

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA**

GUILHERME MAGNABOSCO

**FADIGA ESPECTRAL: CARACTERIZAÇÃO DE SINAIS DE ENTRADA E
PREVISÃO DE VIDA EM FADIGA**

**CAXIAS DO SUL
2019**

GUILHERME MAGNABOSCO

**FADIGA ESPECTRAL: CARACTERIZAÇÃO DE SINAIS DE ENTRADA E
PREVISÃO DE VIDA EM FADIGA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Universidade de Caxias do Sul para a
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: prof. Me. Eng. André Alaniz
Cesário

CAXIAS DO SUL

2019

GUILHERME MAGNABOSCO

**FADIGA ESPECTRAL: CARACTERIZAÇÃO DE SINAIS DE ENTRADA E
PREVISÃO DE VIDA EM FADIGA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Universidade de Caxias do Sul para a
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 25/06/2019

Banca examinadora

Prof. Me. Eng. André Alaniz Cesário
Universidade de Caxias do Sul-UCS

Prof. Me. Eng. Paulo Roberto Linzmaier
Universidade de Caxias do Sul-UCS

Prof. Me. Eng. Vagner do Nascimento
Universidade de Caxias do Sul-UCS

RESUMO

O presente trabalho se propôs a determinar a vida em fadiga de um componente utilizado em veículos de transporte coletivo de passageiros, do tipo suporte para estepe. Comparando os efeitos da aplicação de um modelo de pneu não abrangido no projeto atual e com um aumento em massa de 167%. As avaliações foram realizadas sobre diferentes tipos de pavimento. Para a determinação da vida do componente foi utilizado o método de fadiga no domínio da frequência. Este método se caracteriza por apresentar reduções expressivas na carga de processamento computacional quando comparado ao domínio do tempo e apresentar um melhor entendimento do comportamento dinâmico da estrutura. Porém sua correta aplicação requer condições de linearidade do sistema e aleatoriedade dos sinais de carregamento. Assim, este trabalho aplicou técnicas de coleta de dados de aceleração, análises estatísticas de aleatoriedade sobre os sinais coletados, conversão dos sinais temporais em espectros e a aplicação de uma metodologia de fadiga espectral sobre o componente estudado. Constatações sobre a qualidade dos sinais, a importância de classificar os tipos de pavimentos e a influência da relação entre as frequências de excitação e naturais do sistema na vida em fadiga são discutidas ao longo do texto.

Palavras chaves: Fadiga; domínio da frequência; coleta e análise de dados experimentais; aleatoriedade; simulação numérica; veículo de transporte coletivo; suporte para estepe.

ABSTRACT

The present study proposed to determine the fatigue life of a component used in public passenger transport vehicles, of steppe support type. Comparing the effects of the application of a tire model not covered in the current project and with a mass increase of 167%. The evaluations were performed out on different types of pavement. The fatigue method was used in the frequency domain to determine component life. This method is characterized by expressive reductions in the computational load when compared to the time domain and present a better understanding of the dynamic behavior of the structure. However, its correct application requires conditions of linearity of the system and randomness of the load signals. Thus, this work applied techniques of acceleration data acquisition, statistical analysis of randomness on the collected signals, conversion of temporal signals into spectra and the application of a spectral fatigue methodology on the studied component. Findings on signal quality, the importance of classifying pavements types and the influence of the relationship between the excitation and natural frequencies of the system in fatigue life are discussed throughout the text.

Keywords: Fatigue; frequency domain; collection and analysis of experimental data; randomness; numerical simulation; bus; support for steppe.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação de dados determinísticos e aleatórios.	14
Figura 2 – Conjunto de sinais temporais, que definem um processo aleatório.	14
Figura 3 – Aliasing de frequência.	17
Figura 4 – Curva de fadiga S-N.	21
Figura 5 – Análise de fadiga no domínio do tempo.	23
Figura 6 – Análise de fadiga no domínio da frequência.	23
Figura 7 – Função de transferência.	25
Figura 8 – Definição de momentos espectrais.	26
Figura 9 – Sinal temporal aleatório.	27
Figura 10 – PDF para um processo Gaussiano.	28
Figura 11 – Representação de largura de banda.	29
Figura 12 – Representação de largura de banda.	34
Figura 13 – Suporte para pneu estepe.	35
Figuras 14 e 15 – Massa do estepe original e <i>off-road</i>	36
Figura 16 – Organograma da proposta de trabalho.	37
Figura 17 – Veículo utilizado para as coletas.	39
Figura 18 – Montagem suporte estepe no chassi.	39
Figura 19 – Posicionamento do sensor.	40
Figura 20 – Rota da coleta.	41
Figura 21 – Exemplo de sinal temporal para cálculo de autocorrelação.	44
Figura 22 – Exemplo de divisão do sinal temporal.	44
Figuras 23 e 24 – Geometria preparada e malha gerada.	46
Figura 25 – Massa do suporte para estepe.	47
Figura 26 – Pontos de carregamento.	49
Figura 27 – Curva S-N Aço SAE 1010.	50
Figura 28 – FFT sinais unidos.	51
Figura 29 – Histograma asfalto.	52
Figura 30 – Histograma urbano.	52
Figura 31 – Histograma fora de estrada.	52
Figura 32 – Autocorrelação asfalto.	54
Figura 33 – Autocorrelação urbano.	54
Figura 34 – Autocorrelação fora de estrada.	54
Figura 35 – PSD's de aceleração.	55

Figura 36 – FRF em tensão/g para a condição com estepe misto.....	59
Figura 37 – FRF em tensão/g para a condição com estepe <i>off-road</i>	59
Figura 38 – Posição do nó crítico.....	60
Figura 39 – PSD de tensão nó crítico - Estepe Misto - Asfalto.	61
Figura 40 – PSD de tensão nó crítico - Estepe Misto - Urbano.	62
Figura 41 – PSD de tensão nó crítico - Estepe Misto – Fora de estrada.	62
Figura 42 – PSD de tensão nó crítico - Estepe <i>Off-Road</i> – Asfalto.	63
Figura 43 – PSD de tensão nó crítico - Estepe <i>Off-Road</i> – Urbano.....	63
Figura 44 – PSD de tensão nó crítico - Estepe <i>Off-Road</i> – Fora de estrada.	64
Figura 45 – Histograma Tensão <i>versus</i> Dano - Estepe Misto – Fora e estrada.....	65
Figura 46 – Histograma Tensão <i>versus</i> Dano - Estepe <i>Off-road</i> – Fora e estrada.	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	AMBIENTE DE TRABALHO	11
1.2	JUSTIFICATIVA.....	11
1.3	OBJETIVOS DE TRABALHO.....	12
1.3.1	Objetivo geral	12
1.3.2	Objetivos específicos	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	CARACTERIZAÇÃO DOS SINAIS.....	13
2.1.1	Sinais determinísticos versus aleatórios	13
2.1.1.1	Sinal aleatório: estacionário <i>versus</i> não estacionário.....	14
2.1.1.2	Sinal aleatório: ergódico <i>versus</i> não ergódico.....	15
2.2	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS ALEATÓRIOS	16
2.2.1	Aquisição de dados	16
2.2.1.1	Transdutor e conversão dos dados.....	16
2.2.1.2	Teorema de amostragem e erro de Aliasing	17
2.2.1.3	Qualidade dos dados	17
2.2.1.3.1	<i>Principais erros e anomalias em sinais coletados</i>	18
2.2.1.3.2	<i>Edição de sinais coletados</i>	18
2.2.1.3.3	<i>Filtragem digital</i>	19
2.2.1.3.4	<i>Janelas de dados</i>	19
2.3	FADIGA	20
2.3.1	Histórico	20
2.3.2	Análise tradicional - Domínio do tempo	21
2.4	FADIGA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	23
2.4.1	Transformadas Discretas e Rápidas de Fourier – DFT e FFT	24
2.4.2	Função de Resposta à Frequência - FRF	25
2.4.3	Espectro de densidade e correlação de energia - PSD e CSD	25
2.4.4	Momentos espectrais	26
2.4.5	<i>Probability Density Function - PDF</i>	27
2.4.6	Contagem de dano	29
2.5	ELEMENTOS FINITOS BASEADO NA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES	31
2.5.1	Cálculo da função linear de transferência	31

3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	OBJETO DE ESTUDO.....	35
3.1.1.1	Comparativo estepe misto e <i>off-road</i>	36
3.2	ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO	36
3.2.1	Experimental	38
3.2.1.1	Veículo e montagem do suporte	38
3.2.1.2	Definição do ponto e equipamentos para coleta de dados	39
3.2.1.3	Coleta de dados.....	40
3.2.2	Processamento dos sinais coletados	41
3.2.2.1	Procedimentos de pré-análise dos sinais coletados.....	42
3.2.2.2	Análises estatísticas	42
3.2.2.2.1	<i>Distribuição Gaussiana normal</i>	43
3.2.2.2.2	<i>Média e desvio padrão constantes</i>	43
3.2.2.2.3	<i>Autocorrelação constante</i>	43
3.2.2.3	Geração de PSD.....	45
3.2.3	Elementos Finitos	45
3.2.3.1	Geração do modelo	46
3.2.3.2	Análise Modal e Harmônica	47
3.2.3.2.1	<i>Contatos</i>	48
3.2.3.2.2	<i>Condições de contorno</i>	48
3.3	FADIGA ESPECTRAL	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	PROCESSAMENTO DOS SINAIS COLETADOS	51
4.1.1	Qualidade dos sinais coletados	51
4.1.2	Distribuição Gaussiana Normal	51
4.1.3	Média e desvio padrão	53
4.1.4	Autocorrelação	53
4.1.5	PSD's de aceleração	55
4.2	FADIGA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	55
4.2.1	Análise modal	55
4.2.2	Análise harmônica	59
4.2.3	Fadiga	60
5	CONCLUSÕES	67

5.1	Aquisição dos dados e qualidade dos sinais	67
5.2	Análise estatística dos sinais coletados	67
5.3	Conversão dos sinais temporais para o domínio da frequência	68
5.4	Estimativa da Vida em Fadiga	69
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
	APÊNDICE A – MOMENTOS ESPECTRAIS	73
	APÊNDICE B – VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DA PDF DE UMA PSD	74
	APÊNDICE C – CLASSIFICAÇÃO VISUAL DOS PAVIMENTOS COLETADOS	75
	APÊNDICE D – RESUMO E CLASSIFICAÇÃO DAS COLETAS	76
	APÊNDICE E – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS SINAIS TEMPORAIS UNIDOS	77
	APÊNDICE F – RESULTADOS AUTOCORRELAÇÃO	79

1 INTRODUÇÃO

Frequentemente componentes mecânicos falham em condições onde o regime de tensões são consideravelmente inferiores ao limite de ruptura do material, até mesmo abaixo ao limite de escoamento. A característica mais distinta desta falha é aplicação de tensões cíclicas por um número muito grande de vezes ao longo do tempo, caracterizando uma falha por fadiga.

Além de garantir à confiabilidade do produto, a estimativa de vida em fadiga também ajuda a reduzir o tempo e o custo de desenvolvimento do produto, reduzindo a quantidade de ensaios de durabilidade em estruturas metálicas. Para uma assertiva estimativa de vida, de estruturas metálicas, é fundamental conhecer, mensurar e caracterizar os carregamentos impostos ao produto, na sua condição normal de uso e até mesmo em condições adversas de sobrecarga. (BUDYNAS; NISBETT, 2006; DOWLING, 2018)

No caso de veículos rodoviários de transporte de passageiros, ônibus, o perfil de pista ao qual um veículo é submetido, juntamente com as condições de tráfego, são um dos principais responsáveis pelos carregamentos atuantes à estrutura da carroceria.

Segundo o Boletim Estatístico da Confederação Nacional do Transporte – CNT de maio 2018 a frota de ônibus no Brasil é de 213.836 veículos, responsáveis pelo transporte de passageiros em linhas rodoviárias e urbanas e que 1.364.510 km do total de 1.578.298 km da malha rodoviária no Brasil são de vias não pavimentadas.

Outra pesquisa realizada em 2017 também pela CNT, onde foram avaliados 105.814 km de rodovias federais e estaduais pavimentadas em todo o Brasil, aponta que 78,4% deste total apresentam algum tipo de problema na condição da superfície do pavimento, 51,1% do total apresentam desgaste, 23,9% trinca em malha ou remendos e em 2,3% afundamentos, ondulações ou buracos. A pesquisa também destacou que 1,1% da extensão estavam totalmente destruídas e que somente 21,6% do total avaliado apresentavam perfeitas condições.

De posse das informações supracitadas, concluir-se que, em algum momento de sua vida ou em grande parte desta, os ônibus trafegarão por vias de má qualidade.

Geralmente a vida em fadiga de componentes estruturais é estimada no domínio do tempo, onde todas as entradas de carga e saídas de tensão ou deformação são baseadas em sinais temporais. Outra abordagem que vem ganhando interesse atualmente é a estimativa de vida no domínio da frequência, onde as entradas e saídas se dão em termos de densidade espectral de potência (PSD). (LEE et al., 2005)

Este trabalho se propõe a estudar os métodos para determinação de vida por fadiga no domínio da frequência acerca das suas aplicações, vantagens e desvantagens, através da coleta e análise de sinais utilizando *softwares* numéricos dedicados e, por fim, aplicar o método estudado na estimativa de vida de um componente.

1.1 AMBIENTE DE TRABALHO

Uma referência mundial em carrocerias para ônibus, a Marcopolo S.A foi fundada em 1949 na cidade de Caxias do Sul – RS. A empresa possui três unidades fabris em Caxias do Sul - RS, uma em Duque de Caxias – RJ e outra unidade em São Matheus – ES. No exterior dispõe de fabricas em todos os continentes, na África do Sul, Argentina, Austrália, China, Colômbia, Egito, Índia, México, Canada, Estados Unidos e Rússia.

O estudo aqui descrito será realizado utilizando recursos da Engenharia Experimental e da Engenharia de Simulações, ambas alocadas dentro da área de Engenharia de Simulações e Testes, que são responsáveis pelas validações dos projetos das carrocerias e veículos da Marcopolo S/A, utilizando critérios normativos baseados em legislações vigentes e utilizando critérios internos de durabilidade e confiabilidade do produto.

1.2 JUSTIFICATIVA

A fadiga no domínio da frequência é realizada através da conversão dos históricos temporais de tensão aplicadas a estrutura para o domínio da frequência através da PSD (Power Spectral Density) , a principal vantagem deste método quando comparado ao domínio do tempo, é a grande redução no volume de dados armazenados e processados, gerando assim um menor custo de processamento, e conservando as características dinâmicas do carregamento, porém a análise espectral de fadiga não pode ser usada em qualquer situação, ou para qualquer tipo de carregamento, condições de linearidade no sistema e condições estatísticas dos sinais de entrada precisam ser respeitadas. Assim, a correta análise dos dados experimentais de carregamento e o correto processamento deles necessitam ser previamente realizados. (CESÁRIO et al., 2011; DE MORAIS TEIXEIRA et al., 2013; HALFPENNY, 2006; LEE et al., 2005)

1.3 OBJETIVOS DE TRABALHO

1.3.1 Objetivo geral

Determinar a vida em fadiga de um componente, do tipo suporte para estepe, comparando os efeitos da aplicação de um modelo de estepe, não abrangido no projeto atual através do método de fadiga no domínio da frequência. Estudar os conceitos, vantagens e limitações do método.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) estudar as condições para que sejam aplicadas as teorias de fadiga espectral em sinais aleatórios;
- b) coletar e selecionar sinais impostos ao sistema/componente alvo da análise;
- c) analisar os sinais coletados verificando as condições dos mesmos para a análise de vida sob fadiga no domínio da frequência;
- d) determinar e comparar a vida em fadiga, através do método no domínio da frequência no suporte para dois modelos de estepe, modelo misto e modelo *off-road*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conforme descrito anteriormente um dos pontos importantes, para estimar a vida em fadiga de estruturas metálicas, é compreender e mensurar os carregamentos aos quais a estrutura está submetida, assim a revisão bibliográfica se inicia caracterizando sinais para a análise de fadiga no domínio da frequência, a aquisição e processamento de dados aleatórios, e posteriormente, o fenômeno de fadiga em metais e a sua aplicação no domínio da frequência e através do Método de Elementos Finitos.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SINAIS

A transformação de um histórico de carregamento entre o domínio do tempo e da frequência está sujeita a certos requisitos, onde ele deve ser estacionário, aleatório e Gaussiano (normal). (LEE et al., 2005)

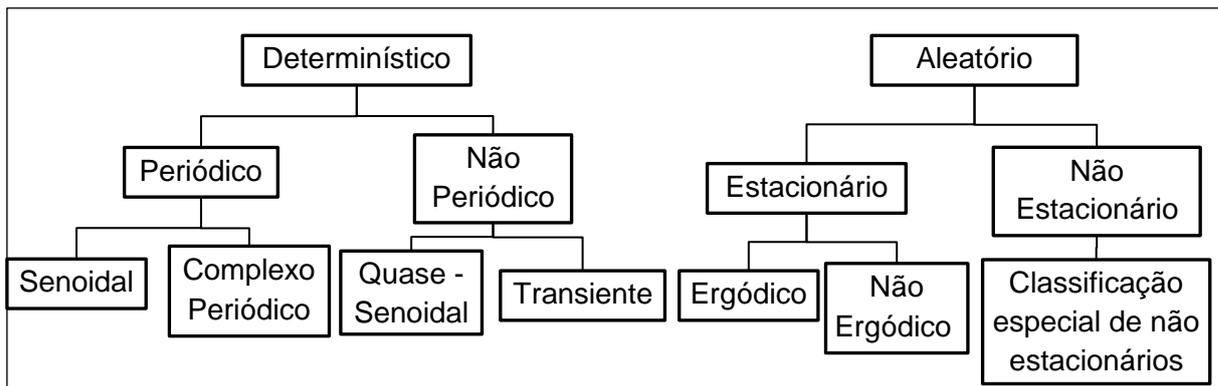
2.1.1 Sinais determinísticos *versus* aleatórios

Qualquer conjunto de dados medidos que represente algum fenômeno físico pode ser classificado como determinístico ou não determinístico. Dados determinísticos são aqueles que podem ser descritos na forma de uma relação matemática explícita, onde através destas funções é possível determinar o valor exato em um instante no futuro, por exemplo, pode-se citar: sistema de massa suspensa por uma mola, a órbita de um satélite ao redor da Terra, o potencial de um capacitor à medida que o mesmo descarrega sobre um resistor, a resposta à vibração de uma máquina rotativa, a temperatura da água em um trocador de calor, entre outros.

No entanto existem muitos fenômenos que geram dados que não são determinísticos, como por exemplo, a altura das ondas do mar, a pressão acústica gerada pelo deslocamento de ar interno a um tubo, a saída elétrica de um gerador de ruído, forças aplicadas ao sistema de suspensão de veículos automotores ou trens ferroviários, dados que não podem ser descritos por uma função matemática explícita. Estes são de caráter aleatório e devem ser descritos em termos de demonstrações de probabilidade e médias estatísticas. As classificações de dados determinísticos e aleatórios estão esquematizadas na Figura 1. (BENDAT; PIERSOL, 2011; DE MORAIS TEIXEIRA et al., 2013; THORBY, 2008)

Em termos práticos a distinção entre dados aleatórios e determinísticos é feita a partir da capacidade de se reproduzir os dados por experimentos controlados, se o experimento produz os dados de interesse, e esses podem ser repetidos muitas vezes com resultado idênticos, então estes dados são considerados determinísticos. Caso um experimento não possa ser previsto, ou não gere os resultados idênticos ao ser repetido, os dados devem ser considerados de natureza aleatória. (BENDAT; PIERSOL, 2011)

Figura 1 – Classificação de dados determinísticos e aleatórios.

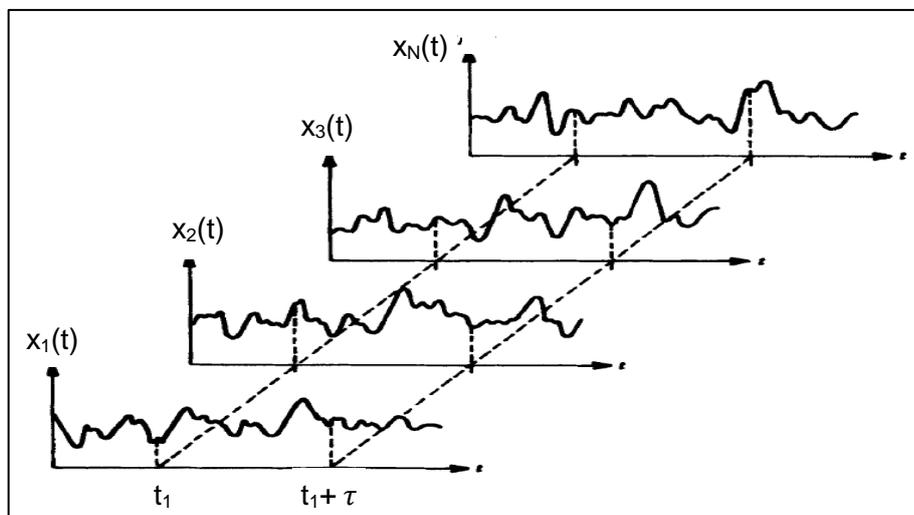


Fonte: Adaptado de Bendat (2010).

2.1.1.1 Sinal aleatório: estacionário *versus* não estacionário

As propriedades estatísticas de um fenômeno físico aleatório podem ser descritas em algum instante de tempo, pelo cálculo dos valores médios do conjunto de sinais das funções amostrais, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Conjunto de sinais temporais, que definem um processo aleatório.



Fonte: Adaptado de Bendat (2010).

Seguindo o exemplo da Figura 2, o valor médio do processo aleatório em t_1 pode ser calculado tomando o valor instantâneo de cada função de amostra do conjunto no tempo t_1 , somando-se os valores e dividindo pelo número de funções de amostra, conforme a Equação 1.

De maneira semelhante é possível determinar o valor de autocorrelação da função, Equação 2 (função de autocorrelação), e auto correlação cruzada que relaciona dois sinais distintos.

$$\mu_x(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=i}^N x_k(t_1) \quad (1)$$

$$R_{xx}(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=i}^N x_k(t_1) x_k(t_1 + \tau) \quad (2)$$

onde: $\mu_x(t_1)$ é a média do processo aleatório em t_1 ;

$R_{xx}(t_1, t_1 + \tau)$ é o valor da função de autocorrelação em t_1 e τ para as N amostras.

Um conjunto de dados é considerado estacionário, quando repartido em intervalos de tempo, e suas várias seções apresentam as mesmas características estatísticas, caso contrário o sinal é considerado não estacionário. (BENDAT; PIERSOL, 2011; THORBY, 2008)

2.1.1.2 Sinal aleatório: ergódico *versus* não ergódico

Além de aleatório e estacionário um sinal pode também ser classificado como ergódico, isso ocorre em situações específicas onde um conjunto de dados mantém seu valor médio e de autocorrelação constantes sobre as diversas funções amostrais.

Processos aleatórios ergódicos são importantes, pois nestes casos é possível determinar as características probabilísticas de todo o processo através de uma única função de amostra. Usualmente fenômenos físicos estacionários são ergódicos, assim as propriedades deste fenômeno podem ser mensuradas, a partir de um único registro temporal, em outras palavras, conhecendo um intervalo de tempo do fenômeno é possível determinar as características probabilísticas de todo o fenômeno.

Deve-se ressaltar que quanto maior for intervalo de observação, maior é a convergência da média temporal e conseqüentemente menor é a sua variância em relação a todo o conjunto, e que todo processo ergódico é estacionário, mas o oposto nem sempre é verdadeiro. (BENDAT; PIERSOL, 2011; BIRKHOFF, 1942)

2.2 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS ALEATÓRIOS

A aquisição e o processamento de conjuntos de dados aleatórios, que representam fenômenos físicos contínuos, requerem procedimentos específicos para a posterior correta realização das análises.

As técnicas a serem aplicadas são altamente dependentes do fenômeno físico a ser representado e das metas de engenharia desejadas no processamento. De forma geral as operações podem ser divididas em 4 categorias principais: Aquisição, Conversão, Qualificação e Análise dados.

2.2.1 Aquisição de dados

A aquisição de dados é usualmente realizada utilizando um sistema que envolve o uso de um transdutor com condicionamento de sinal, a transmissão deste sinal para um conversor analógico-digital e um método de calibração do sistema, que estabelece a relação entre o fenômeno físico medido e o sinal transmitido do transdutor ao conversor. (BENDAT; PIERSOL, 2011)

2.2.1.1 Transdutor e conversão dos dados

De forma geral, um transdutor é um dispositivo que traduz a potência de uma forma para outra. Em grande parte das aplicações em engenharia os transdutores são constituídos de elementos mecânicos que convertem um fenômeno físico em uma deformação do elemento sensor, e este produz ou varia uma quantidade elétrica proporcional a magnitude do fenômeno físico.

O sinal elétrico oriundo do transdutor é posteriormente convertido para formato digital através de um conversor analógico-digital, a conversão deste sinal para o formato digital é importante para possibilitar as posteriores análises sobre o sinal coletado.

A conversão do sinal temporal analógico para a forma digital é feita através da discretização do sinal em intervalo de aquisição com um valor constante de tempo, o inverso deste intervalo é determinado como a frequência de aquisição. (BENDAT; PIERSOL, 2011)

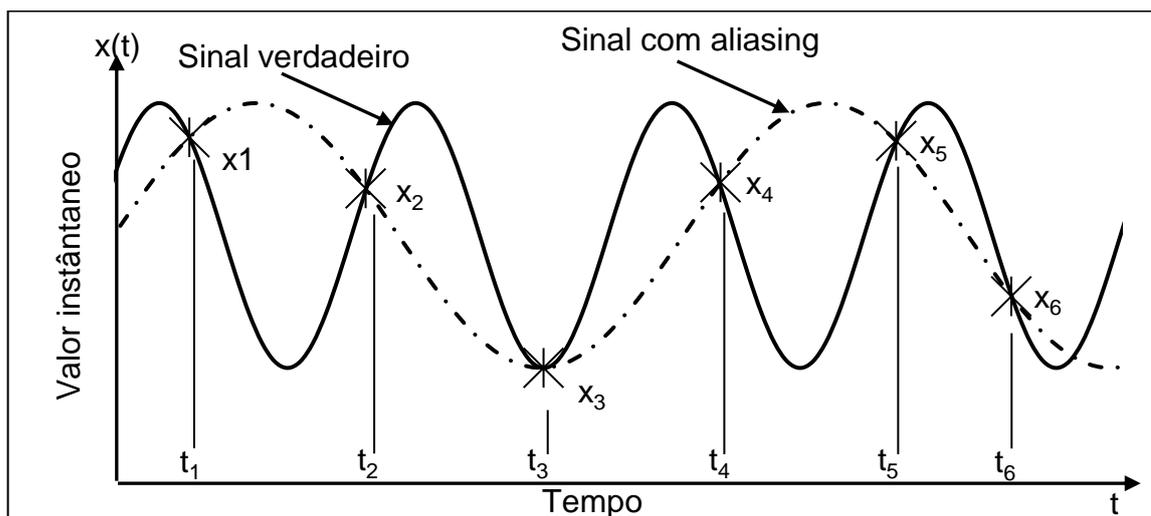
2.2.1.2 Teorema de amostragem e erro de Aliasing

O teorema de amostragem determina que a frequência de aquisição ou amostragem deve ser ao menos igual ao dobro da frequência máxima de interesse contida no fenômeno, esta frequência de amostragem mínima é determinada como frequência de Nyquist.

Quando a frequência de amostragem é inferior a frequência de Nyquist é gerado um fenômeno indesejável determinado como erro de *Aliasing*, esta falha gera a sobreposição de espectro e inviabiliza a correta recuperação do sinal digital.

De forma exemplificar a Figura 3 demonstra um sinal analógico sobreposto por um sinal digitalizado em uma taxa de amostragem inadequada, perdendo as características do sinal original. (BENDAT; PIERSOL, 2011)

Figura 3 – Aliasing de frequência.



Fonte: Adaptado de Bendat (2010).

2.2.1.3 Qualidade dos dados

Previamente a análise detalhada dos dados coletados é importante classificar os dados aleatórios de três maneiras. Primeiramente verificar características de não-estacionariedade, componentes periódicos e propriedades não gaussianas. Segundo deve ser realizado uma inspeção cuidadosa dos registros temporais coletados para verificar anomalias indicativas de erros de aquisição. E em terceiro lugar, para eliminar anomalias, editar o sinal original de forma a eliminar estas anomalias. (BENDAT; PIERSOL, 2011)

2.2.1.3.1 Principais erros e anomalias em sinais coletados

As anomalias mais frequentes presentes em sinais temporais convertidos digitalmente são: (BENDAT; PIERSOL, 2011)

- a) **ruído excessivo de instrumentação:** ocorre quando a sensibilidade de entrada (ganho) do instrumentos no sistema de aquisição de dados é ajustada muito baixa, fazendo com que os sinais de dados medidos tenham valores que não são substancialmente maiores do que o ruído do sistema de aquisição de dado, isto é, as medições são feitas com uma inadequada relação sinal-ruído;
- b) **clipping de sinal:** semelhante ao ruído de instrumentação está diretamente relacionado com a sensibilidade de entrada, esta falha ocorre quando o ganho definido é muito alto fazendo com que o instrumento sature (exceda seu intervalo linear de leitura) produzindo um sinal linear com magnitude limitada;
- c) **picos de ruído intermitentes (spikes):** principalmente em aquisições dinâmicas, onde há movimento relativo entre os cabos e os transdutores ou com o aquisitor, são identificados picos ou valos no formato de espinhos no sinal, esta falha é ocasionada por perda de contato ou curto-circuito nestas conexões;
- d) **perda temporária do sinal:** uma falha facilmente percebida ao se verificar visualmente o sinal coletado e é ocasionada pela interrupção temporária do registro do histórico temporal;
- e) **power line pickup:** esta falha é ocasionada pela irradiação da energia eletromagnética dos sistemas de distribuição de energia, esta falha geralmente ocorre pelo mau aterramento do sistema de coleta, e pode ser facilmente identificada, pois sua frequência é conhecida, comumente 60 Hz ou 50 Hz;
- f) **spurious trend ou off-set:** ocorre quando o valor médio varia no tempo em um sistema de aquisição de dados, geralmente ocorre pela variação de temperatura no sistema ou instrumentos.

2.2.1.3.2 Edição de sinais coletados

Convencionalmente é sugerido que medições aleatórias de dados que apresentaram anomalias durante o processo de verificação sejam descartadas, no entanto para casos onde não seja possível repetir o experimento existem algumas operações digitais que permitem a recuperação parcial das informações coletadas.

As principais ferramentas utilizadas para a edição dos sinais são filtros, que retiram espectros de determinadas frequências dos sinais, e a eliminação de trechos temporárias dos sinais, sendo estes feitos de maneira manual ou com rotinas pré-programadas. (BENDAT; PIERSOL, 2011)

2.2.1.3.3 Filtragem digital

A filtragem digital pode ser realizada no domínio do tempo ou no domínio da frequência. A filtragem no domínio da frequência corresponde à multiplicação da transformada de Fourier do registro de dados pela função de resposta em frequência do filtro desejado e depois tomando a transformação inversa. Este tipo de filtragem tem certas vantagens, sendo as principais que é simples de entender e nenhuma expressão analítica é necessária para a função de resposta de frequência do filtro. No entanto, a implementação da filtragem no domínio da frequência é geralmente mais intensiva computacionalmente do que procedimentos de filtragem no domínio do tempo. (BENDAT; PIERSOL, 2011)

Os filtros no domínio do tempo podem ser divididos em dois tipos:

Filtros de resposta a impulso não-recursivos ou finitos (FIR) possuem resposta de fase linear, isto é, não provoca distorção de fase no sinal filtrado, fundamental em aplicações como biomedicina, áudio e imagem.

Filtros de resposta impulsiva recursiva ou infinita (IIR). É uma função dos sinais de entrada presentes e passados, e dos sinais de saída passados. A dependência das saídas passadas (recursividade) faz com que a duração da resposta seja infinita, mesmo quando cessaram os sinais de entrada. (BENDAT; PIERSOL, 2011)

2.2.1.3.4 Janelas de dados

Para a geração prática de espectros a partir de FFT sobre sinais digitais temporais é necessário dividir os sinais coletados em janelas de comprimentos determinados, este janelamento provoca o efeito de vazamento espectral, introduzindo frequências adicionais ao espectro, que não representam o fenômeno medido.

Para minimizar os efeitos de vazamento espectral são aplicadas janelamentos que suavizam o início e fim de cada bloco, sendo as mais utilizadas: Hamming, Von Hann (Hanning) Kaiser-Bessel e Blackman-Harris.

2.3 FADIGA

O acúmulo de dano através de carregamentos cíclicos até a falha do material caracteriza a fadiga no mesmo. Ao longo dos dois últimos séculos a engenharia vem desenvolvendo estudos e metodologias visando à prevenção da falha por fadiga. Atualmente existem três principais abordagens para analisar e projetar contra falhas por fadiga: (DOWLING, 2018; LEE et al., 2005)

- a) **baseada na tensão (S-N)**: sendo a tradicional e mais difundida, onde a tensão nominal em fadiga é determinada considerando tensões médias e concentradores de tensão, este método é indicado para carregamentos de alto ciclo;
- b) **baseada na deformação (Épsilon-N)**: que leva em conta a análise mais detalhada do escoamento localizado do material ou plasticidade indicada para carregamentos de baixo ciclo;
- c) **baseada na mecânica da fratura**: que trata especificamente da propagação das trincas.

Por ser o método mais tradicional e difundido este trabalho utilizará a abordagem baseada na tensão, esta metodologia enfatiza as curvas de tensão *versus* número de ciclos (S-N). As curvas S-N são comumente expressas em termos de amplitude de tensão *versus* ciclos até a falha e são obtidas através de ensaios experimentais. (DOWLING, 2018; LEE et al., 2005)

2.3.1 Histórico

A fadiga tem seus primeiros relatos na mineração, onde em 1829 Julius Albert publicou um estudo realizado com correntes de ferro submetidas até a falha a carregamentos cíclicos com amplitudes muito abaixo da resistência a tração do material. Na década seguinte, em 1843, o engenheiro escocês Rankine verificou o efeito dos concentradores de tensão, percebendo que estas falhas, em eixos rodoviários, iniciavam principalmente em entalhes e se propagavam até a ruptura, abrindo caminho para Neuber (1946), Peterson (1959) e finalmente Taylor (2007), que desenvolveu a Teoria das Distâncias Críticas. (DOWLING, 2018; LEE et al., 2005; TEIXEIRA, 2017)

Durante 20 anos a partir de 1850 o engenheiro alemão Albert Wöhler desenvolveu estratégias de projeto para evitar falhas de fadiga, testando aços, ferro fundido e outros metais sob flexão, torção e cargas axiais. Wöhler também demonstrou que a fadiga não era

apenas afetada pelas tensões cíclicas, mas também pela tensão média ou estática, e deu início à abordagem S-N que é amplamente utilizada atualmente. (DOWLING, 2018; LEE et al., 2005; TEIXEIRA, 2017)

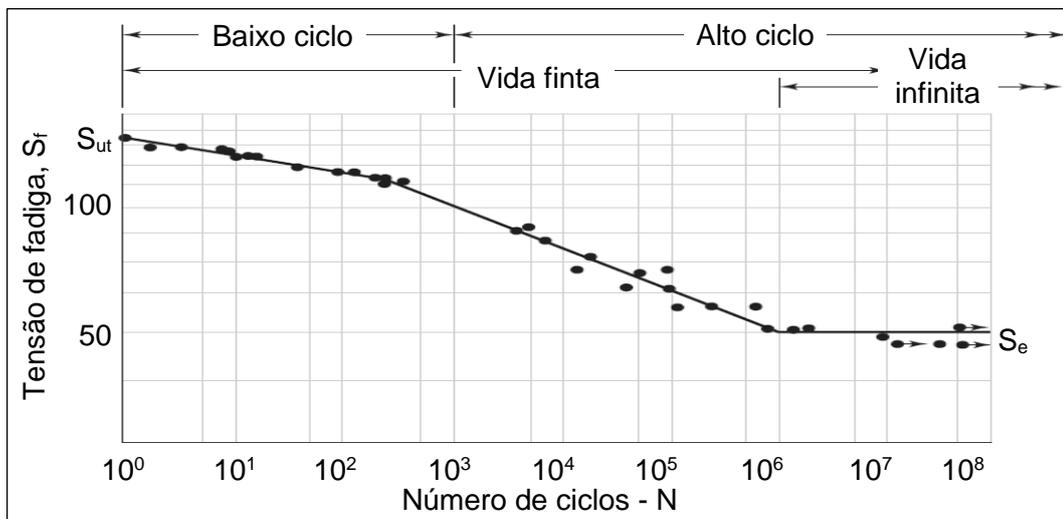
Ao final do século 19 ocorreu um esforço para explicar o efeito da tensão média para carregamentos com amplitude constantes, utilizando da "Teoria Dinâmica" amplamente discutida no livro de Fidler, foram introduzidos os diagramas de Findley Goodman, Gerber e Haigh. (DOWLING, 2018; LEE et al., 2005; TEIXEIRA, 2017)

Posteriormente Findley (1959), Brown & Miller (1972), Carpinteri (2001) Susmel (2009) e Fatemi's (1985) estudaram a fadiga multiaxial, onde Findley introduziu o conceito de plano crítico, onde a pior combinação de amplitude de tensão de cisalhamento e tensão normal máxima (atuando em um plano particular), é o parâmetro de dano relevante para nucleação de uma trinca por fadiga em metais dúcteis. (DOWLING, 2018; LEE et al., 2005; TEIXEIRA, 2017)

2.3.2 Análise tradicional - Domínio do tempo

A vida em fadiga é obtida comparando o carregamento do componente avaliado com a respectiva curva de fadiga S-N do material. As curvas S-N dependem principalmente do material e seu processo de fabricação e são gravemente afetadas pela geometria, concentradores de tensão, acabamento superficial, ambiente químico e térmico, frequência de carregamento e tensões residuais. A Figura 4 ilustra uma curva de fadiga característica S-N. (BUDYNAS; NISBETT, 2006; DOWLING, 2018)

Figura 4 – Curva de fadiga S-N.



Fonte: Adaptado de BUDYNAS; NISBETT (2006).

Para a análise de fadiga de alto ciclo as curvas de fadiga podem ser expressas matematicamente, em escala logarítmica, conforme a equação 3.

$$\sigma_a = A(N_f)^B \quad (3)$$

onde: σ_a é a magnitude da tensão alternante;
 A e B são constantes do material;
 N_f é número de ciclos para a falha.

Tensões médias, ou nominais, trativas tendem a reduzir a vida útil do material, enquanto as tensões médias compressivas tendem a ser benéficas ao material, retardando ou impedindo o crescimento das trincas. Tensões médias trativas e seus efeitos podem ser estimados através de teoremas como: Gerber, Goodman, Soderberg e Morrow

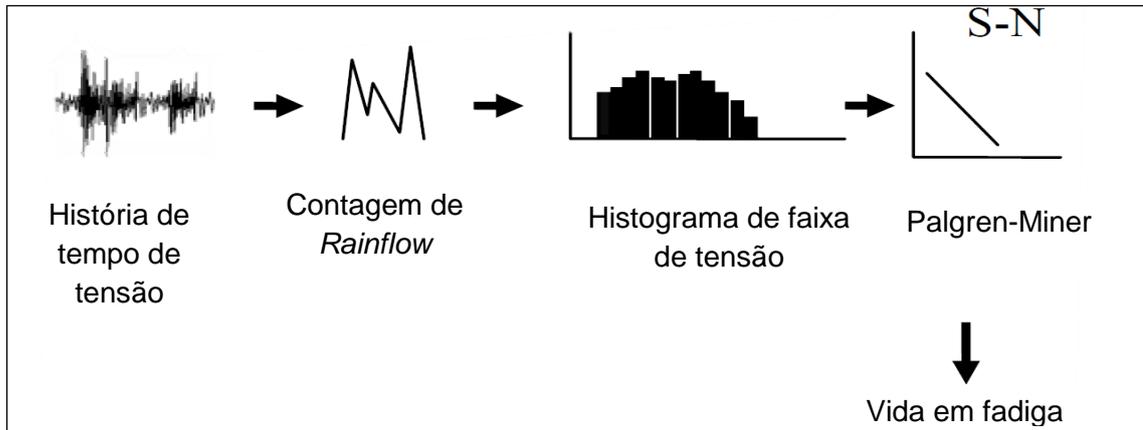
Para carregamentos de amplitudes e médias variáveis, a estimativa de vida pode ser feita através das somas das participações de dano de cada ciclo através da regra de Palmgren-Miner, conforme a equação 4. (BUDYNAS; NISBETT, 2006; DOWLING, 2018)

$$\frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} + \frac{N_3}{N_{f3}} + \dots = \sum \frac{N_j}{N_{fi}} = 1 \quad (4)$$

onde: N_x é número de ciclos;
 N_{fx} é número de ciclos para falha para σ_{ax} .

Porém, para carregamentos aleatórios, onde analiticamente se torna difícil identificar os blocos de ciclos N_x , é utilizado método de *Rainflow*, e o dano em fadiga ocasionado por estes blocos de carregamento devem ser computados, geralmente através da teoria de dano cumulativos de Palmgren-Miner de forma simplificada o procedimento comum para estimativa da vida em fadiga no domínio do tempo é ilustrada na Figura 5. (BERHANU, 2011; BUDYNAS; NISBETT, 2006; DOWLING, 2018)

Figura 5 – Análise de fadiga no domínio do tempo.



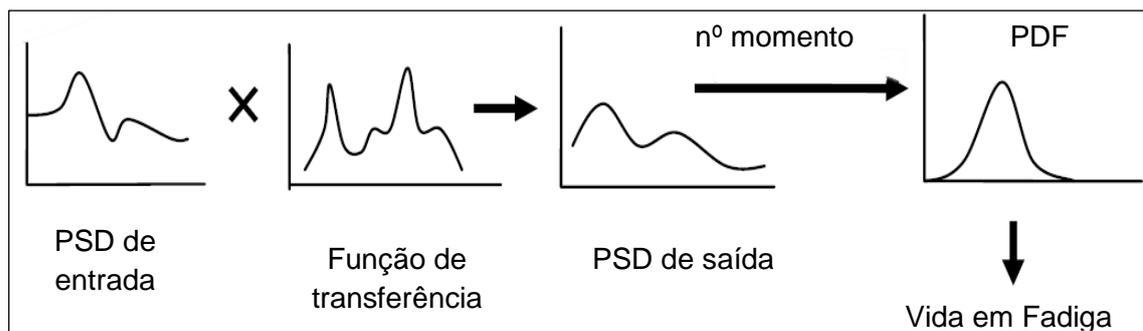
Fonte: Adaptado de Berhanu (2011).

2.4 FADIGA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Quando as frequências naturais de um componente mecânico estão próximas às frequências dos carregamentos aos quais o componente está sujeito o problema físico é dinâmico, e sua análise deve levar em conta seus efeitos, neste caso à análise transiente modal é recomendada. (BENDAT; PIERSOL, 2011; BERHANU, 2011; TEIXEIRA, 2014)

Para estruturas onde é verificada a linearidade entre o carregamento e as respostas do sistema e o carregamento seja classificado como aleatório, estacionário, ergódico e Gaussiano, é possível caracterizar os sinais de carregamento e a sua resposta no domínio da frequência através dos seus respectivos espectros de densidade de potência (PSD), e correlaciona-los através da função de transferência do sistema (FRF), e utilizando de alguns momentos espectrais e a PDF da PSD de saída, juntamente com as propriedades do material, é possível estimar a vida do componente. A Figura 6 ilustra de forma simplificada o procedimento mais comum para estimativa de vida em fadiga no domínio da frequência. (BENDAT; PIERSOL, 2011; BERHANU, 2011; TEIXEIRA, 2014)

Figura 6 – Análise de fadiga no domínio da frequência.



Fonte: Adaptado de Berhanu (2011).

Sabendo que tanto os métodos para mensurar de forma prática o fenômeno físico de vibrações mecânicas, quanto os métodos de cálculo de fadiga no domínio da frequência utilizam conjunto de dados discretos, os conceitos ao longo deste trabalho serão abordados diretamente com teorias e formulações para conjunto de dados discretos. (BENDAT; PIERSOL, 2011; BERHANU, 2011; TEIXEIRA, 2014)

2.4.1 Transformadas Discretas e Rápidas de Fourier – DFT e FFT

Para funções não periódicas, as transformadas de Fourier e suas inversas permitem transformar um sinal temporal para o domínio da frequência, e vice-versa.

Na prática a DFT gera uma grande carga de processamento para calcular os valores complexos para todos os N valores de k, se aproveitando do fato que as DFT's geram um número significativo de cálculos redundantes, os *softwares* atuais utilizam algoritmos baseados na transformada rápida de Fourier ou *Fast Fourier Transform* (FFT), produzindo o mesmo resultado, mas com mais eficiência. Sua única condição é que ele exige que N seja uma potência de 2, por exemplo, para 1.024 pontos, o DFT requer 1.048.576 multiplicações, enquanto o FFT requer apenas 5.120 multiplicações, representando uma economia de 99,5% nas operações de multiplicação. A DFT na forma temporal discreta é expressa pela equação 5. (BENDAT; PIERSOL, 2011; DE MORAIS TEIXEIRA et al., 2013; THORBY, 2008)

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_j e^{-i\left(\frac{2\pi jk}{N}\right)} \quad (5)$$

onde: $x_j = (x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1})$

A inversa da DFT ou IDFT é obtida maneira similar, conforme a equação 6.

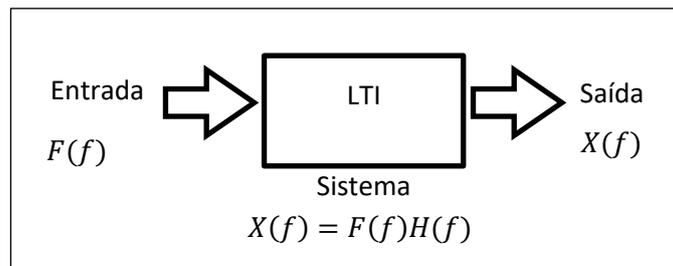
$$x_j = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{i\left(\frac{2\pi jk}{N}\right)} \quad (6)$$

onde: N é o número de pontos de X_k e x_j .

2.4.2 Função de Resposta à Frequência - FRF

A *Frequency Response Function* é expressa por $H(w)$, para notações em rad/s ou $H(f)$ em Hz, normalmente em engenharia a FRF é utilizada para verificar e projetar estruturas mantendo as frequências de ressonância distantes das frequências de entrada (excitação). Mas para casos onde há restrições de projeto é possível aumentar o amortecimento estrutural do sistema, a fim de reduzir a amplificação da resposta. Para sistemas lineares invariantes no tempo ou *Linear Time Invariant* (LTI) a FRF representa a resposta do sistema para determinada frequência, onde a resposta do sistema $X(f)$ é uma escala da função de entrada $F(f)$ pela sua função de transferência, conforme ilustrado na Figura 7. (DE MORAIS TEIXEIRA et al., 2013; THORBY, 2008)

Figura 7 – Função de transferência.



Fonte: Adaptado de Teixeira (2014).

2.4.3 Espectro de densidade e correlação de energia - PSD e CSD

Os espectros de potência são utilizados para prever ou medir a resposta do sistema às entradas aleatórias, mostrando como a energia é distribuída pela faixa de frequência. A Densidade Espectral de Potência ou *Power Spectral Density* é obtida dividindo a potência, ou valor médio quadrático, em determinada frequência pela largura de banda sobre a qual está distribuída e pode ser obtida usando diretamente o DFT, conforme a equação 7. (BENDAT; PIERSOL, 2011; THORBY, 2008)

$$G(f) = 2T \cdot X(f) \cdot X^*(f) \quad (7)$$

onde: $G(f)$ é a função de densidade espectral de potência para a frequência f ;
 T é o comprimento de onda;
 $X^*(f)$ é o conjugado complexo de $X(f)$.

Para correlacionar duas PSD's é utilizado o mesmo conceito da função de correlação cruzada, onde, através de um processo semelhante a função de correlação cruzada é obtido a Função de Correção Espectral ou *Cross Spectral Density Function-CSD* de duas PSD's, conforme a equação 8. (BENDAT; PIERSOL, 2011; TEIXEIRA et al., 2017; THORBY, 2008)

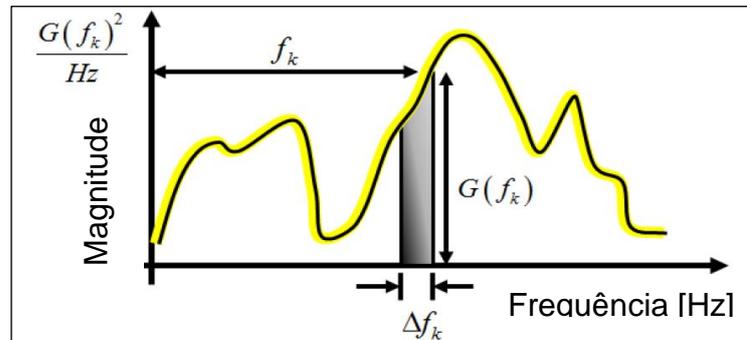
$$G_{xy}(f) = 2T \cdot X(f) \cdot Y^*(f) \text{ ou } G_{yx}(f) = 2T \cdot Y(f) \cdot X^*(f) \quad (8)$$

2.4.4 Momentos espectrais

Os momentos espectrais podem ser vistos como uma maneira estatística para analisar um espectro de energia. Amplamente utilizado nos processamentos e análises de sinais, eles condensam as informações temporais em grandezas escalares capazes de descrever a distribuição.

Alguns destes momentos retornam a média, desvio padrão, assimetria e curtose de um sinal e podem ser combinados para caracterizá-lo por completo. A definição clássica de um momento espectral é definida pela equação 9 e ilustrada pela Figura 8. (FREDRIK; HOLM; LINGJAERDE, 2001; TEIXEIRA, 2014)

Figura 8 – Definição de momentos espectrais.



Fonte: Adaptado de Teixeira (2014).

$$M_n = \sum_{k=1}^N f_k^n G(f_k) \Delta f \quad (9)$$

onde: n é a ordem do momento;
 G é a função PSD;
 f a frequência;
 Δf é o intervalo de frequência;
 N o número de amostras.

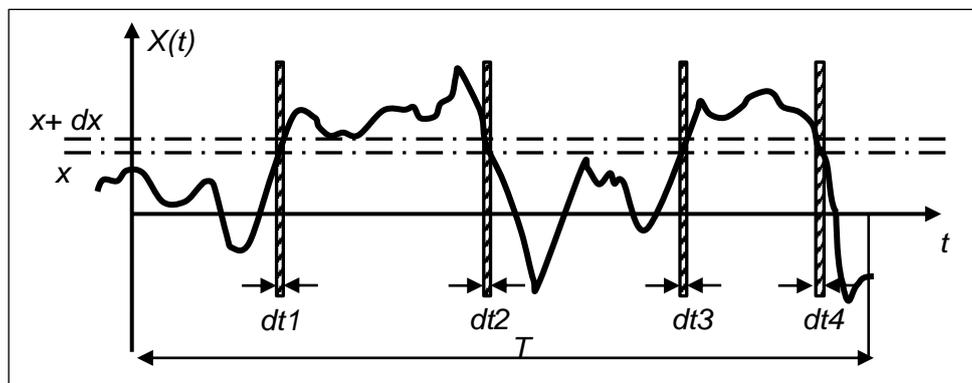
Na fadiga no domínio da frequência, os momentos espectrais são usados para calcular o desvio padrão, os picos e o cruzamento médio ascendente por segundo, o fator de irregularidade e a frequência média, o equacionamento dos respectivos parâmetros estão descritas no Apêndice A. (FREDRIK; HOLM; LINGJAERDE, 2001; TEIXEIRA, 2014)

2.4.5 Probability Density Function - PDF

A função de densidade de probabilidade descreve a probabilidade de um dado aleatório futuro assumir um valor dentro de um determinado intervalo de amplitude, em algum instante de tempo. Além da descrição probabilística dos dados, a PDF também é comumente utilizada para: avaliação da normalidade, detecção de erros de aquisição, indicação de efeitos não-lineares e análise de valores extremos.

A PDF de um histórico temporal pode ser obtida calculando as propriedades estatísticas do processo. A Figura 9 demonstra um sinal temporal aleatório $x(t)$ em intervalo T , onde $X(t)$ vem dos valores entre x e $x+dx$ para o tempo total $(dt_1 + dt_2 + dt_3 + dt_4)$.

Figura 9 – Sinal temporal aleatório.



Fonte: Adaptado de Newland (2005).

A probabilidade de $x \leq X(t) \leq x + dx$ é dada pela equação 10:

$$P[x \leq X(t) \leq x + dx] = \frac{dt_1 + dt_2 + dt_3 + dt_4}{T} \quad (10)$$

Caso T tenha uma duração suficientemente longa, a PDF é dada pela equação 11:

$$P(x) = P[x \leq X(t) \leq x + dx] = \frac{\sum_{i=1}^k dt_i}{T} \quad (11)$$

Matematicamente a equação 11 somente está correta para T tendendo ao infinito, o que implica em que o histórico de tempo da amostra continua para sempre. Como alternativa a PDF pode ser determinada pela fração do número de amostras na faixa entre x e $x+dx$, e pode ser definida conforme 12.

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[\frac{P[x \leq X(t) \leq x+dx]}{\Delta x} \right] \quad (12)$$

Através da PDF é possível calcular a média e a variância do processo aleatório, conforme as equações 13 e 14 respectivamente:

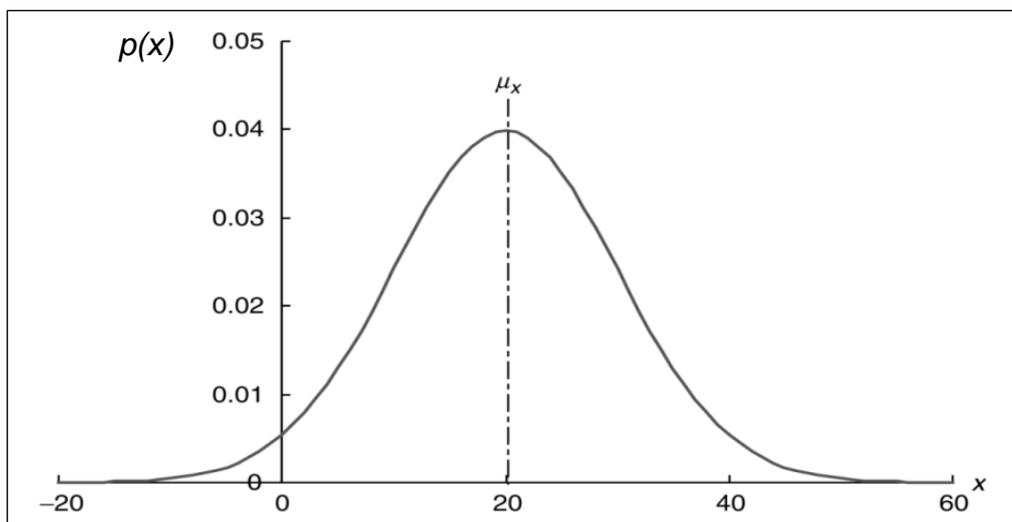
$$\mu_x = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x)dx \cong \frac{1}{T} \int_0^T X(t)dt \quad (13)$$

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - \mu_x]^2 p(x)dx \cong \frac{1}{T} \int_0^T [X(t) - \mu_x]^2 dt \quad (14)$$

Quando a PDF apresenta uma distribuição na forma de sino, ela é classificada como Gaussiano, conforme ilustrado na Figura 10. Para esta condição a PDF pode ser calculada conforme a equação 15.

$$p_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \right] - \infty < x < +\infty \quad (15)$$

Figura 10 – PDF para um processo Gaussiano.



Fonte: Adaptado de Bendat (2010).

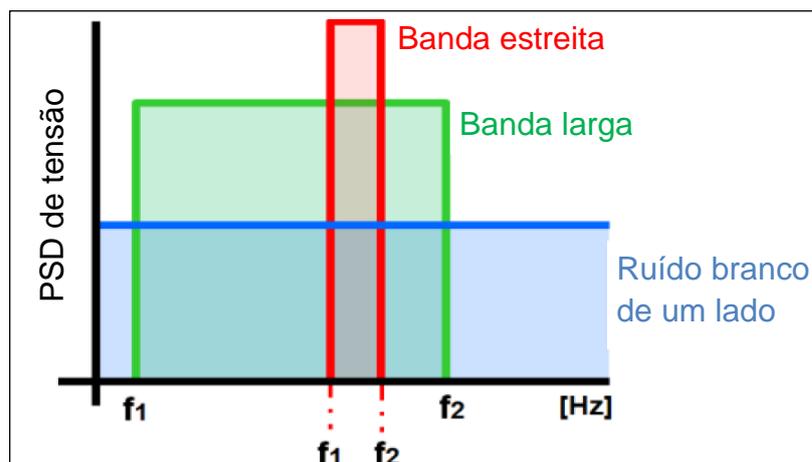
2.4.6 Contagem de dano

A estimativa de vida em fadiga normalmente direciona a algum método de contagem de ciclos, no domínio do tempo o método de *Rainflow* é o mais amplamente usado, já no domínio da frequência a PDF é uma das principais ferramentas para armazenar estes ciclos de carregamentos.

Atualmente existem muitos métodos que são utilizados para o cálculo de dano através de uma PSD de tensão utilizando as informações de sua respectiva PDF, pode-se citar: Tunna, Wirsching e Light, Ortiz e Chen, Tovo e Benasciutti, Hancock, Chaudhury e Dover, Steinberg e Dirlik.(CESÁRIO et al., 2011; DE MORAIS TEIXEIRA et al., 2013)

Essencialmente, a PDF é o que diferencia estas diversas metodologias, cada método é baseado em um conjunto definido de momentos espectrais e projetado para cobrir certo tipo de largura de banda de sinal (estreita, larga) ou uma combinação de ambos, conforme Figura 11. (CESÁRIO et al., 2011; DE MORAIS TEIXEIRA et al., 2013)

Figura 11 – Representação de largura de banda.



Fonte: Adaptado de Teixeira (2014).

O fator de irregularidade (γ), equacionado no Apêndice A, é um importante parâmetro para classificar a distribuição do sinal entre banda larga e estreita, para γ próximo a 1 o sinal é classificado como banda estreita e para valores próximos a 0 como banda larga. Um sinal de ruído branco é aquele com igual intensidade em diferentes frequências, ou seja, sua PSD é constante para a faixa de frequência relevante. (CESÁRIO et al., 2011; DE MORAIS TEIXEIRA et al., 2013)

O modelo Dirlik mostra-se um dos mais precisos entre os apresentados, demonstrando resultados muito próximos aos experimentais e através da equação 16

propôs um modelo empírico de se obter uma PDF a partir de uma PSD, tanto de banda estreita quanto larga, assim este trabalho se propõe a utilizar este método. (CESÁRIO et al., 2011; DE MORAIS TEIXEIRA et al., 2013)

$$p(S_r) = \frac{1}{2\sqrt{M_0}} \left[\frac{D_1}{Q} e^{-\frac{Z}{Q}} + \frac{D_2 Z}{R^2} e^{-\frac{Z^2}{2R^2}} + D_3 Z e^{-\frac{Z^2}{2}} \right] \quad (16)$$

As variáveis da Equação 16 estão descritas no Apêndice B, e o dano correspondente pode ser escrito pela equação 17.

$$D_{Dirlik} = \frac{E[P]T}{k} \sum_0^\infty S_r^b p(S_r) \cdot dS_r \quad (17)$$

$$E[P] = \sqrt{\frac{M_4}{M_2}} \quad (17.1)$$

onde: S_r : faixa de tensão.

T : tempo de exposição.

$p(S_r)$: função de densidade de probabilidade

k, b : coeficiente e expoente da resistência a fadiga.

2.5 ELEMENTOS FINITOS BASEADO NA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

Essa seção considera o modelamento do fenômeno físico de vibrações em componentes mecânicos e a obtenção das PSD's de tensão a partir do uso da teoria de elementos finitos.

2.5.1 Cálculo da função linear de transferência

A base para descrever um sistema que atua dinamicamente é a equação 18, movimento do componente. (ALVES FILHO, 2005; DOURADO; MEIRELES, 2016; HALFPENNY, 1999; TEIXEIRA et al., 2017)

$$[M].\{\ddot{U}\} + [C].\{\dot{U}\} + [K].\{U\} = F(t) \quad (18)$$

onde: $[M]$, $[C]$ e $[K]$ são as matrizes globais de massa, amortecimento e de rigidez; U e $F(t)$ são os vetores nodais de deslocamento e forças.

O método da Superposição Modal é aplicado a sistemas lineares e pode ser dividido em duas etapas: análise modal e determinação dos fatores de participação modal. Para a análise modal é possível resolver a equação 18 ignorando o amortecimento e considerando $f(t)=0$, considerando assim a estrutura sobre vibração livre sem amortecimento, conforme a equação 19. (ALVES FILHO, 2005; HALFPENNY, 1999)

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K].\{U\} = 0 \quad (19)$$

Admitindo que durante a vibração livre cada grau de liberdade da estrutura executa um movimento harmônico, obtém-se a equação 20. (ALVES FILHO, 2005)

$$\{U(t)\} = \{U_0(t)\} \text{sen}(\omega t) \quad (20)$$

onde: $\{U_0(t)\}$ é o vetor das amplitudes de oscilação.

A segunda derivada da equação 20 é dada pela equação 21.

$$\{\ddot{U}(t)\} = -\{U_0(t)\} \omega^2 \text{sen}(\omega t) \quad (21)$$

Substituindo as equações 20 e 21 na equação 19, e simplificando-se é obtida a equação 22.

$$([K] - \omega^2[M]) \cdot \{U_0\} = 0 \quad (22)$$

A solução trivial da equação 22 é dada para $\{U_0\} = 0$, o que não representa vibrações na estrutura. A solução não trivial é obtida $([K] - \omega^2[M]) = \{0\}$, tendo como incógnita ω^2 , corresponde aos quadrados das frequências naturais dos n possíveis modos de vibrar da estrutura, e substituindo ω^2 por λ , resulta na equação 23, de frequência do sistema. (ALVES FILHO, 2005)

$$\det([K] - \lambda[M]) = 0 \quad (23)$$

Os autovalores λ são as raízes do polinômio característico, conforme equação 24.

$$p(\lambda) = \det([K] - \lambda[M]) \quad (24)$$

Uma vez que cada autovalor corresponde a um modo de vibrar, dado pelos autovetores, pode ser escrito conforme equação 25.

$$([K] - \lambda_i[M]) \cdot \{\phi_i\} = \{0\} \quad (25)$$

De posse das equações 22 e 23, são obtidas as frequências naturais da estrutura, autovalores, e os modos de vibrar associados a estas frequências através dos autovetores. Conhecendo as frequências naturais e os modos de vibrar o próximo passo é definir a participação de cada modo na resposta dinâmica através da hipótese de superposição modal, onde a configuração deformada da estrutura em um instante qualquer t pode ser obtida através da soma das configurações de cada modo conforme a equação 26.(ALVES FILHO, 2005)

onde: $\{\phi_i\}$ são os autovetores – modos naturais de vibrar da estrutura.

$$\{U(t)\} = y_1\{\phi_1\} + y_2\{\phi_2\} + y_3\{\phi_3\} + \dots + y_n\{\phi_n\} = \sum_{i=1}^n y_i(t)\{\phi_i\} \quad (26)$$

onde: $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ são os fatores de participação associados aos modos ϕ_i .

Aplicando as propriedades de ortogonalidade nos autovetores, sendo $i \neq j$, de forma compacta são geradas as Equações 27, 28, 29 e 30.

$$\{\phi_i\}^T [K] \{\phi_i\} = k_i \quad (27)$$

$$\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\} = m_i \quad (28)$$

$$\{\phi_i\}^T [C] \{\phi_i\} = c_i \quad (29)$$

$$\{\phi_i\}^T [F] \{\phi_i\} = f_i \quad (30)$$

onde: k_i é a rigidez generalizada para cada modo i ;
 m_i , é a massa generalizada para cada modo i ;
 c_i , é o amortecimento generalizada para cada modo.

Um sistema com N graus de liberdade apresentara n massas, rigidezes e amortecimentos generalizados

Substituindo a Equação 26 na Equação 18, utilizando as Equações 27 a 30, a resposta dinâmica da estrutura em coordenadas generalizadas é dada pela Equação 31.(HALFPENNY, 1999)

$$m_i \cdot \ddot{y}_i(t) + c_i \cdot \dot{y}_i(t) + k_i \cdot y_i(t) = f_i(t) \quad (31)$$

Para obter-se a FRF do sistema com N GDL, aplica-se a transformada de Fourier nos dois lados as Equação 31, obtendo-se a Equação 32. (HALFPENNY, 1999)

$$[[k] - \omega^2[m] + i\omega[c]] \{Y(i\omega)\} = \{F(i\omega)\} \quad (32)$$

onde: $[k]$ é a matriz de rigidez generalizada;
 $[m]$ é a matriz de massa generalizada;
 $\{Y(i\omega)\}$ é a transformada de Fourier do vetor $y_i(t)$;
 $\{F(i\omega)\}$ é a transformada de Fourier do vetor $f_i(t)$.

A Equação 32 ainda pode ser descrita como a Equação 33.

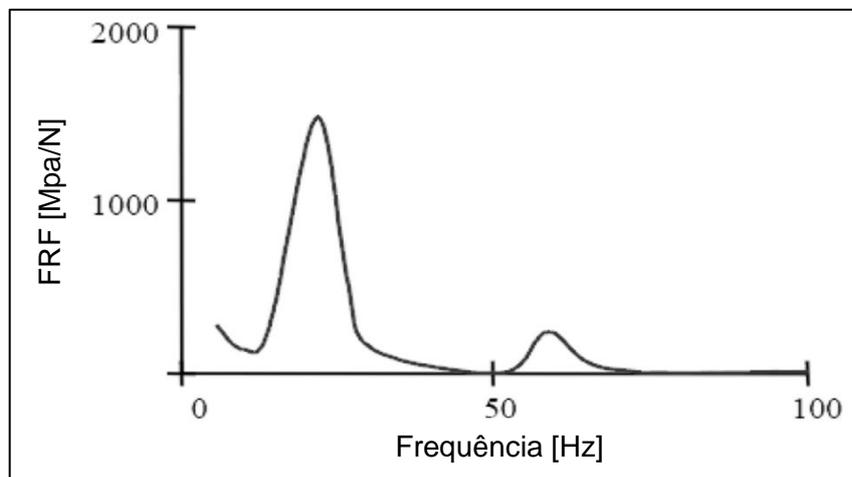
$$\{Y(i\omega)\} = [H(i\omega)] \cdot \{F(i\omega)\} \quad (33)$$

onde:

$$[H(i\omega)] = [k - \omega^2 m + i\omega c]^{-1} \quad (34)$$

A resposta pode ser dada em termos de deformação e tensão e a entrada pode ser dada em termos de velocidade, aceleração e deslocamento, a Figura 12 ilustra uma FRF onde a resposta é dada em termos de tensão e a entrada é dada em termos de força. (HALFPENNY, 1999)

Figura 12 – Representação de largura de banda.



Fonte: Adaptado de Halfpenny, 1999.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

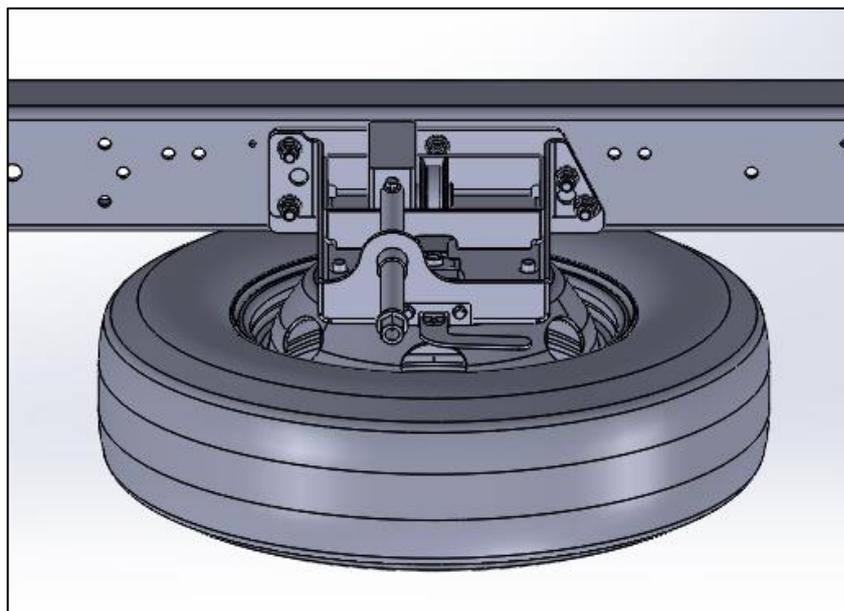
Este capítulo demonstra a metodologia aplicada para o desenvolvimento do trabalho, abordando inicialmente as condições de projeto, de aplicação, construção e funcionais do componente avaliado. Posteriormente foi definido o procedimento para a aplicação das teorias de fadiga no domínio de frequência sobre o componente avaliado comparando o uso de dois modelos de estepe, o modelo original de projeto denominado de misto e um modelo não contemplado pelo projeto original, denominado de *off-road*, sobre diferentes tipos de pavimento, utilizando-se de dados experimentais e do MEF.

3.1 OBJETO DE ESTUDO

Para a aplicação das teorias foi selecionado um suporte para pneu estepe utilizado em veículos de transporte coletivo de passageiros, suporte semelhantes a estes são usualmente utilizados com a mesma finalidade em veículos de carga.

O componente avaliado é constituído de chapas metálicas e um sistema de redução para elevação do pneu estepe, seu conceito é de suporte em balanço o que o deixa suscetível a efeitos de vibração, sendo este um sistema indicado para a análise de fadiga no domínio da frequência. A Figura 13 ilustra o componente.

Figura 13 – Suporte para pneu estepe.



Fonte: Autor (2019).

3.1.1.1 Comparativo estepe misto e *off-road*

O suporte para estepe a ser avaliado foi desenvolvido para receber um conjunto de roda e pneu mistos, para aplicações em diferentes perfis de pista, devido a versatilidade de uso aos quais os veículos de transporte de passageiros estão sujeitos verificou-se a possível utilização de pneus com características fora de estrada, esta mudança implica no aumento de 167% na massa do conjunto estepe.

As Figuras 14 e 15 demonstram a massa dos conjuntos de estepe.

Figuras 14 e 15 – Massa do estepe original e *off-road*.

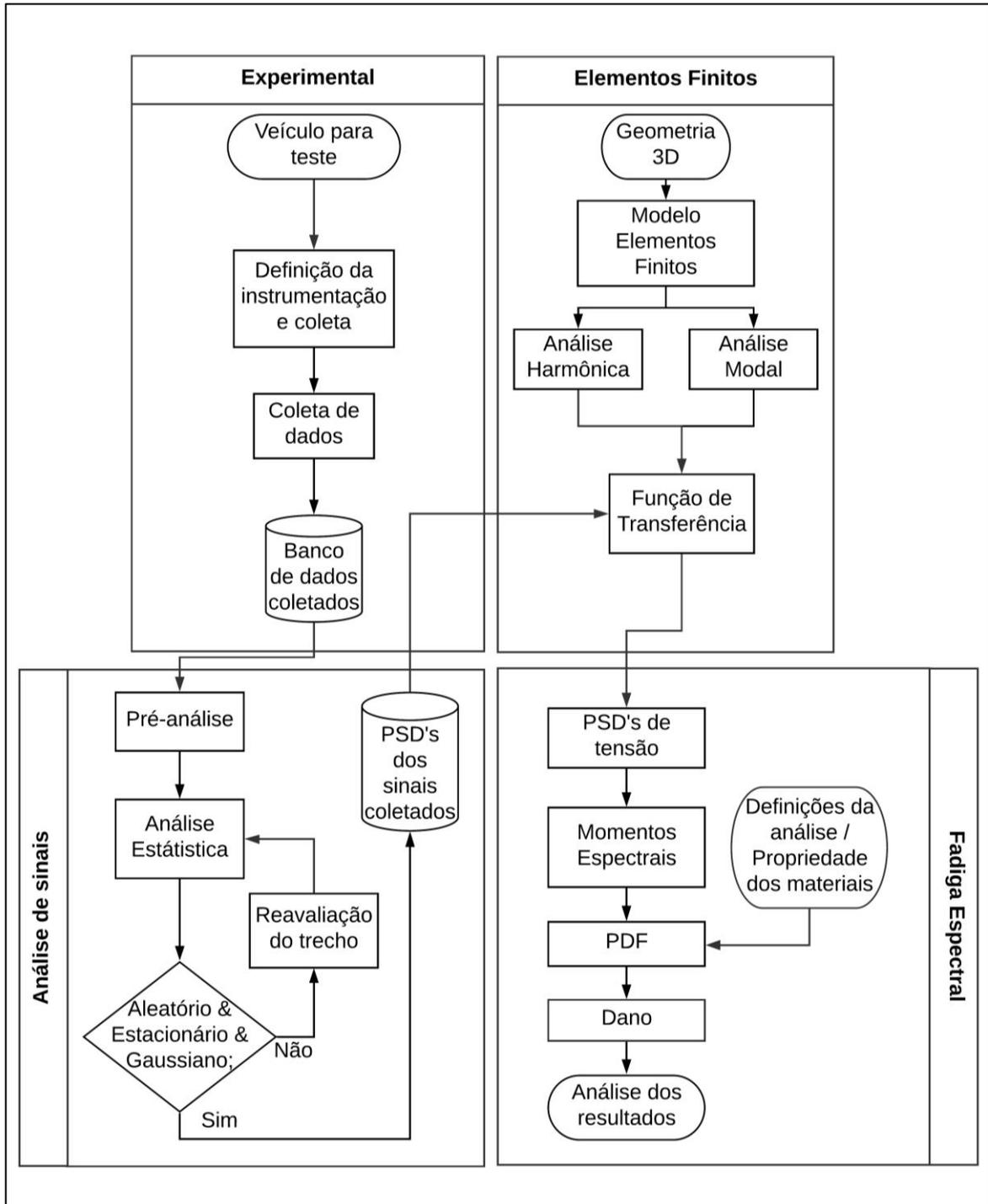


Fonte: Autor (2019).

3.2 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

De forma a aplicar as teorias descritas no capítulo 2 e atender aos objetivos que este trabalho se propôs, o desenvolvimento do trabalho foi dividido em 4 áreas, sendo elas: Experimental, Análise de Sinais, Elementos Finitos e Fadiga Espectral, cada área e suas etapas estão ilustradas na Figura 16 e posteriormente descritas.

Figura 16 – Organograma da proposta de trabalho.



Fonte: Autor (2019).

3.2.1 Experimental

Esta área teve como objetivo a obtenção dos dados de aceleração transmitidos para o suporte do estepe, quando o veículo é utilizado em condições normais de tráfego, sobre diferentes perfis de pista.

Para a obtenção destes dados as seguintes etapas foram realizadas:

- a) obtenção do veículo para as coletas;
- b) definição do ponto de coleta;
- c) instrumentação e coleta de dados.

3.2.1.1 Veículo e montagem do suporte

O veículo selecionado para as coletas foi um micro-ônibus modelo Volare Cinco, as características do veículo estão resumidas no Quadro 1.

Quadro 1 – Características básicas do veículo.

Modelo do Veículo	Volare Cinco
Comprimento	6.700 mm
Altura externa	2.740 mm
Largura	2.010 mm
Quantidade de ocupantes	13 passageiros
Suspensão	Metálica por feixes de molas
Modelo pneus	205/75R16
Modelo de rodas	Rodas em aço de 16"
Condição de carga	100% carregado

Fonte: Autor (2019).

Semelhante aos veículos da linha pesada de transporte de passageiros e carga, o Volare Cinco se caracteriza por ser constituído de carroceria acoplada sobre chassi, a Figura 17 demonstra o veículo utilizado para a realização dos ensaios.

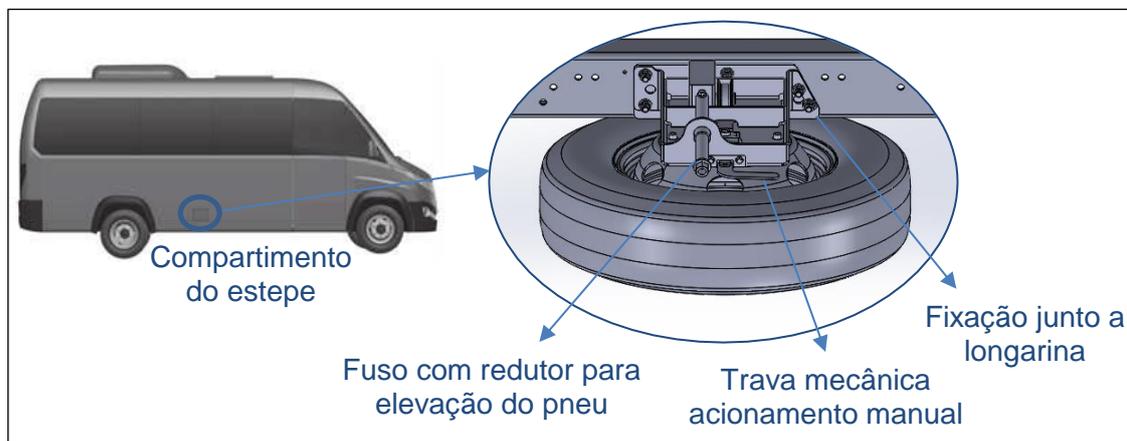
O componente alvo do estudo, suporte do estepe, é fixado diretamente na longarina do chassi, através de seis parafusos e seis porcas M12 x 1,5 mm classe 10.9. O conjunto é posicionado na longarina do lado direito, no entre eixos. A Figura 18 ilustra a posição e montagem do suporte no chassi.

Figura 17 – Veículo utilizado para as coletas.



Fonte: Autor (2019).

Figura 18 – Montagem suporte estepe no chassi.



Fonte: Autor (2019).

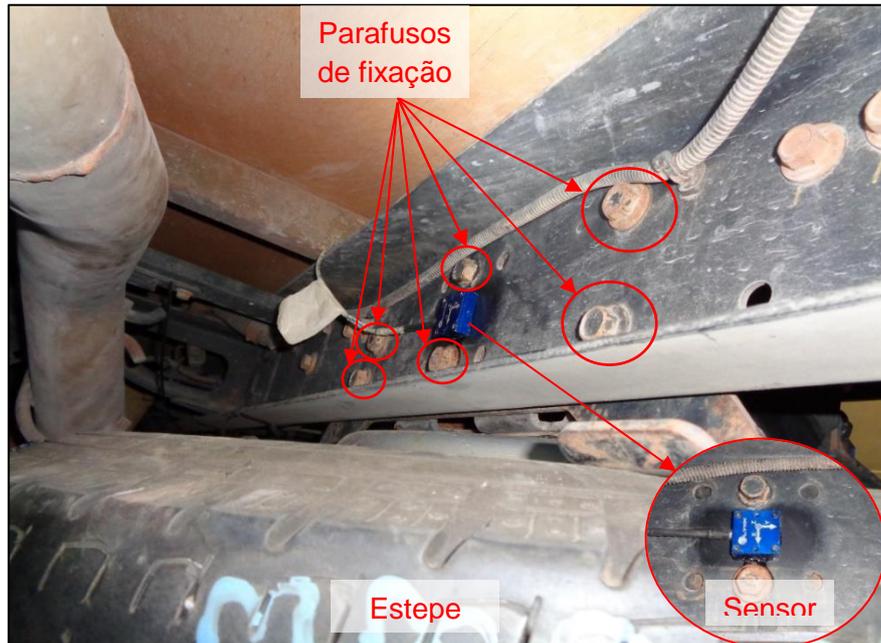
3.2.1.2 Definição do ponto e equipamentos para coleta de dados

Conceitualmente o suporte para o estepe tem fixação semelhante a uma viga curta em balanço, ou seja, somente uma face engastada. Em uma prévia análise visual do componente verificou-se que os principais carregamentos impostos ao conjunto durante a operação do veículo são transmitidas pela longarina do chassi.

Com base na análise anterior foi determinado que o ponto de instrumentação com o acelerômetro deve ser junto a longarina do chassi, centralizado com o suporte, para facilitar a instrumentação foi selecionada a face oposta a união, conforme ilustra a Figura 19.

O sensor utilizado foi um acelerômetro tri axial, tipo MENS±16g, da marca *Lynx*, para a aquisição dos dados foi utilizado o sistema de aquisição modelo ADS 2000 marca *Lynx*, juntamente com um *notebook* para a interpretação e armazenamento dos dados.

Figura 19 – Posicionamento do sensor.



Fonte: Autor (2019).

3.2.1.3 Coleta de dados

O estepe é um item de segurança e seu uso é obrigatório, assim todas as coletas foram realizadas com o pneu montado no suporte.

Previamente as coletas, o acelerômetro foi calibrado utilizando-se da aceleração da gravidade e um nível mecânico, obtendo-se os pontos de leitura de -1 g , 0 g e 1 g .

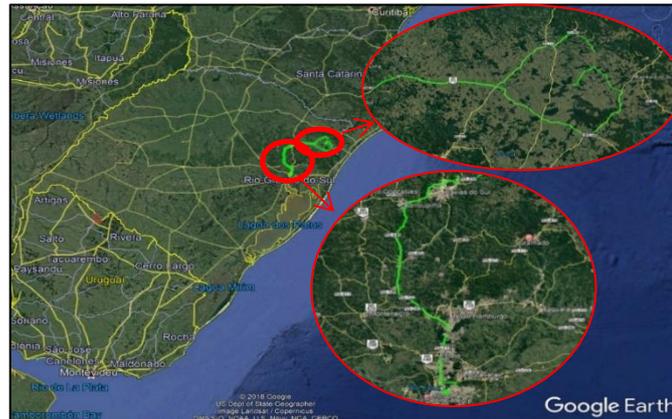
As coletas foram classificadas conforme a análise visual dos pavimentos das pistas, seguindo o padrão a seguir:

- a) **via pavimentada com asfalto**: caracterizada por ser revestida com pavimento asfáltico de boa qualidade baixa ocorrência de falhas superficiais.
- b) **chão batido**: via não pavimentada, com superfície de rolamento composta de agregados produzidos artificialmente (materiais britados) e oriundos do seu próprio leito (pedras graníticas).
- c) **urbano**: via pavimentada variável entre prismas graníticos regulares e irregulares e asfalto de baixa camada.

O Apêndice C contém imagens que ilustram cada classificação de pavimento.

As coletas foram realizadas nas proximidades das cidades de Caxias do Sul, São Francisco de Paula, Jaquirana e Porto Alegre, todas no estado do Rio Grande do Sul. A Figura 20 demonstra o trajeto onde as coletas foram realizadas, destacado em verde.

Figura 20 – Rota da coleta.



Fonte: Autor (2019).

Foram coletados 19 trechos, totalizando 441,9 km em 8 horas e 47 minutos de gravação. A taxa de aquisição foi configurada para 512 Hz, com filtro *anti-aliasing* de 200 Hz.

O Apêndice D contém uma tabela que resume as coletas realizadas, compilando as principais informações sobre cada trecho, e classifica cada trecho conforme os critérios de tipo de pavimentos descritos anteriormente.

3.2.2 Processamento dos sinais coletados

Esta área teve como objetivo gerar as PSD's de aceleração, que foram utilizadas como entrada no cálculo de fadiga espectral, a partir dos dados coletados anteriormente.

Realizando, antes da conversão dos sinais para o domínio da frequência, a verificação da qualidade deles, e conferindo o atendimento aos requisitos que caracterizam um conjunto amostral aleatório, estacionário e ergódico.

Assim esta área foi dividida nas seguintes etapas:

- a) **pré-análise:** sobre todos os sinais foram verificadas e eliminadas falhas como *spikes*, *drift* e ruído. Também foi verificado se a taxa de amostragem estava adequada aos fenômenos medidos;
- b) **análise estatística:** sobre os sinais foram verificadas as propriedades estatísticas dos mesmos, verificando o atendimento aos critérios de conjunto amostral aleatório, estacionário e ergódico, sendo estas principais:
 - média e desvio padrão constantes dentro da mesma coleta para distintos trechos;
 - autocorrelação invariante;

- distribuição gaussiana normal.
- c) **banco de dados de PSD's:** após a confirmação da qualidade dos sinais e que os mesmos atendem aos critérios para a utilização no cálculo de fadiga espectral, a partir dos mesmos foram geradas as PSD's de aceleração de entrada.

3.2.2.1 Procedimentos de pré-análise dos sinais coletados

A verificação da qualidade dos sinais coletados se iniciou com a verificação da frequência de aquisição, para ao menos um trecho de cada classificação perfil de pista foi gerado a FFT do sinal e comparando as frequências efetivas de excitação com a frequência de coleta.

O critério de aceitação se baseia no conceito da frequência de Nyquist, que determina que a frequência de amostragem deve ser ao menos o dobro da frequência de aquisição.

Esta verificação foi realizada utilizando o software Lynx AqDAnalysis 7.5, os parâmetros das análises seguiram as informações do Quadro 2:

Quadro 2 – Parâmetros para gerar FFT.

Tipo de espectro	Auto espectro
Tipo de janela de compensação	Hanning
Sobre posição Percentual	66%

Fonte: Autor (2019).

Após a verificação da frequência de aquisição foi verificado a qualidade dos sinais coletados, essa verificação foi realizada de forma visual, gerando os gráficos das coletas no domínio do tempo e aplicando filtros passa baixa de 100 Hz. Este procedimento também foi realizado utilizando o *software* Lynx AqDAnalysis 7.5.

3.2.2.2 Análises estatísticas

Como descrito anteriormente este procedimento tem como objetivo verificar se os dados coletados atendem aos critérios de sinal aleatório, estacionário e ergódico.

Carregamentos vibratórios gerados pelo veículo parado além de baixa amplitude tem caráter determinístico, assim estes trechos foram eliminados dos sinais.

De forma a facilitar as análises e reduzir o número de arquivos a serem analisados, os sinais com mesma classificação de pavimentação conforme o item 3.2.1.3 foram unidos, de forma manual, em serie gerando um único sinal temporal para cada classificação de pavimento.

3.2.2.2.1 *Distribuição Gaussiana normal*

Através de uma planilha em Excel foram gerados os histogramas, de amplitude do sinal versus o número de repetições dos dados de cada coleta e verificando se a distribuição dos mesmos é Gaussiano normal.

3.2.2.2.2 *Média e desvio padrão constantes*

Para a verificação dos valores constantes de média e desvio padrão foi utilizado o Lynx AqDAnalysis 7.5, onde foi calculado a média e desvios padrão para o sinal completo e para secções de trinta minutos.

3.2.2.2.3 *Autocorrelação constante*

O cálculo de autocorrelação foi realizado aplicando-se os conceitos da Equação 2 e utilizando uma planilha em Excel, conforme o procedimento e exemplo descritos a seguir.

Para cada classificação de pavimento, o conjunto de dados foi dividido em N janelas, esta divisão foi realizada em sequência e distribuída sobre todo o conjunto amostral, fazendo com que N tende-se a infinito.

O tamanho de cada janela N foi exatamente o valor do espaçamento τ , e os valores $X(t_1)$ e $X(t_1+\tau)$ foram, respectivamente, as extremidades de cada janela N, assim, quanto menor o espaçamento τ maior o número de janelas N.

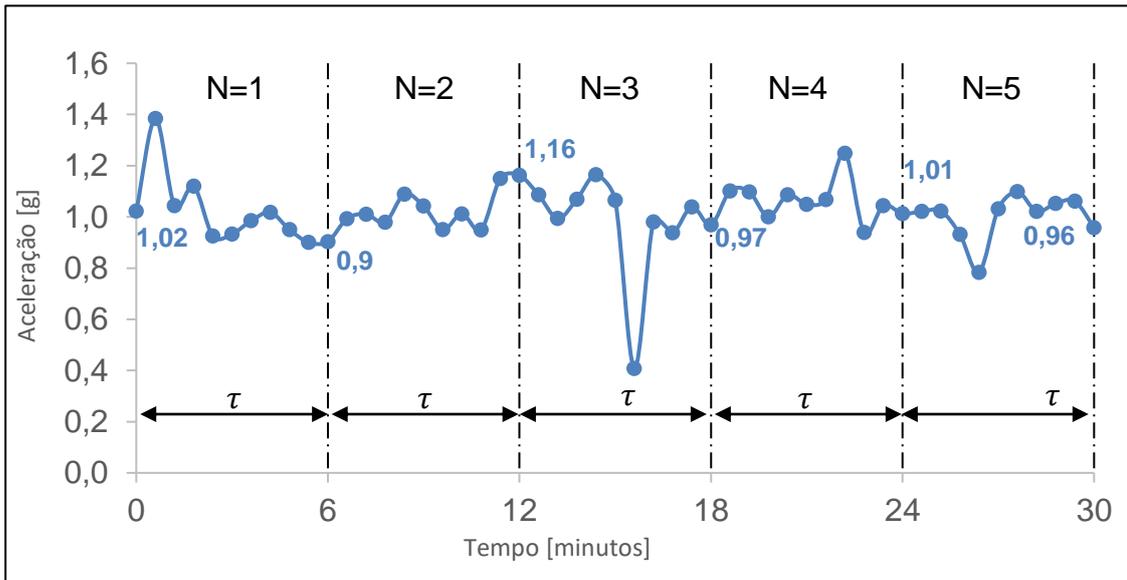
O espaçamento τ foi variado de 900 até 0,00390625 segundos e o cálculo além de ser realizado sobre todo o conjunto amostral também foi realizado sobre trechos de 30 minutos e os resultados comparados.

Para facilitar o entendimento do procedimento aplicado, segue o desenvolvimento de um exemplo, com valores fictícios de magnitude semelhante aos valores coletados.

O exemplo demonstra um conjunto temporal de 30 minutos, com espaçamento temporal $\tau = 6$ minutos, gerando assim 5 janelas (N=5).

A Figura 21 demonstra o sinal temporal e suas respectivas divisões.

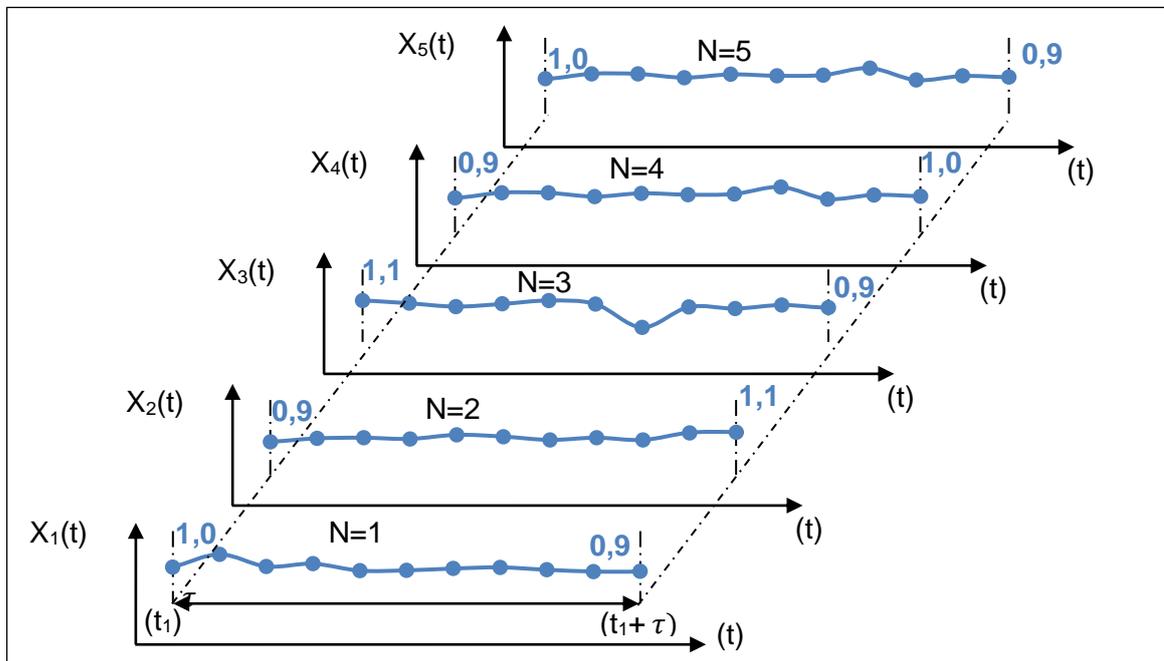
Figura 21 – Exemplo de sinal temporal para cálculo de autocorrelação.



Fonte: Autor (2019).

Seguindo o procedimento, o sinal foi dividido nas 5 janelas e os valores das extremidades de cada janela foram memorizados para o posterior cálculo, a Figura 22 ilustra esta etapa.

Figura 22 – Exemplo de divisão do sinal temporal.



Fonte: Autor (2019).

Posteriormente os valores de aceleração, previamente memorizados, foram tabulados. A Tabela 2 demonstra a tabulação dos valores e a resolução do cálculo da autocorrelação (R_{xx}) para o exemplo.

Tabela 2 – Resumo coletas.

N	X(t1)	X(t1+τ)	X(t1) *X(t1+τ)
1	1,02	0,90	0,918
2	0,90	1,16	1,044
3	1,16	0,97	1,1252
4	0,97	1,01	0,9797
5	1,01	0,96	0,9696
AUTO CORRELAÇÃO - $R_{xx} = 1,0073$			

Fonte: Autor (2019).

3.2.2.3 Geração de PSD

A geração de cada PSD de aceleração foi realizada individualmente para cada um dos três sinais temporais representativos dos perfis de pista, o *software* utilizado para a conversão do domínio do tempo para a frequência foi o nCode Desing Life® da empresa Prencia. As propriedades utilizadas para a geração das PSD's estão resumidas no Quadro 3.

Quadro 3 – Propriedades para geração das PSD's de aceleração.

Tipo de espectro de saída	Potência
Tipo de janela de compensação	Hanning
Sobre posição Percentual	67%
Buffersize	512

Fonte: Autor (2019).

3.2.3 Elementos Finitos

Esta área teve como objetivo gerar o modelo numérico em elementos finitos e as análises modal e harmônica, para possibilitar o cálculo de vida em fadiga.

Para as análises numéricas foi utilizado o *software* Ansys® 19.2 e uma *Workstation* HP® *EliteBook 850w* com processador Intel® Core™ i7-2860QM CPU @ 2.50GHz e 16 GB de memória instalada (RAM).

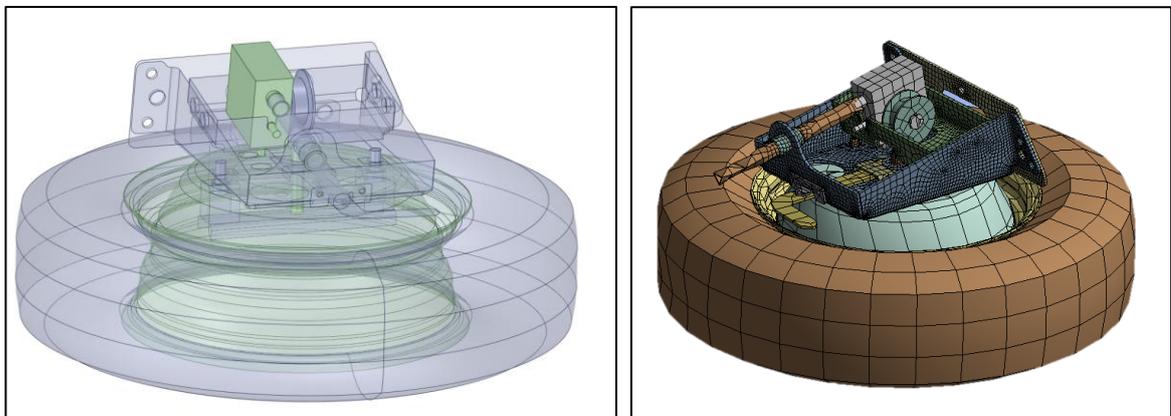
3.2.3.1 Geração do modelo

As geometrias em CAD do conjunto suporte e estepe foram simplificadas utilizando-se o *software* SpaceClaim®, que faz parte do pacote do *software* ANSYS versão 19.2, que foi utilizado nas avaliações estruturais do presente trabalho. A simplificação da geometria em estudo é feita com dois objetivos principais: gerar as superfícies média (*mid-surfaces*), que permitem o uso de elementos de casca, e eliminar detalhes geométricos que incorrem em elevado número de elementos em regiões de baixo interesse, como roda, pneu e redutor de elevação do estepe, no caso do presente trabalho.

Com a geometria preparada a malha de elementos finitos foi gerada, utilizando o pacote *MESH* do *software* ANSYS®. O suporte do estepe, bem como o conjunto do estepe foram representados com elementos do tipo casca (*shell*), pois possuem espessura fina e constante. Outros componentes, que possuem geometria complexa, tais como redutor e polia foram representados com elementos sólidos (tetraedros e hexaedros).

As Figuras 23 e 24 demonstram a geometria preparada com as superfícies médias geradas, e a posterior malha gerada.

Figuras 23 e 24 – Geometria preparada e malha gerada.



Fonte: Autor (2019).

As massas dos componentes fabricados em chapas já são adequadamente representadas, pois o volume e a massa específica dos mesmos são conhecidos. Os demais componentes tiveram as massas calibradas a partir de medições experimentais e alterações nos valores das massas específicas diretamente no *software* de análise. A Figura 25 demonstra a massa do suporte.

Figura 25 – Massa do suporte para estepe.



Fonte: Autor (2019).

O suporte para estepe tem sua estrutura construída em chapas com 5 mm de espessura em aço SAE 1010, as propriedades mecânicas utilizadas no cálculo estão descritas no Quadro 4.

Quadro 4 – Propriedades mecânicas dos materiais.

Limite de escoamento [MPa]	280
Limite de resistência a tração [MPa]	320
Módulo de Elasticidade [GPa]	210
Coefficiente de Poisson	0,3

Fonte: Marcopolo (2019).

3.2.3.2 Análise Modal e Harmônica

Através da análise modal são obtidas as frequências naturais e os modos de vibrar do conjunto, estas informações foram utilizadas para a realização da análise harmônica que resultam nas FRF's da estrutura.

Tanto a análise modal, quanto a harmônica foram configuradas de forma a representar a faixa de frequência onde a excitação é expressiva. Para a melhor representação das FRF's da estrutura se fez uso do comando *Cluster Results*, este comando adiciona, uma quantidade de pontos, definidos pelo usuário, na periferia das frequências naturais, já que as mesmas são responsáveis pelas maiores amplificações de tensão no componente. Alguns pontos de frequências foram adicionados manualmente para garantir que as principais frequências de excitação fossem corretamente representadas.

Para a análise harmônica se fez uso do fator de amortecimento teórico aplicado ao sistema de 5%.

3.2.3.2.1 *Contatos*

Ressaltando que o método de fadiga no domínio da frequência é válido apenas para sistemas lineares, assim contatos não-lineares sequer são suportados pelo *software*. Assim contatos do tipo *bonded* foram aplicados nas condições de encontro entre os componentes, unindo pneu a roda e a roda ao suporte. Este contato se caracteriza por não promover movimento relativo entre as partes, uma vez que os graus de liberdade dos pares de contatos estão “amarados”.

Ainda que existam diferentes metodologias para o modelamento de juntas soldadas através de Elementos Finitos, conforme Eriksson et al. (2003), e não sendo análise dos efeitos destas metodologias o foco deste trabalho, tais regiões foram representadas através da conexão dos nós dos elementos adjacentes.

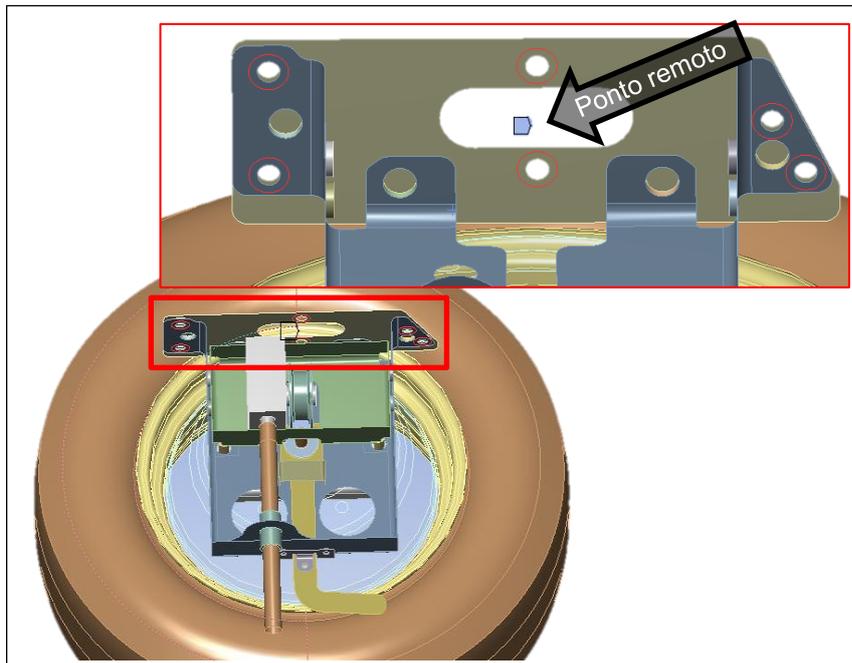
3.2.3.2.2 *Condições de contorno*

Para considerar a montagem aparafusada do suporte ao veículo, foi gerada uma geometria com diâmetro da igual ao diâmetro externo da cabeça do parafuso, as seis geometrias de fixação foram unidas através de um nó *master*, localizado no centroide das 6 geometrias de fixação e conectado a estas geometrias através de elementos rígidos (RBE2).

Para a realização da análise harmônica se faz necessário definir um carregamento, assim foi definido uma carga unitária de 1g sobre o ponto remoto, na direção vertical, sendo está a direção das coletas experimentais de aceleração.

As geometrias que foram utilizadas para a aplicação do carregamento estão destacadas em vermelho na Figura 26, onde a posição do ponto remoto, ou nó *master*, está ilustrado pela flecha.

Figura 26 – Pontos de carregamento.



Fonte: Autor (2019).

3.3 FADIGA ESPECTRAL

A aplicação do método de fadiga no domínio da frequência foi realizada através do módulo de cálculo de fadiga *Vibration Analysis* do software Ncode DesingLife®, nesta etapa os resultados das áreas anteriores foram combinados.

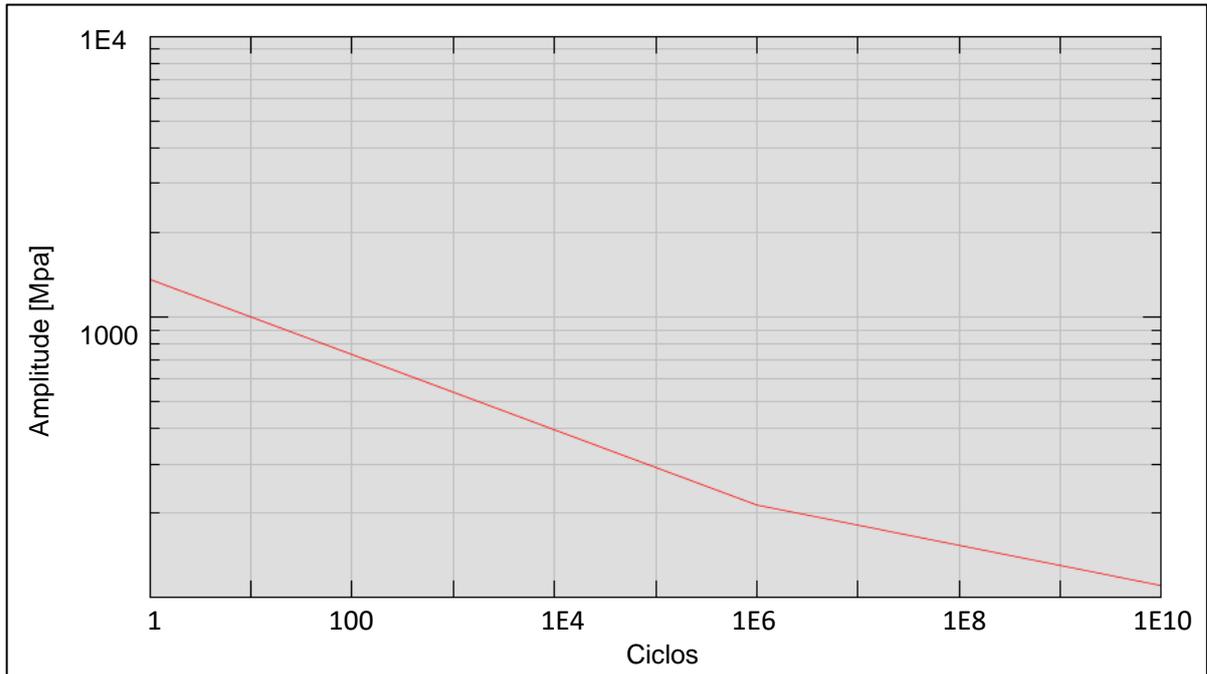
A contagem de ciclos e cálculo de dano foi realizado utilizando o método de Dirlik através das PDF's geradas a partir das PSD's de tensão. A curva de fadiga utilizada foi para o material SAE 1010 onde o Quadro 5 resume seus coeficientes e a Figura 24 ilustra a curva S-N.

Quadro 5 – Propriedades mecânicas dos materiais.

Inclinação da primeira reta	-0,13385
Inclinação da segunda reta	-0,07172

Fonte: Autor (2019).

Figura 27 – Curva S-N Aço SAE 1010.



Fonte: Autor (2019).

Para o presente trabalho os efeitos das tensões médias foram desprezados por dois motivos: no objeto de estudos as tensões médias são ocasionadas somente pelo peso próprio, gerando assim baixos valores de tensão; o método utilizado, Dirlik, não abrange os efeitos destas tensões, métodos mais como o de Tovo e Benasciuto considerem seus efeitos, porém não estão implementados do software utilizado.

O estado de tensão utilizado para o cálculo de fadiga foi a Máxima Tensão Principal Absoluta, com confiabilidade de 99,9%. Foi considerando tempo de exposição para as PSD's de entrada de 4,5 E7 segundos que corresponde a 12.500 horas de operação, ou uma estimativa de 10 anos de uso. O Quadro 6 resume as propriedades do cálculo de fadiga.

Quadro 6 – Propriedades mecânicas dos materiais.

Modelo de cálculo	Dirlik
Confiabilidade	99,9%
Estado de tensão	Máxima Tensão Principal Absoluta
Método de tensões médias	Não aplicado
Interpolação pontos da FRF	Logarítmica
Tempo de exposição [segundos]	4,5 E7

Fonte: Autor (2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

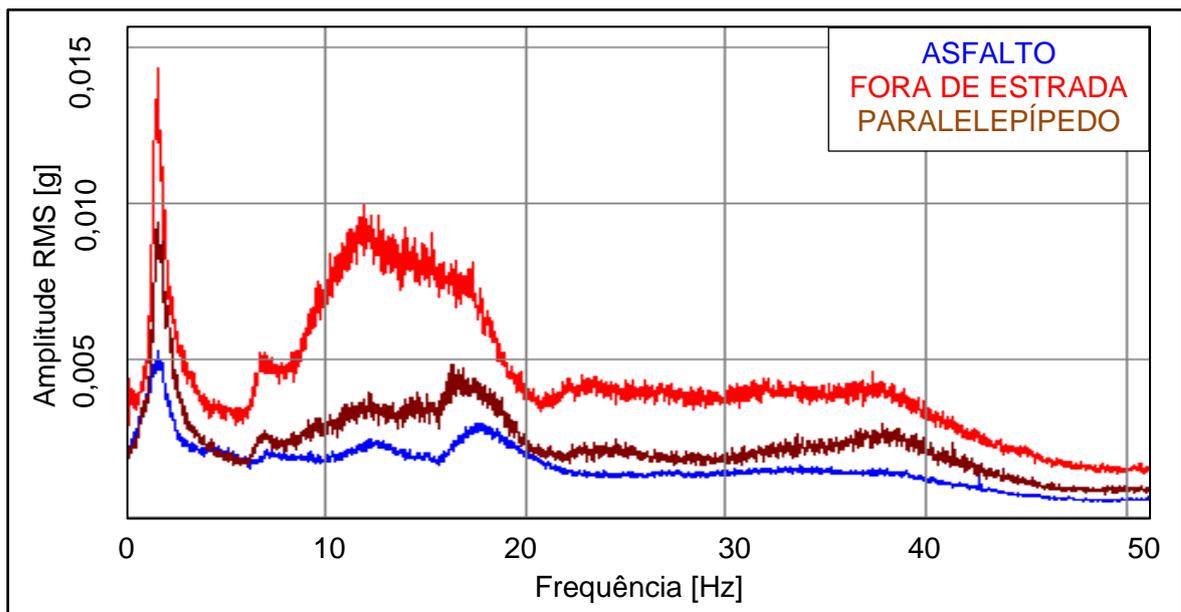
4.1 PROCESSAMENTO DOS SINAIS COLETADOS

4.1.1 Qualidade dos sinais coletados

Todos os sinais foram coletados de forma satisfatória, não apresentando falhas e com frequência de aquisição adequada para o fenômeno medido.

A Figura 28 demonstra a FFT gerada através dos sinais unidos por classificação de perfil de pista, onde percebe-se que as principais amplitudes de aceleração estão próximas a 12 Hz, com pico de baixa frequência em 1,7 Hz. Evidenciando maiores amplitudes nas coletas sobre pavimento fora de estrada e posteriormente urbanas.

Figura 28 – FFT sinais unidos.



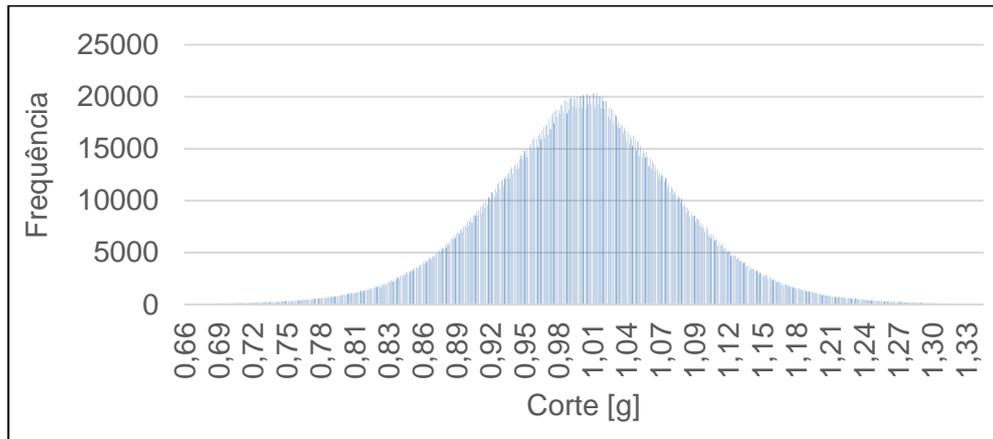
Fonte: Autor (2019).

4.1.2 Distribuição Gaussiana Normal

As Figuras 29, 30 e 31 confirmam a distribuição Gaussiana normal dos sinais analisados, com média igual a 1 g.

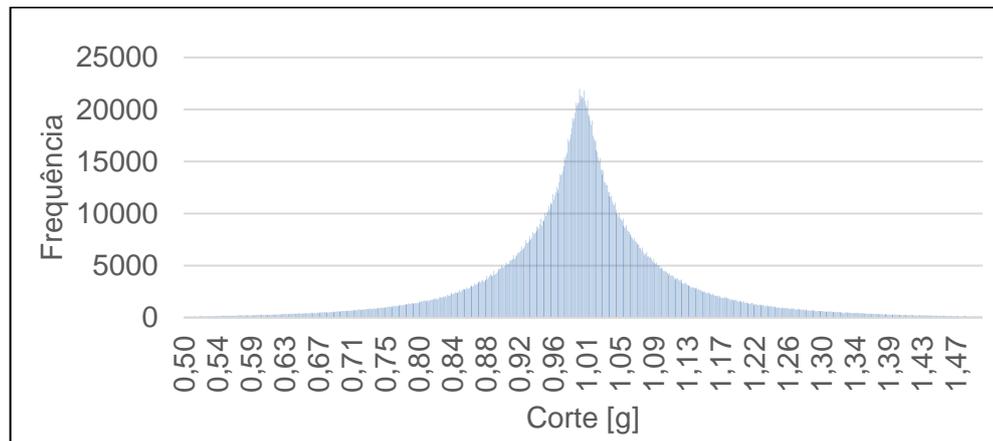
A variação no formato das caudas das curvas Gaussinas indicam a diferença de amplitudes de aceleração entre as classificações pré-determinadas, confirmando assim a necessidade do uso da classificação.

Figura 29 – Histograma asfalto.



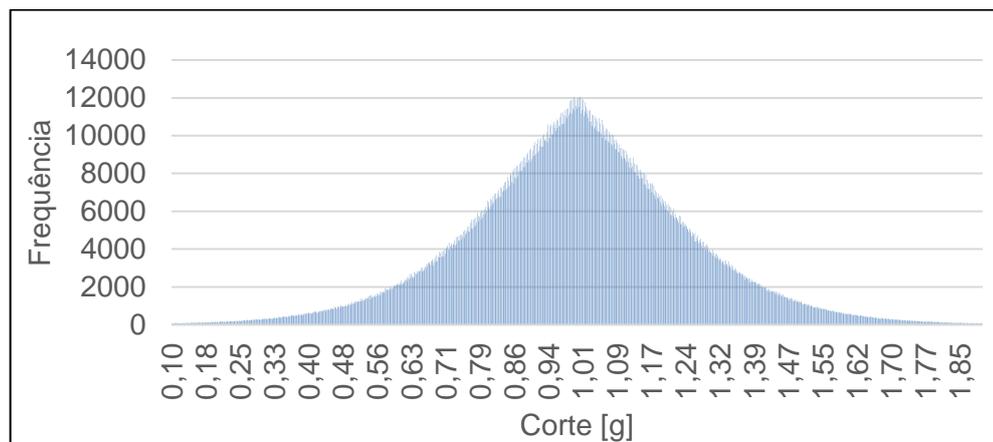
Fonte: Autor (2019).

Figura 30 – Histograma urbano.



Fonte: Autor (2019).

Figura 31 – Histograma fora de estrada.



Fonte: Autor (2019).

4.1.3 Média e desvio padrão

Como esperado para o fenômeno medido, a média se manteve constante em todas as coletas, sendo que o valor de 1 g indica a leitura do sensor em repouso, tendendo todas as excitações a responderem com a mesma magnitude e retornarem ao valor de repouso.

Os desvios padrão mostram pequenas variações, estas mais expressas no conjunto de dados de asfalto, sendo ocasionada principalmente por pequenas variações na qualidade do pavimento medido, certos trechos apresentavam algumas irregularidades, porém o valor de dispersão é baixo.

Os resultados estão descritos no Apêndice E, no formato de tabela e gráfico para cada tipo de pavimento.

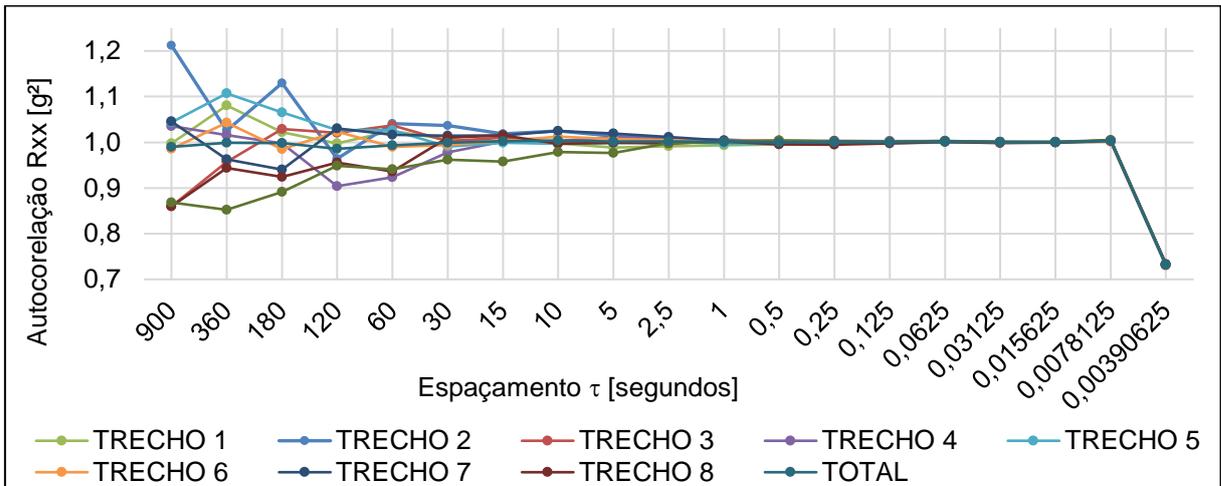
4.1.4 Autocorrelação

Confirmando a equação foi verificado que para pequenas quantidades de amostras N , o valor da autocorrelação diverge, amentando-se a quantidade de amostras a autocorreção tende a um valor constante.

Os valores convergiram quando aplicado espaçamentos menores a 2,5 segundos e divergiram com espaçamentos 0,00390625 segundos, esta divergência está relacionado ao intervalo temporal de aquisição aplicado de 0,001953125 segundos, exatamente a metade do valor de divergência da autocorrelação, indo ao encontro a Lei de Nyquist que determina que deve ser ao menos dois pontos sobre a medida.

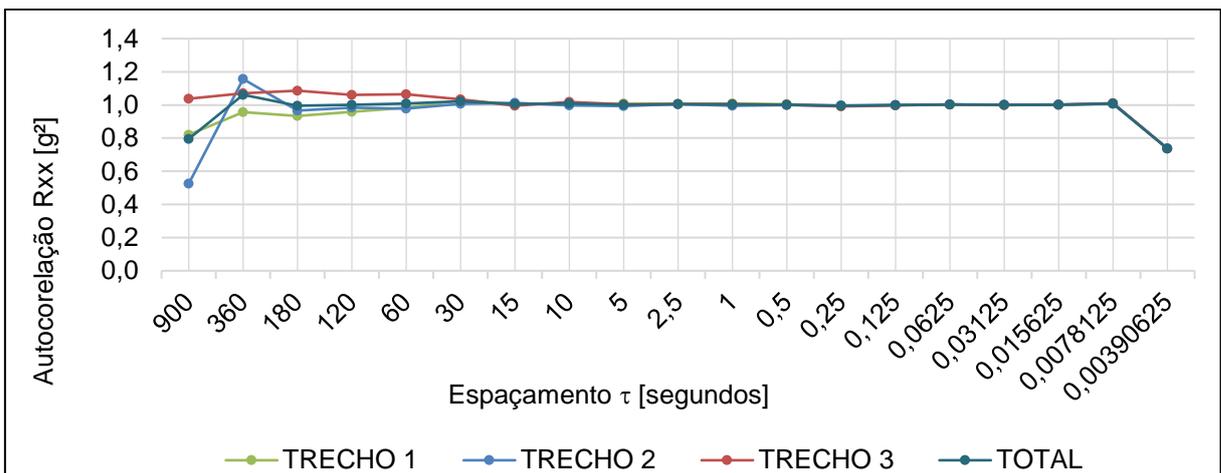
As Figuras 32, 33 e 34 demonstram os gráficos obtidos com o cálculo de autocorrelação para cada perfil de pista. As tabelas com os valores utilizado para gerar os respectivos gráficos estão no Apêndice G.

Figura 32 – Autocorrelação asfalto.



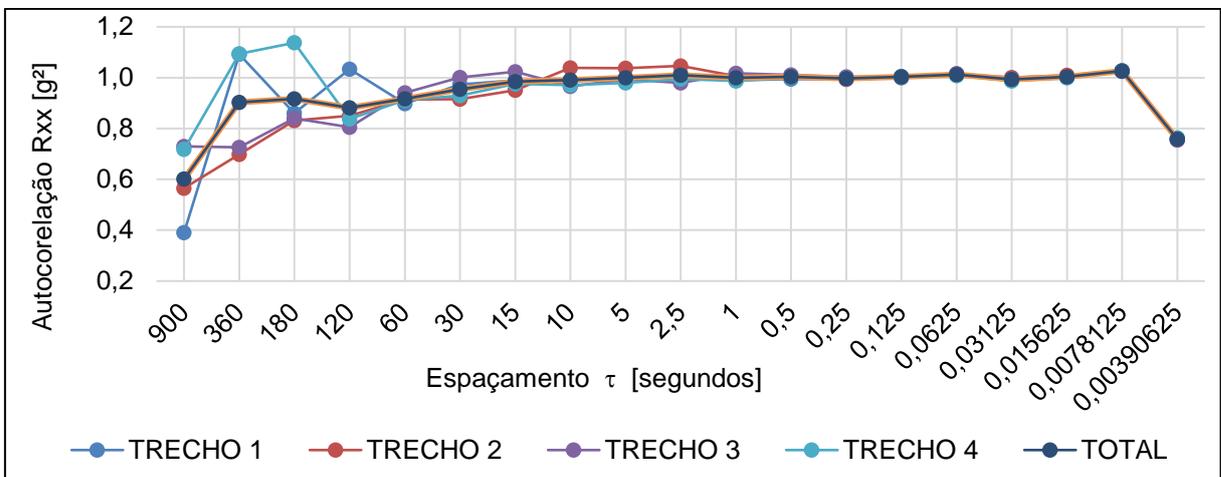
Fonte: Autor (2019).

Figura 33 – Autocorrelação urbano.



Fonte: Autor (2019).

Figura 34 – Autocorrelação fora de estrada.

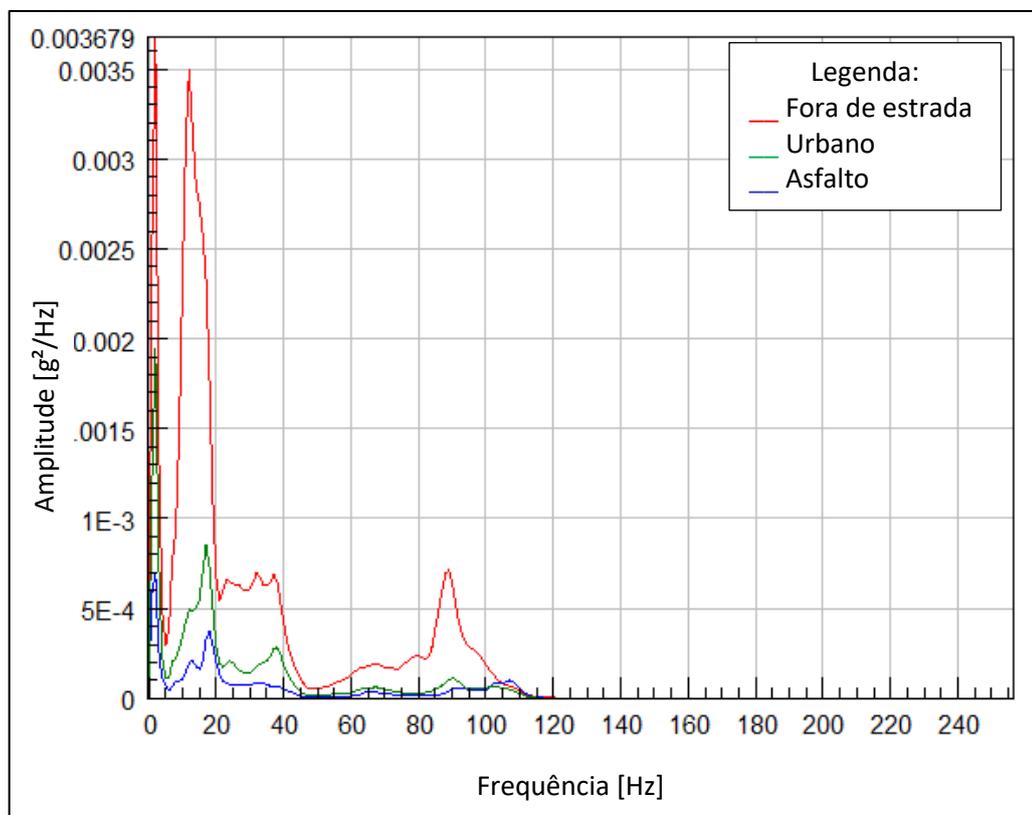


Fonte: Autor (2019).

4.1.5 PSD's de aceleração

A Figura 35 demonstra as PSD de cada perfil de pista sobreposto, indicando que a faixa de maior energia dos sinais estão abaixo de 40 Hz, com picos em 12 e 17 Hz. O pavimento fora de estrada demonstra a maior energia, seguido pelo pavimento urbano e o asfaltado. Ainda o pavimento fora de estrada se difere por apresentar uma maior energia com 88,8 Hz, todos os espectros não apresentam energia acima de 120 Hz, devido ao filtro prévio de 100 Hz.

Figura 35 – PSD's de aceleração.



Fonte: Autor (2019).

4.2 FADIGA NO DOMINIO DA FREQUÊNCIA

4.2.1 Análise modal

Visto que as PSD's de aceleração geradas que serão utilizadas como entrada na análise de fadiga têm valores representativos até 120 Hz a análise modal foi configurada a gerar os modos de vibrar até esta frequência.

De forma a ressaltar as diferenças nas magnitudes das frequências naturais do conjunto com pneu misto e do conjunto com pneu *off-road*, apresenta-se o Quadro 7. Saliendo-se que os modos de vibrar são idênticos.

Quadro 7 – Comparativo frequências naturais.

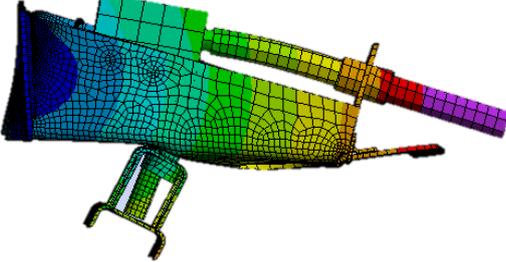
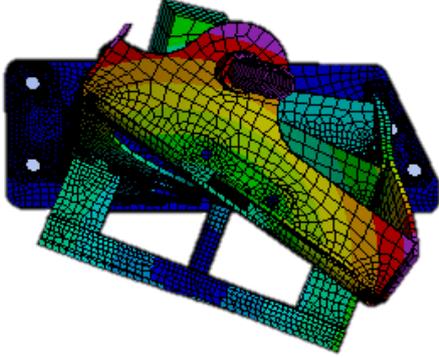
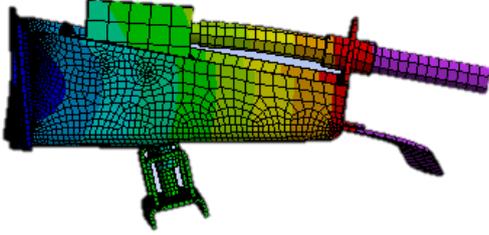
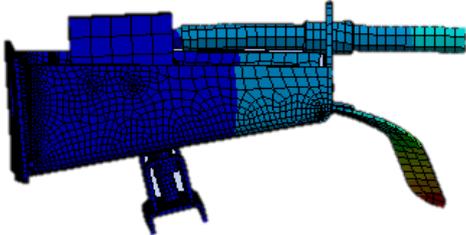
Modo de vibrar	Com estepe misto		Com estepe <i>off-road</i>		Diferença % na magnitude das Fn
	Frequência [Hz]	Característica	Frequência [Hz]	Característica	
1	31,0	Flexão	22,2	Flexão	72%
2	61,6	Torção	44,2	Torção	72%
3	74,4	Flexão	52,4	Flexão	70%
4	125,5	Flexão	94,1	Flexão Lateral	75%
5	-	-	96,9	Flexão	-
6	-	-	123	Torção	-

Fonte: Autor (2019).

A mudança do estepe misto para o *off-road* reflete em um caimento expressivo das frequências naturais do componente, próximo a 72%, reduzindo o primeiro modo de 31,0 Hz para 22,2 Hz e o aproximando da região de maior energia das PSD's de aceleração.

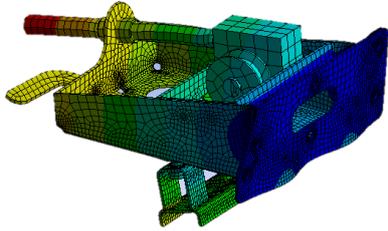
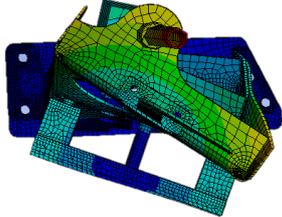
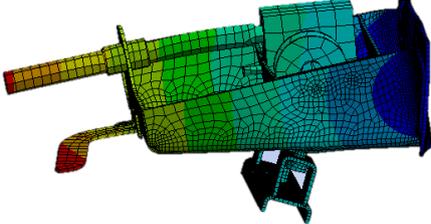
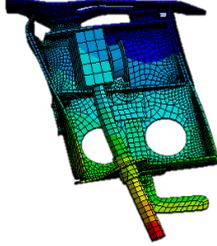
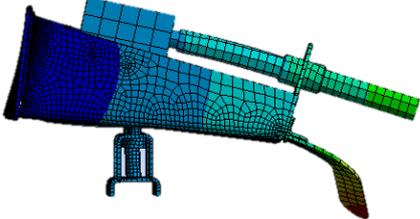
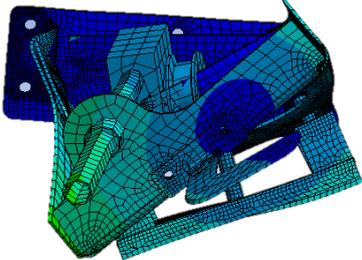
Os Quadros 8 e 9 ilustram os modos de vibrar do suporte para ambos os modelos de estepe, para facilitar a visualização dos modos de vibrar o conjunto do estepe foi ocultado.

Quadro 8 – Modos de vibrar porta estepe com estepe misto.

	Modo de vibrar	Frequência [Hz]	Característica
1		31,0	Flexão
2		61,6	Torção
3		74,4	Flexão
4		125,5	Flexão

Fonte: Autor (2019).

Quadro 9 – Modos de vibrar porta estepe com estepe *off-road*.

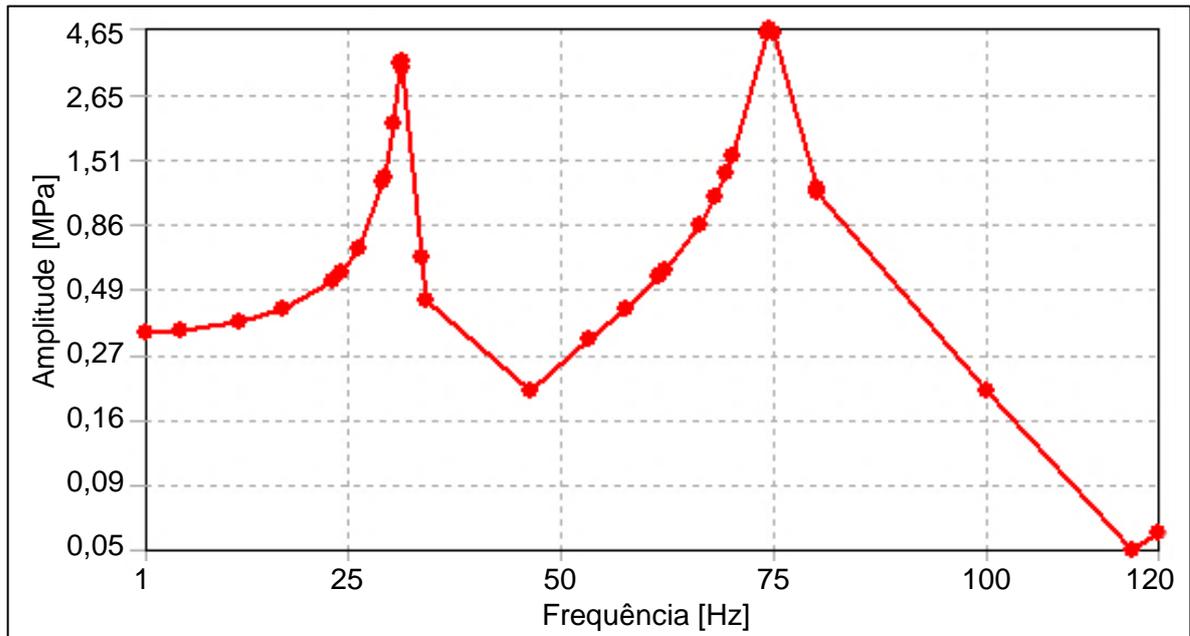
	Modo de vibrar	Frequência [Hz]	Característica
1		22,2	Flexão
2		44,2	Torção
3		52,4	Flexão
4		94,1	Flexão Lateral
5		96,9	Flexão
6		123	Torção

Fonte: Autor (2019).

4.2.2 Análise harmônica

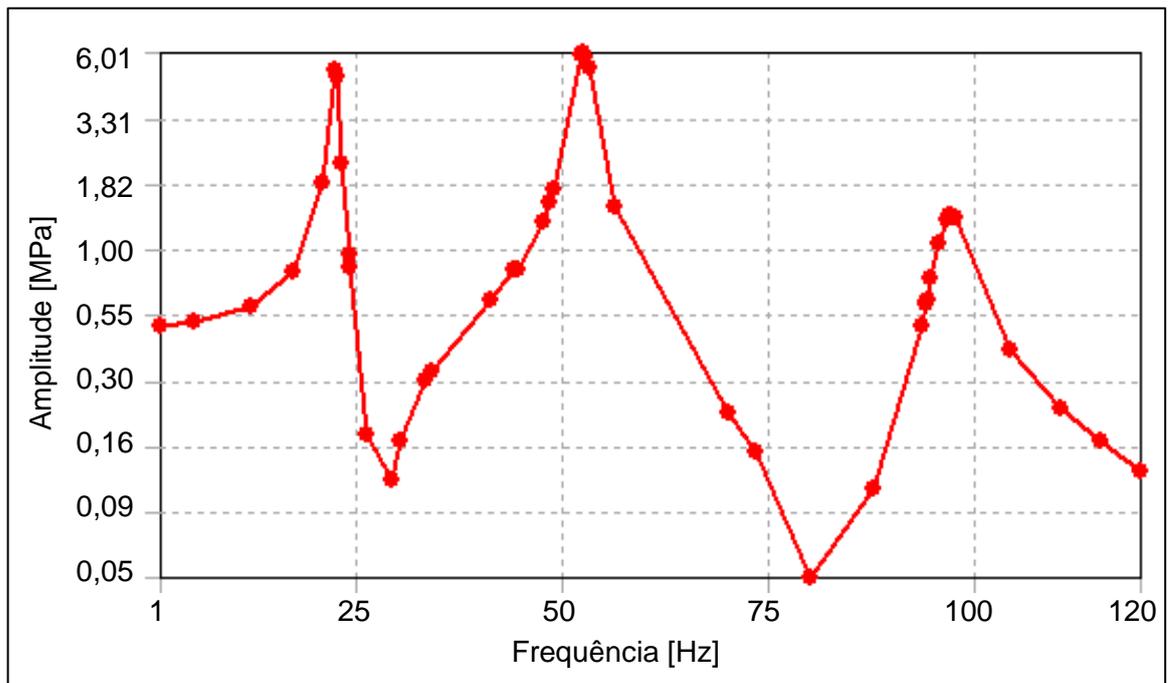
As Figuras 36 e 37, apresentam a FRF de tensão para o mesmo nó do componente em estudo, sendo com o estepe misto e *off-road* respectivamente.

Figura 36 – FRF em tensão/g para a condição com estepe misto.



Fonte: Autor (2019).

Figura 37 – FRF em tensão/g para a condição com estepe *off-road*.



Fonte: Autor (2019).

Com base nestas FRF's é possível verificar os picos de amplificação próximo as frequências naturais de flexão dos componentes, mesmo que as demais frequências naturais sejam varridas pelas FRF's as mesmas não demonstram amplificação pois o carregamento aplicado na análise era puramente vertical, assim estes modos não foram excitados.

Para ambos os casos as FRF's foram geradas de forma coerente, representando com uma maior densidade de pontos as frequências naturais excitadas e através das mesmas foi possível gerar as PSD's de tensão no componente.

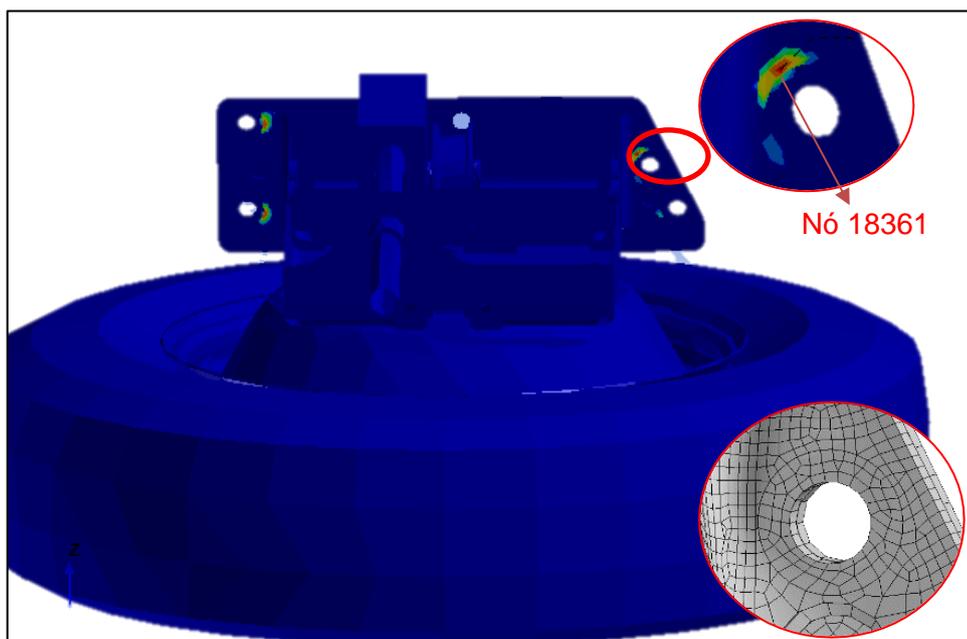
4.2.3 Fadiga

Nesta etapa o cálculo de vida em fadiga foi aplicado sobre o suporte para estepe para as duas condições de estepe, misto com 26 kg e *off-road* com 43 kg, onde os efeitos sobre a vida do componente devido a esta alteração foi comparada para as três classificações de pavimento, gerando assim o total de seis análises.

Para a configuração de máquina previamente descrita foi obtido tempo de aproximadamente 7 minutos para cada análise.

Durante as análises foi determinado o nó crítico, sendo este o nó nº 18361, assim todos os resultados foram apresentados e discutidos sobre este nó. A Figura 38 demonstra a posição do nó crítico, destacando-se a malha nesta região.

Figura 38 – Posição do nó crítico.

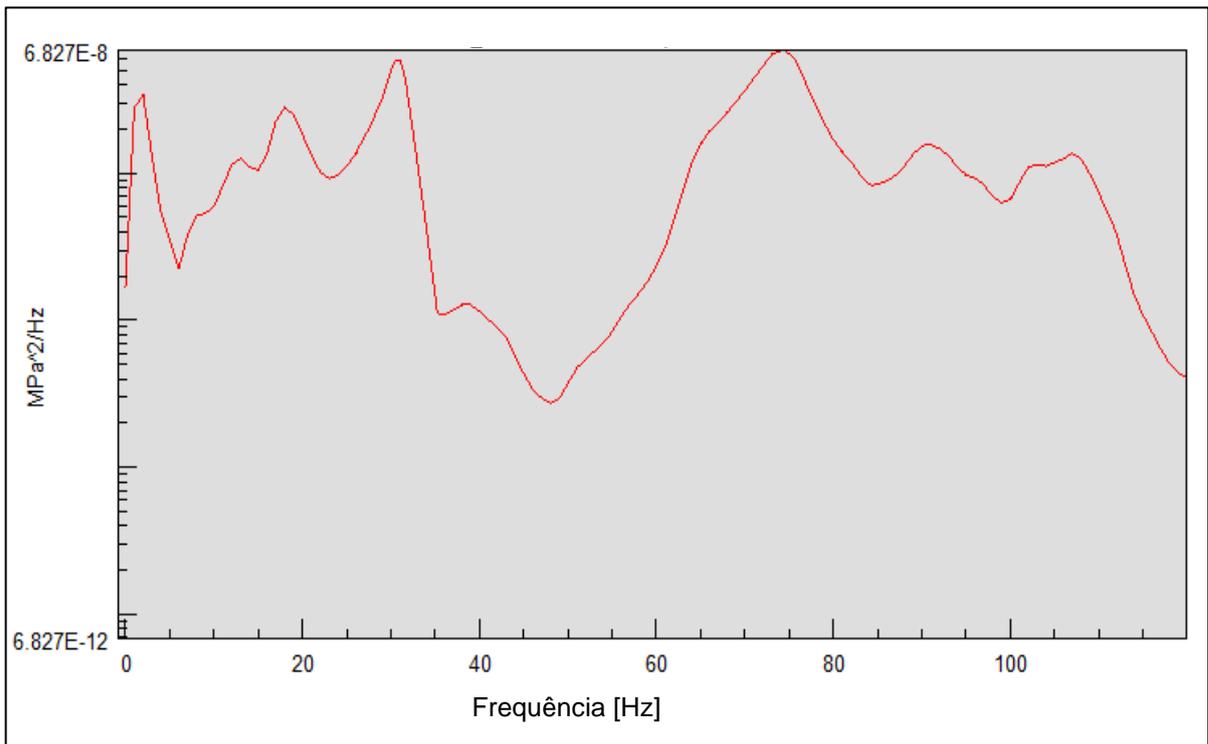


Fonte: Autor (2019).

As Figuras de 39 à 41 demonstram a PSD de tensão no nó crítico para as três condições de pavimento, asfalto, urbano e fora de estrada para o suporte na condição de estepe misto, de menor massa, já as Figuras 42 à 44 demonstram a PSD do mesmo nó, sobre as mesmas pistas, porém para o estepe *off-road*, de maior massa.

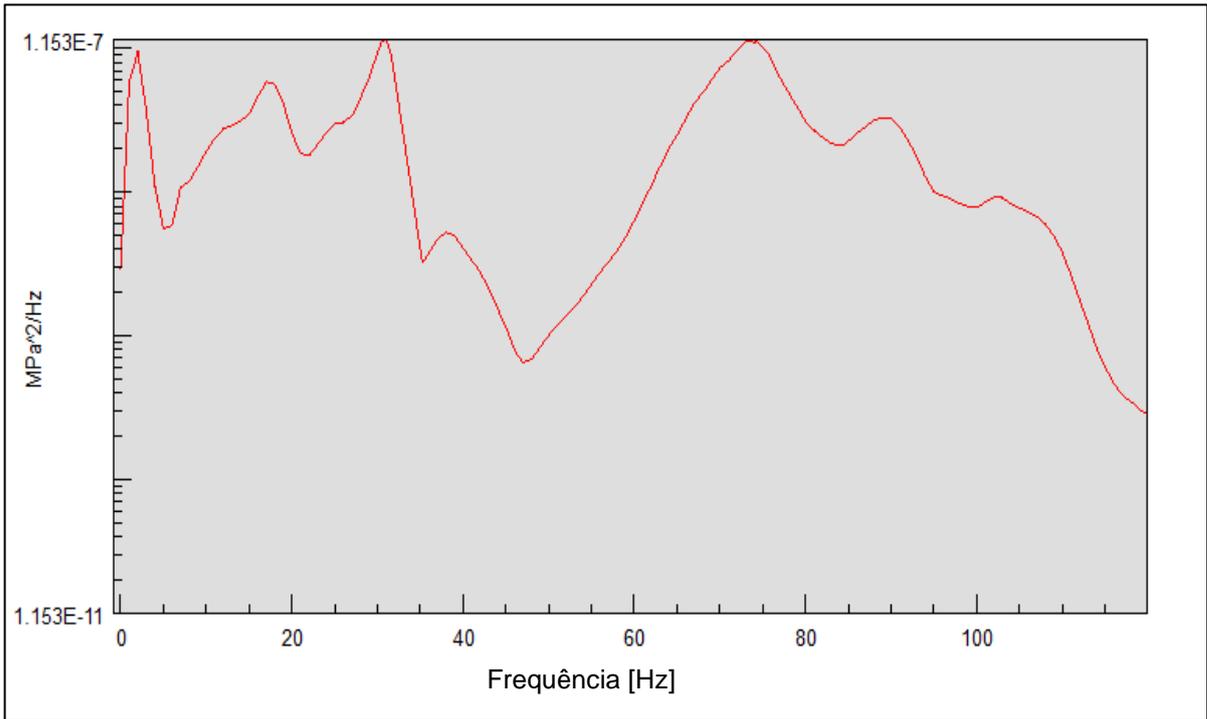
As PSD's de aceleração confirmam que a pista mais agressiva ao componente é a fora de estrada, também evidenciam as ampliações nas frequências naturais de flexão dos componentes.

Figura 39 – PSD de tensão nó crítico - Estepe Misto - Asfalto.



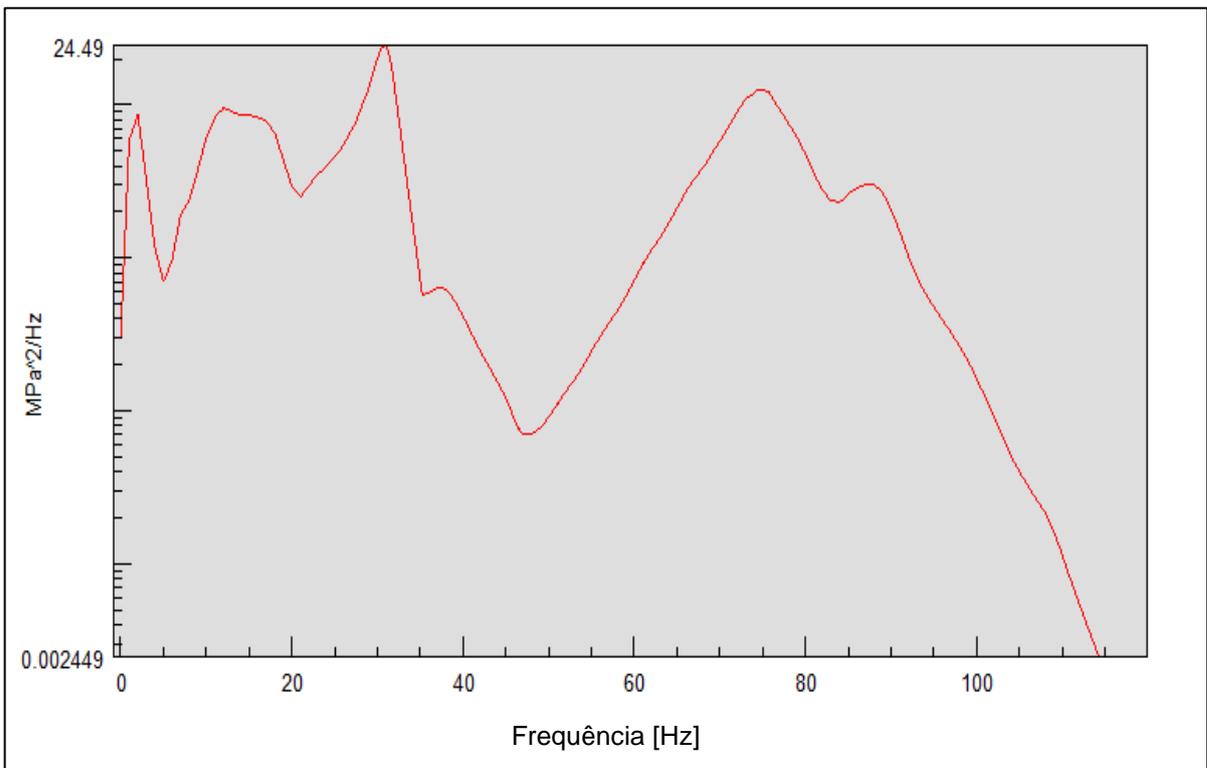
Fonte: Autor (2019).

Figura 40 – PSD de tensão nó crítico - Estepe Misto - Urbano.

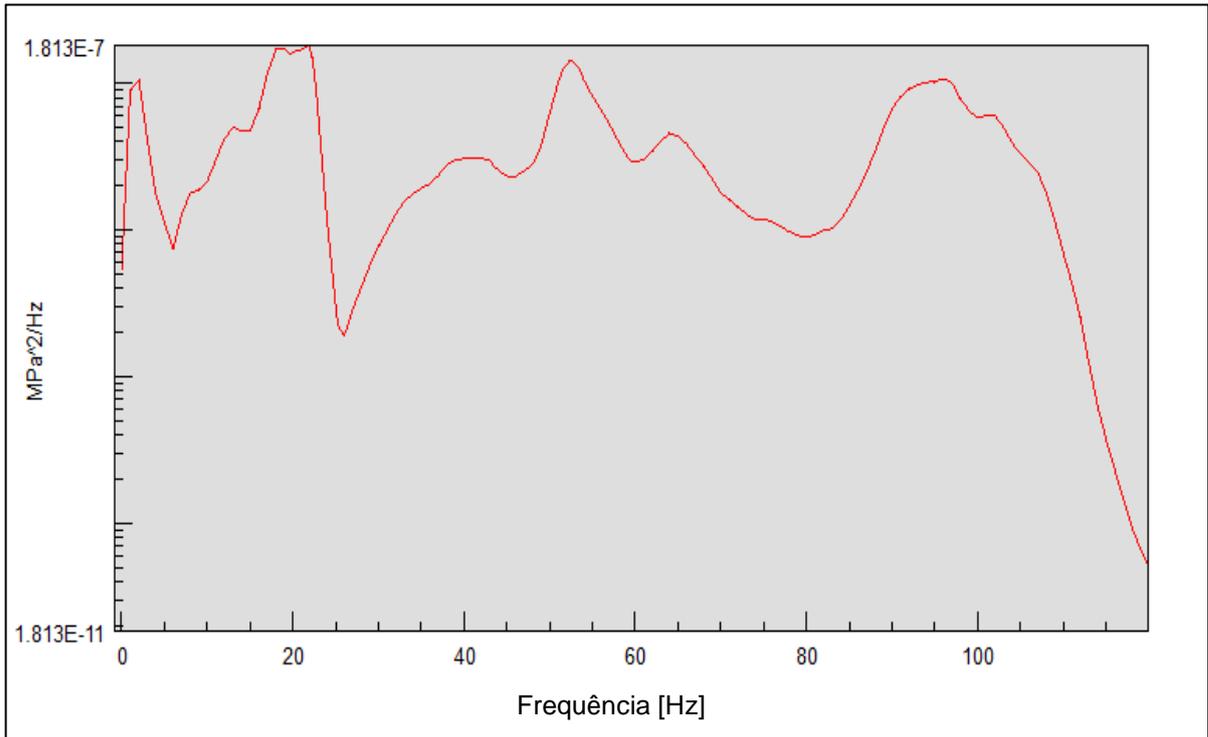


Fonte: Autor (2019).

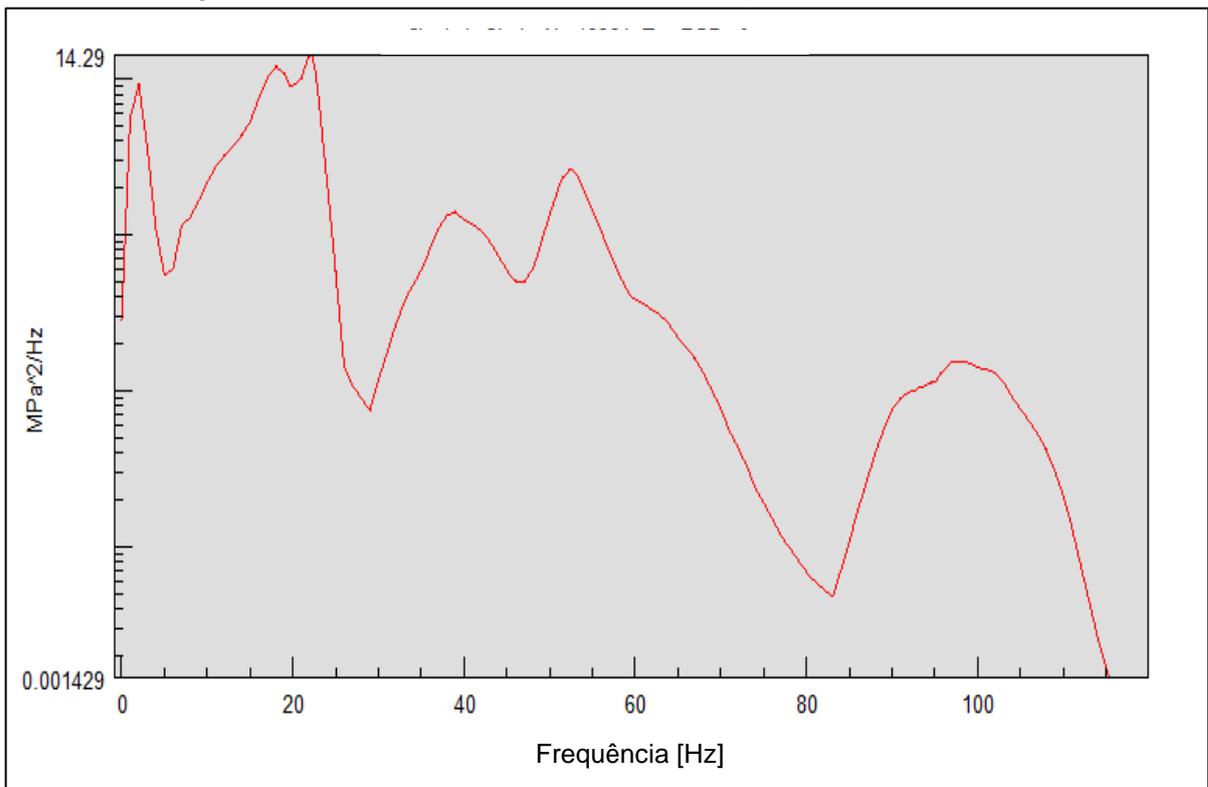
Figura 41 – PSD de tensão nó crítico - Estepe Misto – Fora de estrada.



Fonte: Autor (2019).

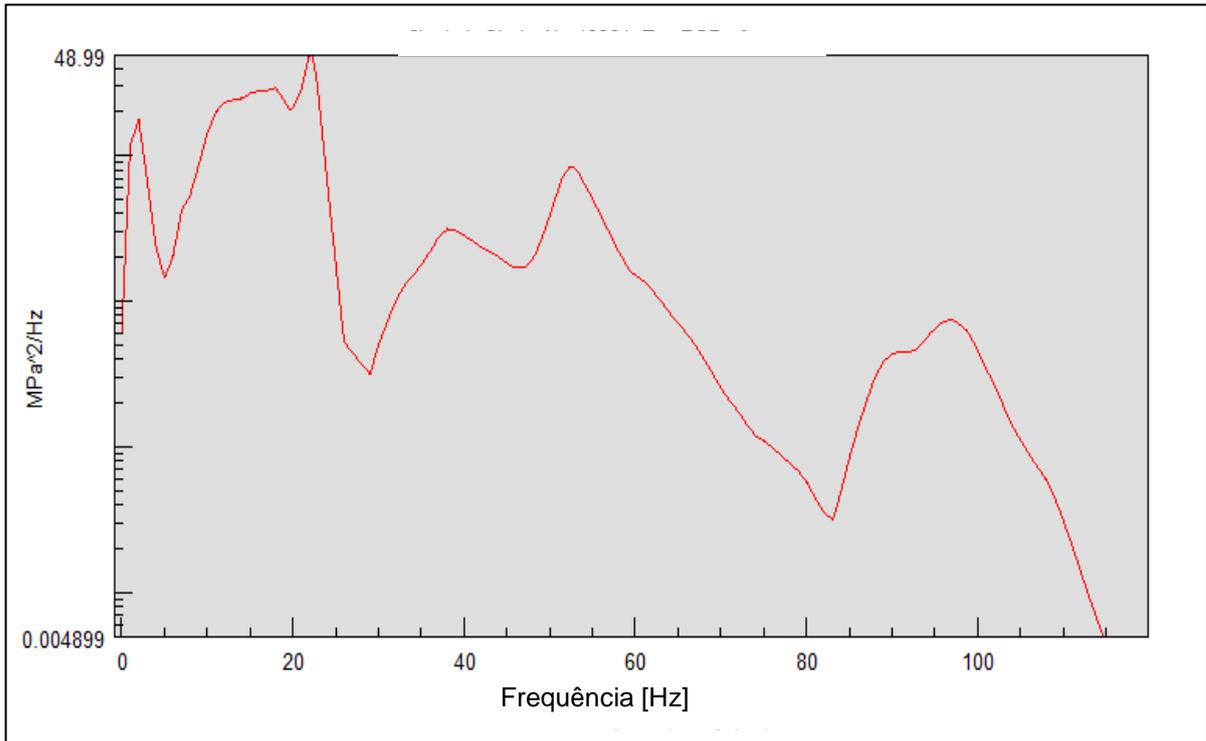
Figura 42 – PSD de tensão nó crítico - Estepe *Off-Road* – Asfalto.

Fonte: Autor (2019).

Figura 43 – PSD de tensão nó crítico - Estepe *Off-Road* – Urbano.

Fonte: Autor (2019).

Figura 44 – PSD de tensão nó crítico - Estepe *Off-Road* – Fora de estrada.



Fonte: Autor (2019).

Os efeitos do aumento da massa no estepe ficam claros quando comparados os as PSD's de tensão fora de estrada, Figuras 41 e 44, ambas demonstram pico de tensão no primeiro modo de vibrar, porém com o dobro de amplitude. O Quadro 10 resume estes valores.

Quadro 10 – Resumo pico de tensão nó crítico fora de estrada.

Pico de tensão	Estepe Misto	Estepe <i>Off-Road</i>	Diferença % na amplitude
Fora de estrada	24, 46 MPa ² /Hz @ 31 Hz	48,99 MPa ² /Hz @ 22 Hz	200%

Fonte: Autor (2019).

O resultado de previsão de vida encontrado para o nó crítico nas seis condições avaliadas estão descritas no Quadro 11. Os valores de repetições de vida indicam quantas vezes o tempo de exposição é suportado até a falha, valores de repetições acima de 1 indicam sobre vida e inferiores falha. De modo a facilitar a relação com o uso do veículo a vida também foi expressa em horas.

Valores de vida infinita indicam as tensões geradas no nó crítico foram muito baixas não gerando dano ao componente.

Quadro 11 – Resumo vida nó crítico.

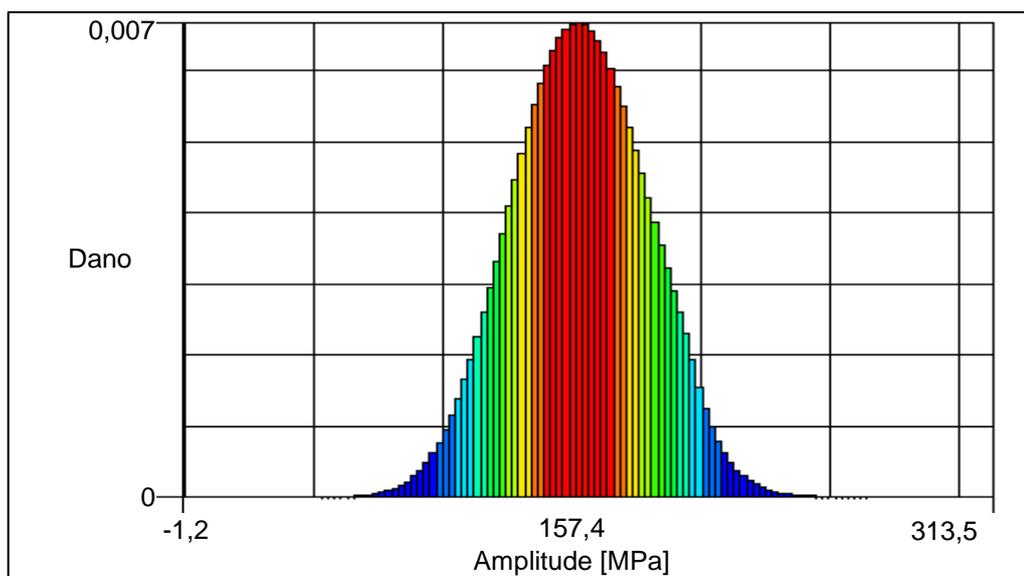
PSD de entrada	Estepe misto			Estepe <i>off-road</i>			Variação %
	Repetições de vida	Vida [Horas]	Vida [Anos]	Repetições de vida	Vida [Horas]	Vida [Anos]	
Asfalto	Infinita	Infinita	Infinita	Infinita	Infinita	Infinita	-
Urbano	Infinita	Infinita	Infinita	Infinita	Infinita	Infinita	-
Fora de estrada	1,7	21.250	17	0,2	2.500	2	850 %

Fonte: Autor (2019).

Com base nos resultados obtidos de estimativa de vida pra o nó crítico, fica novamente evidente a maior agressividade da pista fora de estrada para o conjunto de porta estepe, para a condição com o estepe misto o conjunto apresentou uma sobrevida de 70% já para a condição com estepe *off-road*, de maior massa, o conjunto indicou previsão de falta com 20% da vida.

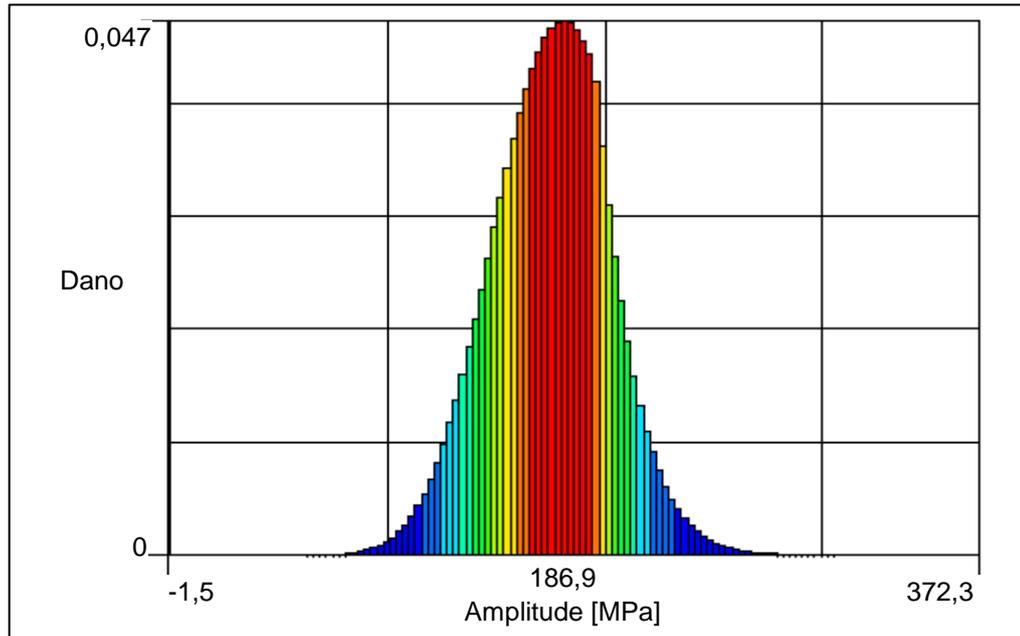
De forma exemplificar as principais tensões que geram dano, as Figuras 45 e 46 demonstram o histograma de tensão por dano para as duas condições de estepe para o pavimento fora de estrada.

Figura 45 – Histograma Tensão *versus* Dano - Estepe Misto – Fora e estrada.



Fonte: Autor (2019).

Figura 46 – Histograma Tensão versus Dano - Estepe *Off-road* – Fora e estrada.



Fonte: Autor (2019).

O Quadro 12 resume a maior relação tensão-dano com base nas figuras 45 e 46.

Quadro 12 – Pico da relação tensão dano, nó crítico, fora de estrada.

Pista	Estepe Misto		Estepe <i>Off-Road</i>	
	Tensão [MPa]	Dano	Tensão [MPa]	Dano
Fora de estrada	157,4	0,007	186,9	0,047

Fonte: Autor (2019).

5 CONCLUSÕES

Os objetivos gerais e específicos do presente trabalho foram atingidos, iniciando-se pelo estudo das características e condições para o uso da teoria de fadiga espectral em sinais aleatórios, o estudo de caso desde a coleta dos sinais de aceleração, a verificação da qualidade deles, a verificação de suas características aleatórias e finalmente aplicação o conceito de fadiga no domínio da frequência sobre o componentes proposto.

5.1 Aquisição dos dados e qualidade dos sinais

A coleta de dados foi realizada de forma satisfatória, onde foi verificada a importância da correta utilização da taxa de aquisição, levando-se em consideração o Teorema de Nyquist ou Teorema de Amostragem, outro ponto importante na aquisição de dados aleatórios é a definição do filtro de *anti-aliasing*, este tem função de evitar distorções no espectro coletado.

A conversão de sinais aleatórios analógicos em sinais digitais implica no possível surgimento de anomalias nos sinais digitais coletados, estas falhas estão principalmente relacionadas a qualidade dos equipamentos e da instrumentação realizada, para os sinais utilizados neste trabalho foram realizadas verificações sobre estes sinais e os mesmos não apresentaram falhas para a faixa de interesse.

5.2 Análise estatística dos sinais coletados

Após a certificação da qualidade dos sinais coletados, foram aplicados cálculos estatísticos sobre os mesmos e constatado que os sinais coletados atendem aos critérios de estacionariedade e ergodicidade, estas condições são de extrema importância para a aplicação de fadiga espectral, pois as mesmas garantem que somente um trecho medido pode representar a vida toda do componente.

A principal constatação durante a realização dos cálculos foi o efeito de fenômenos determinísticos, neste caso a condição de veículo parado foi facilmente verificada no cálculo da autocorrelação dos sinais, e por isso para os resultados apresentados estes trechos de veículo parado foram eliminados.

Resultados coerentes para o cálculo de autocorrelação foram obtidos com grande quantidade de amostras, por se tratar de dados digitais, ou seja, a amostragem é limitada à taxa de aquisição. Foi verificado que a autocorrelação diverge quando aplicada com

espaçamento inferior metade da frequência de aquisição, indicando a relação da mesma com a teoria de amostragem e a lei de Nyquist.

A média de todos os sinais coletados se manterão constantes, esse fenômeno se deve a posição de repouso do sistema e da tendência de ele retornar a este estado.

Outra constatação importante foi a classificação das gravações por perfil de pista, a importância desta divisão fica explícita no cálculo do desvio padrão, sendo eles 0,09 g para o asfalto, 0,14 g para os trechos urbanos e 0,26 g para o trecho fora de estrada. O desvio padrão deixa evidente a diferença de agressividade entre os trechos. Outro indicativo dessas diferenças são a amplitude máxima de: 1,3 g para trechos de asfalto, 1,6 g para trechos urbanos e 3 g para trechos fora de estrada.

5.3 Conversão dos sinais temporais para o domínio da frequência

A geração dos espectros de aceleração foi necessária para obter os sinais de entrada na análise de fadiga, o método aplicado utiliza a PSD de aceleração gerada através do uso da FFT.

Para gerar a FFT de longos sinais temporais é necessário dividir os mesmos em trechos que posteriormente são unidos, porém o corte efetuado pela divisão do sinal temporal implica no vazamento espectral, para minimizar este efeito o uso de janelamentos é aplicado. O objetivo do janelamentos é suavizar o início e o final do sinal em cada divisão, esta suavização do sinal implica na perda de amplitude do sinal, uma das formas de reduzir este efeito é o uso da sobreposição das janelas, o janelamentos aplicado a este trabalho foi o Hanning e para manter a mesma área de janelamentos foi aplicado uma sobreposição de 66,7% entre janelas.

5.4 Estimativa da Vida em Fadiga

Atendendo ao principal objetivo do trabalho a análise de vida em fadiga no domínio da frequência foi realizada obtendo-se a estimativa de vida comparativa entre os dois modelos de estepe, misto e *off-road*, quando submetidos a excitação das PSD's de aceleração geradas pela aplicação do veículo sobre três pavimentos: asfalto, urbano e fora de estrada.

A primeira conclusão se refere as frequências naturais e modos de vibrar, no qual a alteração na massa do conjunto de estepe refletiu no caimento das frequências naturais, porém mantendo os mesmos modos de vibrar.

A segunda conclusão está relacionada a agressividade dos pavimentos, em que a via fora de estrada mostrou os maiores valores de amplitude desde as análises estatísticas dos sinais temporais até a geração das PSD's de aceleração, e por fim foi único pavimento que gerou dano expressivo ao componente.

Portanto conclui-se que a alteração do modelo de pneu misto para o *off-road* implica na redução drástica da vida do componente quando o mesmo é submetido ao uso em pavimentos fora de estrada. Assim, para a implementação desse modelo de pneu se faz necessário ajustes no projeto com o intuito de aumentar sua vida, podendo ser a alteração para materiais mais nobres. Entretanto o mais indicado são soluções que visem aumentar a frequência natural do conjunto, como o uso de maiores espessuras nas chapas estruturais.

Em resumo, o aumento de 167% na massa do estepe refletiu em: redução de 72% na primeira frequência natural; aumento de 200% no pico energia na PSD de tensão do nó crítico; e redução de 800% na vida do componente. Essa variação na vida não se deve somente ao fato da alteração na massa do componente, mas principalmente na redução da frequência natural do suporte, aproximando-a das principais frequências de excitação.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para futuros trabalhos, propõem-se o estudo e a realização da calibração do modelo numérico em elementos finitos através da análise modal experimental, e a posterior realização de um ensaio em bancada, replicando as excitações, com objetivo de validar o cálculo de estimativa de vida em fadiga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: A base da tecnologia cae: Análise dinâmica**. 1^a Edição ed. São Paulo: Érica, 2005.
- BENDAT, J. S.; PIERSOL, A. G. **Random Data: Analysis and Measurement Procedures**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2011.
- BERHANU, G. **Vibration Durability Testing and Design Validation Based on Narrow Frequency Band**, 2011.
- BIRKHOFF, G. D. What is the Ergodic Theorem? **The American Mathematical Monthly**, v. 49, n. 4, p. 222, abr. 1942.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. Vol. VIII ed. United States of America: McGraw-Hill Companies, 2006.
- CESÁRIO, A. A. et al. Coupled FE Spectral Analyses - Random Fatigue Calculation Methodology for Semi-Trailer. **SAE Brasil-Sociedade de Engenharia da Mobilidade**, p. 1–7, 2011.
- CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2017** – Disponível em: <[http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br//Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20\(2017\)%20-%20ALTA.pdf](http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br//Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20(2017)%20-%20ALTA.pdf)> Acesso em: 22 de agosto de 2018.
- CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Boletim estatístico – 05 - 2018** – Disponível em: <<http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/BOLETIM%20ESTAT%3%8DSTICO/BOLETIM%20ESTAT%3%8DSTICO%202017/Boletim%20Estat%3%ADstico%20-%2012%20-%202017.pdf>> Acesso em: 22 de agosto de 2018.
- DE MORAIS TEIXEIRA, G. et al. Random Vibration Fatigue: Frequency Domain Critical Plane Approaches. **Volume 9: Mechanics of Solids, Structures and Fluids**, p. V009T10A095, 2013.
- DOURADO, M.; MEIRELES, J. Obtenção de um modelo de elementos finitos simplificado para representação de juntas rebitadas em análise dinâmica de estruturas usando uma ferramenta de updating. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, v. 32, n. 3, p. 173–180, jul. 2016.
- DOWLING, N. E. **Comportamento Mecânico dos Materiais**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.
- ERIKSSON, Å., LIGNELL, A. M., OLSSON, C., & SPENNARE, H. **Weld evaluation using FEM: a guide to fatigue-loaded structures**: Industrilitteratur, 2003
- FREDRIK, V.; HOLM, S.; LINGJAERDE, O. C. Spectral Moments and Time Domain Representation of Photoacoustic Signals used for Detection of Crude Oil in Produced Water. **University of Oslo**, 2001.
- HALFPENNY, A. Accelerated vibration testing based on fatigue damage spectra. **White paper, nCode International, www. ncode. com**, 2006.

HALFPENNY, A. A Frequency Domain Approach for Fatigue Life Estimation from Finite Element Analysis. **Key Engineering Materials**, v. 167–168, p. 401–410, 1999.

LEE, Y. et al. **Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice)**. USA: Elsevier Butterworth-Heinemann Publications, 2005.

TEIXEIRA, G. et al. Efficient Frequency Domain Fatigue Approaches for Automotive Components. **International Fatigue Conference**, 2017.

TEIXEIRA, G. M. Random Vibration Fatigue - A Study Comparing Time Domain and Frequency Domain Approaches for Automotive Applications. **SAE Technical Paper**, 2014.

TEIXEIRA, G. M. **Fatigue of Metals : Failure and Success Fatigue of Metals**, 2017.

THORBY, D. **Structural Dynamics and Vibration in Practice**. First edit. USA: Elsevier, 2008.

APÊNDICE A – MOMENTOS ESPECTRAIS

Desvio padrão:

$$\sigma = \sqrt{M_0}$$

Expectativa de número de picos:

$$E(P) = \sqrt{\frac{M_1}{M_2}}$$

Número esperado de cruzamento zero:

$$E(P) = \sqrt{\frac{M_2}{M_0}}$$

Fator de irregularidade:

$$\gamma = \sqrt{\frac{M_2^2}{M_0 M_4}}$$

Frequência média:

$$x_m = \frac{M_1}{M_0} \sqrt{\frac{M_2^2}{M_0 M_4}}$$

onde: M_0 , M_1 , M_2 e M_4 são os momentos espectrais extraídos da PSD avaliada;

APÊNDICE B – VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DA PDF DE UMA PSD

$$Z = \frac{S_r}{2\sqrt{M_0}}$$

$$D_1 = \frac{2(x_m - \gamma^2)}{1 + \gamma^2}$$

$$x_m = \frac{M_1}{M_0} \sqrt{\frac{M_2}{M_4}}$$

$$D_2 = \frac{1 - \gamma - D_1 + D_1^2}{1 - R}$$

$$D_3 = 1 - D_1 - D_2$$

$$R = \frac{\gamma - x_m - D_1^2}{1 - \gamma - D_1 + D_1^2}$$

$$Q = \frac{1,25(\gamma - D_3 - D_2 R)}{D_1}$$

$$E[P] = \sqrt{\frac{M_4}{M_2}}$$

onde: M_0, M_1, M_2 e M_4 são os momentos espectrais extraídos da PSD avaliada;

S_r é a tensão limite de fadiga do material avaliado

X_m é a frequência média;

γ é o fator de irregularidade.

APÊNDICE C – CLASSIFICAÇÃO VISUAL DOS PAVIMENTOS COLETADOS

Via pavimentada com asfalto:



Fonte: Autor (2019).

Via não pavimentada de chão batido:



Fonte: Autor (2019).

Urbano:



Fonte: Autor (2019).

APÊNDICE D – RESUMO E CLASSIFICAÇÃO DAS COLETAS

Resumo das gravações.

Gravação	Tempo [h:m:s]	Distância [km]	Velocidade média [km/h]¹	Classificação visual da via
1	00:40:13	53,4	79,6	Asfalto
2	00:17:11	24,3	84,7	Asfalto
3	00:34:30	20,0	34,8	Estrada de chão
4	00:36:14	14,0	22,6	Estrada de chão
5	00:17:22	12,3	42,5	Estrada de chão
6	00:09:09	2,73	17,9	Estrada de chão
7	00:38:39	25,9	40,2	Estrada de chão
8	00:36:44	44,9	73,4	Asfalto
9	00:26:00	33,0	76,1	Asfalto
10	00:37:28	42,4	67,8	Asfalto
11	00:17:19	18,9	65,6	Urbano
12	00:35:47	19,9	18,3	Urbano
13	00:45:49	17,1	22,4	Urbano
14	00:06:18	2,5	23,9	Urbano
15	00:22:13	5,4	14,1	Asfalto
16	00:40:48	53,4	78,6	Asfalto
17	00:37:59	36,6	57,7	Asfalto
18	00:14:31	9,1	37,6	Asfalto
19	00:13:00	6,1	28,0	Urbano

Fonte: Autor (2019)

(1) Velocidade média do veículo em movimento, paradas foram descontadas.

APÊNDICE E – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS SINAIS TEMPORAIS UNIDOS

Seguem tabelas e posteriores gráficos dos valores de média e desvio padrão obtidos sobre os sinais temporais unidos conforme classificação de pavimento.

ASFALTO

Medida	Total	Trecho								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Média [g]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Desvio Padrão [g]	0,09	0,08	0,09	0,08	0,09	0,08	0,09	0,09	0,11	0,12

Fonte: Autor (2019).

URABANO

Medida	Total	Trecho		
		1	2	3
Média [g]	1,00	1,00	1,00	1,00
Desvio Padrão [g]	0,14	0,13	0,13	0,15

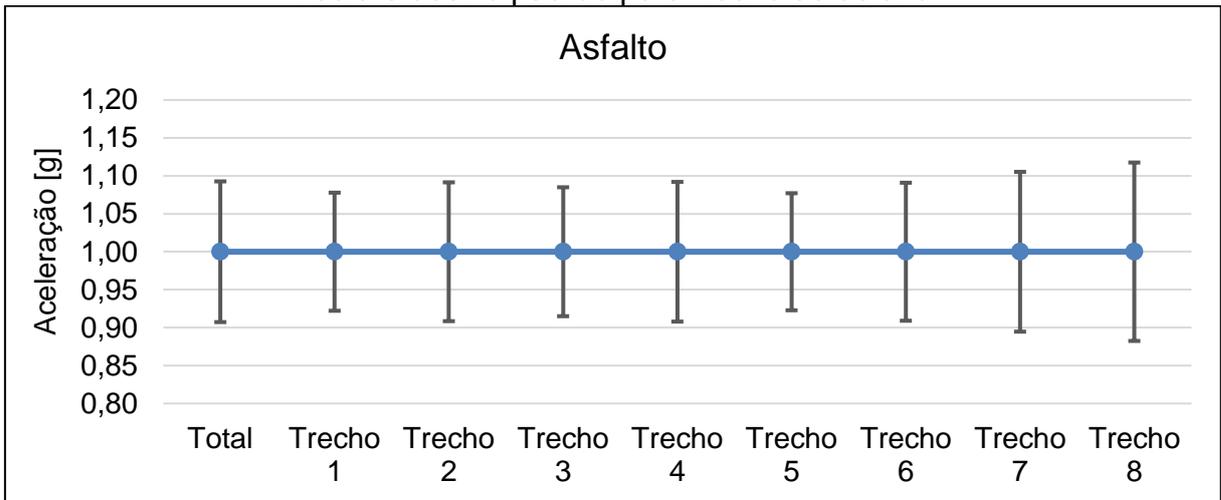
Fonte: Autor (2019).

FORA DE ESTRADA

Medida	Total	Trecho			
		1	2	3	4
Média [g]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Desvio Padrão [g]	0,26	0,25	0,22	0,26	0,28

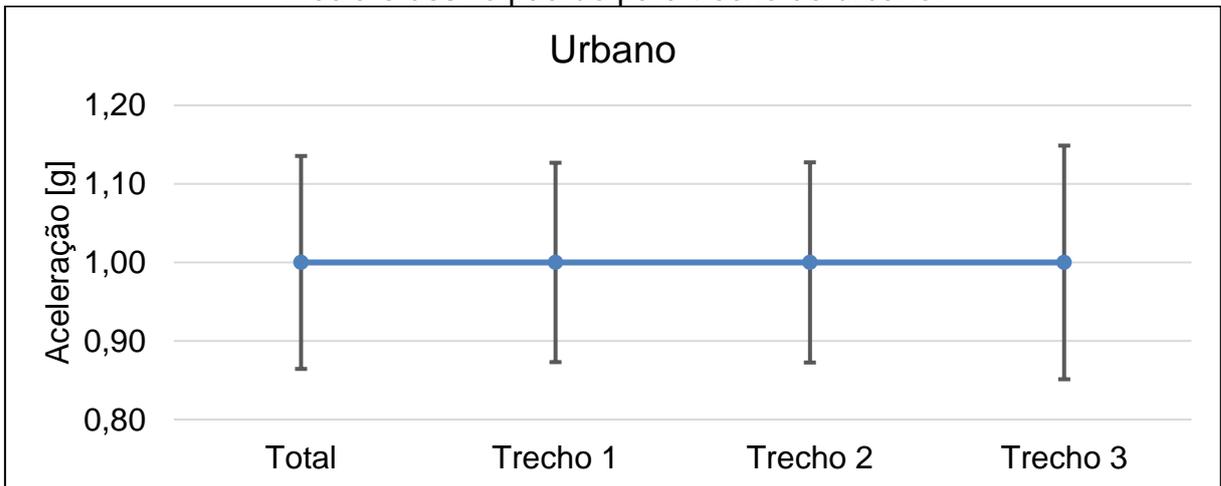
Fonte: Autor (2019).

Média e desvio padrão para trecho de asfalto.



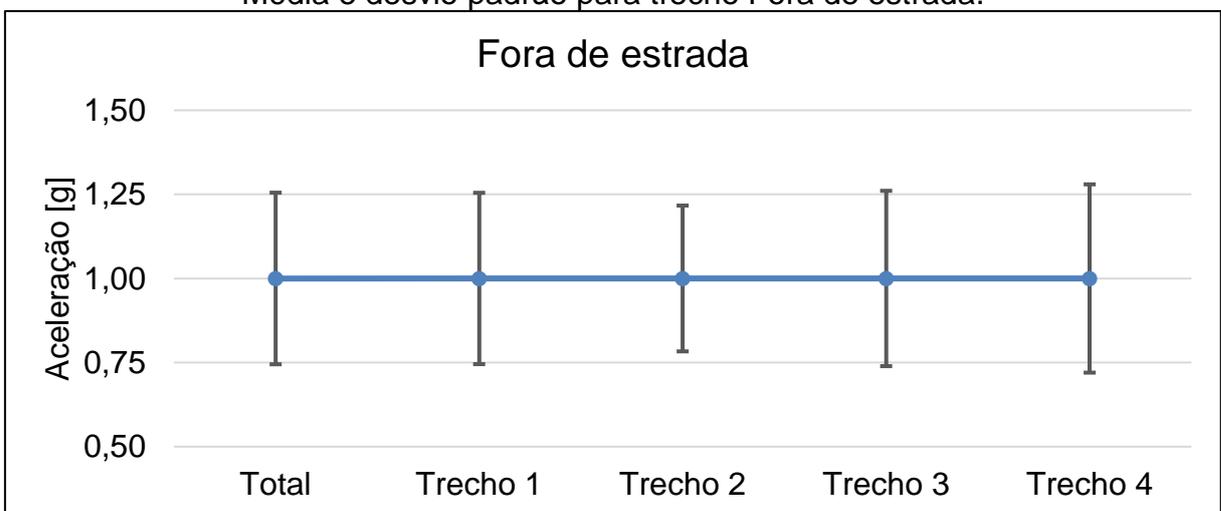
Fonte: Autor (2019).

Média e desvio padrão para trecho de urbano.



Fonte: Autor (2019).

Média e desvio padrão para trecho Fora de estrada.



Fonte: Autor (2019).

APÊNDICE F – RESULTADOS AUTOCORRELAÇÃO

Autocorrelação trechos de asfalto.

Espaçamento τ [segundos]	Divisões por trecho	Divisões totais	AUTOCORRELAÇÃO Rxx [g ²] - Asfalto								
			TRECHO								TOTAL
			1	2	3	4	5	6	7	8	
900	2	16	0,998	1,212	0,860	1,036	1,044	0,985	1,046	0,860	0,990
360	5	40	1,081	1,026	0,957	1,016	1,107	1,043	0,962	0,944	0,999
180	10	80	1,022	1,130	1,029	0,998	1,065	0,985	0,940	0,924	0,998
120	15	120	0,998	0,964	1,021	0,904	1,027	1,023	1,030	0,956	0,986
60	30	240	1,025	1,041	1,037	0,924	1,026	0,990	1,017	0,936	0,993
30	60	480	1,006	1,037	1,002	0,978	0,990	0,994	1,014	1,010	0,999
15	120	960	1,001	1,018	1,011	1,002	0,999	1,003	1,015	1,015	1,002
10	180	1440	0,997	1,025	1,001	1,003	0,997	1,013	1,025	0,997	1,004
5	360	2880	0,989	1,013	1,001	1,012	0,998	1,008	1,019	0,999	1,002
2,5	720	5760	0,991	1,006	0,997	1,008	1,001	1,005	1,011	0,998	1,002
1	1800	14400	0,994	1,005	1,002	1,003	0,997	1,003	1,004	1,002	1,001
0,5	3600	28800	0,995	1,001	1,000	1,004	0,996	1,004	0,999	0,995	1,000
0,25	7200	57600	0,998	0,999	1,000	1,003	0,998	1,001	1,003	0,995	1,000
0,125	14400	115200	0,999	0,999	1,002	1,002	1,000	1,001	1,001	0,997	1,000
0,0625	28800	230400	1,001	1,001	1,002	1,003	1,001	1,002	1,002	1,001	1,002
0,03125	57600	460800	1,001	1,000	1,001	1,000	1,001	1,001	1,000	0,998	1,000
0,015625	115200	921600	1,001	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	1,000	1,000
0,0078125	230400	1843200	1,002	1,003	1,003	1,003	1,002	1,001	1,003	1,005	1,003
0,00390625	460800	3686400	0,731	0,732	0,732	0,733	0,731	0,730	0,732	0,733	0,732

Fonte: Autor(2019).

Autocorrelação trechos fora de estrada.

			AUTOCORRELAÇÃO Rxx [g ²] - Fora de estrada				
Espaçamento τ [segundos]	Divisões por trecho	Divisões totais	TRECHO 1	TRECHO 2	TRECHO 3	TRECHO 4	TOTAL
900,00	2	8	0,391	0,565	0,730	0,718	0,601
360,00	5	20	1,092	0,699	0,726	1,094	0,903
180,00	10	40	0,860	0,832	0,840	1,137	0,917
120,00	15	60	1,034	0,851	0,804	0,838	0,882
60,00	30	120	0,898	0,914	0,941	0,912	0,916
30,00	60	240	0,973	0,915	1,001	0,930	0,955
15,00	120	480	0,989	0,951	1,023	0,976	0,985
10,00	180	720	0,989	1,039	0,965	0,971	0,991
5,00	360	1440	0,991	1,037	0,993	0,980	1,000
2,50	720	2880	1,016	1,046	0,979	0,995	1,009
1,00	1800	7200	0,989	1,006	1,017	0,987	1,000
0,5	3600	14400	0,995	1,008	1,011	1,001	1,004
0,25	7200	28800	0,993	0,995	1,003	0,998	0,997
0,125	14400	57600	1,000	1,003	1,004	1,005	1,003
0,0625	28800	115200	1,010	1,014	1,016	1,008	1,012
0,03125	57600	230400	0,991	1,001	0,996	0,987	0,994
0,015625	115200	460800	1,004	1,009	1,002	1,000	1,004
0,0078125	230400	921600	1,027	1,027	1,025	1,027	1,027
0,00390625	460800	1843200	0,760	0,756	0,755	0,764	0,759

Fonte: Autor(2019).

Autocorrelação trechos de urbano.

AUTOCORRELAÇÃO PARALELEPÍPEDO Rxx [g²]						
Espaçamento τ [segundos]	Divisões por trecho	Divisões totais	TRECHO 1	TRECHO 2	TRECHO 3	TOTAL
900	2	6	0,820	0,525	1,038	0,794
360,0	5	15	0,957	1,156	1,071	1,062
180,0	10	30	0,934	0,966	1,086	0,995
120,0	15	45	0,958	0,985	1,060	1,001
60,0	30	90	0,984	0,978	1,065	1,009
30,0	60	180	1,028	1,007	1,034	1,023
15,0	120	360	1,006	1,012	0,996	1,005
10,0	180	540	1,009	0,997	1,018	1,008
5,0	360	1080	1,009	0,993	1,002	1,001
2,5	720	2160	1,007	1,005	1,005	1,006
1,0	1800	5400	1,009	0,995	1,005	1,003
0,5	3600	10800	1,004	1,000	1,001	1,001
0,25	7200	21600	0,994	0,997	0,992	0,994
0,125	14400	43200	0,999	0,999	0,997	0,998
0,0625	28800	86400	1,002	1,002	1,003	1,002
0,03125	57600	172800	1,000	1,001	1,000	1,000
0,0156250	115200	345600	1,002	1,002	1,001	1,002
0,0078125	230400	691200	1,007	1,008	1,010	1,008
0,00390625	460800	1382400	0,738	0,736	0,737	0,737

Fonte: Autor(2019).