ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

CLAYTON MAMEDES ANGELO

**FADIGA DE AMPLITUDE VARIÁVEL COMO PARÂMETRO DE
PROJETO PARA EIXOS TRASEIROS AUTOMOTIVOS: UMA
ANÁLISE DO EFEITO DAS SOBRECARGAS E DA FILTRAGEM
MATEMÁTICA NA PREDIÇÃO DE VIDA EM FADIGA**

São Paulo
2007

CLAYTON MAMEDES ANGELO

FADIGA DE AMPLITUDE VARIÁVEL COMO PARÂMETRO DE PROJETO PARA EIXOS TRASEIROS AUTOMOTIVOS: UMA ANÁLISE DO EFEITO DAS SOBRECARGAS E DA FILTRAGEM MATEMÁTICA NA PREDIÇÃO DE VIDA EM FADIGA.

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Geraldo Schön

São Paulo
2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.
São Paulo, 25 de abril de 2007.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Ângelo, Clayton Mamedes

Fadiga de amplitude variável como parâmetro de projeto para eixos traseiros automotivos: uma análise do efeito das sobrecargas e da filtragem matemática na predição de vida em fadiga / C.M. Angelo. -- ed.rev. -- São Paulo, 2007.

75 p.

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

1.Fadiga dos materiais 2.Rainflow 3.Sobrecargas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

Aos meus pais, que sempre souberam me incentivar
nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, José Mamedes Angelo e Maria Esther Ramalho Angelo, por tudo que eu consegui nesta vida.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Cláudio Schön, por todo o apoio nesta jornada.

Agradeço a minha namorada, Valery de Almeida Gomes, por ter paciência em me suportar durante a realização desta pesquisa; afinal, foram muitos sábados de estudo.

Agradeço ao meu amigo Eliezer Andreoli, pela edição de algumas figuras e o empréstimo do “scanner”.

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

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a comparação dos resultados de ensaios de durabilidade em um suporte do eixo traseiro de um veículo leve de passeio, submetido a dois tipos distintos de testes: durabilidade em rodagem real e em simuladores de estradas. Após o término dos ensaios, o componente apresentou resultados diferentes: as trincas podem ser observadas na peça submetida à rodagem real, e os danos não ocorrem no eixo que foi testado em simulador. As discrepâncias citadas podem estar ligadas a possíveis erros, ocorridos durante a transferência dos dados pertinentes ao teste real para o simulador.

ABSTRACT

The aim of this research is comparing results from durability tests performed at a rear axle bracket of a small passenger car. The part was tested using two different kinds of tests: real (proving ground) durability and simulated (road simulator) durability. After that, the part showed different final results: several cracks can be observed at the part that was tested at the proving ground and no real damage was inflicted at the part that was test at the road simulator. These differences can be related to transferability problems that occurred during data analysis and transfer from real test to a simulated one.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 FADIGA	4
2.1.1 TENSÃO CÍCLICA	4
2.1.2 AMPLITUDE VARIÁVEL E CICLOS “RAINFLOW”	7
2.1.3 AMPLITUDE VARIÁVEL E ACÚMULO DE DANO	8
2.2 O MÉTODO “RAINFLOW”	9
2.2.1 DEFORMAÇÃO CÍCLICA E FADIGA	9
2.2.2 FBC EM MONOCRISTAIS CFC	11
2.2.3 MECANISMOS DE NUCLEAÇÃO DE TRINCAS DE FADIGA	15
2.2.4 EFEITOS DE SOBRECARGAS E SUBCARGAS	16
2.2.5 MECANISMOS DE RETARDO POR SOBRECARGAS	17
2.2.6 OUTROS MECANISMOS DE RETARDO	19
2.2.7 RETARDO DE CRESCIMENTO DE TRINCAS DURANTE FADIGA COM AMPLITUDE VARIÁVEL	19
2.2.8 O CARREGAMENTO EM ESPECTRO	21
2.2.9 O MÉTODO “RAINFLOW”	22
2.3 ANÁLISE DE SINAIS	26
2.3.1 INTRODUÇÃO	26
2.3.2 ASPECTOS BÁSICOS DAS SÉRIES DE FOURIER	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 OS ELEMENTOS ENVOLVIDOS	29
3.1.1 O VEÍCULO TESTADO	29
3.1.2 A SUSPENSÃO TRASEIRA	29
3.1.3 ENSAOS EM CAMPO – A PISTA DE TESTE	31
3.1.4 O SIMULADOR DE ESTRADAS	32

3.1.5	O SINAL	38
3.2	ENSAIOS DE FADIGA	38
3.2.1	O ENSAIO EM EDIÇÃO MODO I	38
3.2.2	O ENSAIO EM EDIÇÃO MODO II	39
4.	RESULTADOS	41
4.1	COMPARAÇÃO QUALITATIVA DOS ENSAIOS DE FADIGA	41
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS	41
4.2.1	A EDIÇÃO EM MODO I	41
4.2.2	A EDIÇÃO EM MODO II	45
4.3	CONTAGEM DE CICLOS POR RFC	46
4.4	CÁLCULO DE VIDA	47
5.	DISCUSSÃO	49
6.	CONCLUSÕES	55

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1: Gráfico Tensão x Tempo com amplitude constante e assimétrica.	5
Fig. 2.2: Exemplo de carregamento por blocos de amplitude constante [6].	6
Fig. 2.3: Dois tipos de carregamento com amplitude variável. (a) Estreita faixa de variação, (b) Grande faixa de variação [6].	7
Fig. 2.4: 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 [17].	12
Fig. 2.5: Diferentes regimes da curva tensão-deformação cíclica [17].	13
Fig. 2.6: Ciclos de histerese obtidos em monocristais de cobre submetidos a ensaios de fadiga em controle de deformação. As letras correspondem aos diferentes níveis de ciclagem aplicados [12].	14
Fig. 2.7: Definição do RFC (<i>Rainflow Counting Cycle</i>) [7].	24
Fig. 2.8: Definição de amplitude, faixa (“range”) e média de um ciclo [7].	24
Fig. 2.9: Ilustração esquemática sobre os significados da contagem por rainflow.	25
Fig. 3.1: Esquema da suspensão traseira, mostrando o eixo traseiro, amortecedores, molas e cubos de rodas.	31

Fig. 3.2: Veículo no dispositivo simulador de estradas MTS.	33
Fig. 3.3: Sensor MTS SWIFT 30T montado em veículo.	34
Fig. 3.4: Detalhe do simulador MTS 349.	35
Fig. 3.5: Fluxogramas do método de predição de vida em fadiga.	37
Fig. 3.6 : Diagrama comparativo entre tempo de testes.	39
Fig. 4.1: Resultado da rodagem real A: pequenas trincas na junção do suporte do eixo com a longarina traseira (região lateral).	42
Fig. 4.2: Resultado da rodagem real B: ruptura total dos pontos de solda, provocando destacamento do suporte do eixo traseiro.	43
Fig. 4.3: Resultado da rodagem real C: ruptura parcial dos pontos de solda, provocando pequeno deslocamento do suporte do eixo traseiro.	43
Fig. 4.4: Resultado da rodagem simulada A: pequenas trincas na junção do suporte do eixo com a longarina traseira (região lateral).	43
Fig. 4.5: Resultado da rodagem simulada B: pequenas trincas na junção do suporte do eixo com a longarina traseira (região lateral).	44
Fig. 4.6: Resultado da rodagem simulada C: pequenas trincas na junção do suporte do eixo com a longarina traseira (região lateral).	44
Fig. 4.7: Histórico de carregamento no eixo traseiro. Trecho limitado a 100 segundos.	45

Fig. 4.8: Dados rainflow originais e filtrados com $h = 0,2$. Janela limitada a 60 segundos.	46
Fig. 4.9: Representação do número de ciclos <i>rainflow</i> , com e sem filtragem.	47
Fig. 4.10: Histograma de distribuição de ciclos <i>rainflow</i> , com e sem filtragem.	47
Fig. 5.1: Relação entre os tipos de testes e suas características.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características do veículo testado.	29
Tabela 3.2 – Composições nominais dos aços usados nos elementos do corpo do eixo traseiro neste trabalho analisados.	30
Tab. 3.3: Valores de carga utilizados no ensaio.	38
Tab. 4.1 : Resultados obtidos.	42
Tab. 4.2: Valores de vida (horas) em função do valor h .	48

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_m	Tensão média;
$\sigma_{\max}$	Tensão máxima;
$\sigma_{\min}$	Tensão mínima;
σ_a	Amplitude de tensão;
R	Razão de tensão;
M_k	Ponto máximo local de uma função Markov;
m_k^-	Ponto mínimo local de uma função Markov;
m_k^+	Ponto mínimo local de uma função Markov;
m_k^{RFC}	Ponto mínimo correspondente RFC;
$L(t)$	Carga aplicada em função do tempo;
s	Amplitude da carga (constante);
ω	Frequência da carga (constante);
$N(s)$	Número de ciclos de fadiga à amplitude constante;
$D(t)$	Dano causado pela carga em função do tempo;
K	Fator intensificador de tensões;
a	Tamanho da trinca;
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

Um dos grandes desafios atuais da Engenharia Mecânica é desenvolver ferramentas e métodos que possibilitem o cálculo, cada vez mais apurado, da vida de um componente, seja este um mancal de deslizamento ou uma turbina de avião. Hoje em dia existem muitos métodos onde o componente é dimensionado levando em consideração o estado de tensões *médio* ao qual o mesmo estará submetido durante a maior parte de sua vida em serviço. Contudo, a imensa maioria dos equipamentos não funciona sob um rígido regime de tensões constantes, e sim sob um estado que pode alternar várias situações de solicitações, variando da tração à compressão, amplitudes flutuantes de deformação e carga, modos de carregamento, entre outros. Essa variação representa as diferentes solicitações que agem, por exemplo, na suspensão de um automóvel durante o tráfego por um terreno acidentado ou rodovia pavimentada, as oscilações das asas de um avião de carga durante seu voo, a variação de momentos no eixo de uma turbina de uma usina hidrelétrica com a passagem do fluxo de água, e assim por diante. Ou seja: elas representam o comportamento real do componente durante seu uso, onde a **Fadiga** passa a ser um aspecto relevante.

Assim, um método de predição de vida útil que deseje ser preciso deve, no mínimo, considerar a variação ou aleatoriedade dos fenômenos envolvidos. De modo simplista, bons resultados podem ser alcançados quando são utilizados métodos ou ferramentas que contabilizam os efeitos da variação no nível de carga ou deformação, estimando a influência dos mesmos na vida do componente estudado.

Uma forma bastante comum é estudar a variação da amplitude de carregamento ou deformação durante o uso do componente: tais solicitações (em um certo período de tempo t) provocam uma quantidade de dano acumulado no componente D ; esta

quantidade de dano absorve uma parcela da vida útil do objeto. Assim é possível fazer uma projeção da vida útil total do componente estudado; cálculo esse bem mais apurado do que se fosse considerado apenas um estado *médio* de tensões constantes. Em resumo, um método que utiliza a aleatoriedade presente no mundo real certamente fornecerá resultados mais satisfatórios no ponto de vista da predição, comparando-se a um ensaio que ignore a natureza aleatória do carregamento em fadiga.

Porém, como todo modelo que tenta transcrever os efeitos do mundo real, uma análise em fadiga é susceptível ao problema da transferência de valores: em uma análise bem executada os resultados obtidos em campo (normalmente o estado de tensões atuante) são transferidos corretamente para o modelo estudado neste trabalho. Efeitos como amplitudes de baixo ou alto ciclo devem ser interpretadas de forma correta, a reprodução das solicitações reais bem estudada, entre outros fatores. No caso específico aqui estudado, a qualidade aplicada na transferência dos sinais coletados em campo apresenta um grande impacto na predição final de vida útil do componente.

Neste estudo é analisada a influência dos efeitos de filtragem matemática de sinais nos cálculo de vida em fadiga, ou seja, a interpretação e transferência dos valores obtidos em campo, simulando uma condição de uso real. Filtragem é entendida como uma metodologia de tratamento de sinais que, neste caso específico de estudo de fadiga, consiste na remoção de amplitudes de carregamento extremamente baixas do cálculo do dano acumulado. Estas baixas amplitudes (geralmente interpretadas como ruídos oriundos da medição ou solicitações de pequena ordem) não influiriam na vida em fadiga do componente, podendo assim ser excluídos como forma de simplificar e reduzir o tempo de ensaio. Não existe, entretanto, uma recomendação ou estimativa concreta do valor que se pode considerar como irrelevantes para a fadiga e, por consequência, os parâmetros de filtragem são escolhidos através da experiência do

pesquisador. Assim, nesta pesquisa, um sinal real foi filtrado em vários níveis para propiciar condições de analisar a influência da redução de ciclos considerados irrelevantes na fadiga dos componentes mecânicos. Também é estudada a influência da omissão de ciclos em ensaios de fadiga, com ênfase à aplicação de sub e sobre-cargas.

O presente trabalho tem por objetivos (1) investigar o efeito da metodologia de filtragem empregada no procedimento de contagem pelo método *Rainflow* de um espectro característico das solicitações aplicadas ao suporte eixo traseiro de veículo leve de passeio, tomado em condições de pista de teste e (2) discutir a transferibilidade dos resultados obtidos em ensaios simulados às condições reais de uso do componente, comparando-se o desempenho do componente nestes ensaios simulados e na pista de teste; (3) editar esse mesmo espectro de carregamento através da remoção de trechos de tempo com solicitação nula, proporcionando assim um estudo das sub e sobrecargas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fadiga

Fadiga pode ser definida como uma falha que ocorre em componentes (estruturas, peças, etc.) sujeitos a tensão dinâmica flutuante. Sob tais condições, a falha por fadiga pode ocorrer mesmo em níveis de tensão abaixo do limite do escoamento do material para cargas estáticas [1 - 5].

O termo fadiga refere-se à capacidade do fenômeno “cansar” o material, através dos esforços cíclicos alcançados durante um certo período e tempo até a ruptura. Como a maioria dos materiais de engenharia está sujeita a cargas cíclicas, é muito importante a compreensão do mecanismo de falha: estima-se que cerca de 90% das falhas metálicas são causadas pela fadiga, que costuma causar danos severos e abruptos [3].

2.1.1 Tensão Cíclica

Em geral, existem três tipos de carregamento tensão-tempo ou deformação-tempo, que são utilizados no estudo da fadiga de um material:

Carregamento com amplitude constante:

Este é a condição mais simples de carregamento em fadiga, onde se tem uma carga (respectivamente, deformação) variando com o tempo, em máxima e mínima amplitude (fig. 2.1). Alguns autores [1 – 5] ainda consideram o posicionamento do ciclo de tensões para uma outra classificação. Assim, quando a amplitude é simetricamente distribuída durante o tempo (a tensão média é zero) tem-se o chamado ciclo reverso de tensões. Caso contrário, tem-se o ciclo repetido de tensões, quando a amplitude é assimétrica ao eixo de tempo [3].

Fig. 2.1: Gráfico Tensão x Tempo com amplitude constante e assimétrica.

Na figura 2.1 estão indicados parâmetros usados para descrever a tensão flutuante [2]. A amplitude de tensão varia em torno de uma tensão média σ_m , definida como a média entre os picos de tensão:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1)$$

A faixa de tensão σ_r é a diferença entre os picos de tensão:

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2)$$

A amplitude de tensão σ_a :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (3)$$

A razão ou taxa de fadiga R é definida como:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (4)$$

As tensões de tração são indicadas positivas; as de compressão, negativas, como usual na Mecânica dos Sólidos.

Carregamento por blocos:

Neste caso de carregamento a tensão é aplicada em blocos facilmente identificáveis (fig. 2.2). Estes blocos são considerados como trechos de carregamento por amplitude constante, seguidos por outro com amplitude diferente, mas ainda constante [6].

Fig. 2.2: Exemplo de carregamento por blocos de amplitude constante [6].

Carregamento com amplitude variável:

Um veículo em movimentação em uma estrada não é submetido a carregamentos como os representados na fig. 2.2, onde a amplitude é constante. O simples fato de o automóvel estar ou não com carga altera completamente o estado de solicitação. Com as irregularidades do solo, sobre e subcargas são experimentadas, assim como diversos trechos onde dominam diferentes tensões médias. As Figuras 2.3a e 2.3b apresentam exemplos desse comportamento [6, 7].

Fig. 2.3: Dois tipos de carregamento com amplitude variável: (a) Estreita faixa de variação, (b) Grande faixa de variação [6].

2.1.2 Amplitude variável e ciclos *Rainflow*.

Do exposto, acima se conclui que, devido à natureza das cargas, um modelo de carregamento com amplitude variável é o mais indicado para a representação de ciclos de fadiga em componentes automotivos.

Uma maneira de se tratar com amplitude de carga variável é estipular ciclos de carregamento equivalentes e assim utilizar os métodos de acúmulo de dano para prever seu efeito sobre a vida útil do componente. Estes ciclos equivalentes são constituídos quando os valores de pico são comparados. A literatura propõe muitas maneiras de realizar esta etapa. [8].

O chamado método de *Rainflow* (RFC - *Rainflow Counting*) foi introduzido em 1967, por Endo apud Rychlik [7] e desde então, se constituiu no mais popular procedimento para contagem de ciclos de fadiga em amplitude variável. O nome do método vem da idéia do trajeto que as gotas de chuva fazem ao cair pelos telhados de estilo japonês, que não bloqueiam o trajeto da água apesar da pequena elevação de nível

no seu ponto mais baixo. Por analogia, pequenas reversões de carga em um ciclo de fadiga com amplitude maior também não iriam interferir no dano acumulado por fadiga.

Em sua forma original, o RFC constitui um complicado algoritmo matemático, projetado para captar variações na amplitude do carregamento, formando ciclos e comparando os pontos de máximo e mínimo, mesmo que estes estejam separados por extremos intermediários. Cada máximo local é utilizado como o pico de um ciclo de histerese com uma amplitude calculada pelo algoritmo. Uma nova definição equivalente do RFC é dada por Rychlik [7].

Maiores detalhes sobre o Método *Rainflow* são fornecidos na seção 2.2.

2.1.3 Amplitude Variável e Acúmulo de Dano.

O dano por fadiga aumenta com a quantidade de ciclos aplicados de maneira cumulativa, até atingir a fratura. A forma como este dano é tratado depende do regime de fadiga em qual o objeto de estudo se situa.

Assume-se que o comportamento do material sob solicitações de fadiga é dado por uma curva S-N descrita pela relação de Basquin, mas apresentando limite de fadiga σ_∞ nítido. Ou seja, acima do limite de fadiga o número de ciclos para falha é dado por:

$$KN^\beta = \sigma(N) \Rightarrow N(\sigma) = K^{-1} \sigma^{-\beta} \quad (\sigma > \sigma_\infty) \quad \text{eq. (1)}$$

onde K e β são constantes dependentes do material [4].

Pela definição do limite de fadiga tem-se que:

$$N(\sigma) = \infty \quad (\sigma \leq \sigma_\infty) \quad \text{eq. (2)}$$

Para cargas aleatórias, ou seja, de amplitude variável, a curva S-N definida é combinada com um método de contagem de ciclos e alguma teoria de acúmulo de dano.

A Teoria de Acúmulo de Dano Linear de Pålmgren-Miner, apud Fatemi e Yang [9], é a mais utilizada para prever a vida em fadiga, e é rapidamente revista a seguir.

Se o k -enésimo ciclo tem amplitude σ_k , pode-se assumir que ele causa dano igual a $1/N(\sigma_k)$ (ou seja, um dano linearmente proporcional à sua vida estimada neste nível de tensão). O dano total em um intervalo de tempo igual a t :

$$D(t) = \sum_{t_k \leq t} \frac{1}{N(\sigma_k)} = K \sum_{t_k \leq t} \sigma_k^\beta \quad \text{eq. (3)}$$

onde a somatória contém todos os ciclos até tempo $= t$. O tempo de vida em fadiga t_f é definido como o tempo, t , para o qual $D(t)$ supera o valor 1 pela primeira vez.

2.2 O Método “Rainflow”

2.2.1 Deformação cíclica e fadiga

O fenômeno físico da fadiga pode ser representado pela amálgama dos conceitos mais difundidos, que são reproduzidos a seguir:

1. Fadiga pode ser definida como uma falha que ocorre em componentes (estruturas, peças, etc.) sujeitos a tensão dinâmica flutuante. Sob tais condições, a falha por fadiga pode ocorrer mesmo em níveis de tensão abaixo do limite do escoamento do material para cargas estáticas [1-3];
2. Fadiga é o fenômeno que provoca mudanças nas propriedades do material devido à repetida aplicação de tensão e deformação [4].

Existem diferentes processos pelos quais a falha dos materiais é estimulada pela aplicação de cargas cíclicas. Cada um desses processos de fadiga pode ser subdividido em diferentes estágios nos quais ocorrem o dano cíclico e a formação de trincas:

1. Fadiga cíclica: ocorre em decorrência da aplicação de repetidos ciclos de tensão ou deformação em um componente. Pode ser:

- de alto ciclo: o nível de tensão aplicado é inferior ou próximo à tensão de escoamento do material;
 - de baixo ciclo: se o nível de tensão aplicada causa deformação plástica externa ou localizada no material.
2. Fadiga por corrosão: existem os ciclos repetidos de tensão, mas o início do processo é causado pela ação da corrosão na superfície externa do componente, criando um concentrador de tensões geométrico;
 3. Fadiga por fretting: os agentes promotores deste fenômeno são os movimentos de baixa amplitude entre as superfícies de contato, nas quais não existem movimentos relativos entre si. A consequência imediata é a abrasão e a formação de concentradores de tensão geométricos;
 4. Fadiga térmica: fenômeno causado pelas repetidas variações na temperatura do material, nas quais os diferentes coeficientes de dilatação térmica produzem tensões internas suficientes para que ocorra a fadiga cíclica;
 5. Fadiga de contato: é um tipo particular de fadiga que ocorre com muita frequência em componentes projetados para estar continuamente em contato um com o outro (engrenagens, por exemplo), nos quais as cargas flutuantes produzem danos superficiais que promovem a nucleação de trincas de fadiga;
 6. Fadiga sônica ou acústica: as tensões impostas ao componente são decorrentes das vibrações mecânicas produzidas pelas ondas acústicas.

Assim, a progressão de danos por fadiga (considerando materiais livres de defeitos e com alto grau de pureza), ocorre na seguinte sequência:

- I. Criação de alterações irreversíveis na microestrutura acompanhadas por encruamento cíclico e amolecimento;
- II. Nucleação de defeitos microscópicos;
- III. Formação de uma falha macroscópica dominante, devido ao crescimento dos defeitos microscópicos;
- IV. Crescimento subcrítico de macrotrincas;
- V. Falha final do material.

Fadiga, supostamente, surge a partir de danos acumulados no material sob condições de microplasticidade, justificando-se sua ocorrência mesmo para tensões nominalmente inferiores ao limite de escoamento estático do material e na ausência de deformação plástica macroscópica [10]. Desta forma, a nossa análise vai ser iniciada pelos danos que surgem em um material sob condições de fadiga em controle de deformação (também chamada de fadiga de baixo ciclo, FBC). Para tanto se considera o caso de monocristais com estrutura cúbica de faces centradas (CFC), orientados para monoescorregamento (*“easy glide”*), onde este comportamento está mais bem caracterizado.

2.2.2 FBC em monocristais CFC

A aplicação de deformação plástica reversa (ou seja, com $R=-1$) em um monocristal de estrutura CFC recozida provoca um rápido encruamento, mesmo durante os primeiros ciclos [11]. A Figura 2.4 apresenta o resultado típico de um ensaio de fadiga em controle de deformação em cobre recozido publicado originalmente por Kuhlmann-Wilsdorf e Laird em 1979 [12]. Esta figura ilustra o contínuo endurecimento da liga com a ciclagem. Como se observa, entretanto, este aumento de resistência não é constante, mas satura em uma curva de histerese característica para o dado nível de deformação cíclica aplicado. O gráfico formado pela tensão de saturação em função da amplitude de deformação é conhecido como curva tensão versus deformação cíclica.

Fig. 2.4: 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 [17].

Carregamentos em fadiga totalmente reversos (tensão e compressão iguais) não causam a rotação do sistema de escorregamento com referência ao eixo de carregamento, pelo motivo que a deformação plástica produz aproximadamente a mesma quantidade de discordâncias em cunha negativas e positivas. Discordâncias em hélice, tanto positivas quanto negativas, não são acumuladas devido à possibilidade de escorregamento com desvio (*cross-slip*) que leva à aniquilação mútua de discordâncias em hélice com sinais inversos [12].

Como exposto no parágrafo anterior, o acúmulo de discordâncias é o principal responsável pelo encruamento rápido visto no regime A da curva de saturação tensão-deformação (Fig. 2.5). Neste estágio um estado de deformação contínuo é atingido como consequência do equilíbrio entre as discordâncias em cunha e em hélice. Quando a deformação plástica sobe, 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*, [14 – 16]. 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 onde 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.

Fig. 2.5: Regimes da curva tensão-deformação cíclica [17].

Os dois parâmetros que são reconhecidos como de vital importância para o comportamento das discordâncias sob o regime de fadiga nos metais [12] são a tensão de atrito e a tensão de retorno. Enquanto a tensão de atrito é independente da deformação direcional, a tensão de retorno altera de sinal a cada meio ciclo de fadiga, alcançando o seu valor máximo no pico de deformação de fadiga. Ainda, esta tensão é responsável pelo efeito Bauschinger.

Fig. 2.6: Ciclos de histerese obtidos em monocristais de cobre submetidos a ensaios de fadiga em controle de deformação. As letras correspondem aos diferentes níveis de ciclagem aplicados [12].

A maior diferença entre deformação sob regime monotônico e em deformação cíclica, portanto, é encontrada na forma em que os degraus de escorregamento se formam na superfície livre [13]. O carregamento monotônico produz traços de bandas de deformação na superfície do corpo de prova em forma de “escada”. Já a deformação cíclica provoca uma superfície rugosa, composta por “montanhas” e “vales”, que são conhecidos como “extrusões” e “intrusões”. Esses se formam nos locais onde as PSBs emergem na superfície. Ainda, a criação de PSBs são exclusivas na deformação cíclica, assim como a existência de uma região, na curva de saturação tensão-deformação (Fig. 2.5), onde a tensão de cisalhamento resultante é independente da amplitude de deformação plástica (regime B).

Outra diferença importante se refere à densidade de discordâncias e defeitos produzidos durante a deformação cíclica, que é muito maior quando comparada à deformação monotônica. Em suma, as principais diferenças entre os dois casos são [11]:

- (i) devido ao maior tempo e deslocamentos envolvidos, as estruturas de discordâncias formadas na fadiga estão mais próximas da sua configuração de equilíbrio dinâmico do que aquelas formadas durante deformação unidirecional;
- (ii) os movimentos repetitivos da fadiga minimizam o aparecimento de vetores de Burgers locais, que são prevalecem após a deformação monotônica;
- (iii) a densidade de discordâncias é muito maior quando o material é submetido á fadiga.

Todos os mecanismos de deformação cíclica descritos podem ser aplicados em parte para a deformação em policristais; contudo, a presença de contornos de grão, inclusões e outras complexidades comuns em metais comerciais, altera a atuação desses mecanismos. Enquanto em um monocristal uma simples PSB pode se espalhar por toda a extensão do cristal, em um metal policristalino as PSBs estão confinadas a um determinado grão, devido à incompatibilidade de escorregamento entre grãos vizinhos. Com altos graus de deformação os policristais podem exibir estruturas celulares. [4, 9].

2.2.3 Mecanismos de nucleação de trincas de fadiga:

Como exposto, durante a deformação cíclica a superfície do material, inicialmente lisa, começa a apresentar aumento em sua rugosidade em diferentes planos de escorregamento, criando as chamadas extrusões e intrusões. Este aumento de rugosidade é um responsável pela irreversibilidade do escorregamento cíclico. Esta irreversibilidade (a principal causa para o aumento de rugosidade superficial e a disposição para nucleação de trincas de fadiga) surge devido à influência de vários fatores, entre eles (i) escorregamento em diferentes planos de escorregamento durante o carregamento e descarregamento do ciclo de fadiga, como consequência do

escorregamento com desvio (“cross-slip”) ou formação de emaranhados de discordâncias, travas e degraus (jogs); (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;

2.2.4 Efeitos de sobrecargas e de subcargas

A taxa de crescimento de trincas durante o processo de fadiga é seriamente afetada pela variação nas amplitudes das cargas aplicadas, sejam elas sobrecargas, subcargas ou carregamentos em bloco [18 - 20]. Nesta revisão, o termo “sobrecarga” é utilizado para descrever esses tipos de variação no regime de carregamento. A seguir são explicitados conceitos fundamentais [18, 19]:

- Dada uma amplitude de tensão média do carregamento (S_{BG} – Tensão de “*Background*”, ou de Fundo), é conhecida como sobrecarga qualquer pico de tensão que seja maior do que a S_{BG} . Sobrecargas também podem ser definidas em função do fator de intensificação de tensões K ;
- Assim, uma subcarga é definida como um vale, com valor abaixo do S_{BG} (ou K_{BG}).

Com isso em mente, abaixo podem ser descritas as principais influências das sobrecargas sobre o crescimento de trinca [18]:

- 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 seqüência de aplicação (interação entre cargas);
- Os efeitos (ou magnitude) da retardo/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 da retardo dependem da taxa de sobre-carregamento (OLR – “Overload Rate”), o valor de K_{BG} quando a sobrecarga é aplicada e da taxa R ;
- 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).

2.2.5 Mecanismos de retardo por sobrecargas:

Os mecanismos sugeridos [18, 19] para explicação da retardo são:

1. 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 a crescimento da trinca, exigindo rearranjo geométrico da mesma, além de afetar todo o estado de tensões nas regiões vizinhas da ponta da trinca.

2. Deflexão ou ramificação da trinca (trincas secundárias): afeta o potencial termodinâmico 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.

3. 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 têm a peculiaridade de agirem na região à frente da trinca. Os dois mecanismos citados logo a seguir, atuam atrás da trinca.

4. Fechamento induzido por plasticidade: existe muita discussão sobre este mecanismo, pois vários pesquisadores argumentam que a plasticidade sempre abre a trinca, ao invés de fechá-la. Porém, recente investigação promovida por Riemelmoser e Pippin apud Sadananda [19] demonstra que a 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 [18, 19] devido às limitações da hipótese concebida sobre as tensões residuais;

5. 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 termodinâmico para o crescimento de trincas. Recentes investigações [19] demonstram que enquanto o fechamento por plasticidade é de difícil ocorrência, o induzido por rugosidade é mais freqüente, porém com uma contribuição muito pequena.

Atualmente ainda existe uma certa discussão [18, 19] 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 termodinâmico para crescimento de trincas em fadiga.

2.2.6 Outros mecanismos de retardo:

Além do mecanismo de fechamento de trincas, muitos outros mecanismos podem alterar a resistência microscópica à fratura por fadiga de um material.

Todos os mecanismos apresentados aqui não causam qualquer melhoria intrínseca à resistência do material a ruptura por fadiga: eles apenas fornecem uma melhoria aparente ou extrínseca. Modificações microestruturais que auxiliam a deflexão de trincas em uma direção de carregamento podem levar a uma severa deterioração da resistência a ruptura por fadiga na direção transversal; e a melhoria na resistência a fadiga pode ser acompanhada por uma deterioração da resistência à nucleação de trincas de fadiga.

2.2.7 Retardo de crescimento de trincas durante fadiga com amplitude variável:

De acordo com a Teoria de Dano Linear [18, 19], quanto maior a amplitude de tensão, maior é a quantidade de dano provocado. Apesar desta afirmação ser confirmada em muitos casos envolvendo nucleação de trincas ou carregamento variável utilizando-se vários espectros de carregamento, as previsões da Regra de Palmgren-Miner são contestadas [18,19] por uma grande gama de experimentos. A prova mais clara contra a validade desta teoria é encontrada em experimentos de crescimento de trincas sob fadiga em amplitude variável, envolvendo sobrecargas: é conhecido que a aplicação de sobrecargas em uma trinca de material dúctil pode causar um severo retardo (ou até mesmo total travamento) do crescimento da trinca. A influência da desaceleração na taxa de crescimento de trincas ou a possibilidade de travamento da mesma é determinada por vários fatores, entre eles: a magnitude da sobrecarga aplicada em relação à tensão cíclica de *background*, o estado de tensões atuante, o ambiente, a taxa de carregamento e os efeitos de fechamento de trincas.

Alguns argumentos têm sido utilizados para explicar a retardo das trincas de fadiga após a aplicação de sobrecargas, com base nos seguintes fenômenos [18]:

1. Tensões residuais compressivas na ponta da trinca: a aplicação de uma sobrecarga provoca um aumento na extensão do campo de tensões residuais. É aceito que esse aumento “fecha” a ponta da trinca (que está sujeita a um menor ΔK após a sobrecarga) causando a retardo do crescimento de trincas. Este retardo persiste até que a ponta da trinca ultrapasse o campo de tensões. Resultados experimentais demonstram certos desvios entre as dimensões da zona plástica e o tempo de retardo;

2. Fechamento de trinca induzido por plasticidade: o aumento da deformação plástica causado pelas sobrecargas provoca elevados níveis de fechamento de trinca induzido por plasticidade, principalmente quando a trinca (pós-sobrecarga) avança através da zona plástica que também sofreu os efeitos da sobrecarga. Experimentos atestam o aumento do fechamento de trinca após sobrecargas [19];

3. Alterações na geometria da trinca envolvendo arredondamento ou deflexão da ponta da trinca: as alterações do fator de intensificação de tensões nas proximidades da ponta da trinca, resultante da alteração geométrica da mesma, auxiliam a retardo;

4. Ativação do mecanismo limiar de fadiga no regime pós-sobrecarga: se após a sobrecarga o ΔK atuante for reduzido (devido à atuação de um ou mais dos mecanismos citados) a um valor típico da região próxima ao limiar (*near threshold*), os mecanismos exclusivos deste regime, como a fratura em estágio I e o fechamento da trinca induzido por óxidos, podem ser ativados após a aplicação de sobrecargas. Estas alterações resultam em maior retardo no crescimento de trincas.

Ainda em complemento aos mecanismos citados, pode-se incluir o encruamento da ponta da trinca. Todas as influências descritas possuem como referência a aplicação de sobrecargas de tração. As sobrecargas compressivas tendem acelerar a taxa de

crescimento de trincas, pelo fato de causarem a geração de campos de tensões residuais compressivos e anularem o arredondamento da ponta de trinca.

2.2.8. O carregamento em espectro.

O desafio de prever o comportamento de diversos componentes em fadiga levou os pesquisadores à utilização de métodos que possibilitam a análise dos ciclos de tensão em condições reais de solicitação e, ainda permitem o uso das informações do histórico de carregamento durante o tempo de funcionamento do mesmo. Esta técnica de predição em simulação de serviço é possível através do uso dos espectros de carregamento como ponto de partida. Neste tipo de gráfico são registradas as amplitudes de serviço em função do tempo, permitindo a simulação de casos reais de uso. Os desenvolvimentos nesta área começaram na indústria aeronáutica, com o intuito de investigação em desastres ocasionados por falha de fadiga prematura. Em princípio foi compreendido que as asas de aeronaves estavam dinamicamente carregadas durante o voo, com várias cargas de amplitudes variáveis. Em 1930 um mecanismo para medição da deformação durante o voo foi concebido, e o espectro carga – tempo foi gravado em uma placa de vidro e analisado ao microscópio. Os pioneiros neste campo de estudo foram Gassner e Teichmann [21, 22].

A técnica para análise dos ciclos variáveis foi a de considerar os pontos extremos (máximos e mínimos) como relevantes, e usando estatística para contabilizar estes picos deu origem aos espectros unidimensionais (1D). Outras ferramentas deram origem aos espectros bidimensionais (2D), onde eram considerados intervalos entre picos consecutivos, considerando diferentes médias para estes intervalos. Gassner [21] introduziu o chamado *testes de fadiga programado*, onde uma sequência de ciclos de amplitude constante reproduzia os efeitos das amplitudes variáveis que ocorriam em

serviço. Uma simulação mais realista do espectro de carregamento era impossível com o maquinário disponível na época.

Nos anos subseqüentes foram introduzidas novas técnicas de aquisição de dados, chegando até a utilização de unidades sem fios em aeronaves ou veículos em movimento, ou bancadas de testes inteligentes que utilizam o sinal coletado durante o uso real, para simular as condições de uso [22].

A aplicação do método Rainflow em conjunção com o método de acúmulo de danos linear deixa implícita a hipótese de que os efeitos dos ciclos de tensão/deformação do espectro não dependem da história de carregamento [21]. A literatura estabelece claramente que tal hipótese não é válida em fadiga. De fato, sabe-se, por exemplo, que a ordem de aplicação de amplitudes altas e baixas de carga em um carregamento em bloco afeta a vida em fadiga do material, reduzindo-o quando o bloco de baixa amplitude é aplicado inicialmente. Este fenômeno, conhecido como “Interação de cargas” (*load interaction*) pode ser incorporado em critérios de acúmulos de dano mais sofisticados que o linear [09, 23 - 29]. Mas, hoje em dia se aceita que a dependência da vida em fadiga de um material na história de carregamento é mais complexa do que pode ser tratado por um simples critério de acúmulo de dano (que, por sua natureza, é local). Isto fica evidente quando se analisa o efeito de sobrecargas e subcargas na propagação de trincas de fadiga.

2.2.9 O Método Rainflow:

O Método Rainflow foi introduzido por Endo apud Rychlik [7] e em sua definição original era um complicado algoritmo, que identificava os ciclos fechados de histerese em um plano de tensão-deformação..

Em estudos de fadiga é geralmente aceito [6, 7] que a forma da curva que conecta dois pontos extremos intermediários durante o carregamento não apresenta (ou

pelo menos é de pouca) importância, e que somente os valores dos máximos e mínimos locais da sequência de carga é que realmente influenciam a vida em fadiga. Assim, um carregamento, para aplicações em fadiga, pode ser caracterizado pela sua sequência de pontos extremos, também chamados de pontos de inflexão.

Suponha-se um processo estocástico $\{X_t\}_{t>0}$ com um número finito de extremos ocorrendo em tempos $t_1, t_2, \dots$ para simplificação, considere-se que o primeiro extremo é mínimo. Assim, a sequência de pontos de inflexão é definida por:

$$\begin{aligned} PI(\{X_t\}) &= \{X_{t_1}, X_{t_2}, X_{t_3}, X_{t_4}, \dots\} \\ &= \{m_0, M_0, m_1, M_1, m_2, M_2, \dots\} \end{aligned} \quad \text{eq. (4)}$$

onde m_k indica um mínimo e M_k um máximo

A contagem de ciclos e os ciclos de histerese podem se relacionar através do modelo Masing para a dissipação energética nos materiais (veja Brokate e Sprekels apud Johannesson [6]). Existem várias definições para ciclos rainflow na literatura [6, 10, 21 – 25], contudo basicamente elas variam no tratamento dos ciclos de histerese, se os mesmo estão fechados ou não. Aqui é apresentada uma definição apresentada por Rychlik [7]:

Sendo $X(t)$, $0 < t < T$, uma função com finitos máximos locais de altura M_k , ocorrendo em tempos t_k . para o k -enésimo máximo em tempo t_k , definem-se os seguintes mínimos à esquerda e à direita.

$$\begin{aligned} m_{k-} &= \inf \{X(t) : t_{k-} < t < t_k\} \\ m_{k+} &= \inf \{X(t) : t_k < t < t_{k+}\} \end{aligned} \quad \text{eq. (5)}$$

O método Rainflow então é definido por:

Definição (RFC): Em cada máximo local M_k , um outro deve alcançar o mesmo nível, seja atrás (esquerda) ou na frente (direita). Os mínimos m_k^- e m_k^+ , um em cada lado são identificados. Aquele mínimo que representa o menor desvio em relação ao máximo M_k é definido como o correspondente mínimo rainflow m_k^{RFC} . O K -enésimo ciclo rainflow é definido como (m_k^{RFC}, M_k) .

A definição é melhor entendida graficamente (Fig. 2.7):

Fig. 2.7: Definição do RFC (*Rainflow Counting Cycle*) [7].

O ciclo rainflow é um par consistindo de um ponto mínimo m_k^{rfc} e um máximo M_k , onde a amplitude é a característica mais importante para avaliações em fadiga.

Muitas vezes um ciclo é representado como um par alcance-média (Fig. 2.8):

- Amplitude: $(M_k - m_k^{rfc}) / 2$;
- Alcance (range): $M_k - m_k^{rfc}$;
- Média: $(M_k + m_k^{rfc}) / 2$

Fig. 2.8: Definição de amplitude, faixa (range) e média de um ciclo [7].

Este método é mundialmente conhecido e é descrito como pela norma ASTM E-1049 e apesar de não refletir o princípio físico exato da teoria de acúmulo de dano, este

procedimento representa com grande realidade a severidade dos carregamentos variáveis em função do tempo.

O dano de fadiga não pode ser calculado para ciclos de carregamento incompletos, onde o escoamento reverso não for completado. Assim o dano em fadiga está associado com a plasticidade reversa [7]. Este é a base para a contagem de ciclos por rainflow, que pode ser visualizada na figura 2.9:

A figura (a) mostra inúmeros ciclos de pequena amplitude contidos em um ciclo maior. Se estes ciclos menores fossem ignorados, o ciclo completo seria representando pela figura (b). Todos estes ciclos menores são contidos dentro de um ciclo maior de histerese, como mostrado em (c), pode ser visto que a inclusão dos ciclos menores não influencia o ciclo principal.

Fig. 2.9: Ilustração esquemática sobre os significados da contagem por rainflow.

O procedimento rainflow não considera extremos picos ou vales que podem estar espaçados pelo tempo. A técnica de contagem é baseada no conceito de ciclos fechados de tensão-deformação.

2.3 Análise de sinais

2.3.1 Introdução.

A discussão anterior toma como implícito que o carregamento (ou seja, a função X_t) é conhecido. Na prática, entretanto, ela é resultado de uma medida e está sujeita a erros estatísticos e sistemáticos. O sinal medido deve ser, portanto, analisado antes de ser submetido ao método Rainflow. Este procedimento, eventualmente, afeta o resultado do procedimento.

Os resultados quantitativos da observação de um fenômeno físico são os valores assumidos por uma grandeza X , função de uma variável independente t . na maioria das aplicações, a função $X(t)$ será uma função do tempo, podendo, porém, ser função de um outro parâmetro físico, como espaço. Esta função do tempo tem o nome de sinal [30].

Um sinal senoidal é o tipo mais comum que se pode obter em fenômenos físicos e é caracterizado por uma amplitude X , uma fase β e uma frequência ω . A senóide é a base da análise espectral de sistemas lineares [30, 31].

Para um sistema eixo-disco¹ em uma máquina real, são considerados efeitos de acoplamentos e juntas universais, engrenagens, etc. tem-se um movimento muito mais

¹ Mecanismo composto por um eixo, acionado por um motor, e um disco na outra extremidade. Trata-se de uma explicação genérica para um sistema onde se tem um atuador (motor), um elemento de ligação (eixo) e um corpo giratório (disco), possuindo em suas uniões os elementos tradicionais de construção mecânica: rolamentos, acoplamentos, etc., por exemplo: um ventilador de teto, sendo a hélice tratada como disco.

complexo do centro do disco, porém esse movimento conservará a característica básica de ser repetitivo a cada volta do conjunto. Esse tipo de sinal ou excitação é chamado de periódico. Já, ao se tentar estudar o sistema sem desbalanceamento ou sem girá-lo, e considerando-se que os amortecimentos no sistema dissipam energia, o movimento inicial se extinguirá com o tempo, e o sinal jamais será periódico. Este tipo de sinal, que existe por apenas um período limitado de tempo, é chamado transitório.

Os dois tipos de sinais explicados têm a propriedade de serem razoavelmente representados por expressões matemáticas, e por isso são chamados de sinais determinísticos. Já os sinais que não podem ser representados são chamados de aleatórios ou estocásticos.

Um sinal aleatório não é um sinal em particular, mas sim um conjunto de sinais [30]. Contudo, este conjunto (finito ou não) de sinais não é suficiente para descrever o sinal aleatório de maneira completa. Para tanto, é necessária a adição de elementos matemáticos (como as leis de probabilidade) que explicitem a frequência de ocorrência de cada membro deste conjunto de sinais. A um conjunto de valores, que são os resultados de uma experiência aleatória, pode-se associar uma variável x . Esta variável é chamada de variável aleatória. Porém, ao se considerar que se os resultados destas experiências aleatórias, ao invés de números fossem funções com um ou mais parâmetros, tem-se o sinal aleatório.

Para o estudo dos sinais determinísticos são utilizadas a série e a transformada de Fourier [31], resultado no que se conhece como análise espectral do sinal. Já os sinais aleatórios necessitam de outras ferramentas, que serão explicadas a seguir.

2.3.2 Aspectos básicos das séries de Fourier.

A transformada de Fourier (TF) é a principal ferramenta da Teoria do Tratamento de Sinal [31]. Em termos de análise espectral, é a ferramenta fundamental,

seja o sinal determinístico ou aleatório. A TF não adiciona informação ao sinal; apenas transforma a informação por ele veiculada em uma outra forma, mas fácil de ser interpretada.

A TF de uma função ou sinal $x(t)$ é:

$$\begin{aligned} TF(x(t)) = X(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2\pi j f t} dt \\ TFI(X(f)) = x(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{2\pi j f t} df \end{aligned} \quad \text{eq. (6)}$$

Onde f tem unidade de Hz ou 1/seg.

Para sinais periódicos, é utilizada uma série de Fourier. Todo sinal periódico pode ser decomposto (ou expandido) em séries de Fourier. [31], na forma:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi f_0 t) + b_n \sin(2\pi f_0 t)] \quad \text{eq. (7)}$$

Os sinais aleatórios, por sua vez, são caracterizados por momentos estatísticos, possuindo um domínio temporal infinito e, portanto, energia infinita. Por isso, este tipo de sinal não possui uma TF. Assim, a sua análise é realizada através do uso da Densidade Espectral de Potência Estimada, que é a TF da função de autocorrelação do sinal:

$$P_{xx}(t) = \frac{1}{2\sigma_0} \left| \int_{-\sigma_0}^{\sigma_0} x(t) e^{-2\pi j f t} dt \right|^2 \quad \text{eq. (8)}$$

Esta revisão básica de análise de sinais tem como objetivo situar o leitor sobre as funções matemáticas utilizadas para análise dos sinais aleatórios. Tais funções estão inclusas no algoritmo de RFC do Matlab®.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Os elementos envolvidos

3.1.1 O veículo testado

O veículo alvo deste trabalho é um automóvel leve de passeio, produzido por uma importante indústria automobilística. As principais características do veículo são apresentados na tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Características do veículo testado.

Dimensões externas (mm)	
Comprimento	4.200
Distância entre eixos	2.470
Largura	1.650
Altura	1.570
Pesos (kg)	
Em ordem de marcha	1.100
Carga útil	490
Capacidade máxima de passageiros	5

3.1.2 A suspensão traseira

A suspensão de um automóvel é considerada como um dos componentes de maior segurança do mesmo. É responsável por estabelecer a altura do veículo em relação ao solo (propiciando a capacidade de transpor obstáculos), pela condução do veículo (através dos sistemas de direção e freios) e, principalmente, a suspensão é responsável por absorver os impactos e irregularidades do piso, fornecendo conforto aos ocupantes do automóvel. Atualmente, a construção das suspensões obedece a um certo padrão; o veículo utilizado neste estudo não foge à regra: equipado com suspensão dianteira independente e traseira de eixo rígido e molas helicoidais. Como o foco deste

estudo é a suspensão traseira, a seguir serão detalhados os principais componentes da mesma.

O eixo traseiro: trata-se de um corpo metálico, composto por perfis dobrados e soldados, cuja função é interligar as rodas com a carroçaria do veículo, através de um sistema de amortecimento. No nosso caso, o conjunto roda / pneu, juntamente com o sistema de freios a tambor é unido a uma extremidade do eixo através do cubo da roda (vide figura 3.1). Por sua vez, o corpo do eixo é ligado à carroçaria do veículo por meio de coxins de borracha (para permitir movimentação relativa e absorção de impactos), formando uma articulação. Os coxins são presos na carroçaria através dos seus suportes, que são feitos em chapa estampada e soldados no assoalho do veículo. Para termos a altura correta da suspensão, são utilizadas molas helicoidais, que se apóiam no corpo do eixo e na carroçaria. Por último, para permitir o amortecimento de choques e o curso de suspensão são utilizados amortecedores hidráulicos, que são fixados de modo semelhante às molas helicoidais (uma extremidade no eixo, outra na carroçaria). Para maiores detalhes veja figura 3.1. O corpo do eixo traseiro é composto dos elementos descritos abaixo, com as respectivas composições químicas exibidas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composições nominais dos aços usados nos elementos do corpo do eixo traseiro aqui analisados.

Composição	Perfil “V”	Escora e braço tubular
C	0,14% max.	0,10 max
Si	0,30% max	---
Mn	0,3% a 1,4%	0,02% a 0,45%
P	0,02% Max	0,03% max
S	0,03% Max	0,05% max
Al	0,02% a 0,07%	0,02% a 0,07%
Ti	< 0,01%	---
Nb	<0,05%	---

Fig. 3.1: Esquema da suspensão traseira, apresentando o eixo traseiro, amortecedores, molas e cubos de rodas.

3.1.3 Ensaios em campo – a pista de testes.

Um dos requisitos necessários para a certificação de um veículo é o teste de rodagem em uma pista controlada, que simula os extremos críticos sob os quais o automóvel estará submetido durante seu uso pelo cliente. Tal pista é composta por trechos retos e com asfalto regular, piso com paralelepípedos, bueiros, buracos, ondulações e “costelas de vaca” (obstáculos transversais), além de valetas com água. Os obstáculos são dimensionados de forma que, ao atingir uma certa quilometragem de teste, o veículo tenha sido submetido a uma quantidade total de dano acumulado bem superior ao que seria quando utilizado por um cliente, mesmo em condições reconhecidas como adversas, garantindo assim o seu bom funcionamento nas ruas de verdade. Os principais obstáculos são descritos a seguir:

- Trecho de corcovas de concreto com cerca de 48 metros de extensão: este obstáculo simula o uso do curso inteiro de suspensão. As corcovas são de tamanhos variáveis dependendo do tipo de veículo testado (automóvel de passeio ou de transporte de carga);
- Tanque de passagem em lama com 65 metros de extensão: utilizado para simular passagem em terrenos enlameados. A profundidade da lama é controlada;

- Trecho de pista abaulada não-plana com extensão de 600 metros: estimula a suspensão do veículo simulando a passagem por terrenos acidentados e com leves abaulamentos. Aqui é alcançada uma das velocidades mais elevadas da pista inteira;
- Trecho de pista abaulada e costela de vaca com extensão de 30 metros: trecho que simula transição entre piso irregular (abaulado) e obstáculo severo (costela de vaca);
- Trecho de calçamento belga (paralelepípedo) com extensão de 350 metros: simula o tráfego sobre paralelepípedos, muito comum nas cidades brasileiras. Aqui ocorre grande excitação de vibração dos componentes;
- Tanque de passagem em água salgada com extensão de 40 metros: além de simular a passagem em terrenos alagados, este tanque também conta com o agente corrosivo do sal;
- Trecho de 9 metros com passagens de nível: simulação das famosas lombadas e valetas, com profundidade variável;
- Trecho de 180 metros com calotas metálicas: simulação de tampas de bueiro elevadas;
- Trecho de 105 metros com vigas transversais e buracos: simula transposição de severos obstáculos transversais, semelhantes a trilhos de trem. Obtenção de grandes choques na suspensão do veículo;
- Trecho de esforços laterais e acionamento da direção;

Para a realização dos testes, o veículo é carregado com 80% de sua carga máxima permitida, sendo este peso alcançado através do uso de bonecos (simulando pessoas) e lastros.

3.1.4 O simulador de estradas

Este dispositivo, largamente utilizado na indústria automobilística consiste em uma plataforma (onde o veículo completo é posicionado) e atuadores hidráulicos ou pneumáticos fixados às suas rodas, que excitam o veículo como se o mesmo estivesse rodando em uma pista real. Os simuladores mais simples possuem apenas 4 canais, onde

são provocados estímulos no sentido vertical (um canal para cada roda). Já os mais sofisticados possuem 24 canais, sendo 6 por roda (aceleração vertical, horizontal em dos sentidos, longitudinal em 2 sentidos e frenagem).

Fig. 3.2: Veículo no dispositivo simulador de estradas MTS.

O controle da movimentação destes atuadores é executado por computadores, onde é possível simular a rodagem em diversos tipos de pista e terrenos, bastando para tanto possuir os sinais característicos da estrada em questão. Estes sinais são coletados através do uso de acelerômetros instalados no veículo, e o sinal medido durante o tráfego na pista escolhida. Neste caso, foram utilizados os sensores MTS SWIFT 30T (Spinning Wheel Integrated Force Transducer). Este sinal (geralmente na forma de deformação x tempo, aceleração x tempo ou tensão atuante x tempo) é transferido para o computador, onde pode ser editado antes de ser utilizado no simulador de estradas. Se for necessário realizar um ensaio de bancada em um único componente, é possível utilizar o sinal correspondente à sua excitação (cargas verticais, no caso de amortecedores, por exemplo) para testar o componente isoladamente.

Fig. 3.3: Sensor MTS SWIFT 30T montado em veículo. Cortesia MTS Systems.

No momento em que o sinal é coletado e transferido para o computador, ocorre a chamada edição de sinais que geralmente, consiste na remoção de trechos que não são interessantes para a análise. Trechos em que o veículo trafegou em locais planos ou em pisos sem irregularidades comumente são removidos, pois além de reduzir o tempo do ensaio, estes trechos são conhecidos por não representarem muita influência para a fadiga dos componentes.

Atuadores de um simulador MTS Model 349 foram utilizados para atingir a configuração necessária para o teste.

- Atuadores hidráulicos Modelo 244.11, MTS Corp. – 15 kN;
- Atuadores hidráulicos Modelo 204.61, MTS Corp. – 50 kN;
- Transdutores HBM Typ U3 – 10 kN a 2mV/V
- Transdutores HBM Typ U3 – 50 kN a 2mV/V
- Simulador RPC – PC Spectra.

Fig. 3.4: Detalhe do simulador MTS 349.

3.1.5 O sinal

O principal objetivo do simulador de estradas é fornecer resultados mais rapidamente do que a rodagem verdadeira. Assim, para atingir esta meta, o simulador conta com dois fatores preponderantes: a ausência de paradas devidas às necessidades dos motoristas e outras eventualidades, e a possibilidade de simular um trajeto “editado”, com tempo menor de teste e resultados semelhantes ao da rodagem real.

A edição de sinais, como rapidamente definida, consiste basicamente na remoção de trechos do sinal onde o veículo percorre trechos planos, insignificantes para a fadiga. Contudo, ainda existe um outro tipo de edição também muito utilizado: a remoção de trechos que apresentam variações em amplitude muito baixas, sendo esta aceleração, tensão ou deformação. Tais pequenas variações na maioria das vezes são geradas por ruídos durante a medição, ou são mesmo solicitações de baixo ciclo. Novamente aqui, estas baixas oscilações são consideradas insignificantes para a vida em fadiga. Com a remoção destes baixos ciclos, o tempo do teste simulado é reduzido mais ainda, realizando assim os objetivos do simulador de estradas.

Contudo não existe um padrão reconhecido para este tipo de edição de sinal. Uma prática comum é a remoção de ciclos com amplitude menor do que $1/4$ ou $1/5$ do pico máximo de amplitude. Na grande maioria dos casos, o parâmetro de edição é deixado sob responsabilidade do técnico.

O veículo alvo do estudo foi instrumentado com acelerômetros e extensômetros, nos pontos onde as tensões atuantes são críticas (pontas de eixo, braços articulados, amortecedores, terminais de direção, etc.). O sinal foi coletado durante trajeto na pista de testes de uma importante indústria automobilística brasileira, em rodagem com um veículo leve de passeio, respeitando-se os procedimentos de testes, tais como velocidade de trânsito, carga do veículo, pressão de pneus, atitude da suspensão, etc. Após esta etapa, o mesmo é transferido para os computadores onde é editado, utilizando-se o software Spectra[®].

Após a obtenção, o sinal foi editado em duas maneiras distintas, com o objetivo da realização de dois tipos de ensaios específicos:

Remoção de trechos completos de baixíssima ou nula solicitação, como retornos, curvas suaves, declives sem obstáculos, etc. Tal sinal foi utilizado para verificação do comportamento da peça com a ausência de subcargas no espectro de carregamento. A este método é dado o nome de Edição Modo I;

Exclusão de amplitudes menores do que certos valores definidos (cerca de $1/5$ do pico máximo em amplitude). Com o espectro já editado, os ciclos Rainflow foram calculados e a predição de vida em fadiga também. Sobre essa estimativa inicial, foram aplicados outros níveis de filtragem e a vida em fadiga recalculada. A este método é dado o nome de Edição Modo II;

A estrutura da avaliação obedece aos esquemas da figura 3.5:

Fig. 3.5: Fluxogramas do método de predição de vida em fadiga.

3.2 Ensaaios de fadiga

3.2.1 O ensaio em edição Modo I

A sequência deste ensaio é a seguinte:

1- Com o veículo devidamente instrumentado, foi realizado um ciclo de rodagem na pista de testes, para obtenção do sinal correspondente ao mesmo;

2 - Este sinal foi editado em Modo I, conforme descrito, tendo os seus trechos de solicitação extremamente baixa removidos. Vale ressaltar que em nenhum momento houve a remoção de ciclos de baixa amplitude, sendo a edição limitada à extração dos chamados “tempos mortos” de rodagem;

3 - O sinal foi transferido para um simulador, instalado somente nas rodas traseiras do veículo;

4 - O veículo foi ensaiado na rodagem simulada.

O sinal editado em Modo I reduziu o tempo de uma tomada de teste de **30** para **16** minutos, ou seja, uma redução de 47% no tempo de duração do teste. Uma tomada representa o tempo necessário para um volta completa na pista de testes.

O veículo utilizado na simulação manteve todas as suas características rigorosamente iguais aos veículos submetidos aos testes reais, sendo a sua massa descrita na tabela 3.3:

Tab. 3.3: Valores de carga utilizados no ensaio.

Carga máxima admissível no eixo traseiro (para o modelo utilizado de veículo)	840,0 kg
Carga no eixo traseiro utilizada no ensaio (80% da carga máxima)	670,4 kg

Para atingir tal massa no eixo traseiro, foram utilizados como lastros 3 bonecos de 75 kg cada, 52 kg de mantas no porta-malas e 40 kg de mantas posicionadas entre os bancos dianteiro e traseiro.

Neste estudo foram realizados os seguintes testes:

- 3 rodagens reais com veículo completo;
- 3 testes em simulador.

A eliminação das paradas pode ser compreendida fisicamente através da figura 3.6:

Fig. 3.6 : Diagrama comparativo entre tempo de testes.

3.2.2 O ensaio em edição Modo II

Este ensaio foi elaborado com o intuito de verificar a influência de sutis diferenças no sinal editado no cálculo final de vida em fadiga. Assim, o sinal coletado foi editado com vários níveis de filtragem (remoção de ciclos de amplitudes extremamente baixas). Este parâmetro de filtragem é denominado de fator h e, nesta avaliação, varia de 0,0 (sem filtragem) até 0,3 (remoção de ciclos com amplitude menor e igual a 0,3). Vale a pena ressaltar que este ensaio em Modo II foi realizado de maneira

estritamente computacional, sendo que nenhum componente foi ensaiado sob as condições definidas pela variação do fator h . Este tipo de edição tem como objetivo fornecer uma visão geral de como a ínfima variação de um parâmetro que pode ser facilmente controlado, afeta o resultado final da simulação.

4.RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de fadiga e da análise pelo RFC. Os resultados são apresentados em dois conjuntos (apresenta-se também o critério de aprovação do componente):

- Ensaio de Durabilidade Veicular: 12.000 km rodados na pista, sem apresentar danos;
- Ensaio em Simulador de Estradas: 270 horas de simulação, sem apresentar danos (quantidade de tempo equivalente à quilometragem do teste anterior).

4.1 Comparação qualitativa dos ensaios de fadiga:

Após a rodagem em pista de teste, o suporte do eixo costuma apresentar trincas na região de junção, por solda, entre ele e a longarina traseira. Mesmo com essa falha, o comportamento da peça é considerado satisfatório, por não apresentar sintomas (ruído, afetar dirigibilidade ou segurança, corrosão, etc.) e pelo motivo da mesma apresentar-se em uma quilometragem elevadíssima da vida do veículo.

Já nos testes realizados no simulador de estradas, as mesmas regiões terminam o ensaio *sem* apresentarem qualquer indício de trinca, ou no pior dos casos, apresentando pequenas fissuras de cerca de 2 a 3 mm.

4.2 Resultados dos ensaios

4.2.1 O ensaio em edição Modo I:

Os resultados resumidos podem ser vistos na tabela 4.1. As seguintes definições podem ser aplicadas à interpretação da tabela:

- Pequenas trincas: aparecimento de pequenas trincas (principalmente ao redor de pontos de solda), sem que ocorra comprometimento estrutural (ruído, infiltração de água ou corrosão);

- Ruptura parcial: rompimento dos pontos de solda ou do elemento em si causando leve deslocamento entre as partes podendo causar comprometimento estrutural;
- Ruptura total: soltura total dos seus pontos de fixação.

Tab. 4.1 : Resultados obtidos.

TESTE	DURAÇÃO	RESULTADO
Real A	12.000 km	Pequenas trincas
Real B	6.696 km	Ruptura total
Real C	10.992 km	Ruptura parcial
Simulação A	12.000 km	Pequenas trincas
Simulação B	12.000 km	Pequenas trincas
Simulação C	14.000 km	Pequenas trincas

Fig. 4.1: Resultado da rodagem real A: pequenas trincas na junção do suporte do eixo com a longarina traseira (região lateral).

Fig. 4.2: Resultado da rodagem real B: ruptura total dos pontos de solda, provocando deslocamento do suporte do eixo traseiro.

Fig. 4.3: Resultado da rodagem real C: ruptura parcial dos pontos de solda, provocando pequeno deslocamento do suporte do eixo traseiro.

Fig. 4.4: Resultado da rodagem simulada A: pequenas trincas na junção do suporte do eixo com a longarina traseira (região lateral).

Fig. 4.5: Resultado da rodagem simulada B: pequenas trincas na junção do suporte do eixo com a longarina traseira (região lateral).

Fig. 4.6: Resultado da rodagem simulada C: pequenas trincas na junção do suporte do eixo com a longarina traseira (região lateral).

Assim, tendo em mente o que está definido na Revisão Bibliográfica, pode-se observar na figura 3.6 que as paradas realizadas no teste real podem agir como se fossem subcargas (uma subcarga é definida como um vale, com valor abaixo do S_{BG} ou K_{BG} , sendo este último representado pelos esforços médios que ocorrem durante toda a

rodagem). Também como definido anteriormente, as subcargas causam aceleração na taxa de crescimento das trincas. Esta aceleração pode ser a responsável pelas rupturas ocorridas nos testes executados de forma real, ou melhor, responsável pela maior quantidade de danos nestes testes.

4.2.2 O ensaio em edição Modo II:

Obedecendo a estrutura demonstrada, este ensaio restringiu-se à edição do sinal removendo os ciclos e baixa amplitude.

O histórico é representado na figura 4.1, onde no eixo vertical tem-se a amplitude de carga e no horizontal o tempo expresso em segundos. Para melhor visualização é apresentado somente uma janela do histórico, com a faixa e tempo limitada aos 100 primeiros segundos de solicitação.

Fig. 4.7: Histórico de carregamento no eixo traseiro. Trecho limitado a 100 segundos.

4.3 Contagem de Ciclos por RFC.

Por meio do algoritmo matemático (vide Apêndice A) e com base no espectro definido acima, pode-se calcular o espectro de ciclos *rainflow*, representada pela figura abaixo. Como pode ser observado existem duas curvas resultantes da extração de ciclos: a linha cheia corresponde ao espectro diretamente calculado, ou seja, sem a filtragem. Já a linha tracejada representa o resultado da filtragem com um fator $h = 0,2$, significando que ciclos *rainflow* com amplitude menor do que 0,2 são removidos do espectro.

Fig. 4.8: Dados rainflow originais e filtrados com $h = 0,2$. Janela limitada a 60 segundos.

Na figura 4.9 tem-se uma representação gráfica da contagem de ciclos *rainflow*. Pode-se comparar o efeito do filtro sobre as amplitudes de baixo ciclo.

Fig. 4.9: Representação do número de ciclos *rainflow*, com e sem filtragem.

As diferenças nos gráfico da figura 4.9 são melhores visualizadas nos histogramas da figura 4.10, onde redução significativa na quantidade de ciclos de baixa amplitude pode ser percebida em destaque.

Fig. 4.10: Histograma de distribuição de ciclos *rainflow*, com e sem filtragem.

4.4 Cálculo de Vida

Para efeito comparativo, foi realizado o cálculo da vida útil remanescente do componente testado, tendo como base o espectro de carregamento obtido. Tal cálculo foi executado por meio de algoritmo no Matlab[®][34], apresentado no Apêndice A, utilizando-se a regra de acúmulo de dano linear. Nesta abordagem, os fatores de

filtragem matemática h utilizados foram de 0,0 (sem filtragem), 0,2 e 0,3. Na tabela 4.2 pode ser verificada a influência do fator h na vida remanescente.

Tab. 4.2: Valores de vida (ciclos) em função do valor h .

Fator h	Valor 1	Valor 2	Valor 3	Valor 4	Valor 5	Vida média (ciclos)
0,3	1,23E+07	1,18E+07	1,21E+07	1,24E+07	1,19E+07	1,21E+07
0,2	1,05E+07	1,00E+07	1,03E+07	1,06E+07	1,01E+07	1,03E+07
0,0	1,00E+07	1,01E+07	8,99E+06	1,08E+07	9,87E+06	9,94E+06

5. DISCUSSÃO

Para um ensaio de fadiga ser aplicável na indústria, este deve obedecer aos seguintes requisitos: Representabilidade, Repetibilidade e Transferibilidade.

Diz-se que um ensaio de um componente apresenta boa Representabilidade quando este consegue, com maior ou menor grau de precisão, fornecer de maneira estatisticamente comprovada e eficiente, uma amostra que represente todo o universo de componentes sendo utilizados no espaço amostral de referência. No caso aqui aplicado, os resultados dos ensaios que conseguem suprir tal requisito básico representam fielmente as condições de uso do veículo pelos seus usuários. Esta característica representa a aleatoriedade e determinação estatística do ensaio.

Já a Reprodutibilidade é a propriedade possuída por um ensaio cujas características conseguem serem reproduzidas intencionalmente, sendo que as possíveis variações, oriundas de fenômenos físicos ou outros, não afetem a sua representabilidade. Novamente, no caso da indústria automotiva, este requisito é satisfeito através do uso de procedimentos e equipamentos adequados, de acordo com o ensaio que se pretende realizar.

A Transferibilidade pode ser definida como a capacidade apresentada por um determinado ensaio ou experimento em reproduzir fielmente, através do uso de corpos-de-prova ou sistemas mecânicos, o estado de tensões ao qual o componente real estará submetido durante serviço. Logicamente a primeira vista, pode-se parecer impossível prever, com exatidão satisfatória, os esforços aplicados a um componente durante sua vida útil (principalmente devido aos vários fatores que o mesmo está sujeito durante o uso), porém uma estimativa do estado de tensões atuante durante a grande maioria de

sua vida útil sob condições normais, já teria teoricamente a capacidade de prever bons resultados.

A discussão sobre a eficácia dos ensaios simulados de fadiga na indústria é o foco de uma intensa discussão, contando com opiniões bem distintas entre os autores: Schütz [32] chega ao extremo de dizer que não existe substituto direto para os ensaios reais de fadiga, e que os softwares utilizados nas simulações contêm inúmeros erros conceituais; já Newman [24] exalta, com o uso de diversos modelos matemáticos de simulação, a eficácia da predição de fadiga nos ensaios na indústria aeronáutica: no seu artigo, por exemplo, ele demonstra a proximidade entre a taxa de crescimento de trincas calculada por seus modelos e a taxa que foi encontrada experimentalmente. Schütz, por sua vez cita que o caso da predição de vida em fadiga sob amplitude variável permanece sem solução: cálculos executados através de Miner e suas variantes, ou até mesmo os que utilizam a abordagem de deformação local, não conseguem obter uma precisão suficiente. Ele ainda cita que componentes que antigamente não eram considerados como críticos à fadiga, agora demonstram falhas deste tipo, tais como as tubulações de óleo no Mar do Norte. Em seu artigo [21] Schijve assume uma posição moderada entre os autores já comentados, dizendo que predições de vida em fadiga precisas não serão obtidas em um futuro muito próximo, sendo a regra de Miner uma simples extrapolação de um fator oriundo do carregamento sob amplitude constante para o de amplitude variável. Schijve também expõe que um teste de simulação de serviço não está livre de questões: primeiro pelo motivo de se tratar de um teste acelerado (danos de anos simulados em dias), distorcendo a influência dos fatores dependentes do tempo, tais como a corrosão. E depois, deve-se conhecer profundamente o histórico de serviço do componente; ou seja: a simulação ideal deve considerar as diferenças ocasionadas pelo ambiente e o uso do componente. Devido a todas essas dificuldades, as predições devem

conter fatores de segurança baseados na experiência, informação dos dados do espectro, conhecimento das condições de uso, variações estatísticas e conseqüências das falhas de fadiga. A precisão limitada das predições acaba enfatizando o significado de simulações realísticas. Assim sendo, Schijve conclui o artigo dizendo que as indústrias, conhecendo as limitações das predições, tentam diminuir o grau de extrapolação das mesmas através do uso de simulações cada vez mais próximas do real uso do componente em serviço. Apesar do relativo sucesso em reduzir a extrapolação, o resultado ainda é obtido por meio de uma simulação, restrita pelas possibilidades experimentais. A validação deste teste, segundo o autor, ainda requer uma profunda compreensão do comportamento em fadiga dos componentes em serviço.

Ainda, como citado por Schütz [32], a transferibilidade de resultados experimentais de fadiga (obtidos com corpos de prova, por exemplo) para componentes reais, ainda figura como um item problemático. Ensaios demonstraram que a vida em fadiga de componentes é muito menor do que a encontrada para os seus respectivos corpos de prova.

Um exemplo prático desse fenômeno é o comportamento de componentes veiculares quando submetidos aos chamados “testes de bancada” (ou simulados) e testes reais dinâmicos. Na imensa maioria dos casos, o exposto confirma-se novamente: a vida em fadiga durante os testes reais é menor do que a alcançada em simulações. Mesmo com resultados em campo satisfatórios, este fato representa um possível problema de transferibilidade dos dados, conforme comentado por Schütz [32].

Por exemplo, no presente trabalho observou-se que ensaios realizados de forma simulada apresentaram um comportamento muito menos severo em relação aos ensaios realizados de forma real (em campo). Os resultados das rodagens reais variaram do aparecimento de pequenas trincas até a ruptura total do eixo traseiro, passando por uma

grande ruptura parcial. Já os ensaios em simulador apresentaram somente o surgimento de pequenas trincas no componente.

Apesar deste fenômeno ser pouco estudado, possíveis erros de transferibilidade em ensaios de fadiga podem levar a resultados catastróficos ou, no mínimo, economicamente desfavoráveis [32].

Como exercício ilustrativo, imagine o desenvolvimento de toda uma suspensão dianteira de um automóvel de passeio, onde os suportes de suspensão (peça vital para o funcionamento do sistema) foram dimensionados considerando o histórico de tensões disponíveis em bancada; por se tratar de um componente de segurança, o mesmo deve ser aprovado primeiramente nos ensaios simulados para somente depois, ser testado em veículo. Assim, componentes protótipos são confeccionados e testados em bancadas por horas, resultando em uma pré-certificação de cerca de € 80.000,00 a € 100.000,00. Após aprovação, novos componentes são montados em veículos protótipos (que custam aproximadamente € 500.000,00 cada veículo) e são submetidos a testes de rodagem onde, devido a problemas de transferibilidade, podem apresentar falhas prematuras, resultando em um novo, demorado e oneroso processo de re-certificação. Estas falhas podem ser associadas à discrepância entre os resultados dos testes de bancada, que são realizados na maioria das vezes em uma fase inicial do projeto, e os testes em situações reais. Discrepâncias estas causadas, em parte, pelo fenômeno da transferibilidade.

Assim sendo, este trabalho compara os resultados obtidos em testes de rodagem de veículos e ensaios simulados (chamados de simuladores de estradas), tendo como objeto de estudo suporte do eixo traseiro de um veículo de passeio. Este componente foi escolhido para análise devido ao fato de ser uma peça que praticamente é submetida a todos os tipos de esforços solicitantes, oriundos das irregularidades do piso onde o veículo trafega, nível de carga do mesmo e estilo de condução, e também por ter

apresentado uma sensível diferença de comportamento à fadiga quando acionado nos diferentes testes.

Fig. 5.1: Relação entre os tipos de testes e suas características.

O simulador é excitado por um sinal amplitude x tempo que é obtido através do tráfego do veículo na pista real, ou seja, é uma cópia da pista de testes. Porém, para tornar a simulação mais rápida, este sinal de campo é editado, sendo os seus períodos de excitação nula removido integralmente (edição Modo I), ou seus ciclos de baixa amplitude removidos (edição Modo II) pelo motivo de, por conhecimento comum, não representarem influência significativa no processo de fadiga. Contudo, como demonstrado pelos resultados finais, alguma divergência existe.

Como tentativa de isolar o problema, o espectro ou histórico de carregamento foi obtido, o sinal foi modelado, transformando-se em uma série gaussiana, função esta que descreve muito bem a aleatoriedade e variabilidade dos ciclos de tensão. Com o sinal modelado, o método de contagem de ciclos por *rainflow* foi empregado. A partir desta contagem as matrizes de dano acumulado puderam ser calculadas [34] e, finalmente pôde-se analisar a influência da aplicação de fatores de filtragem matemática h [35] nestas matrizes. Esta filtragem é utilizada para eliminar ciclos causados por ruídos na medição, ou ciclos de baixa amplitude [35], considerados irrelevantes para o processo

de fadiga, como mencionado no parágrafo anterior [6, 7]. A aplicação do fator h geralmente obedece ao instinto do técnico, não existindo um valor estabelecido para tal. Assim, foram calculadas as vidas em fadiga para ciclos *rainflow* sem filtro, e com filtragem tendo $h = 0,2$ e $h = 0,3$.

Foram observadas diferenças significativas entre as vidas remanescentes obtidas com os diferentes valores de filtro, concluindo-se que mesmo as pequenas amplitudes contribuem para a fadiga, até mesmo após a contagem por *rainflow*.

Recomenda-se, antes de aplicar a filtragem matemática, calcular a vida em fadiga e dano acumulado para vários níveis do mesmo (inclusive para filtro nulo) com o intuito de se ter um panorama mais amplo e seguro do estado em que se encontra o componente em análise. Uma das principais razões para tais discrepâncias é que elas seriam oriundas das limitações da regra de acúmulo de dano: a incapacidade de considerar as interações entre as cargas e o efeito da tensão média.

Também é de conhecimento que a remoção dos ciclos de baixa amplitude durante a edição de sinais, como exposto em [32], conduz os ensaios a discrepâncias como as apresentadas aqui. Fica como sugestão um trabalho onde a parcela de cada um desses principais fatores que afetam a transferibilidade nos ensaios de fadiga (subcargas e edição de sinais) possam ser convenientemente mensuradas

6. CONCLUSÕES

Das análises realizadas no capítulo anterior se pode concluir que existe uma significativa diferença entre os resultados obtidos em rodagens reais e simuladas, sendo que os resultados dos testes reais são mais severos. Esta diferença entre os danos ocorridos pode ter sido causada em parte, pela influência das paradas que ocorrem nos testes reais. Tais paradas possivelmente agem como subcargas no regime de fadiga [18 – 20], acelerando a taxa de crescimento das trincas, levando assim a um dano resultante maior à estrutura veicular. Já o ensaio de fadiga em Modo II demonstrou que, variando-se apenas o nível de filtragem (ou de corte) para omissão dos sinais de baixíssima amplitude, obtém-se resultados finais, em termos de durabilidade, muito diferentes. Ou seja, existe realmente uma grande influência do nível de omissão de ciclos na transferibilidade e, conseqüentemente, na representabilidade do ensaio. Tal premissa pode ser aplicada também ao ensaio em Modo I, já que o mesmo apresentou resultados reais muito diferentes dos alcançados através da simulação.

Com os resultados obtidos é possível realizar uma correlação mais precisa entre testes reais x testes simulados, com o intuito de tornar os últimos realmente representativos, pois a simulação é uma ferramenta poderosíssima na indústria. Tal correlação melhorada deve levar em consideração não somente o nível de dano infligido à estrutura, mas sim a maneira como este dano é aplicado, otimizando-se tanto a forma de aplicação do dano, quanto o tempo de duração do mesmo, tendo em vista que o fator tempo é de suma e vital importância na indústria.

REFERÊNCIAS

- [1] AVNER, S.H. **Introduction to Physical Metallurgy**. 2nd Ed. New York: McGraw Hill, 1974.
- [2] HERTZBERG, R.W. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**. 4^a Ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1995.
- [3] KOCANDA, S. **Fatigue Failure of Metals**. 1^a Ed. Poland: Sijthoff & Noordhoff International Publishers, 1978.
- [4] FORREST, P.G. **Fatigue of Metals**. 1^a Ed. London: Pergamon Press, 1962.
- [5] CALLISTER, W.D. **Materials Science and Engineering. An Introduction**. 6^a Ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2006.
- [6] JOHANNESSON, P. **Rainflow Analysis of Switching Markov Loads**. 1999. 195 p. Tese (Doutorado) – Lund Institute of Technology, Lund University. Lund, Sweden, 1999.
- [7] RYCHLIK, I. Simulation of load sequences from Rainflow matrices: Markov method. *International Journal of Fatigue*, UK, n. 18, p. 429-438, 1996.
- [8] ANTHER, R.J. Modified Rainflow counting keeping the load sequence. *International Journal of Fatigue*, UK, n. 19, p. 529-535, 1997.
- [9] FATEMI, A.; YANG, L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials, *International Journal of Fatigue*, UK, n. 20, p. 09-34, 1998.
- [10] TOVO, R. A damage-based evaluation of probability density distribution for Rainflow ranges from random processes. *International Journal of Fatigue*, UK, n. 22, p. 425-429, 2000.

- [11] WILSDORF, D. K.; LAIRD, C. Dislocation behavior in fatigue. *Materials Science and Engineering*, n. 27, p. 137-156, 1977.
- [12] WILSDORF, D. K.; LAIRD, C. Dislocation behavior in fatigue: II. Friction stress and back stress as inferred from an analysis of hysteresis loops. *Materials Science and Engineering*, n. 37, p. 111-120, 1979.
- [13] WILSDORF, D. K. Dislocation behavior in fatigue: III. Properties of loop patches – Do they participate in fatigue cycling? *Materials Science and Engineering*, n. 39, p. 127-139, 1979.
- [14] WILSDORF, D. K. Dislocation behavior in fatigue: IV. Quantitative interpretation of friction stress and back stress derived from hysteresis loops. *Materials Science and Engineering*, n. 39, p. 231-245, 1979.
- [15] WILSDORF, D. K.; LAIRD, C. Dislocation behavior in fatigue: V. Breakdown of Loop Patches and formation and of persistent slip bands and of dislocation cells. *Materials Science and Engineering*, n. 46, p. 209-219, 1980.
- [16] WILSDORF, D. K.; FINNEY, J. M.; LAIRD, C. Dislocation behavior in fatigue: VI. Variation in the localization of strain in persistent slip bands. *Materials Science and Engineering*, n. 50, p. 127-136, 1981.
- [17] CAHN, R.W.; HAASEN, P.; KRAMER, E.J. **Material Science and Technology** vol. 6. Germany: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1993.
- [18] BORREGO, L. P. et al, Evaluation of overload effects on fatigue crack growth and closure. *Engineering Fracture Mechanics*, UK, n. 70, p. 1379-1397, 2003.
- [19] SADANANDA, K. et al. Analysis of overload effects and related phenomena. *International Journal of Fatigue*, UK, n. 21, p. 233-246, 1999.

- [20] McEVILY, A.J.; ISHIHARA, S; MUTOH, Y. On the number of overload-induced delay cycles as a function of thickness. *International Journal of Fatigue*, n. 26, p. 1311-1319, 2004.
- [21] SCHIJVE, J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. *International Journal of Fatigue*, UK, n. 25, p. 679-702, 2003.
- [22] SUNDER, R. Spectrum load fatigue – underlying mechanisms and their significance in testing and analysis. *International Journal of Fatigue*, UK, n. 25, p. 971-981, 2003.
- [23] STEPHENS, R.I. Etal. Fatigue damage editing for accelerated durability testing using strain range and SWT parameter criteria. *International Journal of Fatigue*, UK, n. 19, p. 599-606, 1997.
- [24] NEWMAN, J.C. The merging of fatigue and fracture mechanics concepts: a historical perspective. *Progress in Aerospace Sciences*, USA, n. 34, p. 347-390, 1998.
- [25] NAGODE, M.; FAJDIGA, M. On a new method for prediction of the scatter of loading spectra. *International Journal of Fatigue*, UK, n. 20, p. 271-277, 1998.
- [26] TOVO, R. Cycle distribution and fatigue damage under broadband random loading. *International Journal of Fatigue*, UK, n. 24, p. 1137-1147, 2002.
- [27] TOVO, R. On the fatigue reliability evaluation of structural components under service loading. *International Journal of Fatigue*, UK, n. 23, p. 587-598, 2001.
- [28] TOPPER, T.H.; LAM, T.S. Effective strain-fatigue life data for variable amplitude fatigue. *International Journal of Fatigue*, UK, n. 19, p. 137-143, 1997.
- [29] SMITH, K.N. Etal. A stress-strain function for the fatigue of metals. *Journal of Materials*, JMLSA, vol. 5, No. 4, p. 767-788, 1970.

- [30] PADOVESE, L.R.; Processamento de sinais aplicado à engenharia mecânica. Brasil: Serviço de Bibliotecas da EPUSP, 2001.
- [31] BRAUN, S. **Mechanical Signature Analysis**. London: Academic Press Inc., 1986.
- [32] SCHÜTZ, W. A history of fatigue. Engineering Fracture Mechanics, UK, vol. 54, n. 2, p. 263-300, 1996.
- [33] HEYWOOD, R.B. **Designing Against Fatigue**. London: Chapman and Hall Ltd., 1962.
- [34] MATLAB 6.5 Release 13. The Matlab Woks Inc., 2002, 2 CD-ROMS.
- [35] WAFO: A Matlab Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads. Version 2.0.02, Sweden: Lund University, 2000.

APÊNDICE A - ALGORITMOS DO MATLAB.

```

n = 41; param_m = [-1 1 n]; param_D = [1 n n];

u_markov = levels(param_m);

G_markov = mktestmat(param_m,[-0.2 0.2],0.15,1);

T_markov = 5000;

xxD_markov = mctpsim({G_markov []},T_markov);

xx_markov = [(1:T_markov)' u_markov(xxD_markov)'];

plot(xx_markov(1:50,1),xx_markov(1:50,2))

Grfc_markov=mctp2rfm({G_markov []});

clf

subplot(121),cmatplot(u_markov,u_markov,G_markov),axis('square')

subplot(122),cmatplot(u_markov,u_markov,Grfc_markov),axis('square')

cmatplot(u_markov,u_markov,{G_markov Grfc_markov},3)

cmatplot(u_markov,u_markov,{G_markov Grfc_markov},4)

subplot(121), axis('square'), title('min-to-max transition matrix')

subplot(122), axis('square'), title('Rainflow matrix')

n = length(u_markov);

Frfc_markov = dtp2rfm(xxD_markov,n);

clf

cmatplot(u_markov,u_markov,{Frfc_markov Grfc_markov*4},3)

subplot(121), axis('square'), title('Observed rainflow matrix')

subplot(122), axis('square'), title('Theoretical rainflow matrix')

tp_markov = dat2tp(xx_markov);

```

```

RFC_markov = tp2rfc(tp_markov);

h = 1,0;

Frfc_markov_smooth = cc2cmat(param_m,RFC_markov,[],1,h);

clf

cmatplot(u_markov,u_markov,{Frfc_markov_smooth Grfc_markov*4},4)

subplot(121), axis('square'), title('Smoothed observed rainflow matrix')

subplot(122), axis('square'), title('Theoretical rainflow matrix')

beta = 4;

Dam_markov = cm2dam(param_m,Grfc_markov,beta)

DamObs2_markov = cm2dam(param_m,Frfc_markov,beta)/(T_markov/2)

Dmat_markov = cm2dmat(param_m,Grfc_markov,beta);

DmatObs_markov = cm2dmat(param_m,Frfc_markov,beta)/(T_markov/2);

clf

subplot(121), cm2dmat(u_markov,u_markov,Dmat_markov,1)

title('Matriz de Dano Teorica')

subplot(122), cm2dmat(u_markov,u_markov,DmatObs_markov,1)

title('Matriz de Dano Simulada h = 1.0')

sum(sum(Dmat_markov))

sum(sum(DmatObs_markov))

```