

A TRANSFERIBILIDADE NOS ENSAIOS DE FADIGA¹

Clayton Mamedes²

Resumo

Um desafio em engenharia mecânica é a realização de ensaios que, além de serem economicamente favoráveis, forneçam resultados que condizem com a real sollicitação do componente durante seu uso. Um dos pilares de todo ensaio de fadiga é a transferibilidade; quando este requisito é atendido podemos dizer que o ensaio que estamos realizando é, no mínimo, representativo. Este trabalho tem como principal objetivo apresentar ao leitor a estrutura básica da teoria dos ensaios, e alguns problemas oriundos do não-cumprimento dos fundamentos da mesma. Será estudada uma situação distinta, onde um dos conceitos fundamentais dos ensaios (a transferibilidade) será utilizado como ponto de partida para a análise de um fenômeno físico que, sem sombra de dúvida, pode levar a resultados insatisfatórios na predição de vida em fadiga de componentes automotivos. O dimensionamento quanto à fadiga de componentes automotivos lança mão de testes reais (utilizando veículos) e os ensaios simulados (utilizando dispositivos). A transferibilidade trata diretamente com a precisão com que um teste real é simulado (quando o mesmo tem a capacidade de fornecer resultados mais rápidos e econômicos). É demonstrada a influência da transferibilidade, utilizando-se de uma situação que ocorre nos testes reais e como a mesma se reflete de forma negativa nos testes simulados, com base em um fenômeno físico da fadiga: o efeito das sub e sobrecargas na vida em fadiga de um componente.

Palavras-chave: Fadiga; Dano acumulado; Sobrecargas; Vida útil.

Abstract

Este trabalho tem como principal objetivo apresentar ao leitor a estrutura básica da teoria dos ensaios, e alguns problemas oriundos do não-cumprimento dos fundamentos da mesma. Será estudada uma situação distinta, onde um dos conceitos fundamentais dos ensaios (a transferibilidade) será utilizado como ponto de partida para a análise de dois fenômenos físicos que, sem sombra de dúvida, podem levar a resultados insatisfatórios na predição de vida em fadiga de componentes automotivos.

Palavras-chave: Fadiga; Dano acumulado; Sobrecargas; Vida útil.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Mestrando em Engenharia de Materiais pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP).

1 INTRODUÇÃO

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 forneceria teoricamente a capacidade de prever bons resultados.

Contudo, como bem citado em um importante artigo,^[1] 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 difere da que é 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 acima se confirma 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.⁽¹⁾

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

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) 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 o 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.

1.1 Sobre e Sub-cargas

A taxa de crescimento de trincas durante o processo de fadiga é seriamente afetada pela variação nas amplitudes das cargas aplicadas, sejam elas sobrecargas, sub-cargas ou carregamentos em bloco.⁽²⁾ Neste artigo, o termo “sobrecarga” é utilizado para descrever esses tipos de variação no regime de carregamento. Abaixo temos alguns conceitos fundamentais:^(2,3)

- 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 sub-carga é definida como um vale, com valor abaixo do S_{BG} (ou K_{BG}).

Com isso em mente, abaixo são descritas as principais influências das sobrecargas sobre o crescimento de trinca:⁽²⁾

- Sobrecargas retardam a taxa de crescimento de trincas principal;
- Sub-cargas aceleram a taxa de crescimento de trincas;
- Sobre e sub-cargas combinadas apresentam resultados misturados, dependendo basicamente da seqüência de aplicação (interação entre cargas);
- Os efeitos (ou magnitude) da retardação/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 são restabelecidas;
- Além dos fatores metalúrgicos descritos acima, os efeitos da retardação 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%;
- A retardação 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).

1.2 Mecanismos de Retardação por Sobrecargas

Os mecanismos sugeridos^(2,3) para explicação da retardação são apresentados abaixo:

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

4. 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 [03] demonstrou que plasticidade na abertura da trinca pode levar a pequenas quantidades de fechamento. Como 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;

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 retardação devido a esse mecanismo, porém a sua contribuição é considerada como um efeito adicional sobreposto sobre os outros processos de retardação. Um efeito secundário deste mecanismo é a redução do potencial termodinâmico para o crescimento de trincas. Recentes investigações demonstraram 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^(2,3) sobre quais mecanismos provocam a retardação 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 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 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). A controle da movimentação destes atuadores é executada 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. 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. o 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.

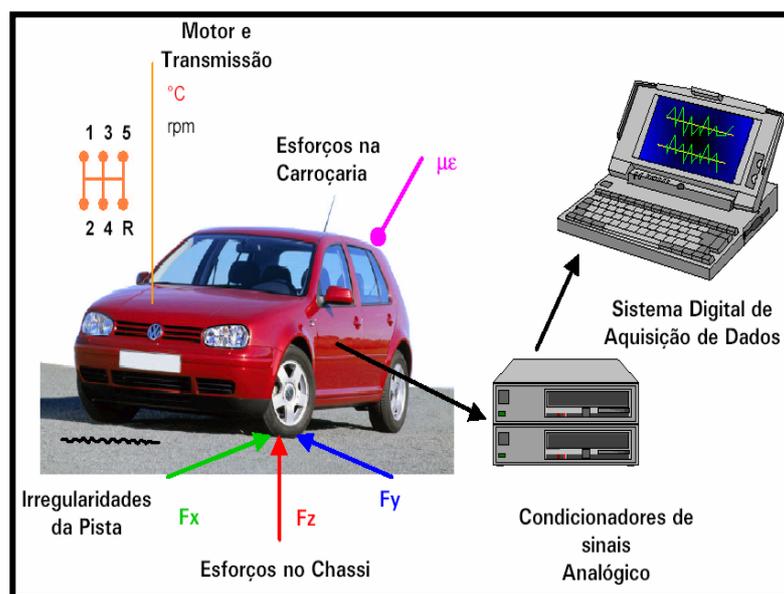


Figura 1. Esquema geral do funcionamento do simulador.

2.2 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.

2.3 A Edição de Sinais

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

Contudo, um destes fatores de vantagem é justamente o que pode levar a resultados finais insatisfatórios: a ausência de paradas durante o ensaio. Enquanto um teste real é realizado em cerca de 500 – 550 horas de rodagem, o teste em simulador é concluído em 180 horas (tempo este otimizado através da eliminação das paradas e edição de sinais). Assim o veículo alvo de nosso estudo foi instrumentado com extensômetros, nos pontos onde as tensões atuantes são críticas (pontas de eixo, braços articulados, amortecedores e terminais de direção). O sinal foi coletado durante trajeto na pista de testes de uma indústria automobilística brasileira, em rodagem com um veículo de passeio, respeitando-se os procedimentos de testes, tais como velocidade de trânsito, carga do veículo, pressão de pneus e atitude da suspensão. Após esta etapa, o mesmo é transferido para os computadores onde é editado, utilizando-se o software Spectra[®]. Neste momento, o sinal real é transformado em um equivalente (mesmo nível de dano acumulado⁽⁴⁾), resultando no tempo de 180 horas.

3 RESULTADOS

Neste estudo foram realizados os seguintes testes:

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

Os resultados resumidos podem ser vistos na tabela abaixo. Apesar de praticamente todos os componentes do veículo serem testadas nestes experimentos, as nossas atenções estão voltadas apenas para a fixação do eixo traseiro, que é realizada mediante o uso de um suporte em “U” soldado no assoalho do veículo. 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 (chapas), causando leve deslocamento do suporte, podendo causar comprometimento estrutural;
- Ruptura total: soltura total do suporte dos seus pontos de fixação.

Tabela 1. Resultados obtidos (resumo)

TESTE	TEMPO DURAÇÃO	RESULTADO
Real A	575 horas	Pequenas trincas
Real B	420 horas (interrompido)	Ruptura total
Real C	540 horas	Ruptura parcial
Simulação A	180 horas	Pequenas trincas
Simulação B	180 horas	Pequenas trincas
Simulação C	180 horas	Pequenas trincas

4 DISCUSSÃO

Aqui cabe uma análise mais detalhada sobre os parâmetros de teste:

- O simulador é excitado com as mesmas solicitações encontradas na rodagem real, porém o sinal é otimizado com o intuito de diminuir o tempo necessário de teste;
- A edição de sinais é realizada através da remoção de trechos onde a solicitação é muito baixa (fadiga de baixo ciclo, cuja influência é analisada em outro artigo⁽⁵⁾) e a eliminação das paradas que ocorrem no teste real i.e. manutenção, etc);
- A eliminação das paradas pode ser compreendida fisicamente através da figura a seguir:

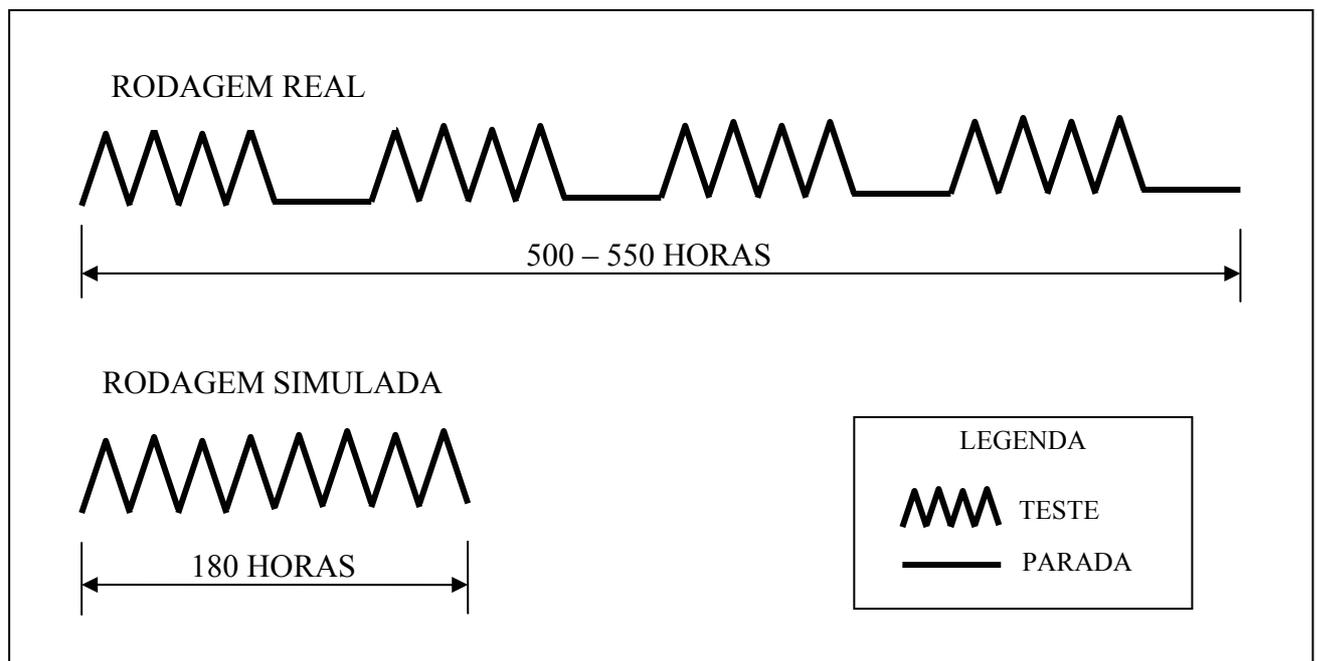


Figura 2. Comparativo entre tempo de testes.

Assim, tendo em mente o que já foi definido em 1.2, pode-se observar na figura acima que as paradas realizadas no teste real agem como se fossem sub-cargas (uma sub-carga 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 em 1.2, as sub-cargas 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.

5 CONCLUSÃO

Após o exposto acima se pode concluir que a diferença entre os danos ocorridos nos veículos submetidos aos testes reais e aos submetidos à rodagem simulada foi causada, em parte, pela influência das paradas que ocorrem nos testes reais. Tais paradas agem como sub-cargas no regime de fadiga, acelerando a taxa de crescimento das trincas, levando assim a um dano resultante maior à estrutura veicular. Os resultados aqui apresentados coincidem imensamente com as

hipóteses levantadas primeiramente por Schütz em [01], onde o autor cita a transferibilidade como um problema ainda não resolvido no campo da fadiga.

Também é de conhecimento que a remoção dos ciclos de baixa amplitude durante a edição de sinais, como exposto em [05], 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 (sub-cargas e edição de sinais) possam ser convenientemente mensuradas.

Agradecimentos

O autor agradece o apoio do Prof. Dr. Cláudio Geraldo Schön (PMT – EPUSP), que forneceu o material bibliográfico para esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 SCHÜTZ, W. A history of fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*, UK, Vol. 54, n. 2, p. 263-300, 1996.
- 2 BORREGO, L. P. Etal, Evaluation of overload effects on fatigue crack growth and closure. *Engineering Fracture Mechanics*, UK, n. 70, p. 1379-1397, 2003.
- 3 SADANANDA, K. Etal. Analysis of overload effects and related phenomena. *International Journal of Fatigue*, UK, n. 21, p. 233-246, 1999.
- 4 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.
- 5 ANGELO, C. M. Efeitos da filtragem matemática na predição de vida em fadiga de componentes de suspensão veicular. In: XIII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva, São Paulo, Brasil, 2005.