CLAYTON MAMEDES ANGELO

**ESTUDO DO EFEITO DE PAUSAS INTRODUZIDAS EM TESTES DE
FADIGA DE AMPLITUDE VARIÁVEL**

**São Paulo
2016**

CLAYTON MAMEDES ANGELO

**ESTUDO DO EFEITO DE PAUSAS INTRODUZIDAS EM TESTES DE
FADIGA DE AMPLITUDE VARIÁVEL**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo como parte dos
requisitos para obtenção do título de Doutor em
Ciências.

**São Paulo
2016**

CLAYTON MAMEDES ANGELO

**ESTUDO DO EFEITO DE PAUSAS INTRODUZIDAS EM TESTES DE
FADIGA DE AMPLITUDE VARIÁVEL**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo como parte dos
requisitos para obtenção do título de Doutor em
Ciências.

Área de concentração: Engenharia Metalúrgica
e de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Geraldo Schön

**São Paulo
2016**

FICHA CATALOGRÁFICA

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Angelo, Clayton Mamedes

Estudo do efeito de pausas introduzidas em testes de fadiga de amplitude variável / C. M. Angelo -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
115 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.fadiga 2.testes 3.amplitude variável 4.sobrecargas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

À minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, José Mamedes e Maria Esther, por tudo que eu consegui nesta vida. E pelos ensinamentos que percebemos o valor só depois de adultos.

Agradeço a minha esposa, Valery Gomes, pelo todo apoio em todos os momentos que passamos. E pela paciência. Vale também um agradecimento especial pela edição de quase todas as imagens!

Agradeço também à minha irmã, Priscila Mamedes, que sempre me ajuda, seja levando os volumes para impressão ou papelada até a Poli.

Abraços especiais para o Roger Valentim, Fernando Machado, Petit, Wilson Carlos, Erika, Christina Pichler e ao restante do pessoal do Centro de Ensaaios de Durabilidade, pelo apoio incondicional à minha pesquisa.

E ao amigo de longa data Eli Andreoli pela ajuda com os diversos gráficos

Agradeço ao amigo e novamente orientador e Prof. Dr. Cláudio Schön, por todo o apoio nesta jornada. Obrigado especial pelas dicas de apresentação e ajuda extra com os artigos.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram, mesmo que de forma indireta, para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

É muito importante para a indústria fornecer produtos competitivos e que exerçam corretamente as suas funções perante o cliente. Uma das ferramentas existentes para atingir estes objetivos é a realização de testes de fadiga e durabilidade cada vez mais refinados e em espaço mais curto de tempo. Uma das maneiras de se executar testes de fadiga mais precisos é utilizando parâmetros que sejam fiéis à solicitação que o produto sofre durante o seu uso. Com esse intuito surgiram os testes de fadiga sob amplitude variável. Juntamente com eles surgem as particularidades deste tipo de solicitação, que é de natureza complexa.

Algumas particularidades são a dependência do resultado na história de carregamento (também chamada de “interação de cargas”) e a variação abrupta do nível de carga durante o tempo de aplicação. Fenômenos estes chamados de sobrecarga ou subcarga (*overload* e *underload*), que aqui serão agrupados, muitas vezes de forma simplista, de perturbações no espectro de fadiga.

A finalidade principal deste trabalho é descrever a influência das perturbações ocorridas nas solicitações nos testes de fadiga em regime de amplitude variável, mais precisamente em testes de bancada, em que se busca a reprodução de situações de trabalho reais de um componente. Apesar de esse assunto ser alvo de diversas investigações recentes, nenhum trabalho tem como foco a influência das paradas (completa remoção de carga) realizadas durante um teste de fadiga acelerado. Essas paradas são extremamente comuns na prática laboratorial, seja por manutenção do equipamento, inspeção da amostra ou necessidade de operação. O objeto alvo de estudo nesta pesquisa é um suporte metálico de buzina, utilizado em automóveis de passeio. Apesar de sua concepção simples, tal componente é responsável por exercer funções importantes e é sujeito a uma interessante gama de solicitações.

Como resultado observou-se que a aplicação das paradas durante os testes de fadiga simulados no componente automotivo, provoca variações em sua vida útil total. E o tempo de parada também exerce influência nesta variação observada.

Essas paradas não se encaixam perfeitamente nas classificações de perturbações no espectro registradas na literatura. Por esse motivo o trabalho se propõe ainda a sintetizar e uniformizar a terminologia para as variações abruptas de tensão aplicadas no tempo (as sobrecargas e as subcargas), tendo em vista que ocorre a falta de consenso entre os termos utilizados atualmente na literatura e seus respectivos conceitos.

ABSTRACT

It is very important to the industry to deliver competitive products that can properly perform their functions to the final customer. One existing tool for achieve this objective is the usage of abbreviated durability and fatigue tests. For more precise tests, the required parameters must be reliable when compared to the efforts that the component is submitted at the field during your real performance. In order to achieve these results, the fatigue tests under variable amplitude loading came to existence. Together came also in existence the singularities from this complex behavior.

Some of these singularities are the dependence in loading history (also called “load interaction effects”) and the abrupt load variation level during the test time. These phenomenons are called overloads or underloads. These particularities will be grouped in this work as “perturbations” on the fatigue spectrum.

The main objective of this work is to describe the influence of these perturbations upon the fatigue tests under variable amplitude loading, more precisely on bench tests, where one seeks the concise reproduction of the real work situations for one component or system. Although this subject lately has caused more interest to the researchers, no work which focuses on the influence of the “pauses” (complete absence of load during the test) upon accelerated fatigue tests has been published yet until this moment. These pauses are extremely common due to equipment maintenance, test sample inspections or operational routines.

The target of this work is a metallic horn bracket, which is used in light passenger vehicles. Although this is a simple component, it has important functions to perform and is subjected to a wide range of loads types.

As result, there was been verified that the presence of the “pause” during the simulated fatigue tests causes changes in their total useful life. And the magnitude of the pause has your role too.

Moreover, the pause do not properly fits into the current classifications for the perturbations on the fatigue specter that are today available on the literature. For theses reason, this work tries to resume and unify the terminology of the abrupt load variations during time (overloads and underloads) because

there is some lack of consensus between the actual terminology and their concepts.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	Fadiga: o fenômeno	11
2.1.1	Histórico	11
2.1.2	Acidentes famosos causados pela fadiga	23
2.1.3	Conceitos fundamentais da fadiga	31
2.1.4	Estágios da fadiga.	34
2.1.5	Abordagens ao problema da fadiga.	39
2.1.6	Os conceitos Safe-Life e Fail-Safe.	41
2.1.7	Perturbações no carregamento com amplitude variável.	41
2.1.8	Plasticidade na ponta da trinca.	51
2.1.9	O fenômeno de fechamento prematuro de trinca.	54
2.1.10	Fechamento de trinca induzido por plasticidade	54
2.1.11	Medida de fechamento e ΔK_{EF}	56
2.1.12	Fechamento parcial por asperezas	58
2.1.13	Outras contribuições para o fechamento	59
2.1.14	Efeito da espessura:	60
2.1.15	Efeito da curvatura da trinca	60
2.2	Fadiga: ferramentas para análise	62
2.2.1	Métodos para contagem de ciclos	62
2.2.2	Método Rainflow	63
2.2.3	Método de Pares de Tensão (Range Pair)	64
2.2.4	Método de Cruzamento de Nível (Level Crossing)	65
2.2.5	Método de Contagem de Picos (Peak Counting)	66
2.2.6	Densidade Espectral de Potência	67

3	OBJETIVO DO PRESENTE TRABALHO	69
4	MATERIAIS E MÉTODOS	70
4.1	Ensaaios	70
4.2	O componente.	71
4.3	Os meios.....	75
4.3.1	A Pista de Testes.....	75
4.3.2	O Simulador de estradas (Hidropulsador).....	75
4.3.3	As Rodas de Medição	77
4.3.4	A bancada de testes.	77
5	RESULTADOS	82
5.1	Peças ensaiadas em veículo.....	82
5.1.1	Análise macrográfica.	83
5.1.2	Análises mecânicas.....	86
5.1.3	Análises de dano acumulado.....	87
5.2	Peças ensaiadas em bancada	93
6	DISCUSSÃO	97
6.1	Considerações gerais	97
6.2	Possíveis mecanismos atuantes.....	99
6.2.1	Zona plástica na frente da trinca e fechamento por plasticidade:.....	99
6.2.2	Fechamento prematuro da trinca por rugosidade superficial ou óxidos:	100
6.2.3	Ativação do mecanismo limiar de fadiga no regime:	101
6.3	Sugestões para trabalhos futuros	101
6.4	Considerações finais.....	102

7	CONCLUSÕES.....	105
8	BIBLIOGRAFIA	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Fotografia de artefato de pedra retirada do sítio arqueológico de Gona, Etiópia. A face desgastada indica o uso como um martelo.	2
Figura 1.2 - Esquema relacionando volume cerebral e tecnologia desenvolvida, para os diversos ancestrais do Homem.	4
Figura 1.3 - Pontas de flechas feita de pedra, de 4.200 - 3.000 a.C,	5
Figura 1.4 - Processo de aquisição de dados em campo.	9
Figura 2.1 - Desenho ilustrando uma falha por fadiga em um eixo (1843).	12
Figura 2.2 - Típica curva S-N.	15
Figura 2.3 - Coordenadas das tensões na ponta da trinca.	19
Figura 2.4 - Correlação entre os dados da taxa de crescimento de trinca.	19
Figura 2.5 - As três regiões do crescimento de trinca.	20
Figura 2.6 - Comportamento típico da taxa de crescimento entre trincas grandes e curtas.	23
Figura 2.7 - Ilustração do acidente de Versailles.	24
Figura 2.8 - Gravura em madeira retratando o desastre da ponte Ashtabula.	25
Figura 2.9 - Área atingida pelo melaço.	26
Figura 2.10 - Estrutura danificada pela onda de melaço.	27
Figura 2.11- de Havilland Comet.	28
Figura 2.12 - Imagem da região da falha em uma janela do Comet.	29
Figura 2.13 - O caça F-111, fotografado em 1956.	30
Figura 2.14 - O Grumman M870 em serviço.	31
Figura 2.15 - Definição dos parâmetros do carregamento cíclico.	32
Figura 2.16 - Representação simplificada dos modos de carregamentos cíclicos comumente utilizados em ensaios de fadiga.	33

Figura 2.17 - Diferentes fases da vida em fadiga.	35
Figura 2.18 - Gráfico da tensão de cisalhamento resultante (no ponto de saturação) contra a deformação resultante, mostrando os círculos de histerese estabilizados. A linha tracejada representa a curva tensão-deformação cíclica para cristais dúcteis.	36
Figura 2.19 - Os diferentes regimes da curva de saturação tensão-deformação.....	37
Figura 2.20 - Mecanismo simplificado para a formação de extrusões e intrusões.....	38
Figura 2.21 - Representação dos três estágios da propagação da trinca de fadiga.	39
Figura 2.22 - Carregamento aplicado nos testes de propagação de trinca executados por Schijve e De Rijk em 1965.....	42
Figura 2.23 - O efeito das sobre e subcargas na taxa de crescimento de trincas.....	44
Figura 2.24 - Definições de sobre (overload) e subcarga (underload), conforme Fleck.	45
Figura 2.25 - Predições de vida em fadiga com sobrecargas compressivas, segundo Topper.....	46
Figura 2.26 - Definição de subcarga trativa conforme Zitounis.....	47
Figura 2.27 - Histórico de carregamento. (a) sobrecarga (b) subcarga, conforme Stephens e Fatemi.	48
Figura 2.28 - Efeito de blindagem da zona plástica sobre o campo de tensão desenvolvido por uma trinca.	52
Figura 2.29 - Campo efetivo gerado por uma trinca.....	52
Figura 2.30 - Representação do experimento proposto por Dugdale para determinar do comprimento da zona plástica formado na borda de um corte em uma placa sujeita a uma tensão uniforme.	53
Figura 2.31 - Evolução de publicações sobre fechamento de trinca desde 1970.	54
Figura 2.32 - Formação das zonas plásticas durante o crescimento de trinca.	55
Figura 2.33 - Medições de COD (Crack Open Displacement).....	56

Figura 2.34 - Ciclo COD completo.	57
Figura 2.35 - Abertura e fechamento de trinca durante ciclagem.	59
Figura 2.36 - Mecanismos dominantes de fechamento de trinca.	59
Figura 2.37 - Ilustração exemplificando a contagem de ciclos de fadiga pelo método <i>Rainflow</i>	64
Figura 2.38 - Método <i>Range-Pair</i> . (a) contando os ciclos menores e descartando os pontos de inflexão. (b) novamente executando a operação anterior. (c) Carregamento final equivalente.	65
Figura 2.39 - Método <i>Level Crossing</i> . (a) histórico com a contagem de níveis. (b) construção dos ciclos de maior dano.	66
Figura 2.40 - Método de Peak Counting. (a) histórico de carregamento com correspondentes picos e vales. (b) contagem de ciclos resultante.	67
Figura 4.1- Fluxograma representando os passos do trabalho, descritos em na seção 4.1.	71
Figura 4.2 - Visão isométrica do suporte da buzina.	72
Figura 4.3 - Posicionamento do microfone e do veículo. Vista plana.	73
Figura 4.4 - Posicionamento do microfone e do veículo. Vista isométrica.	74
Figura 4.5 - Veículo no Simulador MTS 329.	76
Figura 4.6 - Roda de Medição Kistler RoaDyn® S625.	77
Figura 4.7 - Visão geral da bancada de testes.	80
Figura 4.8 - Detalhe da fixação, célula de carga e haste.	80
Figura 4.9 - Detalhe da fixação da amostra.	81
Figura 4.10 - Unidade controladora Spectra® ST7000.	81
Figura 5.1 - Ruptura do suporte da buzina. Foto abaixo é referente a uma amostra testada em bancada, porém a localização da falha é igual.	82

Figura 5.2 - Região aproximada de ocorrência da ruptura no suporte.	83
Figura 5.3 - Superfície de fratura da amostra #1. Estereomicroscópio. A seta indica o ponto de nucleação da trinca de fadiga.....	84
Figura 5.4 - Superfície de fratura da amostra #1 com aumento. Estereomicroscópio. A seta indica o ponto de nucleação da trinca de fadiga.....	84
Figura 5.5 - Superfície de fratura da amostra #2. MEV. Elétrons secundários. A seta indica o ponto de nucleação da trinca de fadiga.....	85
Figura 5.6 - Superfície de fratura da amostra #2. Estereomicroscópio. A seta indica o ponto de nucleação da trinca de fadiga.....	85
Figura 5.7 - Superfície de fratura da amostra #2. Estereomicroscópio. A seta indica o ponto de nucleação da trinca de fadiga.....	86
Figura 5.8 - Comparação entre os cargas atuantes na suspensão do veículo. Método de contagem de ciclos: Cruzamento de Nível (<i>Level Crossing</i>).	88
Figura 5.9 - Comparação entre os cargas atuantes na suspensão do veículo. Método de contagem de ciclos: Método pares de tensão (<i>Range Pair</i>).....	89
Figura 5.10: Densidade Espectral de Potência (PSD) para os carregamentos atuantes na suspensão do veículo.	89
Figura 5.11 - Comparação entre os cargas atuantes no suporte da buzina. Método de contagem de ciclos: Cruzamento de Nível (<i>Level Crossing</i>).	90
Figura 5.12 - Comparação entre os cargas atuantes no suporte da buzina. Método de contagem de ciclos: Método pares de tensão (<i>Range Pair</i>).....	90
Figura 5.13 - Densidade Espectral de Potência (PSD) para os carregamentos atuantes no suporte da buzina. A interrupção da leitura aos 35 Hz deve-se à falha na instrumentação.	91

Figura 5.14 - Representação do dano acumulado total em ambos os testes. Espectro obtido pelas Rodas de medição e atuante na suspensão do veículo.	91
Figura 5.15 - Representação do dano acumulado total em ambos os testes. Espectro obtido por extensimetria e atuante no suporte da buzina.....	92
Figura 5.16 - Resultados dos testes em bancada.	95
Figura 6.1 - Sequência de carregamento convencional adaptada para teste untrassônico. A aplicação de pausas pode ser visualizada na figura da direita.	99
Figura 6.2 - Representação gráfica do Fator de Recuperação, considerando os ensaios realizados neste trabalho.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Principais mecanismos de falhas mecânicas nos metais.	8
Tabela 2.1 - Linha do tempo dos principais eventos na pesquisa da fadiga.....	20
Tabela 2.2 - Resumo contendo as diferentes conceituações sobre as perturbações no regime de fadiga.	49
Tabela 4.1 - Valores de homologação para níveis sonoros de buzina.	72
Tabela 4.2 - Principais características mecânicas especificadas para o aço DC01.	74
Tabela 4.3 - Características técnicas do Simulador MTS 329.....	77
Tabela 4.4 - Características da unidade controladora ST7000.	79
Tabela 5.1 - Resumo das falhas observadas nos testes com veículo.	83
Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios de tração no componente ensaiado.	87
Tabela 5.3 - Valores de dureza Vickers encontrados.	87
Tabela 5.4 - Amostras testadas sem paradas.	94
Tabela 5.5 - Amostras testadas com paradas de 5 horas.	94
Tabela 5.6 - Amostras testadas com paradas de 10 horas.	95
Tabela 5.7 - Amostras testadas com paradas de 45 horas.	95
Tabela 5.8 - Resultados dos testes de bancada, vida média em fadiga e desvios padrão.	96

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for Testing and Materials
Caltech	California Institute of Technology
CFC	Cúbico de Face Centrado
COD	Crack Open Displacement
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DIN	Deutsches Institut für Normung
ECE	Economic Commission for Europe
EN	European Standard
FEM	Finite Elements Method
GTAC	Ground to Air Cycle
ISO	International Organization for Standardization
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MFEL	Mecânica da Fratura Elasto-plástica
Mil-STD	United States Military Standard
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NBR	Norma Brasileira
OLR	Overload Rate
PSB	Power Spectral Density

PSB	Persistent Slip Band
SAE	Society of Automotive Engineers
UHFC	Ultra High Cycle Fatigue

LISTA DE SÍMBOLOS

K	Fator intensificador de tensões
σ	Tensão
$N(s)$	Número de ciclos de fadiga à amplitude constante
a	Tamanho da trinca
σ_m	Tensão média
σ_e	Tensão de escoamento
σ_{max}	Tensão máxima
σ_{min}	Tensão mínima
σ_a	Amplitude de tensão
R	Razão de tensão
s	Amplitude da carga (constante)
s_{min}	Amplitude da carga (mínima)
s_{max}	Amplitude da carga (máxima)
s_{eff}	Amplitude da carga (efetiva)
s_{ab}	Amplitude da carga (de abertura da trinca)
s_{cl}	Amplitude da carga (de fechamento da trinca)
δ_s	Tensão de saturação
ϕ_{pl}	Deformação em saturação
r_p	Raio da zona plástica na ponta da trinca
ω	Frequência da carga (constante);

$D(t)$ Dano causado pela carga em função do tempo;

n_i Número de ciclos sob amplitude s_i ;

N_i Número de ciclos total em fadiga;

D Parâmetro de dano acumulado linear;

1 INTRODUÇÃO

A origem e a subsequente evolução do Homem, até chegar aos níveis de civilização em que nos encontramos atualmente, estão intimamente ligadas ao surgimento e avanços da tecnologia (1; 2). Ao longo da História, a Humanidade constrói equipamentos para auxiliá-la na execução das diversas tarefas do dia-a-dia, indo desde as mais simples, como cortar a carne de um animal, ou outras extremamente complexas, como a construção de um foguete para o lançamento de um satélite. É esta capacidade criativa e tecnológica que nos representa, ou mais precisamente, ajuda a nos definir como humanos.

Enquanto as definições e separações entre os períodos de Pré-história e da História são bem claras e estabelecidas (1), o conceito de quando o Homem propriamente dito realmente surgiu, é alvo de intenso debate no campo da Antropologia e Arqueologia (3). Levando em consideração novos achados de fósseis recentemente descobertos e pela utilização da genética na investigação arqueológica supõe-se que o Homem surgiu há quatro milhões de anos (1; 3; 2).

Atualmente, os critérios fundamentais que marcam a origem da Humanidade são os seguintes (1; 3; 2): o bipedalismo, o aumento do volume cerebral e a utilização e criação de ferramentas. Dentre estas três distintas características pode-se afirmar que, no mínimo, duas delas estão relacionadas de algum modo à tecnologia (1; 3).

O bipedalismo (o andar ereto em dois pés) surgiu com o *Australophitecus* – representado pelo famoso fóssil conhecido como Lucy, há cerca de quatro milhões de anos atrás (1; 3; 2). Além de permitir que os nossos ancestrais conseguissem explorar as áreas fora de seu ambiente florestal repleto de árvores, tal característica transformou a utilização das mãos e dos braços: com o polegar opositor, eles podiam segurar itens em suas mãos e andar simultaneamente, sem que a velocidade de deslocamento fosse reduzida. Atualmente não se sabe se os nossos primeiros ancestrais carregavam bastões ou peles de animais, pois, como se tratam de peças feitas de matéria orgânica, as mesmas se desintegraram ao longo das eras. Contudo,

sabe-se que eles carregavam pedaços de pedra arredondados e grandes seixos por longas distâncias dos rios onde seriam encontrados. Do ponto de vista da História da Tecnologia, eles utilizavam os objetos encontrados no meio ambiente como ferramentas. Apesar de os humanos não serem as únicas criaturas que utilizam ferramentas (chimpanzés, pássaros e insetos também fazem uso deste expediente, além de outros), eles apresentam grandes diferenças: somente os Homens são moldados pelas ferramentas que utilizam a sua sobrevivência seria muito difícil sem as mesmas (1; 2). Adicionalmente, o Homem é a única criatura que fabrica ferramentas com o objetivo de fazer outras ferramentas. Ainda, o único que tem a capacidade de transmitir o conhecimento tecnológico através das gerações. Fatos estes que auxiliaram a evolução da Humanidade como espécie (1).

As ferramentas mais antigas encontradas, no Vale de Gona na Etiópia (datada de 2,5 milhões de anos (4; 5)), são compostas simplesmente por pedras com pedaços quebrados para formar pontas afiadas, suficientes para cortar madeira, quebrar ossos e cortar pelo e carne. Vide exemplo na Figura 1.1

Figura 1.1 - Fotografia de artefato de pedra retirada do sítio arqueológico de Gona, Etiópia. A face desgastada indica o uso como um martelo.

Fonte: adaptado de (6).

Já por volta de 1,8 milhões de anos atrás, as pedras passaram a ser afiadas em ambos os lados, dando origem a martelos mais eficientes e cutelos. Nesta época, com o surgimento do *Homo Erectus*, nossos antepassados perderam muitas das características anatômicas da espécie anterior, fazendo com que a ato de subir em árvores e mastigar grandes pedaços de carne crua não fossem realizados com a facilidade de outrora. Surgem então os machados de mão, com longas faces afiadas, que se manteriam cortantes por um longo tempo. Algumas destas peças chegam a pesar quase 3 kg.

Com o surgimento do *Homo Sapiens* há cerca de 150 mil anos, o antigo machado deu lugar a um conjunto de ferramentas, cada uma delas projetada para um fim específico: pontas de lanças e lâminas de vários tipos e tamanhos. Há 70 mil anos já existiam “kits” de ferramentas, agulhas para costura e refinadas flechas. Enfim, eles não sobreviveriam sem as ferramentas (2).

Como as características descritas anteriormente (o bipedalismo, o aumento do volume cerebral e a utilização e criação de ferramentas) não surgiram simultaneamente, não existe um ponto preciso na História em que nos tornamos humanos (3), mas sim um lento e gradual processo onde o desenvolvimento tecnológico (na forma do uso de ferramentas) exerceu um papel primordial, moldando os primeiros grupos dos nossos ancestrais através da caça de animais, coleta de víveres, agricultura, arte, escrita, fortificações e outros aspectos fundamentais de nossa vida. Não podemos dizer que criaturas com cérebro maior inventaram as ferramentas. Mas sim que cérebro, características anatômicas e as ferramentas evoluíram juntos para criar os nossos ancestrais (2). A relação entre volume cerebral e tecnologia disponível está descrita na Figura 1.2.

Vale ressaltar que, mesmo durante as eras remotas citadas até o momento, o Homem já fazia uso de processos tecnológicos para a confecção de suas ferramentas, sendo os mesmos tão conhecidos e difundidos que se tornaram marcos para a Pré-história. Utilizando a fratura frágil, nossos ancestrais conseguiram produzir lâminas afiadas, marcando o período como Paleolítico. Com o advento de peças de pedra afiadas, mas com a superfície polida, a resistência à fratura das mesmas foi elevada, dando origem a outro período pré-histórico: o Neolítico (1; 2). Em suma, a introdução de avanços

tecnológicos na produção de ferramentas (com conceitos da Ciência dos Materiais) fornece a distinção entre estas duas eras. Exemplos de flechas podem ser vistos na Figura 1.3.

Independentemente da complexidade da empreitada, um projeto bem conduzido começa pela elaboração do conceito, passa pela seleção do material a ser utilizado, assim como pela sua forma construtiva; fatores estes que estão intimamente ligados ao: (i) tipo e magnitude de esforços que o objeto em questão será submetido durante o seu uso, (ii) vida útil requerida e (iii) viabilidade financeira.

Figura 1.2 - Esquema relacionando volume cerebral e tecnologia desenvolvida, para os diversos ancestrais do Homem.

Fonte: adaptado de (1).

Figura 1.3 - Pontas de flechas feita de pedra, de 4.200 - 3.000 a.C,

Fonte: (2).

Conectando todos estes fatores anteriores, chega-se à necessidade de se conhecer a maneira sob a qual o material ou objeto falhará. Nos primórdios da engenharia, a falha mecânica sempre foi associada ao escoamento ou deformação excessiva (instabilidade dimensional) ou à fratura, levando aos critérios de dimensionamento por carregamentos estáticos e similares, em que era observado o nível de tensão máxima á qual a estrutura ou componente estaria sujeita. Deformação excessiva, escoamento e fratura são, ainda hoje, os tipos de falhas mais estudados (7).

Após a Revolução Industrial, entretanto, a utilização de máquinas e equipamentos mais complexos e com maior número de partes móveis, e principalmente com expectativa de durabilidade ganhou força e, conseqüentemente, também a observação de falhas mecânicas ocorridas em componentes sujeitos a cargas repetitivas e em níveis muito abaixo de sua tensão de escoamento (8). Tem-se, com isso, o início do estudo da fadiga (9).

Apesar de tratar-se de um fenômeno economicamente importante (estima-se que o custo das falhas por fratura em 1982 chegou a 119 bilhões de dólares em 1982, sendo que é aceito que até 90% destes casos tenham sido causados pela fadiga (7)), a falha dos materiais por ação da fadiga ainda não é conhecida completamente, principalmente devido à natureza complexa das situações em que ocorre. Até mesmo uma definição coesa e unificada sobre o fenômeno ainda não possui o consenso entre os pesquisadores, assim como definições para outros detalhes importantes da fadiga (10), como as perturbações no regime de amplitude variável. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os principais modos de falha que atingem os materiais, bem como os modos associados à falha por fadiga.

É vital para uma empresa desenvolver os seus produtos de forma confiável e ao menor custo. No caso dos automóveis, aviões e outros meios de transporte ainda existem os fatores segurança (pois coloca em risco vidas humanas) e a pressão exercida pela concorrência, originando uma verdadeira corrida tecnológica, onde o tempo de desenvolvimento dos produtos passa a ser cada vez menor. O fator segurança em projetos ficou novamente em evidência no Brasil após o desastre de Mariana, em Minas Gerais (11).

Entre outras etapas, a fase de testes de validação é de extrema importância, tanto para assegurar a qualidade do produto, quanto para reduzir o tempo de projeto dos mesmos. Fazem parte de tais etapas os testes ou ensaios de fadiga, comumente chamados de testes de durabilidade¹. A função deste tipo de ensaio no desenvolvimento veicular é de dimensionar a vida útil dos componentes sob o uso real. Ele contribui para uma grande parcela na otimização de tempo de um projeto, utilizando-se da capacidade de acelerar o ensaio para que uma falha seja observada em um intervalo de tempo mais curto, extrapolando-se os resultados para a o uso do cliente. Nesse sentido a transferibilidade, que lida diretamente com a correlação entre um teste real (de

¹ Neste trabalho, os testes de fadiga sob amplitude variável serão muitas vezes tratados somente como ensaios ou testes de durabilidade.

longa duração) e um ensaio simulado em laboratório (de curta duração), é fundamental. É nessa diferença de tempos gastos, entre outros, que o desenvolvimento veicular consegue minimizar o período gasto em um projeto.

O momento em que um teste real é transferido para simulação é extremamente delicado: com o objetivo de reduzir cada vez mais o tempo necessário para obter resultados representativos, os testes de bancada tendem a ser cada vez mais agressivos e, muitas vezes, acabam perdendo a sua representatividade, fornecendo resultados dúbios e até divergentes (9).

Outro aspecto importante de correlação entre os testes reais e simulados é a necessidade de “paradas” durante o ensaio. Muitas vezes, por restrições práticas de funcionamento e/ou condições climáticas, o teste real precisa ser interrompido (o veículo quebrou ou fará revisão, o turno acabou, o operador precisa almoçar, etc.) e esta interrupção pode acarretar diferenças nos resultados quando o mesmo teste é simulado em dispositivo.

De forma análoga, o dispositivo pode apresentar as tais paradas, causadas por intervalos de manutenção, sobreaquecimento e quedas de energia. Uma fonte constante de pausas em testes de fadiga é a aplicação da parada para controle de temperatura durante ensaios de fadiga em ultra-alto ciclo (very high-cycle fatigue) e ultrassônica. Neste tipo de ensaio, a frequência chega à casa dos 20 kHz, em contraste com os usuais 200 Hz dos ensaios convencionais (12; 13; 14; 15). A investigação da influência destas interrupções na aplicação de carregamento em fadiga é válida. E inédita.

Buscando manter representatividade, os ensaios de fadiga na indústria automobilística migraram nas últimas décadas, de testes cíclicos para complexas solicitações através do uso de fadiga de amplitude variável, oriundas de sinais coletados em campo, cuidadosamente editados para maximizar o ganho de tempo. A Figura 1.4 ilustra de maneira esquemática o processo de aquisição de dados em campo, utilizando um veículo instrumentado para tal finalidade. Nela é possível visualizar a fonte de entrada das solicitações mecânicas (tensão e temperatura) e o equipamento utilizado.

Tabela 1.1 - Principais mecanismos de falhas mecânicas nos metais.

1	Deformação Excessiva
2	Fratura dúctil
3	Fratura frágil
4	Impacto ou carga dinâmica
5	Fluência
6	Choque térmico
7	Desgaste
8	Corrosão
9	Corrosão sob tensão
10	Fadiga:
	a – nucleação de trinca
	b – crescimento de trinca
	c – carregamento de amplitude constante ou variável
	d – carregamento uniaxial ou multiaxial
	e – fadiga sob corrosão
	f – fadiga por <i>fretting</i>
	g – fadiga sob fluência
	h – fadiga térmica
	i – fadiga de contato
	j – fadiga sônica
	l – combinações de a até j

Fonte: adaptado de (7).

Pode-se dizer que um ensaio de durabilidade é considerado adequado quando atende a três requisitos básicos:

1. **Representatividade:** é a capacidade que o ensaio apresenta de, com maior ou menor precisão, fornecer de maneira estatisticamente comprovada e eficiente um conjunto de dados que represente o

fenômeno físico observado no componente real, em campo, durante o seu uso;

2. **Reprodutibilidade:** é a propriedade possuída por um ensaio cujas características possam ser reproduzidas intencionalmente, sendo que as possíveis variações, oriundas de fenômenos físicos ou outros, não afetem a sua representatividade;
3. **Transferibilidade:** capacidade apresentada pelo ensaio em reproduzir fielmente, através do uso de corpos de prova ou sistemas mecânicos, o estado de tensões (extraído de um ambiente representável e reproduzível) ao qual o componente real está submetido durante serviço.

Figura 1.4 - Processo de aquisição de dados em campo.

Juntamente com este ganho, o uso de fadiga de amplitude variável trouxe também alguns efeitos colaterais, como a percepção da influência das perturbações no ciclo de fadiga, interações e contagem entre ciclos, maior ação do fechamento prematuro de trincas e outros. É justamente a estes aspectos colaterais que este trabalho se dedica.

Nas páginas a seguir será apresentado o histórico da pesquisa em fadiga: sua origem, casos famosos e principais desenvolvimentos no campo, até os dias de hoje. Nas páginas dedicadas aos últimos avanços, serão demonstrados os mais atuais conceitos no campo de fadiga de amplitude variável, assim como a influência de seus fenômenos nos ensaios realizados hoje em dia. Uma breve revisão e correção de terminologia básica também são discutidas, baseadas na nomenclatura utilizada por diversos pesquisadores do assunto. Já a parte experimental é dedicada a elucidar os efeitos das paradas durante os testes e fadiga.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fadiga: o fenômeno

2.1.1 Histórico

Fadiga pode ser definida como um termo aplicado às alterações nas propriedades que ocorrem em um material, devido à aplicação de seguidos ciclos de tensões ou deformações. Este termo, contudo, é comumente aplicado especialmente àquelas alterações que levam à formação de trinca ou falha (16; 17). Alguns autores (7; 8; 18; 19) ainda definem a fadiga como uma falha que ocorre em componentes (estruturas, peças, etc.) sujeitos a tensão ou deformação cíclicas. Sob tais condições, a falha por fadiga pode ocorrer mesmo em níveis de tensão abaixo do limite do escoamento do material para cargas estáticas. De acordo com o *ASM Metals Handbook – Vol 19 Fatigue and Fracture* (10) e a norma ASTM E1150 (20), fadiga é um “processo de alterações estruturais permanentes, localizadas e progressivas, que ocorrem em um material sujeito a condições que produzem tensões flutuantes e deformações em algum ponto ou pontos, e que podem culminar em trincas ou fratura completa após uma quantidade suficiente de flutuações”.

Ainda, de acordo com a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, pode-se associar a fadiga a outros tipos de solicitação, permanecendo a definição acima aplicável para a *fadiga mecânica*. Cargas cíclicas e altas temperaturas causam a *fadiga sob fluência*. Quando a temperatura de trabalho também varia, existe a *fadiga termomecânica*. Já esforços cíclicos combinados com um ambiente corrosivo ou degradante leva à *fadiga sob corrosão*. Ainda pode-se enumerar a *fadiga por contato*, seja esta de deslizamento ou rolante, e a *fadiga por fretting*, quando ocorre movimento relativo oscilatório entre as superfícies. Por último, a *fadiga sônica*, presente em aviões devido à ação de suas turbinas.

A palavra *fadiga* refere-se à capacidade do fenômeno “cansar” o material, originada da expressão em latim *fatigare*, e desde a época das

Grandes Navegações é utilizada para descrever a deformação existente nos mastros das embarcações, devido à constante solicitação no mar (16).

O primeiro estudo de fadiga em materiais metálicos é creditado ao engenheiro alemão W. A. J. Albert, publicado em 1837 (21). Nesta pesquisa, Albert carregou ciclicamente correntes feitas de aço, utilizadas como guinchos em minas. Nota-se que ele testou não somente o material utilizado, mas sim o componente real.

O primeiro estudo detalhado sobre o fenômeno da fadiga ocorreu após o acidente de trem de Versailles², em 8 de Maio de 1842, em que mais de 50 pessoas morreram. No ano seguinte, o engenheiro inglês W. Rankine atribuiu o acidente a falha por fadiga no eixo dianteiro da locomotiva (22), revelando em seu estudo a importância da concentração de tensão (7, 8, 16). A fadiga em um eixo, datada de 1843.

Figura 2.1 - Desenho ilustrando uma falha por fadiga em um eixo (1843).

Fonte: (23)

Já em meados de 1849, o *Institution of Mechanical Engineers* na Inglaterra começou a explorar a Teoria da Cristalização da fadiga, onde as trincas seriam causadas por uma misteriosa “cristalização” do material, assim explicando a ausência de deformação plástica nas falhas (7; 16). Na mesma

²Maiores detalhes sobre este acidente estão na página 22.

época, o governo britânico contratou E. Hodgkinson para estudar fadiga em ferro fundido utilizado em pontes ferroviárias.

Em 1853, Morin publicou em seu livro *Resistance des Matériaux* relatos de engenheiros responsáveis por carruagens do serviço postal, estabelecendo a substituição dos eixos após os 60.000 km rodados. Este foi o primeiro exemplo de inspeção por tempo de serviço da história, apud Schütz (9). Morin também é citado como o pioneiro a utilizar a palavra *fadiga* para descrever o crescimento de trincas em metais, contudo esta honra, na verdade, deve ser creditados a Braithwaite que, em 1854, descreveu uma série de falhas em serviço devido à fadiga em bombas d'água, eixos, alavancas, guindastes e outros. O próprio Braithwaite relata que um certo Sr. Field cunhou o termo, apud Schütz e Suresh (9; 16).

Em 1858, A. Wöhler iniciou os seus estudos em fadiga, medindo os carregamentos em serviço de eixos ferroviários, observando que as tensões de falha em carregamento cíclico eram muito menores do que a tensão para falhas estáticas. Tais medições foram executadas ao longo de 22.000 km em eixos de vagões de passageiros equipados com 4 e 6 rodas, em trajetos entre Breslau, Berlin e Frankfurt. A deflexão do eixo foi marcada em uma placa de zinco, movimentada por um sistema de alavancas preso na suspensão do vagão, possibilitando a comparação entre a deflexão existente em serviço e a encontrada em laboratório, chegando a um fator de 1,33, concluindo:

[...] o número de ciclos por viagem é consideravelmente menor do que a quantidade de milhas que um eixo percorre durante a sua vida. Portanto, os fatores de segurança são alcançados se os eixos podem resistir às tensões máximas medidas quantas vezes quanto a vida esperada em milhas. Se nós estimarmos a durabilidade dos eixos em 200.000 milhas, considerando o desgaste nos mancais é, portanto somente necessário que ele resista a 200.000 ciclos de deflexão da magnitude medida sem falha (9).

Em 1860, Wöhler publicou o trabalho sobre a caracterização do comportamento a fadiga em termos de curvas de tensão e amplitude, introduzindo o conceito das curvas S-N e do limite de fadiga (16), demonstrando que a vida em fadiga decresce com o aumento da amplitude de

tensão aplicada e que abaixo de certo limite, a falha em fadiga não ocorre. Wöhler é considerado o pai dos procedimentos de testes de fadiga (7; 8). Abaixo, são reproduzidas as chamadas Leis de Wöhler (9; 17):

- O material pode ser induzido à falha através de muitas repetições de tensão, todas elas menores do que a resistência estática;
- As amplitudes de tensão são decisivas para a destruição da coesão do material;
- A tensão máxima influencia apenas no sentido de que quanto maior ela for, menores são as amplitudes de tensão que levam à falha.

O trabalho de Wöhler foi muito importante, pioneiro e abrangente, indo de medições de carregamentos em serviço, cálculo de tensões de serviço, projeto considerando vida finita e desvios, incluindo também propagação de trinca. Para mensurar o pioneirismo de seu trabalho, vale notar que a seguinte publicação a comentar sobre vida finita só apareceu 75 anos depois, feita por Almen e Boegehold (9). Um exemplo de curva S-N pode ser vista na Figura 2.2.

Em 1864 foi a vez de W. Fairbairn concluir que, após experimentos de aplicação de tensões cíclicas em vigas de ferro, as mesmas falharam com somente um terço da tensão estática (24). H. Gerber em 1874 iniciou o estudo de métodos para projeto considerando fadiga, assim como estudou o efeito da tensão média. Trabalho este desenvolvido mais tarde por Goodman, em 1899 (7; 16). Em 1886, Bauschinger observou que o limite elástico dos metais, em tensão ou em compressão era reduzido após a aplicação de carga de sinal oposto, causando deformação monotônica. Surgia o Efeito Bauschinger: “a alteração do limite elástico através de seguidos ciclos de tensão”. Ele ainda confirmou muitos resultados previstos por Wöhler (7; 9; 16). Na virada do século, Ewing e Humfrey utilizaram a microscopia ótica para estudar os mecanismos de fadiga, realizando a primeira descrição metalúrgica do processo, constando com a observação de dano cíclico na superfície do material, chamadas de bandas de escorregamento (25). Estas bandas aumentavam com o progresso da deformação, levando à formação de trincas.

Também formavam degraus na superfície do material, no formato de elevações e depressões, hoje conhecidas como extrusões e intrusões. Este trabalho resultou também na obliteração da teoria de cristalização na fadiga (16).

Figura 2.2 - Típica curva S-N.

Fonte: (17).

Basquin em 1910 utilizou leis empíricas para caracterizar as curvas S-N dos metais, resultando em um gráfico bi logarítmico da tensão contra o número de ciclos de fadiga (16). Esta equação é utilizada atualmente para representar o comportamento de vida em fadiga finita (7). Neste mesmo ano, Boudouard estudou os efeitos dos tratamentos térmicos na resistência à fadiga (16). Haigh documentou a fadiga sob corrosão pela primeira vez em 1917. Em 1918 W. Douglas conduziu o primeiro teste de fadiga em escala total, utilizando um grande componente aeronáutico. O termo “efeito de entalhe” aparece explicitamente pela primeira vez, apesar de já ter sido citado anteriormente por Rankine em 1843 (22).

Os anos 20 deram origem a trabalhos de suma importância no estudo da fadiga e degradação dos metais. Em 1920, Griffith desenvolveu o embasamento da mecânica da fratura, usando os seus pioneiros experimentos de fratura frágil em placas de vidro (26). H. Gough publicou na Inglaterra, em 1924, um livro chamado *The Fatigue of Metals*, no qual cita pela primeira vez a influência da rugosidade superficial no limite de fadiga, assim como os fatores de concentração de tensões de entalhes em V. Também em 1924, Palmgren

publicou o seu estudo onde desenvolveu um método de cálculo do dano linear cumulativo em amplitude variável (9). Em 1927, H. Moore e J. Kommers publicaram o primeiro livro sobre o assunto nos EUA, com o mesmo título da obra que Gough publicara três anos antes (7). Graf e Föppl também publicaram os seus livros em 1929 – *Die Dauerfestigkeit der Werkstoffe und Konstruktionselemente*³ e *Die Dauerprüfung der Werkstoffe hinsichtlich ihrer Schwingfestigkeit und Dämpfungsfähigkeit*⁴ respectivamente.

Já nos anos 30, ocorreram as primeiras incursões da fadiga na indústria automobilística, com a pioneira medição de espectro de carga em molas de suspensão automotivas, executada por Batson e Bradley em 1931 (9), assim como a introdução do processo de *shot-peening* para evitar falhas em molas e eixos automotivos, muito comuns na época, atribuída a Föppl e Thum (7; 9), e a utilização benéfica das tensões compressivas superficiais. Em 1936, de Forest executou o primeiro teste de propagação de trincas. Langer em 1937 publicou uma hipótese de acúmulo de dano idêntica a de Palmgren, contudo separando a vida em fadiga em duas fases: nucleação da trinca e crescimento da trinca (9).

Em 1932 ocorreu um grande desenvolvimento para o estudo da fadiga: pesquisadores alemães patentearam o primeiro extensômetro, o de indução, que foi utilizado com sucesso nas primeiras medições de espectro de carregamento em aviões (9). Em 1933 Teichmann e Michael escreveram que “durante o uso de um avião, as amplitudes de tensão não são idênticas as de um teste de laboratório, pois grandes e pequenas amplitudes ocorrem com frequências diferentes” (9). A partir de 1938 foram publicados diversos trabalhos relatando as medições de carregamento em asas de aviões, até 1939 quando Gassner descreveu as ideias fundamentais dos testes de fadiga em amplitude variável (7; 9). Mesmo considerando que a medição de Batson e

³ Tradução livre: A durabilidade dos materiais e elementos de construção.

⁴ Tradução livre: Os testes de durabilidade dos materiais no que diz respeito à sua resistência à fadiga e a capacidade de amortecimento.

Bradley foi pioneira (citada anteriormente), a real utilização dos dados obtidos em projeto só ocorreu após 1938, com os trabalhos dos alemães no campo da indústria aeronáutica.

Outros livros pioneiros sobre fadiga foram publicados nessa época: Herold em 1934 (*Die Wechselfestigkeit Metallischer Werkstoffe*⁵), Cazaud (*La Fatigue des Métaux*) e Serensen (*The Endurance of Metals and the Design of Machine Component*) em 1937 (7; 9).

Em 1939 foi inventado o extensômetro resistivo elétrico por pesquisadores do MIT e Caltech. Este foi considerado inútil e só viu utilização durante a Segunda Guerra Mundial (9).

A década de 40 foi dominada pelos testes de fadiga em amplitude variável na forma de carregamentos em blocos, utilizando-se novas máquinas, muitas delas inventadas por Gassner e Schenck. Durante o período da Segunda Guerra Mundial foi observado o avanço nas medições de espectros de carregamento durante vôos militares, sobretudo os realizados por pesquisadores ingleses. Em 1945, Miner (27) sugeriu uma regra de acúmulo de dano baseada nos trabalhos de Palmgren, dando origem a Regra de Palmgren-Miner, que foi e ainda é, muito utilizada para a predição de vida em fadiga (7).

O período pós-guerra trouxe avanços notáveis para o estudo da fadiga, principalmente devido a novas instalações de teste, computadores, máquinas hidráulicas ou pneumáticas para teste e análise numérica de tensões. Para quantificar este avanço, Schijve compara a quantidade de referências de estudo da fadiga no séc. XIX (menos de 100) com a contabilização do século XX (perto de 100.000) (28). Assim como os acidentes com os navios *Liberty* na Segunda Guerra impulsionaram o estudo da Mecânica da Fratura, os anos 50 trouxeram um dos mais célebres casos de falha causada pela fadiga: o caso dos aviões *de Havilland Comet*⁶.

⁵ Tradução livre: A resistência à fadiga dos materiais metálicos.

⁶ Maiores detalhes sobre este acidente estão na página 22.

Nesta época também já existia um conhecimento bem desenvolvido sobre a teoria de discordâncias, e alguns pesquisadores tentaram explicar o fenômeno da nucleação da trinca com base na criação e movimentação das discordâncias. A partir do trabalho de Forsyth, três aspectos fundamentais puderam ser estabelecidos: (i) a importância da superfície do material, (ii) a irreversibilidade do escorregamento cíclico e (iii) os efeitos ambientais na nucleação e microtrincas (28). Assim, pode-se dizer que, nos anos 50 e 60, duas invenções contribuíram de forma significativa para o estudo da fadiga: a invenção das máquinas de ensaios servo-hidráulicos de circuito fechado, e a invenção da microscopia eletrônica (tanto de transmissão quanto de varredura); esses dois desenvolvimentos tecnológicos permitiram, entre outras coisas, a execução de testes de fadiga complexos utilizando histórico de carregamento, e a observação de estrias de fadiga. Irwin introduziu em 1957 o fator de intensificação de tensões (29) que é a base para a mecânica da fratura linear elástica e cunhou o termo “mecânica da fratura”. A distribuição de Weibull (30) forneceu uma metodologia para a previsão probabilística para a vida em fadiga. No começo dos anos 60, Coffin e Manson (7) estabeleceram, independentemente, a relação entre a amplitude e deformação plástica e a vida em fadiga.

Em 1961 Paris, Anderson e Gomez (31) publicaram o primeiro artigo com a adoção do valor K originado da análise do campo de tensão em volta da ponta da trinca (cujas coordenadas podem ser vistas na Figura 2.3), como proposto por Irwin (29), dando origem a famosa relação de Paris, representando a região linear no estágio de crescimento de trincas. Tal região pode ser visualizada nas seguintes ilustrações: Figura 2.4 e Figura 2.5. O detalhamento sobre os estágios de crescimento de trincas de fadiga encontra-se na seção 2.1.4.

Figura 2.3 - Coordenadas das tensões na ponta da trinca.

Fonte: (31).

Também nesta época, Schijve (32) ressaltou a importância de testes com amplitude variável, junto com a influência das sobrecargas no retardo no crescimento das trincas de fadiga. Apesar de o efeito das sobrecargas ganhar maior ênfase neste momento, tal fenômeno já era conhecido antes dos anos 50, com o trabalho de Heyer em 1943, utilizando pré-cargas compressivas durante a Segunda Guerra (28).

Figura 2.4 - Correlação entre os dados da taxa de crescimento de trinca

Fonte: (31).

Na Tabela 2.1 estão relacionados os principais eventos ocorridos durante a pesquisa de fadiga, até o ano de 1970.

Figura 2.5 - As três regiões do crescimento de trinca.

Fonte: (33).

A década de 70 seria um terreno muito fértil para as pesquisas considerando carregamentos em amplitude variável, empurradas principalmente pelo campo da aviação. Em 1970, Elber (34) postulou e provou experimentalmente a importância do fenômeno de fechamento prematuro de trinca no crescimento de trincas de fadiga.

Tabela 2.1 - Linha do tempo dos principais eventos na pesquisa da fadiga.

Ano	Evento
1837	W. Albert publica o primeiro artigo sobre a fadiga
1839	J. Poncelet descreve o “cansaço” dos metais em suas aulas em Metz
1842	W. Rankine cita a importância dos concentradores de tensões
1854	Braithwaite relata falhas em serviço e introduz o termo <i>fadiga</i>

1860	A. Wöhler inicia a sua pesquisa sistemática em testes de fadiga
1870	Wöhler introduz o conceito de limite de fadiga
1903	J. Ewing apresenta a origem da falha em fadiga em trincas microscópicas
1910	O. Basquin propõe uma relação log-log para a curva SN
1945	A. Miner populariza a regra de dano linear de Palmgren (1924)
1954	L. Coffin e S. Manson explicam o crescimento de trincas de fadiga através de campos plásticos na ponta da trinca
1961	P. C. Paris propões métodos para predizer a taxa de crescimento de trincas
1968	T. Endo e M. Matsuishi introduzem o método <i>rainflow</i> de contagem de ciclos de fadiga
1970	W. Elber propõe o fenômeno de fechamento de trinca

Fonte: acervo pessoal.

Em 1974 a Força Aérea dos EUA introduziu novas especificações para os futuros projetos, através do *Damage Tolerance Requirements* (Mil A-83444) (7; 9). Neste norma os defeitos (ou trincas) são postulados como presentes em todos os pontos críticos da estrutura, sendo causados pelos processos de manufatura ou carregamentos em serviço. Assim, o fabricante era obrigado a provar, através de cálculos e testes, que a presença destes defeitos ainda forneceria a vida útil suficiente (durabilidade) e resistência estática (tolerância a danos) requisitados pelo projeto. Este fato marcou o início do uso da mecânica da fratura como ferramenta para projetos, e enfatizou a utilização de ensaios não-destrutivos para a detecção de trincas (7).

A junção de (i) conceitos e parâmetros, como o fator de intensificação de tensões, (ii) a resistência à fratura e (iii) o tamanho e (iv) a taxa de crescimento de trinca, deu origem à Mecânica da Fratura Elasto-plástica (MFEL) em meados da década de 70 (16; 33), a qual observou uso crescente e comercial

durante a década de 80, sendo principalmente auxiliada pelos avanços da computação e métodos de observação microscópica no estudo da fadiga. Também nesta época iniciou-se o estudo do problema das micro-trincas (7; 16) (ou *small cracks*, ver Figura 2.6), com a publicação de Pearson em 1975 (16). Ainda tivemos avanços em observações de micro-trincas e dano multi-local.

Impulsionada pela aviação e pela corrida espacial, o estudo da fadiga termomecânica e o comportamento de materiais compósitos tiveram início no final dos anos 80. A preocupação com a influência dos fatores ambientais sobre a vida em fadiga também é estudada. Inspeções periódicas e utilização de ensaios não destrutivos eram cada vez mais comuns.

Os anos 90 trouxeram as pesquisas no campo da fadiga multiaxial, auxiliada principalmente pelos softwares para simulação de reais e complexos históricos de carregamento em componentes ou estruturas. Integrações com softwares de projeto e utilização de dados reais de serviço elevaram os ensaios de fadiga a uma importante fase de projeto e validação (7; 16). Paris publica, em 1998 (35), um breve artigo de revisão histórica criticando a utilização dos recursos disponíveis até a data, na predição de vida em fadiga.

Em 1998 o pesquisador Helmut Naundorf tem a ideia de compilar um resumo sobre o termo técnico alemão *Betriebsfestigkeit* que, sob uma ótica simplista, descreve o comportamento mecânico de estruturas sob a ação de cargas operacionais ou de serviço (36). Apesar de o termo *Betriebsfestigkeit* possuir vários significados em português, pode-se definir os quatro principais parâmetros desta abordagem técnica como:

- Carregamento (cargas);
- Projeto;
- Material;
- Processo de manufatura.

O conjunto desses pilares forma o campo de estudo da durabilidade estrutural ou integridade estrutural.

Figura 2.6 - Comportamento típico da taxa de crescimento entre trincas grandes e curtas.

Fonte: (17)

Na virada do século XX, ocorre o surgimento de um novo campo de pesquisa: a fadiga de ultra-alto ciclo (UHCF), estudo esse possível através da utilização de máquinas de ensaio de fadiga com frequência ultrassônica (12; 13; 37; 14; 15), ou seja, acima de 10^7 ciclos (33). Nestes testes são aplicadas frequências ultrassônicas, na faixa de 20 kHz, com o intuito de provocar em tempo hábil a falha no componente, a qual apareceria somente após uma elevada quantidade de ciclos de fadiga (normalmente após 10^6 ciclos). Com uma ciclagem para a falha tão elevada, o teste em questão duraria cerca de um ano; tempo este que é reduzido para somente poucas semanas quando frequências ultrassônicas são aplicadas.

2.1.2 Acidentes famosos causados pela fadiga

O Acidente de trem de Versailles: este acidente ferroviário ocorreu em 8 de Maio de 1842, perto de Meudon Bellevue, entre as cidades francesas de Versailles e Paris (38). Na ocasião uma composição retornava de uma celebração no Palácio de Versailles quando a locomotiva quebrou o eixo,

causando a colisão entre os vagões e posterior incêndio. O primeiro acidente ferroviário registrado da França (e um dos primeiros da história) vitimou cerca de 50 pessoas. Uma ilustração representando o acidente pode ser vista na Figura 2.7.

Tal acidente foi investigado por W. Rankine (22), tornando-se a primeira pesquisa detalhada sobre a fadiga da história (7; 16).

Figura 2.7 - Ilustração do acidente de Versailles.

Fonte: (38).

O desastre da ponte Ashtabula: foi um acidente de trem causado por uma falha numa ponte sobre o rio de mesmo nome, ocorrida em 29 de Dezembro de 1876, em Ohio (EUA) (39; 40). Neste dia, um trem composto de duas locomotivas (Sócrates e Columbia) e 11 vagões, caiu de uma altura de 20 metros após o colapso da ponte que atravessavam, sendo que a locomotiva líder, a Sócrates, já havia atravessado a construção de 90 metros de comprimento. Este desastre, causado pela falha por fadiga dos suportes de aço fundido, utilizado para unir os trilhos, vitimou 92 pessoas e feriu outras 64. Tal

acidente levou ao assassinato de um responsável pela obra⁷, Charles Collins e o suicídio de outro, Amasa Stone (41). Após este episódio, a inspeção periódica de trechos críticos das ferrovias foi recomendada. A Figura 2.8 ilustra o local do acidente.

Figura 2.8 - Gravura em madeira retratando o desastre da ponte Ashtabula.

Fonte: (38).

A inundação de melaço de Boston: em 15 de Janeiro de 1919, um grande tanque de melaço colapsou em Boston, Massachusetts (42), fazendo com que uma onda de melaço invadissem as ruas a uma velocidade de cerca de 50 km/h, matando 21 pessoas e ferindo outras 150. Este tanque media 15 metros de altura, por 27 metros de diâmetro, e tinha a capacidade de armazenar 8.700 m³ do produto. A força da onda de melaço foi tamanha que, além de cobrir as ruas com uma camada de 60 a 90 cm de altura, derrubou muros, matou cavalos, danificou uma ponte e removeu um vagão dos trilhos (43). Vide imagens dos danos nas

⁷Na época da tragédia, foi dito que Charles teria cometido suicídio, porém análises posteriores executadas em seu crânio em 2001 atestaram o assassinato (41).

Figura 2.9 e Figura 2.10 a seguir.

Figura 2.9 - Área atingida pelo melaço.

Fonte: (42). Copyright © Leslie Jones.

As investigações sobre as causas do acidente apontaram (após suspeitas de atentado de anarquistas e enchimento do tanque além da capacidade para aumentar a produção de rum antes da Proibição) para uma falha causada por crescimento crítico de trincas de fadiga na base do tanque. O mesmo havia sido enchido até o limite por 8 vezes, causando um esforço cíclico nas paredes. Houve também a variação da temperatura externa, que saiu de -17°C para 5°C em poucos dias no período do acidente. Ainda, a construção do tanque não respeitou normas básicas de segurança, como testes para verificação de possíveis vazamentos: o mesmo era pintado de marrom com o objetivo de esconder o melaço que vazava continuamente.

Figura 2.10 - Estrutura danificada pela onda de melaço.

Fonte: (43). Copyright © Leslie Jones.

O caso Comet, no primeiro aniversário da aviação comercial a jato, em 2 de Maio de 1953, uma aeronave de Havilland Comet (representado na Figura 2.11), foi o primeiro jato comercial da história, com mais de 300 horas de vôos de teste e sem a construção de protótipos (40)) desintegrou-se em pleno vôo logo após decolar de Calcutá, na Índia, apenas 4 dias após passar por uma inspeção de rotina (7). Como ocorria uma forte tempestade tropical no momento, este acidente foi creditado às condições climáticas (16). Em 10 de Janeiro de 1954, outro *Comet* explodiu a mais de 8.000 metros de altitude, sobrevoando o Mar Mediterrâneo após decolar de Roma sob bom tempo. Como a maioria dos destroços não pode ser recuperada, novamente não foram identificadas falhas de projeto e os aviões retornaram a operação 10 semanas após. A terceira e última explosão ocorreu em 8 de Abril de 1954, após a decolagem de Roma com destino a Londres. Como estes destroços caíram em águas muito profundas, os esforços para a recuperação dos restos do segundo desastre foram retomados, com a utilização da explosão de réplicas de madeira sobre o mar, para determinar onde as partes poderiam cair. Assim, mais destroços foram recuperados e a investigação continuou, revelando marcas de impressão de uma página de jornal e uma moeda indiana na cauda

do avião. Ambos os fatos indicam uma violenta explosão da cabine. O próximo passo foi a remoção de uma *Comet* em serviço para ser submerso em um tanque, onde a pressão cíclica da água simularia as repetidas pressurizações e despressurizações que a cabine estaria sujeita durante o voo, juntamente com a excitação das asas com o uso de macacos hidráulicos.

Figura 2.11- de Havilland Comet.

Fonte: (44)

Como resultado destes testes, após um número de horas consideravelmente menor do que o esperado, uma trinca surgiu na aresta de uma janela da cabine (quadradas, vide Figura 2.12), crescendo rapidamente até a falha catastrófica da fuselagem do avião. Problemas por fadiga não eram esperados em tempo curto dado ao fato que o processo de pressurização só ocorre uma vez por voo, assim levariam muitas horas de uso para que algum dano por fadiga se desenvolvesse. Os engenheiros da *de Havilland* só haviam se preocupado com a capacidade da cabine de suportar a pressão, e não a sua aplicação cíclica.

Figura 2.12 - Imagem da região da falha em uma janela do Comet.

Fonte: (44).

Esta seqüência de acidentes e a imagem negativa perante a opinião pública ajudaram a *Boeing Aircraft Company* a alcançar a liderança mundial na aviação comercial (16). O caso do *Comet* tornou-se um divisor de água para o estudo da fadiga e suas aplicações tecnológicas.

O caso F-111: o F-111, como pode ser visto na Figura 2.13 foi a primeira aeronave projetada sob a ótica da abordagem *safe-life*⁸ como resultado do *Aircraft Structural Integrity Program* dos EUA em 1956 (45). Contudo, após alguns acidentes (com menos de 100 horas de voo (9)) devido a falhas de fadiga em asas, um programa de pesquisa teórico e experimental foi implementado pela Força Aérea americana. Como resultado, entre outros, foi descoberto que mesmo as microtrincas invisíveis aos ensaios não-destrutivos da época, poderiam levar a falha por fadiga, devido à sensível redução da

⁸Mais detalhes sobre este tipo de abordagem nas próximas seções.

resistência a fratura do material utilizado quando em baixas temperaturas (cerca de -40°C).

Figura 2.13 - O caça F-111, fotografado em 1956.

Fonte: (46).

Os ônibus *Grumman Fxibles* M870: no começo dos anos 80, a prefeitura de Nova Iorque lançou uma concorrência para a aquisição e novos ônibus para a cidade. Entre os requerimentos especificados estavam: ser mais leve para economizar combustível, ser capaz de transportar cadeirantes, ser equipado com ar condicionado e ter controles eletrônicos (40). A *Grumman Fxibles Corporation* então desenvolveu o seu M870 (Figura 2.14), que possuía uma plataforma extremamente modificada, deixando para trás as estruturas resistentes e abrindo caminho para veículos leves e modernos. Eventualmente, a empresa venceu a concorrência para entregar 850 unidades para a cidade.

Porém, após a entrega de 637 ônibus, a Prefeitura de Nova York resolve recolher toda a frota adquirida, devido ao aparecimento de diversas trincas de fadiga, somente após 6 meses de uso. As trincas no assoalho causavam problemas na suspensão dianteira, que levava a ruptura dos rolamentos da coluna de direção. Em 1984 todas as unidades foram devolvidas ao fabricante, que protestou alegando uso abusivo das plataformas, que deveriam durar até 1990. Mesmo assim, a *Grumman* teve que devolver os 92 milhões de dólares pagos pelos veículos e ainda pagar outros 350 milhões como multa por danos, e ainda perdeu o contrato com a Marinha para a fabricação dos aviões A-6 e F-14.

Figura 2.14 - O Grumman M870 em serviço.

Fonte: (47).

2.1.3 Conceitos fundamentais da fadiga

Como citado anteriormente, a fadiga pode ser definida como um termo aplicado às alterações nas propriedades que ocorrem em um material metálico, devido à aplicação de seguidas quantidades de tensões ou deformações, contudo este termo é comumente aplicado especialmente àquelas alterações que levam à formação de trinca ou falha (16; 17). Outras fontes (7; 8; 18; 19) ainda definem a fadiga como uma falha que ocorre em componentes (estruturas, peças, etc.) sujeitos a tensão ou deformação cíclicas. Sob tais condições, a falha por fadiga pode ocorrer mesmo em níveis de tensão abaixo do limite do escoamento do material para cargas estáticas.

Em suma, existem três tipos principais de carregamento tensão-tempo que são utilizados no estudo da fadiga:

Carregamento com amplitude constante ou cíclico: esta é a condição mais simples de carregamento em fadiga, na qual existe uma carga (ou respectivamente, deformação) variando com o tempo, em máxima e mínima amplitude. Alguns autores ainda consideram o posicionamento do ciclo de

tensões para outra classificação. Assim, quando a amplitude é simetricamente distribuída durante o tempo (a tensão média é igual a zero) temos o chamado ciclo reverso de tensões. Caso contrário, temos o ciclo repetido de tensões.

Figura 2.15 - Definição dos parâmetros do carregamento cíclico.

Fonte: (33).

Na Figura 2.15 estão indicados alguns parâmetros que são utilizados para descrever a tensão flutuante. A amplitude de tensão varia em torno de uma tensão média σ_m , definida como a média entre os picos de tensão:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1)$$

A tensão média:

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

A razão ou taxa de fadiga R é definida como:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (3)$$

Com tensões de tração sendo indicadas como positivas, e de compressão negativas, como usual na Mecânica dos Sólidos.

Carregamento por blocos: neste tipo de solicitação a tensão é aplicada em blocos facilmente identificáveis (ver Figura 2.16). Estes blocos são considerados como trechos com carregamento por amplitude constante, seguidos por outro com amplitude diferente, mas ainda sendo constante. Este tipo de solicitação era utilizado em ensaios de componentes aeronáuticos quando as máquinas hidráulicas de circuito fechado ainda não estavam disponíveis (16).

Carregamento com amplitude variável ou em espectro: um veículo em movimentação em uma estrada não é submetido a carregamentos como os demonstrados anteriormente, nos quais a amplitude é constante. O simples fato de o automóvel estar ou não com passageiros ou bagagem altera o seu estado de solicitação. Com as irregularidades do solo (buracos, valetas, lombadas, diferentes pisos, etc.), perturbações na amplitude de tensão aplicada são observadas, assim como variações na tensão média atuante. A Figura 2.16 ilustra exemplos desse comportamento.

Figura 2.16 - Representação simplificada dos modos de carregamentos cíclicos comumente utilizados em ensaios de fadiga.

Fonte: (33).

Este carregamento tornou-se amplamente utilizado em análises de fadiga, devido ao fato representar de maneira confiável (representável) a

situação de uso da grande maioria das estruturas e componentes mecânicos, sendo ainda atualmente executado através de atuadores hidráulicos ou pneumáticos controlados por computador.

2.1.4 Estágios da fadiga.

Nos vários estágios de dano por fadiga em um componente, os defeitos podem nuclear e propagar-se de maneira estável até a fratura. De forma genérica, este processo segue os seguintes passos (16):

1. Alteração microestruturais que causam a nucleação de dano permanente;
2. Surgimento de trincas microscópicas;
3. Crescimento e coalescimento de falhas microscópicas que formam trincas “dominantes” que podem levar à ruptura (limite entre os estágios de crescimento e propagação das trincas);
4. Propagação estável da macrotrinca dominante;
5. Instabilidade estrutural ou fratura completa.

A maior dificuldade para o desenvolvimento de modelos para predição de vida em fadiga está justamente na definição do estágio de nucleação da trinca, que é dificultada pelo fato que as condições para a nucleação de defeitos e sua taxa de propagação ser influenciadas por inúmeros fatores, sejam eles microestruturais ou externos.

Assim, a vida total em fadiga é definida como a somatória do número de ciclos necessários para iniciar uma trinca de fadiga, e o número de ciclos para propagá-la até um tamanho. Desta forma, a clara separação entre os estágios de nucleação e crescimento de trinca se faz mandatória, como esquematizado na Figura 2.17. A diferenciação entre estas duas etapas é importante porque diversas condições de superfície que afetam o período inicial têm uma contribuição ínfima para o estágio de crescimento (18).

Figura 2.17 - Diferentes fases da vida em fadiga.

Fonte: adaptado de (18).

A nucleação de trincas começa com o surgimento de microtrincas, logo no princípio da vida em fadiga. Mesmo prematuras, as microtrincas permanecem indetectáveis por uma considerável parte da vida total do componente (18). Uma vez que as trincas se tornam visíveis, a vida remanescente é apenas uma pequena porcentagem da vida total. Tal fato é válido para amplitudes de carregamento consideradas grandes.

Tanto o processo de nucleação quanto o de crescimento de trincas são causados pelo escorregamento cíclico, que causa a deformação plástica em amplitudes abaixo do limite de escoamento.

Quando um monocristal recozido de estrutura CFC é submetido a deformações cíclicas e totalmente reversíveis (desde que somente o escorregamento simples esteja ativo), um rápido endurecimento é percebido. E este aumenta com a aplicação dos ciclos de deformação, até atingir um limiar quase constante. Neste ponto ocorre a saturação (16). Vide Figura 2.18.

Figura 2.18 - Gráfico da tensão de cisalhamento resultante (no ponto de saturação) contra a deformação resultante, mostrando os círculos de histerese estabilizados. A linha tracejada representa a curva tensão-deformação cíclica para cristais dúcteis.

Fonte: (16).

O acúmulo de discordâncias é o principal responsável pelo encruamento rápido visto no regime A da curva de saturação tensão-deformação. (Figura 2.19). Neste estágio um estado de deformação constante é atingido como consequência do equilíbrio entre as discordâncias. Quando o nível de deformação plástica se eleva, passando para o regime B da figura, o escorregamento cíclico começa a se concentrar próximo a certas bandas de escorregamento. Estas bandas são denominadas bandas de escorregamento persistentes (PSB – *Persistent Slip Bands*, Thompson et al., 1956), que levam às extrusões e intrusões (vide Figura 2.20). São assim denominadas por persistentemente nuclear nos mesmos locais do corpo de prova quando este é solicitado mesmo após a remoção por polimento de uma fina camada da superfície onde elas originalmente surgiram. As marcas de escorregamento vistas na superfície são extensões dos locais em que as PSBs alcançam a superfície. Enquanto os degraus de escorregamento se formam na superfície do cristal em proporção à tensão, os deslocamentos das PSBs não são totalmente reversos durante o carregamento em fadiga. Esta irreversibilidade cinemática do escorregamento cíclico é o principal mecanismo para a formação de trincas de fadiga em materiais isentos de defeitos superficiais (riscos, inclusões etc.) preexistentes.

Figura 2.19 - Os diferentes regimes da curva de saturação tensão-deformação.

Fonte: (48).

Este aumento de rugosidade é consequência da irreversibilidade do escorregamento cíclico. Esta irreversibilidade surge devido à influência de vários fatores, entre eles (i) escorregamento em diferentes planos de deslizamento durante o carregamento e descarregamento do ciclo de fadiga, como consequência do escorregamento com desvio (*cross-slip*) ou formação de emaranhados de discordâncias, bloqueios e degraus (*jogs*) ou discordâncias; (ii) escorregamento assimétrico oriundo das alterações na forma do cristal ou da diferença da tensão de retorno devido ao escorregamento em planos diferentes; (iii) criação de defeitos puntiformes; (iv) fatores ambientais, como absorção de produtos ou oxidação do degrau virgem formado pela discordância (33).

Em resumo, pode-se concluir que o estágio de nucleação de trincas é um fenômeno superficial do material (18).

Se o nível de tensão cíclica for suficientemente alto, uma microtrinca superficial crescerá através da superfície e penetrará no volume do material (8). Como a trinca está crescendo dentro do material em alguns grãos adjacentes, a restrição nos sistemas de escorregamentos aumentará, devido à presença dos grãos vizinhos, dificultando assim a acomodação os deslocamentos em um único plano de escorregamento, o que ativa os outros sistemas de escorregamento. Assim, a direção de crescimento da microtrinca,

inicialmente orientada a 45° da máxima tensão de tração, se desviará com tendência ao crescimento perpendicular à máxima tensão de tração.

Figura 2.20 - Mecanismo simplificado para a formação de extrusões e intrusões.

Fonte: (33).

Este processo ocorre até que a trinca atinja um tamanho que possibilite o crescimento como uma macrotrinca, ou seja, o seu comportamento de crescimento dependerá da quantidade de aberturas e fechamentos aplicada. Como a linha de frente da trinca precisa manter-se coerente, ela não pode crescer em cada grão em uma direção arbitrária e com uma taxa de crescimento independente nos grãos adjacentes. Esta continuidade forçada previne altos gradientes de taxa de crescimento na frente da trinca. A velocidade com a qual a trinca se propaga é dependente da resistência do material e os dois aspectos superficiais não são mais relevantes: a restrição ao escorregamento cíclico e rugosidade não atuam dentro do material. Assim, o crescimento de macrotrincas não é um fenômeno superficial (18).

Em suma, pode dividir o processo de propagação da trinca (etapa que consome aproximadamente 95% da vida útil de um componente sujeito a

fadiga de alto ciclo) em três estágios (33; 17), conforme ilustrado na Figura 2.21:

1. Uma ou mais trincas de fadiga se propagam a partir da superfície, seguindo planos de deslizamento orientados a 45° do eixo de carregamento;
2. Após atingir um contorno de grão, uma das microtrincas muda de orientação e se propaga perpendicularmente ao plano de máxima tensão de tração;
3. Ao atingir certo tamanho crítico, a trinca cresce de forma instável até a ruptura.

Figura 2.21 - Representação dos três estágios da propagação da trinca de fadiga.

Fonte: traduzido de (18).

2.1.5 Abordagens ao problema da fadiga.

A abordagem clássica (*fail-safe*) ao projeto considerando a fadiga resume-se à caracterização da vida total em fadiga até a falha, geralmente utilizando os parâmetros da curva S-N. Assim, a quantidade de ciclos necessária para produzir a falha por fadiga em um corpo inicialmente intacto é

estimada sob condições controladas (por corpos de prova sob carregamento de amplitude constante), ou seja, os ciclos de fadiga que ocorrem para iniciar uma trinca dominante e propagá-la até a falha total. Como o processo de nucleação da trinca pode ocupar cerca de 90% da vida total do componente (16), pode-se afirmar que esta abordagem considera o projeto contra a nucleação de trincas de fadiga, sendo conhecida como abordagem de vida total. Esta abordagem ainda faz uso de técnicas específicas para a consideração dos efeitos da tensão média, concentradores de tensão, ambiente, tensões multiaxiais e amplitudes variáveis. Ainda os conceitos de fadiga de alto-ciclo (alta ciclagem com baixa tensão caracterizada por ensaios em controle de tensão) e fadiga de baixo-ciclo (alta tensão, caracterizada em ensaios em controle de deformação) são utilizados.

Existe também a abordagem ao projeto em fadiga, utilizando conceitos da mecânica da fratura, sob uma filosofia chamada de abordagem tolerante a defeitos (16). Neste caso assume-se que todos os componentes de engenharia já possuam falhas intrínsecas pré-existentes, cujo tamanho seria determinado através de técnicas de inspeção não-destrutivas, ou estimadas de uma outra forma. Se nenhuma trinca é detectada, o componente é sujeito a um teste inicial, com tensões maiores do que seriam encontradas durante o seu serviço. Se não são novamente detectadas trincas, ou não ocorreu falha catastrófica durante o teste inicial, o tamanho da maior trinca inicial (que não fora detectada) é então estimado com base na resolução do ensaio não-destrutivo utilizado. Assim, a vida em fadiga do componente é definida como a quantidade de ciclos de fadiga ou tempo necessário para propagar a trinca dominante, de seu tamanho inicial até algum tamanho crítico. A predição da propagação da trinca é realizada utilizando conceitos empíricos da mecânica da fratura (mais precisamente a mecânica da fratura linear elástica), aplicável sob condições de escoamento de pequena escala, ou seja, distante do campo plástico e de concentradores de tensão, onde a zona plástica na ponta da trinca é pequena quando comparada às dimensões do componente estudado, e sob condições de carregamento elástico.

Como resultado final, a abordagem tolerante a defeitos tende a ser mais conservativa do que de vida total.

2.1.6 Os conceitos Safe-Life e Fail-Safe.

Na abordagem *safe-life* em fadiga, o espectro de carregamento cíclico para a estrutura em serviço é primeiramente determinado. Assim, todos os componentes são testados em laboratório, sob as condições típicas espectro de serviço, e a vida em fadiga é estimada para o componente. Esta vida, modificada por fatores de segurança, resulta na *safe-life* do componente. Ao final de sua vida operacional, o componente é automaticamente retirado de serviço, mesmo que nenhuma falha tenha sido observada e o mesmo ainda possua uma considerável vida residual. Este procedimento, apesar de iniciado com testes práticos, apresenta uma natureza teórica, pois ainda precisa considerar vários fatores desconhecidos, tais como alterações nas condições de carregamento, erros no levantamento do espectro, dispersões nos resultados, variações nas propriedades dos materiais envolvidos.

Já o conceito *fail-safe* prega que, se um componente individual de uma grande estrutura falha, ainda haveria suficiente integridade estrutural para que os componentes remanescentes ainda pudessem operar a estrutura com segurança, até que a falha seja detectada. Esta abordagem exige inspeções periódicas mandatórias juntamente com técnicas de detecção de trincas adequadas.

Seja qual for a filosofia empregada, é sempre desejável que os componentes críticos sejam inspecionados periodicamente, eliminando assim possíveis consequências perigosas originadas de erros de projeto, principalmente com a abordagem *safe-life* (16).

2.1.7 Perturbações no carregamento com amplitude variável.

Apesar de este tipo de solicitação em fadiga apresentar variações em amplitude durante o tempo, a magnitude de tais oscilações no regime ainda são consideradas “bem comportadas”; ou seja: não são observadas diferenças significativas de amplitude entre duas ou mais regiões adjacentes do espectro, fazendo com que não existam zonas ou patamares claramente identificáveis. Esta situação ocorre quando não existem variações profundas na carga ou taxas de deformação aplicadas ao material. Já quando são aplicados

gradientes suficientemente severos, ocorrem as chamadas sobrecargas (*overloads*) ou subcargas (*underloads*) no regime de fadiga. Estas duas perturbações no carregamento originam importantes fenômenos no crescimento de trincas de fadiga, que serão discutidos mais adiante.

Vale ressaltar que uma clara e conclusiva definição sobre estes fenômenos de perturbações no regime de fadiga sob amplitude variável ainda não existe, como pode ser verificado a seguir, em que é apresentada uma breve revisão da literatura contendo os principais trabalhos sobre o assunto.

Um dos trabalhos seminais sobre as perturbações foi publicado por Schijve e De Rijk na Holanda em 1965 (49). Nele os pesquisadores compararam a vida em fadiga de componentes aeronáuticos, calculada pela Regra de Palmgren-Miner (amplitude constante) com a vida obtida em testes simulados utilizando o efeito do ciclo GTAC (*ground-to-air cycle*, ilustrado na

Figura 2.22), que representa as perturbações no espectro de amplitude constante causadas pelo pouso e aterrissagem da aeronave. Neste trabalho, um pico de tensão foi chamado de *upload*, enquanto uma redução foi denominada de *download*. Neste estudo os autores concluíram que a inclusão dos *downloads* provocou um aumento em cerca de 10% na taxa de crescimento de trinca, quando comparada com a taxa calculada através de Palmgren-Miner.

Figura 2.22 - Carregamento aplicado nos testes de propagação de trinca executados por Schijve e De Rijk em 1965.

Fonte: traduzido de (49).

Já na década de 70 juntamente com o trabalho de Elber⁹ (34), outros tantos foram publicados sobre o tema (50; 51; 52), onde pode ser vista pela primeira vez a utilização do termo *overload*. Contudo, neste momento, a definição mais usual (e utilizada nos trabalhos de Topper) é em resumo:

- *Overload* (sobrecarga) é a palavra utilizada para definir um pico no espectro de fadiga em amplitude variável, não havendo distinção entre tensões compressivas ou trativas. Assim, um pico positivo (tração) era denominado como sobrecarga trativa (*tensile overload*), enquanto um pico negativo (compressão) era chamado de sobrecarga compressiva (*compressive overload*), como pode ser visto na Figura 2.23.

Com o aumento na quantidade de trabalhos publicados principalmente no decorrer dos anos 80 e 90, ocorreram também as primeiras divergências nas definições básicas do fenômeno. Enquanto Topper e outros conduziam os principais trabalhos nos EUA (53; 54; 55), Schijve (18; 28) e colegas trabalhavam na Europa: o primeiro no ramo da engenharia civil e o outro na aeronáutica.

Assim sendo, Schijve (18) definiu sobrecarga da seguinte maneira:

- *Overload* (sobrecarga) é o termo utilizado para designar um pico de carga adicionado ao carregamento em amplitude constante, podendo ser positivo (tração) ou negativo (compressão). Um pico de amplitude negativa é comumente chamado de *underload* (subcarga).

Aqui ocorre pela primeira vez a citação do termo “subcarga” para descrever os picos de amplitude negativa no espectro de fadiga. Outro ponto importante na definição acima se encontra na utilização do termo “amplitude

⁹Apesar de este trabalho ser importante devido à introdução do conceito de fechamento de trinca, e analisar a fadiga em amplitude variável, Elber não considerou as perturbações no espectro de fadiga.

constante”. Schijve considera em seus trabalhos que, mesmo ocorrendo a aplicação de picos, um espectro de carregamento ainda é reconhecido como sendo em amplitude constante (49). Ao contrário de Topper que, para um carregamento muito semelhante, o classifica como fadiga sob amplitude variável (55).

Figura 2.23 - O efeito das sobre e subcargas na taxa de crescimento de trincas.

Fonte: traduzido de (18).

Em 1985, o pesquisador britânico N. A. Fleck (56) apresenta outros distintos conceitos sobre o fenômeno. Primeiramente, ele classifica o regime de fadiga como amplitude variável, assim como Topper já o havia feito antes. Contudo neste trabalho, Fleck introduz uma definição diferente e polêmica sobre as perturbações no regime de fadiga: ele defende a existência de subcargas mesmo quando o material está sujeito à tração. Assim sendo, o autor define a sobrecarga como sendo um pico positivo em um espectro de

fadiga. De forma análoga, a subcarga é um pico negativo, mesmo que esteja atuante apenas no campo de tração do ensaio, como ilustrado na Figura 2.24.

Fleck também utiliza o conceito de fator de aceleração, primeiramente proposto por McMillan e Pellox (57), onde:

$$\gamma = \frac{\text{taxa de crescimento da trinca medida por bloco}}{\text{taxa prevista por somatória linear (amplitude contante)}} \quad (4)$$

Figura 2.24 - Definições de sobre (overload) e subcarga (underload), conforme Fleck.

Fonte: traduzido de (56).

Outra mudança interessante pode ser vista no trabalho publicado por Topper e outros em 1990 (55), onde o autor altera as suas definições sobre as perturbações, anteriormente publicadas, utilizando o termo “subcarga” em detrimento do “sobrecargas compressivas”:

Assim, subcargas são definidas como grandes tensões de compressão, enquanto sobrecargas referem-se a grandes esforços de tração, sendo ambos consideravelmente maiores do que outros ciclos no histórico de carregamento e ocorrendo periodicamente ao longo do mesmo.

Topper utiliza certa redundância neste mesmo trabalho, citando sobrecargas trativas e subcargas compressivas em vários trechos do mesmo. Note a diferença de nomenclatura com referência ao trabalho anterior (53), onde são utilizados os termos sobrecargas trativas e/ou compressivas (sem a citação de subcarga) para representar o mesmo fenômeno. Vide Figura 2.25.

Figura 2.25 - Predições de vida em fadiga com sobrecargas compressivas, segundo Topper.

Fonte: traduzido de (55).

Em 2007, Zitounis e Irving (58) publicam um trabalho (vide Figura 2.26), fortemente influenciado pelas pesquisas anteriores de Topper, porém

apresentando definições de perturbações no regime de fadiga ainda mais divergentes: a conceituação da subcarga trativa (*tensile underload*), definida como um pico de amplitude negativa, no campo de tração do espectro.

Figura 2.26 - Definição de subcarga trativa conforme Zitounis.

Fonte: traduzido de (58).

As conceituações sobre o fenômeno relatado anteriormente, ganham certa convergência nos livros-textos mais recentes e usuais no estudo da fadiga. Suresh (16) segue uma abordagem semelhante à que foi publicada por Topper em 1985 (53), utilizando os termos sobrecarga trativa e compressiva. Stephens e Fatemi também seguem esta mesma tendência em seu livro (7), conforme pode ser visualizado na Figura 2.27.

Schijve em seu livro (18), utiliza os já abordados conceitos de sobre e subcargas, diferenciando as duas de acordo com o tipo de pico de carga – tração ou compressão.

Neste trabalho será utilizado o conceito de perturbações anteriormente apresentado por Topper (55):

- Subcargas são definidas como grandes tensões de compressão, enquanto sobre cargas referem-se a grandes esforços de tração, sendo ambos consideravelmente maiores do que outros ciclos no histórico de carregamento e ocorrendo periodicamente ao longo do mesmo.

Figura 2.27 - Histórico de carregamento. (a) sobrecarga (b) subcarga, conforme Stephens e Fatemi.

Fonte: traduzido de (7).

Na Tabela 2.2 estão de forma resumida, os conceitos expostos anteriormente.

Com isso em mente, abaixo são descritas as principais influências das sobrecargas sobre o crescimento de trinca:

- Sobrecargas retardam a taxa de crescimento de trincas principal;
- Subcargas aceleram a taxa de crescimento de trincas;
- Sobre e subcargas combinadas apresentam resultados misturados, dependendo basicamente da sequência de aplicação (interação entre cargas);
- Os efeitos (ou magnitude) do retardo ou aceleração dependem de fatores metalúrgicos do material, como propriedades de escoamento, sistemas de planos de escorregamento e microestrutura;
- O retardo é medido geralmente em termos de ciclos de atraso N_D , antes que as condições originais sejam restabelecidas;

- Além dos fatores metalúrgicos descritos acima, os efeitos do retardo dependem da taxa de sobre-carregamento (OLR – Overload Rate). Apesar de qualquer valor de sobrecarga apresentar efeitos (mesmo os extremamente baixos), efeitos mais visíveis são observados quando a OLR é superior a 50%;
- O retardo persiste até que a trinca tenha se propagado para fora da zona plástica afetada;
- Todos os fatores que influenciam a plasticidade na ponta da trinca afetam, direta ou indiretamente, os efeitos das sobrecargas (geometria do corpo de prova, temperatura, ambiente e propriedades do material).

Tabela 2.2 - Resumo contendo as diferentes conceituações sobre as perturbações no regime de fadiga.

Autor	Ano (Ref)	Resumo do conceito
Schijve e De Rijk	1965 (49)	Pico: <i>upload</i> Vale: <i>download</i> (mesmo em tração)
Topper et al	1972 (52)	Sobrecargas trativas e compressivas
Fleck	1985 (56)	Pico: sobrecarga Vale: subcarga (mesmo em tração)
Topper	1985 (53)	Tração: sobrecarga trativa Compressão: sobrecarga compressiva
Topper	1990 (55)	Tração: sobrecarga trativa Compressão: subcarga compressiva
Suresh	1998 (16)	Tração: sobrecarga trativa Compressão: sobrecarga compressiva
Stephens e Fatemi	2001 (7)	Tração: sobrecarga trativa Compressão: sobrecarga compressiva
Schijve	2003 (28)	Pico ou vale: Sobrecargas Amplitude negativa: subcarga
Zitouni e Irwing	2007 (58)	Vale: subcarga trativa (mesmo em tração)

Fonte: acervo pessoal.

Os mecanismos sugeridos para explicação do retardo são apresentados abaixo:

Arredondamento da ponta da trinca: envolve condições transientes principalmente em regiões à frente da trinca, sendo nesse caso resumidas às alterações geométricas na ponta da mesma. O arredondamento (*blunting*) afeta o crescimento da trinca, exigindo rearranjo geométrico da mesma, além de afetar todo o estado de tensões nas regiões vizinhas da ponta da trinca.

Deflexão ou ramificação da trinca (trincas secundárias): afeta o potencial mecânico para o crescimento da trinca, devido à sobreposição dos componentes do Modo II e Modo III sobre o Modo I. Devido à formação de caminhos tortuosos de trincas, esse mecanismo pode levar ao fechamento de trinca induzido por rugosidade (veja adiante).

Encruamento da ponta da trinca ou tensão residual à frente da ponta da trinca: afeta o início do escorregamento com o aumento da tensão atuante. Este fato retarda o crescimento de trincas se ele é ativado por escorregamento. Ainda, se a trinca estiver ocorrendo através de mecanismos frágeis (efeitos ambientais, por exemplo), o encruamento terá um efeito oposto.

Os três mecanismos citados acima têm a peculiaridade de agirem na região à frente da trinca. Já os dois restantes, citados logo a seguir, atuam atrás da trinca.

Fechamento induzido por plasticidade: existe muita discussão sobre este mecanismo, pois vários pesquisadores argumentam que plasticidade sempre abre a trinca, ao invés de fechá-la. Porém, recente investigação promovida por Riemelmoser e Pippan *apud* Sadananda (59) demonstrou que plasticidade na abertura da trinca pode levar a pequenas quantidades de fechamento. Como a plasticidade ocasionada por sobrecarga sempre ocorre em regiões à frente da ponta da trinca, o fechamento induzido por plasticidade não se manifesta até que a trinca se mova adiante, e sua abertura se posicione na região plastificada pela sobrecarga. Fechamento de trinca por plasticidade tem recebido maior atenção pelos pesquisadores devido às limitações da hipótese concebida sobre as tensões residuais. Mais detalhes na seção 2.1.9.

Fechamento induzido por rugosidade: a rugosidade não é causada pela plasticidade provocada pelas sobrecargas, mas sim pela tortuosidade da trinca.

Assim, materiais cujas trincas apresentam esse comportamento, demonstram maior retardo devido a esse mecanismo, porém a sua contribuição é considerada como um efeito adicional sobreposto sobre os outros processos de retardo. Um efeito secundário deste mecanismo é a redução do potencial mecânico para o crescimento de trincas. Recentes investigações demonstraram que enquanto o fechamento por plasticidade é de difícil ocorrência, o induzido por rugosidade é mais frequente, porém com uma contribuição muito pequena. Mais detalhes na seção 2.1.9.

Atualmente ainda existe certa discussão (60) sobre quais mecanismos provocam o retardo por sobrecargas, visto que as principais teorias para tanto apresentam contra-argumentos fortes, principalmente no que tange à influência sobre o ΔK , que o potencial mecânico para crescimento de trincas em fadiga.

2.1.8 Plasticidade na ponta da trinca.

Durante o processo de fadiga cíclica, a plasticidade local na ponta da trinca controla a taxa de crescimento da trinca (7). Esta zona plástica é criada devido à ductilidade do material. As dimensões desta zona podem ser estimadas considerando que dentro dela a tensão equivalente de von Mises exceda a tensão de escoamento em tensão. A dimensão da zona plástica na frente da trinca é proporcional ao quadrado do fator de intensificação de tensão. Esta é a Aproximação de Irwin (16), proposta nos anos 50.

A presença da zona plástica blinda o campo de tensões na frente da trinca, como ilustrado na ver Figura 2.28, agindo como uma perturbação que pode ser aproximada pelo campo gerado por uma trinca virtual de tamanho efetivo a_{ef} (17; 33), conforme Figura 2.29.

Figura 2.28 - Efeito de blindagem da zona plástica sobre o campo de tensão desenvolvido por uma trinca.

Fonte: (17).

Figura 2.29 - Campo efetivo gerado por uma trinca.

Fonte: (17).

Assim, de acordo com Irwin, o tamanho da zona plástica de deformação no plano da trinca, é dado por (sendo σ_e a tensão de escoamento do material) (33):

$$r_e \sim \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K}{\sigma_e} \right)^2, \text{ estado plano de deformações} \quad (5)$$

$$r_e \sim \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_e} \right)^2, \text{ estado plano de tensões} \quad (6)$$

Em 1960, Dugdale (7; 16) também elaborou um modelo para o cálculo das dimensões da zona plástica a frente de uma trinca de Modo I, em uma placa fina de sólido perfeitamente elasto-plástico em estado plano de tensões (

Figura 2.30). Neste modelo, as regiões plásticas se estendem além da trinca como estreitas faixas (altura quase nula), a uma distância r_p da ponta da mesma. Assim uma tensão interna atuando a uma distância r_p a frente da trinca, fecharia a mesma por um comprimento $2a$.

O raio da zona plástica no Modelo de Dugdale é dado por (33):

$$r_e \sim \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_1}{\sigma_e} \right)^2 \quad (7)$$

Figura 2.30 - Representação do experimento proposto por Dugdale para determinar do comprimento da zona plástica formado na borda de um corte em uma placa sujeita a uma tensão uniforme.

Fonte: (17; 33).

Apesar da abordagem de Irwin permitir o uso da MFEL para materiais com plasticidade limitada, a mesma é um tanto simplista e os resultados com a proposta de Dugdale são mais precisos.

2.1.9 O fenômeno de fechamento prematuro de trinca.

O conceito conhecido como fechamento prematuro de trinca (ou em inglês, *crack closure*) foi primeiramente introduzido por Wolf Elber em 1970 (34) e tornou-se um dos principais desenvolvimentos no estudo da ciência dos materiais da segunda metade do séc. XX, explicando as características do crescimento de trincas de fadiga em ligas de alumínio. Atualmente é aceito que este fenômeno apresenta contribuições significativas sobre os efeitos de retardo de crescimento de trincas em sobrecargas ou aceleração de trincas curtas, principalmente em regimes próximos ao liminar de fadiga. A crescente importância e reconhecimento do conceito de fechamento de trinca podem ser constatados pela evolução nos trabalhos publicados, de acordo com a Figura 2.31.

Figura 2.31 - Evolução de publicações sobre fechamento de trinca desde 1970.

Fonte: traduzido de (59).

2.1.10 Fechamento de trinca induzido por plasticidade

De acordo com as equações que regem o comportamento elástico do material durante o crescimento de trinca, a taxa de abertura de trinca cai a zero

se a carga trativa sobre o corpo de prova for removida. Assim, uma carga de compressão induziria uma abertura de trinca negativa, fato que é cientificamente contestável.

Elber (9; 18; 34; 61; 62) descobriu que uma trinca de fadiga sujeita a carga trativa pode estar fechada mesmo antes de a carga atingir o valor nulo, ou seja, a ponta da trinca já estaria fechada com valores de tensão ainda positivos. Em detalhes podemos considerar o crescimento de uma trinca de fadiga, no qual se observa que a zona plástica se move junto com a ponta da mesma, aumentando o seu tamanho proporcionalmente ao tamanho de trinca a . O mesmo ocorre para a zona plástica reversa, que é originada pelo estado sob compressão durante o descarregamento. Já a deformação fora da zona reversa é chamada monotônica, e causa o alongamento permanente na direção da carga. Como a zona plástica monotônica é muito maior do que a zona plástica reversa (a relação é de cerca de $\frac{1}{4}$, veja Figura 2.32), a deformação plástica fica concentrada no corpo da trinca, resultando no alongamento no eixo y supracitado.

Figura 2.32 - Formação das zonas plásticas durante o crescimento de trinca.

Fonte: (18).

Como resultado a trinca fechará (no mínimo parcialmente) durante o descarregamento e quando a carga atingir o valor nulo, tensões residuais compressivas estarão presentes no corpo da trinca: estas tensões são transmitidas através da trinca, devido ao contato das superfícies de fratura, resultantes da ação da deformação plástica.

2.1.11 Medida de fechamento e ΔK_{EF}

O mais popular método para medição de fechamento de trinca é o COD (*Crack Open Displacement*), sendo utilizado por Elber em seus trabalhos. Tal deslocamento é medido por extensometria, em pontos A e B próximos à trinca (vide Figura 2.33), sendo os seus valores parametrizados como função da tensão remota S , ou COD- S , proporcional à tensão e ao comprimento de trinca a .

Figura 2.33 - Medições de COD (Crack Open Displacement).

Fonte: (18).

Acima do ponto A, o comportamento do COD- S é linear e a sua inclinação é correspondente ao tamanho de trinca, o que indica que a mesma

está completamente aberta. Abaixo do ponto A, a inclinação é maior, similar ao comportamento de um corpo com trinca menor, indicando que a trinca está parcialmente fechada. A tensão no ponto A é a tensão de fechamento ou tensão de abertura.

Um ciclo completo COD (Figura 2.34) geralmente apresenta uma leve histerese e ocorre a abertura total da trinca no ponto A' e fechamento em A". A existência de um trecho não-linear, seguido por um linear é facilmente percebida, porém a exata determinação do mesmo com precisão é um tanto complexa. Métodos para aumentar a precisão das medições foram propostos por Paris. Aproximar os extensômetros da ponta da trinca também aumenta a precisão.

Figura 2.34 - Ciclo COD completo.

Fonte: (62).

Outros métodos de medição de COD foram propostos na literatura (62), com destaque para o método do potencial elétrico, extensometria na superfície da trinca e transmissão ultrassônica de ondas de superfície através da linha da trinca.

Durante o carregamento cíclico, o fechamento de trinca ocorre se $S_{\text{MIN}} < S_{\text{ab}}$ (Figura 2.35). A trinca estará parcialmente ou totalmente fechada quando

atinge S_{MIN} e estará totalmente aberta em S_{ab} , permanecendo neste estado até S_{MAX} . Após a remoção da carga, a trinca se mantém aberta até o processo de fechamento se iniciar na ponta da mesma, sendo S_{CL} (tensão de fechamento, ou o ponto A' da Figura 2.34) aproximadamente igual a S_{ab} (ponto A'' na Figura 2.34). Assim sendo, o fator de intensificação de tensão na ponta da trinca K, estará atuante desde que a ponta da trinca esteja aberta; caso contrário, esta concentração de tensão não ocorrerá mais na ponta. Se o gradiente de tensão ocorrer na ponta da trinca, a mesma irá crescer. Esta é a definição de tensão efetiva:

$$\Delta S_{\text{EF}} = S_{\text{MAX}} - S_{\text{ab}} \quad (8)$$

E do fator de intensificação efetiva, relacionado:

$$\Delta K_{\text{EF}} = \beta \Delta S_{\text{EF}} \sqrt{\pi a} \quad (9)$$

E da sua relação com o crescimento de trinca:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K_{\text{EF}}) \quad (10)$$

2.1.12 Fechamento parcial por asperezas

O fechamento parcial de trinca através da presença de asperezas apresenta grande importância em fadiga em alta temperatura e em ambientes corrosivos. Assim, devemos considerar a situação onde a presença de uma aspereza causa o contato das superfícies da trinca em uma distância finita, atrás da ponta da trinca, provocando um fechamento incompleto, dependente do tamanho e espaçamento das asperezas. Este comportamento também pode surgir através de sinuosidades no caminho da trinca, ou deflexão da mesma associada ao Modo II e III. Os mecanismos dominantes de fechamento de trinca são sumarizados na Figura 2.36.

Figura 2.35 - Abertura e fechamento de trinca durante ciclagem.

Fonte: (18).

As asperezas resultantes de oxidação ou corrosão são originadas através do *freting*, que acelera os processos de degradação superficial, expondo regiões sem proteção ao ambiente. Já a rugosidade superficial originada das sinuosidades pode se originar dos efeitos microestruturais como tamanho de grão, plano de escorregamento, etc.

Figura 2.36 - Mecanismos dominantes de fechamento de trinca.

Fonte: (17).

2.1.13 Outras contribuições para o fechamento

Além dos mecanismos de fechamento induzido por plasticidade, por óxidos e rugosidades, outros foram sugeridos ao longo do tempo (18; 62).

Entre eles podemos incluir fechamento induzido por transformações de fase e por viscosidade. Estes efeitos podem ser considerados como alterações no campo de tensão na ponta da trinca, devido às alterações ocorridas na região, do que como fenômenos de fechamento propriamente ditos. A intensidade destes efeitos depende da natureza das tensões internas e de sua reversibilidade com a carga cíclica.

Outro mecanismo interessante lida com a diferença entre as superfícies de fratura, que pode ocorrer em grau elevado em materiais com complexa estrutura. Também é citado (18) o mecanismo de bloqueio da ponta da trinca (*crack tip shielding*).

2.1.14 Efeito da espessura:

É conhecido que uma trinca de fadiga pode crescer, em um material de pouca espessura, totalmente sob estado plano de tensão. De forma análoga, em materiais espessos, este crescimento pode ocorrer sob estado plano de deformação.

Estados de deformação levam a menor plasticidade na ponta da trinca, contudo com maiores tensões locais, fato que acarreta o aumento da conversão de escorregamento cíclico pela extensão da trinca.

Como exposto anteriormente nas Equações 5 e 6, o tamanho da zona plástica é 4 vezes maior no estado plano (Figura 2.32), implicando em maior deformação no caminho da trinca e, conseqüentemente, maior fechamento. O aumento de espessura resulta em uma menor parte da ponta da trinca no estado plano de tensões e menor fechamento.

Enfim, o efeito da espessura no fechamento de trinca deve ser considerado de forma empírica, já que existe pouco material a respeito publicado, e o resultado ainda varia de acordo com o material utilizado.

2.1.15 Efeito da curvatura da trinca

Toda a discussão aqui realizada assume que a linha da trinca em uma placa é perpendicular à superfície do material. Contudo na realidade, as trincas

tendem a apresentar uma leve curvatura. Em casos extremos e bem particulares, a formação de grandes curvaturas (línguas) pode ser observada.

Pensando em fechamento de trinca, pode-se assumir que ocorre mais fechamento na superfície do que no interior do material, resultando em um maior ΔK_{EF} no interior. Assim, é possível que a mesma trinca não esteja totalmente fechada no interior do material (ocorrência de infiltrações plásticas de trincas). Também vale notar que a trinca pode ficar presa na superfície, devido à maior facilidade de deformação plástica neste local.

Deformações elásticas também são mais fáceis na superfície, de acordo com as simulações em Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method* – FEM) executadas por Newman Jr. (60).

O conceito de fechamento de trinca é de real importância para o completo entendimento do crescimento de trincas de fadiga, promovendo informações capazes de solucionar alguns fenômenos interessantes, como retardo e aceleração da taxa de crescimento de trincas na presença de sobre e subcargas (63; 64).

Vale ressaltar que o último trabalho de revisão (61) sobre fechamento de trinca foi publicado em 1994. Neste ínterim, a maioria das publicações ficou restrita a simulações FEM do fenômeno (60; 65; 66; 67) e variações em métodos alternativos de medições (68; 69; 70; 71; 72; 73; 74; 75; 76; 77). Além destes, existe ainda um trabalho de revisão sobre tal teoria do próprio autor (78).

2.2 Fadiga: ferramentas para análise

A predição de vida em componentes sujeitos às condições de serviço nas quais as cargas demonstram irregularidade e natureza aleatória é de vital importância, e pode ser alcançada de diferentes maneiras.

Uma abordagem bem conhecida e bastante utilizada é a análise no domínio do tempo, com a contagem de ciclos em históricos de carregamento, identificando os ciclos com diferentes amplitudes e valores médios. Assim, o dano total é avaliado por uma regra de dano cumulativo (por exemplo: Palmgren-Miner), como a somatória das contribuições do dano de um único ciclo. Este dano deve ser considerado como variável, pois é oriundo de um conjunto de ciclos contados, os quais são também um conjunto de variáveis (79).

Já na abordagem do domínio da frequência, os históricos de tensão irregulares são tratados como frutos de processos estocásticos estacionários de Gauss. Este processo é descrito no domínio da frequência em termos de sua densidade espectral de potência (PSD), a qual fornece um panorama da distribuição energética através das frequências (79; 80).

A seguir serão analisados os principais métodos em cada uma das duas abordagens citadas anteriormente.

2.2.1 Métodos para contagem de ciclos

Os métodos de contagem de ciclos de fadiga em amplitude variável são utilizados para reduzir o histórico de carregamento aleatório a uma série de eventos discretos, os quais podem ser analisados com ferramentas e dados oriundos dos carregamentos sob amplitude constante. Desta forma é possível comparar os efeitos dos históricos sobre as curvas obtidas. Os métodos de contagem são comumente utilizados em diversos modelos de predição de vida, seja sob a abordagem de dano localizado, ou como abordagem tolerante a danos (16). Durante os anos, um grande número de métodos de contagem foi desenvolvido, baseado nas metodologias de “tentativa e erro”. Apesar do

surgimento de forma empírica, alguns destes métodos, após testes com sucesso, representam importantes ferramentas auxiliares no desenvolvimento de componentes sujeitos a fadiga.

Um método de contagem precisa contar um ciclo contido desde o pico mais elevado até o vale mais baixo no histórico, e ainda precisa contar os outros ciclos intermediários de uma maneira que maximize as variações encontradas (7). Esta regra justifica que o dano seja função da magnitude do loop de histerese ou considera que as flutuações intermediárias do histórico de fadiga são menos importantes que as diferenças entre os picos e vales. Ainda, cada parte só pode ser contabilizada uma única vez. A seguir é apresentado um breve resumo dos métodos de contagem de ciclos de fadiga mais conhecidos e utilizados atualmente (7; 16; 33; 81). Tais métodos ainda são os recomendados pela norma ASTM 1049-97 (82).

2.2.2 Método *Rainflow*

Possivelmente o método mais conhecido, o Rainflow foi primeiramente proposto por Endo, Mitsunaga e Nakagawa em 1967 *apud* Sunders (83) e tem esse nome devido ao fato de, durante a chuva, o caminho de contagem dos ciclos de fadiga percorrer um trajeto no espectro de carregamento semelhante a gotas de água caindo de um telhado estilo pagode (7). Este método é aplicado da seguinte maneira:

1. Rearranjar o histórico de fadiga para começar ou com o maior pico ou com o menor vale;
2. A partir do princípio do histórico, desça para o próximo ciclo reverso. O fluxo deve continuar para baixo até que encontre ou ciclo de igual ou maior magnitude, ou outro fluxo;
3. Repita o processo para o próximo ciclo reverso;
4. Repita o processo para todas as amplitudes que não foram utilizadas nos passos anteriores.

Uma vantagem deste método ocorre quando ele é utilizado em conjunto com análise de deformação de um corpo entalhado, onde os loops fechados de

histerese podem ser também utilizados para realizar a contagem de ciclos. A Figura 2.37 exemplifica a utilização do método *Rainflow*.

Figura 2.37 - Ilustração exemplificando a contagem de ciclos de fadiga pelo método *Rainflow*.

Fonte: traduzido de (7).

2.2.3 Método de Pares de Tensão (*Range Pair*)

Neste método, os ciclos contendo baixas amplitudes são contabilizados primeiro, e seus pontos de inflexão (picos e vales) são eliminados, resultando em um histórico de carregamento conforme demonstrado na Figura 2.38.

Figura 2.38 - Método *Range-Pair*. (a) contando os ciclos menores e descartando os pontos de inflexão. (b) novamente executando a operação anterior. (c) Carregamento final equivalente.

Fonte: traduzido de (7).

2.2.4 Método de Cruzamento de Nível (*Level Crossing*)

Para a aplicação deste método, primeiramente deve-se escolher uma carga de referência no espectro de carregamento, que é então dividido por incrementos de carga. Temos uma contagem positiva toda vez que o espectro cruzar as linhas de incrementos acima da linha de referência. De maneira análoga, quando o espectro cruzar a região abaixo da referência, temos uma contagem negativa (7; 33; 82). Com estes resultados, monta-se uma tabela de cruzamentos. A partir desta tabela as possíveis faixas de tensão são montadas. Para obter os ciclos de fadiga que causam o maior dano, o maior ciclo possível é construído a partir da tabela, seguido do segundo maior ciclo possível, e

assim por diante, até que todos os cruzamentos sejam utilizados (vide Figura 2.39).

Figura 2.39 - Método *Level Crossing*. (a) histórico com a contagem de níveis. (b) construção dos ciclos de maior dano.

Fonte: traduzido de (82).

Os resultados obtidos podem ser aplicados em qualquer sequência desejada, significando que este método não considera a interação entre ciclos e sequência de aplicação no dano em fadiga, o que pode ser uma desvantagem dependendo do tipo de análise que se pretende executar (7).

2.2.5 Método de Contagem de Picos (*Peak Counting*)

Este método é muito semelhante ao *Level Crossing* com a diferença que, ao invés de contarmos os cruzamentos, aqui são contados os picos (sejam eles positivos ou negativos) com referência a um nível de carga médio, previamente escolhido (7; 82). A montagem dos ciclos de maior dano também

obedece ao mesmo procedimento do *Level Crossing* (vide Figura 2.40), inclusive apresentando a desvantagem de não considerar a sequência de carregamento na análise de dano.

Figura 2.40 - Método de Peak Counting. (a) histórico de carregamento com correspondentes picos e vales. (b) contagem de ciclos resultante.

Fonte: traduzido de (82).

Vale ressaltar que, apesar de amplamente utilizados atualmente, a contagem de ciclos não é a única ferramenta para avaliação de dano acumulado. Métodos estatísticos aplicados sobre os eventos observados em um histórico de carregamento já medido, podem se mostrar úteis (7).

2.2.6 Densidade Espectral de Potência

A Densidade Espectral de Potência (PSD: *Power Spectral Density*) é uma função que demonstra a potência de uma variável (energia) em função da frequência. Em outras palavras, exibe em quais frequências as variações são fortes (alta potência) e em quais são fracas (baixa potência) (80; 84; 85).

Assim, observar uma curva PSD é como analisar uma simples série distribuída no tempo, exceto que ao invés de tempo, as séries são distribuídas em função da frequência.

A Densidade Espectral de Potência de um sinal aleatório $x(t)$ é uma função real e positiva a qual descreve como a potência é distribuída ao longo do eixo da frequência. Ela é comumente definida através do Teorema de Wiener–Khintchine como a Transformada de Fourier da função de auto-correlação $R(\tau)$ (79; 84).

$$\theta_x(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (11)$$

Com:

$$R_x(\tau) = E[x(t)x(t + \tau)] \quad (12)$$

A principal vantagem da abordagem no domínio da frequência é a capacidade de produzir expressões analíticas pelas quais se pode estimar a distribuição dos ciclos e o dano de fadiga após um dado método de contagem de ciclos (79).

3 OBJETIVO DO PRESENTE TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo a investigação dos efeitos das perturbações no espectro de fadiga em amplitude variável, que ocorrem geralmente em testes de fadiga acelerados ou simulados. A hipótese defendida no presente trabalho atribui à existência destas perturbações a alteração substancial da vida em fadiga do componente submetido ao teste em laboratório, comparado com o mesmo veículo testado em campo. Tal perturbação é inserida nos testes simulados de maneira involuntária, trazendo assim resultados imprevisíveis.

Nesta investigação, a perturbação será reproduzida em bancada de testes através da completa remoção de carga do componente em questão, com o objetivo de simular uma interrupção abrupta no teste de fadiga.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Ensaaios

Tendo como objetivo a verificação dos efeitos das paradas no regime de fadiga sob amplitude variável, foi desenvolvido um ensaio mecânico no qual um componente automotivo é submetido a esforços cíclicos e à remoção periódica da carga. Para tanto, a seguinte metodologia de testes foi elaborada:

- **Passo 1a e 1b:** levantamento do espectro de carregamento atuante no veículo e no componente, em trajeto real (Pista de Testes – 1a) e durante teste no Simulador de Estradas (Hidropulsador – 1b). O componente foi instrumentado com extensômetros (unidirecionais tipo LY1 da Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt (86) com o intuito de coletar as grandezas de tensão atuantes sobre a peça;
- **Passo 2:** comparação entre os danos observados nos dois testes, com o objetivo de verificar a plausibilidade das cargas;
- **Passo 3:** levantamento da vida útil em fadiga do componente em testes de bancada, considerando a aplicação do espectro de carregamento descrito no passo 1 (utilizado no Simulador), em amostras suficientes para estabilizar o processo de falha. Tal etapa é realizada de maneira ininterrupta para cada amostra;
- **Passo 4:** levantamento da nova vida útil em fadiga utilizando-se os mesmos parâmetros descritos no Passo 3, porém considerando a aplicação das perturbações em testes de bancada, com vários “tempos de parada”: intervalo de tempo no qual o componente é submetido sem a ação de carga, durante o teste de fadiga.

Utilizando a metodologia descrita (vide Figura 4.1) espera-se obter um panorama das influências das paradas (ou perturbações) na vida em fadiga. Esta é uma informação de vital importância, principalmente quando se busca o refinamento dos testes e simulações que são executados em laboratórios hoje em dia. Ainda vale considerar que as pesquisas com fadiga em amplitude

variável se concentram, até o momento, em investigar o fenômeno de interações entre cargas e influência dos picos de tensão na vida útil do material.

Figura 4.1- Fluxograma representando os passos do trabalho, descritos em na seção 4.1.

Fonte: acervo pessoal.

4.2 O componente.

Para este estudo foi selecionado um componente automotivo simples: o suporte da buzina principal, cuja ilustração e descritivo técnico podem ser observados na Figura 4.2.

O suporte da buzina principal tem duas principais funções. A primeira é estrutural: ele atua como um suporte propriamente dito, posicionando a buzina de maneira adequada na carroçaria veículo. A outra função é acústica: as dimensões do suporte possibilitam que o mesmo atue como uma caixa de reverberação, auxiliando no desempenho sonoro da buzina.

Figura 4.2 - Visão isométrica do suporte da buzina.

Fonte: acervo pessoal.

O ponto crucial no desenvolvimento do suporte da buzina é que, como a peça possui as duas funções expostas acima, o correto compromisso entre as estas propriedades (sonora vs. resistência) se torna o fator limitante no projeto da mesma. Ou seja: é necessário aliar a capacidade de suportar o peso próprio da buzina durante a utilização do veículo e, ainda, apresentar a função sonora desejada, não só subjetivamente, mas também numericamente de acordo com a NBR 5483:2006 (87), norma que regulamenta o funcionamento e homologação deste tipo de equipamento sonoro. É na homologação do produto que se encontra outra peculiaridade. Para atender a legislação vigente, a NBR 5483:2006 (87) exige que a buzina atinja certos objetivos sonoros, entre eles a execução de sons dentro de certa faixa, medidos a uma distância controlada, conforme exposto a seguir (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figura 4.3 e Figura 4.4).

Tabela 4.1 - Valores de homologação para níveis sonoros de buzina.

Norma	Valor mínimo	Valor máximo
ECE R28	93,0 dB(A)	112,0 dB(A)
CONTRAN 035/98	93,0 dB(A)	104,0 dB(A)

Fonte: (87).

Figura 4.3 - Posicionamento do microfone e do veículo. Vista plana.

Fonte: (87).

É necessário aqui ressaltar que o posicionamento da buzina e o desenho da cobertura do para-choque dianteiro interferem diretamente na magnitude do sinal sonoro que chega até o microfone. Assim sendo, uma buzina que fora homologada para o veículo A, pode não ser aprovada no veículo B, sem que ocorram alterações no suporte ou no próprio componente, acarretando custos ao projeto. De forma análoga, quando ocorre o facelift¹⁰ de um modelo, com alterações na parte frontal, o desempenho da buzina é novamente afetado. Isto é verdade mesmo quando as mudanças do design entre os veículos A e B são sutis. Com o objetivo de diminuir os custos desnecessários envolvidos, geralmente opta-se por alterar o suporte, sendo que a característica sonora do mesmo seja a dominante, e a propriedade estrutural deve ser refinada através de ensaios mecânicos.

¹⁰Entende-se *facelift* como uma leve alteração visual do veículo, geralmente com a inclusão de novos faróis, lanternas e coberturas de pára-choques.

Figura 4.4 - Posicionamento do microfone e do veículo. Vista isométrica.

Fonte: (87).

.O suporte é confeccionado em aço carbono DC01 – Q/B qb 403-2003, com espessura de 2,53 mm, laminado a frio, equivalente a St12 de acordo com a norma DIN1623-(1)-1983 (88). Pintado na cor preta fosca x600 ou x630 ou r670 ou r630. As principais características mecânicas podem ser visualizadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Principais características mecânicas especificadas para o aço DC01.

Característica	Valores
Resistência a tração	270 – 410 N/mm ² (89)
Dureza	85 – 130 HV (90)

Fonte: (89; 90).

Especificações utilizadas para testar chapas em geral:

- Ensaio de tração conforme EN 10002-1;
- Corpo de prova: L0 = 80 mm, largura b = 20 mm; segundo EN 10002-1, Anexo B. Comprimento de ensaio 120 mm;

4.3 Os meios

4.3.1 A Pista de Testes

A Pista de Testes é formada por um conjunto de vias com diversos tipos de pavimentos (asfalto, terra, cascalho, paralelepípedos) e trechos com topografias definidas, como lombadas, valetas, buracos e canais de água. Tal percurso, juntamente com o carregamento realizado no veículo e a quilometragem de acionamento, conseguem reproduzir as cargas sob as quais o veículo estaria sujeito, sob condições de utilização extrema em território brasileiro. A aplicação de tais cargas provoca o acúmulo de dano na estrutura e componentes do automóvel de forma acelerada, fazendo com que níveis de dano que seriam observados somente após dezenas de milhares de quilômetros rodados, sejam alcançados após poucas semanas de teste. A integridade dos testes é mantida através de procedimentos de rodagem e inspeções, como velocidades e carregamentos específicos para cada trecho.

Tal pista, com os procedimentos de teste pertinentes, foi utilizada em pesquisas anteriores do autor (91; 92).

4.3.2 O Simulador de estradas (Hidropulsador).

O sistema de simulação de estradas consiste em um conjunto de atuadores e sensores que reproduzem os esforços aplicados ao veículo durante a sua utilização. O modelo MTS 329 apresenta seis graus de liberdade, fornecendo o controle dos esforços verticais, laterais, longitudinais, torques de frenagem e aceleração e forças de esterçamento.

Este simulador pode ser utilizado nas seguintes configurações, dependendo do tipo de teste e resultado desejados:

- Carroçaria flutuante (24 canais): este teste de veículo completo fornece a mais precisa distribuição de tensões na estrutura do veículo para evento sem manobras (frenagem e esterçamento). Como a carroçaria flutua, todas as cargas são resultantes da inércia;

- Carroçaria fixa (12 canais): este teste de eixo único reproduz as cargas na suspensão do veículo, permitindo inclusive a simulação de manobras e estradas acidentadas;
- Carroçaria semi-flutuante (12+1 canais): nesta configuração são testadas a suspensão e alguma outra parte do veículo. Um eixo é fixado no chão e o restante da carroçaria tem a liberdade de flutuar, com a possibilidade de simulação de frenagem;
- Restrição semi-ativa longitudinal: configuração para teste de veículo completo, no qual se pode simular tráfego por pisos acidentados, bem como frenagens. A carroçaria é flutuante, mas é restrita longitudinalmente durante as frenagens.

A Figura 4.5 apresenta uma configuração típica do simulador com um veículo montado: carroçaria flutuante. Já a Tabela 4.3 descreve as principais especificações técnicas do modelo de simulador em questão.

Figura 4.5 - Veículo no Simulador MTS 329.

Fonte: (93).

Tabela 4.3 - Características técnicas do Simulador MTS 329

	Vertical	Longt.	Lateral	Esterçamento	Frenagem	Cambagem
Freq. Max.	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Operação						
Força/momento	63 kN	22 kN	20 kN	4 kN.m	4 kN.m	8,5 kN.m
Deslocamento	380 mm	392 mm	258 mm	16°	32°	16°

Fonte: Adaptado de (93).

4.3.3 As Rodas de Medição

Para a coleta dos sinais oriundos das excitações que atuam sobre o veículo, seja na Pista ou no Simulador, foi utilizado um dispositivo de aquisição chamado comumente de Rodas de Medição. Neste trabalho foi empregado o modelo Kistler RoaDyn® S625 (94) com sua respectiva unidade de telemetria. Tal dispositivo pode ser visto na Figura 4.6

Figura 4.6 - Roda de Medição Kistler RoaDyn® S625.

Fonte: (94)

4.3.4 A bancada de testes.

Após a coleta dos espectros de carregamento atuantes no suporte da buzina, durante rodagem no campo de provas e no simulador, e comparação

dos resultados, o sinal correspondente ao simulador foi transferido para uma bancada de testes (Figura 4.7, Figura 4.8, Figura 4.9 e Figura 4.10), constituída por uma unidade controladora Spectra® ST7000 (95) (bastidor e controladora), uma célula de carga HBM® (86) de 50 kN e um pulsador Schenk® Modelo PVQ de 60 kN de capacidade. Ainda, para permitir a correta sujeição do componente à bancada, foi confeccionada uma haste prolongadora de perfil sextavado de 1/2" e com comprimento de 300 mm, feita em aço SAE1020.

As especificações técnicas da bancada estão descritas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Características da unidade controladora ST7000.

Características Técnicas - Rack		
Tensão de entrada (seleção automática)	12V / 24V -10+25%	VCC
Corrente de entrada nominal máxima	13,0 / 7,0	A
Fusível de proteção	15.0	A
Potência máxima	125	W
Número máximo de módulos amplificadores	8	
Número de saídas analógicas simultaneamente disponíveis por módulo	4	
Dimensão dos módulos (Padrão IMS)	232 x 156	mm
Faixa de temperatura		
Operação	-10 .. +50	° C
Armazenamento	-10 .. +60	° C
Dimensão do rack (L x A x P)	482 x 181 x 370	mm
Peso (2)	8	kg
Características Técnicas - Controladora ST7100		
Painel frontal		
Display	Cristal líquido gráfico c/ backlight	
Teclado	Policarbonato 18 teclas	
Potenciômetro digital	24 pulsos / volta	
Conversor analógico-digital		
Faixa de entrada	±10	V
Resolução de conversão	12	bits
Taxa de amostragem máxima	180.000	Am / Seg
Memória de armazenamento de sinais temporais (taxa de amostr. < 3KHz)	250.000 .. 4.000.000	Amostras
Número máximo de canais endereçáveis	128	canais / rack
Número máximo de racks em cadeia	4	racks
Trigger externo para início de conversão	digital níveis TTL (borda +ou-)	
Interface com microcomputador PC		
Serial	Padrão RS-232	
Taxa de transferência	19,2	K Baud
Paralela	Padrão EPP	
Taxa de transferência	150.000	Bytes / seg

Fonte: (95).

Figura 4.7 - Visão geral da bancada de testes.

Fonte: acervo pessoal.

Figura 4.8 - Detalhe da fixação, célula de carga e haste.

Fonte: acervo pessoal.

Figura 4.9 - Detalhe da fixação da amostra.

Fonte: acervo pessoal.

Figura 4.10 - Unidade controladora Spectra® ST7000.

Fonte: acervo pessoal.

5 RESULTADOS

5.1 Peças ensaiadas em veículo.

Dois ensaios utilizando veículos completos foram realizados, com foco no suporte da buzina. As rupturas em ambos os testes foram observadas conforme figuras e tabela a seguir. A amostra #1 foi testada em Pista de Testes, enquanto a amostra #2 no Simulador, conforme o Passo 1 da metodologia do ensaio, descrita em 4.1. Falha semelhante à ocorrida nos testes aqui descritos pode ser visualizada na Figura 5.1. Devido aos ensaios mecânicos e de imagem, não foi possível realizar fotografias satisfatórias das peças testadas nos veículos, contudo, em ambos os casos a fratura ocorreu na região próxima ao furo de fixação da porca. Já a duração (vida) das amostras está descrita na Tabela 5.1.

Figura 5.1 - Ruptura do suporte da buzina. Foto abaixo é referente a uma amostra testada em bancada, porém a localização da falha é igual.

Fonte: acervo pessoal.

Tabela 5.1 - Resumo das falhas observadas nos testes com veículo.

Peça	Observação da falha
#1 (Pista de Testes)	18% do teste
#2 (Simulador)	11% do teste

Fonte: acervo pessoal.

Estes resultados foram, evidentemente, obtidos com uma única amostra em cada teste, assim a diferença pode ser justificada simplesmente pela natureza estocástica das falhas em fadiga. Observação dos componentes testados indica que a fratura ocorreu na mesma região (próxima à solda entre a porca e a chapa)

Figura 5.2 - Região aproximada de ocorrência da ruptura no suporte.

Fonte: acervo pessoal.

5.1.1 Análise macrográfica.

As superfícies de fratura de ambas as amostras foram analisadas utilizando os métodos de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As Figura 5.3 e Figura 5.4 mostram as superfícies de fratura da amostra #1, onde a seta indica o ponto de nucleação da trinca de fadiga.

Na Figura 5.5 pode-se notar o ponto de início da falha por fadiga (nucleação da trinca), indicada por uma seta no canto esquerdo inferior. Já na

Figura 5.6 e Figura 5.7 são mostradas ampliações da região de nucleação. Ambas referem-se à amostra #2.

Figura 5.3 - Superfície de fratura da amostra #1. Estereomicroscópio. A seta indica o ponto de nucleação da trinca de fadiga.

Fonte: acervo pessoal.

Figura 5.4 - Superfície de fratura da amostra #1 com aumento. Estereomicroscópio. A seta indica o ponto de nucleação da trinca de fadiga.

Fonte: acervo pessoal.

Figura 5.5 - Superfície de fratura da amostra #2. MEV. Elétrons secundários. A seta indica o ponto de nucleação da trinca de fadiga.

Fonte: acervo pessoal.

Figura 5.6 - Superfície de fratura da amostra #2. Estereomicroscópio. A seta indica o ponto de nucleação da trinca de fadiga.

Fonte: acervo pessoal.

Figura 5.7 - Superfície de fratura da amostra #2. Estereomicroscópio. A seta indica o ponto de nucleação da trinca de fadiga.

Fonte: acervo pessoal.

Devido à leve corrosão presente nas superfícies de fratura da amostra #1, não foi possível a realização da análise visual por MEV. Tal corrosão superficial ocorreu, porque o veículo trafega em trechos sob a ação de névoa salina na Pista de Testes. Analisando visualmente os modos de falha ocorridos durante os testes em veículo completo pode-se notar, entretanto, que as fraturas são macroscopicamente idênticas, tanto com referência à localização da fratura (na região do furo de fixação da porca) quanto ao local de nucleação da trinca, conforme exposto nas Figura 5.4 e

Figura 5.6.

5.1.2 Análises mecânicas

Foram realizados ensaios de tração e de dureza nos componentes submetidos aos testes com veículos completos, com o objetivo de identificar possíveis divergências nas propriedades mecânicas do material, influenciando

assim diretamente a vida em fadiga dos mesmos. Os resultados estão descritos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios de tração no componente ensaiado.

Peça	Tensão de ruptura (89)	Valores encontrados
#1 (Simulador)	240 – 410 N/mm ²	295 N/mm ²
#2 (Pista de Testes)	240 – 410 N/mm ²	333 N/mm ²

Fonte: acervo pessoal.

Os valores do ensaio de tração aplicam-se às amostras transversais e referem-se ao corte transversal das amostras sem revestimento de zinco. Já as conversões para os valores de dureza (Tabela 5.3) foram realizados conforme DIN EN ISO 18265.

Tabela 5.3 - Valores de dureza Vickers encontrados.

Peça	Dureza equivalente (90)	Valores encontrados
#1 (Simulador)	85 a 130 HV	104 HV e 101 HV
#2 (Pista de Testes)	85 a 130 HV	107 HV e 108 HV

Fonte: acervo pessoal.

Ambos os parâmetros (tensão de ruptura e dureza) estão de acordo com as especificações para o material em questão. Tal observação sugere que tanto o material quanto os modos de falha são os mesmos e os mecanismos de falhas são equivalentes. A falha ocorrida na Pista de Testes foi observada em um nível de dano acumulado maior do que a falha observada no Simulador.

5.1.3 Análises de dano acumulado

Uma possível razão para a diferença observadas nos testes poderia ser ainda justificada por alterações significativas no espectro de carregamento aplicado nos dois testes.

Os espectros de carregamento coletados (tanto na suspensão do veículo quanto no suporte da buzina) durante os dois testes foram analisados, utilizando-se as metodologias de contagem de ciclos e cálculo de acúmulo de dano mais comuns existentes hoje em pesquisa de fadiga (18), tais como o método de Contagem de Níveis (*Level Counting* - LC) e Pares de Tensão (*Range Pair* - RC) (82). Os resultados podem ser visualizados nas figuras a seguir (Figura 5.8, Figura 5.9, Figura 5.11 e Figura 5.12). Em todas as imagens a linha preta representa a contagem obtida durante a rodagem em pista. Já a contagem em teste no simulador é representada pela linha vermelha.

Os espectros obtidos para ambos os testes são equivalentes, com pequenas diferenças em ciclos de alta amplitude. A análise de Densidade Espectral de Potência (PSD) (80) foi também executada em todos os sinais e o resultado (Figura 5.10 e Figura 5.13) novamente mostra que os espectros são semelhantes, apresentando picos próximos de 20, 85 e 175 Hz, com os ciclos mais energéticos concentrados nas frequências mais baixas.

Figura 5.8 - Comparação entre os cargas atuantes na suspensão do veículo. Método de contagem de ciclos: Cruzamento de Nível (*Level Crossing*).

Fonte: acervo pessoal.

Figura 5.9 - Comparação entre os cargas atuantes na suspensão do veículo. Método de contagem de ciclos: Método pares de tensão (*Range Pair*).

Fonte: acervo pessoal.

Figura 5.10: Densidade Espectral de Potência (PSD) para os carregamentos atuantes na suspensão do veículo.

Fonte: acervo pessoal.

Figura 5.11 - Comparação entre os cargas atuantes no suporte da buzina. Método de contagem de ciclos: Cruzamento de Nível (*Level Crossing*).

Fonte: acervo pessoal.

Figura 5.12 - Comparação entre os cargas atuantes no suporte da buzina. Método de contagem de ciclos: Método pares de tensão (*Range Pair*).

Fonte: acervo pessoal.

Figura 5.13 - Densidade Espectral de Potência (PSD) para os carregamentos atuantes no suporte da buzina. A interrupção da leitura aos 35 Hz deve-se à falha na instrumentação.

Na Figura 5.14 e Figura 5.15 pode-se observar a representação gráfica dos níveis de dano acumulado demonstrados nos gráficos anteriores, calculados pela Regra de Palmgreen-Miner. Tais níveis são novamente muito similares.

Figura 5.14 - Representação do dano acumulado total em ambos os testes. Espectro obtido pelas Rodas de medição e atuante na suspensão do veículo.

Fonte: acervo pessoal.

Figura 5.15 - Representação do dano acumulado total em ambos os testes. Espectro obtido por extensiometria e atuante no suporte da buzina.

Fonte: acervo pessoal.

Comparando-se as medições realizadas na suspensão do veículo com as isoladas no componente, pode observar que as diferenças entre a Pista de Teste e o Simulador são ainda mais sutis, indicando que o espectro aplicado no componente pode ser considerado como indistinguível. Enquanto as falhas no componente foram observadas em 18% do teste na Pista e 11% no Simulador (38% de diferença), o dano acumulado total apresenta uma diferença relativa de cerca de 10% entre os dois testes.

Com base nas análises anteriormente descritas, pode-se concluir que, para o componente em questão, o nível de dano acumulado fornecido pelo teste do Simulador é compatível ao nível observado na Pista de Testes. Ambos os testes possuem uma nítida correlação.

Vale ressaltar que, alterações sutis no espectro de carregamento em automóveis de passeio submetidos a testes de fadiga acelerados, costumam resultar em alterações abruptas de dano acumulado, principalmente em regiões de ancoragem e fixação dos componentes da suspensão. Tal resultado pode ser conferido em publicações prévias do autor (91; 92; 96)

5.2 Peças ensaiadas em bancada

Baseado nas observações descritas na seção anterior é possível concluir que o teste na Pista de Teste leva a uma vida em fadiga maior para o componente em estudo, quando comparada com os resultados obtidos em Simulador, mesmo considerando os espectros de carregamento similares em ambos os casos. Como explanado anteriormente, a maior diferença entre os dois tipos de teste (real e simulado) reside no fato que a rodagem em Pista de Teste é periodicamente interrompida com maior frequência. Existem, todavia, outras variáveis atuando na rodagem real que poderiam influenciar no resultado e explicar a diferença nas vidas em fadiga (como o clima). O teste em bancada permite investigar o efeito das pausas periódicas sobre a durabilidade do componente, isolando algumas variáveis através do ambiente controlado de um laboratório.

Com o objetivo de permitir a aplicação das paradas durante o teste de fadiga de forma controlada, os espectros de carregamentos obtidos nos testes com veículo completo foram analisados na Seção 5.1.3 e considerados como similares. Para a aplicação em bancada, foi escolhido o espectro de carregamento coletado no teste em Simulador, principalmente devido ao fato de o mesmo já possuir uma duração e complexidades menores, pois é oriundo de uma rodagem simulada.

Os teste em bancadas foram realizados em 4 etapas distintas:

1. Testes sem paradas (Passo 3);
2. Testes com paradas de 5 horas, 10 horas e 45 horas (Passo 4).

Para cada etapa 15 amostras foram testadas, com exceção da etapa com parada de 45 horas, na qual foram testadas 3 amostras. Através de tratamento estatístico, no qual as ciclagens mais afastadas da média foram descartadas, 6 amostras de cada etapa foram selecionadas para o cálculo de vida útil média (exceto para a etapa de parada de 45h novamente).

Após a definição da vida útil sem paradas, os testes subsequentes tiveram a aplicação de suas respectivas paradas a cada intervalo de 100.000 ciclos.

O resumo do cálculo para cada etapa pode ser vista nas tabelas (Tabela 5.4, Tabela 5.5, Tabela 5.6, Tabela 5.7) a seguir. Representação gráfica dos resultados pode ser visualizada na Figura 5.16. O desvio padrão correspondente para cada situação pode ser visualizado na Tabela 5.8.

Tabela 5.4 - Amostras testadas sem paradas.

Amostra	No. ciclos
1	164269
2	146685
3	125321
4	209460
5	148807
6	231410
Média	170992

Fonte: acervo pessoal.

Tabela 5.5 - Amostras testadas com paradas de 5 horas.

Amostra	No. ciclos
1	310025
2	200000
3	224154
4	235910
5	235584
6	230933
Média	239434

Fonte: acervo pessoal.

Tabela 5.6 - Amostras testadas com paradas de 10 horas.

Amostra	No. ciclos
1	228538
2	306005
3	247888
4	190593
5	194436
6	277628
Média	240848

Fonte: acervo pessoal.

Tabela 5.7 - Amostras testadas com paradas de 45 horas.

Amostra	No. ciclos
1	999845
2	1088390
3	1042995
Média	1043743

Fonte: acervo pessoal.

Figura 5.16 - Resultados dos testes em bancada.

Fonte: acervo pessoal.

Tabela 5.8 - Resultados dos testes de bancada, vida média em fadiga e desvios padrão.

Condição	Vida média (ciclos)	Desvio padrão (ciclos)
<i>Baseline</i>	170.922	40.851
Pausa 5h	239.434	37.071
Pausa 10h	240.848	45.780
Pausa 45h	1.043.743	44.277

Fonte: acervo pessoal.

6 DISCUSSÃO

6.1 Considerações gerais

Pode-se observar que a introdução de pausa periódicas com a duração de 5 ou 10 horas leva a significativo aumento na vida em fadiga do componente, em comparação com o teste realizado sem interrupções. A comparação entre os testes com pausas de 5 e 10 horas não trás conclusões satisfatórias. O resultado com pausa de 10 horas demonstra uma vida em fadiga levemente superior ao teste com pausa de 5 horas, mas a diferença não é estatisticamente relevante. Contudo, os testes realizados com pausa de 45 horas de duração claramente revela uma vida em fadiga do componente mais elevada. Os resultados dos testes de bancada suporta a validade da hipótese em questão: as pausas observadas durante os testes no Campo de Provas podem afetar a durabilidade de um componente, aumenta a sua vida em fadiga.

A origem deste fenômeno ainda é incerta. A interrupção de um teste de fadiga (seja por manutenção do veículo em rodagem, ou pausa para inspeção em testes de bancada) resulta em um transiente de cargas inerciais que não estão presentes no teste contínuo. Estas cargas inercias podem ser maiores que as cargas típicas do espectro, resultando em uma sobrecarga (*overload*) que poderia justificar o atraso na propagação de trincas de fadiga. Contudo, é difícil compreender como este efeito seria dependente do tempo de duração da pausa a que o teste esteja submetido.

Outra possível origem para este efeito de retardo seria a ação das variáveis ambientais. É fato que as amostras submetidas às pausas periódicas sofreram um maior ataque ambiental, quando comparadas com amostras testadas de forma contínua. Contudo, ataques ambientais tendem a reduzir a vida em fadiga, atuando de forma contrária ao fenômeno aqui observado. Ainda, conforme demonstrado pelas fotografias, a corrosão superficial influenciaria a amostra testada em Campo de Provas, e não somente algumas amostras do teste em bancada.

Em outras palavras, a causa real para este fenômeno deve ser profundamente investigada. Os resultados atuais claramente apontam, contudo, que o fenômeno existe, e que o mesmo pode justificar as diferenças nas durabilidades observadas entre os testes em Pista de Testes e ensaios de laboratório. O efeito deve ser investigado em uma maneira mais fundamental (em laboratório com corpos-de-prova normalizados com o objetivo de diminuir a influência de variáveis incontrolláveis).

Algumas questões surgem através do presente resultado:

- Seria este efeito limitado a fadiga em aços-carbono, ou também se aplicaria em outros materiais (metálicos e não-metálicos)?
- A importância da espessura do componente testado teria vital importância nos resultados (restrição de campo plástico)?

As respostas para estas e outras questões requerem um programa exclusivo de pesquisa, o qual está fora do escopo deste trabalho, principalmente devido à quantidade de tempo e recursos necessários para a investigação de todos os parâmetros envolvidos de forma isolada, e em laboratório. Tais questionamentos são ainda mais importantes hoje em dia, devido ao fato que pausas periódicas são utilizadas em testes de fadiga de ultra-alto ciclo (12; 13; 14; 15). Com a ação das elevadas frequências (20 kHz) e dependendo da carga aplicada e do material testado, a geração de calor observada nos componentes pode chegar a níveis realmente altos. Para evitar este efeito, executa-se o carregamento de maneira pulsada com interrupções periódicas, com pausas entre 50 e 1000 ms de duração. Apesar de esta técnica apresentar atualmente resultados condizentes com os testes no campo convencional de frequência, a influência destas pausas para resfriamento não foram investigadas. A Figura 6.1 mostra como essas interrupções são aplicadas ao espectro ultrassônico.

Figura 6.1 - Sequência de carregamento convencional adaptada para teste untrassônico. A aplicação de pausas pode ser visualizada na figura da direita.

Fonte: traduzido de (14).

6.2 Possíveis mecanismos atuantes

Como já citado anteriormente, a investigação para definir a causa raiz do fenômeno aqui exposto mostrou-se complexa e necessita de pesquisa adicional. Porém, é de toda valia citar possíveis mecanismos que poderiam explicar o comportamento aqui verificado.

6.2.1 Zona plástica na frente da trinca e fechamento por plasticidade:

A presença da zona plástica na frente da trinca, originada durante o processo de fadiga (ver seção 2.1.8), controla a taxa de crescimento da trinca através das tensões residuais compressivas na ponta da mesma.

A aplicação de uma sobrecarga provoca um aumento na extensão do campo de tensões residuais. Geralmente é aceito que esse aumento “fecha” a ponta da trinca (que está sujeita a um menor ΔK após a sobrecarga (97)) causando o retardo na taxa crescimento da falha. Este retardo persiste até que a ponta da trinca ultrapasse o campo de tensões (78; 96). O retardo ocorre principalmente quando a trinca avança através da zona plástica, que também sofreu os efeitos da sobrecarga (fechamento por plasticidade).

Resta elucidar no caso aqui estudado, se a perturbação no espectro de carregamento aplicada pode gerar tal fenômeno. Ou seja, como se comporta a zona plástica na frente da trinca (e sua eventual interação com a movimentação da trinca) durante e após a aplicação da perturbação, que aqui se configura como a remoção da carga por um período definido de tempo.

A influência da fase de transição entre os regimes na zona plástica também seria de interesse: como se comporta a região à frente a trinca logo após a introdução da perturbação, e logo imediatamente após a retomada do teste.

Lembrando que a atuação da zona plástica (encruamento) ocorre à frente da trinca, e o fechamento induzido por plasticidade atua atrás da trinca de fadiga, conforme exposto na seção 2.1.7. Apesar de os dois mecanismos apresentarem um funcionamento semelhante, a distinção citada anteriormente é bem clara (97).

6.2.2 Fechamento prematuro da trinca por rugosidade superficial ou óxidos:

Estes mecanismos geométricos de fechamento de trinca podem desempenhar um papel importante no fenômeno apresentado neste trabalho, ainda mais considerando que possuem ocorrência mais comum que o fechamento por plasticidade (vide seção 2.1.7). Como estes mecanismos agem através das irregularidades superficiais da trinca (sinuosidades) e deposição de material oriundo principalmente de atrito entre as superfícies da trinca, as pausas nos testes de fadiga podem potencializar fenômenos deste tipo. Com a retomada do ensaio, o caminho da trinca pode sofrer pequenos deslocamentos, alterando o seu caminho inicial e provocando a geração de irregularidades e fechamento parcial da trinca.

Os fragmentos gerados pelo contato entre as superfícies da trinca que ocorrem durante a aplicação do carregamento cíclico, podem durante as pausas se depositarem em locais estratégicos da trinca, fazendo com que a mesma comporte-se de forma parcialmente fechada, ou como se fosse de menor tamanho. Novamente aqui, o estudo durante as fases de transição de regime podem trazer conclusões interessantes.

Ainda, é conhecido que alterações na geometria da trinca, envolvendo arredondamento ou deflexão da ponta, influenciam o fator de intensificação de tensões nas proximidades da ponta da trinca, auxiliando assim a ocorrência do retardo.

6.2.3 Ativação do mecanismo limiar de fadiga no regime:

Se após sobrecarga ou outra perturbação no espectro de carregamento, o ΔK atuante for reduzido (devido à atuação de um ou mais dos mecanismos citados anteriormente) a um valor típico da região próxima ao limiar (*near threshold*), os mecanismos exclusivos deste regime, como a fratura em estágio I e fechamento de trinca induzido por óxidos, podem ser ativados após a aplicação de sobrecargas. Estas alterações resultam em maior retardo no crescimento de trincas (97).

6.3 Sugestões para trabalhos futuros

Dentre as sugestões de trabalhos futuros, podem ser enumerados os seguintes tópicos, em adição às duas questões realizadas anteriormente referentes a aspectos ligados ao material e geometria do componente:

- Levantamento da taxa de crescimento de trincas (CTOD) durante os ensaios;
- Análise visual das superfícies de fratura em diferentes estágios do teste. Por exemplo, para diferentes tempos de parada;
- Extrapolar os tempos de parada, principalmente refinando os resultados para valores entre 5 e 20 horas de pausa;
- Se possível experimentalmente, realizar ensaios com paradas superiores a 45 horas. Tal proposta se mostra desafiadora, devido ao tempo necessário para conclusão de cada amostra ser extremamente elevado;
- Observar a influência de carregamentos residuais nas amostras, através da aplicação de baixas cargas compressivas e estáticas nas amostras durante a parada (pré-carga). Este ensaio ajudaria a

reproduzir a situação de pausa de equipamentos onde o peso próprio ainda agiria sobre partes da estrutura;

- Investigar se existe algum mecanismo de fechamento prematuro de trinca envolvido;
- Investigar a existência de possível influência da formação de óxidos na superfície de fratura;
- Analisar o comportamento da taxa de crescimento da trinca durante a transição de regime, ou seja, durante o momento de aplicação da pausa e da retomada do teste.

6.4 Considerações finais

Com base nos resultados aqui obtidos, recomenda-se cautela durante o planejamento e principalmente durante a execução de testes de fadiga simulados, nos quais os tempos de parada inseridos (de forma proposital ou acidental) nos ensaios sejam significativos ou muito diferentes entre si;

Analizando os conflitos encontrados durante a pesquisa para a Revisão Bibliográfica e resumidos na Tabela 2.2, o autor recomenda a uniformização dos termos e definições utilizadas para descrever os fenômenos de sobrecargas (*overloads*) e subcargas (*underloads*). A inclusão da perturbação investigada neste trabalho (a completa remoção de carga) também deve ser incluída nestas análises teóricas, pois configura um tipo atípico de perturbação no regime de fadiga em amplitude variável, que não foi tratada anteriormente de maneira exclusiva e independente.

Recomenda-se também a inclusão do Fator de Recuperação R_x , com o objetivo de quantificar o ganho em vida útil:

$$\overline{R}_x = \frac{\overline{N}_x}{\overline{N}_0} \quad (13)$$

Onde:

- R_x : fator de recuperação da amostra, após parada de x horas;
- N_x : ciclagem até a ruptura, após aplicação de parada de x horas.
- N_0 : ciclagem até a ruptura da amostra, sem paradas;

Calculando-se o Fator de Recuperação R para os testes realizados neste trabalho, tem-se:

- $N_0 = 170.992$ ciclos;
- $N_5 = 239.434$ ciclos (5h de pausa);
- $N_{10} = 240.848$ ciclos (10h de pausa);
- $N_{45} = 1.043.743$ ciclos (45h de parada).

Assim:

- $R_5 = 1,40$
- $R_{10} = 1,41$
- $R_{45} = 6,10$

E a correspondente representação gráfica é apresentada na Figura 6.2 a seguir. Na referida figura pode ser analisado o crescimento do Fator de Recuperação R com o tempo de parada utilizado em cada ensaio. Enquanto o tempo de parada é duplicado no intervalo inferior do gráfico (de 5h para 10h), é observado um leve incremento no Fator de Recuperação (de 1,40 para 1,41). Porém, quando o tempo de parada é elevado para 45h, o Fator R correspondente é de 6,10. Ou seja, enquanto o tempo de parada é elevado em 4,5 vezes, o Fator de Recuperação tem um incremento de 4,2 vezes.

Figura 6.2 - Representação gráfica do Fator de Recuperação, considerando os ensaios realizados neste trabalho.

Fonte: acervo pessoal.

A importância do Fator de Recuperação se faz evidente quando considerado como parâmetro de projeto em fadiga. Uma vez conhecendo-se a magnitude das paradas envolvidas no ciclo operacional do componente, pode-se dimensioná-lo quanto à vida em fadiga calculando-se a taxa de crescimento de trincas “adaptável” para os tempos de pausa. Assim, espera-se atingir um dimensionamento mais representativo e específico para a aplicação do componente em serviço.

7 CONCLUSÕES

No trabalho apresentado foram realizados testes de fadiga em um componente automotivo (suporte da buzina), os quais apresentaram rotinas diferentes. O teste do componente montado em veículo leva a resultados divergentes, dependente do meio onde o teste é realizado, sendo na Pista de Testes ou em Simulador de Estradas. A diferença é expressa em durabilidade mais elevada para o componente que é testado em rodagem real (falha em 18% da duração do teste) do que para a amostra testada em simulação (falha em 11% da duração do teste). O modo de falha observado nas duas amostras é bastante similar, como demonstrado através das análises óticas realizadas. As características do material do componente também foram investigadas e estão em ordem. Esta diferença também não pode ser atribuída às divergências no espectro de carregamento, os quais se demonstraram completamente equivalentes em termos de dano acumulado e similares em aspecto, mesmo quando comparados através de diferentes métodos de contagem de ciclos de fadiga e análises PSD.

A diferença em durabilidade é então relacionada à existência de pausas ou interrupções na rodagem real, que ocorrem mais raramente no teste simulado. Tais interrupções no espectro de carregamento foram artificialmente introduzidas através de testes em bancada. Desta forma, a vida média em fadiga do componente, que corresponde a 170.922 ciclos quando testado de maneira interrupta foi elevada a 239.434 ciclos com 5T (parada de 5 horas), 240.848 ciclos para 10T (parada de 10 horas) e 1.043.743 ciclos quando submetido a pausas periódicas de 45 horas.

8 BIBLIOGRAFIA

1. **McCLELLAN III, J. E. e DORN, H.** *Science and technology in world history - an introduction*. 2nd Edition. Baltimore : The Johns Hopkins University Press, 2006.
2. **HEADRICK, D. R.** *Technology: a world history*. New York : Oxford University Press, 2009.
3. **DUNBAR, R.** *The human story*. Londres : Faber and Faber Limited, 2004.
4. **SEMAW, S.** The world's oldest stone artefacts from Gona, Ethiopia: their implications for understanding stone technology and patterns of human evolution between 2.6–1.5 million years Ago. *Journal of Archaeological Science*. 27, 2000, pp. 1197 - 1214.
5. *Human-like hand use in Australopithecus africanus*. **SKINNER, M. M. et al.** 6220, 2015, *Science*, Vol. 347, pp. 395 - 399.
6. **STOUT, D. et al.** Technological variation in the earliest Oldowan from Gona, Afar, Ethiopia. *Journal of Human Evolution*. 58, 2010, pp. 474 - 491.
7. **STEPHENS, R. e FATEMI, A.** *Metal fatigue in engineering, 2nd Ed.* New York, New York : John Wiley & Sons, 2001.
8. **FROST, N. E., MARSH, K. J. e POOK, L. P.** *Metal fatigue, Dover Ed.* Mineola, New York : Dover Publications, Inc, 1999.
9. **SCHÜTZ, W.** A history of fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*. 2, 1996, Vol. 54, pp. 263-300.
10. **ASM International.** *ASM Handbook Fatigue and Fracture*. New York : ASM International Handbook Committee, 1996. Vol. 19.

11. globo.com. [Online] [Citado em: 14 de 12 de 2015.] <http://g1.globo.com/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/index.html>.
12. **MAYER, H.** Recent developments in ultrasonic fatigue. *Fatigue Frac. Engng. Mater. Struct.* 39, 2016, pp. 3 - 29.
13. —. Ultrasonic torsion and tension compression fatigue testing: measuring principles and investigations in 2024-T351 aluminum alloy. *Int. J. Fatigue.* 28, 2006, pp. 1446 – 1455.
14. **STANZL-TSCHEGG, S. E., MAYER, H., Stich, A.** Variable amplitude loading in the very high-cycle fatigue regime. *Fatigue Frac. Engng. Mater. Struct.* 25, 2002, pp. 887 - 896.
15. **STANZL-TSCHEGG, S.E.** Fracture mechanisms and fracture mechanics at ultrasonic frequencies. *Fatigue Frac. Engng. Mater.* 1999, Vol. 22, pp. 567 - 579.
16. **SURESH, S.** *Fatigue of materials, 2nd Ed.* New York : Cambridge University Press, 1998.
17. **SCHÖN, C. G.** *Mecânica dos materiais.* São Paulo : Escola Politécnica da USP, 2010.
18. **SCHIJVE, J.** *Fatigue of structures and materials, 2nd Ed.* Delft : Springer, 2009.
19. **CALLISTER, W. D.** *Materials science and engineering: an introduction, 5th ed.* New York : John Wiley & Sons, 2000.
20. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS.** *ASTM E 1150-1987, Standard Definitions of Fatigue.* New York : ASTM, 1995.
21. **ALBERT, W.A.J.** Über Treibseile am Harz. *Archiv für Mineralogie, Geognosie, Bergbau und Hüttenkunde.* 1838, Vol. 10, pp. 215-234.
22. **RANKINE, W.J.M.** On the causes of the unexpected breakage of the journals of railway axles; and on the mean of preventing such accidents by observing the law of

continuity in their construction. *Journal of the Franklin Institute*. 3, 1843, Vol. 36, pp. 178-180.

23. **GLYNN, J.** Paper No 617. *ICE*. 1844.

24. **FAIRBAIRN, W.** Experiments to determine the effect of impact, vibratory action and long continued changes of load. *Phil. Trans. R. Soc.* 154, 1864, pp. 311-325.

25. **EWING, J.A. e HUMFREY, J.C.W.** The fracture of metals under repeated alternations of stress. *Phil. Trans. Royal Society*. 1903, Vol. CC, pp. 241-250.

26. **GRIFFITH, A.A.** The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 221A, 1920, p. 163.

27. **MINER, M. A.** Cumulative damage in fatigue. *Trans. ASME J. Appl. Mech.* 1945, Vol. 67, p. A159.

28. **SCHIJVE, J.** Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. *International Journal of Fatigue*. 25, 2003, pp. 679-702.

29. **IRWIN, G. R.** Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *Trans. ASME J. Appl. Mech.* 1957, Vol. 24, p. 361.

30. **WEIBULL, W.** A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.* 1951, p. 293.

31. **PARIS, P. C., GOMEZ, M. P., ANDERSON, W.E.** A rational analytical theory of fatigue. *The trend of engineering*. 13, 1961, pp. 9-14.

32. **SCHIJVE, J., BROEK, D.** Crack propagation tests based on a gust spectrum with a variable amplitude loading. *Aircraft Eng.* 1962, Vol. 34, p. 314.

33. **SCHÖN, C. G.** *Mecânica dos materiais: fundamentos e tecnologia do comportamento mecânico*. Rio de Janeiro : Elsevier Editora Ltda, 2013.

34. **ELBER, W.** Fatigue crack closure under cyclic tension. *Eng. Fracture Mech.* 1970, Vol. 2, p. 37.

35. **PARIS, C. P.** Fracture mechanics and fatigue: a historical perspective. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 1998, Vol. 21, pp. 535 - 540.
36. **BERGER, C., EULITZ, K.-G., et al.** Betriebsfestigkeit in Germany – an overview. *Int. J. Fatigue*. 24, 2002, pp. 603 – 625.
37. **MAYER, M.** Ultrasonic torsion and tension - compression fatigue testing: measuring principles and investigations in 2024-T351 aluminum alloy. *International Journal of Fatigue*. 2006, Vol. 28, pp. 1446 - 1455.
38. **MALLERY, T. J.** The catskill archive. [Online] [Citado em: 19 de Abril de 2012.] <http://catskillarchive.com>.
39. **OHIO HISTORICAL SOCIETY.** [Online] [Citado em: 20 de Abril de 2012.] <http://www.ohiohistorycentral.org/entry.php?rec=466>.
40. **PETROSKI, H.** *To enginner is human: the role of failure in successful design*. New York : First Vintage Books, 1992.
41. **THE NEW YORK TIMES.** [Online] 24 de Novembro de 1878. [Citado em: 19 de Abril de 2012.] <http://query.nytimes.com/mem/archive-free/pdf?res=F6061FF83E5A137B93C6AB178AD95F4C8784F9>.
42. —. [Online] 15 de Janeiro de 1919. [Citado em: 20 de Abril de 2012.] http://query.nytimes.com/mem/archive-free/pdf?_r=1&res=9B04E4D71339E13ABC4E52DFB7668382609EDE&oref=slogin.
43. **BOSTON PUBLIC LIBRARY.** [Online] [Citado em: 20 de Abril de 2012.] www.bpl.org.
44. **EMCH407 - Numerical analysis.** [Online] 30 de Março de 2011. [Citado em: 20 de Abril de 2012.] http://www.personal.psu.edu/bvd5010/blogs/emch407-numerical_analysis/2011/03/problem-statement.html.

45. *From 'safe life' to fracture mechanics - F111 aircraft cold temperature proof testing at RAAF Amberley.* **REDMOND, G.** Brisbane : AINDT, 2001.
46. **AEROFILES.** [Online] 09 de Novembro de 2008. [Citado em: 21 de Abril de 2012.] <http://www.aerofiles.com>.
47. **NYCSUBWAY.** [Online] 8 de Dezembro de 2004. [Citado em: 21 de Abril de 2012.] <http://www.nycsubway.org>.
48. **CAHN, R.W., HAASEN, P. e KRAMER, E.J.** *Material Science and Technology.* Weinheim : VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1993. Vol. 6.
49. *The effect of ground-to-air cycles on the fatigue crack propagation in 2024-T3 Alclad sheet material.* **SCHIVJE, J. e DE RIJK, P.** Amsterdan - Holanda : Nationaal Lucht - en Ruimtevaartlaboratorium, 1965. NLR-TR M 2148.
50. **PROBST, E. P. e HILLBERRY, B. M.** Fatigue crack delay and arrest due to single peak tensile overloads. *AIAA.* 1973, 73-325.
51. **HSU, T. M. e Lassiter, L. W.** Effects of compressive overloads fatigue crack growth. *AIAA.* 74-365, 1974.
52. **WATSON, P. e TOPPER, T. H.** Fatigue damage evaluation for todd steel incorporating mean stress and overload effects. *Expl Mech.* 12, 1972, Vol. 3.
53. **TOPPER, T. H. e YU, M. T.** The effect of overloads on threshold and crack closure. *International Journal of Fatigue.* 3, 1985, pp. 159-164.
54. **TOPPER, T. H. e LAM, T. S.** Effective strain-fatigue life data for variable amplitude fatigue. *International Journal of Fatigue.* 1997, Vol. 19, pp. 137-143.
55. **POMPETZKI, M.A., TOPPER, T. H. e DU QUESNAY, D. L.** The effect of compressive underloads and tensile overloads on fatigue damage accumulation in SAE 1045 steel. *International Journal of Fatigue.* 3, 1990, Vol. 12, pp. 207-213.

56. **FLECK, N. A.** Fatigue crack growth due to periodic underloads and overloads. *Acta Metall.* 7, 1985, Vol. 33, pp. 1339-1354.
57. **McMILLAN, J. C. e PELLOUX, R. M. N.** ASTM STP 415. 505, 1967.
58. **ZITOUNIS, V. e IRVING, P. E.** Fatigue crack acceleration effects during tensile underloads in 7010 and 8090 aluminium alloys. *International Journal of Fatigue.* 29, 2007, pp. 108-118.
59. **SADANANDA, K.** Analysis of overload effects and related phenomena. *International Journal of Fatigue.* 1999, Vol. 21, pp. 233-246.
60. **NEWMAN Jr., J.** The merging of fatigue and fracture mechanics concepts: a historical perspective. *Progress in Aerospace Sciences.* 34, 1998, pp. 347-390.
61. **VASUDEVEN, A.** A review of crack closure, fatigue crack threshold and related phenomena. *Materials Science and Engineering.* 188, 1994, pp. 1-22.
62. **SCHIJVE, J. II.** Fatigue cracks, plasticity effects and crack closure.
63. **GEARY, W.** Of some aspects of fatigue crack growth under variable amplitude loading. *International Journal of Fatigue.* 6, 1992, pp. 377-386.
64. **KUMAR, R.** A review for crack closure for single overload, programmed and block loads. *Engineering Fracture Mechanics.* 42, 1992, pp. 151-158.
65. **RICARDO, L.C.H., Mattos, P.D. e Dircer, P.** A Review on Crack Closure Models. *SAE.* 2001.
66. **RICARDO, L.C.H, GODEFROID, L.B. e TOPPER, T.** Finite element method to simulate crack closure stress intensity factor. *SAE.* 2004.
67. **SHIH, T.** A study of crack closure in fatigue. *Engineering Fracture Mechanics.* 6, 1974, pp. 19-32.

68. **RICHARDS, C.E. e LINDLEY, T.C.** The influence of stress intensity and microstructure on fatigue crack propagation in ferritic materials. *Engineering Fracture Mechanics*. 4, 1972, pp. 951-978.
69. **LINDLEY, T.C. e RICHARDS, C. E.** The relevance of crack closure to fatigue crack propagation. *Materials Science*. 14, 1974, pp. 281-293.
70. **RICE, J.** Limitations to the small scale yielding approximation for crack tip plasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 22, 1974, pp. 17-26.
71. **SCHIJVE, J.** The effect of pre-strain on fatigue crack growth and crack closure. *Engineering Fracture Mechanics*. 8, 1976, pp. 575-581.
72. **SUNDER, R. e DASH, P.K.** Measurement of fatigue crack closure trough electron mycroscopy. *International Journal of Fatigue*. 4, 1982, pp. 97-105.
73. **CHERMAHINI, R.** Three-Dimensional aspects of plasticity-induced fatigue crack closure. *Engineering Fracture Mechanics*. 34, 1989, pp. 393-401.
74. **DAWICKE, D.** Three-dimensional crack closure behavior. *Engineering Fracture Mechanics*. 36, 1990, pp. 111-121.
75. **CHEN, D.** A new evaluation procedure for crack closure. *International Journal of Fatigue*. 13, 1991, pp. 327-331.
76. **WANG, C.H. e HUTCHINSON, J. W.** Interactions of fatigue cracks with elastic obstacles. *International Journal of Fracture*. 2001, pp. 263-283.
77. **LUGO, M. DANIEWICZ, S. R. .** A mechanics based study of crack closure measurement techniques under constant amplitude loading. *International Journal of Fatigue*. 2011, pp. 186-193.
78. **ANGELO, C. M e SIMONE, W. C.** Teoria do fechamento prematuro de trinca: uma revisão. *Congresso Internacional SAE 2011*. 2011.

79. **BENASCUITTI, D. e TOVO, R.** Spectral methods for lifetime prediction under wide-band stationary random processes. *International Journal of Fatigue*. 2005, Vol. 27, pp. 867 – 877.
80. **PERCIVAL, D. e WALDEN, A.** *Spectral analysis in physical application*. Cambridge : Cambridge University Press, 1993.
81. **DOWLING, N.E.** Fatigue failure predictions for complicated stress-strain histories. *J. Mater.* 7, 1972, Vol. 1, pp. 71-87.
82. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS.** ASTM E1049-89: standard practices for cycle counting in fatigue analysis. [Online] [Citado em: 18 de Outubro de 2015.] <http://compass.astm.org/download/E1049.6073.pdf>.
83. **SUNDER, R.** Spectrum load fatigue - underlying mechanisms and their significance in testing and analysis. *International Journal of Fatigue*. 25, 2003, pp. 971-981.
84. **REYTIER, T. et al.** Generation of correlated stress time histories from continuous turbulence Power Spectral Density for fatigue analysis of aircraft structures. *International Journal of Fatigue*. 2012, Vol. 42, pp. 147 - 152.
85. **CYGNUS RESEARCH INTERNATIONAL.** [Online] [Citado em: 27 de 02 de 2016.] <http://www.cygres.com/OcnPageE/Glosry/SpecE.html>.
86. **HBM DO BRASIL.** HBM DO BRASIL - Produtos. [Online] [Citado em: 25 de Julho de 2013.] <http://www.hbm.com/pt/menu/produtos/componentes-de-pesagem/celulas-de-carga/z6/>.
87. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 5483: Acústica - Medição do ruído emitido por buzinas instaladas em veículos rodoviários automotores - Método de engenharia. 2006.

88. **DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG.** DIN 1623 -1: Steel Flat Products - Cold Rolled Sheet And Strip - Technical Delivery Conditions - Mild Unalloyed Steels For Cold Forming. 1983.
89. **AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE.** DIN EN 10130: Cold rolled low carbon steel flat products for cold forming - Technical delivery conditions. 2007.
90. —. DIN EN ISO 18265: Metallic materials - Conversion of hardness values. 2004.
91. **ANGELO, C.M, SCHÖN, C.G. e MACHADO, F.A.C.** Influence of tire sizes over automobile body spectrum loads and fatigue damage accumulation. *Materials and Design*. 2015, Vol. 67, pp. 385-389.
92. **SCHÖN, C.G., ANGELO, C.M. e MACHADO, F.A.C.** The Role of Tire Size Over the Fatigue Damage Accumulation in Vehicle Bodies. *Procedia Materials Science*. 2014, Vol. 3, pp. 331-336.
93. **MTS Systems Corporation.** MTS. *Site da MTS*. [Online] [Citado em: 10 de Outubro de 2012.] www.mts.com.
94. **KISTLER HOLDING AG.** [Online] [Citado em: 10 de Novembro de 2015.] www.kistler.com.
95. **SPECTRA TECNOLOGIA.** SPECTRA TECNOLOGIA - Produtos para Aquisição de Dados. [Online] [Citado em: 25 de Julho de 2013.] <http://www.spectratecnologia.com.br/Bprodutos/B2aqdados/0221st7100d.htm>.
96. **ANGELO, C. M.** *Fadiga de amplitude variável como parâmetro de projeto para eixos traseiros automotivos*. São Paulo : Escola Politécnica da USP, 2007. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica.
97. **BORREGO, P. e al, et.** Evaluation of overload effects on fatigue crack growth and closure. *Engineering Fracture Mechanics*. 70, 2003, pp. 1379-1397.

98. **STRATHERN, P.** *Archimedes and the Fulcrum*. London : Arrow Books, 1998.
99. **BACKE, D., BALLE, F., EIFLER, D.** Fatigue testing of CFRP in the very high cycle fatigue (VHCF) regime at ultrasonic frequencies. *Composites Sci Tech.* 2015, 106, pp. 93 - 99.