



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA E INSTITUTO DE MATEMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MECATRÔNICA (PPGM)**

GUSTAVO SOUZA ANDRADE

**USO DE WAVELETS PARA A MELHORIA DE DESEMPENHO DE
SIMULAÇÕES NUMÉRICAS USANDO CARREGAMENTOS DE
PISTAS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Salvador
2009

GUSTAVO SOUZA ANDRADE

**USO DE WAVELETS PARA A MELHORIA DE DESEMPENHO DE
SIMULAÇÕES NUMÉRICAS USANDO CARREGAMENTOS DE
PISTAS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Mecatrônica (PPGM), Escola Politécnica e Instituto de Matemática, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Leizer Schnitman

Co-orientador: Prof. Dr. Ângelo Amancio Duarte

Salvador
2009

Andrade, Gustavo Souza

Uso de wavelets para a melhoria de desempenho de simulações numéricas usando carregamentos de pistas na indústria automotiva / Gustavo Souza Andrade. – Salvador, 2009.

93 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Leizer Schnitman

Co-orientador: Prof. Dr. Ângelo Amancio Duarte

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia.
Escola Politécnica, 2009.

1. Wavelet. 2. Simulação Numérica. 3. Indústria Automotiva I.
Schnitman, Leizer. II. Duarte, Ângelo Amâncio. III. Universidade
Federal da Bahia. IV. Título.

TERMO DE APROVAÇÃO

GUSTAVO SOUZA ANDRADE

USO DE WAVELETS PARA MELHORIA DE DESEMPENHO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS USANDO CARREGAMENTOS DE PISTAS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em
Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora:

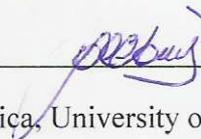
Takashi Yoneyama



Doutor em Engenharia Elétrica, University of London, UL, Inglaterra

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

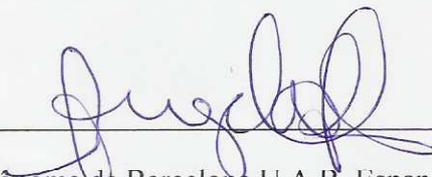
Antonio Cezar de Castro Lima



Doutor em Engenharia Eletrônica, University of Kent at Canterbury, Inglaterra

Universidade Federal da Bahia - UFBA

Ângelo Amâncio Duarte (Co-orientador)



Doutor em Informática, Universidad Autónoma de Barcelona U.A.B, Espanha

Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

Leizer Schnitman (Orientador)



Doutor em Engenharia Eletrônica e Computação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica
– ITA, Brasil

Universidade Federal da Bahia - UFBA

Salvador, 30 de outubro de 2009

A

Luciane, companheira de todas as horas.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Antônio Valente, *in memoriam*, pelo grande exemplo de ser humano e engenheiro.

A minha mãe Jurema e minha avó Dona Maria Pinto.

Aos amigos Antônio Andrade e Fábio Andrade, que sempre confiaram, ajudaram e até mesmo me acalmaram, quando necessário.

Aos amigos Marcelo Godoy e Alexandre Paes, por sempre cruzarem positivamente o meu caminho, me levando cada vez mais longe.

Aos amigos da grande escola CEC Engenharia, João Avelar e André Brandão.

A Ford Motor Company do Brasil, que possibilitou que esse trabalho se realizasse.

Aos Professores Dr. Herman Lepikson, Dr. Flavio Assis e Dr. Marcelo Embiruçu, por acreditarem que eu conseguiria levar a cabo esse trabalho.

Ao meu orientador, Professor Dr. Leizer Schnitman e co-orientador Professor Dr. Ângelo Duarte, pela inestimável ajuda e encaminhamento.

Não esquecendo que para a realização desse trabalho houve a fundamental colaboração de inúmeras pessoas que de forma direta ou indireta, desde o dia do meu nascimento até os dias de hoje, me ajudaram a realizar mais esse sonho. A todos esses, aqui anônimos, agradeço.

Finalmente quero agradecer ao Universo por conspirar a meu favor.

Eu prefiro ser
Essa metamorfose ambulante
Do que ter aquela velha opinião
Formada sobre tudo

Raul Seixas, 1973

RESUMO

Wavelets são poderosas ferramentas matemáticas que, entre outras aplicações, visam melhorar a decomposição tempo-frequência de sinais, avaliando-os em diferentes escalas, em uma abordagem multi-resolução que permite a análise dos diferentes aspectos da informação contida no respectivo sinal. Apesar de ser uma ferramenta relativamente nova, ela vem sendo aplicada em várias áreas do conhecimento humano, e é muito popular no processamento de sinais, particularmente na área compressão de sinais, tais como imagens, vídeo e áudio em computadores. A compressão de sinais está associada com a perda de informação, mas que pode ser aceitável para o usuário final. Com base em aplicações anteriores bem sucedidas e o compromisso com a qualidade dos resultados, este trabalho avalia a utilização da Transformada Wavelet Discreta (DWT), como uma técnica de compressão para reduzir a quantidade de dados coletados em sinais de carregamentos de pista (*load history*), que são utilizados por equipes de engenharia de durabilidade na indústria automotiva. Resultados preliminares mostram que com a utilização da DWT na compressão desses sinais, é possível reduzir o esforço computacional, tempo de processamento, espaço de armazenamento e tráfego de dados entre os computadores, melhorando o processo numérico computacional (CAE) de determinação de tensões, deformações e conseqüentemente da vida em relação a fadiga, ainda mantendo os parâmetros desejados de qualidade.

Palavras-chave: Indústria Automotiva, Processo de Desenvolvimento de Produto, Simulação Numérica Computacional, CAE, Compressão de Sinais, Wavelet.

ABSTRACT

Wavelets are powerful mathematical tools that, among other applications, are used to improve the time-frequency decomposition of signals, evaluating them on different scales in a multi-resolution field allowing the analysis of several features of the information contained in the signal. Despite being a relatively new tool, it has been applied in various areas of human knowledge, and is very popular in signal processing, especially in the areas of coding and compression of signals such as images, video and audio. The signals compression is associated with the loss of information, but can be acceptable to the end user. Based on previous successful applications and the commitment to quality results, this study evaluates the use of Discrete Wavelet Transform (DWT) as compression algorithm to reduce the amount of data collected on road load signals (load history) , which are used by durability engineering teams in the automotive industry. Preliminary results shows that the use of DWT in compression of this kind of signals, can reduce the computational effort, processing time, storage space and data traffic in computer networks, improving the numerical computation (CAE) for determination of stress, deformation and consequently the fatigue life, while still maintaining the desired parameters of quality.

Keywords: Automotive Industry, Product Development Process, Numerical Computational Simulation, CAE, Signal Compression, Wavelet.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama em V, Engenharia de Sistemas (DAUP, 2001).....	22
Figura 2. Foto Aérea de Um Campo de Provas (DAKIN <i>et al</i> , 2001).....	26
Figura 3. Exemplo de Eventos de Uma Pista de Teste.....	27
Figura 4. Simulador de Pista Acoplado aos Eixos.....	28
Figura 5. Simuladores de Pista Acoplados aos Pneus (<i>MTS Systems Corporation</i>).....	29
Figura 6. Detalhe de Montagem do Veículo no <i>Four-Post</i>	30
Figura 7. Processo de Engenharia de Durabilidade (DAKIN <i>et al</i> , 2001).....	31
Figura 8. Antiga Estrada Romana.....	35
Figura 9. Auto Estrada Moderna.	35
Figura 10. Perfil Longitudinal de Uma Pista (SAYERS, 1998).	36
Figura 11. <i>Wheel Force Transducer</i> (Transdutor de Esforços em Roda).....	38
Figura 12. Método Semi-Analítico.....	39
Figura 13. Método Analítico.	40
Figura 14. Onda Senoidal e Wavelet.....	43
Figura 15. Processo da Transformada de Fourier.....	44
Figura 16. Processo da Transformada de Fourier Janelada.	45
Figura 17. Processo da Transformada Wavelet.....	46
Figura 18. Comparação Gráfica das Transformadas.	46
Figura 19. Wavelet Haar.....	48
Figura 20. Família Wavelet Daubechies.....	49
Figura 21. Família Wavelet Coiflets.....	49
Figura 22. Banco de Filtros.	50
Figura 23. Decomposição Wavelet.....	50
Figura 24. Árvore de Decomposição Wavelet (MATHWORKS, 2009).....	51
Figura 25. Metodologia Utilizada nos Trabalhos Experimentais.	54
Figura 26. Pontos de Fixação de Uma Suspensão Tipo MacPherson.....	55
Figura 27. Acelerômetro Unidirecional Instalado.	56
Figura 28. Equipamentos Para Coleta e Registros de Dados.....	56
Figura 29. Evento Padrão Lombada da Pista de Testes.....	57

Figura 30. Sinal de Entrada do <i>Four Post</i>	57
Figura 31. Acelerações Registradas na Pista de Testes.	58
Figura 32. Acelerações Registradas no <i>Four Post</i>	59
Figura 33. Acelerações Determinadas no ADAMS.....	59
Figura 34. Velocidades Horizontais Medidas na Pista de Testes.	60
Figura 35. PSD das Acelerações da Pista de Testes.	60
Figura 36. PSD das Acelerações do <i>Four Post</i>	61
Figura 37. PSD das Acelerações do ADAMS.	61
Figura 38. Balanceamento de Simulações CAE.	63
Figura 39. Sinal Original de Acelerações (g) de Pista, 1024 Amostras.....	65
Figura 40. PSD do Sinal Original de Pista	65
Figura 41. Seqüência de Aproximação do Primeiro Nível (cA_1), Haar, 512 Amostras.....	66
Figura 42. Seqüência de Aproximação do Segundo Nível (cA_2), Haar, 256 Amostras.....	66
Figura 43. Seqüência de Aproximação do Terceiro Nível (cA_3), Haar, 128 Amostras.	67
Figura 44. Superposição dos Sinais Original e Compactações Haar.	67
Figura 45. Erro Quadrático Para cA_1 , Haar.	68
Figura 46. Erro Quadrático Para cA_2 , Haar.	68
Figura 47. Erro Quadrático Para cA_3 , Haar.	68
Figura 48. Gráficos PSD Superpostos, Haar.	69
Figura 49. Modelo de Simulação Numérica CAE Proposto.....	70
Figura 50. Detalhe do Modelo CAE Proposto.....	71
Figura 51. Tensão de Von Mises Para Sinal Original.....	72
Figura 52. Tensão de Von Mises Para Nível 1, Haar, 512 Amostras.	73
Figura 53. Tensão de Von Mises Para Nível 2, Haar, 256 Amostras.	73
Figura 54. Tensão de Von Mises Para Nível 3, Haar, 128 Amostras.	74
Figura 55. Decomposição e Reconstrução Wavelet.	85
Figura 56. Filtragem de Sinal Usando Wavelet <i>Threshold</i>	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparativo de Metodologias.....	17
Tabela 2. Erro Quadrático Médio.....	69
Tabela 3. Resultados Para sinal de Pista Original na Fibra Superior.....	72
Tabela 4. Resultados Para sinal de Pista Original na Fibra Inferior.	72
Tabela 5. Resultados Para Sequencias de Aproximação na Fibra Superior.....	74
Tabela 6. Resultados Para Sequencias de Aproximação na Fibra Inferior.	75
Tabela 7. Erros Para Sequencias de Aproximação na Fibra Superior.	76
Tabela 8. Erros Para Sequencias de Aproximação na Fibra Inferior.	76
Tabela 9. Tempo de Processamento e Tamanho do Arquivo de Saída.....	77

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	ENGENHARIA DE DURABILIDADE NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA .	20
2.1	Desenvolvimento de Produto Automotivo	20
2.1.1	Engenharia de Sistemas.....	21
2.2	Campos de Prova e Pistas de Teste	25
2.3	Bancadas de Ensaios	27
2.3.1	Simuladores de Pista Acoplados aos Eixos	28
2.3.2	Simuladores de Pista Acoplados aos Pneus.....	28
2.4	Métodos Numéricos CAE para Análise de Durabilidade	30
2.5	Fadiga na Indústria Automotiva.....	33
2.6	Perfil Longitudinal de Pista (<i>Road Profile</i>).....	35
2.7	Carregamentos de Pista e Durabilidade.....	37
3	PROCESSAMENTO DE SINAIS USANDO WAVELETS	42
3.1	O Que São Wavelets	42
3.2	Breve Histórico	43
3.3	Da Transformada de Fourier à Transformada Wavelet	44
3.3.1	Transformada de Fourier	44
3.3.2	Transformada de Fourier Janelada	45
3.3.3	Transformada Wavelet	45
3.4	Famílias de Wavelets	47
3.5	Decomposição Wavelet.....	49
3.6	Wavelets na Compressão de Sinais.....	51
4	COLETA DE DADOS PARA ANÁLISE DE DURABILIDADE.....	53
4.1	Comparação de Metodologias	54
4.1.1	Processo de Medição.....	55
4.1.2	Exemplos de Dados Coletados	58
4.2	Considerações Sobre as Diferenças Entre os Métodos.....	62

5	APLICAÇÃO DAS WAVELETS NA COMPRESSÃO DOS SINAIS	64
5.1	Sinal de Pista Proposto.....	64
5.2	Compressão do Sinal.....	65
5.3	Aplicação Prática em CAE.....	70
5.3.1	Resultados Para o Sinal de Pista Original	71
5.3.2	Resultados Para Sinais Comprimidos.....	73
5.4	Comparação das Métricas de Controle e de Vantagem.....	75
6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
	ANEXOS	85
A.1.	Reconstrução Wavelet e a Técnica de <i>Threshold</i>	85
A.2.	Programas Matlab	87
A.3.	Arquivos Nastran	92

1 INTRODUÇÃO

Demandas por melhorias no rendimento, durabilidade e segurança, envolvendo todos os sistemas que compõem um veículo, além de outros fatores orientados ao cliente e, mais recentemente, ao meio ambiente, impelem o processo de desenvolvimento de novos produtos automotivos. Tais demandas precisam ser equilibradas com os custos de desenvolvimento, produção, e também com o tempo necessário para o lançamento de um produto bem sucedido no mercado.

Nesse cenário, de uma forma crescente, as grandes corporações que disputam o mercado investem mais em novas tecnologias, processos e pesquisas, com o objetivo de reduzir custos, melhorar o rendimento de seus produtos e tornar seus processos de desenvolvimento de produto mais rápidos e eficientes. Todo produto de sucesso que chega ao consumidor partiu, muito provavelmente, de um processo de desenvolvimento bem sucedido, fase na qual é determinado o público alvo, as suas necessidades, os níveis de desempenho esperados e as soluções de engenharia necessárias para atingir esses níveis.

Ainda durante o processo de desenvolvimento de produto, é necessário se verificar e confirmar se as peças e sistemas desenvolvidos são capazes de apresentar o rendimento determinado primordialmente pelos projetistas, de forma a atender as necessidades do consumidor final do produto a ser fabricado.

Por muito tempo a indústria automotiva se baseou em um processo de desenvolvimento muito empírico, onde muitas séries de protótipos eram requeridas para atender a enorme quantidade de testes e aprovações necessárias, antes do lançamento do veículo no mercado. Na fase inicial desta indústria, era normal que o consumidor final fosse o único a conhecer realmente os limites do veículo.

Em 1970, o engenheiro chefe da British Leyland's, indústria automotiva inglesa cita: "*Claro que aqui na British Leyland's nós consideramos o consumidor como nosso inspetor final*" (DAKIN *et al*, 2001). O projeto era desenvolvido sem um conhecimento profundo do público alvo, das suas necessidades e dos níveis de rendimento necessários. Assim, constantemente um bom carro, para o consumidor, era aquele grosseiramente super-dimensionado.

Nos primórdios da indústria automotiva os veículos, feitos um a um e para um público muito seletivo, eram testados em rodovias comuns em regiões próximas à fábrica ou especificamente no local onde seria utilizado pelo cliente. Com o passar do tempo, surgiram os campos de prova com suas pistas de testes construídas com eventos padronizados, de tal modo a permitir sistematizar a certificação de peças e sistemas.

Ensaio laboratoriais foram introduzidos no processo de desenvolvimento de produto da indústria automotiva para possibilitar resultados mais rápidos e precisos quando comparados aos obtidos em pistas de testes (GROTE e SHARP, 2000).

Nas últimas décadas, graças ao rápido desenvolvimento dos computadores e de algoritmos utilizados na simulação computacional, principalmente os baseados no Método dos Elementos Finitos (KADING, 2004), foi possível a massificação da utilização de ferramentas computacionais para a completa definição de novos componentes e sistemas a serem criados (GROTE e SHARP, 2000). Assim, o desempenho de componentes e sistemas passou a ser analisado no mundo virtual (CAE, *Computer-Aided Engineering*, engenharia auxiliada por computador).

Assim surgiu o sonho do completo desenvolvimento e aprovações virtuais de peças e sistemas, que tem animado, entre outros, a indústria automotiva a continuar investindo em novas tecnologias e em pesquisas da metodologia CAE (DAKIN *et al*, 2001). Tal abordagem pode ser considerada por alguns uma utopia, mas norteia investimentos em desenvolvimento e tem conseguido, a cada dia, reduzir o número de protótipos envolvidos no processo de desenvolvimento de produtos. As maiores locomotivas desse avanço são as indústrias aeroespacial e automotiva.

Atualmente, durante o processo de desenvolvimento de produtos automotivos, as equipes de engenharia de durabilidade dispõem, basicamente, de três metodologias para obtenção de dados para dimensionamento, teste e certificação de peças e sistemas: a) pista de testes, b) bancadas de testes e c) simulações numéricas computacionais (CAE). Esses três métodos dividem espaço no processo de desenvolvimento de produtos automotivos e dependendo do estágio de desenvolvimento, cada um apresenta suas vantagens e desvantagens (Tabela 1).

Tabela 1. Comparativo de Metodologias.

Metodologia	Vantagens	Desvantagens
Pista de Testes	<ul style="list-style-type: none"> • Testes bem calibrados com necessidades do consumidor final; • Grande experiência da indústria automotiva; • Estrutura já existente; 	<ul style="list-style-type: none"> • Testes de difícil repetibilidade e reprodutibilidade; • Alto custo da implantação e operação; • Resultados demorados; • Depende do clima atmosférico; • Muita interação humana; • Necessita de muitos protótipos disponíveis;
Bancadas de Ensaio	<ul style="list-style-type: none"> • Ambiente mais controlado, menor número de variáveis; • Resultados mais rápidos que na Pista de Testes; 	<ul style="list-style-type: none"> • Resultados mais demorados que na Simulação numérica; • Necessita de protótipos disponíveis; • Necessita de desenvolvimento e implantação de bancadas e laboratórios;
Simulação Numérica	<ul style="list-style-type: none"> • Menor custo de implantação e operação; • Pode ser utilizado antes da existência de protótipos; • Resultados mais rápidos; • Maior velocidade de evolução das três metodologias; 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldades de calibração com fenômeno físico (modelamento); • Tecnologia mais recente ainda em pleno desenvolvimento; • Limitação de <i>hardware</i>;

A pista de testes ainda é o método principal de aquisição de dados e certificação de peças e sistemas. Entretanto, bancadas de ensaios e CAE estão ganhando espaço no processo de desenvolvimento de produtos, especialmente pelo fato de permitir um controle maior dos parâmetros dos testes e serem mais baratos. Nesse cenário, fica fácil de entender a razão da rápida evolução do CAE, o método mais novo, mais barato, mais flexível e mais ágil dos três.

Pressões comerciais e requisitos legais vêm levando a aumentar a confiança no CAE, com a predição da vida em fadiga ocupando um lugar principal no processo de engenharia de durabilidade. No futuro, o processo de engenharia virá a confiar ainda mais em CAE (DAKIN *et al*, 2001).

Mais detalhados e complexos elementos finitos, modelos constitutivos de materiais e formulações para soluções numéricas vêm sendo desenvolvidos diariamente e rapidamente sendo disponibilizados em pacotes comerciais para simulações CAE, tais como MSC NASTRAN e FATIGUE (DAKIN *et al*, 2001). No entanto, esse avanço na modelagem matemática dos elementos aumenta a exigência do desempenho computacional necessário para obter os resultados das simulações em um prazo razoável. Como o custo do sistema computacional (*hardware + software*) é a maior desvantagem de CAE, soluções que reduzam os requisitos computacionais são sempre bem vindas.

A partir dessa premissa, esse estudo apresenta uma alternativa para reduzir os requisitos computacionais em simulações CAE realizadas por equipes de engenharia de durabilidade (*load history*), reduzindo o volume de dados dos sinais utilizados como dados de entrada sem interferir na representatividade da informação associada a esses dados. Utilizando a Transformada Discreta Wavelet (*Discrete Wavelet Transform*, DWT) como algoritmo de compressão, é possível reduzir o esforço computacional, tempo de processamento, espaço de armazenamento e tráfego em redes, sem comprometer a precisão os resultados determinados para tensão, deformação e vida em relação à fadiga.

Os experimentos demonstraram que nossa abordagem apresenta excelentes resultados mantendo os desejados padrões de qualidade e proporcionando uma redução significativa dos custos computacionais associados. Os resultados obtidos apontam que é possível utilizar essa técnica para o processamento de modelos mais complexos obtendo os resultados em tempos compatíveis com os tempos dos modelos atuais, ou ainda reduzir o tempo de processamento dos modelos atuais, sem a necessidade de se fazer uma melhoria no sistema computacional utilizado.

O capítulo 2 é uma apresentação do processo utilizado pelas equipes de engenharia de durabilidade no processo de desenvolvimento de produtos da indústria automotiva, demonstrando as três metodologias disponíveis para a determinação de carregamentos.

O capítulo 3 apresenta a Transformada Wavelet, com o foco em sua utilização no tratamento de sinais.

No capítulo 4 é relatada a coleta e registro de acelerações para um evento proposto. Nesse capítulo, também é feita uma comparação dos resultados obtidos em cada uma das três metodologias utilizadas.

No capítulo 5, é relatada a utilização das wavelets na compressão dos sinais utilizados pelas equipes de engenharia de durabilidade e sua utilização em simulações CAE, comparando os resultados da metodologia tradicional com a metodologia proposta nesse trabalho.

O capítulo 6 traz as conclusões sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 ENGENHARIA DE DURABILIDADE NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

2.1 Desenvolvimento de Produto Automotivo

O objetivo básico de um processo de desenvolvimento de produtos é transferir a voz do consumidor (necessidades e desejos) para um produto exequível e verificado em configuração, capacidade e custos apropriados, em um prazo mercadologicamente aceitável, com a intenção de atingir as metas de vendas desejadas pela corporação.

As diversas atividades necessárias durante o processo de desenvolvimento de um automóvel são frequentemente realizadas em diferentes departamentos por diferentes equipes, até mesmo em continentes e fusos horários diferentes, muitas vezes com pouca comunicação entre eles. Atualmente as indústrias automotivas estão revendo seus processos de coordenação dessas diversas tarefas, e criando estruturas lógicas de comunicação, tornando mais formal o processo de desenvolvimento de produtos. A proposta é tentar garantir que os diversos grupos de trabalho, mesmo trabalhando separadamente e em paralelo em diferentes partes do veículo, consigam finalmente unir as peças e atender os níveis de desempenho pré-estabelecidos (GROTE e SHARP, 2000).

No início, o processo de desenvolvimento de produtos utilizado pela indústria automotiva estava baseado na metodologia tradicional dos quatro passos (GROTE e SHARP, 2000):

➤ PROJETAR → CONSTRUIR → TESTAR → REPROJETAR.

Nessa metodologia a fase de testes era toda baseada na utilização de caros e demorados protótipos físicos, além de ser extremamente custosa, pois alterações de projetos deveriam ser executadas em fases muito avançadas do processo de desenvolvimento, onde os custos de alteração são muito altos.

Atualmente vem sendo verificada uma tendência de aplicação de uma nova metodologia para o desenvolvimento de produto automotivo (INCOSE, 2003):

➤ DEFINIR → DECOMPOR → INTEGRAR → VALIDAR.

Essa nova metodologia propicia o uso intensivo de ferramentas numéricas de simulação CAE nas fases iniciais do processo de desenvolvimento de produto, diminuindo a necessidade de protótipos físicos, facilitando a utilização dos conceitos da Engenharia Simultânea (GROTE e SHARP, 2000).

2.1.1 Engenharia de Sistemas

Engenharia de Sistemas é uma abordagem para gerenciar o processo de engenharia através do ciclo de vida do produto. Esse processo se desenvolveu na indústria aeroespacial, possibilitando uma integração bem sucedida de subsistemas de alta complexidade. O rápido aumento da complexidade dos projetos de automóveis criou nessa indústria uma abordagem parecida (JACKSON, 1991).

Um automóvel pode ser definido como um sistema, que é um conjunto de peças organizadas como uma unidade, que interagem entre si com a intenção de satisfazer a objetivos especificados ou requisitos. É importante ressaltar a função do sistema é definida como sendo o objetivo pelo qual o sistema foi criado e sem a qual não existe sistema, e sim um conjunto de partes.

A Engenharia de Sistemas pode ser definida como "*Um método interdisciplinar para possibilitar a criação de sistemas bem sucedidos*" (INCOSE, 2003). Esse método é uma maneira de pensar na qual o todo deve ser analisado. Neste método, o sistema é entendido observando sua função, suas fronteiras, sua estrutura, sua composição e a sua interação com o ambiente que o cerca. Deste método, os seguintes conceitos podem ser extraídos:

- Um sistema é maior que a soma de suas partes;
- O aperfeiçoamento das partes não necessariamente aperfeiçoa o todo;
- As interações entre as partes determinam o desempenho do sistema.

Desenvolver um produto tão complexo quanto um automóvel, com grande número de fornecedores de engenharia e de peças, exige um grande esforço para disseminar os requisitos de todas as partes do sistema, definir e gerenciar as várias interfaces, garantindo o desempenho de todo o sistema depois de montado e entregue ao cliente.

Uma das ferramentas mais difundidas da Engenharia de Sistemas, criada para facilitar essa tarefa, é o processo conhecido como V da Engenharia de Sistemas (Figura 1).

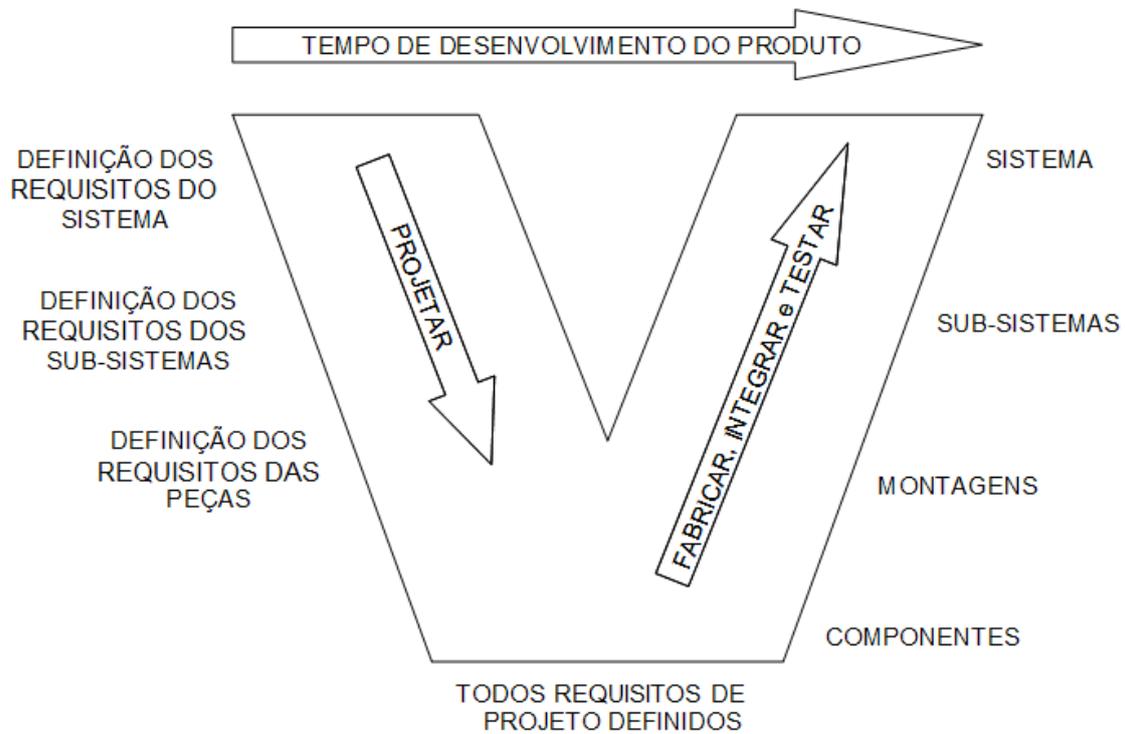


Figura 1. Diagrama em V, Engenharia de Sistemas (DAUP, 2001).

De acordo com esta metodologia, o lado esquerdo do V está focado em definir e decompor o sistema em partes, interfaces e requisitos, cuidando para que estes estejam corretos e completos para todos os níveis do projeto: sistema, subsistemas e partes. O lado direito, por sua vez, está focado na integração e validação, conforme desempenho requerido, para todos os níveis do projeto. Para isso cada uma das fases é executada pela indústria automotiva como descrito a seguir (GROTE e SHARP, 2000):

- **DEFINIR:** Representa o início do trabalho da equipe de engenharia do produto, onde os objetivos, ou níveis de desempenho por atributo, são estabelecidos para o veículo. As necessidades e solicitações do consumidor final pelas características do automóvel a ser projetado guiam a determinação dos requisitos básicos. O desejo do consumidor, combinado com o conhecimento adquirido pela montadora em experiências passadas, com os levantamentos nos produtos da concorrência já no mercado, custo, peso, níveis de desempenho e exigências legais, definem os objetivos de mais alto nível para o sistema como um todo;

- **DECOMPOR:** Os objetivos de alto nível do sistema, definidos na fase anterior, são subdivididos para subsistemas, descendo nível a nível, e finalmente para as partes individuais. Nesta fase do desenvolvimento de um veículo são utilizadas ferramentas CAE de forma intensiva, onde todas as peças têm sua utilização simulada em modelos virtuais, cuidando para que tais peças respondam bem aos carregamentos e restrições necessários para atingir o desempenho esperado. Diversas interações são necessárias, na medida em que os níveis de desempenho determinados são interpretados para cada nível do sistema, bem como diversos acordos são firmados para dirimir impasses nos parâmetros de desempenho, em situações onde um nível de desempenho de uma parte ou subsistema somente consegue ser atingido com a degradação do desempenho de outra parte ou subsistema;
- **INTEGRAR:** Os projetos das partes e subsistemas são completados utilizando ferramentas CAD (*Computer-Aided Design*, projeto auxiliado por computador), propiciando análises de predições dos resultados esperados que serão comparadas com os objetivos pré-estabelecidos. Nesse processo, conhecido com "*Teste Virtual*", as diversas partes e sistemas que compõem o veículo podem ser testados virtualmente em ferramentas CAE de simulação dinâmica de multi-corpos, elementos finitos e predição analítica da fadiga, antes que qualquer protótipo seja fabricado. Durante esse processo, os resultados do *Teste Virtual* podem gerar a necessidade de mais acordos entre as partes responsáveis por itens específicos, e até mesmo da alteração dos níveis de desempenho definidos na primeira fase. Este trabalho, porém, possibilita a identificação da real necessidade dos acordos para determinação de níveis de desempenho e possíveis restrições para o projeto;
- **VALIDAR:** Assim que as peças protótipos estão disponíveis, podem começar os testes físicos para confirmar se os desempenhos dessas partes condizem com o pré-estabelecido. Essas partes serão testadas em bancadas, integradas em subsistemas e sistemas que também serão testados em bancadas bem como fazer parte de protótipos que serão testados em bancadas e pista. Durante essa fase a montagem dos subsistemas e sistemas será, também, avaliada de forma a verificar o processo produtivo.

Durante todo o processo, a realimentação de informações é importantíssima, pois as validações dos modelos virtuais analisados anteriormente podem determinar uma alteração nos níveis de desempenho pré-estabelecidos. Alterações de projeto em fases mais avançadas do processo, quando possíveis, são extremamente custosas, devido ao fato de que a aquisição de ferramentas, dispositivos e equipamentos utilizados na produção em massa do veículo, provavelmente, já esteja acordada.

A grande vantagem da simulação virtual CAE, nos estágios iniciais do processo de desenvolvimento é justamente detectar problemas com maior antecedência. Porém, testes físicos ainda são necessários para confirmar com um nível aceitável de certeza, que as partes associadas a subsistemas e sistema, nesse caso o veículo completo, atendem aos níveis de desempenho que foram definidos na fase “DEFINIR”.

Conceitualmente, durabilidade é a capacidade de um produto desenvolver sua função sem degradação de capacidade e desempenho, durante um período de vida esperado, operando sob condições normais, de maneira a atender ou exceder as expectativas do consumidor (DAKIN *et al*, 2001).

No passado, era aceitável considerar o consumidor final de um veículo como sendo o inspetor final desse produto, procedimento possível de se verificar até a década de 1970. Nessa época, era normal projetar veículos sem um profundo conhecimento de qual seria a sua utilização normal pelo público alvo, sendo a durabilidade do sistema verificada com base no entendimento da equipe de engenharia do que seria esta utilização normal do veículo, além da consideração de alguns eventos mais severos determinados pela experiência. Dessa maneira, produtos com boa reputação de longevidade e qualidade eram, geralmente, produtos com projetos grosseiramente superdimensionados (DAKIN *et al*, 2001).

Atualmente, com a necessidade premente e geral de sistemas energeticamente mais eficientes, os veículos automotores vêm sendo alvos, por exemplo, de avaliações em relação à redução no consumo de combustível e de emissões gasosas. Todo esse processo passa, também, por uma redução da massa nos automóveis modernos, o que, além de melhorar a eficiência energética, possibilita um ganho no desempenho e uma redução do custo de produção.

Tais vantagens, devido à concorrência de mercado, conseqüentemente chegam ao consumidor final. Observa-se que ainda no início da indústria automotiva moderna, já em 1923, Henry Ford percebera a necessidade de redução do peso dos seus automóveis como forma de baratear os custos de produção, além de afirmar que uma massa exagerada não tinha relação com a resistência do produto (DAKIN *et al*, 2001).

Atualmente as equipes de engenharia de durabilidade dispõem de três metodologias para o dimensionamento, teste e certificação de peças e sistemas, pista de testes, bancadas de ensaios e simulações numéricas computacionais (CAE).

2.2 Campos de Prova e Pistas de Teste

Principalmente devido a pressões mercadológicas, os estudos do processo de falha por fadiga mecânica nos materiais que compõem o veículo e de suas causas, tornaram-se imprescindíveis na criação de um produto durável. Com esse intuito, toda a indústria automotiva desenvolveu seus campos de prova (Figura 2), de forma a certificar seus veículos em relação à durabilidade, através da utilização de diversas séries de protótipos físicos.

As pistas de teste de um campo de provas, nas quais esses protótipos são avaliados simulam o uso mais comum e severo pelo consumidor final, considerando o tipo de veículo e o mercado em que vai ser comercializado. Ou seja, a pista de teste utilizada para a aprovação de veículos sub-compactos a serem vendidos na Comunidade Européia é diferente da utilizada para a aprovação de veículos médios para o mercado Norte Americano e mesmo para sub-compactos ou médios no mercado da América do Sul.

Um campo de provas, como ilustrado na Figura 2, consegue em suas pistas de teste representar uma utilização severa por pelo menos 90% dos consumidores de sua linha de veículos. Como não existe uma exigência legal ou norma para regular a durabilidade de veículos automotores, cada corporação desenvolve o seu próprio campo de provas, bem como suas rotas de durabilidade, que é uma seqüência de eventos, específica para um tipo de veículo, destacando que há diferenças expressivas entre elas. A severidade de cada rota de durabilidade de um campo de prova é definida com base na relação entre o fabricante e seus clientes.



Figura 2. Foto Aérea de Um Campo de Provas (DAKIN *et al*, 2001).

A pista de teste se tornou de grande importância para o estudo de durabilidade dos veículos, principalmente no que diz respeito à estrutura e chassi. Os diversos eventos em uma pista de teste foram desenvolvidos para impor ao veículo testado todos os tipos de danos sob carregamentos dinâmicos similares aqueles que os veículos produzidos estarão sujeitos em serviço, principalmente no que diz respeito à fadiga mecânica dos materiais.

A determinação de uma pista de testes começa pela avaliação de dados históricos do desempenho do produto em uso através pesquisas com clientes determinando uma utilização severa pelo consumidor final. Esses dados são analisados estatisticamente de maneira a estabelecer o número de repetições dos eventos disponíveis nas instalações, como apresentados na Figura 3.

O objetivo do processo de desenvolvimento de produto, sob a ótica da durabilidade, é o de fazer com que o veículo projetado consiga finalizar todas as repetições determinadas dos eventos da pista de teste sem apresentar falhas significativas, ou seja, sem ter perdido a capacidade de utilização e segurança.



Figura 3. Exemplo de Eventos de Uma Pista de Teste.

2.3 Bancadas de Ensaio

Diversos tipos de bancadas de ensaios foram desenvolvidos e certificados pela indústria automotiva tais como câmaras semi-anecoicas, câmaras climáticas, *shakers*, dinamômetros e bancadas simuladoras de pista, possibilitando a verificação de desempenho das peças, sistemas e veículos. Para peças e sistemas as bancadas são específicas e desenvolvidas, também, em função do procedimento a ser utilizado. Já para a estrutura principal do veículo as principais bancadas utilizadas são as bancadas simuladoras de pista, que trataremos a seguir.

As bancadas simuladoras de pista são equipamentos de laboratório específicos para testes automotivos. São aplicadas tanto na fase de desenvolvimento de produtos quanto ao final da linha de produção com o objetivo de verificação da qualidade do produto final, principalmente no que tange a ruídos causados por deslocamentos relativos indesejados entre partes diversas do automóvel. Funcionam aplicando esforços e deslocamentos nas rodas ou eixos do veículo, simulando perfis de pista previamente coletados ou sinais criados analiticamente (ZHANG, 2005), dessa forma, recriando na bancada a rodagem do carro em eventos de uma pista de teste qualquer ou explorando amplitudes e frequências para as quais se deseja estudar as conseqüências.

O equipamento básico consiste em um sistema hidráulico composto por atuadores de alto desempenho que provêm excitações programáveis. Os atuadores são controlados independentemente, utilizando um controlador servo hidráulico digital de circuito fechado, que, por sua vez, é preparado e operado mediante um *software* dedicado de aplicação. Basicamente existem no mercado dois tipos de bancadas simuladoras de

pista: os simuladores de pista acoplados ao eixo e os simuladores de pista acoplados aos pneus.

2.3.1 Simuladores de Pista Acoplados aos Eixos

Nesse tipo de bancada simuladora de pista, a principal característica é que os atuadores funcionam fixados diretamente nos eixos das rodas dos veículos a serem testados (Figura 4). É um equipamento complexo, fundamentalmente aplicado ao desenvolvimento, pois demanda muito tempo para a preparação do ensaio, fato que obriga a retirada das rodas do veículo e a colocação deste na bancada de testes com o auxílio de uma ponte rolante ou guindaste.

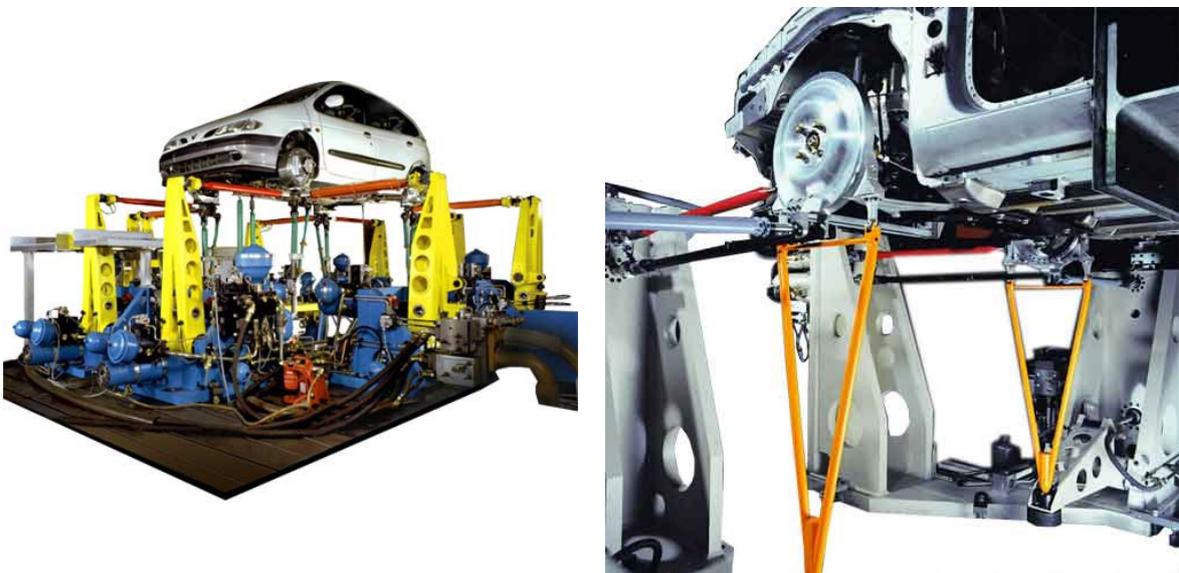


Figura 4. Simulador de Pista Acoplado aos Eixos.

Os simuladores de pista acoplados aos eixos são oferecidos em versões que podem interagir com 3, 4, 5 ou 6 graus de liberdade em cada eixo. Outros atuadores podem ser instalados nesses equipamentos para simular esforços de frenagem e aceleração, ou mesmo esforços aerodinâmicos e inerciais. Esses equipamentos conseguem reproduzir com grande fidelidade eventos de pista e de simulações computacionais, conseguindo reproduzir inúmeras combinações de esforços e movimentos envolvidos na utilização de um veículo pelo cliente. Esse equipamento é considerado o estado da arte em relação à bancadas simuladoras de pista, porém, é extremamente caro e raro.

2.3.2 Simuladores de Pista Acoplados aos Pneus

Para esse tipo de bancada simuladora de pista, o veículo recebe as excitações do equipamento através dos pneus. Apesar de não conseguir reproduzir tantos tipos de

esforços quanto os simuladores acoplados aos eixos, é uma bancada de testes muito mais flexível, pois permite sua utilização tanto em ações de desenvolvimento de produto quanto em verificações de qualidade ao final da linha de produção. Usualmente com apenas quatro atuadores verticais de alto desempenho, daí o nome *Four Post* (Figura 5 e Figura 6), permite que o veículo seja ensaiado por completo, sem a necessidade de montagens e ajustes adicionais. O operador simplesmente estaciona o carro sobre o equipamento e realiza o ensaio.

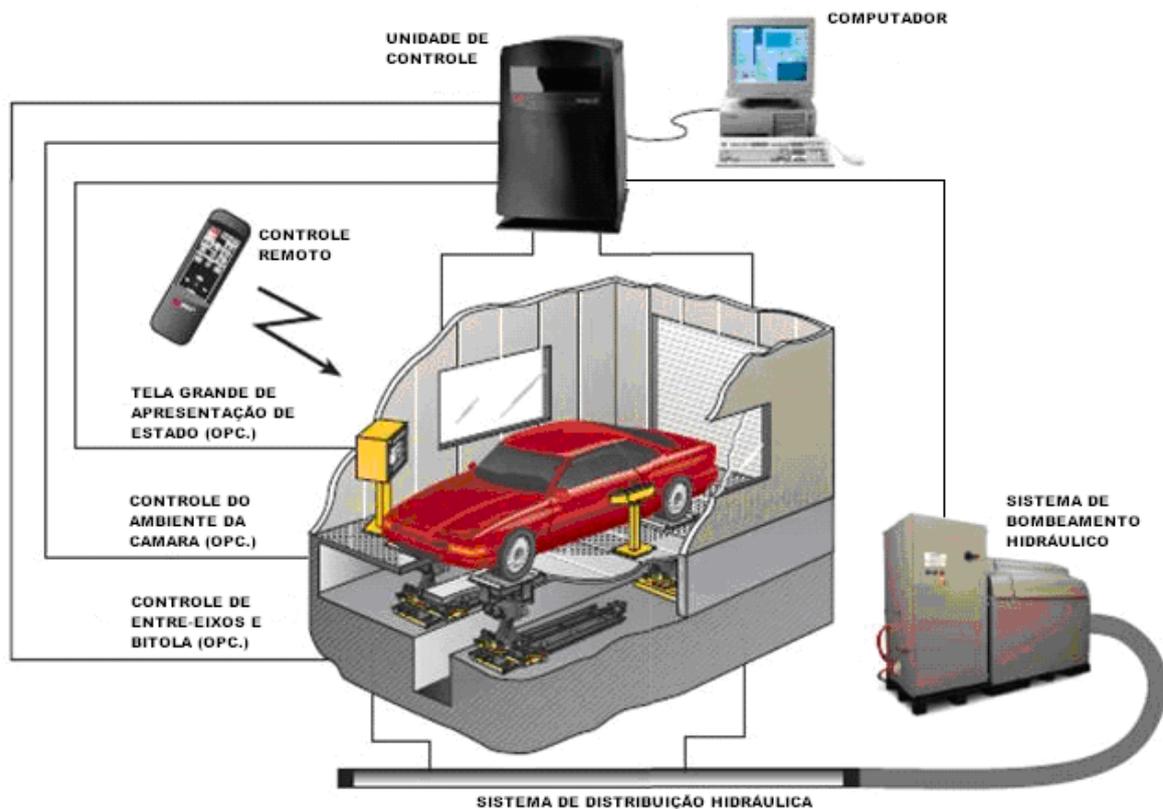


Figura 5. Simuladores de Pista Acoplados aos Pneus (MTS Systems Corporation).

Opcionalmente, os simuladores acoplados aos pneus podem vir equipados com atuadores que simulam esforços aerodinâmicos, mas continuam sendo capazes de aplicar apenas esforços verticais nos veículos à serem ensaiados.

Devido a limitação de somente aplicar cargas verticais nos pneus, este tipo de equipamento é usualmente mais empregado pelas equipes responsáveis pela inspeção de qualidade após a montagem final do veículo, principalmente na detecção de ruídos causados por indesejáveis movimentos relativos entre peças.



Figura 6. Detalhe de Montagem do Veículo no *Four-Post*.

2.4 Métodos Numéricos CAE para Análise de Durabilidade

Nas atuais estratégias de desenvolvimento de produto automotivo, os novos projetos requerem cada vez mais novos sistemas computacionais utilizando softwares baseados em métodos numéricos CAE (Computer Aided Engineering ou Engenharia Auxiliada por Computador). Dentro dessa nova ordem, simulações numéricas CAE assumiram um papel central no desenvolvimento de produtos (DIETZ, 1998).

Nas últimas décadas, o rápido desenvolvimento dos computadores e dos algoritmos utilizados na simulação computacional tornou possível a massificação da utilização de ferramentas CAE para a definição de novos componentes e sistemas a serem criados, tendo seus desempenhos analisados num mundo virtual. Em relação à engenharia de durabilidade, o método numérico dos elementos finitos vem possibilitando o desenvolvimento de ferramentas CAE capazes de prever a vida em fadiga das peças de um sistema.

Mesmo com o avanço do CAE, os campos de prova ainda são ferramentas indispensáveis no processo de projeto de um veículo tanto no início do processo de desenvolvimento, durante obtenção de carregamentos utilizados para o dimensionamento e aprovação das partes, como no final do processo de desenvolvimento, para a validação final e aprovação do veículo como um todo (DAKIN *et al*, 2001).

Salvo características específicas de cada corporação, o processo de engenharia de durabilidade na indústria automotiva pode ser resumido conforme a Figura 7.

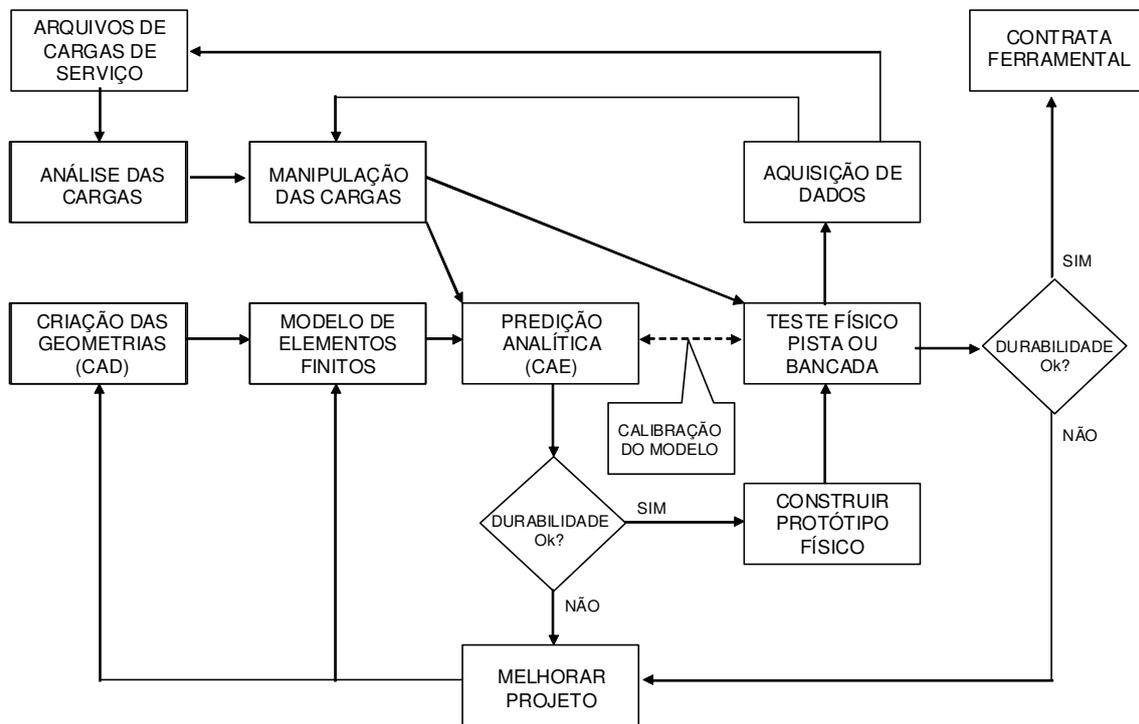


Figura 7. Processo de Engenharia de Durabilidade (DAKIN *et al*, 2001).

Como se pode observar, a predição analítica CAE da vida em fadiga é o elemento central do diagrama, e pode ser considerado como um processo de três estágios distintos:

- 1) Determinação dos carregamentos;
- 2) Cálculo das respostas da estrutura (deformações e tensões);
- 3) Estimativa da vida em relação à fadiga.

Até o meado da década de 80 a principal metodologia utilizada no desenvolvimento de produtos na indústria automotiva era o teste de séries de protótipos físicos fabricados através da utilização da técnica de *soft tooling* (ferramental protótipo), que se baseia na execução de ferramentas protótipo com a utilização materiais menos nobres e mais macios, para baratear o custo e reduzir o tempo de usinagem, o que permite a fabricação de uma pequena série de peças. Problemas detectados nos resultados obtidos com os testes dos protótipos, como os de durabilidade e de *crash* (impacto em barreira), eram corrigidos na próxima série de protótipos. Dessa maneira, o tempo de desenvolvimento

de um veículo completamente novo poderia chegar a oito anos, o que muitas vezes forçava modelos de carros a ficarem sem alterações significativas por mais de dez anos (DAKIN *et al*, 2001).

A principal consequência positiva da utilização de desenvolvimento virtual de produtos na indústria automotiva foi a redução significativa do tempo de desenvolvimento de veículos, o que levou a uma evolução nos processos de desenvolvimento de produtos, baseando as decisões de projeto, cada vez mais, nos resultados obtidos em CAE (DANNBAUER *et al*, 2005).

Essa tendência possibilita, por exemplo, a aprovação de fabricação de ferramentas de produção baseadas apenas em CAE, com pequenas modificações, como inclusão de nervuras ou aumento de espessura de chapa determinada pelos testes físicos finais.

Na década de 90, os computadores e os *softwares* (aplicativos computacionais) de simulação numérica CAE, principalmente os baseados no método dos elementos finitos, estavam suficientemente amadurecidos para adentrar na indústria automotiva, sendo utilizados em paralelo com os testes físicos (pista de teste e bancadas de ensaio). Nesta mesma época, a durabilidade dos veículos era analisada em CAE apenas com simulações estáticas.

Carregamentos aleatórios seqüenciados e rotas de durabilidade, podem ser utilizados como entradas de simulações estáticas lineares para determinar as tensões resultantes para cada elemento do modelo de elementos finitos. Assim, levando em consideração as propriedades do material em relação à fadiga, era possível estimar os danos causados e, finalmente, prever a vida em fadiga de cada parte do modelo, podendo ser apresentada na tela do computador, na forma gráfica com diferentes cores, assim como o cálculo de tensões (DABELL, 2006). Esta metodologia é conhecida como “quasi-estática”.

Atualmente, se torna cada vez mais comum a utilização da metodologia de superposição modal, onde a resposta dinâmica da estrutura do veículo, excitada pelos carregamentos e o amortecimento característico desta, também são considerados na determinação da tensão, do dano e finalmente, da vida em fadiga das partes e do sistema de forma mais confiável.

Com essas duas metodologias, diversos pacotes comerciais foram desenvolvidos e tornaram possível a predição numérica computadorizada de modelos complexos com longos sinais de pista e seqüências de carregamentos variáveis utilizados como carregamento (DAKIN *et al*, 2001). Porém a evolução dos métodos numéricos computacionais e a utilização de modelos CAE cada vez mais complexos vêm demonstrando restrições de *hardware* devido ao crescente esforço computacional envolvido.

2.5 Fadiga na Indústria Automotiva

O uso mais racional das fontes de energia e de materiais, atualmente vem direcionando projetos de veículos cada vez mais leves. Esses veículos cada vez mais esbeltos, como conseqüência, são mais susceptíveis a problemas ligados a vibrações e a fadiga de materiais. O antigo processo de desenvolvimento de produtos automotivos, onde pequenos avanços no projeto eram feitos com base em diversas tentativas e fracassos de experimentos, testes de campo e séries de protótipos, não pôde ser mantido. Novas necessidades de fazer certo da primeira vez, para reduzir drasticamente o tempo de lançamento do produto, liquidaram as séries de protótipos do passado (DIETZ, 1998).

Atualmente na indústria automotiva, grande parte dos problemas identificados em relação à durabilidade de um veículo, durante a fase de projeto, está ligada ao fenômeno da fadiga nos metais. Alguns autores anunciam que falhas por fadiga mecânica custam à indústria mundial duzentos bilhões de Dólares, custando à União Européia e aos EUA, 4% dos respectivos Produtos Internos Brutos (DRAPER, 2004).

Logo, a previsão da vida em fadiga das partes que compõem o sistema é a principal preocupação dos engenheiros envolvidos nesse atributo da durabilidade. Para os engenheiros projetistas das grandes montadoras mundiais, falar em durabilidade é o mesmo que falar em fadiga, fenômeno melhor definindo como uma alteração estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um material sujeito a condição de carregamento que produz uma flutuação de tensões e deformações em algum ponto ou pontos. Tal efeito pode culminar em uma fissura ou fratura completa após um número suficiente dessas flutuações de tensões (WATERMAN, 2002).

Componentes de um veículo são usualmente sujeitos a carregamentos repetidos ou cíclicos, que, mesmo resultando em tensões abaixo dos limites de resistência do material, podem causar danos microscópicos. Estes danos podem se acumular devido às repetições, e se desenvolver em uma trinca que pode resultar em uma falha por fadiga. Se o número de repetições até a falha é da ordem de milhões, a falha é chamada de fadiga de alto ciclo, que está ligada a pequenas deformações elásticas. Porém, caso a falha ocorra com um número de repetições da ordem de dezenas, centenas e até mesmo milhares, ocorre a fadiga de baixo ciclo, que está ligada a uma quantidade significativa de deformações plásticas (TORRES, 2003).

Diversos estudos em relação à fadiga em chapas metálicas foram utilizados pelos engenheiros da indústria automotiva para ajudar na evolução da durabilidade dos componentes sujeitos a carregamentos cíclicos. A utilização cada vez maior de aços de alta resistência e a redução das espessuras das chapas que compõem a estrutura do veículo tem como objetivo principal a redução de peso, o que acarreta redução de custo, de consumo e de emissões. Porém, essa tendência aumenta os níveis de tensões envolvidos e tem por consequência a necessidade de um maior entendimento dos processos que geram a fadiga nos metais. Isso é necessário para que seja possível determinar o rendimento do produto a ser lançado no mercado na disciplina de durabilidade (GENTILCORE, 2004).

O conceito de durabilidade na indústria automotiva está intimamente ligado à busca pelo melhor custo/benefício para o consumidor. Admite-se que o usuário não fica satisfeito com um produto barato, mas que se danifica no primeiro uso e, da mesma forma, entende-se que de pouco adianta o desenvolvimento de um produto extremamente durável, mas para ser vendido por um preço proibitivo para o consumidor.

Não é suficiente no projeto de um automóvel a adoção do critério de Limite de Fadiga, conceito que determina uma divisão clara de limites para estados e flutuações de tensões, abaixo do qual se está seguro e acima do qual se está inseguro. Nessa metodologia, curvas são disponibilizadas para diversos materiais nas quais é possível se determinar as tensões máximas relacionadas ao número de ciclos experimentados pela peça durante sua utilização, é possível até mesmo se determinar um Limite de Fadiga, que seria um nível máximo de tensões até o qual a peça poderá experimentar um

número infinito de ciclos. Tal abordagem, porém, possivelmente resultaria em um veículo extremamente pesado, custoso, energeticamente ineficiente e caro.

2.6 Perfil Longitudinal de Pista (*Road Profile*)

Desde que estradas começaram a ser construídas, seus usuários relacionam o conforto ou desconforto com o viajar sobre diferentes pavimentos e pistas (ver Figura 8 e Figura 9). Posteriormente, ficou evidente que pistas com superfícies mais lisas, que proporcionam o rodar mais suave, também se desgastam mais lentamente, considerando que o veículo reage contra o pavimento com a mesma intensidade em que é solicitado pelos desvios perpendiculares à pista.

Essa constatação tornou o estudo da rugosidade dos pavimentos de grande importância para os governos quando da construção de auto-estradas, já que a intenção é que os gastos com manutenção das pistas sejam minimizados.



Figura 8. Antiga Estrada Romana.



Figura 9. Auto Estrada Moderna.

Com o advento dos veículos automotores, especialmente no início do século vinte, cada vez mais pessoas tiveram acesso a meios de transporte, e estes cada vez mais rápidos. Este aumento da velocidade também tornou cada vez mais evidente que o rodar suave de um automóvel depende em grande parte do pavimento em que está se deslocando. Isto tornou o estudo dos Perfis Longitudinais de uma pista de grande importância no projeto de veículos automotores. Assim, diversos estudos culminaram na criação do Índice de Rugosidade Internacional (IRI), com o qual os pavimentos de estradas são classificados (GILLESPIE, 1992).

O Perfil Longitudinal de uma pista é definido pela composição dos desvios perpendiculares da superfície de um pavimento, a partir de um plano de referência paralelo com a direção da faixa, que é normalmente medido no caminho percorrido pelas rodas de um veículo (FRINKLE, 2004). A Figura 10 ilustra os Perfis Transversais e Longitudinais de uma pista.

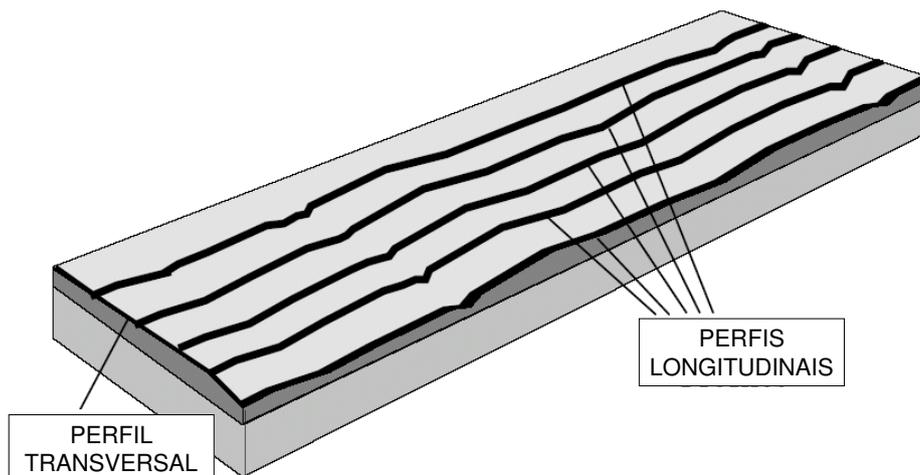


Figura 10. Perfil Longitudinal de Uma Pista (SAYERS, 1998).

O entendimento do conceito de Perfil Longitudinal de Pista se torna importante, pois, os principais carregamentos causadores de danos em uma estrutura de um veículo são causados pelas rodas em contato com a superfície de rodagem e seu perfil longitudinal. Diferentes formas de perfis longitudinais determinam os diversos eventos utilizados nas pistas de teste.

2.7 Carregamentos de Pista e Durabilidade

No início do processo de desenvolvimento da estrutura de um veículo, é de suma importância o conhecimento de *Carregamentos de Pista*, definido como sendo os esforços sofridos pelas diversas partes do veículo, inclusive a estrutura, quando passando por um determinado trecho de pista, os quais devem representar uma utilização severa pelo cliente do veículo final de produção durante todo o tempo de vida projetado para o produto. Esses carregamentos são determinados por características do veículo, perfil de pista e utilização pelo motorista. Ao final do ciclo de vida, ou do teste de durabilidade, o veículo deve apresentar condições de segurança e de funcionalidade. Logo, os *Carregamentos de Pista* são utilizados no processo de desenvolvimento, para garantir que a estrutura do veículo a ser projetada seja suficientemente durável (FRINKLE, 2004). Atualmente, os processos de *Medição em Pista*, Semi-Analítico e Analítico são os três mais utilizados para a determinação dos *Carregamentos de Pista* utilizados pela metodologia CAE. Detalhes destes métodos são descritos nos itens seguintes:

➤ Medição em Pista

Por essa metodologia, a obtenção dos *Carregamentos de Pista* é feita lançando-se mão de sofisticados e caros transdutores tipo *Wheel Force Transducers* (transdutores de esforços em rodas), como os apresentados na Figura 11, que permitem a medição das seis componentes dos esforços que ocorrem nas rodas do veículo de teste enquanto o mesmo se desloca na pista. As seis componentes são as três forças paralelas eixos coordenados e momentos em torno dos mesmos eixos (X, Y e Z). Outros instrumentos não intrusivos como *strain gauges*, acelerômetros, transdutores de deslocamento, etc., são colocados no veículo de teste. É uma metodologia muito confiável, porém o tempo de instrumentação do veículo e a massa de equipamentos necessários adicionados ao veículo impossibilitam a obtenção de carregamentos em todas as situações desejadas (DAKIN *et al*, 2001).



Figura 11. *Wheel Force Transducer* (Transdutor de Esforços em Roda).

➤ **Semi-Analítico**

A maior parte das determinações de vida em fadiga realizadas na indústria automotiva utiliza como base os carregamentos obtidos por essa metodologia. Esse método necessita de medições de esforços em eventos de pista padronizados através da instrumentação com *Wheel Force Transducers* (transdutores de esforços em rodas) de protótipos representativos (fase 1 na Figura 12).

Esses protótipos representativos são montados com partes de modelos existentes, que são espremidos, ajustados, cortados e soldados de forma a montar um veículo completo, de várias fontes, que o grupo de engenharia costuma chamar de “Mula”, a qual cumpre seu papel nos estágios iniciais do processo de desenvolvimento de produto, capturando as intenções do projeto e auxiliando na determinação de níveis de desempenho, antes mesmo de que dados suficientes estejam disponíveis (DONG, 1999).

Os esforços coletados nas rodas da “Mula” são utilizados como dados de entrada em modelos computacionais em *softwares* de Multi-Corpos, tal como o Adams da MSC Software Corporation, que possibilitam a determinação de esforços, acelerações, etc., em qualquer ponto do veículo (fase 2 na Figura 12) (DAKIN *et al*, 2001). Finalmente são obtidos os carregamentos necessários ao projeto estrutural do veículo (fase 3 na Figura

12), bem como a determinação analítica da vida em fadiga de suas partes (fase 4 na Figura 12).

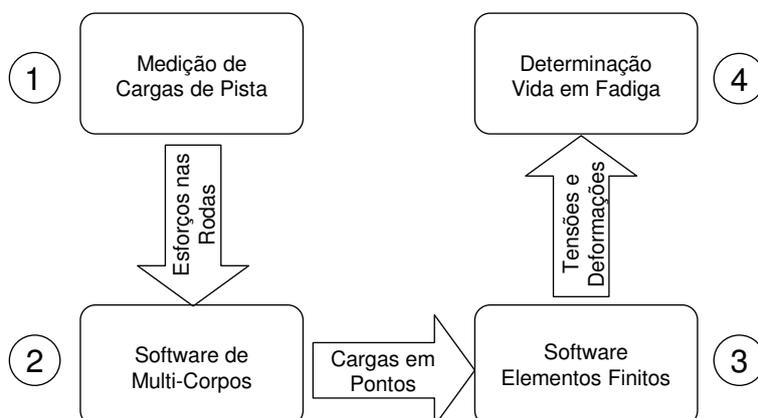


Figura 12. Método Semi-Analítico.

➤ Analítico

Metodologia similar ao Semi-Analítico, porém sem a necessidade da medição de esforços em pista, fase 1 da Figura 12. Para a realização desse processo é necessária a criação de um modelo de Multi-Corpos muito mais complexo do que o exigido pelo método Semi-Analítico, que, nesse caso, entre outras coisas, já deve considerar a estrutura do carro como flexível, e possuir em sua modelagem os complexos modelos de pneus, característica que atualmente ainda passa por um intenso processo de evolução. No processo analítico os eventos dos campos de prova são virtuais, onde os modelos numéricos computacionais dos veículos a serem testados são simulados. Não é necessária a iteração com o ambiente, conforme mostra a Figura 13, ou mesmo a criação de protótipos representativos, as chamadas “Mulas”.

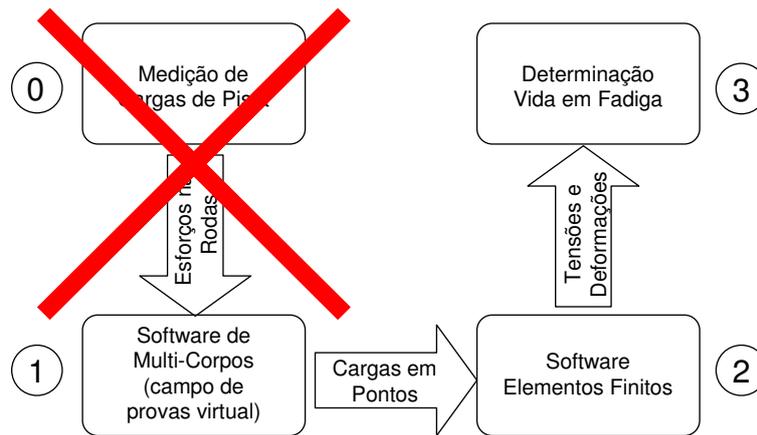


Figura 13. Método Analítico.

Entende-se que esta metodologia representa o futuro no projeto estrutural na indústria automotiva, porém, ainda carece de desenvolvimento, motivo pelo qual, mesmo hoje em dia, o método analítico somente é utilizado em comparações entre diferentes propostas de projeto de partes (DAKIN *et al*, 2001).

Qualquer metodologia que necessite de medições em pista com a utilização de *Wheel Force Transducers* determina que o time de engenharia somente poderá coletar as cargas necessárias para o desenvolvimento do projeto quando uma “Mula” estiver disponível para ser instrumentada. O problema é que esses protótipos, representativos o suficiente para gerar carregamentos confiáveis, somente ficam prontos muito adiante no processo de desenvolvimento de produtos. Dessa forma, muitas vezes o time de engenharia é forçado a utilizar, inicialmente, *Carregamentos de Pista* de outros modelos de veículos similares anteriormente desenvolvidos, durante o início do projeto da estrutura, enquanto possíveis alterações são mais baratas e rápidas, e somente possuirá *Carregamentos de Pista* medidos (mais representativos) muito adiante no processo de projeto, quando qualquer alteração, quando possível, se torna de muito maior custo para o programa. Assim, a capacidade de prever *Carregamentos de Pista* confiáveis o mais cedo possível no processo de desenvolvimento de automóveis, é uma vantagem competitiva desejada.

Os *Carregamentos de Pista* medidos com a utilização dos *Wheel Force Transducers* são diretamente influenciados pelos seguintes itens:

- Características do veículo testado: massa e sua distribuição, dimensões absolutas e relativas, geometria e rigidez das suspensões, pneus e resistência mecânica da carroceria;
- Condições do teste: velocidade, clima, condições da pista de teste e técnica do motorista;
- Tipos de eventos de pista: morfologia da superfície de rolagem das pistas de teste.

Esses testes de campo são demorados, caros e de questionável repetibilidade, pois são realizados em um ambiente pouco controlado e dependem muito da interação humana.

3 PROCESSAMENTO DE SINAIS USANDO WAVELETS

Wavelets são poderosas ferramentas matemáticas desenvolvidas para aperfeiçoar a decomposição de sinais no domínio tempo-frequência, avaliando este em diferentes escalas em um campo multi-resolucional permitindo a análise de diferentes aspectos da informação (MISITI, 2007).

Apesar de ser uma ferramenta relativamente nova, essa técnica vem sendo aplicada em várias áreas do conhecimento humano, e é muito popular no processamento de sinais, especialmente nas áreas de codificação e compressão, tais como imagens, vídeo e áudio em computadores, devido a sua característica de redução da taxa de amostragem (MATHWORKS, 2009).

3.1 O Que São Wavelets

A transformada wavelet contínua (CWT) é formalmente escrita como (VALENS, 1999):

$$\gamma(s, \tau) = \int f(t)\psi_{s,\tau}^*(t)dt, (1)$$

Onde * denota conjugação complexa. Essa equação mostra como uma função $f(t)$ é decomposta em um grupo de funções base $\psi_{s,\tau}(t)$ chamadas de wavelets. As variáveis s e τ são as novas dimensões, escala e translação, após a transformada wavelet. A equação (2) apresenta síntese da transformada wavelet.

$$f(t) = \iint \gamma(s, \tau)\psi_{s,\tau}(t)d\tau ds, (2)$$

As wavelets são geradas de uma única wavelet básica $\psi(t)$, chamada de wavelet mãe, que é escalada e transladada:

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}}\psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right), (3)$$

Na equação (3) s é o fator de escala, τ é o fator de translação e o fator $s^{-1/2}$ serve para a normalização da energia através das diferentes escalas.

É importante notar que em (1), (2) e (3) a função base da wavelet não é especificada. Essa é a diferença da transformada wavelet é da transformada de Fourier.

De forma simples uma wavelet é uma onda de duração limitada, irregular, assimétrica e com a média igual a zero. Ao contrário de uma onda senoidal, base da teoria da Transformada de Fourier, as quais têm uma duração ilimitada e são formas suaves e previsíveis (Figura 14).

Assim com na Transformada de Fourier, na qual um sinal é decomposto em várias senoides de diferentes frequências, na transformada wavelet um sinal é decomposto em versões deslocadas e escaladas de uma wavelet original, também chamada de wavelet mãe (MATHWORKS, 2009).

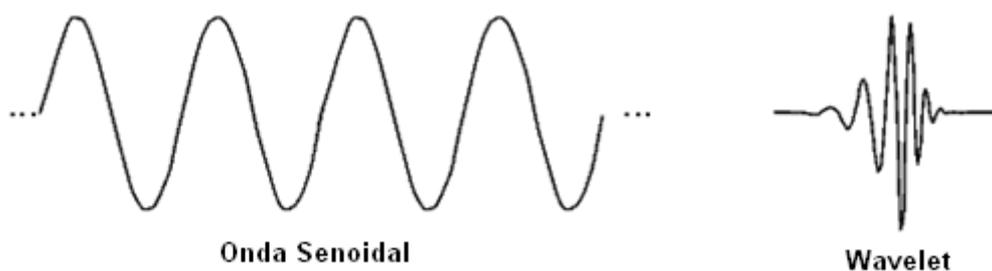


Figura 14. Onda Senoidal e Wavelet.

Durante a análise wavelet de um sinal, essas pequenas ondas não têm um tamanho fixo, e sim variável, tamanho esse que se adapta conforme as necessidades de resolução de cada situação. As wavelets são totalmente moduláveis e escaláveis (variáveis nas duas dimensões) e podem ser deslocadas ao longo do sinal (movidas por toda a duração do sinal) e para cada posição versões da wavelet mãe são calculadas. Esse processo é repetido muitas vezes com versões da wavelet mãe, ligeiramente menores ou maiores para cada novo ciclo. No final o resultado será uma coleção de representações de tempo-escala do sinal, em diferentes resoluções (VALENS, 1999).

3.2 Breve Histórico

Ainda que a análise wavelet seja um método relativamente recente, sua matemática remonta ao trabalho de Joseph Fourier no século XIX. Fourier estabeleceu as bases de suas teorias de análise de frequência, que se revelou extremamente importante e influente para diversas áreas do conhecimento humano tais como Física, Acústica, Sísmica, Elétrica, Óptica, além de outras áreas. Nos campos relacionados com

processamento de sinais, a Transformada de Fourier é utilizada para decompor um sinal nas suas componentes em frequência.

O primeiro registro do termo wavelet ocorre em 1909, na tese do matemático Alfred Haar, porém o conceito de wavelet, na sua forma atual, foi proposto pela primeira vez por Jean Morlet e a equipe do Centro de Física Teoria de Marselha na França (FARIA, 1997).

O algoritmo de análise multi-resolucional remonta ao trabalho de Stephane Mallat em 1988. Desde então, a investigação sobre wavelets tornou-se internacional. Essa investigação é particularmente ativa nos Estados Unidos, onde é liderada atualmente pelo trabalho dos pesquisadores, como Ingrid Daubechies, Ronald Coifman, Victor Wickerhauser, Yves Meyer, Alex Grossmann e George Zweig.

3.3 Da Transformada de Fourier à Transformada Wavelet

3.3.1 Transformada de Fourier

Uma ferramenta de análise de sinais muito popular é a Transformada de Fourier que decompõe um sinal contínuo no tempo em diversas senoides de diferentes frequências, representando o sinal, antes no domínio do tempo, agora num domínio da frequência (GOMES, 1999).



Figura 15. Processo da Transformada de Fourier.

Para grande parte dos sinais, a Transformada de Fourier é extremamente importante pois o acesso às informações de frequências desse sinal é muitas vezes primordial para o seu estudo. Porém, a Transformada de Fourier tem uma séria desvantagem, pois, quando um sinal é deslocado do domínio do tempo para o domínio da frequência, a informação de tempo não é evidente, impossibilitando determinar quando um evento, em particular, aconteceu.

Em se tratando de um sinal estacionário, que suas características não se alteram muito como tempo, a Transformada de Fourier é suficiente. Por outro lado, esta ferramenta não se mostra adequada quando a medição de diversos fenômenos registram diversas características transitórias ou não estacionárias, as quais usualmente estão associadas as características mais importantes do estudo do sinal.

3.3.2 Transformada de Fourier Janelada

Em 1946 Dennis Gabor, adaptou a Transformada de Fourier de forma que analisasse apenas uma seção pequena do sinal por vez, fazendo com que uma "janela" de análise corresse por toda a extensão do sinal. Essa técnica foi chamada de Transformada de Fourier Janelada e permitiu o mapeamento do sinal em um domínio bidimensional de tempo e frequência, o que permitiu uma determinação da densidade de frequência localizada também no domínio do tempo (GOMES, 1999). O procedimento adotado é ilustrado na Figura 16.



Figura 16. Processo da Transformada de Fourier Janelada.

Assim se tornou possível a análise de um sinal se avaliando concomitantemente quando e a que frequência um evento ocorre. Esta informação, porém, tem uma limitação de precisão determinada pelo tamanho da janela. Muitos estudos de sinais necessitam de uma abordagem mais flexível necessitando de uma variação da dimensão da janela para determinar com maior precisão tanto no tempo quanto na frequência (MATHWORKS, 2009).

3.3.3 Transformada Wavelet

A transformada wavelet permite o uso janelas maiores onde é necessária maior precisão para frequências baixas e janelas menores onde é necessária maior precisão para frequências altas, característica bem aplicável à grande maioria dos sinais práticos que apresentam componentes de alta frequência com curta duração e componentes de baixa frequência com longa duração. A Figura 17 ilustra o esquema.



Figura 17. Processo da Transformada Wavelet.

Ainda considerando as diferenças entre a Transformada de Fourier Janelada e a Transformada Wavelet, a primeira analisa frequências altas e baixas com a mesma resolução. A transformada wavelet, por outro lado, permite uma cobertura do plano tempo frequência com resolução temporal nas faixas de baixas frequências diferente da resolução nas faixas de altas frequências. A Figura 18 (FARIA, 1997) ilustra a informação com maiores detalhes.

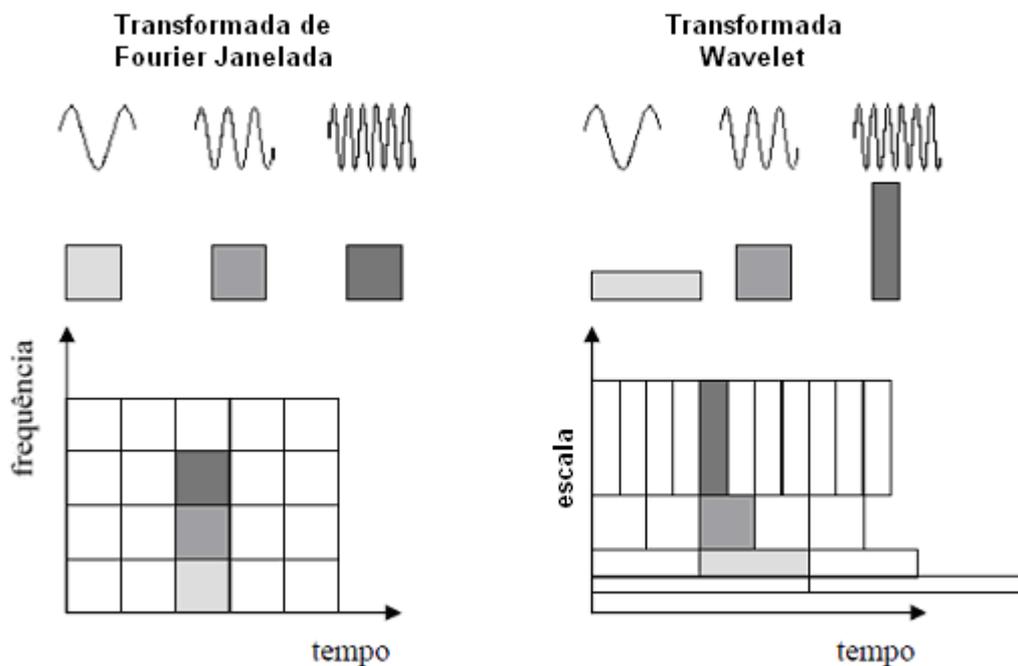


Figura 18. Comparação Gráfica das Transformadas.

É importante observar que a transformada wavelet, não se trata de tempo-frequência e sim de tempo-escala. Na transformada de Fourier buscamos as componentes de frequência que existem em um sinal. Na transformada wavelet

buscamos os instantes de tempo em que acontecem singularidades e a escala da wavelet em que a singularidade é observada.

3.4 Famílias de Wavelets

Wavelets são "ondas pequenas" que associam funções obtidas a partir de uma função protótipo denominada wavelet mãe, por meio de escalamento e translações. O objetivo primordial em se realizar estas operações é o de se obter uma família de funções base para descrever outras funções (FARIA, 1997).

As propriedades mais importantes das wavelets são admissibilidade e regularidade e essas são as propriedades que dão nome as wavelets (VALENS, 1999).

Sendo atendida a condição de admissibilidade (4), a reconstituição do sinal pode ser feita sem a perda de informação.

$$\int \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty, (4)$$

Na equação (4) $\psi(\omega)$ representa a transformada de Fourier de $\psi(t)$. A condição de admissibilidade implica que a transformada de Fourier de $\psi(t)$ desapareça em uma frequência igual a zero. O seja:

$$|\psi(\omega)|^2 \Big|_{\omega=0} = 0, (5)$$

Zero na frequência zero também significa que a média da wavelet, no domínio do tempo também é zero, e sendo assim ser oscilatória.

$$\int \psi(t) dt = 0, (6)$$

Dessa forma $\psi(t)$ precisa ser uma onda.

A condição de regularidade determina que a wavelet de possuir alguma suavidade e concentração tanto no domínio do tempo quanto da frequência. Essa condição determina que a transformada wavelet decresça rapidamente com o decaimento da escala s .

Se a equação (1) for expandida utilizando a série de Taylor, com $t=0$ até a ordem n , nos temos:

$$\gamma(s,0) = \frac{1}{\sqrt{s}} \left[\sum_{p=0}^n \frac{f^{(p)}(0)}{p!} \int \frac{t^p}{p!} \psi\left(\frac{t}{s}\right) dt + O(n+1) \right], \quad (7)$$

Na equação (7) $f^{(p)}$ representa a p -ésima derivada de f e $O(n+1)$ representa o resto da expansão. Se definirmos os momentos da wavelet como M_p :

$$M_p = \int t^p \psi(t) dt, \quad (8)$$

Reescrevendo a equação (7):

$$\gamma(s,0) = \frac{1}{\sqrt{s}} \left[f(0)M_0s + \frac{f^{(1)}(0)}{1!}M_1s^2 + \frac{f^{(2)}(0)}{2!}M_2s^3 + \dots + \frac{f^{(n)}(0)}{n!}M_ns^{n+1} + O(s^{n+2}) \right], \quad (9)$$

Da condição de admissibilidade temos que $M_0 = 0$, assim o primeiro termo do lado direito da equação (9) é zero. Se fizermos os outros termos até M_n zero, assim a os coeficientes $\gamma(s, \tau)$ da transformada wavelet vão decair tão rápido quanto S^{n+2} para um sinal suave $f(t)$.

Sumarizando a condição de admissibilidade nos dá a onda e a regularidade nos dá o rápido decaimento. As duas condições juntas nos dão a wavelet.

Toda discussão sobre wavelets se iniciaram com a wavelet Haar, que foi a primeira e a mais simples de todas e lembra uma função degrau, como apresentado na Figura 19 (FARIA, 1997).

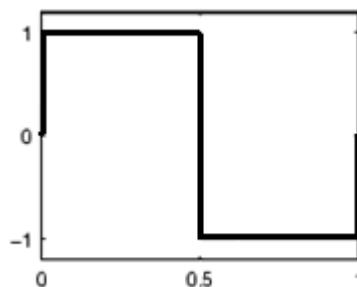


Figura 19. Wavelet Haar.

Dra. Ingrid Daubechies, física e matemática belga atualmente pesquisadora da Universidade de Princeton nos EUA, é um dos maiores expoentes do mundo na pesquisa e desenvolvimento de wavelets e criadora de duas importantes famílias de wavelets: a wavelet Daubechies (Figura 20) e Coiflets (Figura 21) (MATHWORKS, 2009).

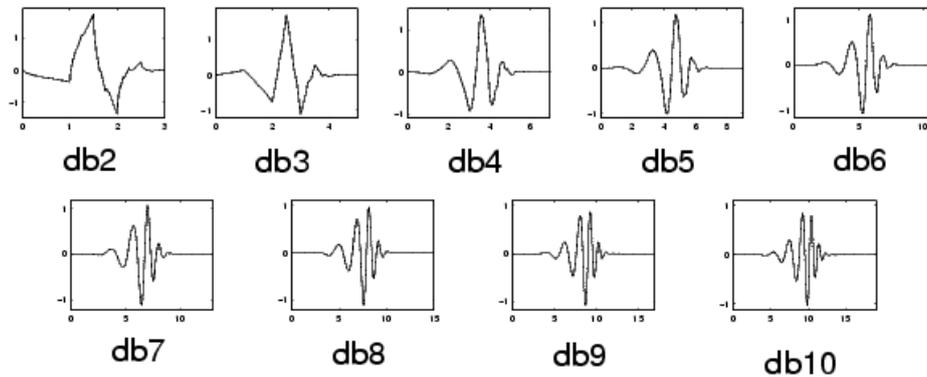


Figura 20. Família Wavelet Daubechies.

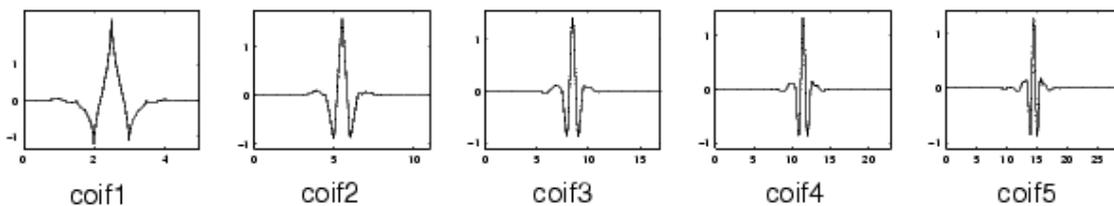


Figura 21. Família Wavelet Coiflets.

Atualmente existe muita atividade de desenvolvimento e pesquisas em torno das wavelets. Numerosos congressos, seminários, workshops, publicações especiais e conferências internacionais endereçando aspectos teóricos e aplicativos das wavelets são realizados e propostos em vários países (FARIA, 1997).

3.5 Decomposição Wavelet

Na decomposição wavelet é utilizada a transformada wavelet discreta (DWT) que veio da limitação dos computadores de trabalhar com equações analíticas integrais, usadas na Transformada Wavelet Contínua (CWT).

A Transformada Wavelet Discreta (DWT) usa o conceito de coeficiente de aproximação (cA) e coeficiente de detalhe (cD). As aproximações são de grande escala e relacionadas com os componentes de baixa frequência, e os detalhes são de pequena escala e relacionadas com componentes de alta frequência.

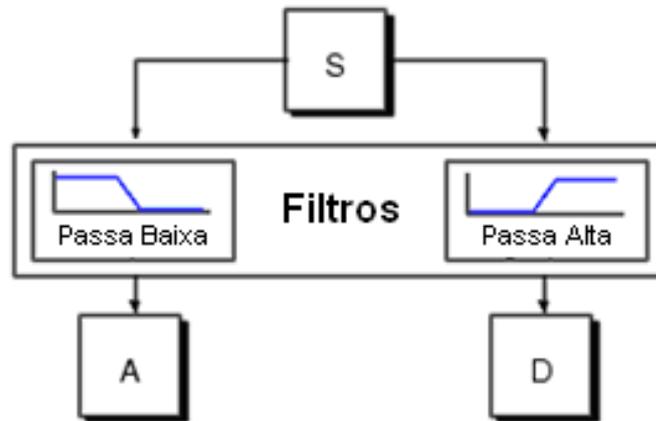


Figura 22. Banco de Filtros.

No primeiro passo do algoritmo DWT, o sinal original passa através de dois filtros complementares, um filtro passa baixa e um filtro passa alta (Figura 22).

No segundo passo, o algoritmo extrai metade das amostras do sinal filtrado, em um processo conhecido como sub-amostragem (Figura 23), resultando em seqüências denominadas coeficientes de aproximação e coeficientes de detalhes, cada uma com metade das amostras do sinal original.

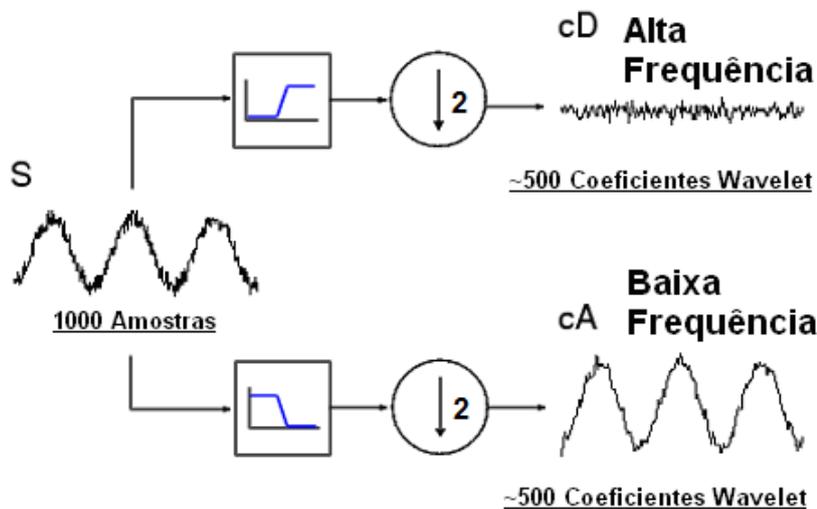


Figura 23. Decomposição Wavelet.

Esse processo de decomposição pode ser realizado em diversos níveis com aproximações e/ou detalhes sendo sucessivamente decompostas com o sinal sendo dividido em componentes de menor resolução. Esse processo é chamado de árvore de decomposição wavelet (Figura 24).

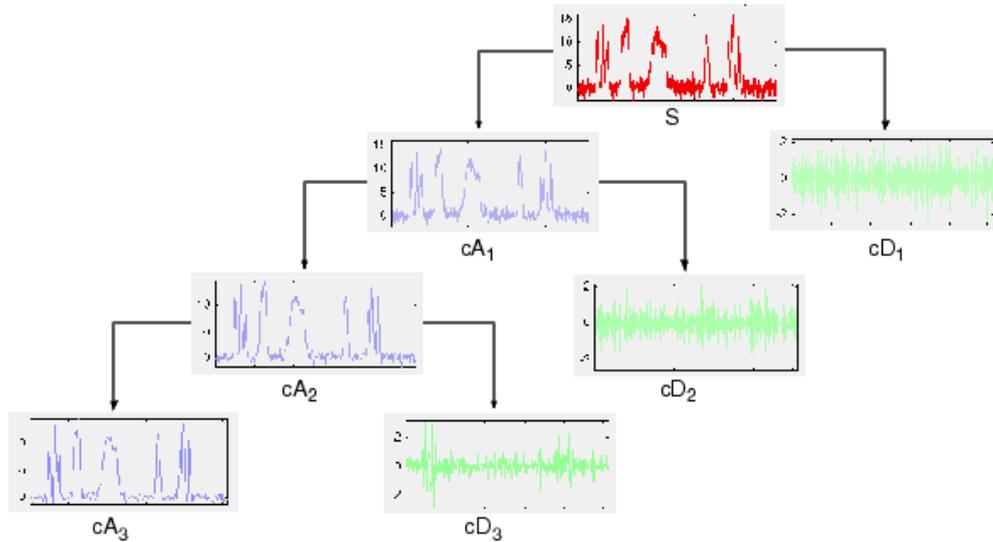


Figura 24. Árvore de Decomposição Wavelet (MATHWORKS, 2009).

A escolha se apenas as seqüências de coeficientes de aproximação ou se também as seqüências de coeficientes de detalhes vão ser decompostas, dependerá apenas da aplicação. A quantidade de níveis em que um sinal pode ser decomposto também depende apenas da aplicação, porém processo só pode continuar até restar apenas uma amostra (MATHWORKS, 2009).

No Anexo A.1 são apresentados processos de reconstrução e filtragem wavelet.

3.6 Wavelets na Compressão de Sinais

O processo de compressão de sinais utilizando DWT é baseado no descarte dos coeficientes de detalhes (altas freqüências), mantendo como resultado apenas a seqüência de coeficientes de aproximação (baixas freqüências). A idéia por trás desse método é que a informação de um sinal se concentra principalmente nos componentes de baixa freqüência enquanto os componentes de alta freqüência geralmente são devidos à ruído ou possuem informação irrelevante.

Esse processo pode ser realizado sucessivamente, ou seja, a seqüência de coeficientes de aproximação pode ser decomposta diversas vezes e os coeficientes de detalhes descartados. O processo pode ser repetido enquanto os resultados das aproximações contiverem informação suficiente para a aplicação onde serão empregados.

Na maioria dos sinais, assim como nos sinais utilizados em simulações de durabilidade, as informações de baixa frequência contêm a parte mais significativa da informação, pois essas compõem a identidade do sinal. Informações de alta frequência são nuances, modulações e ruído (MATHWORKS, 2009). Dessa forma, o uso de DWT na compressão de sinais é conveniente para reduzir a quantidade de dados dos sinais sem comprometer a essência da informação que esses carregam.

Um das mais aplicações mais populares das wavelets é a compressão de imagens de impressões digitais do FBI (FRAZIER, 1999). Outra área muito fecunda para esse tipo de aplicação é na remoção de ruído nos sinais de atividade cardíaca em eletrocardiogramas (ECG).

Ultimamente a compressão de sinal por decomposição wavelet vem sendo largamente utilizada na compressão de imagens digitais utilizadas em computadores como no padrão JPEG (FRAZIER, 1999).

4 COLETA DE DADOS PARA ANÁLISE DE DURABILIDADE

Considerando a engenharia de durabilidade, o campo de provas, e mais especificamente a pista de testes, é de fundamental importância no atual processo de desenvolvimento de produto automotivo. Por outro lado, são grandes instalações, de implantação e manutenção custosa, além de dependerem, fundamentalmente, da interação humana, experiência do piloto e do clima atmosférico, uma vez que dependendo dessas condições, muitos testes precisam ser adequados ou até mesmo suspensos.

Outra opção para realização de testes é a utilização de bancadas simuladoras, que diminuem substancialmente o número de variáveis envolvidas e aumentam os índices de repetibilidade e reprodutibilidade. Apesar de conseguir simular muito bem os esforços sofridos pelo veículo durante a sua utilização pelo consumidor final, as bancadas simuladoras de pista acopladas aos eixos são pouco difundidas, devido a seu custo e complexidade, ficando sua utilização restrita aos grandes centros de desenvolvimento em países do primeiro mundo, tais como Estados Unidos da América, Alemanha, Inglaterra, Itália e França. Em estudos anteriores (LIN, 2006), constata-se a possibilidade da utilização de um *Four Post*, bancadas simuladoras acopladas aos pneus, para estudos de durabilidade.

Qualquer método de ensaio em laboratório deve reduzir o tempo do teste de uma maneira tecnicamente válida, justificável e repetível além de garantir a reprodução do mesmo modo de falha e localização em laboratório (EL-RATAL, 2005).

Na última década foi possível observar na indústria automotiva o aumento da utilização de modelos numéricos computacionais, simulações CAE, em detrimento da construção de protótipos para testes físicos. Tal abordagem visa economizar tempo e dinheiro, mas por vezes não é tão fácil quanto pode parecer (KADING, 2004).

Nos métodos CAE, simplificações inerentes à modelagem numérica dos elementos e modelos constitutivos de materiais, podem culminar em resultados imprecisos. A constante evolução nos algoritmos e formulações está levando a simulação numérica cada vez mais fiel ao evento físico, porém isso vem exigindo um esforço computacional cada vez maior.

4.1 Comparação de Metodologias

Com o intuito de mostrar as diferenças apresentadas nos resultados obtidos em cada um das três metodologias, pista de testes, bancada simuladora e simulação numérica CAE, um experimento foi proposto, a medição de acelerações para cada uma delas conforme metodologia apresentada na Figura 25.

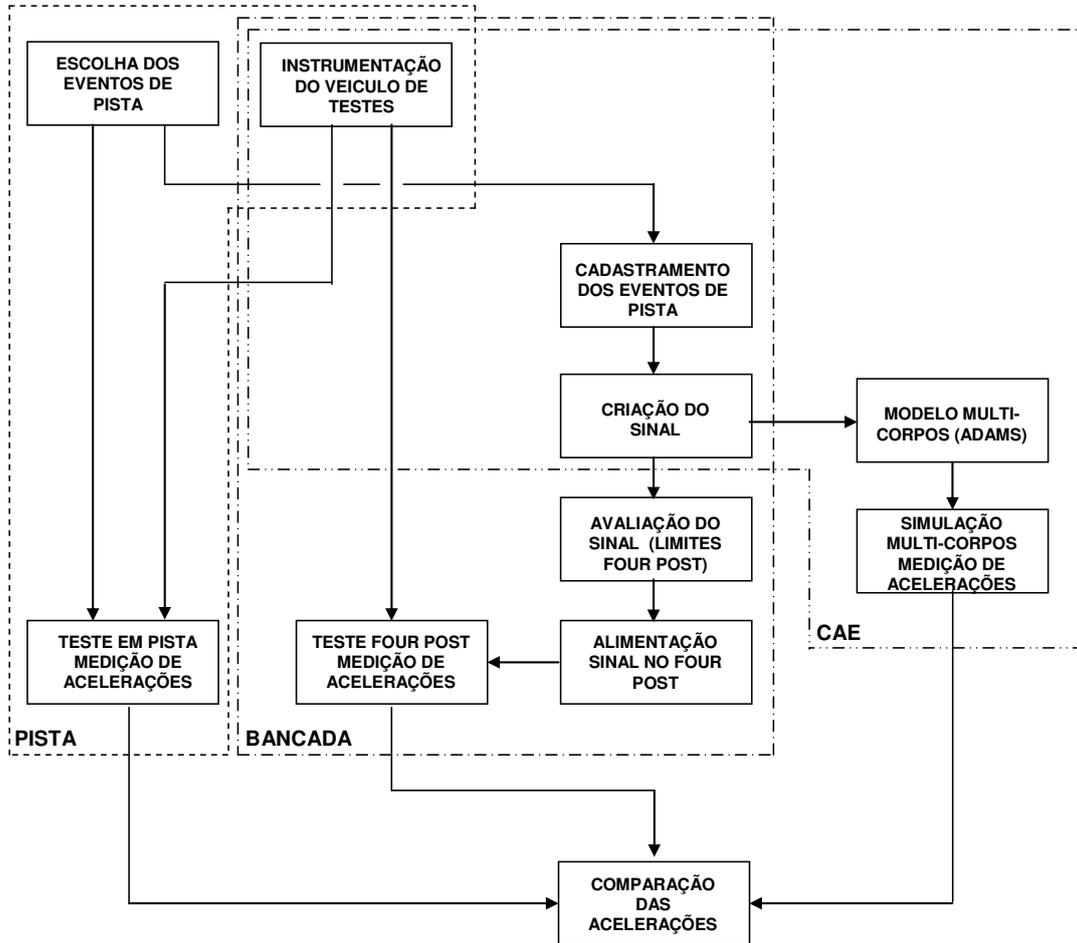


Figura 25. Metodologia Utilizada nos Trabalhos Experimentais.

Os esforços externos sofridos pela estrutura de um veículo são aplicados nos pontos de fixação do sistema de suspensão do carro (Figura 26). A localização e quantidade desses pontos dependem do modelo do veículo e do tipo de suspensão adotado no modelo.

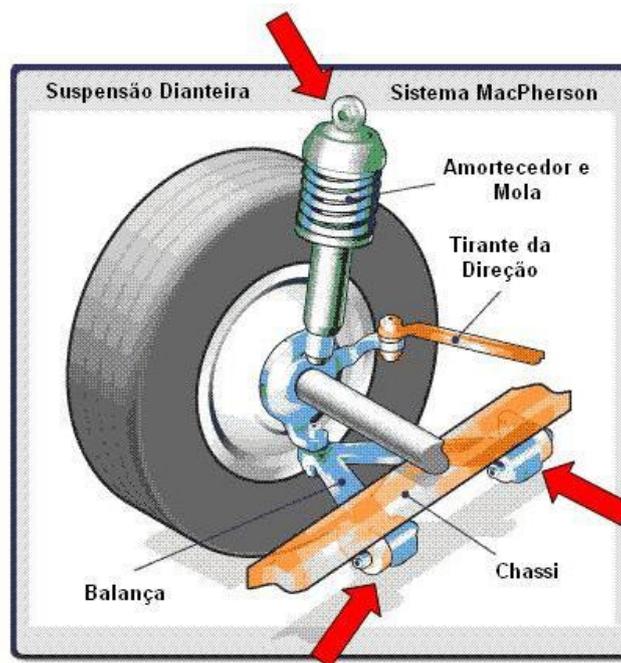


Figura 26. Pontos de Fixação de Uma Suspensão Tipo MacPherson.

A suspensão tem a função de absorver as vibrações e choques das rodas, proporcionando conforto aos ocupantes do veículo e garantindo o contato das rodas com o solo. A suspensão tem grande influência da estabilidade e dirigibilidade do veículo (FERREIRA, 2003).

Considerando como o mecanismo da suspensão é projetado, os esforços verticais, devido ao perfil vertical da pista, são introduzidos no veículo através dos amortecedores fixados à estrutura através das *Shock Towers* (torres dos amortecedores). Devido a isso, os modelos mais simples de bancadas simuladoras de pista possuem apenas quatro atuadores hidráulicos dispostos na posição vertical, *four post*, impondo apenas deslocamentos verticais através dos pneus para a estrutura do veículo.

4.1.1 Processo de Medição

Um veículo de testes foi instrumentado com um acelerômetro unidirecional Silicon Designs, modelo 2220-100, instalado no topo da torre do amortecedor (Figura 27), coletando a informação através de um coletor de dados HBM Spider 8 que foram gravados em um computador portátil com o software HBM Catman (Figura 28).



Figura 27. Acelerômetro Unidirecional Instalado.



Figura 28. Equipamentos Para Coleta e Registros de Dados.

O veículo instrumentado foi submetido ao evento padrão de teste “Lombada” (Figura 29), a uma velocidade de 10 km/h, seis vezes. As acelerações medidas foram registradas.



Figura 29. Evento Padrão Lombada da Pista de Testes.

A geometria do evento padrão de testes Lombada foi medida (cadastrada) para permitir a criação de um sinal digital, considerando uma velocidade de 10 km/h (velocidade determinada pelos padrões para esse evento do campo de provas disponibilizado), que será utilizado como sinal de entrada no *Four Post* (Figura 30).

Uma translação de -30 mm do ponto “zero” dos atuadores foi necessária devido ao deslocamento máximo de 160 mm (-80 mm para 80 mm) do equipamento disponível, e o deslocamento máximo necessário para reproduzir o evento padrão “Lombada” que é de 100 mm. Conforme é possível verificar, as duas rodas dianteiras (DE – Dianteira Esquerda e DD – Dianteira Direita) e as duas rodas traseiras (TE – Traseira Esquerda e TD – Traseira Direita) são deslocadas ao mesmo tempo e seguindo o mesmo padrão.

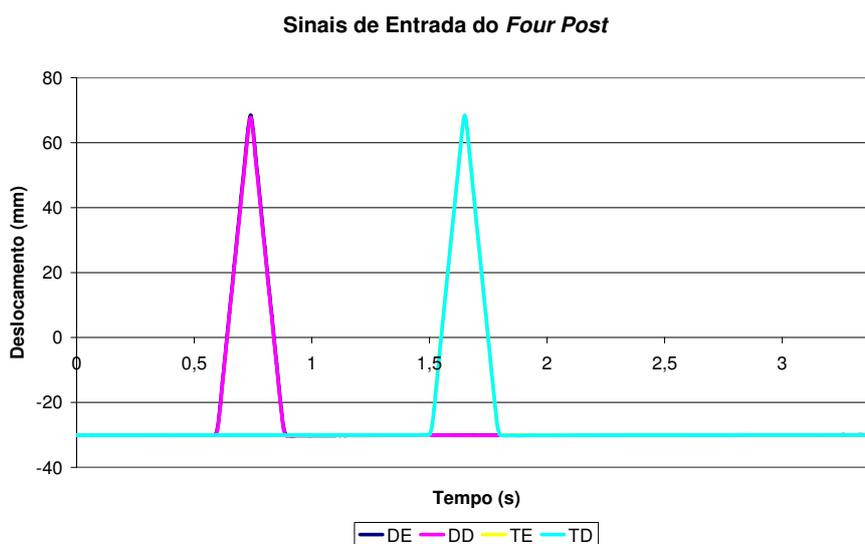


Figura 30. Sinal de Entrada do *Four Post*.

O mesmo veículo instrumentado, considerando o mesmo peso, foi sujeito a uma simulação do evento padrão “Lombada” no *Four Post* modelo RoadLab 4-Post da Instron Schenck Testing Systems Ltd, por seis vezes. As acelerações medidas foram registradas.

Utilizando um modelo de multicorpos no software MSC ADAMS versão 2006, representando o mesmo veículo, nas mesmas condições, testado anteriormente na pista de testes e no *Four Post*, foi realizada uma simulação numérica CAE, onde foram coletadas as acelerações no mesmo ponto medido no veículo.

4.1.2 Exemplos de Dados Coletados

A seguir são apresentados os gráficos das séries temporais coletadas pelas três metodologias, sendo seis passagens na pista de testes na Figura 31, seis passagens na bancada simuladora *Four Post* na Figura 32 e uma determinação na numérica ADAMS (Figura 33). Observa-se que neste último caso uma única simulação é suficiente pois não se justifica mais de uma determinação numéricas para as mesmas condições iniciais e mesmas condições de contorno.

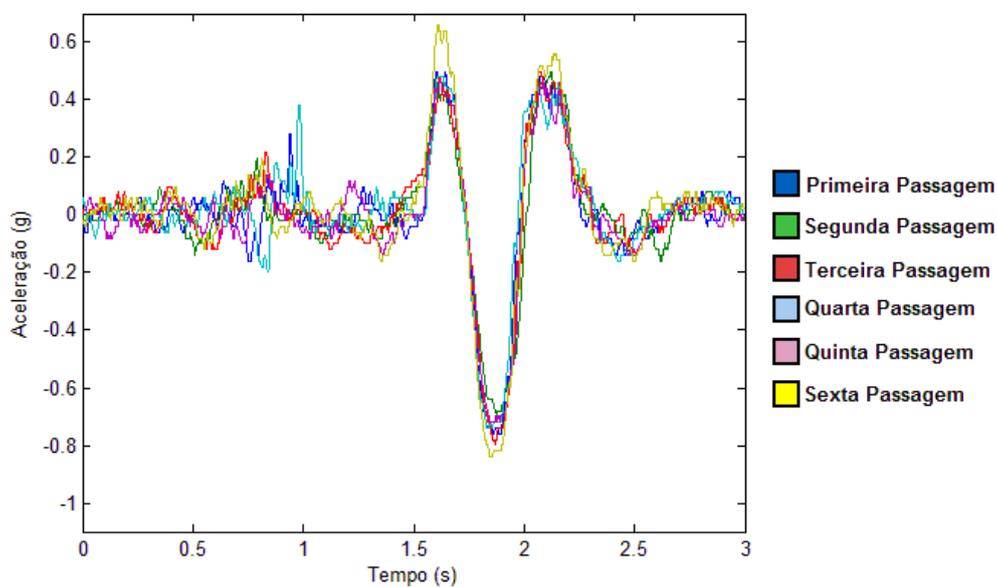


Figura 31. Acelerações Registradas na Pista de Testes.

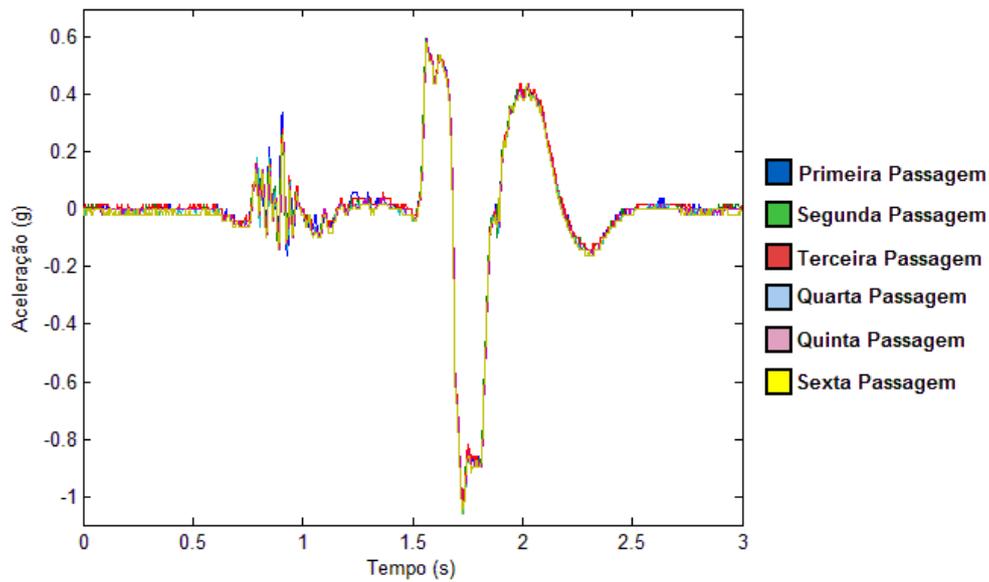


Figura 32. Acelerações Registradas no *Four Post*.

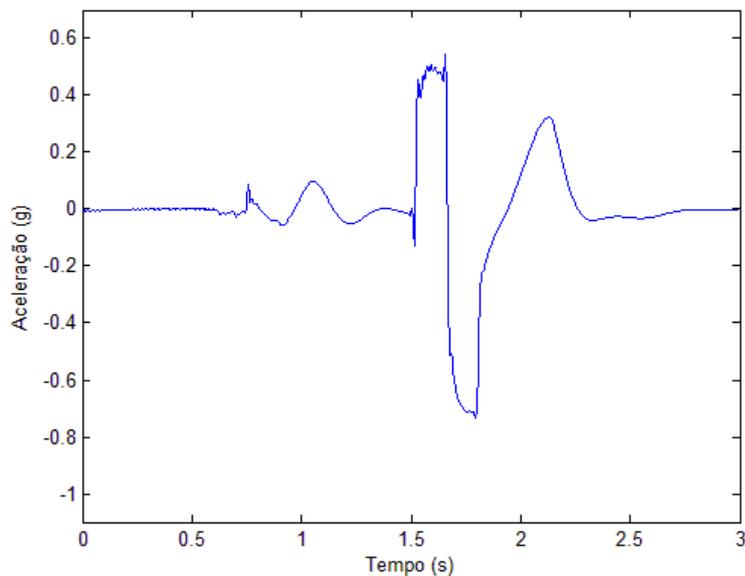


Figura 33. Acelerações Determinadas no ADAMS.

Apesar de certa semelhança entre os sinais, é possível se observar a maior dispersão e ruído nos resultados da pista de testes (Figura 31) em relação aos resultados obtidos no *Four Post* (Figura 32). Também é possível se observar diferenças entre os máximos e mínimos em cada uma das metodologias, bem como na duração dos eventos e na forma dos gráficos.

A pista de testes é das três metodologias apresentadas, a que mais depende de interação humana, e conseqüentemente possui o menor índice de repetibilidade e reprodutibilidade dos três métodos. Dificuldades ligadas a variáveis como condições

ambientais, o posicionamento de entrada e saída do veículo em relação ao evento, e até mesmo variações na velocidade horizontal do veículo (Figura 34), tanto de entrada quanto durante o evento, contribuem para a grande dispersão observada nos resultados.

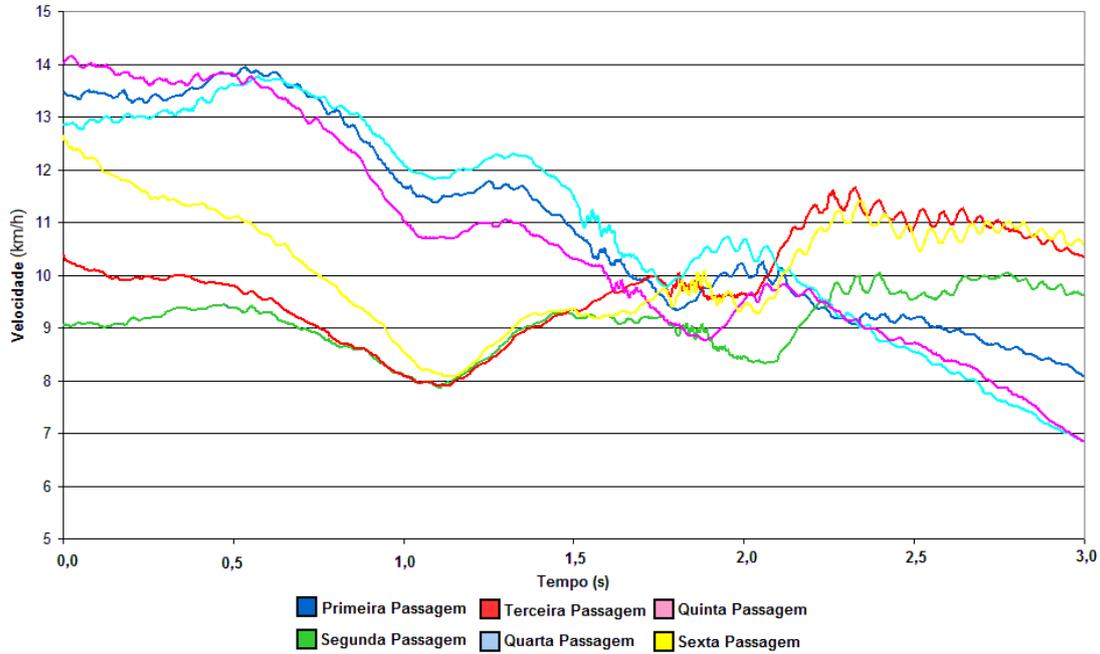


Figura 34. Velocidades Horizontais Medidas na Pista de Testes.

A seguir são apresentados os gráficos de densidade espectral de potência (PSD, g^2/Hz), considerando uma "janela" de 0 a 3 segundos, das séries temporais registradas pelas três metodologias, sendo seis passagens na pista de testes, Figura 35, seis passagens na bancada simuladora *Four Post*, Figura 36, e uma determinação na numérica ADAMS, Figura 37.

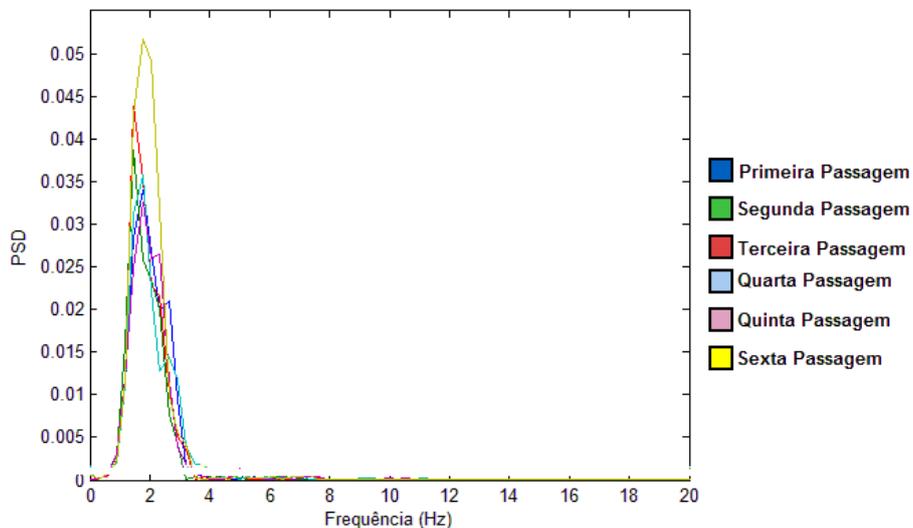


Figura 35. PSD das Acelerações da Pista de Testes.

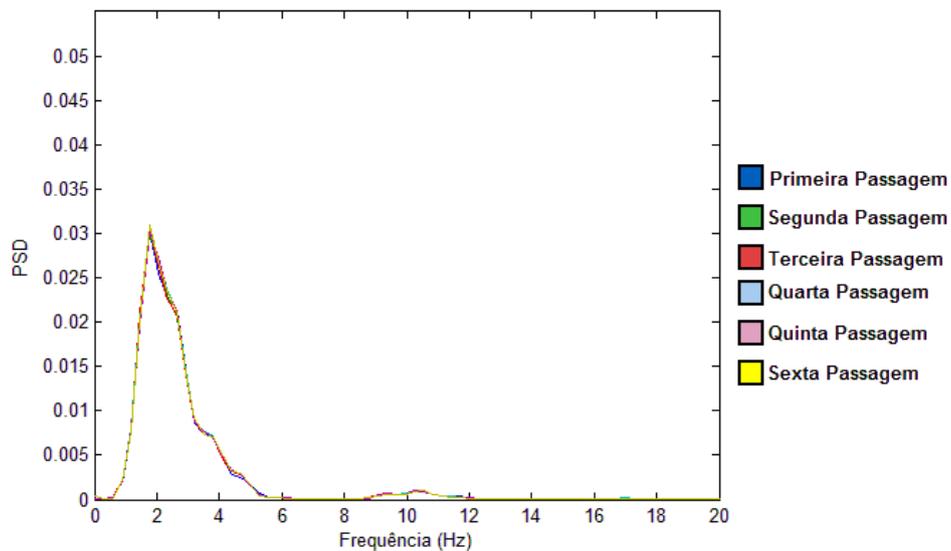


Figura 36. PSD das Acelerações do *Four Post*.

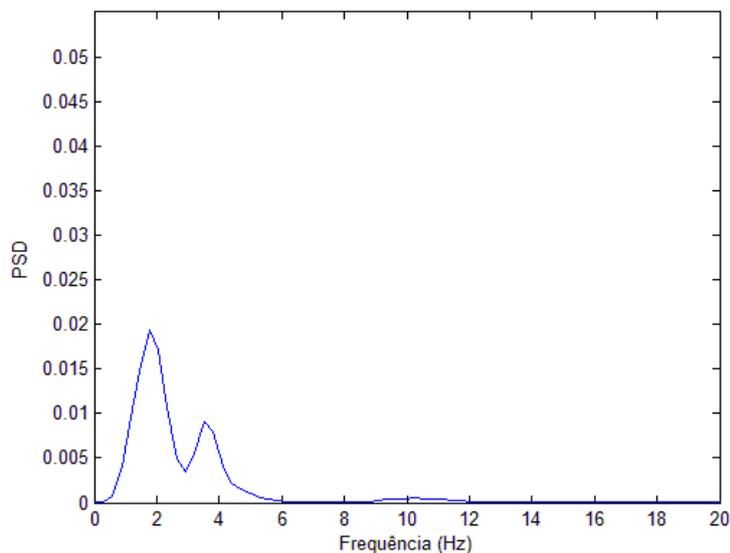


Figura 37. PSD das Acelerações do ADAMS.

Nesse ponto é possível verificar que a transformação da informação para o domínio da frequência já revela diferenças significativas entre os resultados obtidos pelas três metodologias. Mais uma vez é possível notar uma significativa diferença entre os resultados obtidos pelos três métodos.

No caso da pista de testes (Figura 35), praticamente toda a energia está concentrada em uma faixa de frequência de 0 Hz até 4 Hz, já no *Four Post* (Figura 36) essa faixa se estende até os 6 Hz e outra pequena quantidade de energia em uma segunda faixa de 8 Hz a 12 Hz.

O PSD obtido com a série de acelerações determinadas numericamente no ADAMS (Figura 37), mostra que quase a totalidade da energia se concentra em uma faixa de frequências de 0 Hz até 6 Hz, porém uma pequena quantidade de energia também existe em uma segunda faixa de 8 Hz até 12 Hz.

Um segundo ponto a ser notado no estudo no domínio da frequência, são as magnitudes dos picos de energia que diferem consideravelmente entre as três metodologias.

4.2 Considerações Sobre as Diferenças Entre os Métodos

Diferenças importantes são visíveis nos resultados de acelerações registrados para o mesmo evento quando realizado em cada uma das três metodologias disponíveis: pista de teste, bancada simuladora e determinação numérica no ADAMS.

Como já dito, as três metodologias convivem, até hoje, dividindo responsabilidades durante o processo de desenvolvimento de produto automotivo. Cada uma delas tem suas vantagens e desvantagens (Tabela 1) o que torna um ou outro método mais vantajoso para cada uma das fases do desenvolvimento.

As equipes de engenharia de durabilidade da indústria automotiva estão confiando cada vez mais em métodos CAE, porque esses são mais flexíveis e rápidos (DAKIN *et al*, 2001), fato que está alimentando um mercado crescente para o desenvolvimento de matemática computacional. Novos e poderosos *softwares* de CAE vêm sendo lançados com frequência cada vez maior.

Assim, as simulações CAE vêm evoluindo mais rapidamente do que as outras duas metodologias. Neste contexto, grandes esforços vêm sendo realizados para aperfeiçoar as bibliotecas de elementos finitos, modelos constitutivos de materiais e formulações para soluções numéricas. Como consequência, os resultados obtidos em simulações CAE vêm se tornando, cada dia, mais próximos da realidade física, permitindo o uso de modelos maiores, mais detalhados e complexos.

Por outro lado, esse desenvolvimento também requer maior esforço computacional para alcançar os resultados em um tempo razoável. Esse custo, associado ao crescimento da quantidade de informação gerada, são o maior obstáculo no avanço das tecnologias CAE.

Operacionalmente, para cada simulação numérica CAE que é realizada, um equilíbrio entre detalhamento e complexidade do modelo, versus a capacidade de processamento instalada (*hardware*) e o tempo disponível para o processamento, deve ser avaliado (Figura 38). O fato da capacidade de processamento instalada ser insuficiente pode impossibilitar o processamento de certo modelo.

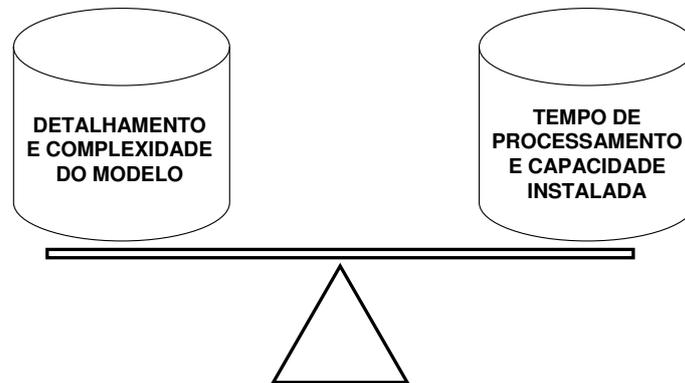


Figura 38. Balanceamento de Simulações CAE.

Especificamente para as equipes de durabilidade, grande parte do esforço computacional (e do tempo de processamento) em simulações CAE está diretamente relacionada com o tamanho dos arquivos das séries temporais utilizadas como sinais de entrada nos modelos (*load history*). O tamanho desses arquivos é diretamente influenciado pela duração do evento e pela resolução (taxa de amostragem) utilizada para representar o evento.

Ambos, a duração do evento e os instantes quando os seus detalhes ocorrem, são de grande importância nas simulações CAE, por existir uma forte correspondência entre a forma do carregamento e a resposta dinâmica da estrutura que está sendo simulada. Dessa forma, tal informação deve ser mantida, porém, é possível reduzir a resolução utilizada para representar o evento. Essa abordagem possibilita preservar a confiança nos resultados das simulações CAE, com a grande vantagem de demandar menos esforço computacional, conseqüentemente reduzindo o tempo de processamento.

Baseado no que foi exposto no capítulo 2.4 e nas considerações desse capítulo (4.2), o trabalho, aqui apresentado, se desenvolverá com o objetivo de contribuir com a evolução da metodologia CAE, visto que essa vem evoluindo mais rapidamente do que as outras duas metodologias, e assumindo um papel central no desenvolvimento de produtos (DIETZ, 1998)

5 APLICAÇÃO DAS WAVELETS NA COMPRESSÃO DOS SINAIS

Basicamente, o maior problema das equipes de engenharia de durabilidade da indústria e a determinação da vida em fadiga das peças e sistemas projetados, relacionada aos níveis de flutuação de tensão e ao número de repetições dessas flutuações.

A determinação da vida em fadiga está diretamente ligada ao tempo de utilização do produto pelo consumidor final, que durante o processo de desenvolvimento de produto, significa suportar todos os ciclos de eventos propostos na pista de testes do fabricante.

No ambiente virtual do CAE esses eventos são representados como sinais coletados nas pistas de testes, na forma de forças, momentos ou acelerações no tempo, e esses são utilizados como dados de entrada para a determinação dos ciclos de flutuação de tensão, sendo chamados de *Road Loads* ou *Load History*.

Das séries temporais de acelerações apresentadas no capítulo 4.1.2, apenas um dos sinais medidos nas passagens na pista de testes (Figura 31), escolhido de forma aleatória, será utilizado como sinal de pista proposto nos estudos realizados a seguir no capítulo 5.2.

Esse sinal de acelerações medidas será utilizado, também, no capítulo 5.3.1, como dado de entrada (*load history*) em simulações CAE para a determinação da flutuação de tensões, fundamental para a determinação da vida em fadiga (SHIGLEY, 2004).

5.1 Sinal de Pista Proposto

A coleta de dados pode se dar nas mais diferentes taxas de amostragens, sendo mais comumente utilizada pelas equipes de engenharia de durabilidade na indústria automotiva a taxa de 300 Hertz¹, que determina um número de 1024 amostras para um sinal representando as acelerações sofridas em um evento de 3,41 segundos de duração. Um exemplo de sinal está apresentado na Figura 39, e seu PSD, considerando uma "janela" de 0 a 3,41 segundos, na Figura 40.

¹ De acordo com o Teorema de Nyquist, uma taxa de amostragem de no mínimo duas vezes o valor da frequência máxima alcançada pelo sinal analógico é necessária para possibilitar o registro digital de todas as frequências analisadas.

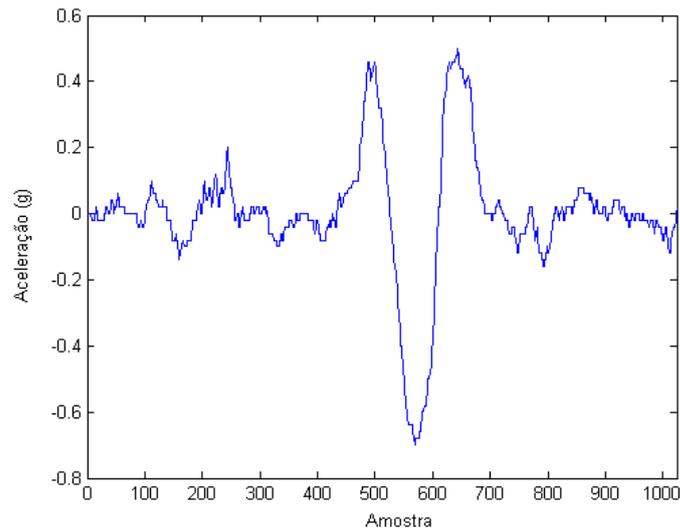


Figura 39. Sinal Original de Acelerações (g) de Pista, 1024 Amostras.

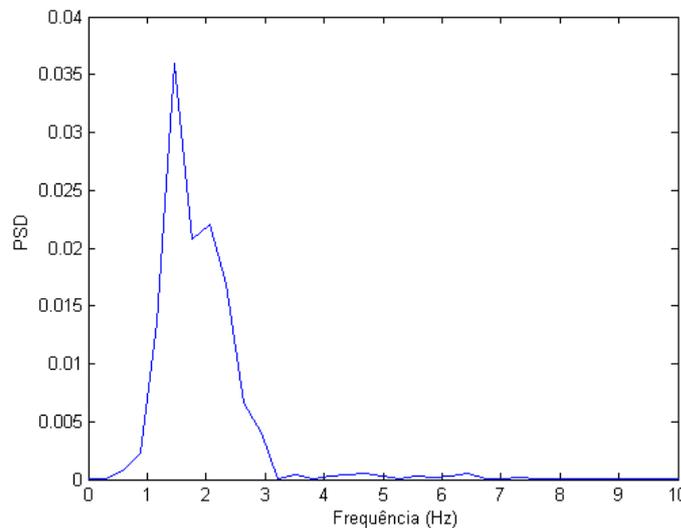


Figura 40. PSD do Sinal Original de Pista

5.2 Compressão do Sinal

Para comprimir o sinal original registrado pelo acelerômetro, foi utilizado Transformada Wavelet Discreta (DWT). Usando o software Matlab 7.0, o sinal original foi decomposto em três níveis, descartando os coeficientes de detalhe para cada nível e ficando apenas com a aproximação cA_3 (terceiro nível). Cada nível de decomposição reduz pela metade a quantidade de informação do sinal original. Dessa forma, no terceiro nível de decomposição, a sequência de coeficientes de aproximação cA_3 possui 1/8 de amostras do sinal primordial.

Nos experimentos foram utilizadas as wavelets Haar, Daubechies 2, Coiflets 1 e Coiflets 2, para permitir a comparação dos resultados obtidos por diferentes tipos de

wavelets. Essas quatro wavelets foram escolhidas por estarem disponíveis para DWT no software Matlab 7.0.

Nos resultado das séries formadas com os coeficientes de aproximação, para os três níveis de decomposição usando wavelet Haar, com 512, 256 e 128 amostras (respectivamente Figura 41, Figura 42 e Figura 43) pode ser observado que do sinal original (Figura 39) as informações de alta frequência vão desaparecendo à medida em que se avança na decomposição.

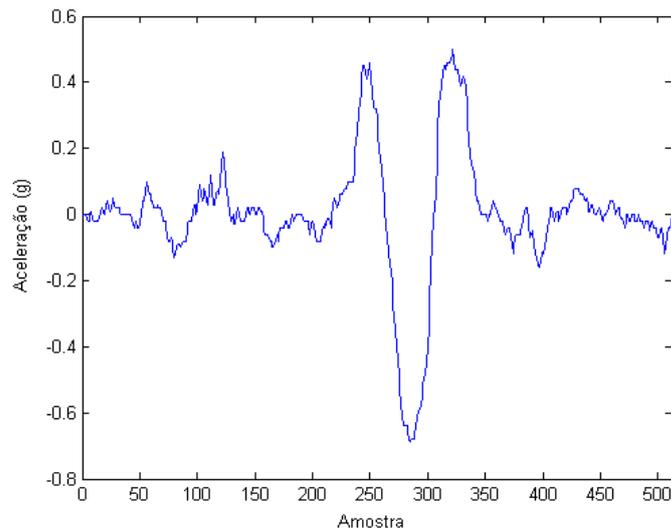


Figura 41. Seqüência de Aproximação do Primeiro Nível (cA_1), Haar, 512 Amostras.

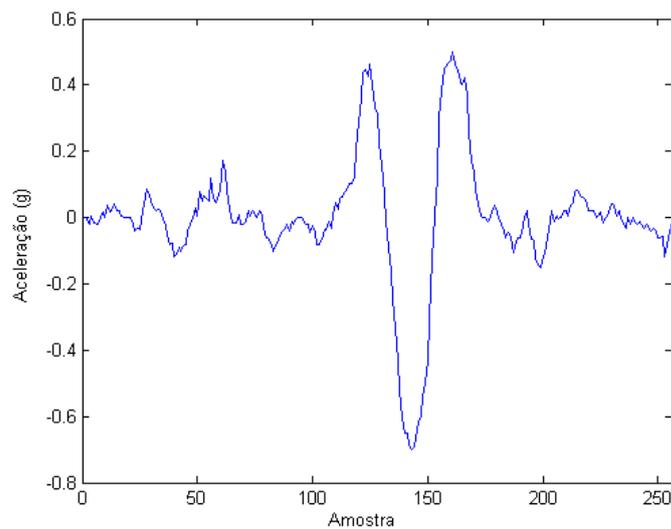


Figura 42. Seqüência de Aproximação do Segundo Nível (cA_2), Haar, 256 Amostras.

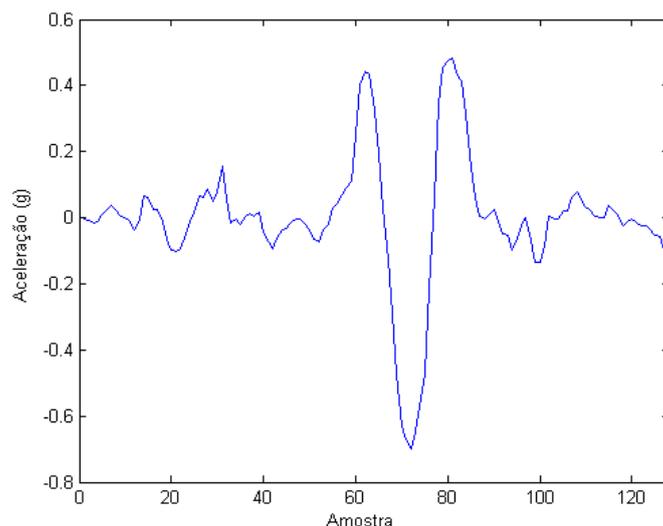


Figura 43. Seqüência de Aproximação do Terceiro Nível (cA₃), Haar, 128 Amostras.

Apesar da filtragem da informação de alta frequência, a comparação entre o sinal original e as seqüências de aproximações para o primeiro nível (cA₁), segundo nível (cA₂) e terceiro nível (cA₃), mostra uma grande similaridade entre todos os sinais, como apresentado na Figura 44.

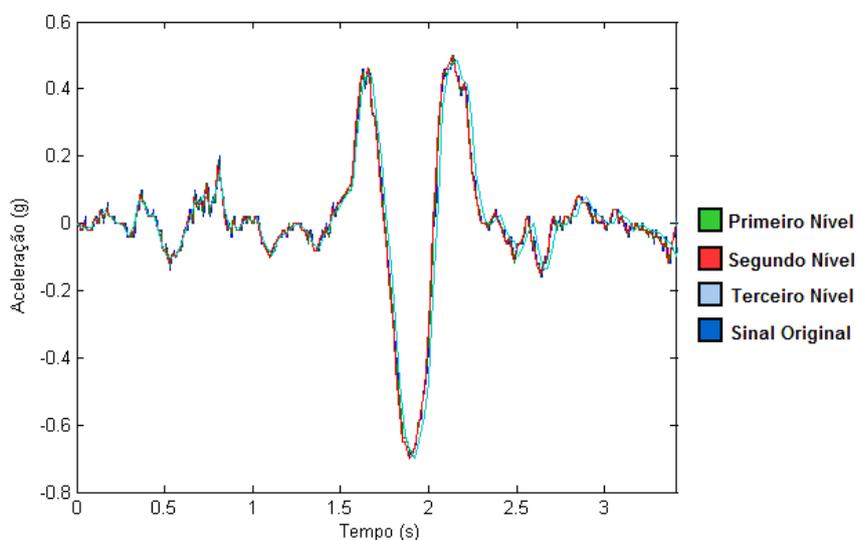


Figura 44. Superposição dos Sinais Original e Compactações Haar.

Nos gráficos a seguir, Figura 45, Figura 46 e Figura 47, são apresentadas as diferenças entre o sinal original e cada uma das seqüências de aproximações cA₁, cA₂ e cA₃ respectivamente (erro quadrático).

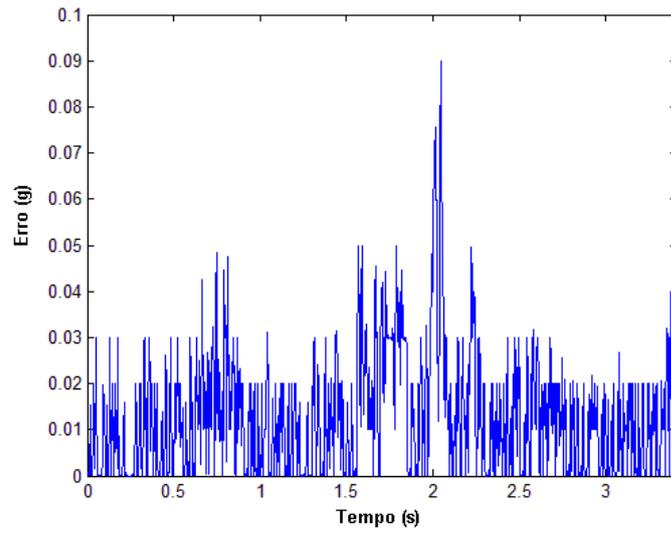


Figura 45. Erro Quadrático Para cA_1 , Haar.

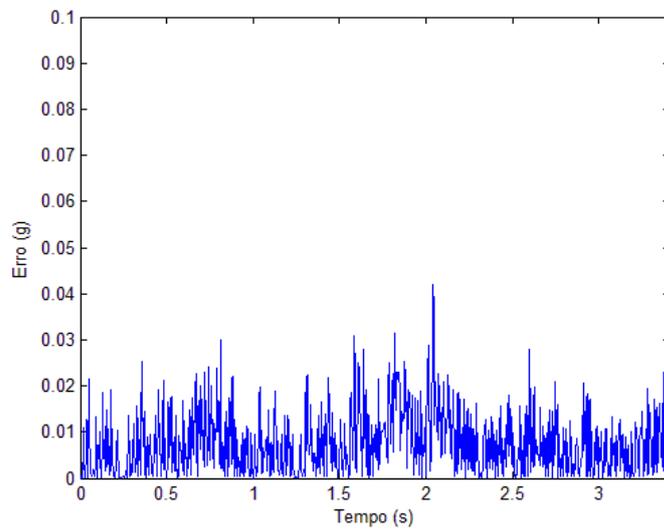


Figura 46. Erro Quadrático Para cA_2 , Haar.

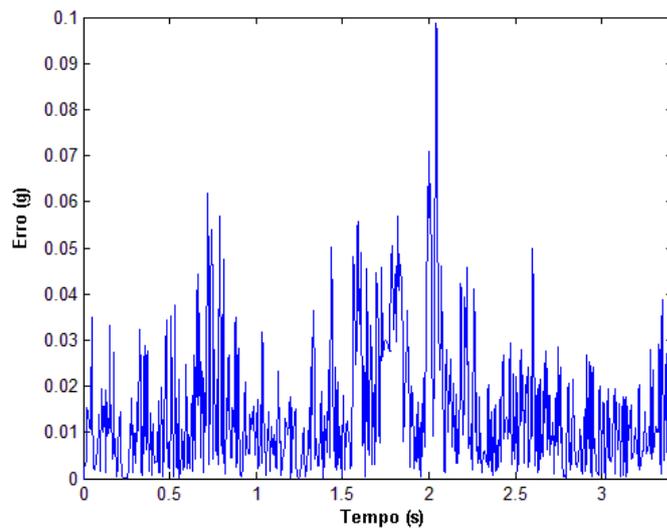


Figura 47. Erro Quadrático Para cA_3 , Haar.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da comparação de cada uma das wavelets utilizadas, para cada um dos três níveis de decomposição. É possível observar que para o terceiro nível de decomposição (cA_3), a wavelet Daubechies 2 apresentou o menor erro médio, 0,0122g.

Tabela 2. Erro Quadrático Médio.

	Erro Quadrático Médio (g)			
	Haar	Daubechies 2	Coiflets 1	Coiflets 2
Primeiro Nível 512 Amostras (cA_1).	0,0127	0,0065	0,0091	0,0091
Segundo Nível 256 Amostras (cA_2).	0,0075	0,0102	0,0099	0,0098
Terceiro Nível 128 Amostras (cA_3).	0,0146	0,0122	0,0128	0,0132

A análise desses sinais no domínio da frequência comprova essa similaridade. Na superposição das PSDs, Figura 48, mostra que as curvas das energias das seqüências de aproximações para o primeiro, segundo e terceiro níveis são muito similares à curva de energia do sinal original. Isso nos permitiu concluir que as seqüências de coeficientes de aproximação são representações suficientemente precisas do sinal original.

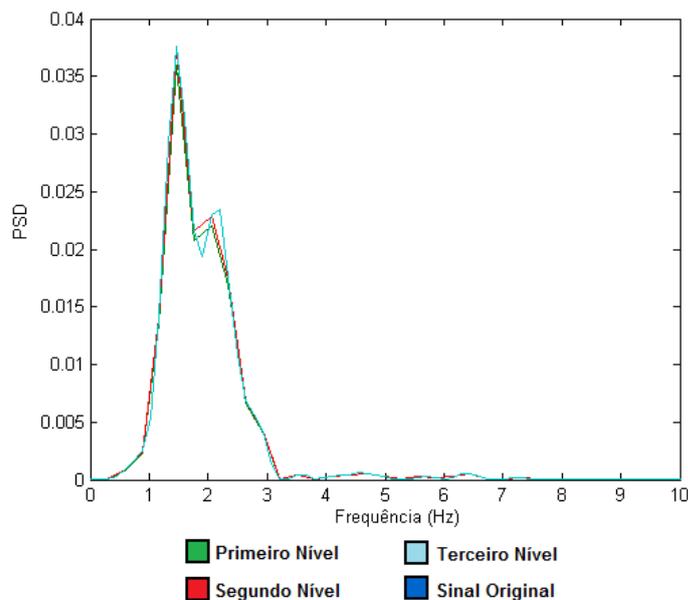


Figura 48. Gráficos PSD Superpostos, Haar.

Esse comportamento, no domínio da frequência, se repete para as seqüências de compressão utilizando as wavelets Daubechies 2, Coiflets 1 e Coiflets 2.

5.3 Aplicação Prática em CAE

Sinais de flutuações de acelerações são amplamente utilizados por equipes de engenharia de durabilidade para realizar simulações CAE de aceleração de base, lançando mão de soluções numéricas como *Large Mass Method* ou Análise de Resposta em Frequencia, para determinar flutuações de tensões e deformações, em peças e sistemas automotivos, durante o período do evento simulado.

Combinando essa informação com o número de repetições do evento, chamados de ciclos, e as propriedades para fadiga dos materiais utilizados no modelo CAE, utilizando métodos consagrados, é possível determinar a vida em fadiga para cada elemento finito do modelo em estudo (SHIGLEY, 2004). Como a determinação da vida em fadiga não é objetivo desse trabalho, somente serão determinadas as flutuações nas tensões.

O sinal de acelerações coletados e as três seqüência de aproximações para cada uma das decomposições DWT utilizadas, foram utilizadas como sinais carregamentos de entrada para o modelo CAE proposto (Figura 49).

O modelo CAE proposto, foi executado com elementos finitos 2D e 1D, e simulado no software MSC NASTRAN versão 2005.1.2, através da solução numérica SOL112, Análise de Resposta em Frequência, processado em uma estação de trabalho SUN ULTRA 45 com 4GB de RAM.

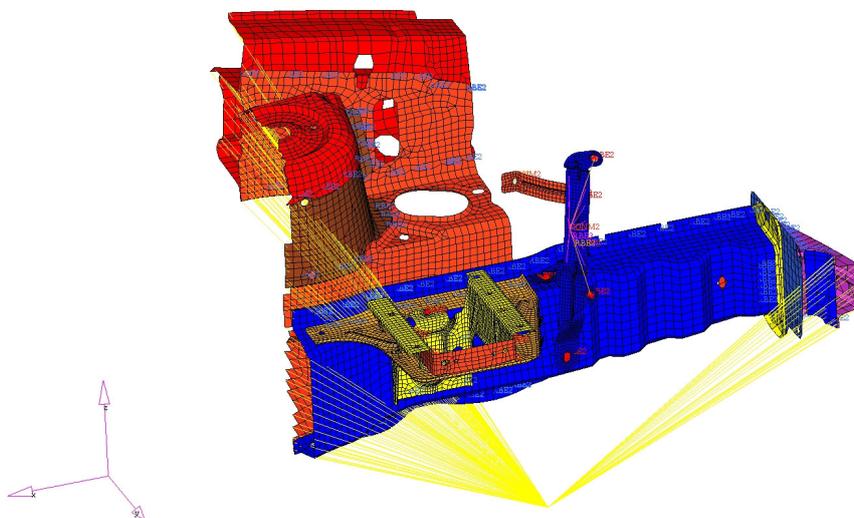


Figura 49. Modelo de Simulação Numérica CAE Proposto.

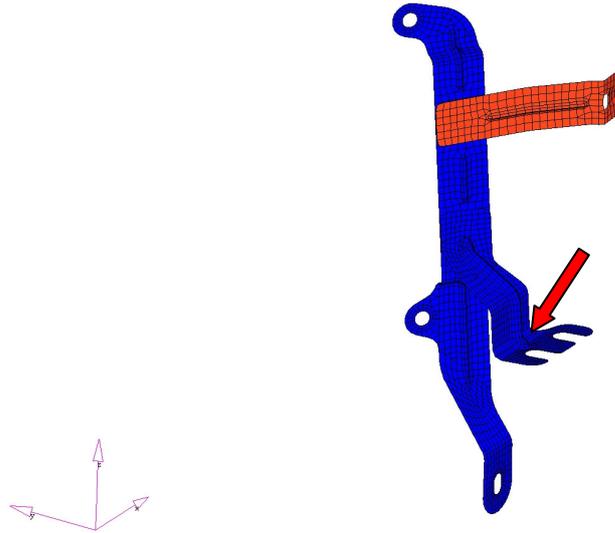


Figura 50. Detalhe do Modelo CAE Proposto.

Para as simulações realizadas foram utilizados como dados de entrada o sinal original de acelerações medidas e seqüências de aproximação para três níveis de decomposição para as wavelets: Haar, Daubechies 2, Coiflets 1 e Coiflets 2.

5.3.1 Resultados Para o Sinal de Pista Original

Na Figura 51 é apresentado o resultado final de determinação das tensões de Von Mises, através de metodologias CAE, nas fibras superiores, em azul, e inferiores, em vermelho, da chapa de aço no ponto representado pelo elemento finito mais solicitado do modelo proposto (Figura 50), durante toda a duração do evento proposto (3,41 segundos), utilizando como dados de entrada o sinal original medido na pista de testes com 1024 amostras.

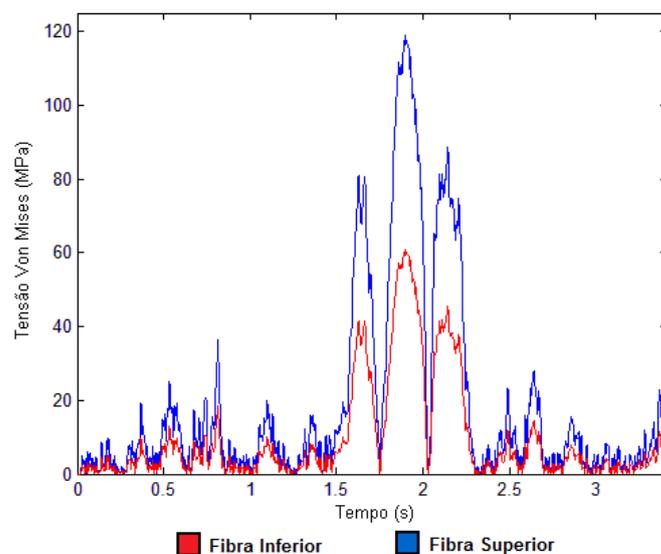


Figura 51. Tensão de Von Mises Para Sinal Original.

No gráfico anterior, é possível observar três grandes picos na flutuação da tensão de Von Mises, o primeiro aproximadamente no instante 1,6 segundos, o segundo aproximadamente no instante 1,9 segundos e o terceiro aproximadamente no instante 2,1 segundos. Esses resultados são apresentados para as fibras superiores na Tabela 3, e para as fibras inferiores na Tabela 4.

Tabela 3. Resultados Para sinal de Pista Original na Fibra Superior.

Instante (s)	Tensão de Von Mises Fibra Superior (MPa)
1,63	80,9
1,90	118,9
2,14	88,5

Tabela 4. Resultados Para sinal de Pista Original na Fibra Inferior.

Instante (s)	Tensão de Von Mises Fibra Inferior (MPa)
1,63	41,4
1,90	61,0
2,14	45,3

Partindo do pressuposto que a flutuação da tensão desempenha um papel fundamental na determinação da vida em fadiga, as magnitudes dos picos da tensão de Von Mises (HIBBELER, 2004) serão utilizadas, nesse estudo, para determinar métricas de qualidade, tempo de processamento e tamanho do arquivo de saída (Tabela 9).

5.3.2 Resultados Para Sinais Comprimidos

Na Figura 52, Figura 53 e Figura 54 são apresentados os resultados para a tensão de Von Mises, através de metodologias CAE, ao longo do período de duração do evento, 3,41 segundos, utilizando como sinal de entrada as séries de coeficientes de aproximação, para o primeiro, segundo e terceiro níveis de decomposição wavelet Haar, com 512, 256 e 128 amostras respectivamente.

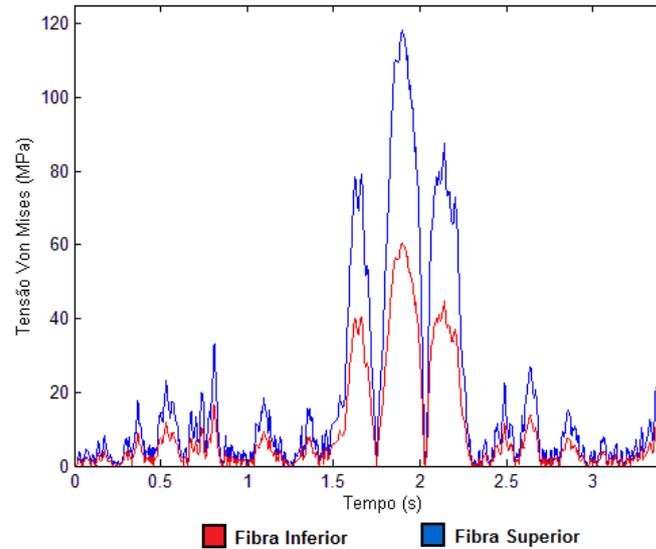


Figura 52. Tensão de Von Mises Para Nível 1, Haar, 512 Amostras.

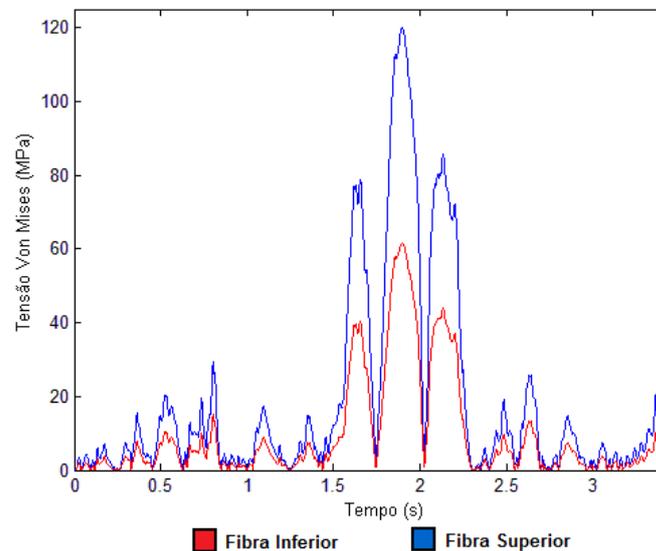


Figura 53. Tensão de Von Mises Para Nível 2, Haar, 256 Amostras.

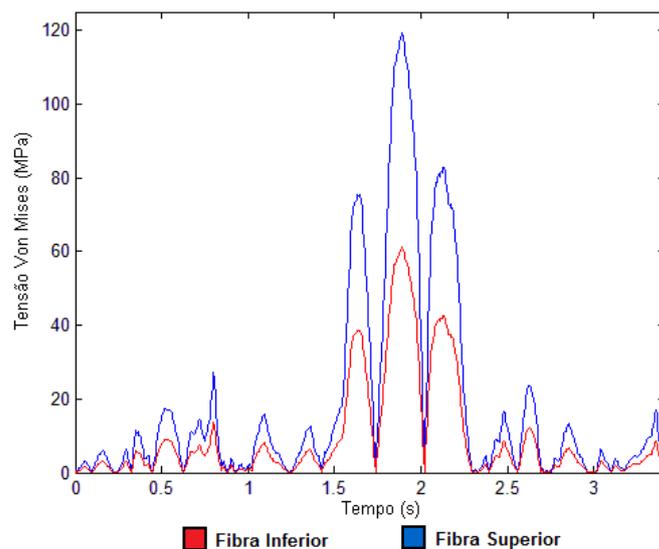


Figura 54. Tensão de Von Mises Para Nível 3, Haar, 128 Amostras.

Nos gráficos anteriores, é possível observar uma grande semelhança com o resultado obtido como sinal original (Figura 51), também sendo possível verificar os três grandes picos na flutuação da tensão de Von Mises, o primeiro aproximadamente no instante 1,6 segundos, o segundo aproximadamente no instante 1,9 segundos e o terceiro aproximadamente no instante 2,1 segundos.

O comportamento se repete para os resultados na flutuação da tensão de Von Mises, quando são utilizados as seqüências de aproximação das wavelets Daubechies 2, Coiflets 1 e Coiflets 2. Os resultados para as determinações CAE para tensão de Von Mises são apresentados na Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5. Resultados Para Sequencias de Aproximação na Fibra Superior.

	Instante (s)	Tensão de Von Mises (MPa)			
		Haar	Daubechies 2	Coiflets 1	Coiflets 2
Primeiro Nível 512 Amostras	~1,6	79,0	79,2	80,6	80,8
	~1,9	118,3	117,7	119,0	119,0
	~2,1	87,6	87,2	88,1	88,2
Segundo Nível 256 Amostras	~1,6	78,9	79,5	78,9	79,2
	~1,9	120,0	120,3	118,6	118,7
	~2,1	85,8	85,4	85,8	85,8
Terceiro Nível 128 Amostras	~1,6	75,4	78,4	77,2	77,5
	~1,9	119,3	119,6	119,1	119,7
	~2,1	83,0	84,3	84,1	83,6

Tabela 6. Resultados Para Sequencias de Aproximação na Fibra Inferior.

	Instante (s)	Tensão de Von Mises (MPa)			
		Haar	Daubechies 2	Coiflets 1	Coiflets 2
Primeiro Nível 512 Amostras	~1,6	40,4	40,5	41,2	41,3
	~1,9	60,6	60,3	61,0	61,0
	~2,1	44,8	44,6	45,1	45,1
Segundo Nível 256 Amostras	~1,6	40,4	40,7	40,4	40,6
	~1,9	61,5	61,6	60,8	60,8
	~2,1	43,9	43,7	43,9	44,0
Terceiro Nível 128 Amostras	~1,6	38,6	40,1	39,6	39,7
	~1,9	61,2	61,3	61,1	61,4
	~2,1	42,5	43,2	43,1	42,8

5.4 Comparação das Métricas de Controle e de Vantagem

Como já citado, o objetivo desse estudo foi utilizar a transformada wavelet discreta (DWT) como algoritmo de compressão dos sinais utilizados pelas equipes de engenharia de durabilidade nas simulações CAE para a determinação de tensões, deformações e conseqüentemente na determinação da vida em fadiga de peças e sistemas automotivos, com o compromisso de obter resultados coerentes com os resultados obtidos com a metodologia tradicional.

Na Tabela 7 e Tabela 8 são apresentados as diferenças entre os resultados de tensão de Von Mises obtidos utilizando as séries de coeficientes de aproximação, e o sinal original registrado na pista de testes. Esses resultados são métricas de controle, pois permitem observar a proximidade dos resultados obtidos utilizando a metodologia de compressão de sinais proposta, para os resultados obtidos com o sinal original.

Tabela 7. Erros Para Sequencias de Aproximação na Fibra Superior.

	Instante (s)	Erros (%)			
		Haar	Daubechies 2	Coiflets 1	Coiflets 2
Primeiro Nível 512 Amostras	~1,6	2,30	2,05	0,35	0,11
	~1,9	0,56	1,05	0,03	0,07
	~2,1	1,05	1,45	0,44	0,36
Segundo Nível 256 Amostras	~1,6	2,44	1,74	2,37	2,10
	~1,9	0,93	1,17	0,27	0,20
	~2,1	3,14	3,57	3,13	3,05
Terceiro Nível 128 Amostras	~1,6	6,72	3,07	4,52	4,15
	~1,9	0,29	0,59	0,17	0,66
	~2,1	6,28	4,80	4,96	5,55

Tabela 8. Erros Para Sequencias de Aproximação na Fibra Inferior.

	Instante (s)	Erros (%)			
		Haar	Daubechies 2	Coiflets 1	Coiflets 2
Primeiro Nível 512 Amostras	~1,6	2,30	2,03	0,33	0,10
	~1,9	0,63	1,12	0,02	0,02
	~2,1	1,18	1,57	0,58	0,50
Segundo Nível 256 Amostras	~1,6	2,22	1,65	2,25	1,97
	~1,9	0,86	1,07	0,36	0,30
	~2,1	3,08	3,70	3,10	3,04
Terceiro Nível 128 Amostras	~1,6	6,61	3,05	4,38	4,13
	~1,9	0,31	0,57	0,20	0,64
	~2,1	6,23	4,71	4,91	5,54

Como é possível observar na Tabela 7 e na Tabela 8, para o primeiro e segundo nível de compressão, seqüências com 512 e 256 amostras respectivamente, tanto para as fibras superiores quanto inferiores, os melhores resultados (destacados nas referidas tabelas) foram obtidos quando foi utilizada a wavelet Coiflets 2. Porém para o terceiro nível de compressão, seqüências com 128 amostras, a wavelet Daubechies 2 apresentou resultados mais próximos dos resultados obtidos com o sinal original (Tabela 3 e Tabela 4).

Na Tabela 9 são apresentadas as informações de tempo de processamento e tamanho do arquivo de saída, que são as métricas de vantagem da utilização da metodologia de compressão proposta.

Tabela 9. Tempo de Processamento e Tamanho do Arquivo de Saída.

		Tempo de Processamento (SUN ULTRA 45, 4GB)		Tamanho do Arquivo de Saída		Erro Máximo	
		(s)	Redução (%)	(Bytes)	Redução (%)	Fibra Superior (%)	Fibra Inferior (%)
Sinal Original		174	-	868.662.776	-	-	-
Haar	Primeiro Nível 512 Amostras (cA ₁).	118	32,2	434.481.332	50,0	2,30	2,30
	Segundo Nível 256 Amostras (cA ₂).	78	55,2	217.395.452	75,0	3,14	3,08
	Terceiro Nível 128 Amostras (cA ₃).	60	65,5	108.804.092	87,5	6,72	6,61
Daubechies 2	Primeiro Nível 512 Amostras (cA ₁).	109	37,4	434.483.200	50,0	2,05	2,03
	Segundo Nível 256 Amostras (cA ₂).	79	54,6	217.399.296	75,0	3,57	3,70
	Terceiro Nível 128 Amostras (cA ₃).	61	64,9	108.806.144	87,5	4,80	4,71
Coiflets 1	Primeiro Nível 512 Amostras (cA ₁).	117	32,8	434.483.200	50,0	0,44	0,58
	Segundo Nível 256 Amostras (cA ₂).	76	56,3	217.399.296	75,0	3,13	3,10
	Terceiro Nível 128 Amostras (cA ₃).	60	65,5	108.806.144	87,5	4,96	4,91
Coiflets 2	Primeiro Nível 512 Amostras (cA ₁).	116	33,3	434.581.504	50,0	0,36	0,50
	Segundo Nível 256 Amostras (cA ₂).	76	56,3	217.399.296	75,0	3,05	3,04
	Terceiro Nível 128 Amostras (cA ₃).	61	64,9	108.806.144	87,5	5,55	5,54

Na Tabela 9 é possível observar que independente do tipo de wavelet utilizada a redução do tempo de processamento para o primeiro nível fica por volta de 34%, para o

segundo nível fica por volta de 56% e para o terceiro nível por volta de 65%. O tamanho do arquivo de saída teve uma redução de 50% para o primeiro nível, 75% para o segundo nível e de 87,5% para o terceiro nível.

Considerando um limite de 5% para o erro máximo, padrão empírico muito utilizado na indústria para avaliações rápidas, as wavelets Daubechies 2 e Coiflets 1 apresentam bons resultados para o terceiro nível de compressão com erro máximos de 4,80% e 4,96% respectivamente. Porém as wavelets Haar e Coiflets 2, também para o terceiro nível de compressão, ultrapassam esse limite com erros máximos de 6,72% e 5,55% respectivamente.

Os resultados também mostram a relação direta entre o número de amostras do sinal de entrada das simulações CAE, com o tempo de processamento e o tamanho do arquivo de saída, e que isso é independente do tipo de wavelet utilizada.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O objetivo principal desse trabalho foi avaliar o uso da Transformada Discreta Wavelet (DWT) como algoritmo de compressão para reduzir a quantidade de informação nos arquivos de carregamento (*load history*) que são utilizados em simulações CAE realizadas pelas equipes de engenharia de durabilidade da indústria automotiva. A idéia principal foi reduzir o esforço computacional, tempo de processamento, espaço de armazenamento e tráfego em redes, ainda mantendo os parâmetros de qualidade e exatidão dos resultados.

Utilizando os coeficientes de aproximação do algoritmo de compressão baseado na DWT, foi possível a redução do tempo de processamento da simulação proposta em até 65,5%, e uma redução de 87,5% no tamanho do arquivo de saída (terceiro nível de aproximação na Tabela 9), mantendo-se uma coerência do resultado com o obtido pela metodologia tradicional (Tabela 7 e Tabela 8).

Como demonstrado na aplicação prática desse trabalho (capítulo 5.3), a metodologia proposta pode ser aplicada em simulações numéricas CAE, para a determinação de tensões, deformações e finalmente vida em fadiga. Os resultados demonstram que essa abordagem permite uma redução significativa dos custos computacionais associados.

É possível utilizar essa técnica para o processamento de modelos mais complexos obtendo os resultados em tempos compatíveis com os tempos de processamento dos modelos atuais, ou ainda reduzir o de processamento dos modelos atuais, sem a necessidade de se fazer uma melhoria no sistema computacional utilizado.

A eficiência do método utilizado nos capacita a avançar em sua utilização. Estudos futuros devem ser realizados para verificar se a utilização de outras famílias de wavelets pode reduzir ainda mais o erro de aproximação.

Uma outra linha de pesquisa será utilizar o mesmo método de compressão proposto, em sinais mais complexos, contendo baixas, médias e altas frequências, para confirmar a robustez dessa técnica na compressão de sinais e se ela traz vantagens similares às obtidas nesse estudo.

Finalmente, os novos estudos podem levar em consideração capacitar o algoritmo de compressão a avaliar o nível máximo compressão possível para cada sinal, caso a caso, de maneira a manter o compromisso de qualidade dos resultados obtidos. Dessa forma, o algoritmo se adaptaria ao tipo de sinal de entrada para obter o máximo benefício entre compressão e erro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DABELL, Brian; MUSIOL, Chris. **“Integrated Durability Management in the Automotive Industry”**. HBM – nCODE, Inc. Disponível em: <http://www.ncode.co.uk/pdfs/papers/ncode_IDM.pdf>. Acesso em: 30 de novembro de 2006.
- DAKIN, J. *et al.* **“Analytical Methods for Durability in the Automotive Industry – The Engineering Process, Past, Present and Future”**. In: SAE Brasil - International Conference On Fatigue, 1., 2001, São Paulo - SP. **Anais...** São Paulo: SAE Brasil, 2001.
- DANNBAUER, H.; GATTRINGER, O.; STEINBATZ, M. **“Integrating Virtual Test Methods And Physical Testing To Assure Accuracy And To Reduce Effort And Time”**. In: 2005 SAE World Congress, 2005, Detroit - MI. **Anais...** Warrendale: SAE, 2005.
- DAUP, Defense Acquisition University Press. **“Systems Engineering Fundamentals”**. 2001, Fort Belvoir - VA.
- DIETZ, S.; NETTER, H.; SACHAU, D. **“Fatigue Life Prediction of a Railway Bogie under Dynamic Loads through Simulation”**. In: LUGNER, P. (Org.). *Vehicle System Dynamics*. Londres: Taylor & Francis, 1998. 29:6, p.385-402.
- DONG, B. *et al.* **“Process to Achieve NVH Goals: Subsystem Target via “Digital Prototype” Simulations”**. In: SAE International Congress and Exposition, 1999, Detroit - MI. **Anais...** Warrendale: SAE, 1999.
- DRAPER, John. **“New Ideas In Fatigue Analysis”**. Penton Media, Inc. 2004. Disponível em: <<http://machinedesign.com/article/new-ideas-in-fatigue-analysis-1212>>. Acesso em: 28 de novembro de 2006.
- EL-RATAL, W *et al.* **“Fatigue Life Modelling And Accelerated Tests For Components Under Variable Amplitude Loads”**, ASTM International, 2005, West Conshohocken – PA.

- FARIA, Regis Rossi Alves. **“Aplicação De Wavelets Na Análise De Gestos Musicais Em Timbres De Instrumentos Acústicos Tradicionais”**. 1997. 203 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- FERREIRA, Hudson Tadeu. **“Determinação das Frequências Naturais e Modos de Vibrar de Um Veículo de Dois Eixos Através de Um Programa Computacional em MatLab-Simulink”**. 2003. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- FRAZIER, Michael W. **“An Introduction To Wavelets Through Linear Algebra”**. ed. Michigan State University, East Lansing - MI, USA, 1999. 503 p.
- FRINKLE, M. WEIR, R. FERRIS, J. B. **“A Graphical Representation of Road Profile Characteristics”**. In: 2004 SAE World Congress, 2004, Detroit - MI. **Anais...** Warrendale: SAE, 2004.
- GENTILCORE, Michael. **"An Assessment of the Fatigue Performance of Automotive Sheet Steels"**. In: 2004 SAE World Congress, 2004, Detroit - MI. **Anais...** Warrendale: SAE, 2004.
- GILLESPIE, Thomas D. **“Everything You Always Wanted to Know about the IRI, But Were Afraid to Ask!”**. In: Road Profile Users Group Meeting, 1992, Lincoln – NE.
- GOMES, Jonas; VELHO Luiz. **“From Fourier Analysis to Wavelets”**. ed. Instituto de Matemática Pura e Aplicada, IMPA, Rio de Janeiro, Brazil, 1999. 201 p.
- GROTE, Philip; SHARP, Malcolm. **“Defining The Vehicle Development Process”**. MTS Systems Corporation, 2000, Eden Prairie – MN.
- HIBBELER, R. C., **"Resistência dos Materiais"**. 5ª. Edição, ed. Pearson Education, São Paulo – SP, Brazil, 2004. 688 p.

- INCOSE, International Council on Systems Engineering. **“Guide to Systems Engineering Body of Knowledge (G2SEBoK)”**, 2003, Seattle – WA.
- JACKSON, M. *et al.* **“Systems Engineering Approach To Subsystem Design”**. In: SAE International Congress and Exposition, 1991, Detroit - MI. **Anais...** Warrendale: SAE, 1991.
- KADING, Dick. **“Simulations Replaces Prototyping”**. Penton Media, Inc. 2004. Disponível em: <<http://machinedesign.com/article/simulation-replaces-prototyping-1209>>. Acesso em: 28 de novembro de 2006.
- LIN, S. -H. *et al.* **“Experiments and CAE Analyses for Suspension Under Durability Road Load Conditions”**. In: 2006 SAE World Congress, 2006, Detroit - MI. **Anais...** Warrendale: SAE, 2006.
- MATHWORKS, **“Wavelets: A New Tool For Signal Analysis”**, Disponível em: <<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/wavelet/index.html?/access/helpdesk/help/toolbox/wavelet>>. Acesso em: 11 de junho de 2009.
- MISITI, M.; MISITI, Y.; OPPENHEIM, G. **“Wavelets And Their Applications”**. ed. ISTE, Londres, Inglaterra, 2007. 330 p.
- SAYERS, Michael W.; KARAMIHAS, Steven M. **“The Little Book Of Profiling, Basic Information About Mesuring And Interpreting Road Profiles”**. University Of Michigan. 1998, Dearborn – MI.
- SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G., **“Mechanical Engineering Design”**. 7^a. Edição, ed. McGraw-Hill, New York – NY, USA, 2004, 1030 p.
- TORRES, M. P. C.; HECKE, M. B.; MACHADO, R. D. **“Método de Análise de Falha Por Fadiga de Alto Ciclo em Metais Duros”**. In: XXIV Ibero Latin American Congress On Computational Methods For Engineering, 2003, Ouro Preto – MG. **Anais...** Ouro Preto: CILAMCE, 2003.

- VALENS, Clemens. “**A Really Friendly Guide To Wavelets**”. ed. Clemens Valens, 1999. 19 p. Disponível em: <<http://pagesperso-orange.fr/polyvalens/clemens/wavelets/wavelets.html>>. Acesso em: 15 de junho de 2009.
- WATERMAN, Pamela. “**Fatigue Analysis. What Is Important, And How To Relates To FEA**”. Desktop Engineering, Design Engineering Technology News Magazine, Dublin – NH, Set. 2002. Disponível em: <www.deskeng.com>. Acesso em: 28 de novembro de 2006.
- ZHANG, Yuan *et al.* “**Full Vehicle Finite Element Model 4-Post Durability Analysis**”. In: 2005 SAE World Congress, 2005, Detroit - MI. **Anais...** Warrendale: SAE, 2005.

ANEXOS

A.1. Reconstrução Wavelet e a Técnica de *Threshold*

O inverso da decomposição ou análise wavelet é o processo de recomposição de um sinal com base em seqüências de aproximação (cA) e detalhes (cD) se chama reconstrução ou síntese. O processo matemático de síntese é chamado de Transformada Discreta Inversa Wavelet (IDWT).

A cada nível de reconstrução, o sinal sofre uma super-amostragem, onde o resultado tem o dobro de amostras das seqüências de aproximação e detalhes utilizadas. Na Figura 55 é representado o processo de decomposição e reconstrução wavelet.

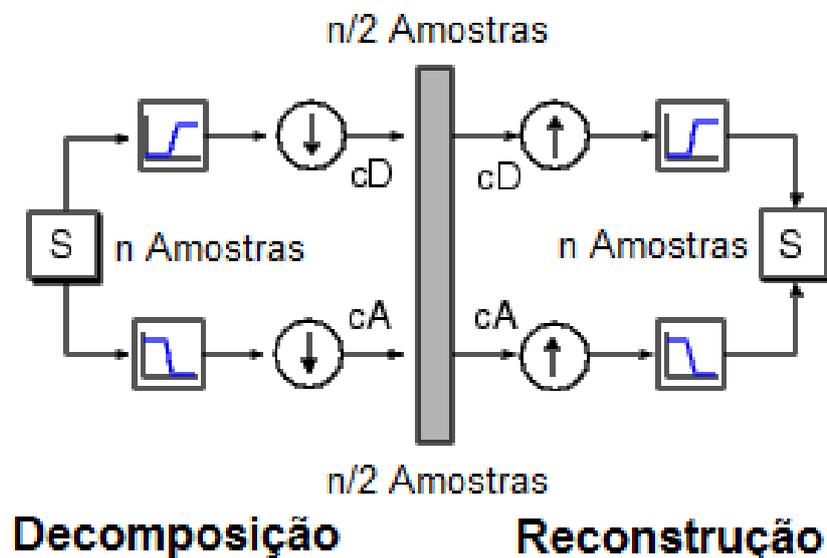


Figura 55. Decomposição e Reconstrução Wavelet.

Em algoritmos que se propõem a filtrar os sinais utilizando algoritmos baseados em wavelets, aplica-se a técnica do *threshold* nos coeficientes de detalhe, onde se limitam as amplitudes desses coeficientes e se recompõe o sinal primordial, agora já devidamente filtrado.

Na Figura 56 é representado o processo de filtragem de um sinal utilizando decomposição, *threshold* e reconstrução wavelet.

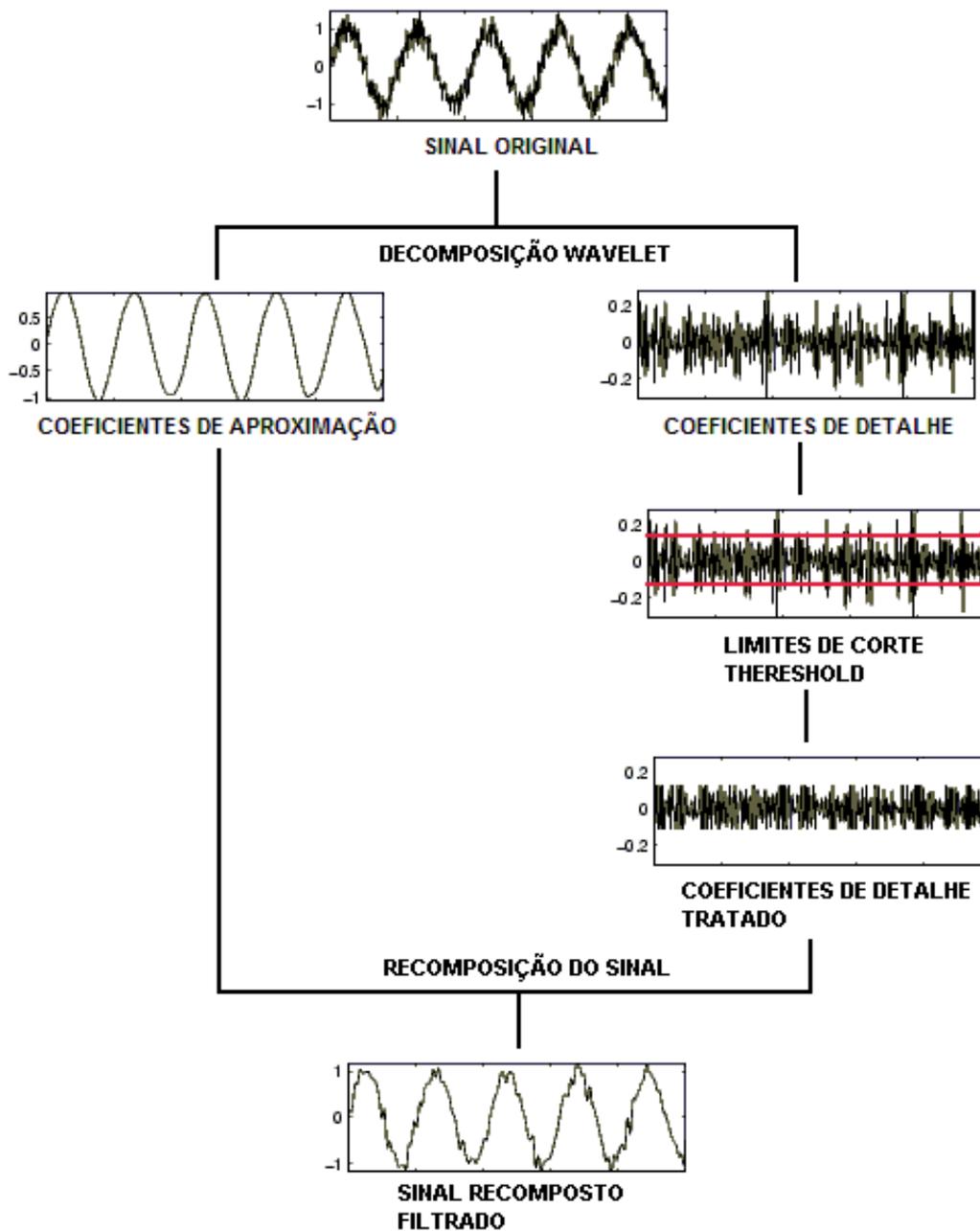


Figura 56. Filtragem de Sinal Usando Wavelet *Threshold*.

A.2. Programas Matlab

```
%Script para analise com transformada Wavelet Discreta
%Multiple level dos sinais utilizados no
%meostrado de Gustavo Andrade, no PPGM/UFBA

clear all % faxina inicial

%dados a serem analisados
load TE_bruto_2_1024.mat;
x=TE_bruto_1024_pista; % sinal a ser analisado

N=length(x); % Numero amostras sinal
Fs= 300; % Sample frequency
t = (0:N-1)/Fs; % Time vector

%
% Perform decomposition at level 3 of s using db2
%
[c,l]= wavedec(x,3,'db2');

% Extract aproximation and detail coefficients at levels 1, 2 and 3,
% from wavelet decomposition
[cD1_db2,cD2_db2,cD3_db2] = detcoef(c,l,[1 2 3]);
cA3_db2= appcoef(c,l,'db2',3);
cA2_db2= appcoef(c,l,'db2',2);
cA1_db2= appcoef(c,l,'db2',1);

%coleta de dados para ajuste de amplitude dos coeficientes wavelet
maximo_db2=max(x);
minimo_db2=min(x);
maximo_db2_cA1=max(cA1_db2);
minimo_db2_cA1=min(cA1_db2);
maximo_db2_cA2=max(cA2_db2);
minimo_db2_cA2=min(cA2_db2);
maximo_db2_cA3=max(cA3_db2);
minimo_db2_cA3=min(cA3_db2);

%calculo fatores de ajuste para amplitudes dos coeficientes wavelet
corr_db2_cA1=min(abs(maximo_db2/maximo_db2_cA1),abs(minimo_db2/minimo_
db2_cA1));
corr_db2_cA2=min(abs(maximo_db2/maximo_db2_cA2),abs(minimo_db2/minimo_
db2_cA2));
corr_db2_cA3=min(abs(maximo_db2/maximo_db2_cA3),abs(minimo_db2/minimo_
db2_cA3));

%coeficientes wavelets com amplitudes ajustadas
cA1_db2_corr=cA1_db2*corr_db2_cA1;
cA2_db2_corr=cA2_db2*corr_db2_cA2;
cA3_db2_corr=cA3_db2*corr_db2_cA3;

%
% Perform decomposition at level 3 of s using haar
%
```

```

[c,1]= wavedec(x,3,'haar');

% Extract aproximation and detail coefficients at levels 1, 2 and 3,
% from wavelet decomposition
[cD1_haar,cD2_haar,cD3_haar] = detcoef(c,1,[1 2 3]);
cA3_haar= appcoef(c,1,'haar',3);
cA2_haar= appcoef(c,1,'haar',2);
cA1_haar= appcoef(c,1,'haar',1);

%coleta de dados para ajuste de amplitude dos coeficientes wavelet
maximo_haar=max(x);
minimo_haar=min(x);
maximo_haar_cA1=max(cA1_haar);
minimo_haar_cA1=min(cA1_haar);
maximo_haar_cA2=max(cA2_haar);
minimo_haar_cA2=min(cA2_haar);
maximo_haar_cA3=max(cA3_haar);
minimo_haar_cA3=min(cA3_haar);

%calculo fatores de ajuste para amplitudes dos coeficientes wavelet
corr_haar_cA1=min(abs(maximo_haar/maximo_haar_cA1),abs(minimo_haar/minimo_haar_cA1));
corr_haar_cA2=min(abs(maximo_haar/maximo_haar_cA2),abs(minimo_haar/minimo_haar_cA2));
corr_haar_cA3=min(abs(maximo_haar/maximo_haar_cA3),abs(minimo_haar/minimo_haar_cA3));

%coeficientes wavelets com amplitudes ajustadas
cA1_haar_corr=cA1_haar*corr_haar_cA1;
cA2_haar_corr=cA2_haar*corr_haar_cA2;
cA3_haar_corr=cA3_haar*corr_haar_cA3;

%
% Perform decomposition at level 3 of s using coif1
%
[c,1]= wavedec(x,3,'coif1');

% Extract aproximation and detail coefficients at levels 1, 2 and 3,
% from wavelet decomposition
[cD1_coif1,cD2_coif1,cD3_coif1] = detcoef(c,1,[1 2 3]);
cA3_coif1= appcoef(c,1,'coif1',3);
cA2_coif1= appcoef(c,1,'coif1',2);
cA1_coif1= appcoef(c,1,'coif1',1);

%coleta de dados para ajuste de amplitude dos coeficientes wavelet
maximo_coif1=max(x);
minimo_coif1=min(x);
maximo_coif1_cA1=max(cA1_coif1);
minimo_coif1_cA1=min(cA1_coif1);
maximo_coif1_cA2=max(cA2_coif1);
minimo_coif1_cA2=min(cA2_coif1);
maximo_coif1_cA3=max(cA3_coif1);
minimo_coif1_cA3=min(cA3_coif1);

%calculo fatores de ajuste para amplitudes dos coeficientes wavelet
corr_coif1_cA1=min(abs(maximo_coif1/maximo_coif1_cA1),abs(minimo_coif1/minimo_coif1_cA1));
corr_coif1_cA2=min(abs(maximo_coif1/maximo_coif1_cA2),abs(minimo_coif1/minimo_coif1_cA2));

```

```

corr_coif1_cA3=min(abs(maximo_coif1/maximo_coif1_cA3),abs(minimo_coif1
/minimo_coif1_cA3));

%coeficientes wavelets com amplitudes ajustadas
cA1_coif1_corr=cA1_coif1*corr_coif1_cA1;
cA2_coif1_corr=cA2_coif1*corr_coif1_cA2;
cA3_coif1_corr=cA3_coif1*corr_coif1_cA3;

%
% Perform decomposition at level 3 of s using coif2
%
[c,l]= wavedec(x,3,'coif2');

% Extract approximation and detail coefficients at levels 1, 2 and 3,
% from wavelet decomposition
[cD1_coif2,cD2_coif2,cD3_coif2] = detcoef(c,l,[1 2 3]);
cA3_coif2= appcoef(c,l,'coif2',3);
cA2_coif2= appcoef(c,l,'coif2',2);
cA1_coif2= appcoef(c,l,'coif2',1);

%coleta de dados para ajuste de amplitude dos coeficientes wavelet
maximo_coif2=max(x);
minimo_coif2=min(x);
maximo_coif2_cA1=max(cA1_coif2);
minimo_coif2_cA1=min(cA1_coif2);
maximo_coif2_cA2=max(cA2_coif2);
minimo_coif2_cA2=min(cA2_coif2);
maximo_coif2_cA3=max(cA3_coif2);
minimo_coif2_cA3=min(cA3_coif2);

%calculo fatores de ajuste para amplitudes dos coeficientes wavelet
corr_coif2_cA1=min(abs(maximo_coif2/maximo_coif2_cA1),abs(minimo_coif2
/minimo_coif2_cA1));
corr_coif2_cA2=min(abs(maximo_coif2/maximo_coif2_cA2),abs(minimo_coif2
/minimo_coif2_cA2));
corr_coif2_cA3=min(abs(maximo_coif2/maximo_coif2_cA3),abs(minimo_coif2
/minimo_coif2_cA3));

%coeficientes wavelets com amplitudes ajustadas
cA1_coif2_corr=cA1_coif2*corr_coif2_cA1;
cA2_coif2_corr=cA2_coif2*corr_coif2_cA2;
cA3_coif2_corr=cA3_coif2*corr_coif2_cA3;

```

```

%Script para analise com transformada PSD
%dos sinais utilizados no mestrado de
%Gustavo Andrade, no PPGM/UFBA

% clear all                                % faxina inicial

%dados a serem analisados
x=cA3_coif2_corr;                          % sinal a ser analisado

N=length(x);                               % Numero amostras sinal???
Fs= 37.5;                                  % Sample frequency
t = (0:N-1)/Fs;                             % Time vector

%calculo da PSD do sinal
[Pxx1,f] = periodogram(x(:,1), [], [],Fs);
% [Pxx2,f] = periodogram(x(:,3), [], [],Fs);
% [Pxx3,f] = periodogram(x(:,4), [], [],Fs);
% [Pxx4,f] = periodogram(x(:,5), [], [],Fs);
% [Pxx5,f] = periodogram(x(:,6), [], [],Fs);
% [Pxx6,f] = periodogram(x(:,7), [], [],Fs);

%plotando os resultados
figure(1)
% plot(f,Pxx1,f,Pxx2,f,Pxx3,f,Pxx4,f,Pxx5,f,Pxx6);
plot(f,Pxx1);

```

```

%Script para calculo do erro medio quadratico
%percentual BRUTO x cA utilizados no
%meostrado de Gustavo Andrade, no PPGM/UFBA
%
clear all;
load('Bruto_Aproximacoes');
%
% Entrada de dados
cmpr=cA3_coif2_corr;
% Taxa Amostragem dados de entrada em Hz
amstr=37.5;
%
%Numero de Lags
lags=50
%
vec_zeros=zeros(lags/10,1);
Resmp_A = interp(cmpr,300/amstr);
Resmp=[vec_zeros;Resmp_A;vec_zeros]
%
[XCF,Lags,Bounds] = crosscorr(TE_bruto_1024_pista,Resmp,lags);
figure(1);
stem(Lags,XCF);
%
[ajst,posi]=max(XCF);
posi_1=posi-lags;
X1=(1:1024);
Resmp_1024=Resmp((posi_1+1):(posi_1+1024));
figure(2);
plot(X1,TE_bruto_1024_pista,X1,Resmp_1024);
%
diff=(TE_bruto_1024_pista-Resmp_1024);
figure(3);
plot(diff);
%
diff_quad=sqrt(diff.^2);
erro_perc=(sum(diff_quad)/length(diff_quad))*100.0

```

A.3. Arquivos Nastran

```
$
$Carta Nastran para simulação de Resposta em Frequencia
$utilizada no mestrado de Gustavo Andrade, no PPGM/UFBA
$
SOL 112
CEND
ECHO = NONE
SPC = 1
INCLUDE 'modelo_d_dura_set101.nas'
STRESS(SORT1,PHASE,PRINT) = 101
method = 10
dload = 22
sdamping = 25
tstep = 27
BEGIN BULK
EIGRL 10 1.0 150.0
$-----\-----\-----\-----\-----\
SPC 1 4848 456
CONM2 9999999 4848 1.0e+06
$
INCLUDE 'modelo_d_dura.nas'
$
TABDMP1 25 CRIT
+TABD
+TABD 0.0 0.050 1000.0 0.050 ENDT
$
$-----\-----\-----\-----\-----\-----\-----\
$TSTEP 27 25601.333e-3
$-----\-----\-----\-----\-----\-----\
$TSTEP 27 12802.667e-3
$-----\-----\-----\-----\-----\-----\
TSTEP 27 6405.333e-3
$-----\-----\-----\-----\-----\-----\
$TSTEP 27 51206.667e-4
$
DLOAD 22 1.0e+06 1.0 101
TLOAD1 101 201 301 0 1
DAREA 201 4848 3 1.0
DELAY 301 4848 3 0.000
$
INCLUDE 'cf2a3_32M1ev1_A.dtab'
$
PARAM,CURVLOT,1
ENDDATA
```

\$

\$Tabela de carregamentos (acelerações) para a simulação Nastran
\$utilizada no mestrado de Gustavo Andrade, no PPGM/UFBA

\$

TABLED1 1

0.0E+0096.326230.0266678.3761940.053333-138.2070.080000-2144.30
0.106667-2504.480.133333-3149.440.1600001809.2570.1866674502.204
0.2133336349.1550.2400004766.0540.2666671038.6480.29333329.31667
0.320000-804.1140.346667-7287.280.373333-4288.610.40000010763.40
0.42666714360.980.4533335444.5250.4800005163.9230.506667-871.124
0.533333-11119.30.560000-17703.00.586667-21522.60.613333-18997.2
0.640000-14059.40.666667-3656.200.6933333191.3290.72000011529.83
0.74666711567.520.77333314608.080.80000012082.660.82666712731.81
0.85333331410.720.88000014038.500.906667-2672.000.933333-1101.46
0.960000-3379.790.986667-259.6621.0133332680.3821.0400001633.357
1.0666673559.8821.093333-6860.101.120000-13912.81.146667-18884.1
1.173333-13514.91.200000-7555.321.226667-5524.101.253333-3760.91
1.280000-1130.781.306667-41.88091.333333-3329.531.360000-7006.68
1.386667-10390.61.413333-16006.91.440000-7814.981.466667-4171.34
1.4933332709.6981.5200007417.1191.54666712924.461.57333417238.20
1.60000019675.671.62666741767.891.65333474250.771.68000087191.99
1.70666788054.741.73333366343.641.76000043623.211.78666712396.76
1.813334-19432.71.840000-50546.11.866667-86404.61.893334-120127.
1.920000-130249.1.946667-137168.1.973333-129659.2.000000-114942.
2.026667-97268.52.053334-54646.22.0800002843.7172.10666759864.66
2.13333387573.102.16000091560.172.18666796284.352.21333485780.60
2.24000081052.242.26666769279.502.29333433069.212.32000015282.36
2.3466671809.2572.373333-577.9572.400000201.02862.4266675658.119
2.453334-527.7002.480000-8564.652.506667-9272.442.533334-19562.6
2.560000-12627.12.586667-7036.002.6133332265.7602.640000-11718.2
2.666667-24010.32.693334-28403.62.720000-19420.22.746667-422.997
2.77333487.950032.800000-833.4312.8266673668.7722.8533342814.401
2.88000010717.332.90666715998.532.93333411957.012.9600007936.443
2.9866674024.7613.013334640.77883.0400001076.3403.066667-1528.65
3.0933346386.8483.1200005364.9523.1466672244.8203.173334-4284.42
3.200000-2144.303.226667-1193.603.253334-3128.503.280000-4196.47
3.306667-5126.233.333334-6931.303.360000-8857.823.386667-11240.8
3.413334-20345.7ENDT