

9,0 (nove),
parabéns
~~zmi~~
11/12/02

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Aperfeiçoamento de Máquina de Fadiga Cíclica e
Realização de Ensaios Experimentais de Fadiga**

**Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia**

Bruno Ricardo Barros Alcova

Orientador: Edison Gonçalves

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**São Paulo
2002**

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Edison Gonçalves pelas diretrizes seguras e permanente incentivo.

Aos técnicos da Oficina Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP pelo acompanhamento e auxílio com as atividades nas máquinas operatrizes.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

RESUMO

Após uma pesquisa bibliográfica voltada para o estudo do fenômeno da fadiga, destacando-se os principais tipos de máquinas de ensaio existentes, escolheu-se para o presente trabalho uma máquina de flexão repetida. Em seguida, realizou-se a implementação das melhorias na máquina de fadiga, através da modificação de mecanismos, troca de peças e do projeto otimizado de alguns subsistemas (estrutura de guias acopladas para a biela do excêntrico, inserção de um balancim, etc.). Com o término da fabricação e montagem das estruturas na máquina, realizaram-se alguns testes de fadiga que possibilitaram a construção da curva de Whöller para o aço SAE-1006. Os resultados alcançados mostraram-se bastante compatíveis com a teoria de fadiga, verificando-se, portanto, a confiabilidade da máquina de ensaios.

ABSTRACT

After one bibliographical research focused on the study of fatigue's phenomenon, being distinguished the main types of existing testing machines, the repeated bending machine was chosen for the present work. After that, it was done the implementation of the improvements in the fatigue machine, through the modification of mechanisms, exchange of parts and the optimized project of some subsystems (structure of guides connected for the knuckle of the eccentric, insertion of a rocker arm, etc.). With the ending of the manufacture and assembly of the structures in the machine, some fatigue tests had been done, which had enabled the construction of the Whöller's curve for the SAE-1006 steel. The reached results had revealed sufficiently compatible with the theory of fatigue, verifying themselves, therefore, the trustworthiness of the testing machine.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

RESUMO

ABSTRACT

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS / IMPORTÂNCIA E RELEVÂNCIA.....	3
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
3.1 Definições.....	5
3.2 Tensões Cíclicas	6
3.3 A Curva S-N	7
3.4 Resistência à Fadiga e Limite de Resistência à Fadiga	9
3.5 Resistência à Fadiga sob Tensões Variáveis	10
3.6 Influências na Resistência à Fadiga.....	14
3.7 Fenomenologia Típica da Fadiga	15
3.8 Características Estruturais da Fadiga.....	17
3.9 Determinando o Número de Ciclos em um Ensaio de Resistência à Fadiga	19
3.10 Corpos de Prova e sua Preparação.....	20
3.11 Máquinas para Ensaio de Fadiga	22
3.12 Componentes de uma Máquina de Fadiga.....	23
3.13 Análise Estatística das Curvas S-N.....	26
3.14 Mecânica da Fratura Aplicada à Fadiga	30
3.15 Procedimentos e Técnicas no Ensaio de Fadiga.....	36
3.16 Recomendações Gerais para o Ensaio de Fadiga.....	37
3.17 Exemplos de Aplicação dos Ensaios de Fadiga.....	38
4. PROPOSTAS DE MELHORIA DA MÁQUINA DE ENSAIOS.....	40
5. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS GERAIS PARA A MÁQUINA DE ENSAIOS	41
6. APERFEIÇOAMENTOS DA MÁQUINA DE ENSAIOS	42
7. ESTUDO COMPARATIVO	53

8. ESPECIFICAÇÃO DOS ENSAIOS – NORMA ASTM, DESIGNAÇÃO E468-90.....	60
9. PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	63
10. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	64
11. CONCLUSÕES	69
12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
13. ANEXOS	71
I) Fluxograma do fenômeno da falha por fadiga.....	72
II) Fraturas por fadiga e a dependência com a solicitação mecânica imposta	73
III) Dano acumulado de fadiga: Lei de Palmgren-Miner.....	74
IV) Curvas S-N para alguns materiais metálicos	75
V) Características do aço AISI-1020	76
VI) Desenhos de conjunto	77

LISTA DE TABELAS

Tabela I – Propriedades dos materiais	10
Tabela II – Valores de q para as curvas S-N (distribuição normal)	29
Tabela III – Valores das variáveis em função da faixa de tensão σ (aço SAE-1006)	49
Tabela IV – Exemplos de materiais a serem ensaiados na máquina de fadiga e respectivas faixas de tensão	50
Tabela V – Exemplo de dados coletados em testes de fadiga	62
Tabela VI – Materiais sugeridos para a execução dos ensaios.....	63
Tabela VII – Apresentação tabular dos resultados experimentais	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Exemplo de falha por fadiga	5
Figura 02 – Ciclos de tensão.....	6
Figura 03 – Ciclo senoidal aleatório de tensões (definição de σ_a e σ_m)	7
Figura 04 – Curva S-N	8
Figura 05 – (a) Diagrama modificado de Goodman; (b) Diagrama mostrando a linha de Goodman modificada	11
Figura 06 – Diagrama modificado de Goodman, que exibe todas as resistências e valores limites de todos os componentes de tensão para uma tensão média particular	13
Figura 07 – Diagrama de fadiga que possibilita a determinação dos valores limite de σ_a e σ_m, conhecida a razão entre as mesmas	14
Figura 08 – Curva típica obtida durante teste de fadiga	15
Figura 09 – Estrias de fadiga na superfície de uma liga de alumínio 2024-T3. As setas indicam a direção de propagação da trinca	16
Figura 10 – Nucleação em bandas permanentes de escorregamento: Intrusões (a) e extrusões (b) ao longo das bandas de uma liga de cobre policristalina	18
Figura 11 – Esquema da fase inicial do trincamento por fadiga	19
Figura 12 – Corpo de prova para ensaio de fadiga (flexão em chapa).....	21
Figura 13 – Curva S-N exibindo a distribuição normal das vidas de fadiga para diferentes níveis de tensão.....	27
Figura 14 – Família de curvas mostrando a probabilidade de falha ou “sobrevivência” de um componente mecânico.....	30
Figura 15 – Lugar geométrico da falha.....	31
Figura 16 – Esquema do comprimento da trinca (a) em função do número de ciclos (N)	32
Figura 17 – Taxa de propagação da trinca (da/dN) pelo fator de intensificação de tensão (Δk)	34
Figura 18 – Propagação da trinca de fadiga (aço SAE-4140).....	35
Figura 19 – Fratura em estrutura naval devido à fadiga	39
Figura 20 – Alternativas para a haste de conexão	42
Figura 21 – Modelagem dos esforços ativos e reativos no balancim (modelo: viga biapoiada – carga concentrada em balanço)	44

Figura 22 – Modelagem dos esforços no corpo de prova (modelo: viga em balanço engastada em uma extremidade – carga concentrada na extremidade livre).....	46
Figura 23 – Seção em corte do balancim (perfil “T”)	47
Figura 24 – Motor trifásico WEG, modelo 132 S (10 cv, 3520 rpm, 60 Hz, 220 V, 28 A .	51
Figura 25 – Inversor de freqüência WEG	51
Figura 26 – Máquina de ensaios – primeiro protótipo	53
Figura 27 – Desenho esquemático – protótipo aperfeiçoado.....	54
Figura 28 – Máquina de ensaios aperfeiçoada.....	55
Figura 29 – Máquina de ensaios – sistema de transmissão	55
Figura 30 – Máquina de ensaios – balancim	56
Figura 31 – Máquina de ensaios – trilhos para movimentação do apoio.....	56
Figura 32 – Máquina de ensaios – fixação do corpo de prova	57
Figura 33 – Máquina de ensaios – motor e acionamento elétrico	57
Figura 34 – Máquina de ensaios – eixo da biela e espaçadores.....	58
Figura 35 – Máquina de ensaios – estrutura guiada para o excêntrico	58
Figura 36 – Máquina de ensaios – vista geral do conjunto	59
Figura 37 – Normas ASTM - Volume 03.01	61
Figura 38 – Corpos de prova para os ensaios	64
Figura 39 – Máquina de fadiga em operação.....	65
Figura 40 – Corpo de prova fraturado (amostra – 02).....	65
Figura 41 – Curva S-N teórica para o aço SAE-1006	66
Figura 42 – Gráfico da curva de Whöller (experimental) para o aço SAE-1006	67

1. INTRODUÇÃO

Em condições normais de uso, as máquinas e seus componentes devem sofrer esforços abaixo do limite de proporcionalidade, ou limite elástico, que corresponde à tensão máxima que o material pode suportar. Em geral, os fabricantes especificam as máquinas, mecanismos e equipamentos para suportarem esforços acima desse limite, ensaiam os materiais, controlam os processos de produção e tomam todos os cuidados para que os mesmos não apresentem qualquer tipo de problema. Entretanto, é possível que, após algum tempo em operação, a máquina ou componente mecânico, de repente, sem aviso prévio e sem motivo aparente, venha a falhar. Trata-se de um fenômeno denominado **fadiga**.

O principal objetivo de um ensaio de fadiga é proporcionar um conhecimento básico sobre as características do material ensaiado, o que irá contribuir para o projeto, construção e manutenção de mecanismos e estruturas, livrando-os de possíveis falhas e ao mesmo tempo garantindo a sua eficiência operacional.

O estudo do fenômeno de fadiga é de suma importância para a engenharia, porque trata-se de um mecanismo direto de falha, que responde por cerca de 80% dos casos de falhas em máquinas.

Os estudos comandados por Wöhler sobre eixos ferroviários constituem um marco na área de comportamento mecânico dos materiais, mais especificamente ao estudo da fadiga e o seu ensaio característico.

As etapas de ruptura de um metal sujeito à fadiga são, essencialmente, três:

- Nucleação da trinca;
- Propagação da trinca;
- Ruptura da peça ou corpo de prova.

As duas primeiras etapas ocupam quase que toda a duração do ensaio de fadiga e, quando o comprimento da trinca atinge um tamanho suficiente para que a secção solicitada fique relativamente pequena, a

ruptura ocorre repentinamente, pois a falha existente não pode resistir à carga aplicada.

O aspecto de uma ruptura por fadiga apresenta, portanto, duas zonas. A primeira é produzida pelo desenvolvimento gradual e progressivo da trinca e a outra pela ruptura brusca, apresentando o aspecto de uma fratura frágil.

Uma ruptura por fadiga sempre é acompanhada de deformação plástica localizada, que pode ocorrer num ponto de concentração de tensões como cantos vivos, entalhes, inclusões, trincas preexistentes, contornos de grão, etc.

2. OBJETIVOS / IMPORTÂNCIA E RELEVÂNCIA

A Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, como uma das mais tradicionais escolas de Engenharia do Brasil, tem se empenhado em garantir aos seus estudantes de graduação e pós-graduação uma ótima formação teórica e prática. A possibilidade de disponibilizar aos alunos do Departamento de Engenharia Mecânica uma máquina de ensaios de fadiga de baixo custo operacional consiste em um importante fator para a compreensão do fenômeno de fadiga e, portanto, no aprendizado do comportamento mecânico dos materiais.

Este trabalho de formatura tem por objetivo o aperfeiçoamento de uma máquina de fadiga cíclica, bem como a verificação de sua confiabilidade. Para isso, serão realizados ensaios de resistência à fadiga, cujos resultados (curvas de Wöhler) serão comparados com dados contidos em referências bibliográficas. Assim, a realização de ajustes na máquina irão permitir que a mesma transforme-se em uma fonte de resultados didáticos confiáveis.

É fundamental para a formação do engenheiro mecânico o conhecimento dos materiais e suas propriedades mecânicas para que o mesmo possa:

- Selecionar materiais para a construção de estruturas, fabricação de componentes de máquinas, otimização de processos de usinagem, etc;
- Estudar o comportamento destes materiais nas regiões mais solicitadas dos equipamentos;
- Diagnosticar e solucionar possíveis falhas relacionadas à fratura, desgaste, corrosão, etc.

Assim, observa-se a necessidade do aperfeiçoamento e implementação de uma máquina de fadiga cíclica nos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, transformando-a em uma ferramenta para o aprimoramento na solução de problemas práticos relacionados à pesquisa de materiais e, também, como incentivo no

estabelecimento de novos projetos de pesquisa, proporcionando progressos tecnológicos no desenvolvimento de novos produtos.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Definições

Fadiga é a ruptura de componentes, sob uma carga bem inferior à carga máxima suportada pelo material, devido à solicitações cíclicas repetidas (tensões cíclicas).

Fadiga pode ser definida como um tipo de falha mecânica, causada primariamente pela aplicação repetida de carregamentos variáveis, a qual é caracterizada pela geração e/ou pela propagação paulatina de uma trinca. A maioria das falhas mecânicas súbitas que ocorrem na prática são causadas por fadiga. Trata-se de um problema local, que depende dos detalhes da geometria, do material e do carregamento do ponto mais solicitado da peça. Observa-se, na figura abaixo, o aspecto final da fratura de uma lança de empilhadeira. Notam-se três trincas de fadiga, em formato semi-elíptico, com as características marcas de praia e a região de propagação instável da fratura.

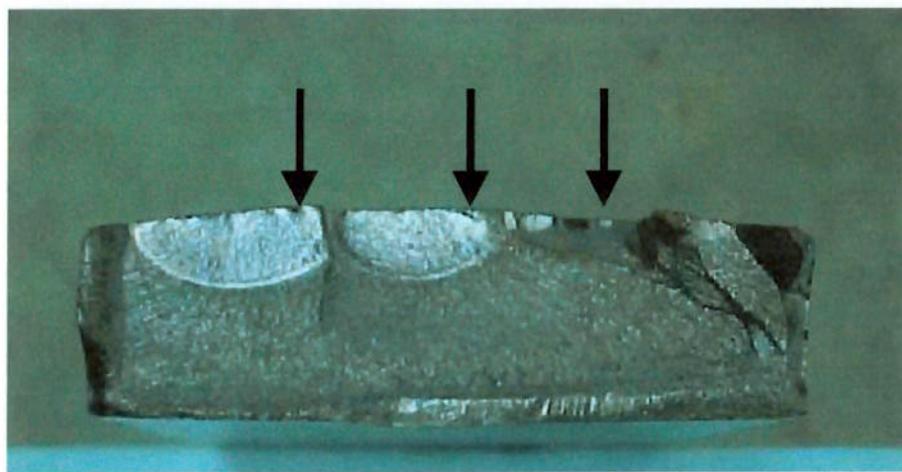


Figura 01: Exemplo de falha por fadiga.

A ruptura por fadiga começa a partir de uma trinca (nucleação) ou pequena falha superficial, que se propaga ampliando seu tamanho, devido às solicitações cíclicas. Quando a trinca aumenta de tamanho, o suficiente

para que o restante do material não suporte mais o esforço que está sendo aplicado, a peça se rompe repentinamente.

A fratura por fadiga geralmente apresenta-se fibrosa na região da propagação da trinca e cristalina na região da ruptura repentina.

Normalmente, a geração e a propagação da trinca não provocam mudanças evidentes no comportamento da estrutura. São, portanto, falhas localizadas (o dano é geralmente restrito à região crítica), progressivas e cumulativas. A detecção da falha é uma tarefa muitas vezes trabalhosa, pois é necessário a localização exata do ponto no qual teve início o trincamento da estrutura.

A falha de um sistema mecânico devido à fadiga é caracterizada como um processo lento, gradual e aditivo, cujas consequências podem ser catastróficas.

3.2 Tensões Cíclicas

As tensões cíclicas são esforços que se repetem com regularidade e que estão presentes em peças sujeitas à fadiga. A tensão cíclica mais comum é caracterizada por uma função senoidal, na qual os valores de tensão são representados no eixo das ordenadas e o número de ciclos no eixo das abscissas. As tensões de tração são representadas como positivas e as tensões de compressão como negativas.

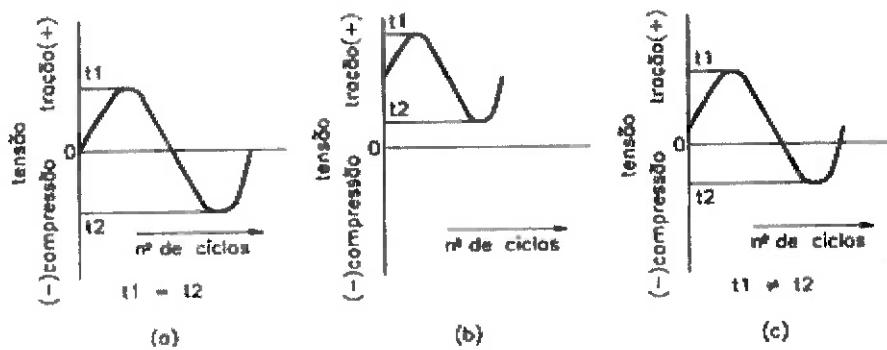


Figura 02: Ciclos de tensão

A figura acima (1a) mostra um gráfico de tensão reversa, assim chamado devido ao fato de que as tensões de tração têm valor igual às tensões de compressão.

No gráfico seguinte (1b), todas as tensões são positivas, ou seja, o corpo de prova está sempre submetido a uma tensão de tração, que oscila entre um valor máximo e um mínimo.

O último gráfico (1c) representa tensões positivas e negativas que não possuem os mesmos valores, diferentemente do primeiro exemplo.

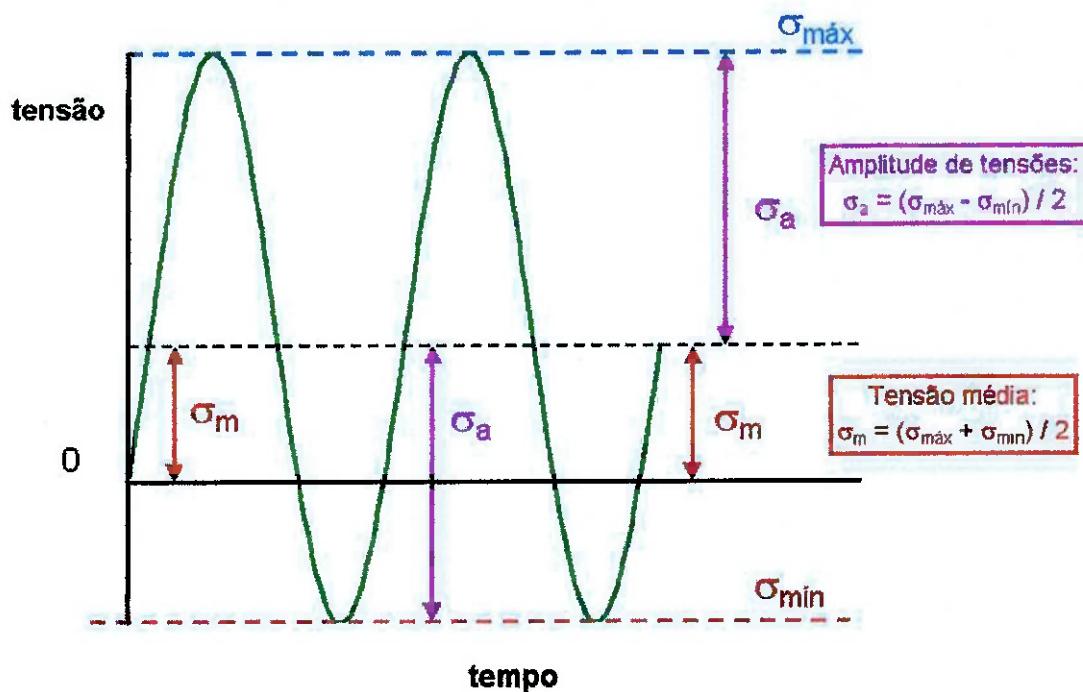


Figura 03: Ciclo senoidal aleatório de tensões (definição de σ_a e σ_m)

3.3 A Curva S-N

Os resultados de um ensaio de fadiga geralmente são apresentados em uma curva tensão-número de ciclos, ou simplesmente curva S-N.

Observando-se a curva obtida, nota-se que à medida que se diminui a tensão aplicada, o corpo de prova resiste a um maior número de ciclos. Pode-se observar, também, que diminuindo-se a tensão a partir de um certo nível, o número de ciclos para o rompimento do corpo de prova torna-se praticamente infinito.

A tensão máxima, que praticamente não provoca mais a fratura por fadiga, é chamada de limite de fadiga ou resistência à fadiga do material considerado. Abaixo desta tensão limite o material pode presumivelmente suportar um número infinito de ciclos sem se romper. A maioria dos metais não-ferrosos, como o alumínio e as ligas de cobre, apresentam uma curva S-N que decresce continuamente com o aumento do número de ciclos. Estes materiais não apresentam um limite de resistência à fadiga, uma vez que a curva S-N nunca se torna horizontal.

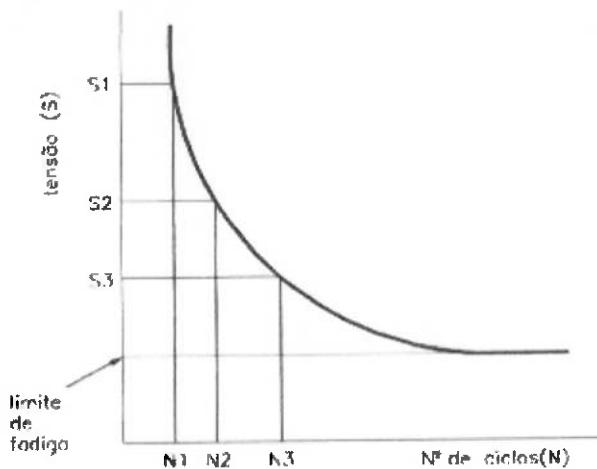


Figura 04: Curva S-N

O procedimento usual para a determinação de uma curva S-N consiste em se testar o primeiro corpo de prova a uma tensão alta na qual se espera que ocorra fratura em um número de ciclos bastante pequeno, por exemplo, cerca de dois terços do limite de resistência do material. A tensão do ensaio é diminuída gradativamente para cada corpo de prova que se sucede, até que uma ou duas amostras não se rompam no número de ciclos especificado, geralmente 10^7 ciclos. Observa-se, normalmente, uma dispersão razoável nos resultados experimentais obtidos. No entanto, se vários corpos de prova forem ensaiados a uma mesma tensão, ocorrerá uma grande dispersão nos valores do número de ciclos para a fratura. Assim, faz-se necessária uma análise estatística aprofundada dos dados experimentais de fadiga para que as curvas plotadas apresentem resultados condizentes com os gráficos de ensaios de fadiga conhecidos.

3.4 Resistência à Fadiga e Limite de Resistência à Fadiga

Para a determinação da resistência de materiais sob a ação de cargas de fadiga, sujeitam-se corpos de prova a forças repetidas e variadas de intensidades especificadas, enquanto são contadas as inversões de ciclos ou de tensões, até a ruptura dos mesmos.

Para se estabelecer o limite de resistência à fadiga de um material, necessita-se de um grande número de testes, devido à natureza estatística da fadiga. Por exemplo, em uma máquina de teste de flexão rotativa, aplique-se uma flexão constante e regista-se o número de revoluções (inversões de tensões) do corpo de prova necessárias para a falha. O teste inicial é realizado com uma tensão solicitante um pouco menor do que o limite de resistência do material. Já o segundo ensaio, faz-se com uma tensão inferior à usada no primeiro teste. Este processo contínuo de experimentos continua até que se obtenham resultados suficientes para a confecção do diagrama S-N em papel mono-log ou di-log. A ordenada deste gráfico corresponde à resistência à fadiga (S_f) do material.

No caso de metais ferrosos e suas ligas, o gráfico torna-se horizontal depois de um determinado número de ciclos. Na região abaixo desta reta, paralela à abscissa, não ocorrerá falha alguma, independentemente do número de ciclos. A resistência correspondente ao ponto pertencente a esta reta (inflexão do gráfico) denomina-se *limite de resistência à fadiga* (S_n) ou *limite de fadiga*.

O alcance de bons resultados experimentais, em Engenharia, requer um programa de testes nos materiais que serão posteriormente empregados no projeto e na fabricação de algum equipamento. Logo, o conhecimento das propriedades mecânicas do material em questão é fator essencial para a prevenção da ocorrência de uma falha por fadiga.

Assim, buscou-se com os diversos métodos de análise de falhas por fadiga, a existência de relações entre os resultados de diferentes tipos de ensaios mecânicos. Através de pesquisas, verificou-se que existe uma correspondência entre o limite de fadiga e as resistências obtidas a partir de

testes simples de tração. Esta relação mostra que o limite de resistência à fadiga varia de 40 a 60% da resistência à tração para aços com $S_{ruptura}$ de até 1400 MPa. O limite de resistência à fadiga parece estar em torno de 700 MPa para resistências à tração iguais ou superiores a 1400 MPa.

A previsão do limite médio de fadiga de corpos de prova submetidos ao teste rotativo de fadiga aponta as seguintes relações:

$$\bar{S}_n' = 0,50S_n \Leftrightarrow S_n \leq 1400 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$\bar{S}_n' = 700 \text{ MPa} \Leftrightarrow S_n > 1400 \text{ MPa} \quad (2)$$

A notação S_n' refere-se ao corpo de prova submetido ao teste rotativo de fadiga, já que o símbolo S_n corresponde ao limite de resistência à fadiga de uma determinada peça da máquina em estudo. Convém lembrar que ao valor de S_n' está associada uma confiabilidade pré-estabelecida, que se não for especificada é considerada como sendo igual a 50% (0,50).

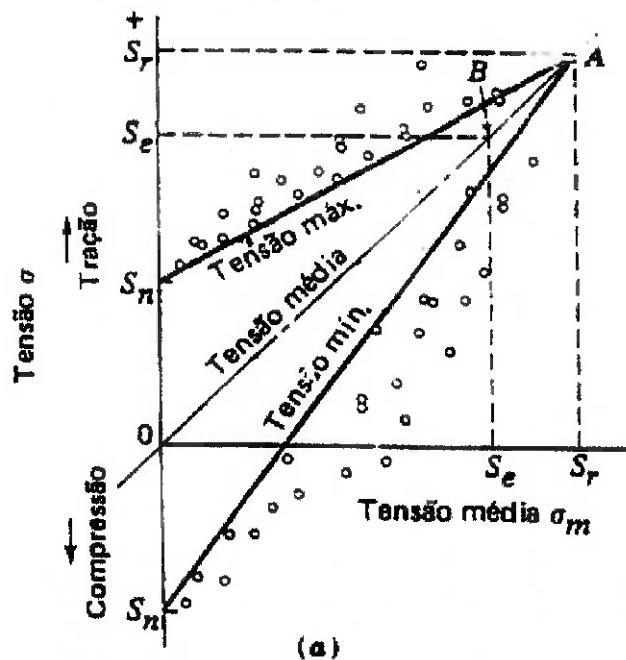
Tabela I: Propriedades dos materiais (valores médios)

Material	Resistência à Tração (MPa)	Limite de Resistência à Fadiga (MPa)
Aço SAE-4340	965	489
	1310	586
	1580	620
Aço SAE-4350	2070	689
Liga de Titânio	1000	579
Liga de Alumínio	524	186
FoFo Cinzento	152	70
	251	110
	431	169

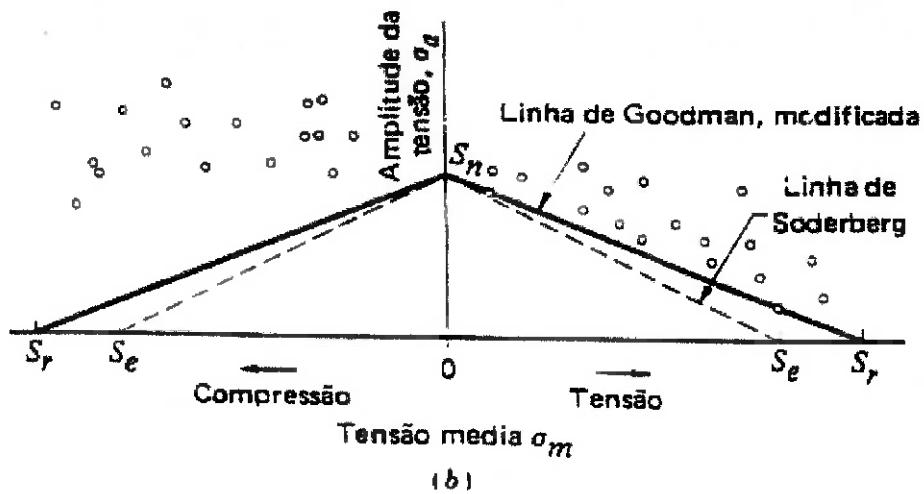
3.5 Resistência à Fadiga sob Tensões Variáveis

Freqüentemente, o engenheiro mecânico necessita determinar a resistência de peças com cargas de tensões variáveis. As componentes de tensão envolvidas nestes casos são: σ_{min} =tensão mínima, σ_{max} =tensão máxima, σ_a =amplitude de tensão, σ_m =tensão média, σ_f =faixa de tensões e

σ_s =tensão estática ou constante. A tensão estática existe devido a uma carga fixa ou a um carregamento previamente aplicado à peça e, normalmente, é independente da parte variável da carga.



(a)



(b)

Figura 05: (a) Diagrama modificado de Goodman;
 (b) Diagrama mostrando a linha de Goodman modificada

Os resultados dos testes de fadiga sob tensões variáveis podem ser estudados através do diagrama modificado de Goodman (vide figura 05a), no qual marca-se a tensão média (σ_m) no eixo das abscissas e os outros componentes de tensão no eixo das ordenadas (tração no sentido positivo),

além dos valores do limite de resistência à fadiga (S_n), resistência à fadiga ou resistência à fadiga para vida finita. A resistência da peça à tração é representada pela linha de tensão média, que vai da origem ao ponto A e tem um coeficiente angular unitário (inclinação de 45°).

O diagrama modificado de Goodman consiste das linhas construídas unindo-se o ponto A a S_n , acima e abaixo da origem. O limite de escoamento (S_e) também é marcado em ambos os eixos, visto que caso a tensão máxima (σ_{max}) for superior a S_e , o escoamento é considerado um critério de fadiga.

Em outro tipo de diagrama de fadiga (vide figura 05b) muito utilizado, usam-se somente dois dos componentes de tensão, já que são registrados a tensão média no eixo das abscissas e a amplitude de tensão (σ_a) no eixo das ordenadas. As propriedades do material procuradas, tais como limite de resistência à fadiga e resistência à fadiga, correspondem ao valor limite da amplitude de tensão no eixo das ordenadas.

A reta que une S_n a S_r é também o critério de falha modificado de Goodman. Outra linha também proposta como critério de falha para projetos é a traçada de S_n a S_e , denominada linha de Soderberg.

A definição da falha através do diagrama de Goodman, recomendada quando são conhecidas todas as dimensões da peça e os componentes de tensão, pode ser obtida em dois casos (vide figura 06): quando a tensão média é de compressão, define-se a falha por duas linhas retas cheias paralelas, com origens em $+S_n$ e $-S_n$, e traçadas para baixo e para a esquerda. Quando a tensão média é de tração, define-se a falha pela linha de tensão máxima ou pelo limite de escoamento indicado pela linha horizontal correspondente à ordenada S_e .

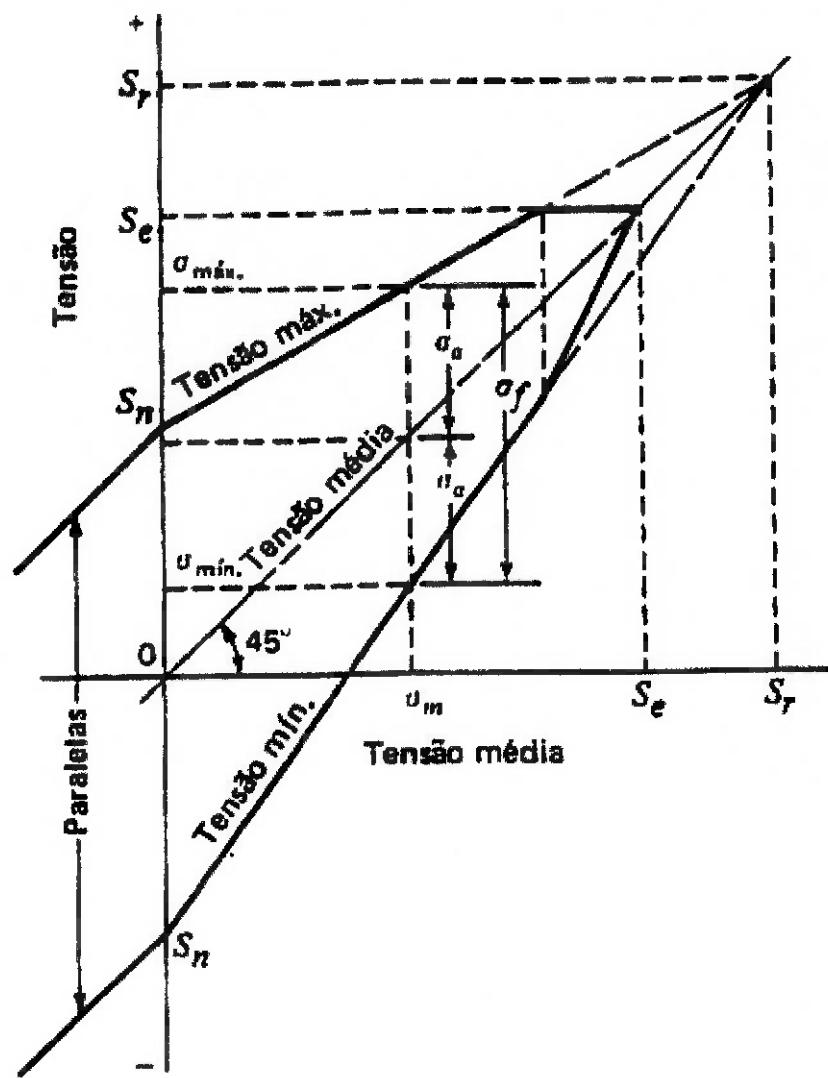


Figura 06: Diagrama modificado de Goodman, que exibe todas as resistências e valores limites de todos os componentes de tensão, para uma tensão média particular

No diagrama de fadiga (vide figura 07), observa-se que o limite de escoamento é representado em ambos os eixos. A falha por escoamento à compressão é definida pela linha unindo S_e à S_{ec} , enquanto que a falha por escoamento à tração é dada pela linha de S_e à S_{et} . A construção da linha de Goodman modificada, para tensões médias de tração, e de uma linha horizontal de S_n para a esquerda, para tensões médias de compressão, ocorrem em seguida. Assim, as intersecções das duas linhas, em cada quadrante, são os pontos de transição entre uma falha por fadiga e uma falha por escoamento.

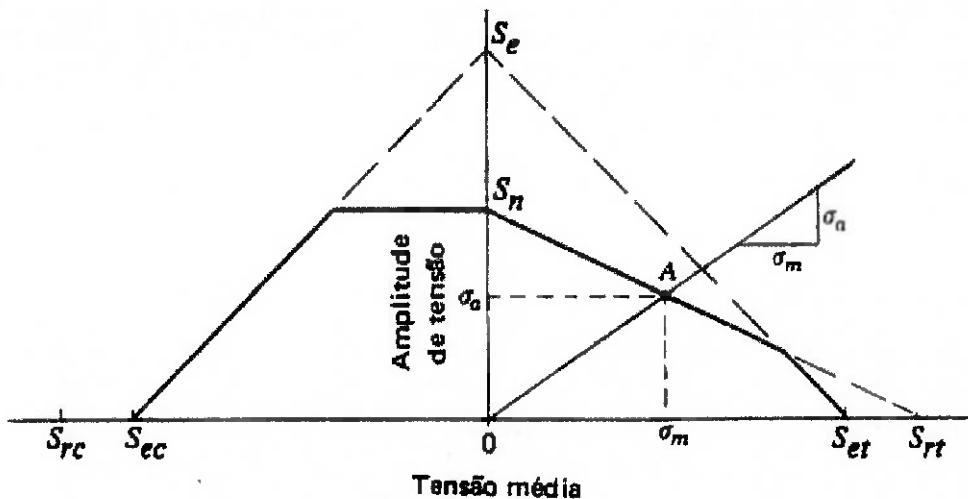


Figura 07: Diagrama de fadiga que possibilita a determinação dos valores limite de σ_a e σ_m , conhecida a razão entre as mesmas

3.6 Influências na Resistência à Fadiga

Uma superfície com um acabamento ruim contém irregularidades (defeitos superficiais) que, como se fossem um entalhe, aumentam a concentração de tensões, resultando em tensões residuais que tendem a diminuir a resistência à fadiga.

A aplicação de tratamentos superficiais (cromeação, niquelação, anodização, etc.) também diminuem a resistência à fadiga, visto que introduzem grandes mudanças nas tensões residuais, além de conferirem porosidade ao metal.

No entanto, também é possível aumentar o limite de fadiga, por exemplo, através do encruamento de aços dúcteis ou do uso de um tratamento térmico adequado.

O meio ambiente também influencia consideravelmente o limite de fadiga, pois a ação corrosiva de um meio químico acelera a velocidade de propagação de uma trinca.

Os projetos em engenharia, sempre que possível, devem evitar a concentração de tensões, prevendo tensões contrárias favoráveis, opostas às tensões principais aplicadas, através de processos mecânicos, térmicos ou similares.

Para aplicações com baixas tensões cíclicas, nas quais a deformação pode ser facilmente controlada, deve-se dar preferência a ligas de alta ductilidade. Já para aplicações com elevadas tensões cíclicas, envolvendo deformações cíclicas predominantemente elásticas, deve-se optar por ligas de maior resistência mecânica.

3.7 Fenomenologia Típica da Fadiga

O trincamento por fadiga é provocado pela repetição de cargas alternadas e depende do valor alcançado pelas tensões atuantes ($\Delta\sigma$).

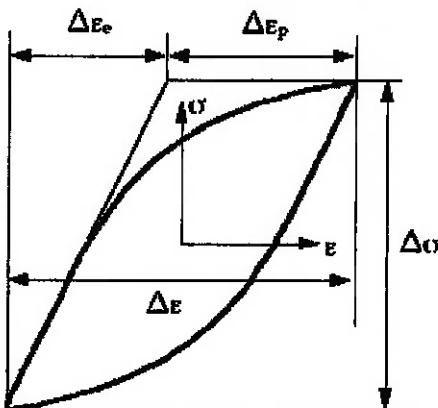


Figura 08: Curva típica obtida durante teste de fadiga

A iniciação típica das trincas em peças metálicas é causada por um ciclo de tensões ($\Delta\sigma$), que gera a movimentação cíclica de discordâncias que se agrupam em células e formam bandas de deslizamento persistente, as quais levam à geração de intrusões e extrusões na sua superfície. Estes micromecanismos podem ser vistos como um problema de plasticidade cíclica localizada.

As ondulações superficiais concêntricas e radiais são a característica macroscópica mais comum das trincas de fadiga. A forma destas marcas, que são visíveis a olho nu, está diretamente relacionada ao carregamento indutor da falha. Já a principal característica microscópica das trincas de fadiga é a presença de estrias, que são causadas pelo crescimento da trinca a cada ciclo do carregamento.

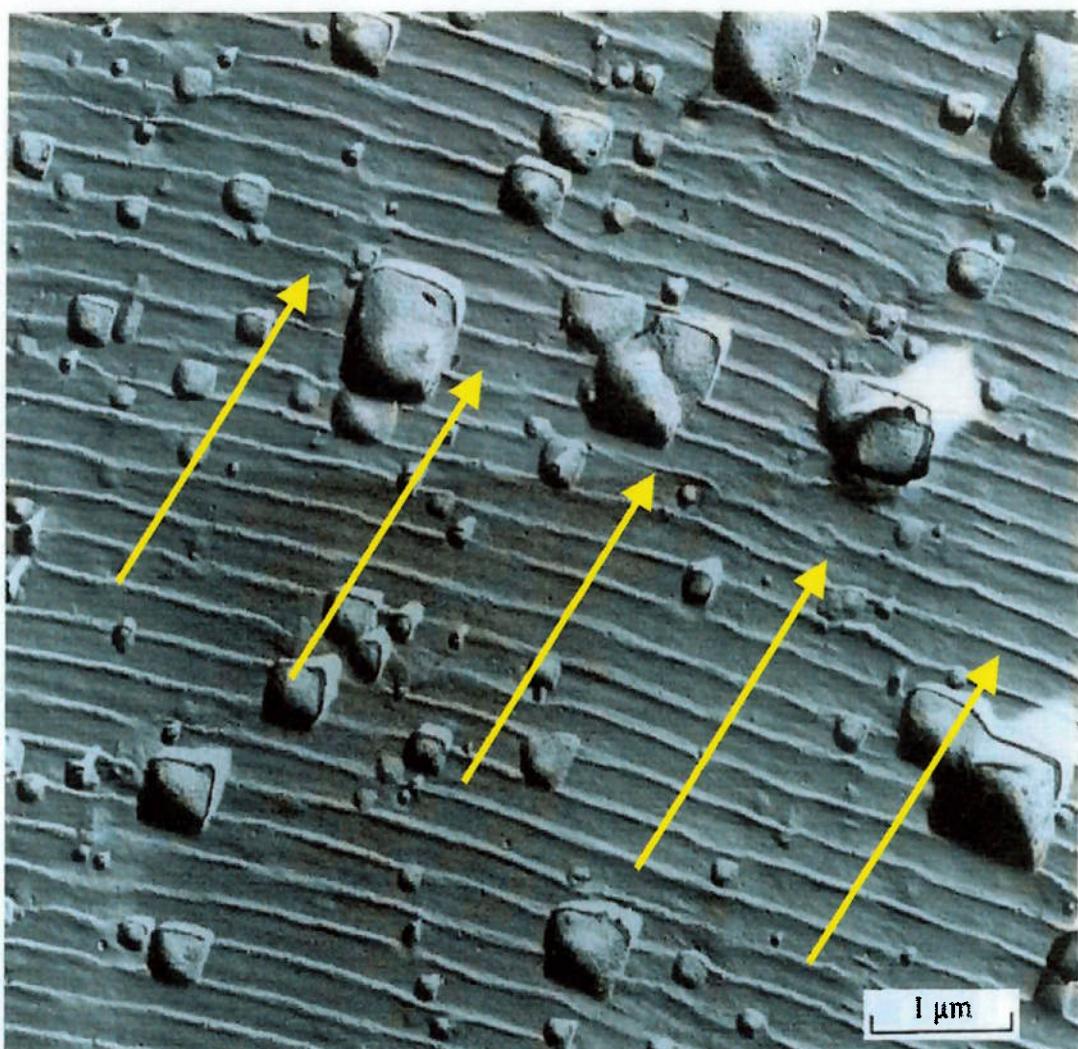


Figura 09: Estrias de fadiga na superfície de uma liga de alumínio 2024-T3.

As setas indicam a direção de propagação da trinca.

Na prática, o processo de fadiga quase sempre ocorre a partir da raiz de um entalhe concentrador de tensão. A iniciação da trinca é controlada pelo valor ($\Delta\sigma$) das tensões (de Von Mises) atuantes naquele ponto, quando as solicitações cíclicas são baixas e a vida é longa. Este processo sofre influências:

- Das propriedades mecânicas do material;
- Do acabamento superficial;
- Do gradiente das tensões atuantes;
- Do estado de tensões residuais presente junto à superfície da raiz do entalhe.

A resistência à fadiga de um certo material tende a aumentar com a resistência à ruptura S_u , com a melhoria do acabamento superficial, com o aumento do gradiente de tensões e com a presença de tensões residuais compressivas. Quando as cargas aplicadas são elevadas, proporcionando um escoamento cíclico e uma vida curta, o principal parâmetro controlador da resistência à fadiga é a ductilidade do material. Os detalhes superficiais, neste caso, têm menos importância, podendo-se considerar a variação ($\Delta\varepsilon$) das deformações como a iniciadora das trincas.

3.8 Características Estruturais da Fadiga

Detalhando-se o processo de fadiga, com relação às suas características estruturais, definem-se as seguintes etapas:

- Iniciação da trinca: desenvolvimento inicial dos danos causados por fadiga;
- Crescimento da trinca em banda de deslizamento: aprofundamento da trinca inicial nos planos de alta tensão cisalhante;
- Crescimento da trinca nos planos de alta tensão de tração: envolve o crescimento de uma trinca bem definida em direção normal à tensão de tração máxima;
- Ruptura final estática: ocorre quando a trinca atinge um tamanho tal que a seção transversal resistente não pode mais suportar a carga aplicada.

Uma consideração estrutural marcante na fadiga é o fato das trincas de fadiga geralmente terem início em uma superfície livre. A fadiga apresenta determinados aspectos em comum com o escoamento plástico e a fratura sob deformação estática ou unidirecional. Sob carregamento cíclico, um metal se deforma por deslizamento nos mesmos planos atômicos e nas mesmas direções cristalográficas que em deformação unidirecional. Na fadiga, alguns grãos apresentam linhas de deslizamento ao passo que outros não mostram evidência de deslizamento. As linhas de deslizamento

geralmente são formadas durante os primeiros poucos mil ciclos de tensão. As trincas, na maioria das vezes, ocorrem em regiões de deformação intensa, paralelas ao que originalmente foi uma banda de deslizamento.

As trincas de fadiga, uma vez formadas, tendem a se propagar, inicialmente, ao longo dos planos de deslizamento, embora em seguida tomem a direção normal à maior tensão de tração aplicada. A propagação da trinca de fadiga é normalmente transgranular.

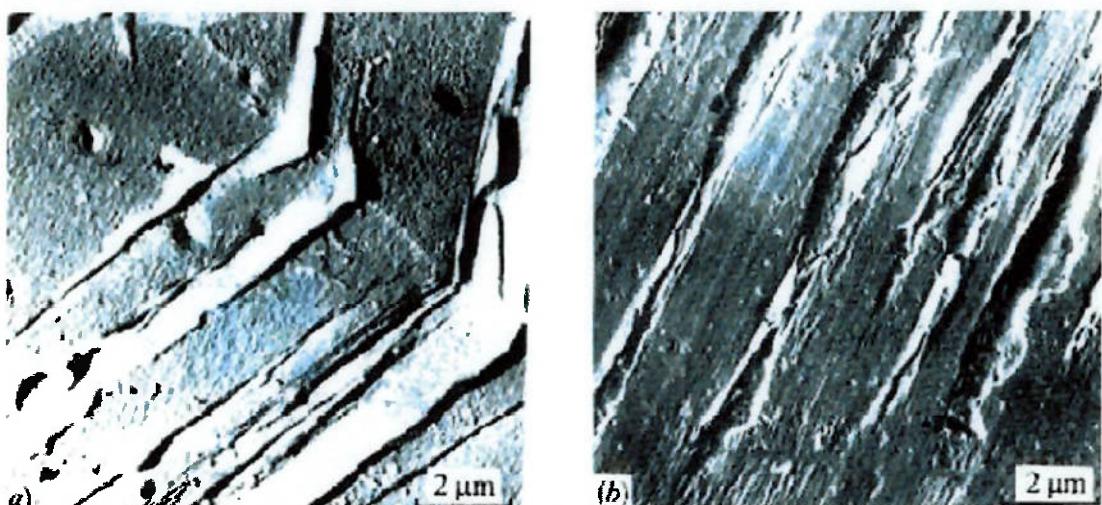


Figura 10: Nucleação em bandas permanentes de escorregamento:

Intrusões (a) e extrusões (b) ao longo das bandas de uma liga de cobre policristalina.

Uma característica estrutural importante que parece ser única para a deformação em fadiga é a formação de ressaltos e reentrâncias na superfície, denominadas intrusões e extrusões. Metalografias realizadas nas seções transversais de corpos de prova mostraram que as trincas de fadiga têm início em intrusões e extrusões.

Existe uma grande similaridade entre as estruturas de discordâncias produzidas por fadiga e por deformação estática. A formação de uma estrutura celular de discordâncias é favorecida por uma grande amplitude de deformação e uma alta energia de falha de empilhamento, que são fatores facilitadores de deslizamento cruzado, o qual desempenha papel importante para o processo de formação das extrusões.

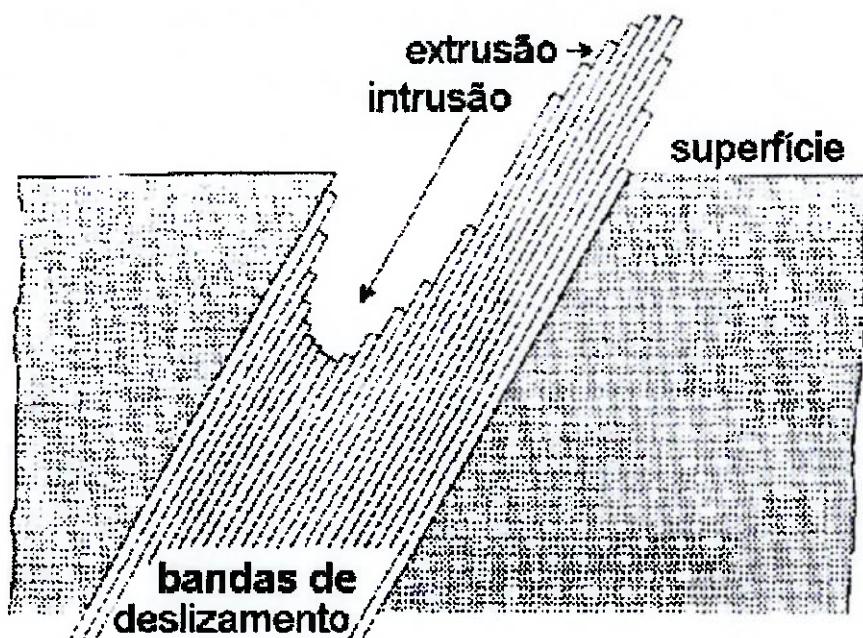


Figura 11: Esquema da fase inicial do trincamento por fadiga

3.9 Determinando o Número de Ciclos em um Ensaio de Resistência à Fadiga

A determinação do número de ciclos para a ruptura do corpo de prova deve estar baseada na definição de falha por fadiga, que pode ser caracterizada como o instante no qual o corpo de prova dividi-se em duas partes (fratura completa). Esta definição, entretanto, requer alguns esclarecimentos a fim de se evitar interpretações errôneas a respeito da fenomenologia típica da fadiga. Em corpos de prova de grandes proporções, uma rachadura ou trinca devido à fadiga do material, uma vez formada, necessitará de um número elevado de ciclos para se propagar por si só ao longo do corpo de prova. Esta afirmação é claramente observada em máquinas de amplitude de tensão constante, principalmente em testes de flexão repetida ou torção uniforme.

Amplas diferenças na taxa de propagação de uma rachadura de fadiga, após o início do trincamento, foram verificadas para um grupo de corpos de prova, de mesmo material, ensaiados sob condições idênticas. Essas diferenças são, na realidade, o resultado de pequenas variações na

geometria de formação da trinca e causam, consequentemente, alterações no número esperado de ciclos para a ruptura do corpo de prova. Convém ressaltar que o número de ciclos obtido no ensaio de fadiga não está relacionado diretamente ao número necessário de ciclos para a iniciação de uma trinca de fadiga.

Em laboratórios didáticos de ensaios mecânicos, onde costumam-se adotar corpos de prova de pequeno porte, a definição de falha por fadiga, já citada anteriormente, é bastante satisfatória. Nestes casos, a única recomendação a ser seguida é o projeto de um sistema que desliga o motor da máquina quando ocorre a fratura do corpo de prova, além da implementação de um contador de ciclos. A diferença entre as leituras final e inicial do contador corresponde ao número de ciclos da curva S-N.

Outra definição com relação à falha por fadiga sugere que a mesma acontece quando é possível a visualização, a olho nu, de uma trinca na superfície do corpo de prova. Este caso engloba os ensaios com materiais fibrosos (plásticos laminados e madeira), com corpos de prova de grandes dimensões e em testes de torção para materiais metálicos. Este método de investigação de falhas possui algumas desvantagens como, por exemplo, a necessidade de um monitoramento contínuo durante todo o transcorrer do ensaio.

3.10 Corpos de Prova e sua Preparação

Ensaios de fadiga que determinam a vida de componentes mecânicos, máquinas e outras estruturas são, geralmente, realizados na própria peça em estudo (modelos ou protótipos de escala reduzida), em produtos acabados, tais como barras e chapas, que podem ser fixados em máquinas com o auxílio de garras apropriadas, ou, ainda, em corpos de prova usinados e padronizados, que variam de acordo com as normas técnicas e o tipo específico de carregamento aplicado nos mesmos. Os testes de resistência à fadiga que objetivam determinar a curva S-N (Tensão x Número de Ciclos), para um material de construção mecânica, são feitos

com corpos de prova de forma geométrica bastante simples. Geralmente, eles são de seção circular ou retangular, contendo uma seção mais espessa em ambos os lados para fixação. A presença de pontas ou quinas é evitada, pois as mesmas podem introduzir regiões de concentração de tensões.

Placas e chapas sujeitas a um ensaio de flexão repetida podem apresentar variações consideráveis em suas dimensões, mas, usualmente, são corpos de prova construídos visando um ponto de máxima aplicação de tensão (ápice do triângulo formado pela extensão dos lados da seção mais côncava e afilada do corpo).

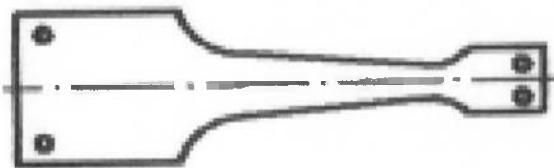


Figura 12: Corpo de prova para ensaio de fadiga (flexão em chapa)

Muitos componentes de máquinas e estruturas possuem alterações em sua seção transversal ou contorno de superfície como filetes, ranhuras, sulcos e orifícios que produzem pontos de concentração de tensões. A comparação efetuada entre ensaios de fadiga com corpos de prova com e sem entalhes é uma maneira eficaz de se avaliar o efeito dessas irregularidades. Um cilindro reto com um entalhe circunferencial na seção transversal mediana ou na de máxima solicitação (tensão) é o tipo de corpo de prova mais utilizado nestes casos.

Os procedimentos de preparação de um corpo de prova para a realização de testes de resistência à fadiga devem seguir certas normas técnicas para acabamento e tolerâncias, permitindo, assim, a correlação de resultados entre diferentes laboratórios e instituições de ensino (pequenas variações nas dimensões não afetam o resultado do ensaio).

Entre outros fatores relevantes no ensaio de fadiga tem-se o efeito da preparação da superfície do corpo de prova e o efeito das condições de ensaio. A preocupação com o acabamento superficial deve-se ao fato de que as trincas propagam-se da superfície para o centro do mesmo. Um bom

acabamento superficial evita que as rugosidades superficiais atuem como entalhes, diminuindo a vida em fadiga do material durante o ensaio. A introdução de tratamentos superficiais que endurecem a superfície, tais como o recozimento e a anodização, para as ligas de alumínio, aumentam a vida em fadiga do material.

As influências sobre o efeito das condições do ensaio devem-se à variáveis como temperatura, velocidade e variação das tensões e condições do meio ambiente.

A atmosfera presente em um ensaio pode reduzir o limite de fadiga. Um material ferroso em contato com um meio alcalino ou ácido, tende a ter um limite de fadiga inferior àquele ensaiado em um ambiente inerte. Essa redução de propriedade deve-se ao fato de que o ataque químico aumenta a velocidade de propagação da trinca de fadiga e a tensão cíclica acelera a corrosão do metal.

3.11 Máquinas para Ensaio de Fadiga

As máquinas de fadiga podem ser classificadas segundo o critério abaixo:

- Tipo de carregamento: carga constante ou deslocamento constante;
- Tipo de tensão: flexão, torção, etc;
- Especificações de projeto: mecânicas, hidráulicas, magnéticas;
- Características operacionais: com ou sem ressonância;

Uma consideração importante, independente do tipo de máquina, é a maneira utilizada para se medir e manter as forças atuantes no sistema durante o ensaio de fadiga. Máquinas mecânicas de carga constante, por exemplo, devem utilizar forças iniciais, pesos livres ou um sistema de molas (de baixo coeficiente elástico K), que permitam uma conveniente avaliação das forças aplicadas no corpo de prova.

As máquinas de flexão repetida (tração-compressão do material) são um dos tipos mais aplicados para o ensaio de fadiga.

Materiais cujas formas geométricas assemelham-se a placas e folhas são amplamente investigados, com relação ao comportamento de fadiga, através da flexão repetida de seus corpos de prova. Uma das vantagens deste tipo de máquina é o fato de que a preparação da superfície do corpo de prova nem sempre faz-se necessária, embora haja cuidados durante a usinagem dos corpos de prova para prevenir problemas nos pontos de fixação dos mesmos.

3.12 Componentes de uma Máquina de Fadiga

A) Mecanismos de Produção de Carga:

As cargas que são aplicadas no corpo de prova durante o ensaio podem ser produzidas por métodos mecânicos, elétricos, eletromagnéticos, entre outros.

A maneira mais simples de gerar essa carga é através da fixação de uma mola helicoidal no corpo de prova e da aplicação de um movimento cílico, com o auxílio de uma haste-manivela, na outra extremidade da mola. O uso de outros tipos de molas geralmente produzem vibrações indesejáveis, devido à torção das mesmas.

Sabe-se que se a velocidade do eixo acoplado a manivela possui um valor bem abaixo da freqüência natural do sistema, as forças aplicadas na haste são muito próximas àquelas atuantes no corpo de prova.

Um outro método conveniente de produção de forças por meios mecânicos consiste no uso de instrumentos oscilantes compostos de um, dois e até quatro pesos desbalanceados em rotação, o que permite o ajuste da carga aplicada com a máquina em operação, alternando-se a fase relativa entre os dois pares de pesos.

Máquinas hidráulicas, atuadores eletromagnéticos em sistemas massa-mola e sistemas pneumáticos são outros exemplos de equipamentos de produção de carga que apresentam as suas desvantagens, bem como desempenho otimizado em algumas aplicações específicas.

B) Membros de Transmissão da Carga Produzida:

Um aspecto essencial em uma máquina de ensaio de resistência à fadiga e que é de extrema importância nos casos em que necessita-se de resultados confiáveis, é a maneira com a qual a carga é transmitida do equipamento para o corpo de prova, ou seja, o projeto das articulações e conexões de movimento.

Estas devem preencher duas condições: primeiramente, não podem introduzir tensões na região de conexão com o corpo de prova, evitando a indução de falhas e, também, não devem permitir a distorção da distribuição de tensões prevista ao longo do material ensaiado.

A primeira condição é plenamente satisfeita se é possível, no ensaio em questão, a preparação da superfície da amostra e/ou a usinagem do corpo de prova com uma geometria adequada que satisfaça a não propagação de trincas e outros defeitos. A segunda condição, no entanto, pode ainda não estar satisfeita, já que tensões inesperadas surgem quando ocorre a fixação do corpo de prova na máquina.

Muitos aparelhos projetados por engenheiros experientes conferem à máquina de ensaios e, principalmente, ao corpo de provas, uma precisão razoável na transmissão das cargas envolvidas e na distribuição das tensões. Estes membros de transmissão avançados encontram-se descritos, detalhadamente, em livros e catálogos técnicos de fadiga.

C) Estrutura da Máquina:

Com o objetivo de minimizar a energia perdida pelo sistema para o meio externo e isolar a máquina e seu conjunto das vibrações excessivas de outras máquinas em operação ao seu redor, o projeto de sua estrutura deve, obrigatoriamente, prever a inclusão de um sistema de suspensão (amortecedores) ou um aparelho, constituído de material elástico (molas, borracha, cortiça, etc.), que retém e absorve as vibrações e ruídos.

Em paralelo, a análise da Resistência dos Materiais e da Teoria da Elasticidade é de fundamental importância para a definição da geometria e do material a serem empregados na construção da estrutura da base da máquina (estudo das tensões e deformações máximas admissíveis).

É interessante citar o exemplo de algumas máquinas de ensaio de fadiga, nas quais a estrutura possui liberdade de movimento horizontal, para que esse deslocamento seja uma medida do carregamento aplicado ao protótipo e, consequentemente, de suas variações ao longo da avaliação experimental.

D) Instrumentos de Medição:

Em máquinas de flexão repetida, que operam através de um sistema que proporcione uma amplitude de tensão constante, não é necessário a utilização de instrumentos para o controle dos limites de tensão.

Nos casos em que a variação da carga é medida através da extensão-compressão de uma mola calibrada, no regime elástico, também é dispensável a adaptação deste componente.

Existem diversos aparelhos que exercem o papel de medidores de tensões em uma máquina de ensaios tais como transdutores resistivos, microscópios eletrônicos e aparelhos gráficos sensíveis a pequenas vibrações.

A medida das forças é realizada por dinamômetros, que podem estar associados a dispositivos elétricos (transdutores, "strain-gages", etc.), otimizando-se a precisão das medições.

E) Instrumentos de Controle:

Na maioria dos casos, o valor desejado de tensão, aplicado no corpo de prova, permanece o mesmo durante grande parte do ensaio. No entanto, em um estágio avançado do processo de falha, quando um escoamento localizado ou a propagação de uma trinca ocorrem no material do corpo de

prova, alterações nesses valores iniciais estão sujeitas a acontecer. Assim, estas mudanças são corrigidas através de acertos manuais por parte do operador da máquina ou com o auxílio de controles automáticos que supervisionam o sistema durante todo o transcorrer do ensaio.

Geralmente, utilizam-se de circuitos elétricos e transdutores para fornecerem os dados das variáveis envolvidas e atribuir-lhes os acertos necessários para a manutenção das propriedades mecânicas de cada tipo de teste.

F) Contador de Ciclos:

O limite de fadiga (vida de fadiga do material) é definido através do número de ciclos imposto ao corpo de prova até a sua ruptura. Quando a máquina de ensaios possui um motor em rotação constante, esta “vida” é simplesmente estimada por um contador de ciclos que fornece o número de rotações do eixo do motor desde o início de seu funcionamento até a sua parada.

Atualmente, opta-se pelo uso de contadores de ciclos digitais, que além de facilitarem a leitura dos dados, possuem maior precisão.

Existem, ainda, dispositivos mais sofisticados, capazes de registrar o número de ciclos e alterar automaticamente a carga aplicada, após um intervalo de tempo pré-determinado pelo programador da máquina.

3.13 Análise Estatística das Curvas S-N

Estudos têm mostrado que o ensaio de um número razoavelmente grande de corpos de prova idênticos, solicitados por uma mesma amplitude de tensão, proporciona a descrição logarítmica da distribuição da vida de fadiga, para diferentes níveis de tensão, de um componente mecânico, através de uma curva de distribuição normal (distribuição Gaussiana).

É aparente o fato de ocorrer um maior espalhamento experimental dos resultados da vida de fadiga de um grupo de corpos de prova

submetidos a níveis de tensão superiores ao seu respectivo limite de fadiga teórico do que nos casos em que os mesmos são ensaiados para valores de tensão próximos da resistência à fadiga, para uma vida previamente conhecida. Portanto, conclui-se que os dados coletados em ensaios cíclicos necessitam de uma análise estatística apropriada.

O valor médio e o desvio padrão para uma certa amostragem são dados, respectivamente, por:

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (3)$$

$$\sigma = \left[\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1} \right]^{1/2} \quad (4)$$

onde, x é a vida de fadiga do material para uma dada tensão e n é o número de corpos de prova ensaiados até o surgimento da falha (ruptura).

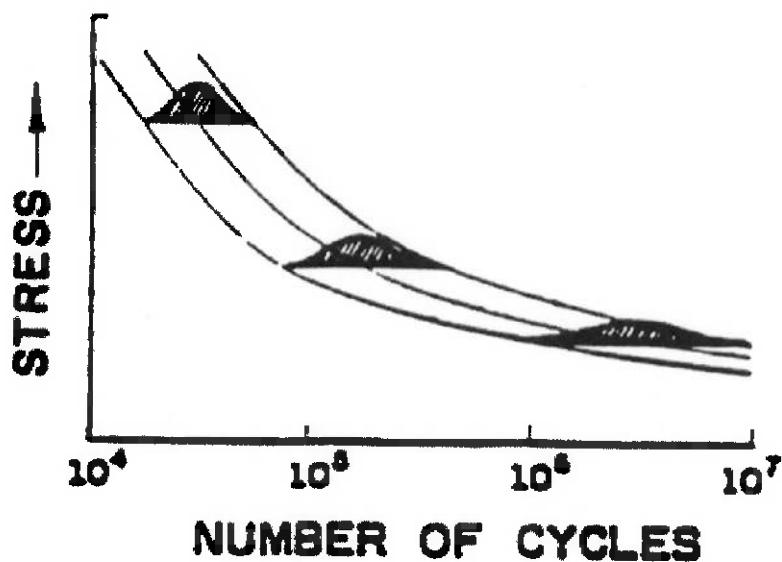


Figura 13: Curva S-N exibindo a distribuição normal das vidas de fadiga para diferentes níveis de tensão

Com estes dois parâmetros estatísticos, é possível obter limites confiáveis para a probabilidade de vida de fadiga do material. A estimativa

da vida de fadiga, segundo um determinado nível de confiabilidade (C%), que assegura um valor percentual (P%) de corpos de prova que não devem falhar, pode ser determinada por:

$$\text{vida estimada } (C, P) = \bar{x} - q \cdot \sigma \quad (5)$$

onde, q é uma função de C%, de P% e do número de corpos de prova utilizados para a determinação de \bar{x} e σ .

A escolha do nível de confiabilidade depende da importância do componente com relação à integridade estrutural do material. Quanto maior for a importância do componente, maior deve ser o nível de confiabilidade e menores as tensões aplicadas. Os valores de q para uma determinada amostra, que assume uma distribuição normal (distribuição de Gauss), são obtidos em tabelas teóricas, como a exibida abaixo.

Tabela II: Valores de q para as curvas S-N (distribuição normal)

P(%)	75	90	95	99	99.9	75	90	95	99	99.9
n	C=0.50					C=0.75				
4	0.739	1.419	1.830	2.601	3.464	1.256	2.134	2.680	3.726	4.190
6	0.712	1.360	1.750	2.483	3.304	1.087	1.860	2.336	3.243	4.273
8	0.701	1.337	1.719	2.436	3.239	1.010	1.740	2.190	3.042	4.008
10	0.694	1.324	1.702	2.411	3.205	0.964	1.671	2.103	2.927	3.858
12	0.691	1.316	1.691	2.395	3.183	0.933	1.624	2.048	2.851	3.760
15	0.688	1.308	1.680	2.379	3.163	0.899	1.577	1.991	2.776	3.661
18	0.685	1.303	1.674	2.370	3.150	0.865	1.544	1.951	2.723	3.595
20	0.684	1.301	1.671	2.366	3.143	0.846	1.528	1.933	2.697	3.561
25	0.682	1.297	1.666	2.357	3.132	0.842	1.496	1.895	2.647	3.497
n	C=0.90					C=0.95				
4	1.927	3.187	3.957	5.437	7.128	2.619	4.163	5.145	7.042	9.215
6	1.540	2.494	3.091	4.242	5.556	1.895	3.006	3.707	5.062	6.612
8	1.360	2.219	2.755	3.783	4.955	1.617	2.582	3.188	4.353	5.686
10	1.257	2.065	2.568	3.532	4.629	1.465	2.355	2.911	3.981	5.203
12	1.188	1.966	2.448	3.371	4.420	1.366	2.210	2.736	3.747	4.900
15	1.119	1.866	2.329	3.212	4.215	1.268	2.068	2.566	3.520	4.607
18	1.071	1.800	2.249	3.106	4.078	1.200	1.974	2.453	3.370	4.415
20	1.046	1.765	2.208	3.052	4.009	1.167	1.926	2.396	3.295	4.319
25	0.999	1.702	2.132	2.952	3.882	1.103	1.838	2.292	3.158	4.143

Com a estimativa de vida calculada e as tabelas de q é possível o desenvolvimento de gráficos, com famílias de curvas, que exibem a probabilidade de ocorrer uma falha em um componente mecânico ensaiado.

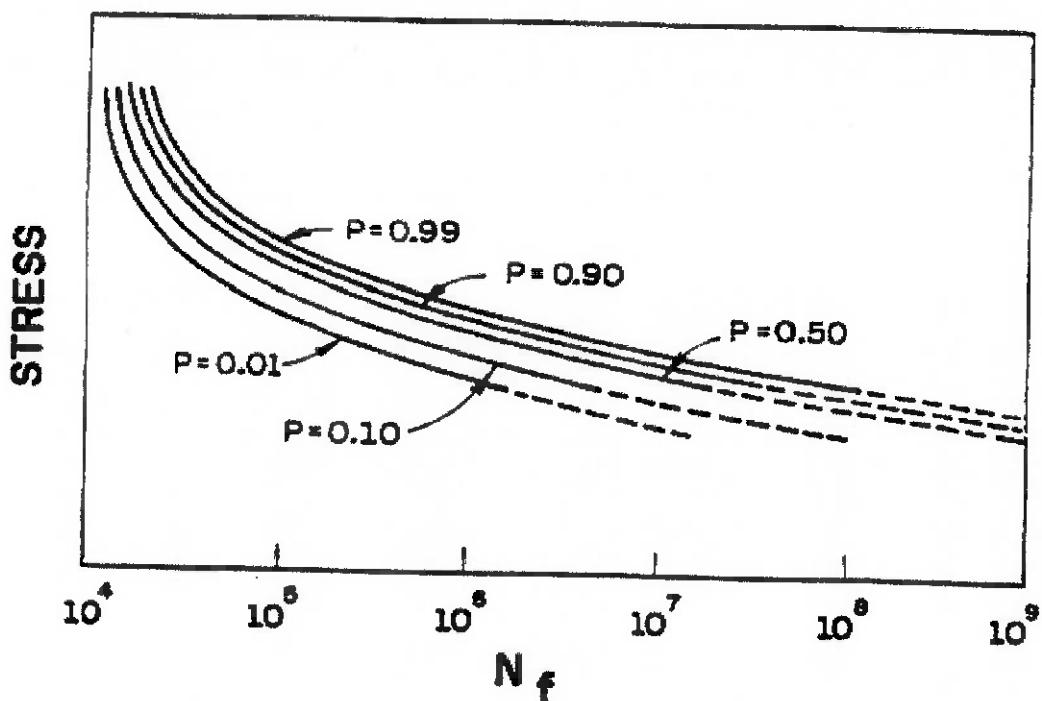


Figura 14: Família de curvas mostrando a probabilidade de falha ou “sobrevivência” de um componente mecânico

3.14 Mecânica da Fratura Aplicada à Fadiga

O crescente aumento no projeto e fabricação de grandes estruturas, tanto em suas dimensões como em sua importância, tem resultado na expansão da aplicação dos estudos sobre Mecânica da Fratura no cotidiano dos engenheiros. Em particular, o fenômeno da propagação de uma trinca de fadiga pode ser analisada em termos da Teoria da Mecânica da Fratura, considerando-se a hipótese, entre outras, de que o material apresenta comportamento elástico-linear.

A suposição básica, neste caso, corresponde ao fato de que as trincas já existem nas estruturas dos componentes mecânicos e que irão aumentar progressivamente quando estiverem em serviço (atuação de esforços solicitantes). Com relação aos estudos específicos sobre o crescimento de trincas de fadiga, também está implícito que a vida de fadiga de um componente é determinada, muitas vezes, através da velocidade de crescimento da trinca a cada ciclo de tensões.

A determinação de k_{IC} (tenacidade à fratura), grandeza que “mede” a resistência dos materiais à propagação de trincas no campo elástico, possibilita a obtenção do lugar geométrico de falhas (ruptura) em função da tensão crítica aplicada e do correspondente comprimento crítico da trinca. Por exemplo, para um comprimento de trinca a_1 dado, corresponde uma tensão crítica σ_1 . Similarmente, para uma dada tensão σ_2 , existe um comprimento a_2 . Assim, a princípio, a região abaixo da curva representa uma área segura com relação às falhas catastróficas (dados úteis para projeto).

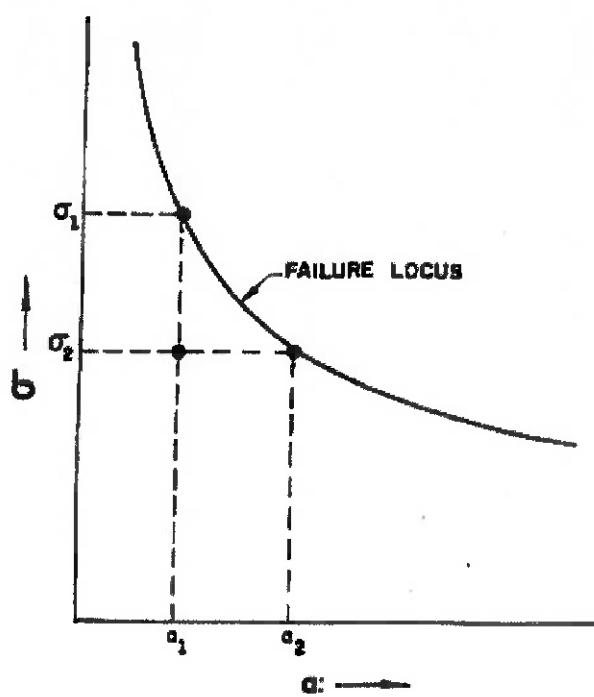


Figura 15: Lugar geométrico da falha

Considerando-se um componente que possui uma trinca de dimensão a_1 sob tensão σ_2 ($\sigma_2 < \sigma_1$), conclui-se que o mesmo não falhará, já que a trinca a_1 é menor que o correspondente tamanho crítico a_2 . Nestas condições, tem-se que a segurança baseia-se na hipótese do carregamento ser estático e da trinca (falha) não se propagar (aumentar) em serviço. No entanto, sabe-se que esta última afirmação não ocorre verdadeiramente nas estruturas.

Portanto, embora a tenacidade à fratura de um material estabeleça a condição de colapso do componente estrutural, a vida em serviço do mesmo, ou seja, sua durabilidade, é função, principalmente, de sua resistência ao crescimento da trinca, isto é, da resistência ao crescimento da trinca devido à fadiga, à fluência, à corrosão localizada, etc.

Sob carregamento cíclico, a trinca “dominante” no material cresce, em função do número de ciclos, de um tamanho inicial a_0 até um tamanho crítico a_c , que causa a ruptura do elemento mecânico. Com a caracterização da cinética do crescimento da mesma, através de uma “força propulsora”, é possível estimar a vida em serviço e/ou os intervalos de inspeção técnicos, conforme as condições de carga e de ambiente do ensaio.

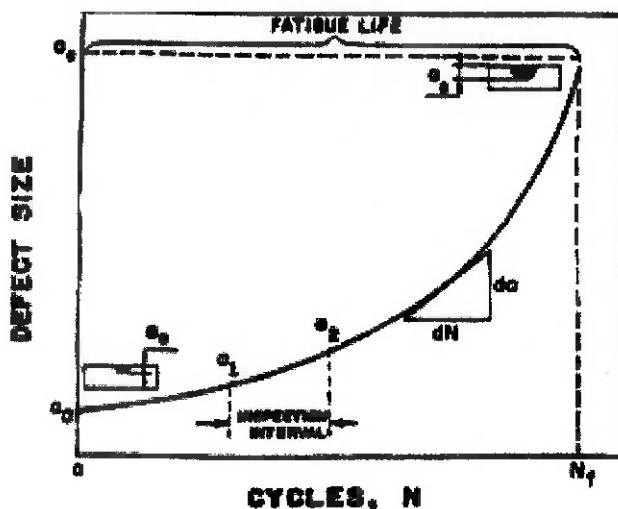


Figura 16: Esquema do comprimento da trinca (a) em função do número de ciclos (N)

Já que o crescimento da trinca tem início no seu ponto mais solicitado (região de maior tensão nas extremidades da falha), a caracterização da “força propulsora” dá-se em termos de fatores de intensificação de tensão, isto é, do alcance (raio de ação) do fator intensificador Δk , com:

$$\Delta k = k_{\max} - k_{\min} \quad (6)$$

onde, k_{\max} e k_{\min} são o máximo e o mínimo fator de intensificação de tensão correspondentes aos carregamentos máximo e mínimo, respectivamente.

A taxa de crescimento da trinca por ciclo, da/dN , pode ser expressa como função de Δk através de uma equação matemática, associada às condições de contorno apropriadas. Como consequência, obtém-se a vida de fadiga do material (número de ciclos até a ruptura). Uma das relações empíricas conhecidas estabelece que:

$$da/dN = C(\Delta k)^m \quad (7)$$

onde, a : comprimento da trinca; N : número de ciclos; Δk : fator de intensificação de tensão e C, m : constantes que dependem do material, razão de carga, temperatura, etc.

Outra relação possível é:

$$C = A/(\Delta k_0)^m \quad (8)$$

onde, A e k_0 são constantes que variam para cada material ensaiado.

Como a taxa de crescimento da trinca de fadiga depende de muitas variáveis, de maneira genérica, pode-se escrever:

$$da/dN \approx \Delta k / \Delta N = f(\Delta k, R, \text{temperatura}, \dots) \quad (9)$$

A equação (7) pode ser integrada para se determinar a vida em serviço (N_f) ou um intervalo de inspeção (ΔN) para um certo elemento estrutural em estudo. Assim, tem-se:

$$N_f = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{f(\Delta k, R, \dots)} \Leftrightarrow \Delta N = N_2 - N_1 = \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{f(\Delta k, R, \dots)} \quad (10)$$

O gráfico di-log da taxa de crescimento (da/dN) pelo fator de intensificação de tensão (Δk) apresenta uma curva de aparência similar à letra “S”, distinguindo-se claramente três regiões. O limite inferior do fator de intensificação de tensão na região I denota o valor limite abaixo do qual a trinca não se propagará. Na região III, o limite superior indica as condições para uma taxa acelerada de crescimento da trinca de fadiga, associada ao início da ruptura final da peça.

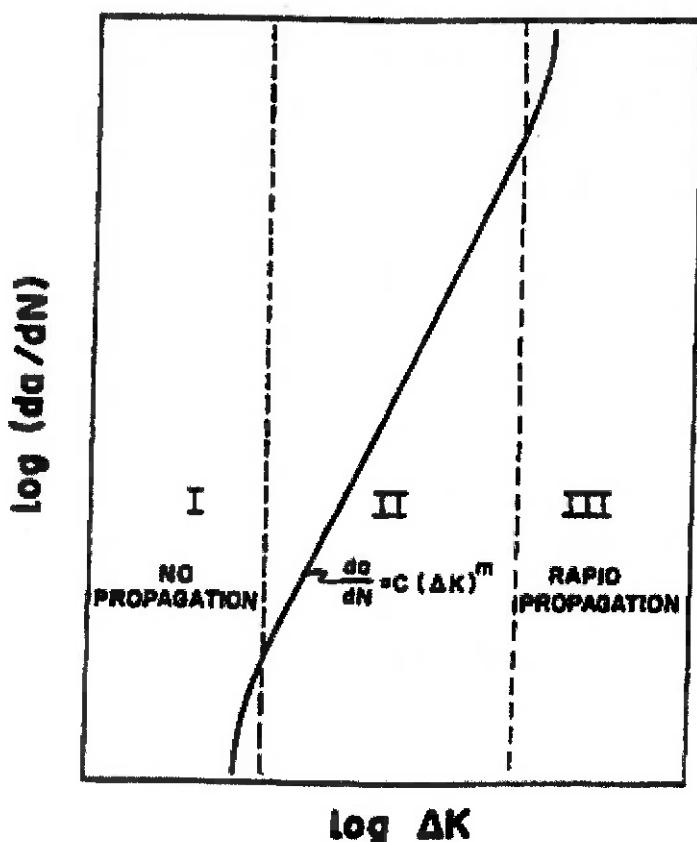


Figura 17: Taxa de propagação da trinca (da/dN)
pelo fator de intensificação de tensão (Δk)

Muitos pesquisadores apresentam seus estudos sobre os mecanismos de propagação das trincas de fadiga baseados nas análises teórica e experimental de três estágios:

- Estágio 1: A microestrutura do material, a razão de tensão R e o ambiente influem diretamente no crescimento da trinca;

- Estágio 2: A influência dos fatores citados no estágio anterior é mínima e a propagação é característica de um movimento contínuo do meio material;
- Estágio 3: Os mecanismos são idênticos àqueles aplicados aos modos estáticos (clivagem, aglutinação intergranular, etc.). A influência do ambiente é mínima.

A avaliação experimental dos ensaios de fadiga, para um mesmo tipo de material, revela que o conjunto de pontos do gráfico di-log da/dN por ΔK recaem sempre sobre a mesma reta média. Assim, permite-se assumir que o parâmetro ΔK descreve de maneira única a taxa de crescimento da falha para diversas aplicações em engenharia. No exemplo ilustrado abaixo, tem-se um comparativo da propagação de trincas de fadiga para dois casos distintos: (a) direção longitudinal (paralela à direção da laminação) e (b) direção transversal (perpendicular à direção da laminação).

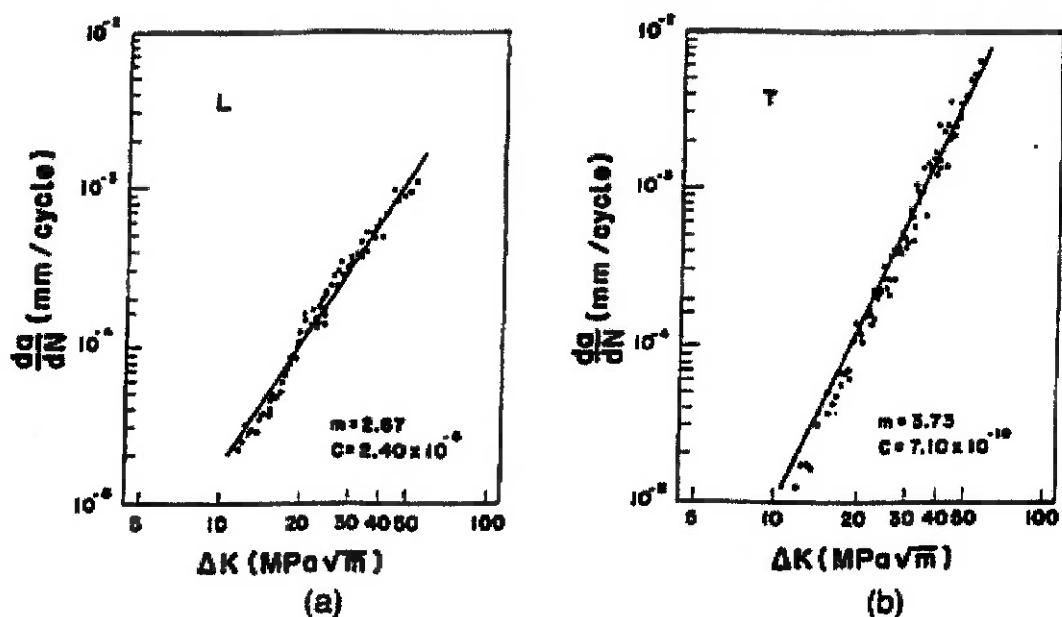


Figura 18: Propagação da trinca de fadiga (aço SAE-4140)

3.15 Procedimentos e Técnicas no Ensaio de Fadiga

Durante o planejamento de um ensaio de fadiga, é necessário estabelecer as variáveis que serão estudadas. A maioria dessas variáveis podem ser agrupadas nas seguintes categorias:

- Material do corpo de prova: composição, estrutura, tamanho de grão, tensões residuais, tratamentos superficiais e/ou térmicos, etc;
- Tensão aplicada: amplitude de tensões, intensidade da tensão média, valores máximo e mínimo, tipo e freqüência do ciclo de tensões, etc;
- Condições ambientais (local do ensaio): temperatura, umidade relativa, radiação solar, agentes corrosivos, etc.

É importante estar consciente de que mais de uma variável pode ser afetada através de uma simples modificação no material ou no método do ensaio.

Após a estruturação do ensaio e a definição das variáveis que estarão sendo analisadas, o número de corpos de prova a serem testados e a faixa de desvios, permitida para os valores medidos, também já podem ser especificados.

O número de valores discretos coletados não dependerá, exclusivamente, da variável principal que estará sendo observada, visto que outros fatores poderão estar influenciando nos resultados finais. Portanto, é comum partir-se para uma análise mais minuciosa, ou ainda, para um maior número de testes, objetivando-se melhores condições de estudo a respeito da sobreposição dos resultados.

A obtenção de uma curva S-N de boa qualidade está diretamente associada ao número de corpos de prova devidamente preparados e testados. Sugere-se um número entre 30 e 50 corpos para que a variedade de resultados possibilite um tratamento estatístico adequado (curva média, desvio padrão, variância, etc.).

3.16 Recomendações Gerais para o Ensaio de Fadiga

Durante a montagem e o ajuste do corpo de prova na máquina de ensaio, devem-se evitar os riscos, arranhões e as marcas superficiais, originados de um possível contato acidental com algum outro objeto, visto que essas "irregularidades" podem alterar o limite de resistência à fadiga do material em questão. O simples fato de se tocar diretamente o corpo de prova com os dedos, pode gerar um princípio de corrosão, que, consequentemente, irá modificar as propriedades de fadiga em estudo.

Qualquer máquina de ensaio de fadiga requer um sistema de amortecimento (molas, borracha, cortiça, etc.) que isola a mesma de vibrações provenientes de máquinas vizinhas e também do seu próprio regime normal de operação.

Os mancais (rolamentos) da máquina devem ser submetidos periodicamente a uma manutenção preventiva que corrige pequenos problemas como folgas de encaixe entre cubo e eixo, aspereza excessiva nos contatos, controle da lubrificação, etc.

A vibração excessiva da máquina, já citada anteriormente, é uma das principais causas de desvios nos resultados finais do ensaio mecânico. A solução para esse problema pode estar na mudança da velocidade de rotação do motor, do uso de um corpo de prova mais espesso, que altera a rigidez do sistema mecânico ou da troca do material dos membros de transmissão (hastes e alavancas), que afetam os valores de seus momentos de inércia.

Em máquinas de flexão repetida, nas quais é possível a utilização de alavancas e hastes ajustáveis conectadas ao corpo de prova e ao mecanismo de produção da carga, recomenda-se o dimensionamento e a construção minuciosa desse sistema, evitando-se movimentos e vibrações laterais que podem influenciar na freqüência natural de operação da máquina.

É importante, também, a verificação periódica dos elementos de fixação (porcas, parafusos, etc.), do dispositivo de parada do motor ao final

do ensaio e do aparelho de controle das tensões aplicadas, caso exista, favorecendo-se, assim, a resolução de qualquer possível problema referente à calibração, desempenho ou funcionamento da máquina de ensaios de fadiga.

3.17 Exemplos de Aplicação dos Ensaios de Fadiga

Os dados obtidos com os ensaios de fadiga podem ser utilizados, por exemplo, na avaliação de:

- Diferentes processos de fabricação;
- Composições de materiais;
- Efeitos de acabamentos superficiais, tratamentos térmicos, martelamento (“shoot peening”) e outros fatores geométricos;
- Métodos de otimização de projetos;
- Efeitos de ambientes corrosivos ou de temperatura elevada.

Abaixo, encontram-se alguns exemplos específicos da aplicação dos resultados obtidos com ensaios de fadiga, mostrando a abrangência e a variedade de situações existentes para estudo e pesquisa:

- Controle de qualidade de pistões forjados;
- Avaliação de processos de fundição;
- Durabilidade de chassis de automóveis e caminhões;
- Integridade dos processos de soldagem;
- Durabilidade de conexões de circuitos eletrônicos;
- Expectativa de vida de cabos de aço para sustentação de pontes;
- Seleção de elementos de liga para engrenagens;
- Confiabilidade de molas para válvulas de motores;
- Controle de qualidade de correntes de aço;
- Avaliação de materiais metálicos pulverizados (metalurgia do pó).



Figura 19: Fratura em estrutura naval devido à fadiga

4. PROPOSTAS DE MELHORIA DA MÁQUINA DE ENSAIOS

Encontram-se relacionadas a seguir as propostas de melhoria da máquina de ensaios que promoverão a otimização do funcionamento da mesma. Apesar de algumas das alterações no protótipo construído não terem sido finalizadas, o estado atual da máquina permitiu a realização dos ensaios experimentais previamente planejados. São elas:

- Aperfeiçoamento da transmissão do movimento vertical do excêntrico ao corpo de prova para garantir o deslocamento da haste em um único plano (acoplamento de guias ao excêntrico);
- Adequação do sistema elétrico da máquina, através da construção de um painel de controle com uma botoeira de acionamento a distância, um contador de ciclos (análogo ou digital) e um tacômetro;
- Implementação de um balancim entre o suporte do corpo de prova e o conjunto do excêntrico para proporcionar a aplicação de diferentes tensões no corpo de prova;
- Troca da borracha de vedação do mecanismo de geração de amplitude devido ao vazamento de óleo;
- Projeto de um dispositivo (sistema de relé) para a parada do motor ao final do ensaio (ruptura do corpo de prova);
- Troca do suporte do corpo de prova por uma viga em "U", otimizando o funcionamento do novo sistema de transmissão de forças e momento fletor;
- Instalação de um sensor de pulsos próximo ao corpo de prova;
- Modificação do sistema que possibilita a amplitude do ciclo, buscando uma maior precisão no ensaio;
- Verificação da efetividade do mecanismo de amortecimento da máquina;
- Cobertura da estrutura da máquina com chapas laminadas, visando um melhor acabamento final;
- Pintura da estrutura para uma melhoria estética da mesma;

5. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS GERAIS PARA A MÁQUINA DE ENSAIOS

O baixo grau de vibração e ruído da máquina é caracterizado como uma exigência funcional, visto que as vibrações não podem influenciar nos resultados dos ensaios e nem comprometer a estrutura (base) que suporta a máquina. Os componentes da mesma também devem ser resistentes à fadiga, para não falharem juntamente com o corpo de prova.

Como exigências operacionais, necessita-se de um procedimento de ensaio que facilite a coleta dos dados para futuras análises, além de um prático e rápido manuseio do sistema de transmissão e de fixação do corpo de prova por parte do operador.

Com relação às exigências construtivas, a máquina não deve possuir dimensões exageradas e o projeto e a fabricação de suas peças devem ser condizentes com os equipamentos de usinagem disponíveis no mercado e, principalmente, na Oficina do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP. A construção também deve considerar a facilidade de montagem da máquina e a possibilidade de reposição de peças.

Os principais requisitos teóricos para a realização do aperfeiçoamento do projeto da máquina de fadiga cíclica estão concentrados em conhecimentos adquiridos nas seguintes disciplinas: Laboratório de Processos de Fabricação I (2º ano), Laboratório de Metrologia e Ensaios Mecânicos I (2º ano), Propriedades e Comportamentos Mecânicos dos Materiais (2º ano), Resistência dos Materiais I e II (2º ano), Estruturas Mecânicas I e II (3º/5º anos), Projeto de Máquinas/Mecanismos (3º/4º anos), Laboratório de Protótipos (3º ano) e Máquinas de Fabricação I e II (5º ano).

6. APERFEIÇOAMENTOS DA MÁQUINA DE ENSAIOS

A primeira mudança implementada na máquina de fadiga cíclica refere-se ao projeto e à fabricação de uma estrutura de aço bastante simples, cuja finalidade é garantir o deslocamento da haste, conectada à biela do excêntrico, em um único plano. Isto significa, em termos cinematográficos, que o mecanismo de transmissão do movimento vertical do excêntrico apresenta uma trajetória estritamente linear, possibilitada pelas guias existentes na estrutura projetada (tem-se um movimento cíclico e constante, para cima e para baixo).

A haste de conexão e o pino deslizante, que interligam a biela ao mecanismo de acoplamento entre o suporte do corpo de prova e o conjunto do excêntrico (balancim), têm, como requisito de projeto, as suas fabricações com um material de elevada tensão de escoamento (por exemplo, um aço SAE-4340 temperado, cujos elementos de liga são o cromo e o molibdênio), já que ambos não podem falhar (ocorrência de ruptura) durante o transcorrer do ensaio. Algumas possíveis concepções físicas, para a geometria da haste de conexão, encontram-se esquematizadas na figura abaixo.

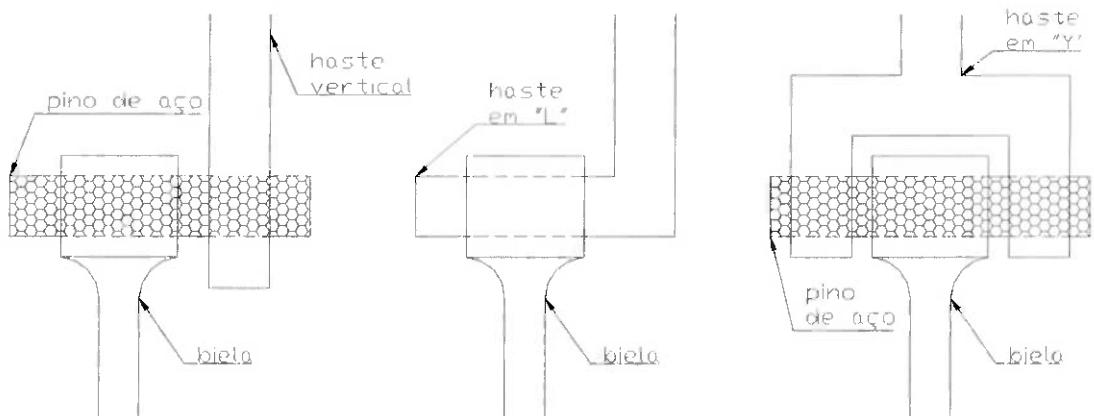


Figura 20: Alternativas para a haste de conexão

A segunda alteração realizada na máquina de ensaios consiste na troca do suporte para o corpo de prova. Objetiva-se, desta maneira, uma melhoria nos resultados dos ensaios, visto que a correta fixação do corpo,

durante o teste, confia ao mesmo uma distribuição de tensões sem grandes variações e, consequentemente, a mínima influência nas propriedades de fadiga do material. A substituição da base em ferro fundido (na realidade, uma carcaça de bomba hidráulica) por uma estrutura de chapas de aço, unidas após um processo de soldagem, com garras fixadoras e de simples geometria, foi a ação tomada para o atendimento dos objetivos já citados.

Convém ressaltar a necessidade da introdução de um apoio para o conjunto do excêntrico, visando-se o nivelamento das polias. Assim, tem-se uma adequada transmissão por correias, garantindo-se a transferência de potência, calculada analiticamente, do motor para o mecanismo de movimento cíclico (excêntrico). Outra necessidade observada, próximo ao início dos testes experimentais, refere-se à introdução de espaçadores no pino deslizante, de modo a garantir o paralelismo entre as duas hastes de conexão soldadas no balancim com as mesmas que se encontram acopladas ao eixo.

Quanto ao projeto de um dispositivo para a parada da máquina de ensaios, após a ruptura do corpo de prova, pode-se dizer que a alternativa de maior viabilidade corresponde ao emprego de dispositivos de comando (sistema de relê), através da implementação de um circuito elétrico de comando à distância, com o auxílio de botoeiras, chaves liga-desliga e lâmpadas de sinalização.

Outra alteração efetuada na máquina de fadiga cíclica requereu uma análise voltada para a área de Estruturas Mecânicas e Resistência dos Materiais, visto que se tratava da implementação de um balancim entre o suporte do corpo de prova e o conjunto do excêntrico, para proporcionar a aplicação de diferentes valores de tensão no corpo de prova. O correto dimensionamento e posicionamento do balancim têm, como consequência direta, o proporcionamento de resultados confiáveis e de qualidade. A seguir, encontra-se a modelagem e um breve memorial de cálculo com relação a este aperfeiçoamento.

Para o dimensionamento do sistema com o balancim, primeiramente, realizou-se a análise dos esforços ativos e reativos neste componente,

através de seu diagrama de corpo livre. Observa-se que a força F , imposta pelo excêntrico a uma das extremidades do balancim, é alternada e os respectivos valores dos esforços e deslocamentos são, em módulo, iguais nas duas configurações.

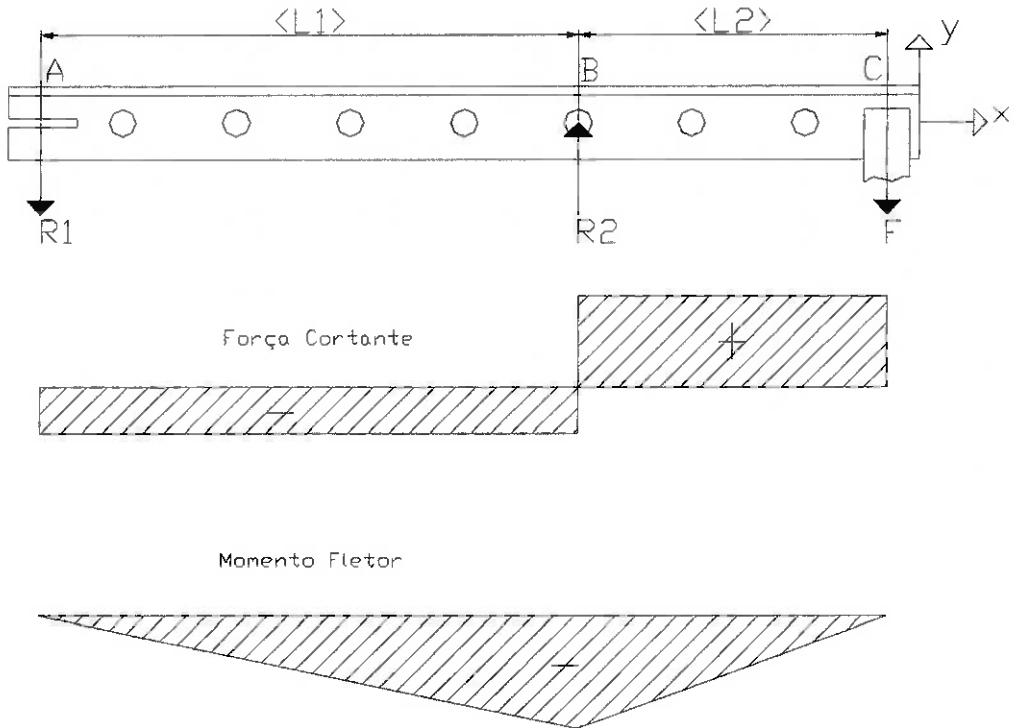


Figura 21: Modelagem dos esforços ativos e reativos no balancim
(modelo: viga biapoiada – carga concentrada em balanço)

Calcularam-se os valores das reações, forças cortantes, momentos fletores e deslocamentos em função das variáveis da figura acima:

$$R_1 = -\frac{F \cdot l_2}{l_1} \quad (11)$$

$$R_2 = \frac{F}{l_1} \cdot (l_1 + l_2) \quad (12)$$

$$V_{AB} = -\frac{F \cdot l_2}{l_1} \quad (13)$$

$$V_{BC} = F \quad (14)$$

$$M_{AB} = -\frac{F \cdot l_2 \cdot x}{l_1} \quad (15)$$

$$M_{BC} = F \cdot (x - l_1 - l_2) \quad (16)$$

$$y_{AB} = \frac{F \cdot l_2 \cdot x}{6 \cdot E \cdot I_z \cdot l_1} \cdot (l_1^2 - x^2) \quad (17)$$

$$y_{BC} = \frac{F \cdot (x - l_1)}{6 \cdot E \cdot I_z} \cdot [(x - l_1)^2 - l_2 \cdot (3 \cdot x - l_1)] \quad (18)$$

$$y_C = -\frac{F \cdot l_2^2}{3 \cdot E \cdot I_z} (l_1 + l_2) \quad (19)$$

Adotando-se um corpo de prova (aço SAE-1020) de comprimento igual a 150 mm (L), com uma seção crítica retangular de 2,5 mm de espessura (h) e 30 mm de largura (b), calcula-se o seu momento de inércia ($I_{C.P.}$):

$$I_{C.P.} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{30 \cdot 2,5^3}{12} \cong 39,1 \text{ mm}^4 \quad (20)$$

Já para um corpo de prova de menor rigidez (aço SAE-1006) com uma seção de 1,5 mm (h) e largura igual a 20 mm (b), chega-se, analogamente, ao valor de $I_{C.P.}$:

$$I_{C.P.} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{20 \cdot 1,5^3}{12} \cong 5,6 \text{ mm}^4 \quad (21)$$

Pode-se determinar a tensão desejada, na seção crítica do corpo de prova, através do emprego de um modelo de uma viga em balanço engastada em uma extremidade.

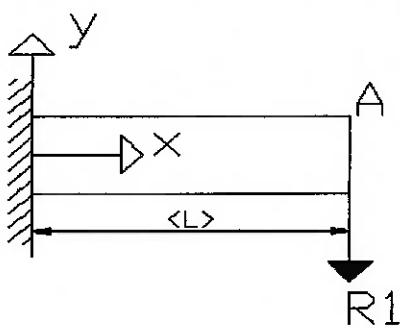


Figura 22: Modelagem dos esforços no corpo de prova
(modelo: viga em balanço engastada em uma extremidade –
carga concentrada na extremidade livre)

Logo, o valor da tensão normal (σ), atuante na seção do engaste, em kgf/mm^2 , é determinado através da expressão:

$$\sigma = \frac{M_z \cdot y}{I_z} \quad (22)$$

Devido ao modelo adotado para a fixação do corpo de prova no suporte da máquina, considerou-se um comprimento efetivo (L_{efetivo}) para os cálculos da tensão, submetida ao corpo de prova, na seção do engaste. Assim, para o protótipo construído, mediu-se que $L_{\text{efetivo}} = 85 \text{ mm}$. Sabendo-se que $M_z = R_1 \cdot L_{\text{efetivo}}$, $y = h/2$ e $I_z = I_{\text{C.P.}}$, após as substituições, tem-se que:

$$\sigma = \frac{R_1 \cdot L_{\text{efetivo}} \cdot h}{I_{\text{C.P.}} \cdot 2} = \frac{R_1 \cdot 85 \cdot 2,5}{39,1 \cdot 2} \cong 2,717 \cdot R_1 \quad (23)$$

Para o corpo de prova de aço SAE-1006, obtém-se a seguinte relação:

$$\sigma = \frac{R_1 \cdot L_{\text{efetivo}} \cdot h}{I_{\text{C.P.}} \cdot 2} = \frac{R_1 \cdot 85 \cdot 1,5}{5,6 \cdot 2} \cong 11,384 \cdot R_1 \quad (24)$$

Com o deslocamento vertical proporcionado pelo excêntrico (y_c), de aproximadamente 20 mm, o valor da força F próximo a 150 kgf e adotando-se um balancim de comprimento total igual a 400 mm (l_1+l_2), é possível determinar a ordem de grandeza das principais variáveis que envolvem o ajuste da máquina de testes, antes do início do ensaio.

O balancim, assim como o corpo de prova, possui um módulo de elasticidade (E) igual a 21000 kgf/mm². Já o momento de inércia do balancim ($I_{balancim}$) depende da geometria de sua seção transversal. Adotou-se uma seção transversal em "T", maciça e simétrica, com as respectivas dimensões representadas na figura abaixo.

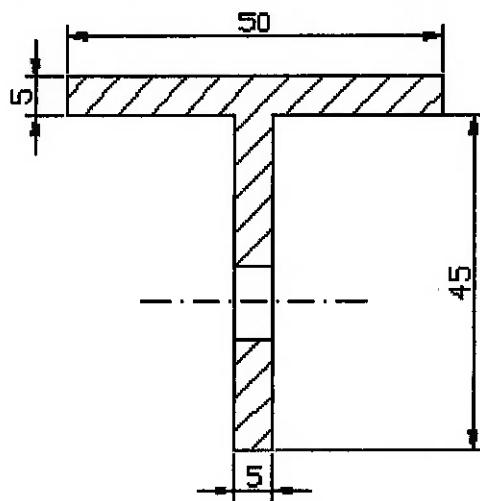


Figura 23: Seção em corte do balancim (perfil "T")

Da Resistência dos Materiais, tem-se que:

$$I_{balancim} \approx 112503 \text{ mm}^4 \quad (25)$$

Assim, é possível construir uma tabela englobando os parâmetros que influenciam o posicionamento do balancim e, consequentemente, os resultados do ensaio de fadiga. Tem-se que:

δ_v = deslocamento vertical na extremidade em balanço do corpo de prova;

R_1 = força aplicada na extremidade em balanço do corpo de prova;

l_2 / l_1 = razão de comprimentos;

l_1 = 1^a componente de comprimento do balancim;

l_2 = 2^a componente de comprimento do balancim;

σ = tensão normal na flexão, atuando na seção crítica do corpo de prova (seção do engaste).

Convém ressaltar que a “entrada” do sistema, para a avaliação das tensões aplicadas no corpo de prova, é o deslocamento vertical imposto pelo conjunto do excêntrico em uma das extremidades do balancim. Este deslocamento possui um valor fixo de 20 mm. Assim, o que permite alterar o valor da tensão aplicada é o ajuste dos comprimentos dos “braços” do balancim, realizado com a movimentação do apoio simples ao longo dos trilhos conectados à base da máquina.

Tabela III: Valores das variáveis em função da faixa de tensão σ
 (aço SAE-1006)

δ_v (mm)	R_1 (kgf)	l_2 / l_1	l_1 (mm)	l_2 (mm)	σ (kgf/mm ²)
0,8	0,4	0,003	398,8	1,2	5,0
1,1	0,7	0,004	398,3	1,7	7,5
1,5	0,9	0,006	397,7	2,3	10,0
1,9	1,1	0,007	397,1	2,9	12,5
2,3	1,3	0,009	396,5	3,5	15,0
2,7	1,5	0,010	395,9	4,1	17,5
3,1	1,8	0,012	395,4	4,6	20,0
3,4	2,0	0,013	394,8	5,2	22,5
3,8	2,2	0,015	394,2	5,8	25,0
4,2	2,4	0,016	393,7	6,3	27,5
4,6	2,6	0,018	393,1	6,9	30,0
5,0	2,9	0,019	392,5	7,5	32,5
5,4	3,1	0,020	392,0	8,0	35,0
5,7	3,3	0,022	391,4	8,6	37,5
6,1	3,5	0,023	390,8	9,2	40,0
6,5	3,7	0,025	390,3	9,7	42,5
6,9	4,0	0,026	389,7	10,3	45,0
7,3	4,2	0,028	389,2	10,8	47,5
7,6	4,4	0,029	388,6	11,4	50,0
8,0	4,6	0,031	388,1	11,9	52,5
...
14,5	8,3	0,056	378,9	21,1	95,0
14,9	8,6	0,057	378,4	21,6	97,5
15,3	8,8	0,059	377,9	22,1	100,0
15,7	9,0	0,060	377,3	22,7	102,5
16,1	9,2	0,061	376,8	23,2	105,0
16,4	9,4	0,063	376,3	23,7	107,5
16,8	9,7	0,064	375,8	24,2	110,0
17,2	9,9	0,066	375,3	24,7	112,5
17,6	10,1	0,067	374,8	25,2	115,0
18,0	10,3	0,069	374,2	25,8	117,5
18,3	10,5	0,070	373,7	26,3	120,0
18,7	10,8	0,072	373,2	26,8	122,5
19,1	11,0	0,073	372,7	27,3	125,0
19,5	11,2	0,075	372,2	27,8	127,5
19,9	11,4	0,076	371,7	28,3	130,0

Tabela IV: Exemplos de materiais a serem ensaiados na máquina de fadiga e respectivas faixas de tensão

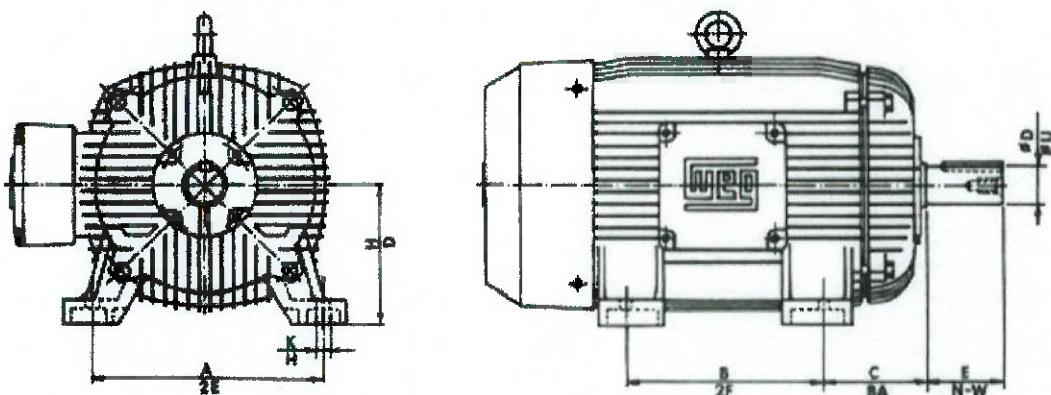
Material	Faixa de Tensão (kgf/mm ²)
Aço-doce	23 – 30
Aço-carbono (0,20% C)	20 – 36
Aço-carbono tratado (0,47% C)	30 – 55
Aço-liga tratado	50 – 85
Liga de alumínio	15 – 28
FoFo cinzento	05 – 18

A observação das tabelas anteriores permite concluir que quando a tensão aplicada é pequena, comparada com o limite de fadiga para aços, haverá um ensaio mais longo do que, por exemplo, quando houver uma solicitação da ordem de 30 kgf/mm² (o limite de resistência à fadiga é, aproximadamente, igual a 48 kgf/mm²).

Destaca-se aqui, também, o motor elétrico utilizado na máquina de ensaios. Para se atingir cerca de dez milhões de ciclos (número médio de ciclos para a fadiga de um corpo de prova), no menor tempo de ensaio possível, faz-se necessário a utilização de um motor de elevada rotação, algo em torno de 3600rpm.

$$\text{Tempo médio de ensaio} = \frac{10^7 \text{ ciclos}}{3600 \text{ ciclos/min} * 24\text{h/dia} * 60\text{min/h}} \approx 2 \text{ dias de ensaio}$$

O primeiro protótipo da máquina possuía um motor trifásico de 10cv e 3520rpm da marca WEG, conforme a figura abaixo.



Dimensões segundo ABNT/IEC (mm)

Modelo	H	A	B	C	K	ØD	E
132 S	132	216	140	89	12	38 K6	80

Figura 24: Motor trifásico WEG, modelo 132 S

(10 cv, 3520 rpm, 60 Hz, 220 V, 28 A)

Entretanto, observa-se que para a realização dos ensaios experimentais, tem-se a necessidade de uma menor rotação, visando-se adequar a freqüência de operação da máquina com a resistência estrutural de seus componentes e mecanismos. Uma das alternativas levantadas consistiu na possibilidade da introdução de um inversor de freqüência, capaz de controlar e variar a velocidade de motores elétricos de indução trifásicos.



Figura 25: Inversor de freqüência WEG

Devido ao elevado custo de obtenção deste equipamento (a pesquisa de preços efetuada pelo graduando apontou um custo de R\$ 2600,00), optou-se pela substituição do motor existente. Assim, adotou-se um motor

trifásico de 1700 rpm e 0,5 cv da marca MANZOLI (modelo SM124). Além disso, a troca da polia motora, de menor diâmetro, alterou a relação de transmissão de 1:1 para 1:2, fazendo-se com que a máquina trabalhe em torno de 850 rpm (aprox. 14,2 Hz).

7. ESTUDO COMPARATIVO

Visando-se um melhor entendimento da evolução construtiva da máquina de ensaios, optou-se por comparar, através de ilustrações e desenhos, os protótipos antes e depois da implementação dos aperfeiçoamentos. Com isso, é possível notar os componentes mecânicos projetados e, consequentemente, o modelo final do conjunto da máquina de ensaios.

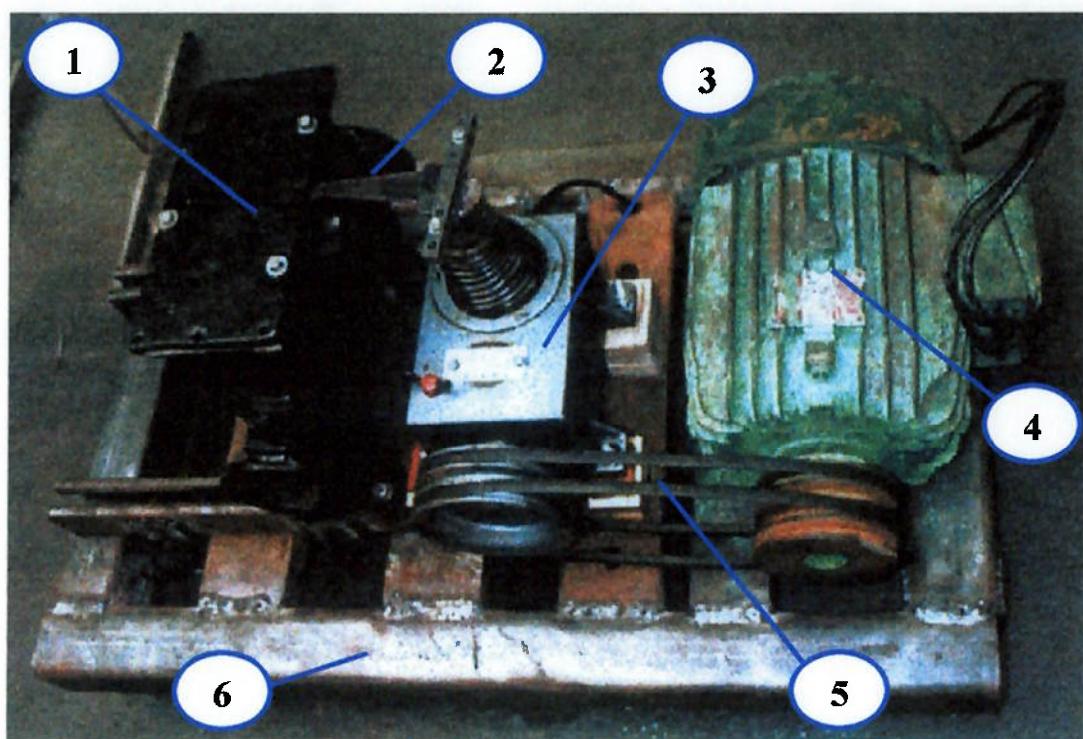


Figura 26: Máquina de ensaios – primeiro protótipo

Pos.	Denominação
1	Base em FoFo para apoio do C.P. (carcaça de bomba hidráulica)
2	Corpo de prova (C.P.) para ensaio de flexão
3	Conjunto do excêntrico com 40 mm de deslocamento vertical
4	Motor trifásico WEG (10 cv e 3520 rpm)
5	Transmissão por correias (perfil A-38)
6	Base da máquina – vigas em “U” soldadas

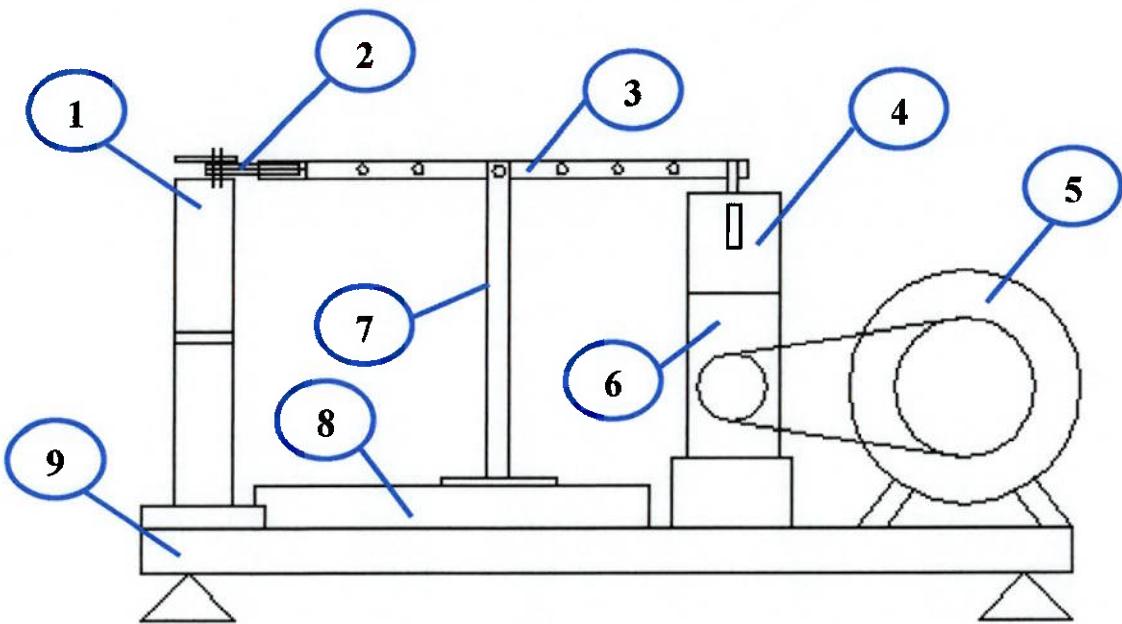


Figura 27: Desenho esquemático – protótipo aperfeiçoado

Pos.	Denominação
1	Suporte para o corpo de prova – estrutura soldada
2	Corpo de prova para ensaio de flexão
3	Balancim – viga em “T”
4	Estrutura com guias acopladas para o excêntrico
5	Motor trifásico MANZOLI (0,5 cv e 1700 rpm)
6	Conjunto do excêntrico com 40 mm de deslocamento vertical
7	Apoio simples para o balancim
8	Trilhos para movimentação do apoio simples
9	Base da máquina – vigas em “U” soldadas

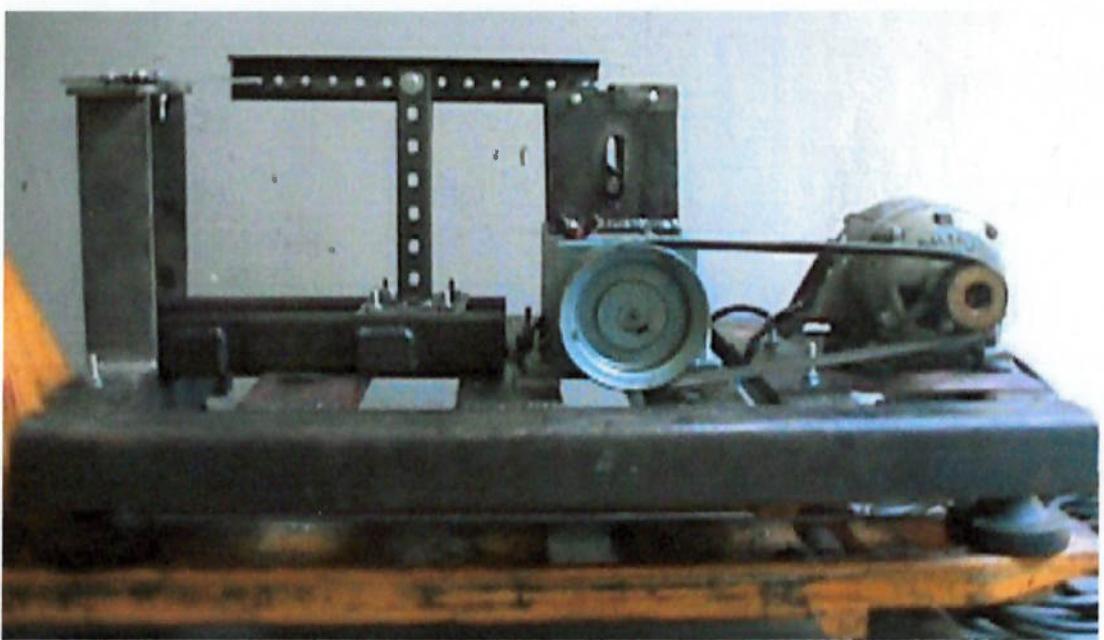


Figura 28: Máquina de ensaios aperfeiçoada

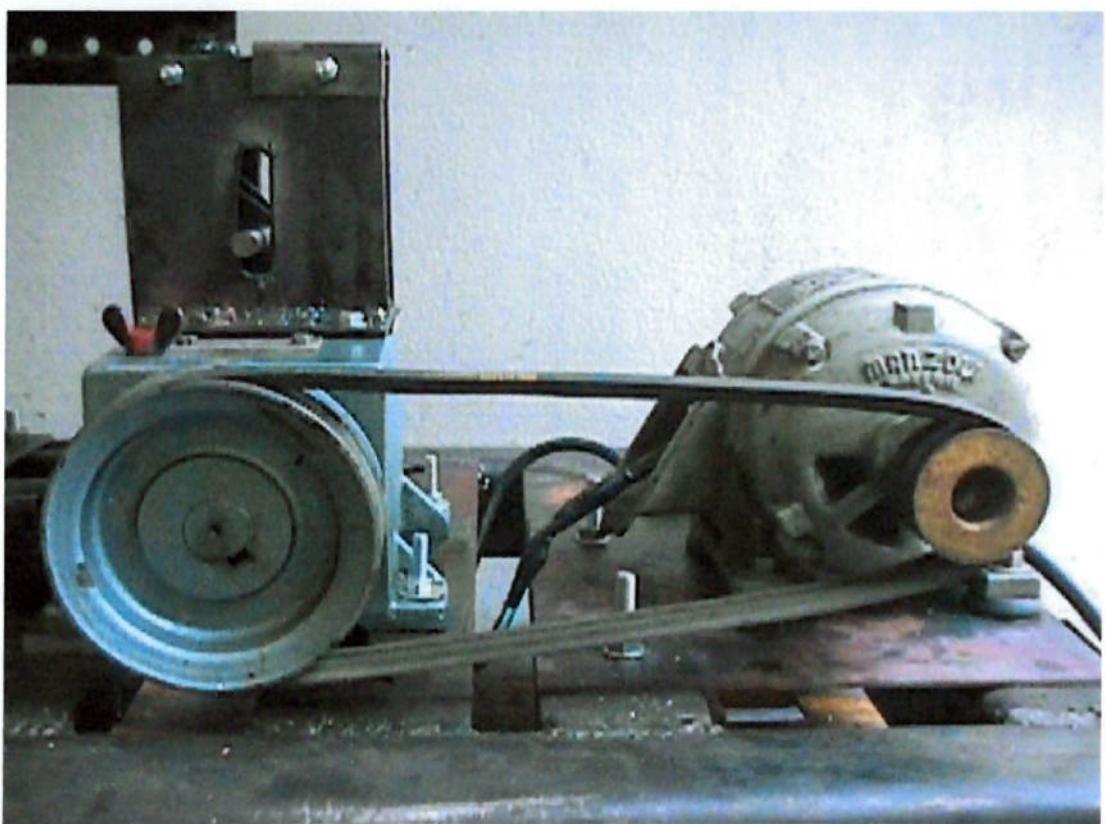


Figura 29: Máquina de ensaios – sistema de transmissão

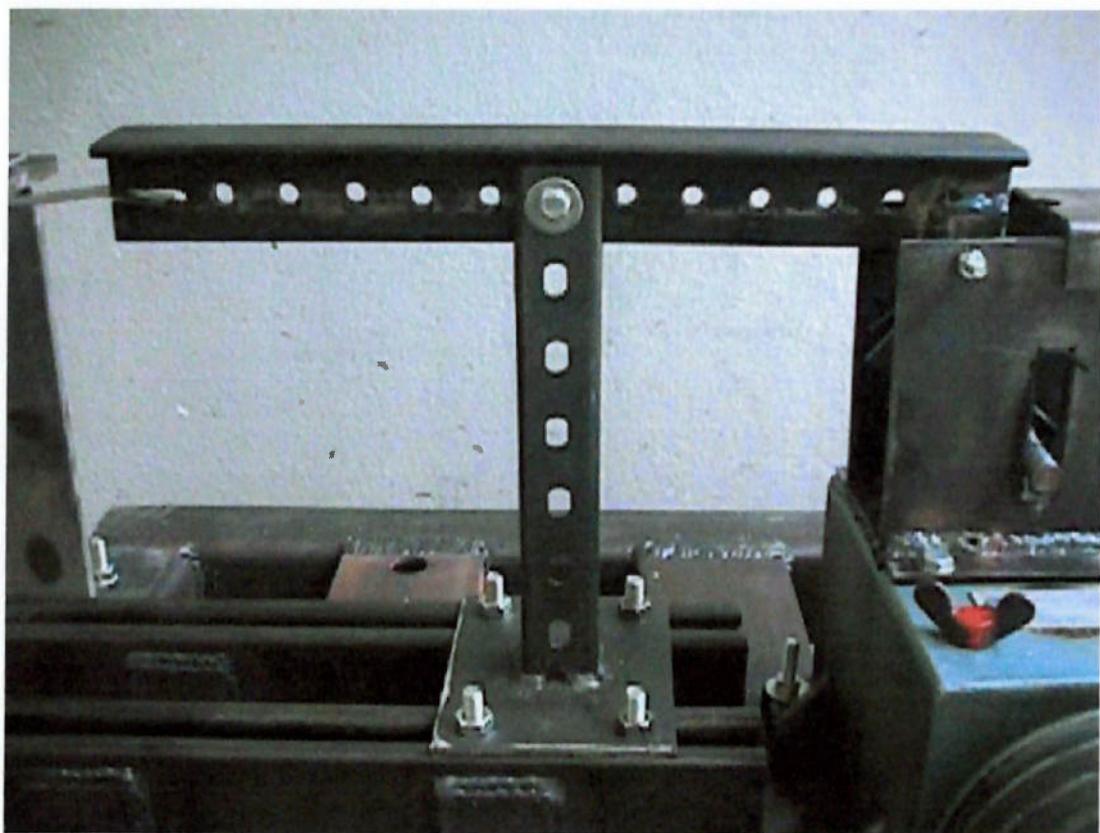


Figura 30: Máquina de ensaios – balancim

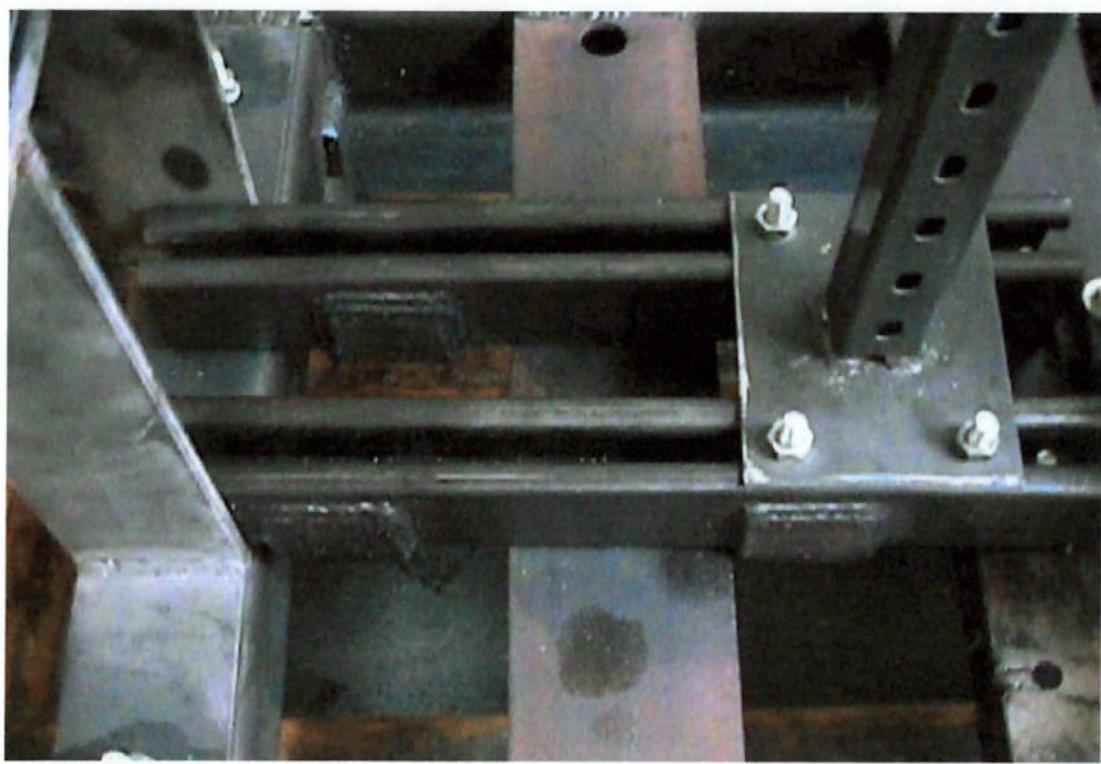


Figura 31: Máquina de ensaios – trilhos para movimentação do apoio

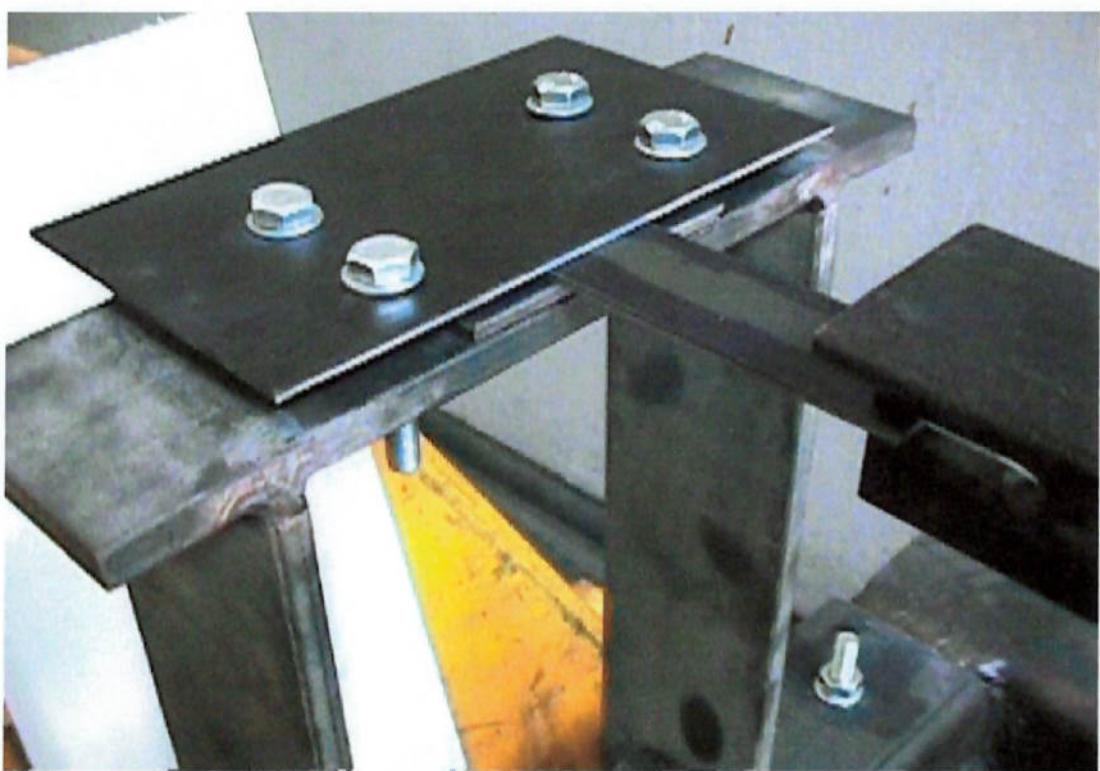


Figura 32: Máquina de ensaios – fixação do corpo de prova

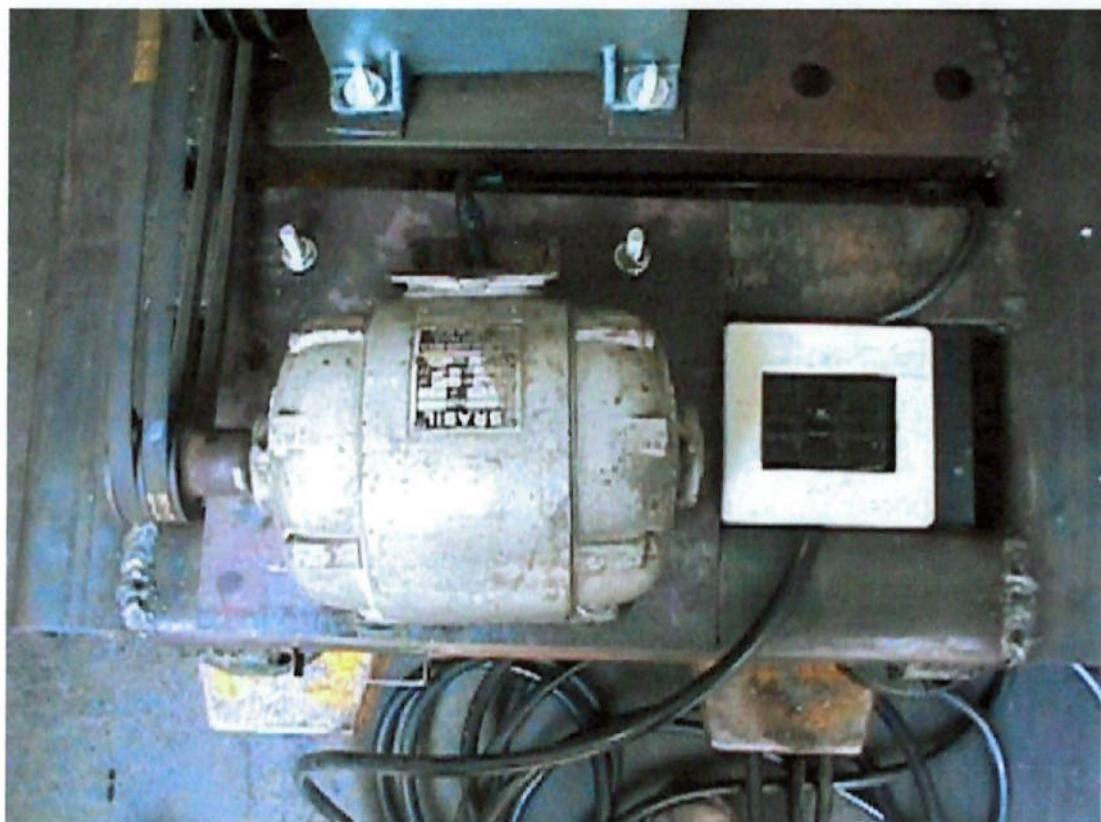


Figura 33: Máquina de ensaios – motor e acionamento elétrico

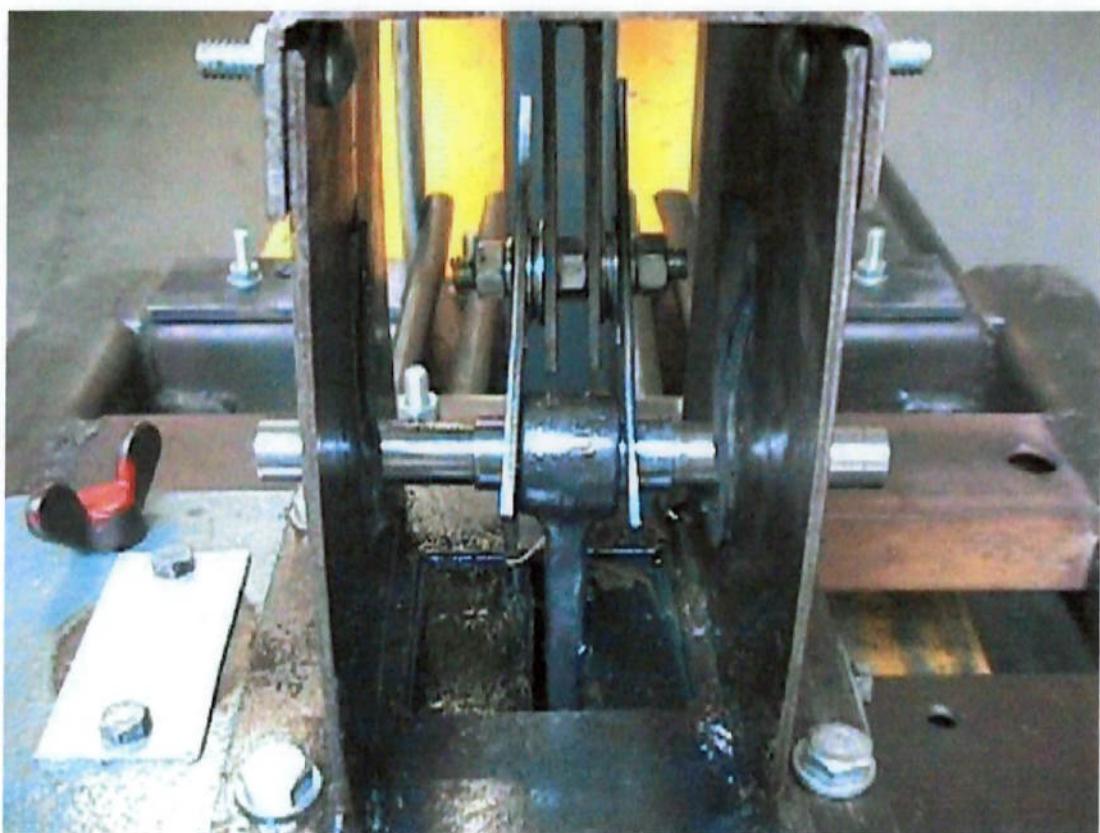


Figura 34: Máquina de ensaios – eixo da biela e espaçadores

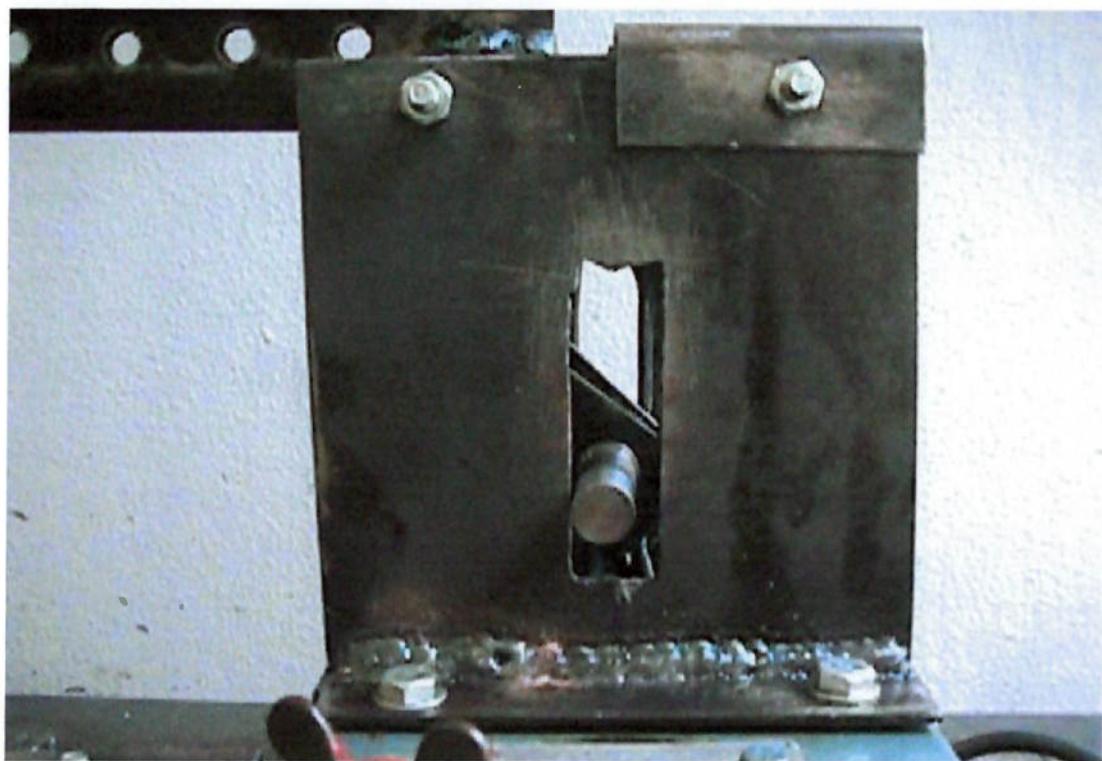


Figura 35: Máquina de ensaios – estrutura guiada para o excêntrico

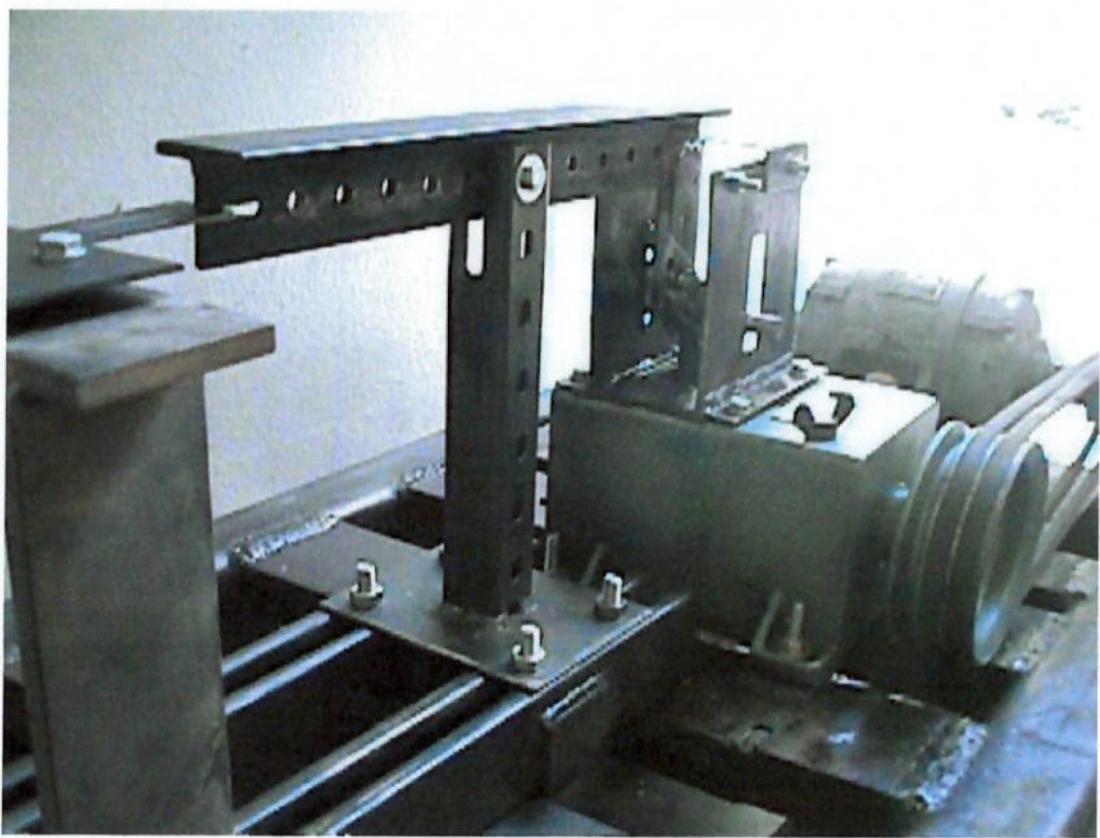


Figura 36: Máquina de ensaios – vista geral do conjunto

8. ESPECIFICAÇÃO DOS ENSAIOS – NORMA ASTM, DESIGNAÇÃO E468-90

Uma das maneiras para se alcançar bons resultados em ensaios de materiais consiste na utilização de uma metodologia e/ou procedimento padrão, que estabelece quais e como são as atividades necessárias para o cumprimento dos objetivos técnicos em questão, exibindo, de maneira clara, os resultados finais dos ensaios.

Buscando um perfeito entendimento dos conceitos de fadiga e, também, uma ferramenta para a explicação dos futuros resultados, comparando-os com dados contidos em referências bibliográficas, decidiu-se pela consulta das normas da ASTM, referentes aos ensaios de fadiga.

A norma técnica de designação E468-90 (*Prática Padrão de Apresentação de Resultados de Testes de Fadiga de Amplitude de Tensão Constante para Materiais Metálicos*) apresenta as informações indispensáveis para a correta divulgação dos resultados dos ensaios de fadiga. Assim, além dos procedimentos a serem seguidos pelo indivíduo que realiza o programa de testes de fadiga, esta norma reúne dados relativos a: terminologia e numenclatura aplicadas ao ensaio, especificações para a preparação dos corpos de prova, métodos para a apresentação dos resultados obtidos nos ensaios, exemplos de dados coletados em testes de fadiga, características dimensionais e de materiais para os corpos de prova, etc.

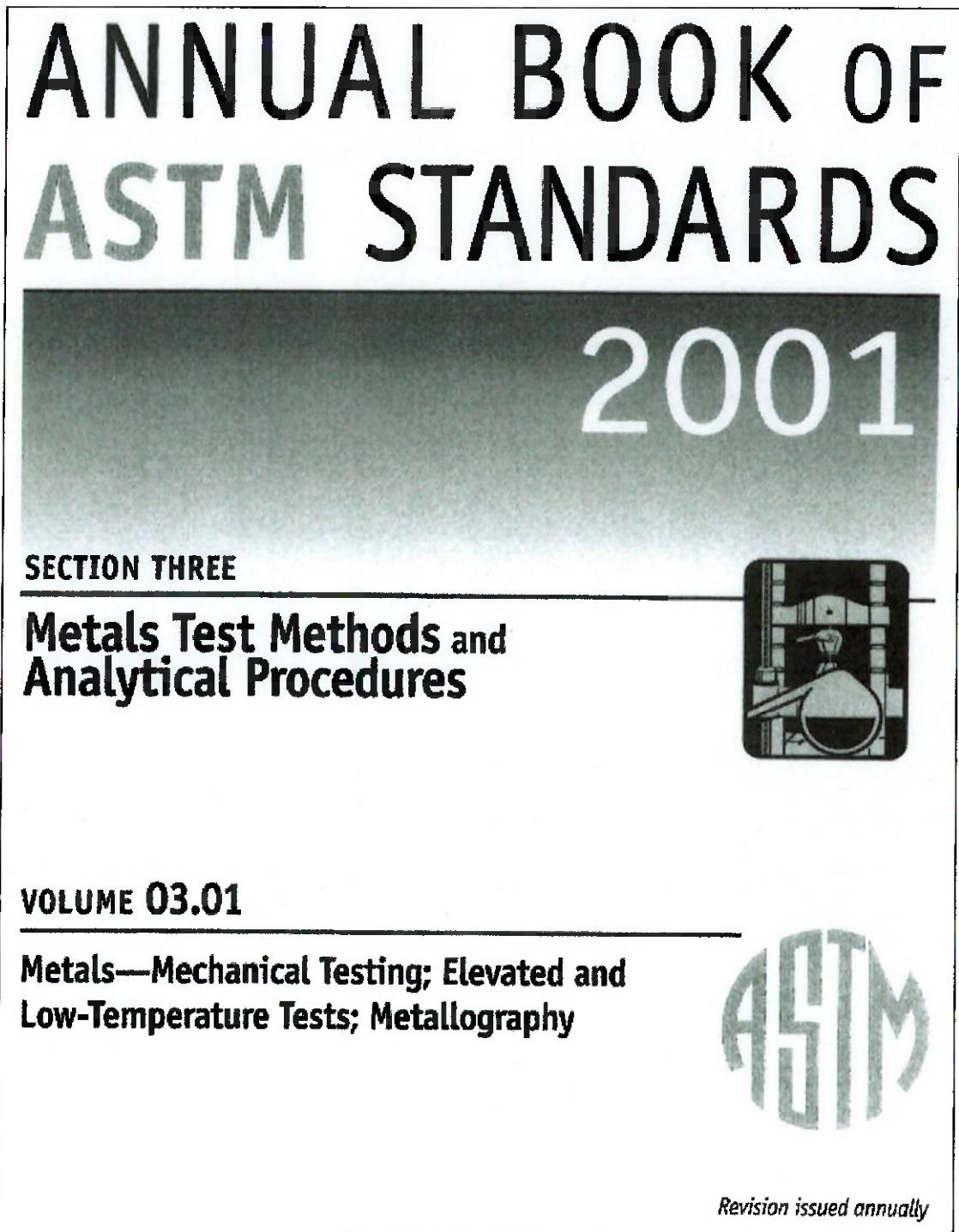


Figura 37: Normas ASTM - Volume 03.01

Outras fontes também foram consultadas (normas e livros técnicos), a fim de se assegurar que os resultados alcançados mantêm uma correlação lógica e condizente com a teoria referente às propriedades e comportamentos mecânicos dos materiais adquiridos em sala de aula, além

de proporcionar a verificação da confiabilidade da máquina de ensaios que está sendo operada. Pode-se citar, como exemplo, a norma relativa à *Prática Padrão para a Análise Estatística de Curvas de Vida de Fadiga Lineares ou Linearizadas (Curvas S-N)*.

Tabela V: Exemplo de dados coletados em testes de fadiga

Tensão Máxima (MPa)	Vida de Fadiga (x 10³ ciclos)	Observação
261	1437.8	com ruptura
249	10000.0	sem ruptura
261	8520.0	sem ruptura
249	8934.0	sem ruptura
261	8000.0	sem ruptura
347	63.5	com ruptura
325	162.6	com ruptura
347	44.9	com ruptura
304	228.4	com ruptura
347	46.2	com ruptura

9. PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Baseando-se na norma ASTM, designação E468-90, planejou-se a execução da seqüência abaixo de procedimentos:

- 1º) Especificações do corpo de prova;
- 2º) Verificação da montagem do corpo de prova e das condições ambientais para os testes;
- 3º) Execução dos ensaios de fadiga (coleta dos dados até a ruptura completa do corpo de prova);
- 4º) Divulgação dos resultados (apresentação gráfica e tabular);
- 5º) Conclusões e observações.

À princípio, pretendia-se realizar um conjunto de ensaios envolvendo três tipos de materiais diferentes, sendo que, para a coleta dos dados experimentais, seriam necessários, pelo menos, entre 10 a 15 corpos de prova. Assim, através de ferramentas estatísticas, pode-se descrever o comportamento do material ensaiado para os casos em que são consideradas amostras maiores de elementos (corpos de prova). No entanto, devido aos ajustes efetuados na máquina, após a sua montagem, realizou-se uma coleta de dados inferior ao planejamento realizado no início deste trabalho.

Convém ressaltar que uma das simplificações adotada, no momento da execução dos testes, consistiu na geometria do corpo de prova. Visando-se uma otimização do tempo de fabricação de cada elemento a ser ensaiado, adotaram-se chapas de perfil retangular (150 mm x 20 mm), com uma espessura igual a 1,5 mm.

Tabela VI: Materiais sugeridos para a execução dos ensaios

Material	Faixa de Tensão (kgf/mm ²)
Aço-carbono (0,20% C)	20 – 36
Aço-carbono tratado (0,47% C)	30 – 55
Liga de alumínio	15 – 28

10. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O material escolhido para a realização dos testes de fadiga foi o aço SAE-1006. Um exemplo de corpo de prova que foi ensaiado é ilustrado abaixo.

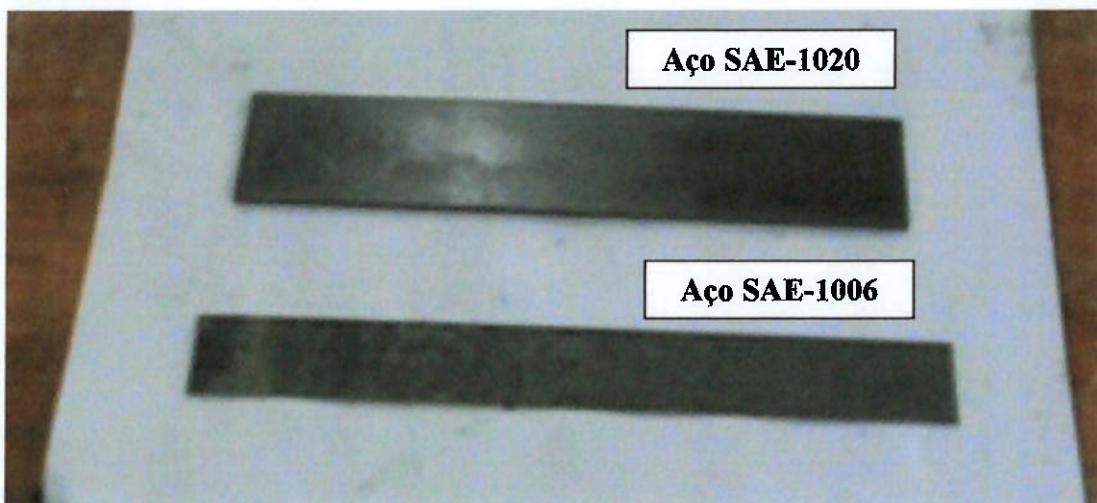


Figura 38: Corpos de prova para os ensaios

Executaram-se cinco ensaios experimentais, a uma temperatura média de 28°C, nos quais três corpos de prova fraturaram e dois não sofreram ruptura. A principal preocupação, antes do início dos testes, concentrou-se na checagem dos elementos de fixação dos mecanismos da máquina, a fim de que os mesmos transmitissem de maneira correta a deformação/tensão para o corpo de prova. Também foram verificados o posicionamento e a fixação (modelagem do engaste) do corpo de prova em seu suporte, prevenindo-se, portanto, alterações de amplitude de tensão na extremidade de aplicação da força.

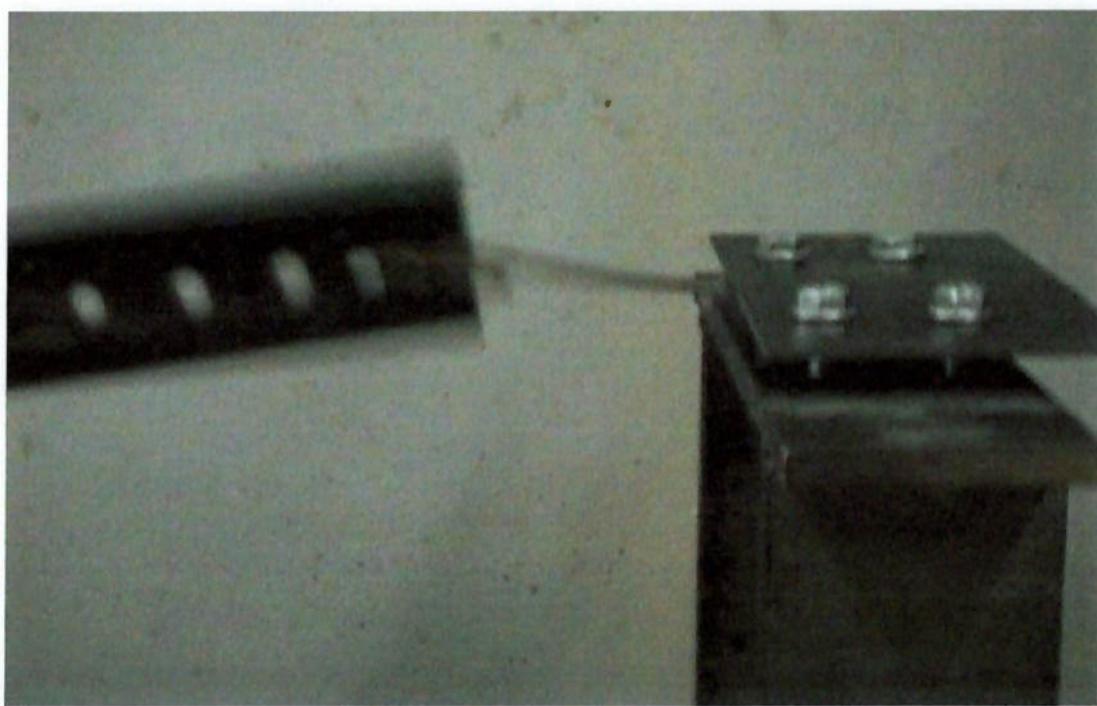


Figura 39: Máquina de fadiga em operação

Com o auxílio de um cronômetro, registrou-se a duração de cada ensaio para que, através da rotação do motor, fossem estimadas a quantidade de ciclos submetidas ao corpo de prova até a sua completa ruptura. O valor da amplitude de tensão, como já explicado anteriormente, é obtido a partir do posicionamento do apoio simples, conectado ao balancim, nos trilhos da máquina.



Figura 40: Corpo de prova fraturado (amostra – 02)

Os dados experimentais coletados foram comparados com a curva teórica, retirada de uma coletânea técnica especializada em ensaios de fadiga.

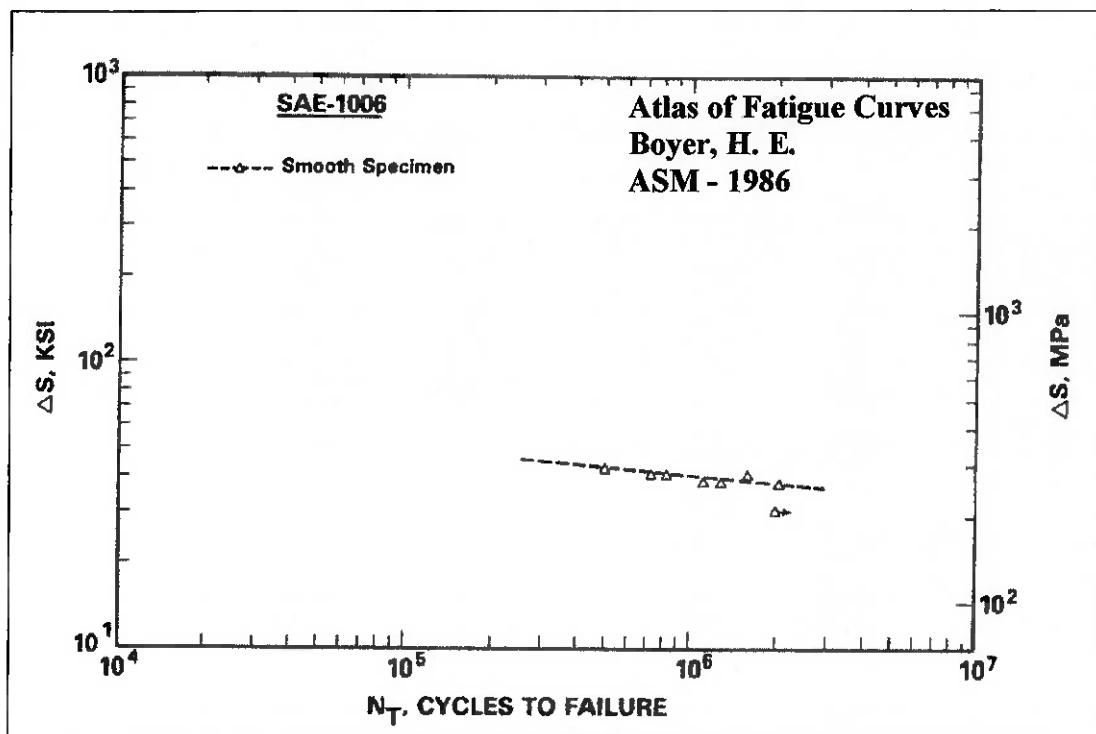


Figura 41: Curva S-N teórica para o aço SAE-1006

Tabela VII: Apresentação tabular dos resultados experimentais

Amostra	Amplitude de Tensão (σ_a)		Número de ciclos (N_f)	Tempo de ensaio (hs)	Observação
	kgf/mm ²	MPa			
01	25	245	49513	0,97	c/ ruptura
02	22,5	221	98214	1,93	c/ ruptura
03	20	196	181300	3,55	c/ ruptura
04	20	196	290000	5,69	s/ ruptura
05	20	196	500000	9,80	s/ ruptura

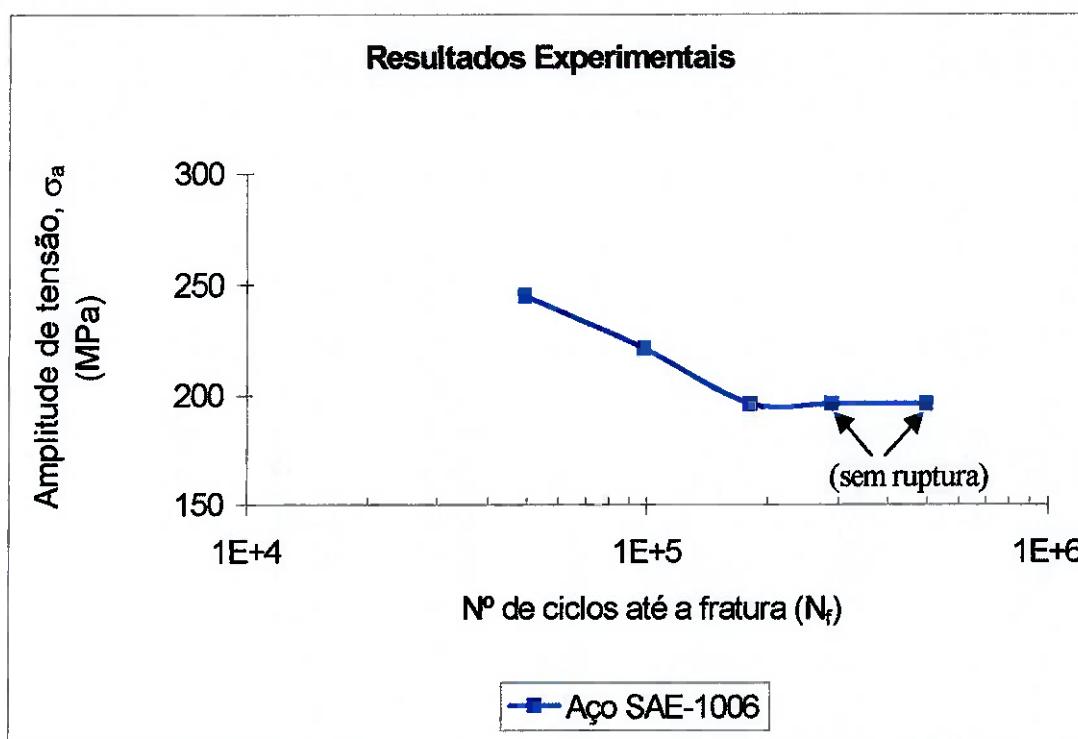


Figura 42: Gráfico da curva de Whöller (experimental) para o aço SAE-1006

A observação dos resultados experimentais obtidos, em comparação aos dados teóricos pesquisados, revela que os corpos de prova ensaiados sofreram ruptura com um nível de tensão inferior ao valor teórico e num tempo inferior ao esperado (menor número de ciclos). Alguns dos fatores que explicam esta variação são:

- Acabamento superficial dos corpos de prova (influência da rugosidade e das tensões residuais) ;
- Ambiente de trabalho (ambientes corrosivos aliados às tensões de trabalho diminuem a vida de fadiga do corpo de prova);
- Vibrações dos mecanismos/máquina (variação das amplitudes de tensão/deformação aplicadas ao corpo de prova, ocasionando a fratura do mesmo com um tempo de solicitação inferior ao esperado).

Os resultados alcançados, contudo, mostraram-se bastante compatíveis com a teoria de fadiga, visto que seria necessária uma família de corpos de prova muito maior para efetuar-se, com uma maior precisão, a construção da curva S-N e a descrição do comportamento e das

propriedades do material ensaiado. Dentro de uma faixa de tolerância para o limite de fadiga do material (necessidade de análise estatística), os valores coletados são altamente satisfatórios, já que não apresentaram discrepâncias que invalidariam a performance da máquina de ensaios.

11. CONCLUSÕES

O trabalho de graduação em questão mostrou-se bastante desafiador, visto que o tema escolhido envolveu não somente o conhecimento teórico acumulado no curso, mas também o projeto (aperfeiçoamento) e a construção de um protótipo.

A realização dos ensaios experimentais possibilitou ao formando a oportunidade de verificar, na prática, o funcionamento de uma máquina protótipo e, com isso, explorar a eficácia operacional da mesma. Assim, notou-se que ainda existem pontos a serem melhorados, como, por exemplo, o excesso de vibração do sistema.

Outro ponto a ser ressaltado refere-se à aprendizagem com a utilização dos recursos do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, no caso, a Oficina Mecânica e suas respectivas máquinas (torno, fresa, furadeira, serra, etc.). Além disso, o contato com os técnicos do laboratório e com outros professores do Departamento foi de fundamental importância, na medida em que contribuiu para o nascimento de novas idéias e para o esclarecimento de dúvidas em algumas etapas deste projeto de formatura.

Por último, convém apontar o amplo envolvimento do graduando com a área de Processos de Fabricação, estimulando-se um aprendizado complementar relacionado à usinagem (processo de formação do cavaco, forças e potências de corte, usinabilidade dos materiais, desgaste das ferramentas, etc.).

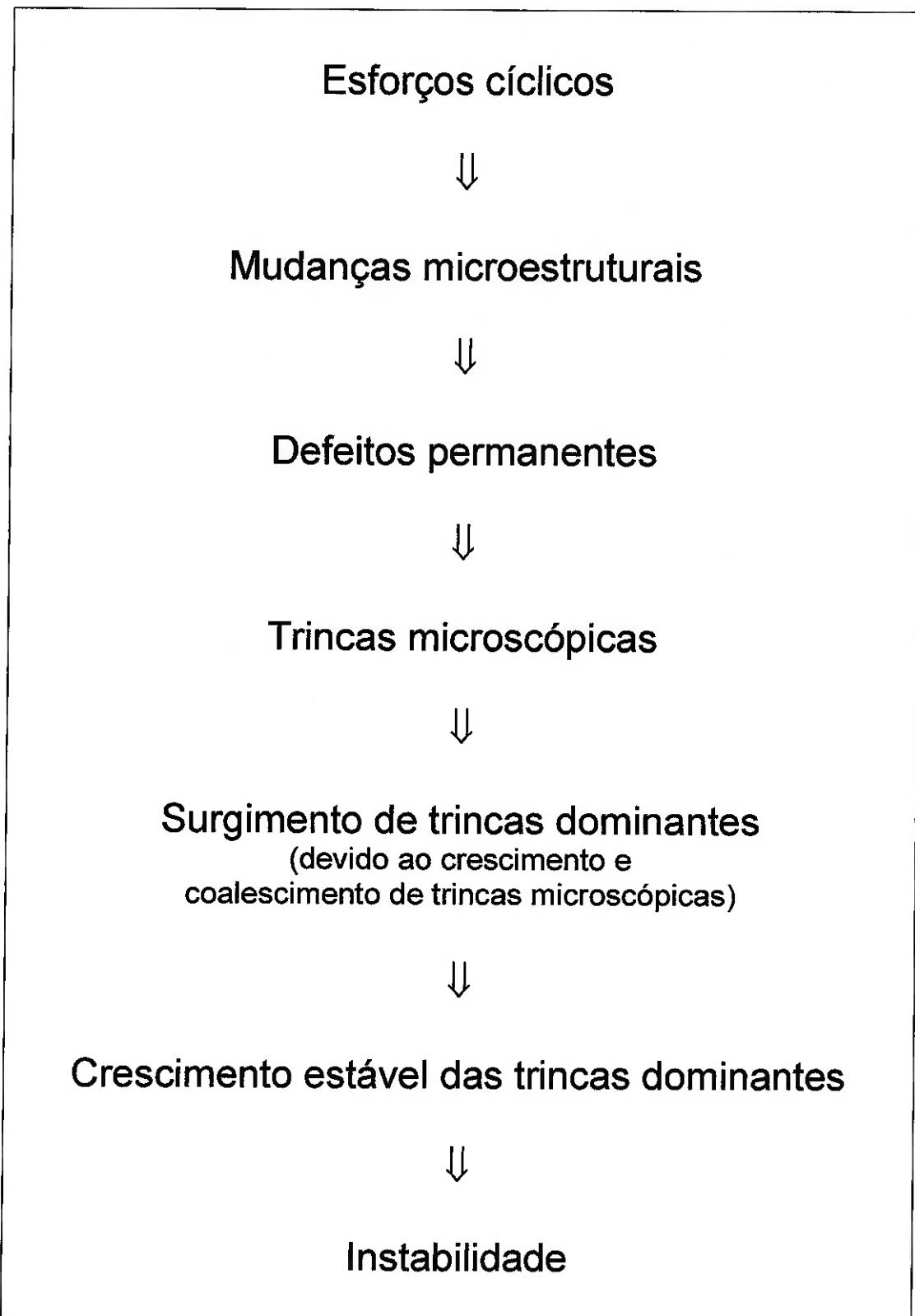
12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Souza, S. A. de – **Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos** – Editora Edgard Blücher LTDA., 5^a Edição, São Paulo, 1982;
- Dieter, G. E. – **Metalurgia Mecânica** – Editora Guanabara Dois, 2^a Edição, Rio de Janeiro, 1981;
- Chironis, N. P. – **Mechanisms & Mechanical Devices Sourcebook** – Editora McGraw-Hill, 2^a Edição, New York, USA, 1991;
- Júnior, M. A. – **"Projeto e Fabricação de uma Máquina de Fadiga Cíclica"** – Trabalho de Formatura, PMC, EPUSP, 1998;
- Shigley, J. E. – **Elementos de Máquinas** – Volumes 1 e 2, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2^a Edição, Rio de Janeiro, 1984;
- Weibull, W. – **Fatigue Testing and Analysis of Results** – Pergamon Student Editions, New York, USA, 1981;
- **Manual on Fatigue Testing** – ASTM (American Society for Testing Materials), Baltimore, USA, 1949;
- Fuchs, H. O. – **Metal Fatigue in Engineering** – John Wiley, New York, USA, 1980;
- **Metals Handbook** – 8^a Edição, Volume 9, 1974;
- Suresh, S. – **Fatigue of Materials** – Cambridge University Press, 2^a Edição, 1998;
- Rolfe, S. T. e Barsom, J. M. – **Fracture and Fatigue Control in Structures** – Prentice Hall, 1977;
- Almarnaess – **Fatigue Handbook** – Tapir, 1985;
- Boyer, H. E. – **Atlas of Fatigue Curves** – American Society for Metals, USA, 1986;
- Normas **DIN**, designação 50100 e 50142;
- Normas **ASTM**, designação E468-90, E739-91 e E1823-96.

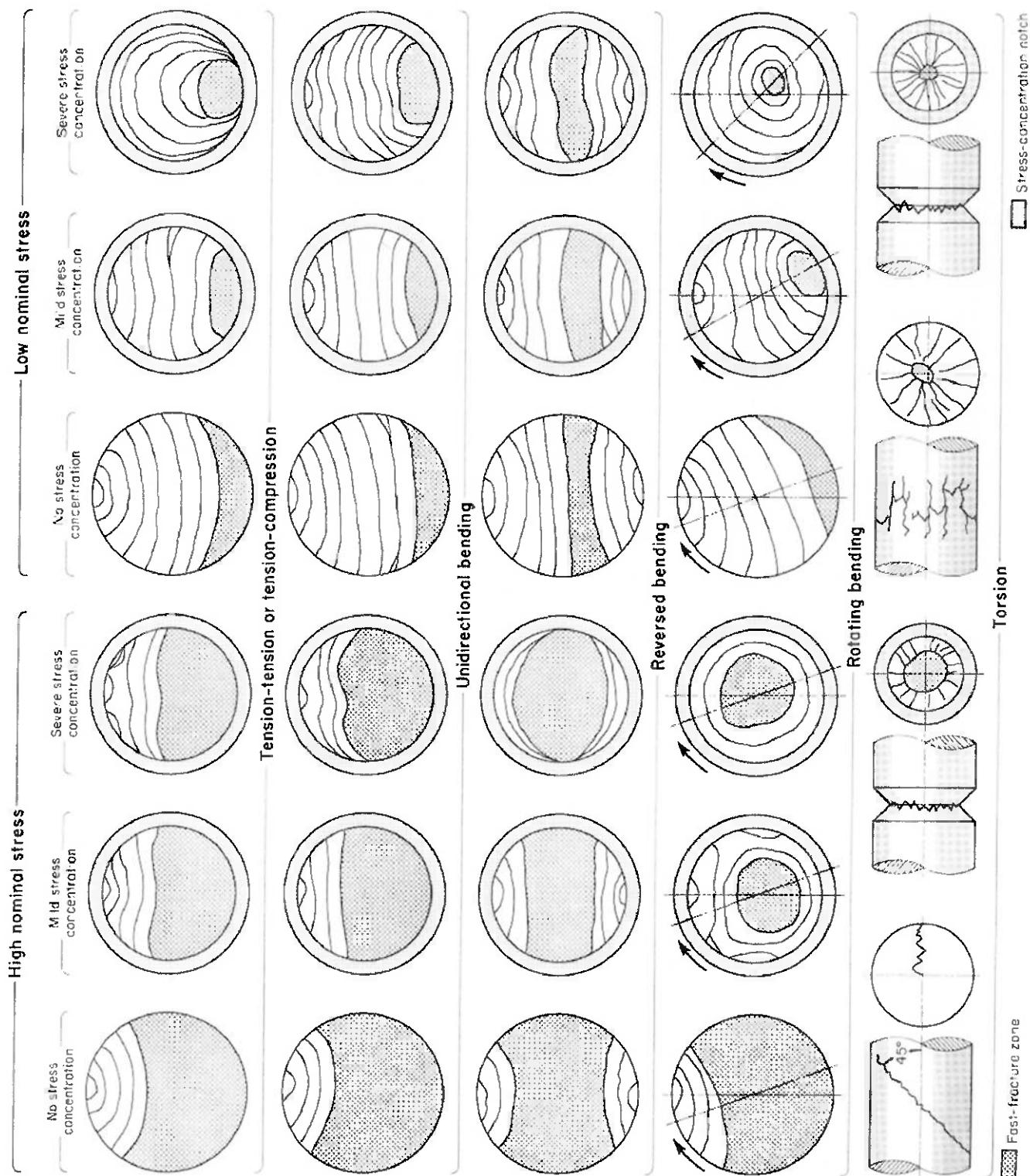
13. ANEXOS

- I) **Fluxograma do fenômeno da falha por fadiga;**
- II) **Fraturas por fadiga e a dependência com a solicitação mecânica imposta;**
- III) **Dano acumulado de fadiga: Lei de Palmgren-Miner;**
- IV) **Curvas S-N para alguns materiais metálicos;**
- V) **Características do aço AISI-1020;**
- VI) **Desenhos de conjunto.**

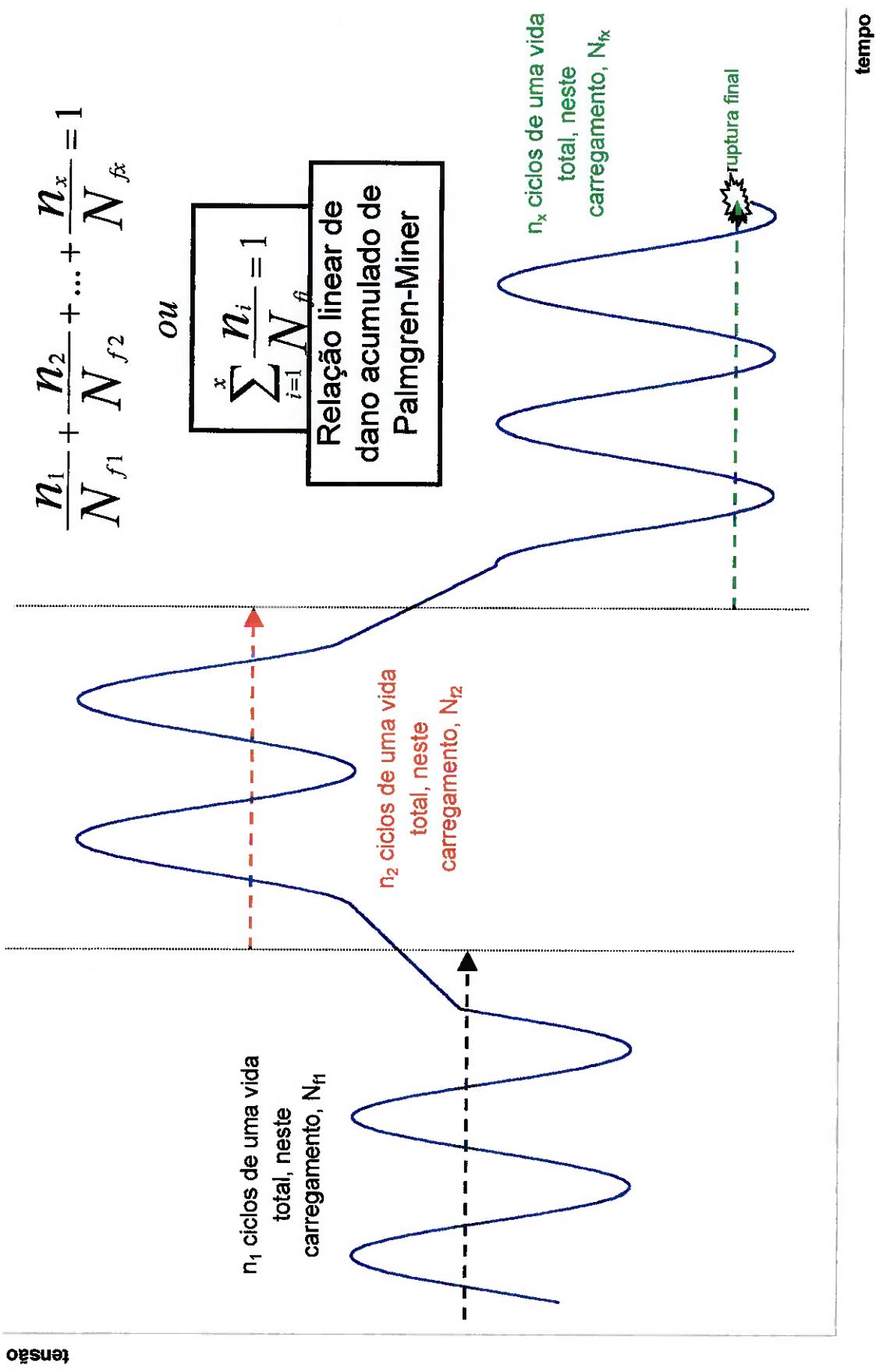
I) **Fluxograma do fenômeno da falha por fadiga**



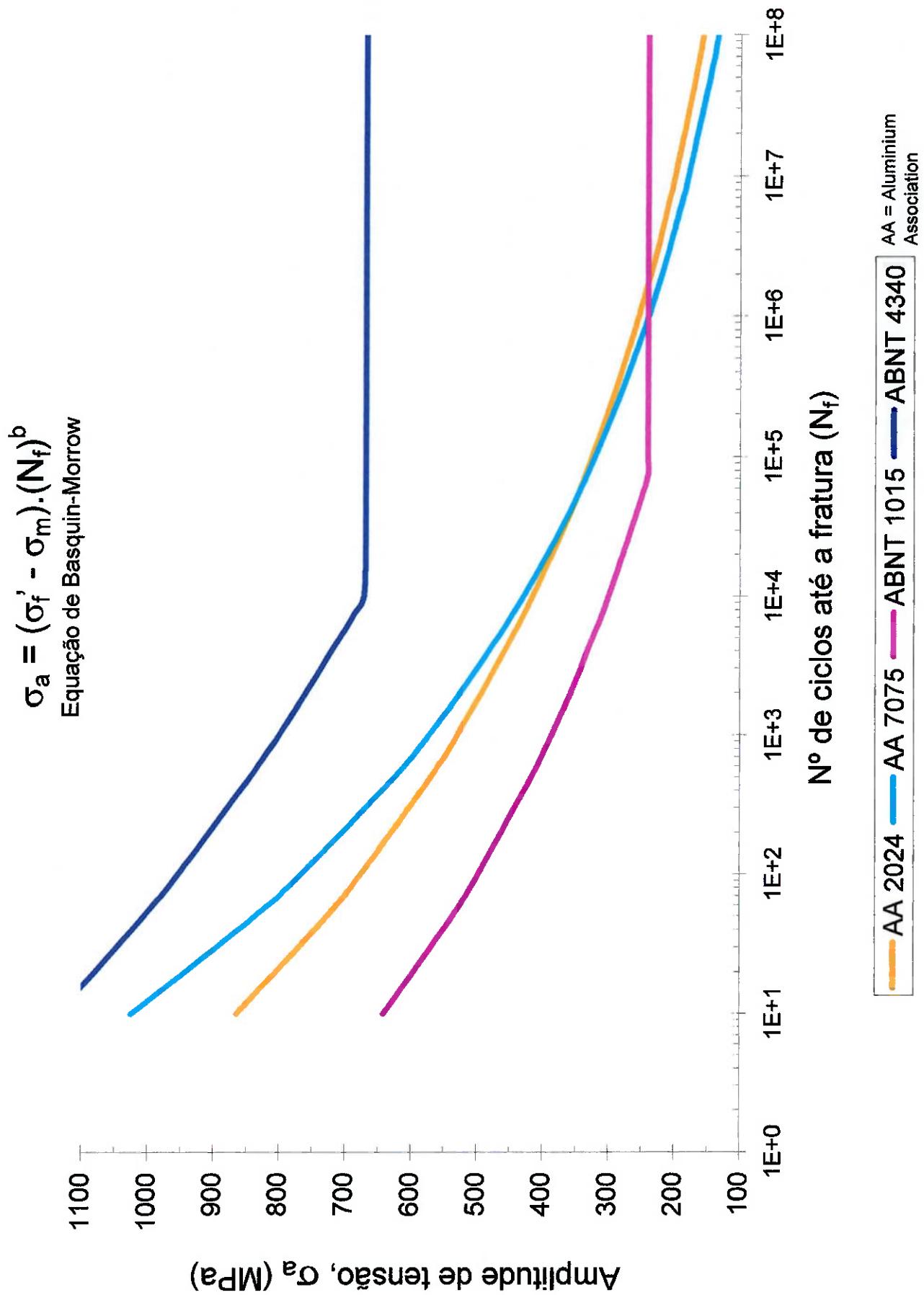
II) Fraturas por fadiga e a dependência com a solicitação mecânica imposta



III) Dano acumulado de fadiga: Lei de Palmgren-Miner



IV) Curvas S-N para alguns materiais metálicos



V) Características do aço AISI-1020

Typical analysis

C	Mn	P	S
0.17 - 0.24	0.25 - 0.60	max 0.04	max 0.05

A general purpose mild steel, low-carbon machinery steel, having good overall mechanical properties. Easily machinable and weldable. Suitable for heat treatment and ideal for carburizing.

Typical applications

General purpose structural and miscellaneous non-critical applications, general engineering parts, shafts, agricultural implements, hubs, so on.

Mechanical properties

As supplied.

The following are average values and may be considered as representative.

Tensile strength	PSI	58,000
Yield strength	PSI	min 36,000
Elongation	%	36
Reduction in area	%	59
Brinell Hardness		120

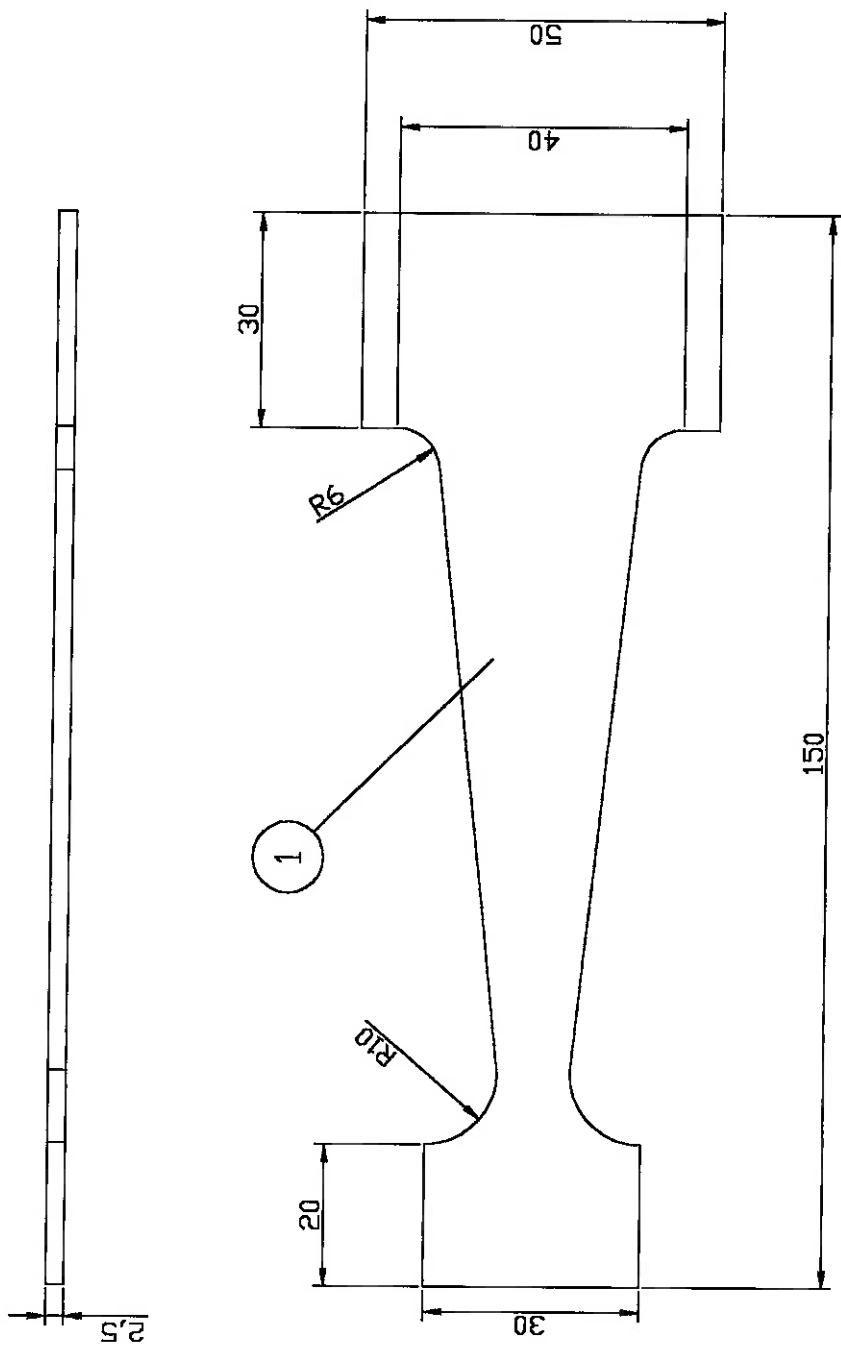
Machinability

AISI 1020 in the as supplied condition has a machinability rating of 72% based on AISI 1212 as 100%. Average surface cutting speed is 120 feet per minute.

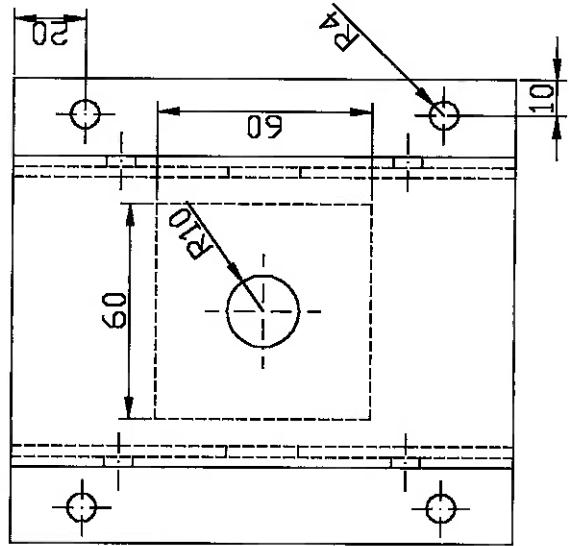
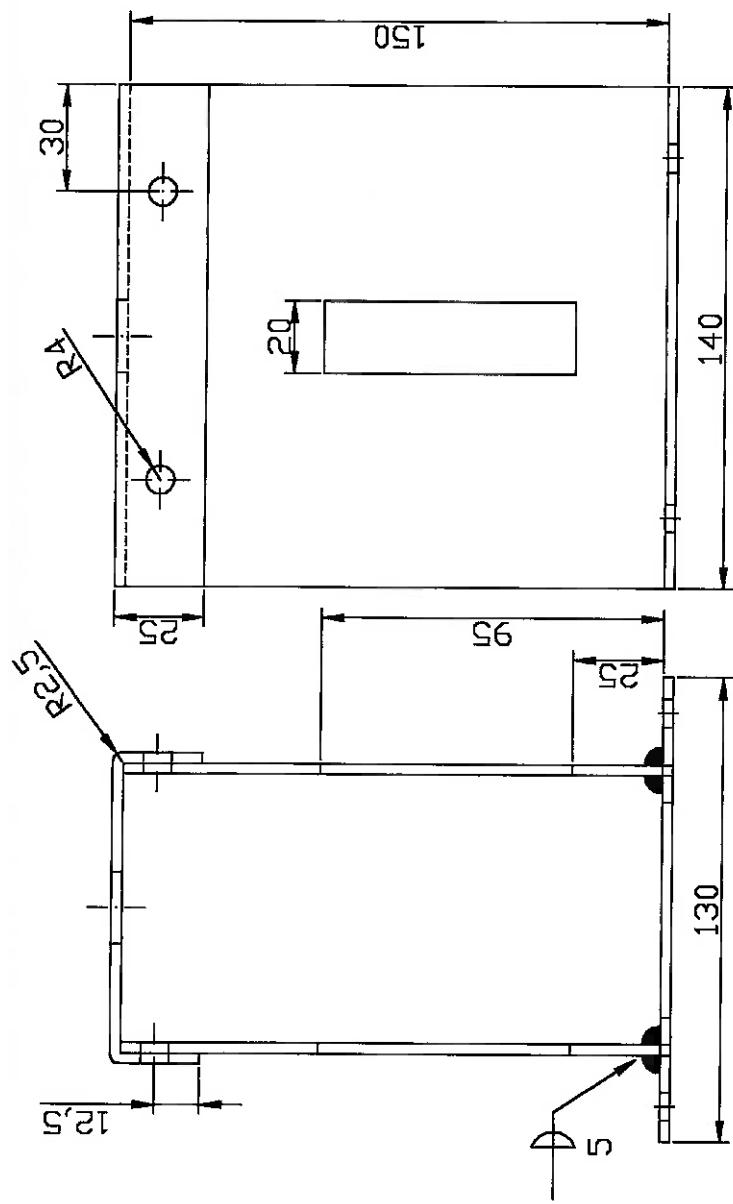
Weldability

AISI 1020 is easily welded by all welding processes. The resultant welds and joints are of extremely high quality. Welding rod to be used depends upon the thickness of section, design, service requirements and so on.

VI) Desenhos de conjunto

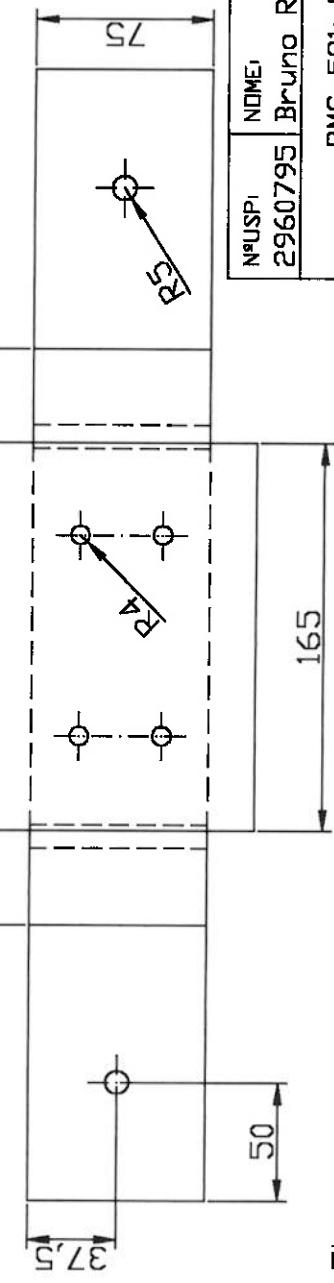
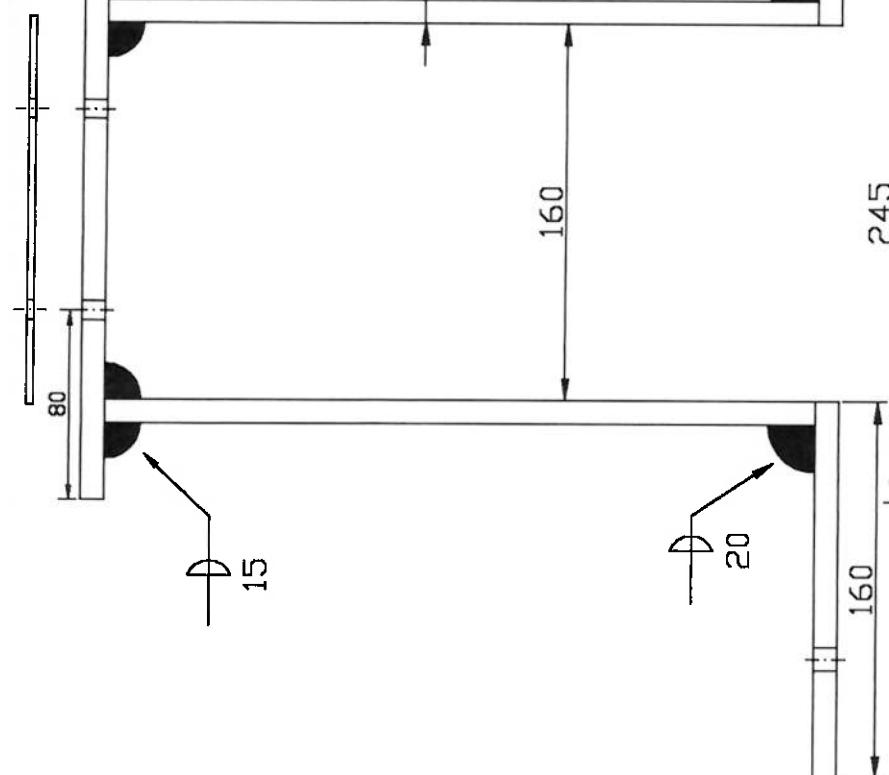
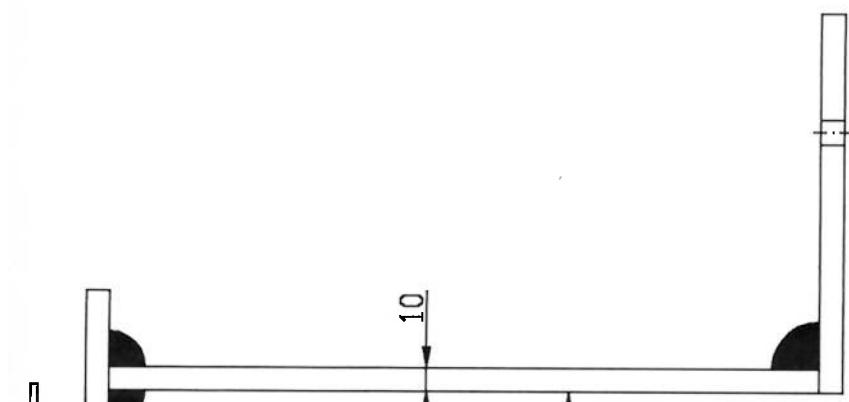
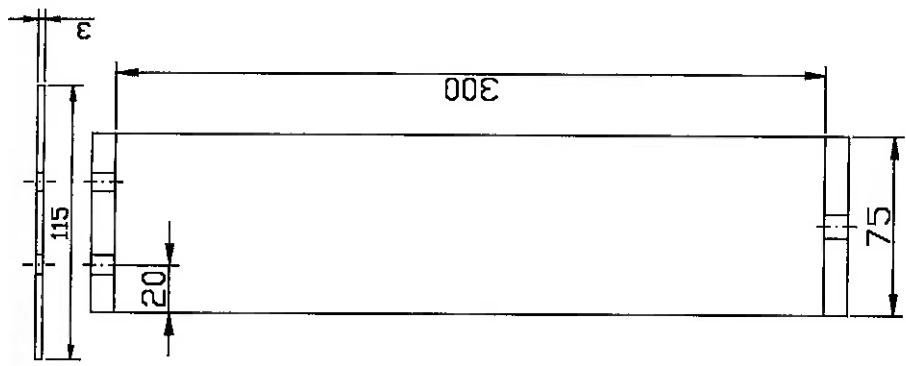


1	Corpo de Prova	1	aço SAE-1020	ensal de flexão
Pos.	Denominação	Quant.	Material	Observações
NºUSP: 2960795	Nome: Bruno Ricardo B. Alcova			ORIENTADOR: Prof. Dr. Edison Gonçalves
PMC-581 Projeto Mecânico II				EPUESP
ESCALA: 1:1	TÍTULO: Corpo de Prova (norma ASTM E468-90)	DATA: Dezembro - 2002		



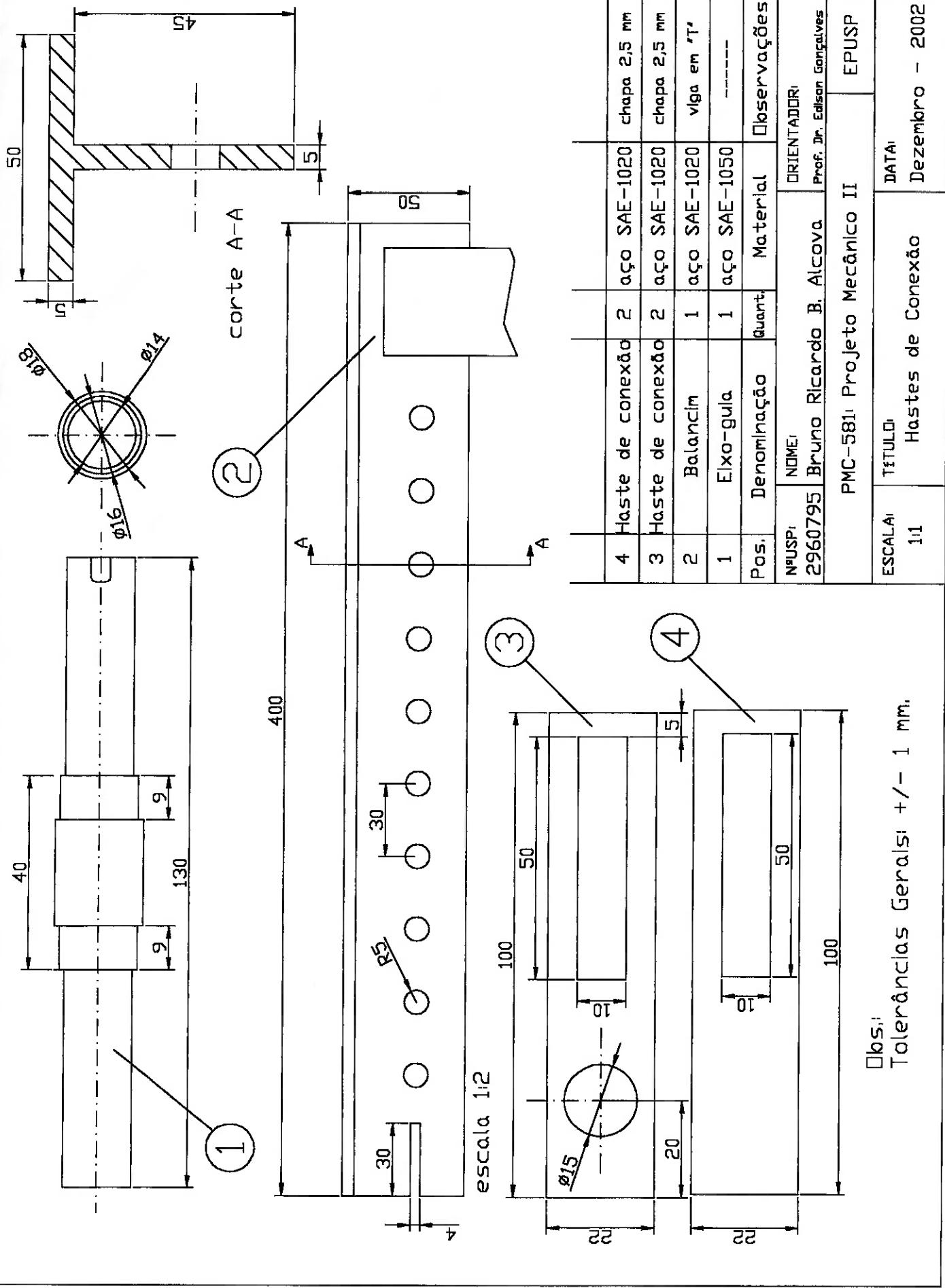
Nº USP ₁	NOME ₁	ORIENTADOR
2960795	Bruno Ricardo B. Alcova	Prof. Dr. Edison Gonçalves
PMC-581	Projeto Mecânico II	EPUSP
ESCALA ₁	TÍTULO ₁	DATA ₁
1:2	Estrutura com Guias Acopladas	Dezembro - 2002

Obs:
Parafusos, porcas e anelulas não representados.
Tolerâncias Gerais: +/- 1 mm.



NºUSP:	2960795	NAME:	Bruno Ricardo B. Alcova
		PROF:	Dr. Edilson Gonçalves
PMC-581 Projeto Mecânico II			EPUSP
ESCALA:	1:3	TÍTULO:	DATA:
		Supor te para o Carro de Prava	Dezembro - 2002

Obs:
Parafusos, parcas e arruelas não representados,
Tolerâncias Gerais: +/- 1 mm.



ESCALA:	TÍTULO:	DATA:
1:1	Hastes de Conexão	Dezembro - 2002

Obs.:
Tolerâncias Gerais: +/- 1 mm.

PMC-581 Projeto Mecânico II

EPUSP

NºUSP: 2960795 | Nome: Bruno Ricardo B. Alcova | Prof. Dr. Edison Gonçalves | ORIENTADOR: