,8944	

Com os dados obtidos das Tabelas 13 e 14 calcularemos a variância e o desvio padrão através das Equações (5) e (6) primeiramente para a liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 120°C 24h (k=15).

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})^2}{k-2} = \frac{1,29}{13} = 0,0992$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\hat{\sigma}^2} = 0,315$$

E então para a liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 180°C 6h (k=12).

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})^2}{k-2} = \frac{2,011}{10} = 0,2011$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\hat{\sigma}^2} = 0,448$$

A partir deste momento iremos determinar os intervalos de confiança nos baseando nas equações (7) e (8), previamente apresentadas, nos utilizaremos também a Tabela 5, com os valores de t_{student} com os valores $n=13$ ($n=k-2$) para o alumínio tratado a 120°C e $n=10$ para o tratado a 180°C e para 95% de intervalo de confiança nos dois casos.

Primeiramente para a liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 180°C por 6h:

$$\hat{A} \pm t_p \hat{\sigma} \left[\frac{1}{k} + \frac{\bar{X}^2}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \right]^{1/2} \rightarrow 6,1 \pm 2,2281 \cdot 0,315 \cdot \left[\frac{1}{12} + \frac{106210,81}{31675,9} \right]^{1/2}$$

Desta forma temos um intervalo de confiança para $\hat{A}$ de:

$$6,1 \pm 1,301$$

$$\hat{B} \pm t_p \hat{\sigma} [\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2]^{-1/2} \rightarrow -0,0028 \pm 2,2281 \cdot 0,315 [31675,9]^{-1/2}$$

Para o estimador $\hat{B}$ temos um intervalo de confiança de:

$$-0,0028 \pm 0,00394$$

De forma geral temos os valores dos intervalos de confiança para o alumínio tratado a 180 °C/6h citados na tabela 15.

Tabela 15: Intervalo de Confiança liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado 180°C/6h

Intervalo de confiança			
$\hat{A}$	6,1	1,301	7,401
		-1,301	4,799
$\hat{B}$	-0,0028	0,00394	0,00114
		-0,00394	-0,00674

E então, para a liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 120°C por 24h:

$$\hat{A} \pm t_p \hat{\sigma} \left[\frac{1}{k} + \frac{\bar{X}^2}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \right]^{1/2} \rightarrow 11,45 \pm 2,1604 \cdot 0,427 \cdot \left[\frac{1}{15} + \frac{150218,25}{3195,4} \right]^{1/2}$$

Da mesma forma ficamos com o intervalo de confiança para o estimador $\hat{A}$:

$$11,45 \pm 6,3294$$

$$\hat{B} \pm t_p \hat{\sigma} \left[\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2 \right]^{-1/2} \rightarrow -0,0116 \pm 2,1604 \cdot 0,427 \cdot [3195,4]^{-1/2}$$

E os valores para o estimador $\hat{B}$ são:

$$-0,0116 \pm 0,0163$$

De forma geral temos os valores dos intervalos de confiança para o alumínio tratado a 120°C/24h citados na tabela 16.

Tabela 16: Intervalo de Confiança liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado 120°C/24h

Intervalo de confiança			
$\hat{A}$	11,45	6,3294	17,7794
		-6,3294	5,1206
$\hat{B}$	-0,0166	0,0163	-0,0003
		-0,0163	-0,0329

O último passo é calcularmos o intervalo de confiança da curva S-N utilizando a equação (15), devemos determinar o valor de F_p , aonde $n_1=2$ (valor fixo), e $n_2=k-2$, utilizaremos um nível de significância de 5% (já explicado na fundamentação teórica).

Para a liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 180°C por 6h temos $n_2=10$, e $F_p = 4,1028$ consequentemente considerando todas as observações feitas, logo:

$$Y_i = \hat{A} + \hat{B}X_i + \sqrt{2F_p} \cdot \hat{\sigma} \left[\frac{1}{k} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Y_i = 6,1 - 0,0028X_i + \sqrt{2.4,1028} \cdot 0,427 \left[\frac{1}{12} + \frac{(X_i - 325,9)^2}{31675,9} \right]^{1/2}$$

$$Y_i = 6,1 - 0,0028X_i + 1,2231 \left[\frac{1}{12} + \frac{(X_i - 325,9)^2}{31675,9} \right]^{1/2}$$

Para a liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 120°C por 24h temos $n_2=13$, e $F_p=3,856$ consequentemente, então:

$$Y_i = 11,45 - 0,0166X_i + \sqrt{2.3,8056} \cdot 0,315 \left[\frac{1}{15} + \frac{(X_i - 387,9)^2}{3195,4} \right]^{1/2}$$

$$Y_i = 11,45 - 0,0166X_i + 0,8747 \left[\frac{1}{15} + \frac{(X_i - 387,9)^2}{3195,4} \right]^{1/2}$$

Os valores de Y_i obtidos para cada tensão X_i a partir da equação obtida para os dois casos geram os limites superior e inferior do intervalo de confiança da curva obtida.

Desta forma, a seguir apresentaremos a tabela com os valores já calculados de Y_i para cada nível de tensão X_i , bem como o valor de $Y_{i \text{ normal}} = 10^{Y_i}$, que é o valor usado definitivamente para ser plotado no gráfico.

Primeiramente para a liga tratada a 180°C por 6h temos os dados apresentados na tabela 17.

Tabela 17: Intervalo de confiança para a liga tratada a 180°C/6h.

Intervalo de confiança (S-N)				
Inferior			Superior	
Xi	Yi	Yi Normal	Yi = log N	Yi Normal
396,00	4,4887	30.808,3235	5,5693	370.921,4778
396,00	4,4887	30.810,5889	5,5693	370.936,8674
371,25	4,6725	47.047,4258	5,5246	334.662,9821
371,25	4,6725	47.043,5406	5,5246	334.657,0666
371,25	4,6725	47.043,5406	5,5246	334.657,0666
321,75	4,9175	82.695,8174	5,5580	361.448,9688
321,75	4,9175	82.698,9509	5,558	361.409,8626
297,00	4,9412	87.336,0940	5,6735	471.552,7320
272,00	4,9151	82.251,4048	5,8402	692.118,0835
272,25	4,9156	82.330,9499	5,8384	689.214,4904
272,25	4,9156	82.337,9405	5,8384	689.286,8607
247,50	4,8643	73.167,4489	6,0288	1.068.545,7187

E finalmente os dados para a liga tratada a 120°C por 24h temos os dados apresentados na tabela 18:

Tabela 18: Intervalo de confiança para a liga tratada a 120°C/24h.

Intervalo de confiança (S-N)				
Inferior			Superior	
Xi	Yi	Yi Normal	Yi = log N	Yi Normal
371,25	4,9301	85.125,6265	5,6549	451.777,4226
376,20	4,9042	80.198,4713	5,5167	328.616,1664
376,20	4,9042	80.204,7335	5,5167	328.624,5467
378,67	4,8865	77.003,4304	5,4524	283.429,9989
378,67	4,8865	77.001,6444	5,4524	283.400,1006
378,67	4,8865	77.001,6444	5,4524	283.400,1006
381,15	4,8644	73.189,4413	5,3923	246.761,1320
381,15	4,8644	73.181,2798	5,3923	246.774,3405
386,10	4,8036	63.615,2697	5,2890	194.551,2312
386,10	4,8036	63.620,9281	5,2890	194.536,0082
386,10	4,8036	63.620,9281	5,2890	194.536,0082
396,00	4,6034	40.124,1631	5,1609	144.853,7393
396,00	4,6034	40.123,6100	5,1609	144.843,8300
420,75	3,8723	7.452,5059	5,0714	117.864,8264
420,75	3,8723	7.452,4659	5,0714	117.869,1088

Finalmente temos todos os dados necessários para construirmos a curva S-N ajustada com intervalo de confiança de 95% construída de acordo com a norma *ASME E739*, seguem primeiramente os dados (Tabelas 19 e 20) que darão origem aos gráficos e em seguida os gráficos propriamente ditos (Figuras 24 e 25).

Tabela 19: Dados para a curva S-N relativa ao gráfico da liga de alumínio solubilizada e precipitada a 180°C /6h

Alumínio tratado e solubilizado a 180°C/6h								
CDP	Coleta de dados		Curva corrigida		Limite inferior		Limite superior	
	Xi=S (Mpa)	N	Xi=S (Mpa)	$\bar{Y}_i$ normal	Xi=S (Mpa)	Yi normal	Xi=S (Mpa)	Yi Normal
7	247,5	100.000,0	247,5	257039,5	247,5	30.808,3	247,5	370.921,4
6	272,3	78.048,0	272,3	218776,1	272,3	30.810,5	272,3	370.936,8
5	272,3	148.080,0	272,3	218776,1	272,3	47.047,4	272,3	334.662,9
8	272,0	1.000.000,0	272,0	218776,1	272,0	47.043,5	272,0	334.657,0
3	297,0	209.457,0	297,0	186208,7	297,0	47.043,5	297,0	334.657,0
4	321,8	346.455,0	321,8	158489,3	321,8	82.695,8	321,8	361.448,9
13	321,8	1.000.000,0	321,8	158489,3	321,8	82.698,9	321,8	361.409,8
16	371,3	75.995,0	371,3	114815,3	371,3	87.336,0	371,3	471.552,7
12	371,3	299.996,0	371,3	114815,3	371,3	82.251,4	371,3	692.118,0
2	371,3	50.955,0	371,3	114815,3	371,3	82.330,9	371,3	689.214,4
14	396,0	107.672,0	396,0	97723,7	396,0	82.337,9	396,0	689.286,8
1	396,0	49.420,0	396,0	97723,7	396,0	73.167,4	396,0	1.068.545,7

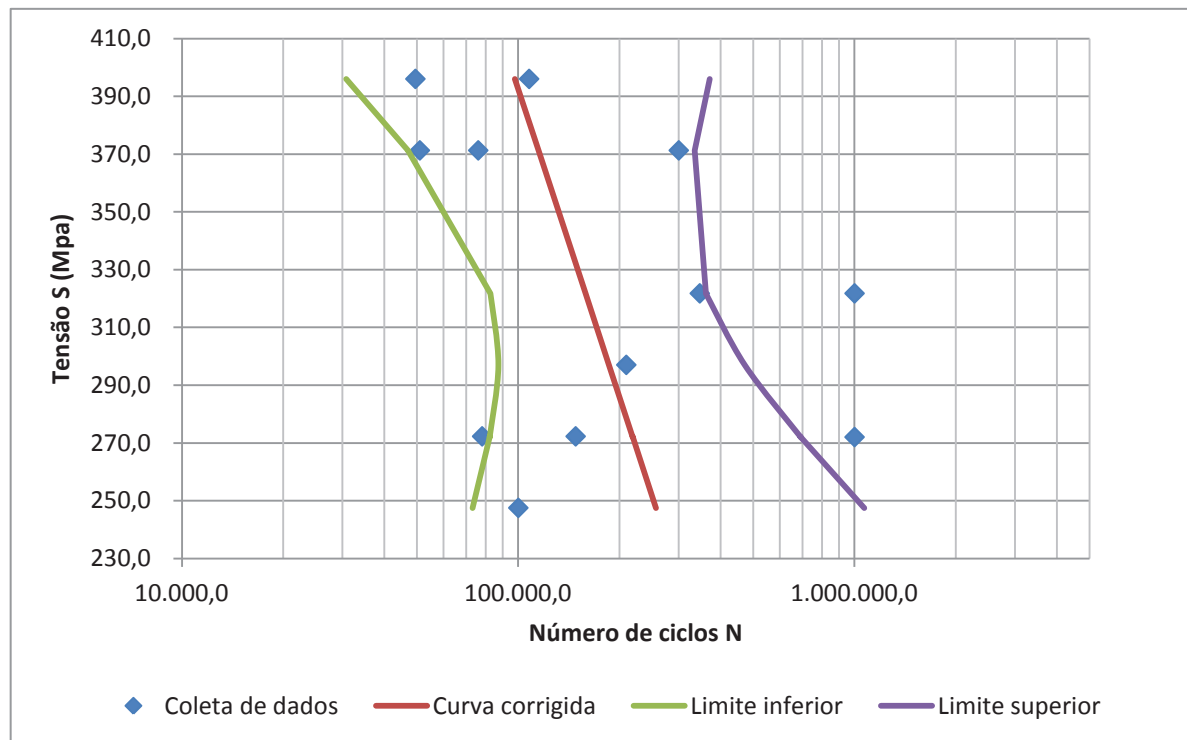


Figura 24: Curva S-N para a liga tratada a 180°C/6h.

Tabela 20: Dados para a curva S-N relativa ao gráfico da liga de alumínio solubilizada e precipitada a 120°C/24h

Alumínio tratado e solubilizado a 120°C/24h								
CDP	Coleta de dados		Curva corrigida		Limite inferior		Limite superior	
	Xi=S (Mpa)	N	Xi=S (Mpa)	 Yi normal	Xi=S (Mpa)	Yi normal	Xi=S (Mpa)	Yi normal
3	371,3	1000000,0	371,3	192579,9	371,3	85.125,6	371,3	451.777,4
16	376,2	69728,0	376,2	162181,0	376,2	80.198,4	376,2	328.616,1
14	376,2	52433,0	376,2	162181,0	376,2	80.204,7	376,2	328.624,5
9	378,7	157790,0	378,7	144543,9	378,7	77.003,4	378,7	283.429,9
8	378,7	329778,0	378,7	144543,9	378,7	77.001,6	378,7	283.400,1
7	378,7	164304,0	378,7	144543,9	378,7	77.001,6	378,7	283.400,1
15	381,2	67392,0	381,2	131825,6	381,2	73.189,4	381,2	246.761,1
13	381,2	76892,0	381,2	131825,6	381,2	73.181,2	381,2	246.774,3
10	386,1	79463,0	386,1	109647,8	386,1	63.615,2	386,1	194.551,2
6	386,1	79108,0	386,1	109647,8	386,1	63.620,9	386,1	194.536,0
5	386,1	158567,0	386,1	109647,8	386,1	63.620,9	386,1	194.536,0
2	396,0	95367,0	396,0	74131,0	396,0	40.124,1	396,0	144.853,7
1	396,0	90546,0	396,0	74131,0	396,0	40.123,6	396,0	144.843,8
12	420,8	44588,0	420,8	28840,3	420,8	7.452,5	420,8	117.864,8
11	420,8	34032,0	420,8	28840,3	420,8	7.452,4	420,8	117.869,1

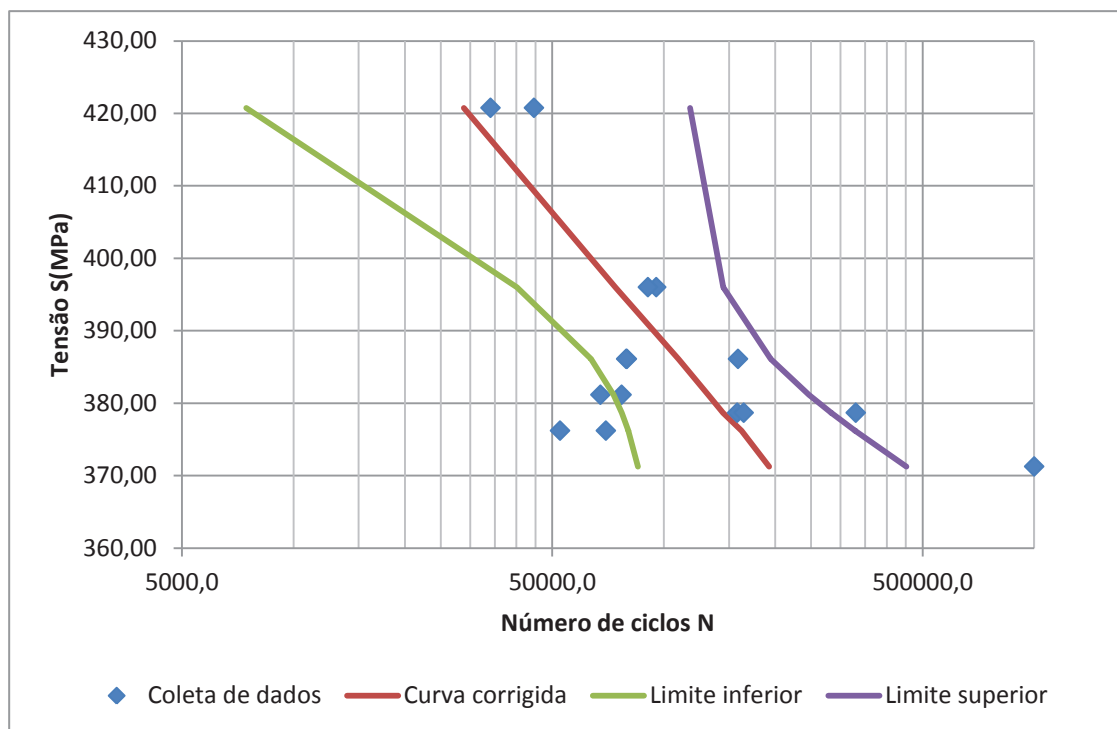


Figura 25: Curva S-N para a liga tratada a 120°C/24h.

Comparando as curvas verificamos que o alumínio tratado a 120°C por 24hs apresenta um maior nível de resistência à fadiga do que o tratado a 180°C por 6h para níveis de tensão menores, por exemplo, a 371,3MPa temos 192579 ciclos para o tratado a 120°C por 24hs e 114815 ciclos para o tratado a 180°C por 6h; no nível de tensão 396MPa temos 74131 ciclos para o tratado a 120°C por 24h e 97723 ciclos para o tratado a 180°C por 6h, ou seja, o comportamento se inverte em maiores níveis de tensão, o tratado a 180°C por 6h passa a ser mais resistente à fadiga que o tratado a 120°C por 24h.

Para efeito comparativo das curvas obtidas apresentamos a Figura 26, uma curva com dados mais precisos:

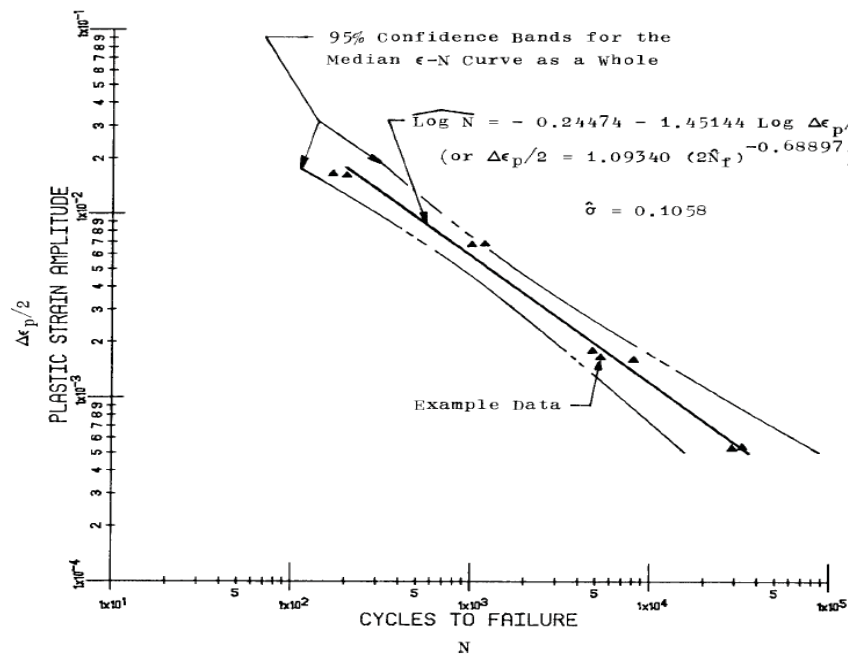


Figura 26: Curva ϵ -N (ASME E739-91).

5 CONCLUSÃO

Após finalizarmos a construção dos gráficos, obtidos com base nos procedimentos fixados pela norma *ASTM E739*, notamos que a curva obtida para a liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 180°C por 6h apresentou desvio da idealidade, uma vez que, obtivemos uma curva corrigida acentuadamente vertical, os limites de confiança para a curva corrigida inferiores e superiores estão bem afastados da mesma, este é um efeito que denuncia o grande espalhamento dos dados obtidos, já citado na introdução deste trabalho. Com um maior número de amostras e níveis de tensão poderíamos seguramente obter melhores resultados.

Já com os dados relativos ao ensaio de fadiga da liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 120°C por 24 h, obtivemos uma curva com um perfil mais adequado, observa-se uma tendência da curva decair mais suavemente a tensão (S) ao passo que temos um aumento no número de ciclos (N) para falha por fadiga do material, o perfil dos intervalos de confiança também são mais “estreitos” no centro da curva corrigida e se distanciam nos extremos, conforme distribuição dos dados adotada como normal, como já foi explicado na seção análise estatística.

Podemos concluir que o maior número de níveis de tensão estimulou a obtenção de melhores resultados, pois tivemos um percentual de replicação maior para a liga de alumínio 7012 solubilizado e precipitado a 120°C por 24h do que a tratada a 180°C por 6h.

Concluimos que a liga de alumínio 7012 solubilizada e precipitada a 180°C por 6h apresenta maior resistência a fadiga em níveis de tensão mais elevados, já em níveis de tensão menores esta característica se inverte.

A princípio devido ao grande espalhamento dos dados obtidos não tínhamos uma visualização clara das curvas de falha por fadiga, impedindo a análise das duas amostras de liga de alumínio e a comparação das características de cada uma. Com a aplicação da norma, mesmo com os desvios da idealidade, obtivemos uma visualização mais clara dos dados, facilitando a comparação e a análise do comportamento dos materiais.

REFERÊNCIAS

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. 2007.

ABRAÃO, R. R. R. et al. **Fadiga de materiais**: Uma revisão bibliográfica. Seminário de Iniciação Científica. UFU – Uberlândia, 2008. Disponível em <https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/seg/cd2008/PDF/IC2008-0165.PDF>. Acesso em 06/07/2012.

ASME E739-91. Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data. Copyright ASTM, United States.

CAIRES, R. R. **Propriedades Mecânicas dos Materiais**. Campinas. 2009.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma Introdução. 5 ed. São Paulo: LTC Editora. 408 p. 2002.

SANTOS, A. S.; GARCIA, A.; SPIM, J. A. **Ensaaios dos Materiais**. São Paulo: LTC Editora. 264 p. 2000.

TORRES, M. A. S., VOORWALD, H. J. C., An evaluation of shot peening, residual stresses and relaxation on the fatigue life. **International Journal of Fatigue**, v.24. 2002.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Manual on Statistical Planning and Analysis for Fatigue Experiments, STP 588, ASTM, 1975.

CAMARGO, J. A. M. **Propagação de Trinca por Fadiga na Liga de Alumínio 7475-T761 Submetida a Carregamento de Amplitude Constante e Variável**. Tese de Mestrado, FEG/UNESP, Guaratinguetá, 1995.

CAMARGO, J. A. M. **A Influência do Shot Peening e das Anodizações Crômica, Sulfúrica e Dura sobre a resistência à fadiga da liga AI 7050 – T 7451 de uso aeronáutico**. Tese de Doutorado em Eng. Mecânica – Área de Projetos e Materiais, FEG/UNESP, Guaratinguetá, 2007.

CARVALHO, A.L.M., **Comportamento Mecânico das Ligas de Alumínio 7010-T74 e 7050-T7451 de Aplicação Aeronáutica, Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica — Projetos e Materiais) — FEG/UNESP, Guaratinguetá, 1999.

DOWLING, N.E., **“Mechanical Behavior of Materials – Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue”**, Prentice Hall, E.U.A., 1993.