



**INFLUÊNCIA DO TEMPO DE MONITORAÇÃO DA
AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO EÓLICA SOBRE A
PREVISÃO DA VIDA À FADIGA DE CABOS
CONDUTORES**

Paulo César de Sousa Santos

**Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-graduação em
Integridade de Materiais da Engenharia**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**Faculdade UnB Gama - FGA
Departamento de Engenharia Mecânica**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UNB GAMA - FGA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**INFLUÊNCIA DO TEMPO DE MONITORAÇÃO DA
AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO EÓLICA SOBRE A
PREVISÃO DA VIDA À FADIGA DE CABOS
CONDUTORES**

Paulo César de Sousa Santos

Orientador: Jorge Luiz de Almeida Ferreira, Dr. Univ (ENM/ UnB)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PUBLICAÇÃO: ENM.DM - 54A/2018

BRASÍLIA/DF: 15 de dezembro de 2017

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA.**

**Influência do Tempo de Monitoração da Amplitude de Vibração
Eólica sobre a Previsão da Vida a Fadiga de Cabos Condutores**

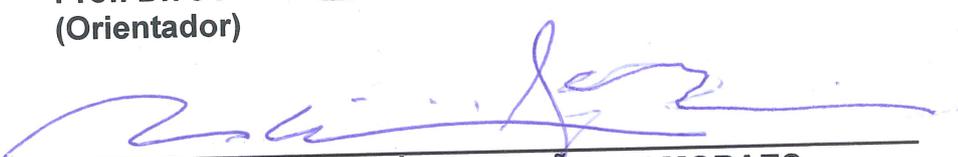
PAULO CÉSAR DE SOUSA SANTOS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA DA
FACULDADE GAMA E FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE
DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA
ENGENHARIA.**

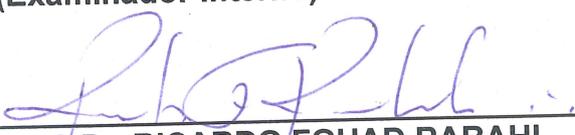
APROVADA POR:



Prof. Dr. JORGE LUIZ DE ALMEIDA FERREIRA
(Orientador)



Prof. Dr. MARCUS VINÍCIUS GIRÃO DE MORAES
(Examinador Interno)



Prof. Dr. RICARDO FOUAD RABAHE
(Examinador Externo)

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, P. C. S.

Influência do tempo de monitoração da amplitude de vibração eólica sobre a previsão da vida à fadiga de cabos condutores

[Distrito Federal] 2017.

xvii, 84p. (FGA/FT/UnB, Mestre, Programa de Pós-graduação em Integridade de Materiais da Engenharia, 2017.

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.

Faculdade UnB Gama - FGA.

Departamento de Engenharia Mecânica.

Palavras-chave:

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Linha de transmissão | 2. Cabos Condutores |
| 3. Previsão de Vida em Fadiga | 4. Método Rainflow e Palmgren-Miner |
| I. FGA/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Santos, P. C. S.(2017). Influência do tempo de monitoração da amplitude de vibração eólica sobre a previsão da vida à fadiga de cabos condutores. Dissertação de Mestrado, Publicação ENM.DM - 54A/2018, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, xvii, 84p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Paulo César de Sousa Santos.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Influência do tempo de monitoração da amplitude de vibração eólica sobre a previsão da vida à fadiga de cabos condutores.

GRAU / ANO: MESTRE / 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação Mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Paulo César de Sousa Santos

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus.

Ao meu orientador Jorge Luiz de Almeida Ferreira, pela orientação, apoio e amizade construída ao longo dessa jornada.

Ao Instituto Federal de Goiás, instituição em que trabalho e que sempre me apoiou na elaboração desta dissertação.

Às amigas construídas na Universidade de Brasília, Miele, Remy, Marcus e Pedro, colegas que sempre estiveram dispostos a ajudar.

E por fim aos meus pais Antônio e Rosa, que sempre me incentivaram nessa jornada, juntamente com a minha companheira Tatianne e meus filhos Danilo e Gabriele, que tiveram a compreensão e aceitação dos momentos de ausência para que fosse possível a realização deste trabalho. Sou extremamente agradecido a vocês.

À todos aquele que de forma direta e indireta contribuíram para a conclusão deste trabalho.

*À minha esposa Tatianne e
aos meus filhos Danilo e Gabriele,
com muito amor.*

Resumo

Influência do tempo de monitoração da amplitude de vibração eólica sobre a previsão da vida à fadiga de cabos condutores

Autor: Paulo César de Sousa Santos

Orientador: Jorge Luiz de Almeida Ferreira, Dr. Univ (ENM/ UnB)

Programa de Pós Graduação em Programa de Pós-graduação em Integridade de Materiais da Engenharia

Brasília, 15 de dezembro de 2017

Os cabos condutores estão sujeitos a carregamentos aleatórios devido à ação dos ventos, o que acelera o seu desgaste mecânico e o leva a romper por fadiga. O objetivo principal deste trabalho é avaliar o tempo adequado de monitoração de um cabo condutor de modo a garantir que a sua estimativa de vida tenha a máxima exatidão. As previsões foram feitas com informações obtidas de testes experimentais realizados no laboratório de cabos da Universidade de Brasília. Foram coletadas informações de sete ensaios diferentes, mas todos tendo como critério de falha a quebra do primeiro fio de alumínio, em particular, do cabo CAA 397,5MCM-IBIS. Realizou-se uma análise computacional utilizando o *software* Matlab sobre estes ensaios experimentais, para se gerar numericamente sinais aleatórios que representem a amplitude de deslocamento para se realizar a predição de vida em fadiga com uma análise no domínio do tempo, utilizando-se os métodos Rainflow e Palmgren-Miner. Para a geração do sinal aleatório faz-se necessário a coleta de dados de entrada obtidos a partir dos resultados experimentais, são eles: o tempo de duração do sinal, a frequência dominante, a largura de banda e o valor RMS. Uma grande vantagem do estudo é a possibilidade de se diminuir a quantidade de dados gravados para se realizar a previsão de vida à fadiga.

Palavras-chaves: Linha de transmissão; Cabos Condutores; Previsão de Vida em Fadiga; Método Rainflow e Palmgren-Miner.

Abstract

INFLUENCE OF THE MONITORING TIME OF THE WIND VIBRATION ON THE PREDICTION OF LIFE TO THE FATIGUE OF CONDUCTIVE CABLES

Author: Paulo César de Sousa Santos

Supervisor: Jorge Luiz de Almeida Ferreira, Dr. Univ (ENM/ UnB)

Post-graduated Program in Materials Integrity

Brasília, 2017

Overhead conductors are subjected to random loads due to the wind actions which accelerate their mechanical wear and there after cause fatigue. The main objective of this work is to evaluate the monitoring time of a conductor in order to guarantee that its life estimate has the maximum accuracy. The predictions were made using information obtained from experimental tests carried out in the cable laboratory at the University of Brasília. Data from seven different tests, made on an ACSR 397.5 MCM-IBIS were collected. The failure criteria considered was the first aluminum wire to break for all tests. A computational analysis was performed using the Matlab software and the experimental data to numerically generate random signals that represent the displacement amplitude to perform the fatigue life prediction by mean of the time domain analysis, such as Rainflow and Palmgren-Miner methods. To generate the random signal, it is necessary to collect input data obtained from the experimental results: time of signal duration, dominant frequency, bandwidth and the RMS value. A great advantage of this study is the possibility of reducing the amount of data recorded to perform the life expectancy to the fatigue.

Key-words: Transmission line; overhead conductor; fatigue life prediction; Rainflow and Palmgren-Miner Methods.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização Temática	2
1.2	Revisão Bibliográfica	3
1.3	Objetivos	5
1.4	Metodologia	5
1.5	Divisão do Trabalho	5
2	FADIGA	6
2.1	Introdução	6
2.2	Etapas e classificação da fadiga	6
2.3	Cabo Condutor	9
2.3.1	Grampo de Suspensão	10
2.3.2	Excitação eólica nos cabos	10
2.4	Fretting	11
2.5	Carregamento Randômico	13
2.6	Previsão de Fadiga	15
2.6.1	Vibrógrafo	15
2.6.2	Teoria de Acúmulo de Dano – Regra de Miner	17
2.7	Método Rainflow de contagem de ciclos	19
2.8	Método previsão de vida	23
2.8.1	Domínio da Frequência	23
2.8.2	Domínio do Tempo	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	Análise Experimental	25
3.2	Análise Computacional	28
4	RESULTADOS	30
4.0.1	Discussão dos Resultados Numéricos	38
5	CONCLUSÃO	41

5.1	Perspectivas	42
	REFERÊNCIAS	43
	APÊNDICES	46
	APÊNDICE A – ROTINAS NUMÉRICAS	47
A.1	Programa Principal	47
A.2	Método Rainflow	50
A.3	Leitura de Picos e Vales	51
	ANEXOS	52
	ANEXO A – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	53
	A.0.1 Ensaio 1	53
	A.0.2 Ensaio 2	55
	A.0.3 Ensaio 3	57
	A.0.4 Ensaio 4	59
	A.0.5 Ensaio 5	61
	A.0.6 Ensaio 6	63
	A.0.7 Ensaio 7	65

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Torre de 110 kV rompida devido a falha do condutor (1)	2
Figura 1.2 – Vibrógrafo do tipo Pavica montado em uma linha de transmissão (2) .	2
Figura 2.1 – Representação da evolução de um processo de rompimento por fadiga (3)	7
Figura 2.2 – Parâmetros para descrever os ciclos de fadiga de amplitude constante. .	7
Figura 2.3 – Tipos de ciclos de tensão a fadiga, (a) alternado; (b) repetido; (c) blocos; (d) irregular ou aleatório; (e) ciclos com onda triangular ou trapezoidal. (Branco et al, 1986 modificado).	8
Figura 2.4 – (a) Foto de um cabo condutor ACSR em corte (a); (b) Regiões de contato. (3)	9
Figura 2.5 – Detalhe do grampo que fixa o cabo na torre.	10
Figura 2.6 – Fadiga por fretting – (a) Intenso desgaste superficial, com fratura de fios de alumínio, em camada externa do cabo ACSR, (B) Presença de pó escuro no conjunto cabo-grampo, (c) Marcas de <i>fretting</i> e fratura dos fios na camada interna do cabo (3)	12
Figura 2.7 – Classificação do processo randômico (4)	13
Figura 2.8 – Exemplo de processo aleatório contínuo (NEWLAND, 2005)	14
Figura 2.9 – (a) Carregamento de amplitude constante; (b) Carregamento aleatório (5)	14
Figura 2.10–(a) Vibrógrafo tipo Pavica, (b) Esquema da montagem do vibrógrafo no cabo.	16
Figura 2.11–Vibrógrafo do tipo Vibrec (6)	16
Figura 2.12–Regra de Palmgren-Miner do acumulo de Dano Linear (3).	17
Figura 2.13–Exemplo de curva S-N, com ciclos de falha e ciclos de serviço indicados para um determinado nível de tensão	19
Figura 2.14–(a) Gráfico Tensão x Tempo; (b) Gráfico Tensão x Tempo girado em 90° no sentido horário; (c) Ilustração de uma casa com um telhado japonês (Pagoda roof) (7).	20
Figura 2.15–Esquema ilustrativo do método rainflow.	21
Figura 2.16–Esquema ilustrativo da contagem de ciclos.	22
Figura 2.17–Previsão de vida de fadiga no domínio da frequência (9)	23
Figura 2.18–Previsão de vida de fadiga no domínio do tempo (9)	24

Figura 3.1 – Esquema da bancada de ensaios para ensaio de fadiga	26
Figura 3.2 – Curva S-N experimental do condutor IBIS – Estimada com base nos resultados dos ensaios de amplitude constante.	27
Figura 3.3 – Fluxograma dos procedimentos para a realização da análise numérica. .	29
Figura 4.1 – Resultados das 100 simulações para cada tempo proposto e a regressão em potência dos valores obtidos para o ensaio 1	31
Figura 4.2 – Resultados das 100 simulações para cada tempo proposto e a regressão em potência dos valores obtidos para o ensaio 2	32
Figura 4.3 – Resultados das 100 simulações para cada tempo proposto e a regressão em potência dos valores obtidos para o ensaio 3	33
Figura 4.4 – Resultados das 100 simulações para cada tempo proposto e a regressão em potência dos valores obtidos para o ensaio 4	34
Figura 4.5 – Resultados das 100 simulações para cada tempo proposto e a regressão em potência dos valores obtidos para o ensaio 5	35
Figura 4.6 – Resultados das 100 simulações para cada tempo proposto e a regressão em potência dos valores obtidos para o ensaio 6	36
Figura 4.7 – Resultados das 100 simulações para cada tempo proposto e a regressão em potência dos valores obtidos para o ensaio 7	37
Figura A.1–Valor RMS da amostra para o Ensaio 1	53
Figura A.2–Função densidade espectral para o Ensaio 1	54
Figura A.3–Fator de irregularidade para o Ensaio 1	54
Figura A.4–Dano acumulado para o Ensaio 1	55
Figura A.5–Valor RMS da amostra para o Ensaio 2	55
Figura A.6–Função densidade espectral para o Ensaio 2	56
Figura A.7–Fator de irregularidade para o Ensaio 2	56
Figura A.8–Dano acumulado para o Ensaio 2	57
Figura A.9–Valor RMS da amostra para o Ensaio 3	57
Figura A.10–Função densidade espectral para o Ensaio 3	58
Figura A.11–Fator de irregularidade para o Ensaio 3	58
Figura A.12–Dano acumulado para o Ensaio 3	59
Figura A.13–Valor RMS da amostra para o Ensaio 4	59
Figura A.14–Função densidade espectral para o Ensaio 4	60
Figura A.15–Fator de irregularidade para o Ensaio 4	60
Figura A.16–Dano acumulado para o Ensaio 4	61
Figura A.17–Valor RMS da amostra para o Ensaio 5	61
Figura A.18–Função densidade espectral para o Ensaio 5	62
Figura A.19–Fator de irregularidade para o Ensaio 5	62
Figura A.20–Dano acumulado para o Ensaio 5	63
Figura A.21–Valor RMS da amostra para o Ensaio 6	63
Figura A.22–Função densidade espectral para o Ensaio 6	64
Figura A.23–Fator de irregularidade para o Ensaio 6	64

Figura A.24–Dano acumulado para o Ensaio 6	65
Figura A.25–Valor RMS da amostra para o Ensaio 7	65
Figura A.26–Função densidade espectral para o Ensaio 7	66
Figura A.27–Fator de irregularidade para o Ensaio 7	66
Figura A.28–Dano acumulado para o Ensaio 7	67

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Principais tipos de cabos condutores	10
Tabela 2 – Comparação entre os três tipos de vibração a que um cabo condutor está sujeito (10, 11)	12
Tabela 3 – Quadro comparativo técnico dos vibrógrafos Pavica e Vibrec	16
Tabela 4 – RMS, frequência dominante, largura de banda e tempo real de vida do cabo condutor obtidos pela análise experimental.	30
Tabela 5 – Tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação para as 100 simulações obtidas para diferentes tempos de duração do sinal gerado para o Ensaio 1	31
Tabela 6 – Tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação para as 100 simulações obtidas para diferentes tempos de duração do sinal gerado para o Ensaio 2	32
Tabela 7 – Tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação para as 100 simulações obtidas para diferentes tempos de duração do sinal gerado para o Ensaio 3	33
Tabela 8 – Tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação para as 100 simulações obtidas para diferentes tempos de duração do sinal gerado para o Ensaio 4	34
Tabela 9 – Tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação para as 100 simulações obtidas para diferentes tempos de duração do sinal gerado para o Ensaio 5	35
Tabela 10 – Tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação para as 100 simulações obtidas para diferentes tempos de duração do sinal gerado para o Ensaio 6	36
Tabela 11 – Tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação para as 100 simulações obtidas para diferentes tempos de duração do sinal gerado para o Ensaio 7	37
Tabela 12 – Valores das constantes de regressão para os ensaios de 1 a 7	38
Tabela 13 – Valores de tempo de duração do sinal, gerados numericamente, para coeficientes menores que 15% obtidos com 100 simulações.	38

Tabela 14 – Valores de tempo de duração do sinal, gerados numericamente, para coeficientes menores que 15% com valores "refinados" com 500 simulações.	39
Tabela 15 – Valores referente ao tempo necessário de gravação estimativo da vida em fadiga do cabo condutor.	40

Lista de Algoritmos

Algoritmo 1 – <i>main.m</i> : Programa principal - Geração do sinal/ Método Rainflow/ Palmgren-Miner	47
Algoritmo 2 – <i>main.m</i> : continuação parte 1	48
Algoritmo 3 – <i>main.m</i> : continuação parte 2	49
Algoritmo 4 – <i>rainflow.m</i> : Método Rainflow	50
Algoritmo 5 – <i>RF.m</i> : Leitura de Picos e Vales	51

Lista de abreviaturas e siglas

<i>ACAR</i>	Cabos de Alumínio com Alma de Liga de Alumínio (Aluminium Conductor Aluminium Reinforced)
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>CAA(ACSR)</i>	Cabos de Alumínio com Alma de Aço (Aluminium Conductor Steel Reinforced)
<i>CIGRÉ</i>	Conseil International des Grands Réseaux Électriques (International Council on Large Electric Systems)
<i>EDS</i>	Every Day Stress ou Carga diária média de tracionamento à qual o cabo é submetido ao longo da vida em serviço. É um percentual da tensão limite de ruptura à tração do condutor.
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
<i>PSD</i>	Power Spectrum Density – Densidade espectral de potência
<i>RMS</i>	Root Mean Square (Valor quadrático médio)
<i>S – N</i>	Stress versus Number of cycles (Tensão versus Vida)
<i>UPC</i>	Último Ponto de Contato

Lista de símbolos

Latinos

d	diâmetro dos fios de alumínio da camada externa do cabo
d_a	diâmetro individual dos fios de alumínio
D	valor do dano
f	Frequência da aplicação da carga em ciclos por segundo
g	unidade de aceleração, definida como 9,806 65m/s ² , igual a aceleração devida à gravidade na superfície da Terra
k	parâmetros da curva S-N
K	constante de Poffenberger
N	número de ciclos
n_a	número dos fios de alumínio
n_b	número de blocos de carregamento de duração de gravação de 10 minutos extrapolados para 30 minutos
N_f	número de ciclos até a falha por fadiga em um dado nível de tensão σ_a
n_i	quantidades de ciclos para níveis de tensão obtidos em campo
Y_{0-pk}	zero a pico
S	tensão
S_a	amplitude de tensão
R	razão de carregamento
T	período total de tempo
V	vida de fadiga
$X(t)$	período total de tempo

Y_B deslocamento vertical medido pico a pico

Gregos

α ângulo de rotação

γ fator de irregularidade

λ parâmetro de largura espectral

$\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ valores dos diferentes níveis de tensão dinâmica em campo

σ_a tensão nominal (zero a pico)

σ_{Eq} tensão equivalente (zero a pico)

σ_x desvio padrão

γ fator de irregularidade

1 Introdução

Os processos ligados a otimização e distribuição de energia elétrica são estratégicos para garantir ao país sustentabilidade no seu crescimento e crédito junto ao investidor estrangeiro, baseados nisso o setor energético deve se preparar para superar as dificuldades e agir preventivamente para se evitar falhas, as falhas causam prejuízos enormes para todos aqueles que estão envolvidos, seja na geração, no consumo e até mesmo para o meio ambiente.

O território brasileiro é muito extenso e os recursos hídricos de maior potencial se encontram longínquos dos postos de consumo, daí a grande importância das linhas de transmissão, e da necessidade de se compreender a necessidade de se encontrar mecanismos que façam a previsão de vida desses cabos, fazendo com que os terríveis e inesperados blecautes não venham a ocorrer.

Um exemplo extremamente negativo foi o ocorrido no Brasil em 2001 quando habitantes da região Sul, Sudeste e Centro-Oeste ficaram sem energia elétrica por várias horas, devido a vibração eólica ocorreu uma ruptura por fadiga do cabo de transmissão no estado de São Paulo, esse blecaute deixou 11 estados sem o fornecimento de energia elétrica, com um enorme prejuízo financeiro e uma propaganda extremamente negativa do país no cenário mundial. Fora do país, no ano de 2012 em Johannesburg, África do Sul, houve a quebra do condutor causada por fadiga devido a vibrações eólicas, Fig. 1.1.

O mais importante conceito relacionado às falhas ocorridas por fadiga associadas a vibração eólica, não é a compreensão de avaliar se a falha irá ou não ocorrer, e sim quando essa falha ocorrerá. A partir desse entendimento pode-se então trabalhar na busca da prevenção da falha, interpretando de forma determinística os fatores que aceleram esse processo.

A forma clássica de previsão de vida à fadiga em condutores sob carregamentos aleatórios é realizada usando contagem e identificação de ciclos pela técnica Rainflow (7) associada à regra de acúmulo de dano de Palmgren-Miner (12, 13). Recomenda-se uma metodologia para estimativa da vida útil do cabo considerando o efeito cumulativo dos ciclos de vibração adquiridos por leituras de campo através de medidores de vibrações chamados vibrógrafos. Fig. 1.2



Figura 1.1 – Torre de 110 kV rompida devido a falha do condutor (1)



Figura 1.2 – Vibrógrafo do tipo Pavica montado em uma linha de transmissão (2)

1.1 Contextualização Temática

Como já foi exposto a falha principal em falha de condutores é a fadiga devido a flexão ocorrida no cabo devido a ação de ventos moderados, o resultado é o roçamento entre os fios do condutor e destes com o grampo de suspensão que fixa os cabos às torres de transmissão, esse fenômeno *fretting* leva a perda de material no interior do grampo de suspensão. Falaremos mais sobre fadiga e *fretting* na Seção 2.

A falha nos cabos condutores ocorre no interior do grampo onde ocorre o desgaste do cabo, onde a inspeção visual para medir tensões e controlar a falha não é possível, devido a localização na linha de transmissão, então usa-se um termógrafo na tentativa de se identificar áreas de quebra de fios (efeito joule) baseado na elevação do gradiente de temperatura na região (cabo/ grampo de suspensão), mas essa leitura pode se tornar

ineficaz, onde os ventos tendem a esfriar essa zona de falha, fato esse ocorrido no apagão de 2001 falado anteriormente.

A melhor ferramenta para se fazer uma previsão de vida do processo de desgaste de uma linha de transmissão afim de se evitar falhas inesperadas e que causem grandes prejuízos baseia-se nas curvas de Wholler ou S-N, essas curvas são resultados de ensaios de fadiga, com condições bem próximas as reais de operação, visualizando os efeitos relevantes do fretting no cabo.

Em conformidade com o que foi abordado até o momento é fundamental o investimento em pesquisas para se obter informações confiáveis e consistentes em relação a previsão de fadiga de um cabo condutor, representando dessa maneira uma realidade mais próxima a que ocorre no campo em situação real.

1.2 Revisão Bibliográfica

A fadiga em cabos condutores causadas pela ação dos ventos vem sendo estudada desde o início do século passado. Trabalhos muitos antigos já observavam estes efeitos sobre os cabos de transmissão (Stock, 1925; Varney, 1926; Nefzger, 1933) (14, 15, 16).

O amortecedor stockbridge (14) foi desenvolvido em 1925 por George H. Stockbridge. Este dispositivo consiste em duas massas inerciais presas na extremidade de um cabo flexível denominado de cabo mensageiro, o qual se encontra acoplado a um grampo para fixação no cabo condutor (Labegalini, 1992) (17).

O princípio mais próximo relacionado com a fadiga do condutor é a deformação dinâmica de flexão medida na boca do grampo de suspensão através de extensômetros, a qual era realizada aplicando extensômetros o mais próximo possível aos pontos de máxima flexão, método o qual apesar de adequado para os testes de laboratório não é apropriado para a aplicação em campo (Steidel, 1954; Hard, 1958; Epri, 1979) (18, 19, 2).

No ano de 1953, a CIGRÉ criou um grupo de estudos para investigação de causa de danos em linhas de transmissão devido à vibração eólica.

No ano de 1960, Zetterholm (20) apresentou para diversos condutores, valores de tensão de esticamento abaixo da qual o cabo não sofreria dano.

No ano de 1963, Edwards e Boyd (21) falaram de "amplitude de flexão" como um parâmetro diretamente relacionado com a deformação de flexão na boca do grampo e mais acessível para medições, prática a qual foi utilizada com sucesso pela Ontario Hydro por cerca de 25 anos. Introduziram também o primeiro gravador de live-line instalado no grampo de suspensão e adequado para estas medições. Essa amplitude de flexão (YB) foi definida como o deslocamento total pico-a-pico do condutor, medido em relação ao grampo de suspensão, em um ponto distante 3,5" (89 mm) a partir do último ponto de contato entre o cabo e o grampo e foi verificada a existência de uma correlação linear

entre a amplitude de flexão e a deformação medida sobre a superfície do condutor junto ao grampo.

No ano de 1965, Poffenberger e Swart (22) desenvolveram uma solução analítica mostrando a relação entre o deslocamento e a flexão sofrida pelos cabos condutores. Essa relação esta ligada dependentemente a tensão no cabo condutor e sua rigidez a flexão.

Em 1966, o IEEE (Institute of Electrical & Electronic Engineers) (1) recomendou o método amplitude de flexão como um método prático para avaliar a severidade da exposição à fadiga do condutor aéreo em todos os grampos de suspensão convencional. Sugeriram uma equação simples de aproximação para converter a amplitude de flexão em deformação de flexão, baseada na Fórmula de (Poffenberger-Swart, 1965) (22), e critérios de avaliação com base na deformação máxima admissível de flexão.

Em 1968 Fricke e Rawlins (23) constataram por meio de ensaios que ocorria desgaste superficial provocado pela ação de uma atrito superficial dos fios, um contato de pequena amplitude ocasionando o desgaste por fretting.

No ano de 1981, Rameye & Silva (24) buscou reproduzir mecanicamente vibrações eólicas em laboratório para avaliar os efeitos da redução da amplitude de vibração na vida à fadiga de condutores tipo ACSR (aluminum conductors steel reinforced). Os testes basicamente consistiam em iniciar o teste de fadiga com um nível de dano predeterminado e finalizá-los com uma amplitude reduzida, comprovando que a redução da amplitude após um mínimo dano já realizado, não impede o desenvolvimento de novas quebras.

No ano de 1993, Gopalan (25) propôs experimentos alternativos para execução de testes de vibração em laboratório com controle de diversas variáveis, que diminuam o custo e o tempo de ensaio, simulando o princípio de excitação de ventos laterais.

No ano de 1995, Zhou et al (26) desenvolveram um aparato experimental para testes de fadiga por fretting dos fios que constituem os cabos condutores, observaram que maiores amplitudes de carga de fadiga provocavam um crescimento da zona de escorregamento e a redução na vida à fadiga do fio.

No ano de 2006, Henriques (11) desenvolveu uma bancada de ensaios mecânicos à fadiga de cabos condutores na Universidade de Brasília, que possibilitou avanços nos estudos de condutores.

No ano de 2010, a tese de Fadel (3) analisa o impacto da aplicação de cargas de esticamento mais elevadas para o condutor IBIS através de uma validação experimental do uso da fórmula de Poffenberger-Swart, levantando dados para gerar curvas S-N do cabo condutor.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem por finalidade principal validar a previsão de vida de cabos condutores com a utilização de metodologia de previsão de vida no domínio do tempo, verificando a influência do tempo de monitoramento da intensidade de vibração eólica do cabo por um vibrógrafo comercial. O trabalho é desenvolvido todo em ambiente computacional, para validar a metodologia computacional selecionada.

1.4 Metodologia

Estes ensaios de forma experimental tiveram como amostras de condutor o tipo CAA 397,5 MCM IBIS, tomando como parâmetros os dados e resultados dos ensaios experimentais de fadiga do cabo condutor, realizados por (Watanabe, 2014) (27), utilizando como critério de falha a quebra do primeiro fio de alumínio, ensaio este realizado no laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília.

1.5 Divisão do Trabalho

Este trabalho se encontra estruturado em cinco capítulos, sendo este o primeiro, onde está escrito o cenário da proposta dissertativa, os aspectos sobre o problema a ser estudado, uma breve revisão bibliográfica, bem como o objetivo da dissertação.

No segundo capítulo iremos falar sobre a fadiga de forma sucinta, como fazer a previsão do dano, e *fretting*. No terceiro capítulo iremos falar sobre a metodologia aplicada, a análise experimental e computacional utilizada no trabalho. No quarto capítulo iremos fazer uma discussão sobre os resultados obtidos na forma computacional, as simulações realizadas. No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões e considerações finais acerca dos resultados obtidos.

2 Fadiga

A fadiga é o motivo de 80 a 90% de todas as falhas estruturais, utilizam-se critérios de projeto para evitar que a falha ocorra ou que se permita a operação em presença de falha dentro de limites de segurança, para que o componente seja substituído bem antes da falha catastrófica (Halfpenny, 2010) (28).

2.1 Introdução

A definição da fadiga descrita na norma ASTM STP E1823, esta definida da seguinte maneira “Fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre num material sujeito a condições que produzem, num ponto ou em vários pontos, tensões ou deformações dinâmicas, capazes de culminar em trincas ou numa fratura completa após um número suficiente de variações de carga”, essa falha normalmente ocorre de forma súbita.

Ao descrever sobre fadiga é necessário falar de August Wöhler, que foi um engenheiro mestre das linhas ferroviárias em Frankfurt Alemanha, que realizou em 1850 estudos sobre o comportamento de materiais metálicos submetidos a esforços cíclicos, estudos feitos sobre a ruptura de eixos rodoviários, ele desenvolveu o método de tensão de vida, simples e de vasta aplicação, a base deste método é a curva S-N ou curva de Wöhler, que relaciona o número de ciclos até que a falha ocorra com um certo nível de tensão (Airiduru, 2004) (29).

Para estimar a curva S-N, são realizados ensaios em que se submete um corpo de prova a ciclos de tensões alternadas, com amplitude constante, até que o corpo de prova falhe. Os estudos realizados no campo da fadiga tem nos permitido o desenvolvimento de métodos de concepção e de cálculos de novos componentes e estruturas, baseados na máxima resistência à fadiga, dando maior confiabilidade e economia aos projetos.

2.2 Etapas e classificação da fadiga

A fadiga somente ocorre se a tensão sofrida pela peça variar com o tempo, desse modo a compreensão deste fenômeno cíclico depende do conhecimento dos ciclos de

carregamento, para que a fadiga ocorra são necessários três fatores atuantes, solicitações cíclicas, solicitações de tração e deformação plástica localizada. O processo de fadiga resultante de tensões dinâmicas pode ser dividido em três etapas (Fig. 2.1): 1) Nucleação da trinca, 2) Propagação da trinca, ou crescimento macroscópico, 3) Ruptura Final.

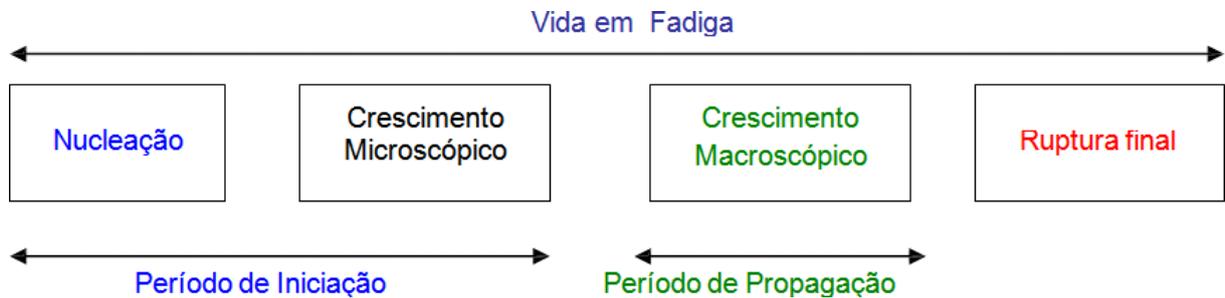


Figura 2.1 – Representação da evolução de um processo de rompimento por fadiga (3)

O processo inicia com o surgimento da trinca (nucleação), propagando em seguida o seu crescimento ainda não visível a olho nu, em seguida ocorre a evolução para trincas visíveis até a sua ruptura.

Os parâmetros utilizados para descrever ciclos de tensão de fadiga estão ilustrados na Fig. 2.2 o eixo das ordenadas mostra a tensão aplicada e no eixo das abcissas mostre o número de ciclos ou tempo.

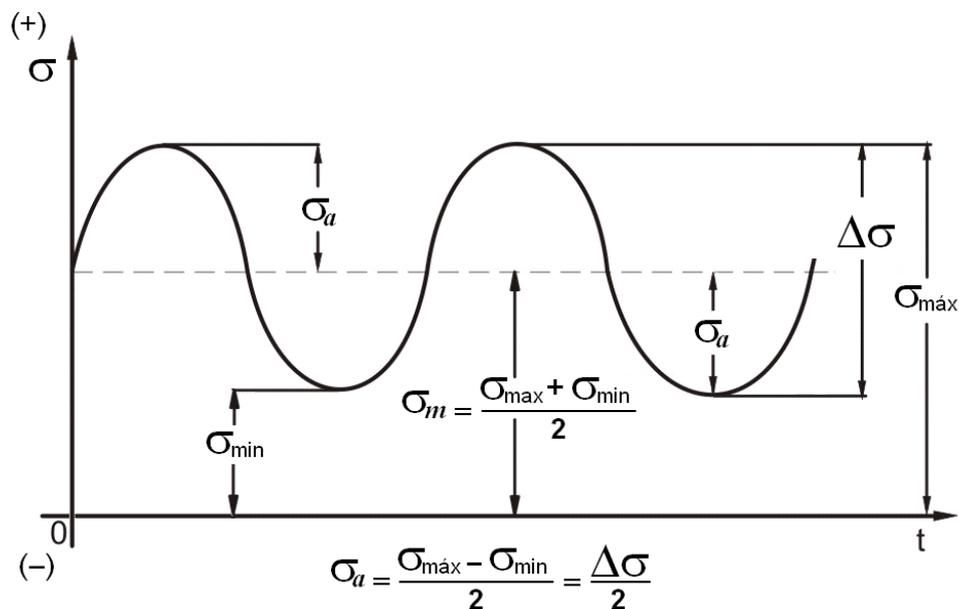


Figura 2.2 – Parâmetros para descrever os ciclos de fadiga de amplitude constante.

Essa forma de carregamento da Fig. 2.2 é mais empregada na caracterização da curva de resistência à fadiga de materiais e sua onda senoidal é dada pela equação.

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin 2\pi t f \quad (2.1)$$

A relação entre o tempo e o número de ciclos é dada por:

$$f = N/T \quad (2.2)$$

onde, f é a frequência da aplicação da carga em ciclos por segundo, N é o número de ciclos e T é o tempo correspondente ao número de ciclos em segundos ou minuto.

A tensão média (σ_m) tem a sua forma básica representada quando se tem a razão representada pela equação, sendo:

$$R = \sigma_{min}/\sigma_{máx} \quad (2.3)$$

A Fig. 2.3 representa os tipos de ciclos de tensão em fadiga, na Fig. 2.3 (a) temos um modelo de ciclo alternado de forma senoidal, com tensão média nula, para esse tipo de tensão temos as tensões máximas (picos) e mínimas (vales) iguais em valor absoluto.

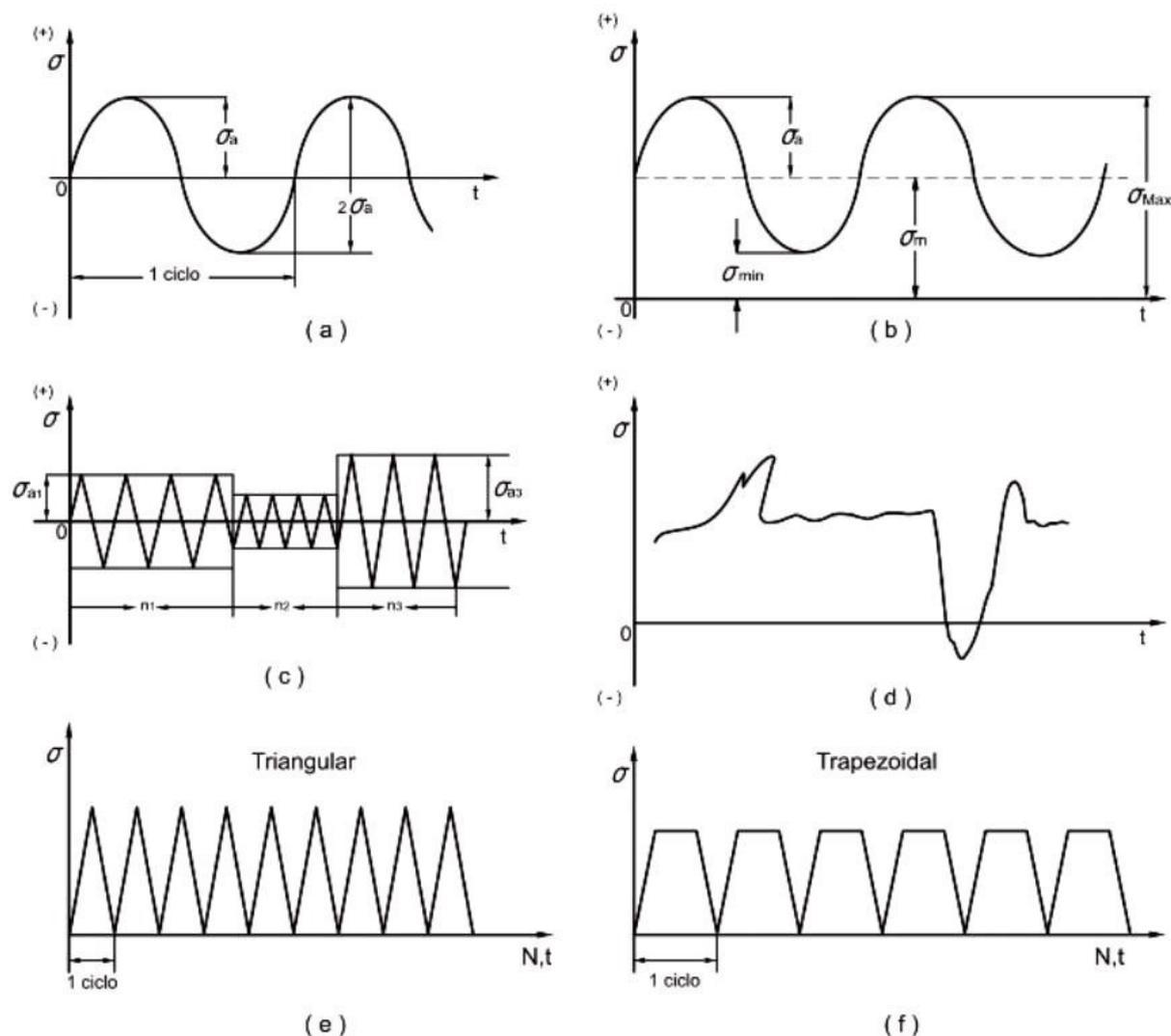


Figura 2.3 – Tipos de ciclos de tensão a fadiga, (a) alternado; (b) repetido; (c) blocos; (d) irregular ou aleatório; (e) ciclos com onda triangular ou trapezoidal. (Branco et al, 1986 modificado).

Na Fig. 2.3 (b) é apresentado um tipo de ciclo de tensão que se repete em torno de uma tensão média (σ_m) não nula, chamado repetido nos quais os valores em módulo da tensão máxima ($\sigma_{máx}$) e da tensão mínima (σ_{min}) não são iguais.

A Fig. 2.3 (c) apresenta um carregamento onde a tensão varia por blocos, que consistem em uma sucessão bem definida de ciclos de tensão. Cada bloco é caracterizado pela amplitude de tensão alternada (σ_a), pela tensão média (σ_m) e pelo número de ciclos de carregamento em que o par (σ_a, σ_m) ocorre.

Resumindo, um ciclo de tensões pode ser definido por uma função, que é chamada de onda de tensões e pode ter as formas, Senoidal (Fig. 2.3 (a,b)), irregular ou aleatório, (Fig. 2.3 (d)) linear ou triangular (Fig. 2.3 (e)), trapezoidal (Fig. 2.3 (f)).

2.3 Cabo Condutor

Dentro do contexto de transmissão de energia elétrica, o cabo condutor é sem dúvidas o principal componente, pois ele faz o transporte de energia elétrica. Realizar um projeto adequado, considerando a carga de esticamento, as condições adversas, a energia a ser transportada são fundamentais para evitar falhas no fornecimento de energia elétrica.

O cabo condutor é formado por um grupo de fios dispostos concentricamente, formando coroas de fios torcidos de forma helicoidal em direções opostas a cada camada. A Fig. 2.4 (a) representa a ilustração de um cabo condutor tipo ACSR (cabos de alumínio com alma de aço), com uma malha de aço na parte central envolto de fios de alumínio. No interior do grampo de fixação ocorre uma série de regiões de contato, quer entre fios de alumínio internamente, quer entre os fios e as ferragens mais externa do cabo como apresentada na Fig. 2.4 (b).



Figura 2.4 – (a) Foto de um cabo condutor ACSR em corte (a); (b) Regiões de contato.
(3)

Entre os fatores que aceleram as cargas de contato entre os fios estão a carga de esticamento do cabo, carga de aperto dos grampos e os materiais constituintes do cabo. A Tab. 1 mostra os principais tipos de cabos e os materiais que são feitos.

Tabela 1 – Principais tipos de cabos condutores

Tipo de Condutor	Descrição
CA (AAC)	Cabos de Alumínio (All Aluminium Conductor)
CAA (ACSR)	Cabos de Alumínio com Alma de aço (Aluminium Conductor Steel Reinforced)
CAL (AAAC)	Cabos de Alumínio Liga (All Aluminium Alloy Conductor)
ACAR	Cabos de Alumínio com Alma de Liga de Alumínio (Aluminium Conductor Alloy Reinforced)
TW	Fios Trapezoidais (Trapezoidal Wires)

2.3.1 Grampo de Suspensão

O grampo de suspensão é o instrumento de apoio dos cabos condutores, a falha no condutor acontece geralmente nos pontos de fixação do cabo, nos grampos de suspensão, amortecedores, espaçadores dentre outros (CIGRÉ, 1988) (30).

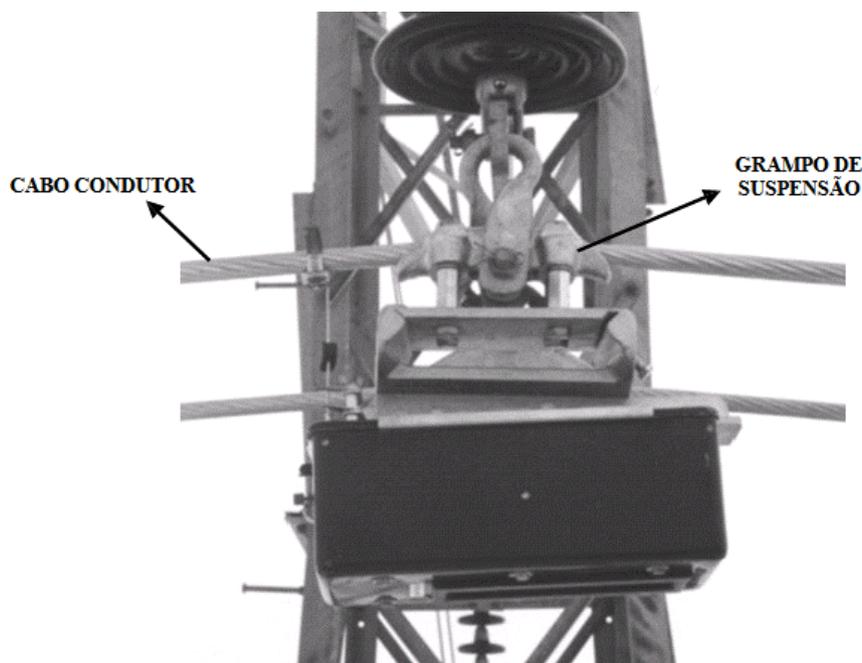


Figura 2.5 – Detalhe do grampo que fixa o cabo na torre.

2.3.2 Excitação eólica nos cabos

Em relação a falha nos cabos, o principal fator causador é a vibração que o mesmo recebe devido a ação dos ventos, a vida útil dos cabos esta ligada a essa vibração recebida pelo cabo juntamente com as amplitudes a ela relacionadas, com a vibração os pontos de fixação dos cabos, em geral nos grampos, faz com que se tenha um ponto de falha pelo roçamento dos fios neste ponto de engastamento. Existe uma dificuldade em prever o comportamento vibratório dos cabos com precisão na fase de projetos da linha de transmissão, o que acaba em limitar a carga de esticamento dos cabos e o comprimento dos

vãos entre as torres, buscando sempre uma metodologia mais conservativa nesse processo. O cabo está sujeito a três tipos de vibração: Oscilação de subvão, galope do condutor e vibração eólica.

As oscilações de subvão ocorrem devido a esteira gerada por um condutor adjacente, abrange uma baixa faixa de frequência e são causados por ventos laterais moderados a fortes, com velocidade de 4 a 18m/s.

As oscilações tipo Galope acontecem em regiões onde acontecem tempestades e neves, na presença de ventos entre 7 a 18m/s, praticamente inexistente no Brasil, a camada de gelo que fica depositada no cabo faz o mesmo com perfil aerodinamicamente instável.

As vibrações eólicas são as mais problemáticas em relação as outras duas, por não serem facilmente detectáveis em uma inspeção visual, pois apresentam pequenas amplitudes causadas por ventos fracos e moderados, com velocidades de 0,8 a 8 m/s e são mais frequentes nas linhas de transmissão, a vibração eólica são a base para o projeto de uma linha de transmissão (Henriques, 2006) (11).

Na Tab. 2, estão descritas as informações sobre os três tipos de vibração.

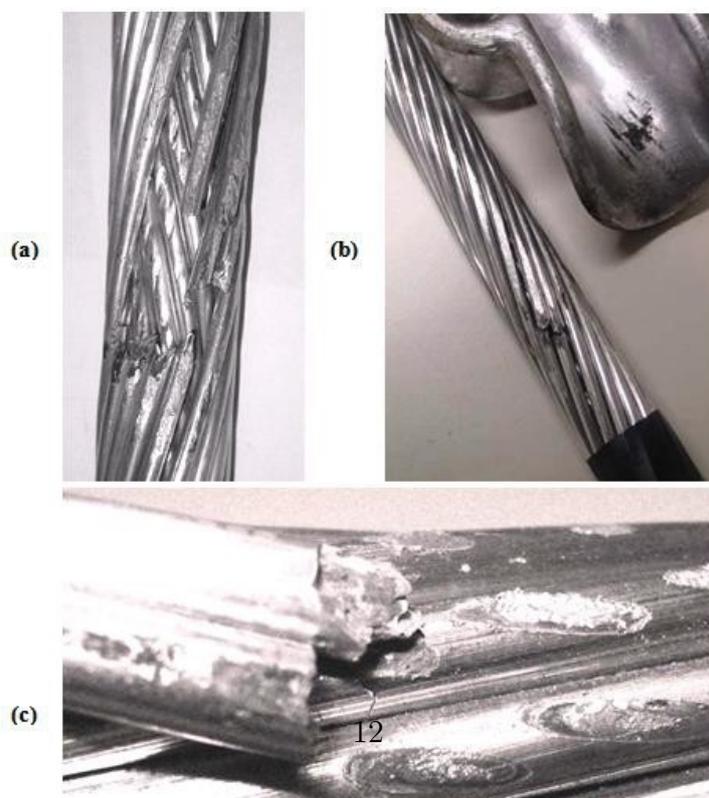
2.4 Fretting

Em superfícies em contato que estejam sujeitas a micro escorregamentos entre essas superfícies ao longo da zona de contato, deslizando uma sobre a outra, dois importantes fenômenos podem surgir como resultado desta ação: O desgaste destas superfícies devido ao contato, dando início a um processo chamado de desgaste por *fretting* e, as trincas de fadiga de um componente carregado ciclicamente na região de início da região afetada pelo *fretting* levando a uma enorme redução da resistência naquele ponto, este processo se chama fadiga por *fretting*.

Existem inúmeros casos práticos onde ocorrem a fadiga por *fretting*, como engrenagens, virabrequins, cabos de alta tensão (Zhou, 1994) (26) e até mesmo luminárias suspensas por cabos (Barnard, 1995)(31), pois diversos tipos de montagens estão sujeitas a vibrações que podem causar uma falha catastrófica devido a fadiga por *fretting*.

Tabela 2 – Comparação entre os três tipos de vibração a que um cabo condutor está sujeito (10, 11)

CARACTERÍSTICAS	VIBRAÇÃO EÓLICA	GALOPE	OSCILAÇÃO DE SUBVÃO
Tipo de LT afetada	Todas	Todas	Cabos geminados
Faixa de Frequência	3 a 150 Hz	0,08 a 3 Hz	0,15 a 10 Hz
Faixa de amplitude (em rel. ao diâmetro do cabo)	0,01 a 1	5 a 300	Modo corpo rígido: 0,5 a 80 Modo de Subvão: 05 a 20
Condições ambientais que favorecem:			
Tipo de vento	Laminar	Laminar	Laminar
Velocidade do vento	1 a 7 m/s (3,6 a 25 km/h)	7 a 18 m/s (25 a 65 km/h)	4 a 18 m/s (14 a 65 km/h)
Superfície do cabo	Nua ou com gelo uniforme	Gelo assimétrico	Nua, seca
Condições de projetos que influenciam	Tensão de esticamento, autoarmotecimento dos cabos, uso de amortecedores, armaduras	Razão da frequência natural vertical para a torção, catenária e condições de suporte	Separação dos subcondutores, torção do feixe, arranjo dos subcondutores, distância entre os espaçadores
Danos:			
Tempo aproximado para a ocorrência	2 meses a mais de 20 anos	1 a 48 horas	1 mês a mais de 8 anos
Causas diretas	Falha devido a Fadiga	Altas Cargas Dinâmicas	Impacto de condutores Abraão Desgastes de ferragens Ferragens de suspensão
Componentes mais afetados	Cabos Condutores e para-raios	Condutores, ferragens, isoladores, estruturas	espaçadores, amortecedores, cabos.



2.5 Carregamento Randômico

Um material pode estar sujeito a carregamento determinísticos ou randômicos, (Bishop, 1989) (32). A diferença entre os processos é que o determinístico é definido quando estados futuros podem ser previstos de forma exata com o uso de uma relação matemática, já no processo randômico, isso não é possível pois cada observação do fenômeno será de uma forma única.

O processo randômico ou estocástico pode ser entendido como uma agrupamento de várias amostras de fenômenos aleatórios, sendo dividido em estacionário e não estacionário. O processo randômico estacionário é aquele, cujas propriedades estatísticas médias permanecem as mesmas para qualquer instante do tempo, podendo ser caracterizado em ergódico e não-ergódico.

Um processo é considerado ergódico se apenas uma observação de um processo $X(t)$ contém toda informação estatística sobre o processo. Todo processo ergódico é estacionário, visto que uma observação de um processo não estacionário não poderia conter toda informação capaz de descrever estatisticamente o processo. Assim, algumas propriedades dos processos estacionários também são propriedades dos processos ergódicos: a média e a variância de um processo ergódico devem ser constantes, e a função de autocorrelação deve ser independente da origem dos tempos (Pereira, 1986) (33). Resumindo o processo ergódico é quando uma amostra apresenta a informação estatística de todo o processo (Bendat, 1971) (4).

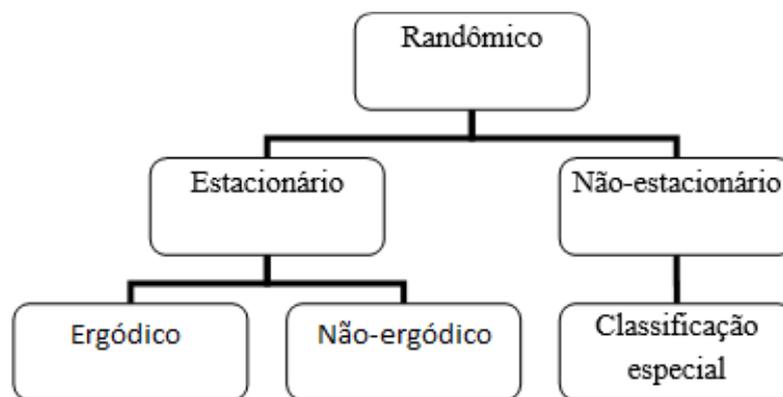


Figura 2.7 – Classificação do processo randômico (4)

Um processo estocástico pode ser definido em estacionários e não estacionários. Um processo é dito estacionário se dividido em intervalos de tempo, e as várias seções do processo exibem essencialmente as mesmas propriedades estatísticas, ou seja, as estatísticas desse processo são independentes da origem dos tempos. Caso contrário o processo é dito não estacionário (Haykin, 2001) (34).

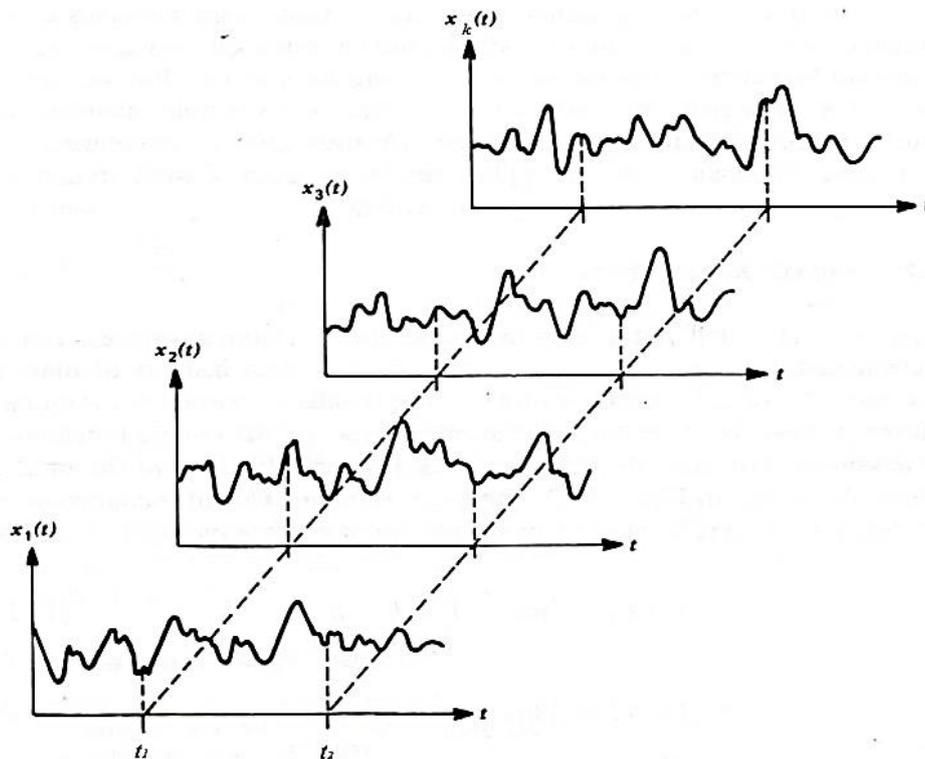


Figura 2.8 – Exemplo de processo aleatório contínuo (NEWLAND, 2005)

Ao contrário por exemplo de máquinas rotativas, que estão sujeitas à carregamentos determinísticos, os componentes estruturais como cabos condutores de energia, pás de turbinas eólicas, plataformas de petróleo, estão sujeitos a carregamentos aleatórios.

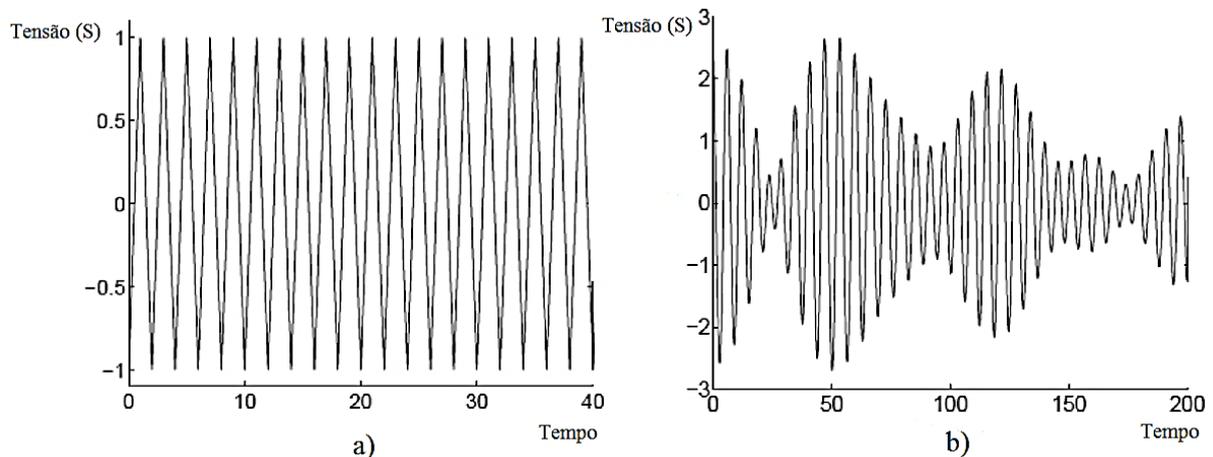


Figura 2.9 – (a) Carregamento de amplitude constante; (b) Carregamento aleatório (5)

A cada instante de tempo, o comportamento da amplitude de tensão é diferente e isso é o que acontece frequentemente na realidade. A grande dificuldade de trabalhar como carregamento randômico é que ele não pode ser descrito por uma curva S-N, já que esta apresenta a relação entre o número de ciclos e o nível de tensão de um determinado material submetido a apenas carregamentos de amplitude constante (Bishop, 1989) (32).

Para contornar esse problema, foi constatado que o dano por fadiga de um componente ocorre de forma acumulativa, levando-o à fratura. Dessa forma, uma forma de prever a vida de fadiga de materiais sob carregamentos aleatórios é utilizando a regra de dano acumulativo linear ou Regra de Palmgren-Miner (Lee, 2005) (35).

2.6 Previsão de Fadiga

Para se estabelecer uma previsão de vida de um componente que esta em fadiga é fundamental saber o carregamento que o material esta sujeito e o dano que o mesmo está sofrendo em sua operação.

Carregamentos de Amplitude Constante

Esse tipo de carregamento assume que o componente que esta sofrendo a fadiga esta em um ciclo de carga de tensão média a amplitude constante, e o diagrama e a montagem da curva S-N é a melhor opção para se levantar o número de ciclos até a ocorrência da falha.

Carregamentos de Amplitude Variável

Nesse tipo de carregamento realizado no tempo, a amplitude se apresenta de forma variável e a melhor maneira de se fazer a previsão de vida é dividi-la em “blocos” de tensões, com o auxílio de um método de contagem de ciclos denominado Rainflow, cujo o resultado, é conhecido como “Fator de Dano”, tem a sua expressão medida como uma fração da falha, ou seja, a falha de um componente ocorre quando o Dano (D) é igual a um, $D = 1$. Caso por exemplo o dano seja igual a $D = 0,20$ significa que 20% da vida do componente foi consumida, essa teoria fala que a acumulação de danos é independente do nível de tensão, a ação dos ventos sobre a linha de transmissão provoca oscilação que causam danos ao mesmo, dessa forma ao longo de sua vida útil, o cabo sofre uma excitação com amplitude variável que pode ser calculada sua previsão de vida por um carregamento em blocos, onde cada bloco impõe ao cabo uma parcela de dano.

2.6.1 Vibrógrafo

Para se estimar a vida de um cabo condutor é necessário que ocorra a coleta de dados relativos as vibrações eólicas a qual o cabo esta submetido, para isso foi utilizado um equipamento chamado vibrógrafo, este equipamento fica montado a distância de $89mm$ do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, ele mede o deslocamento pico a pico, ocasionado pela vibração eólica, conhecido como Y_B , e as respectivas frequências (N), nesse ponto, o sinal é coletado e gravado na memória do medidor, e com o uso de uma fórmula matemática é possível determinar a tensão ao qual o cabo ficou submetido a cada bloco de carregamento (Dados de Watanabe, 2014) (27).

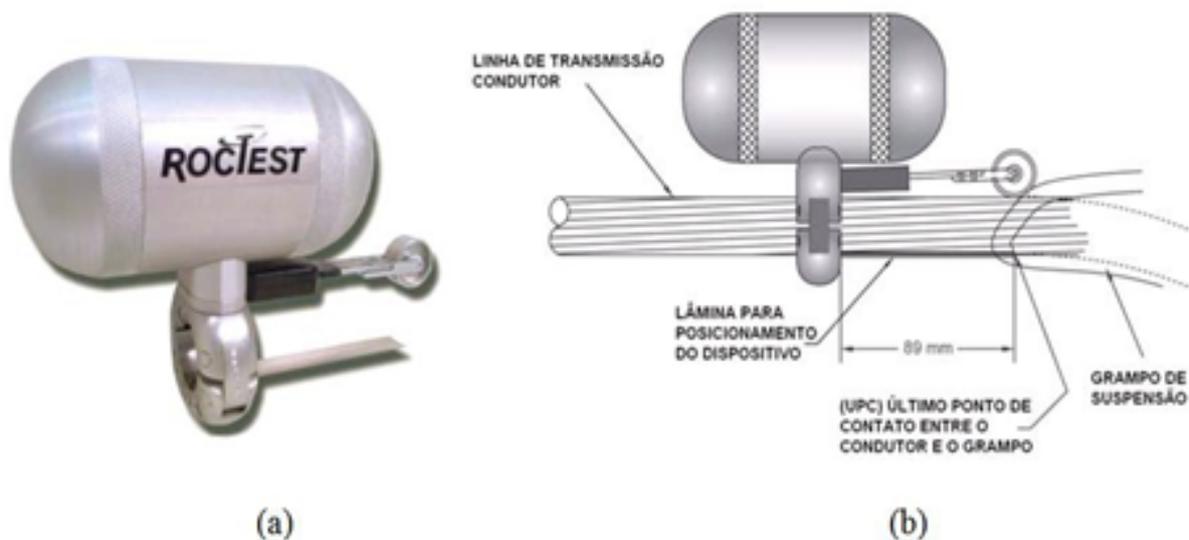


Figura 2.10 – (a) Vibrógrafo tipo Pavica, (b) Esquema da montagem do vibrógrafo no cabo.



Figura 2.11 – Vibrógrafo do tipo Vibrec (6)

Abaixo a Tabela 3 comparativa entre os dois tipos de vibrógrafos.

Tabela 3 – Quadro comparativo técnico dos vibrógrafos Pavica e Vibrec

Características	Vibrógrafo Pavica (Roc-test)	Vibrógrafo Vibrec (Pfisher)
Intervalo de registro	10 minutos	15 minutos
Taxa de aquisição de dados	Até 12 segundos	Até 10 segundos
Frequência de aquisição	1Hz até 1,2 kHz	0,2 Hz a 0,7 kHz
Autonomia	Até 3 meses	Até 12 meses

Ambos captam sinal de forma não contínua e armazenam grande volume de informação, tais fatores somados com a temperatura ambiente e exposição ao tempo

afetam sua autonomia e restringe sua capacidade de permanência no campo.

2.6.2 Teoria de Acúmulo de Dano – Regra de Miner

A ação dos ventos sobre as linhas de transmissão provoca oscilação, onde a intensidade esta ligada ao ângulo de incidência e a constância do vento. Em 1924, foi proposto o primeiro modelo de dano por (Palmgren, 1924) (12) para uma indústria que produzia rolamentos de esferas, posteriormente no ano de 1937 enquanto trabalhava na área de geração de energia elétrica, (Langer, 1937) (36) propôs uma regra linear para calcular o dano dos componentes de um vaso de pressão e componentes de tubulação de aço, Miner em 1945 (13) construiu em cima do trabalho de Langer e aplicou a regra de dano linear, demonstrando concordância entre as previsões da regra de dano linear e seus resultados experimentais.

A regra de Palmgren-Miner (Fig. 2.12), para ser utilizada é necessária que o carregamento seja dividido em blocos, e o objetivo central é estimar quantos blocos de carregamento são aplicados até que a falha do componente ocorra, para transformar o carregamento aleatório em blocos, são utilizados métodos de contagem de ciclo, sendo o Rainflow (falaremos dessa regra no próximo tópico) a mais comumente utilizada.

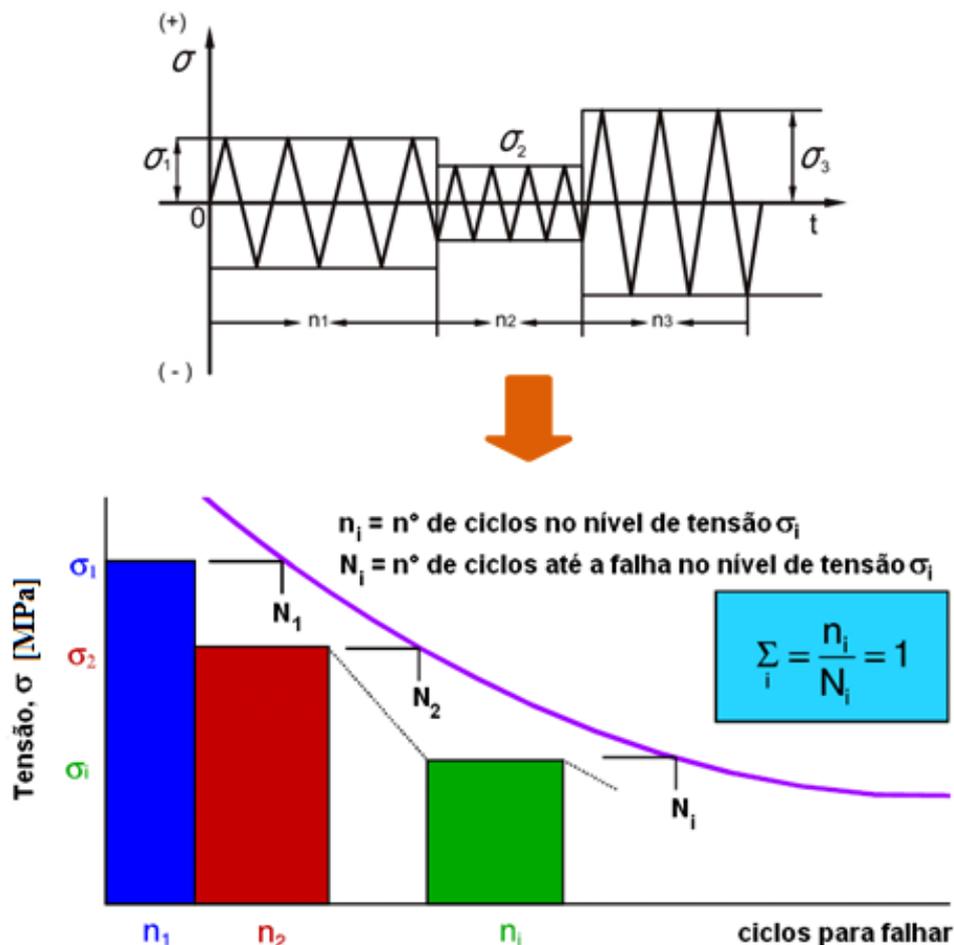


Figura 2.12 – Regra de Palmgren-Miner do acúmulo de Dano Linear (3).

A teoria de Miner define que a ruptura por fadiga é esperada quando o somatório das frações de dano for igual a 1.

$$D = \sum D_i = n_i/N_{f,i} \quad (2.4)$$

Sendo D o valor do dano; n_i as quantidades de ciclos para os respectivos níveis de tensão obtidas em campo; N_f as quantidades de ciclos na curva S-N, correspondente a $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots \sigma_i$; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots \sigma_i$ os valores dos diferentes níveis de tensão dinâmica a que os condutores estão sujeitos no campo.

Se D for calculada considerando valores de n_i extrapolados para um ano de vida do condutor, a duração da vida V do condutor pode ser estimada pela seguinte equação:

$$V = \frac{1}{\sum D} \text{anos} \quad (2.5)$$

Para (Henriques, 2006) (11) aplicação da regra de Palmgren-Miner dois fatores são fundamentais, traçar a curva de fadiga S-N para montagem cabo/grampo, utilizando a Curva de Segurança da CIGRÈ (Safe Border Line) caso não seja possível levanta-la em laboratório; segundo fazer a distribuição n_i (σ_i) dos ciclos em cada um dos níveis de tensão experimentados no campo. Esses dados são obtidos por vibrógrafos, sendo expressos por ciclo ano.

Com o exemplo da curva S-N (Fig. 2.13), verifica-se que, por exemplo, o número de ciclos até a falha de amplitude S_1 seria N_1 , se outras tensões não estivessem presentes. Nesse caso, pode-se dizer que o elemento terá apenas uma fração de dano D_1 quando estiver sujeito a n_1 ciclos de serviço de tensão de amplitude S_1 . Portanto, o dano D_1 é expresso como uma relação de n_1 sobre N_1 .

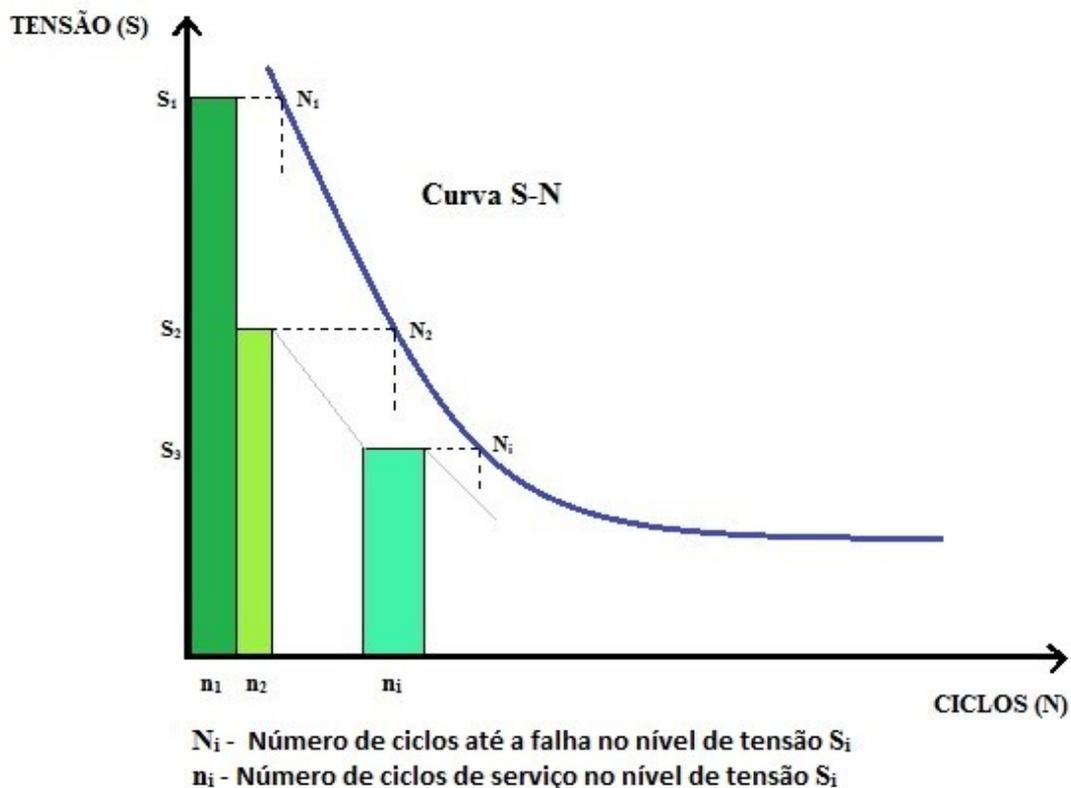


Figura 2.13 – Exemplo de curva S-N, com ciclos de falha e ciclos de serviço indicados para um determinado nível de tensão

O somatório de danos D_i , alinhado para cada nível de tensão S_i , representa o acúmulo de danos que o elemento sofrerá:

$$D = \sum_{i=0}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (2.6)$$

O valor de D , é nulo quando o componente estrutural esta com sua integridade completa e a falha somente ocorrera quando $D \geq 1$.

O importante é que a regra de dano linear despreza danos com tensões inferiores ao limite de fadiga, graças aos métodos de contagem de ciclo Rainflow foi possível a aplicação da regra de Miner em carregamentos aleatórios.

2.7 Método Rainflow de contagem de ciclos

Um registro de amplitude de tensão no tempo não se apresenta de forma harmônica, mas sim de forma aleatória e como abordado anteriormente, com o propósito de aplicar a regra linear de dano ou regra de Palmgren-Miner, é preciso que o carregamento seja dividido em blocos de amplitudes constantes e, para isso, utiliza-se o método de contagem de ciclos e, frequentemente, é utilizado o Rainflow.

Durante muitos anos foram propostos vários métodos para a contagem de ciclos irregulares, mas o consenso surgiu em 1968 quando o método Rainflow foi apresentado por

(M. Matsuishi e T. Endo, 1968) (7), sendo esta uma técnica de contagem de ciclos, uma analogia ao trajeto da queda dos pingos de chuva em um telhado tipicamente japonês, o *pagoda roof*. Essa analogia é visualizada quando o gráfico Tensão *vs* Tempo é girado em 90° no sentido horário, de forma que o eixo positivo do tempo fique apontando para baixo.

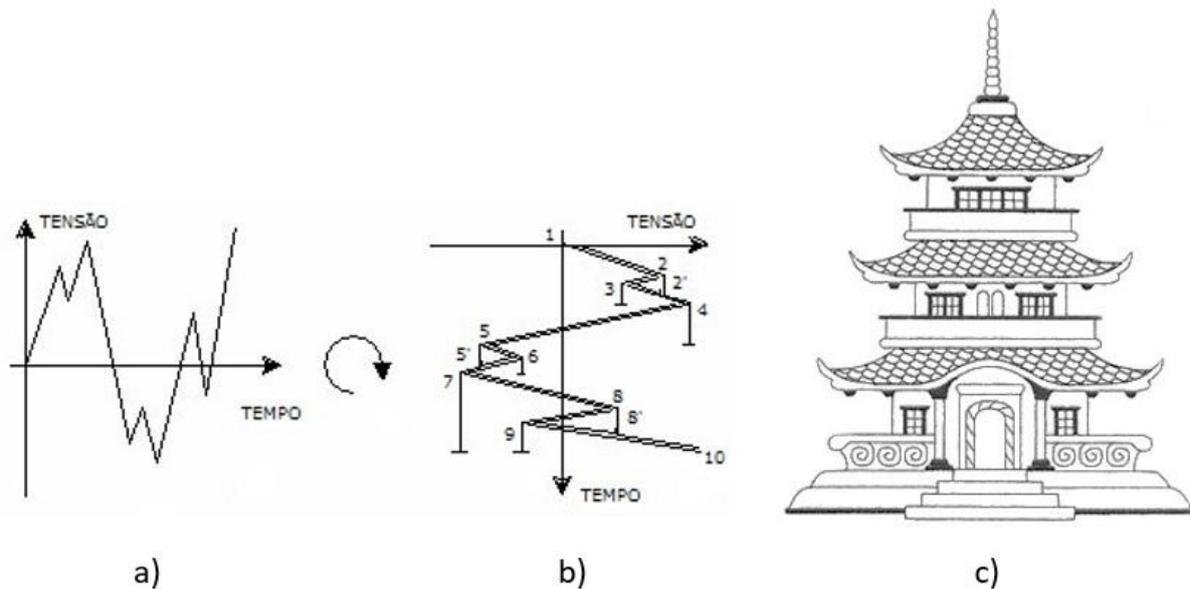


Figura 2.14 – (a) Gráfico Tensão x Tempo; (b) Gráfico Tensão x Tempo girado em 90° no sentido horário; (c) Ilustração de uma casa com um telhado japonês (Pagoda roof) (7).

Constitui um algoritmo matemático, projetado para captar variações na amplitude do carregamento. Formando ciclos e comparando os pontos de máximo e mínimo, mesmo estes estando separados por extremos intermediários. Cada máximo local é utilizado como pico de um ciclo de histerese com uma amplitude calculada pelo algoritmo.

Sabendo que um pico corresponde a um máximo instantâneo, um vale é dito um ponto mínimo instantâneo, faixa é a diferença absoluta entre um pico e um vale e que um ciclo surge de um mínimo, passa por um máximo e finaliza em um mínimo, a norma ASTM E 1049 define os procedimentos para a aplicação do método Rainflow:

(A) Denota-se de X o intervalo em questão; Y , a faixa anterior adjacente a X , e S o ponto de partida na história.

- (1) Leia o próximo pico ou vale. Se estiver fora dos dados, vá para a etapa 6;
- (2) Se houver menos de três pontos, vá para a etapa 1. É necessário formar intervalos de X e Y usando os três picos e vales mais recentes que não tenham sido descartados;
- (3) Compare os valores absolutos dos intervalos de X e Y :
 - a. se $X < Y$, vá para a etapa 1;
 - b. se $X \geq Y$, vá para a etapa 4;
- (4) Se o intervalo Y contém o ponto de partida S , vá para o passo 5; caso contrário,

conte o intervalo Y como um ciclo e descarte o pico e o vale de Y ; vá para o passo 2;

(5) Conte o intervalo Y como um meio ciclo, descarte o primeiro ponto (pico ou vale) no intervalo de Y ; mova o ponto de partida para o segundo ponto no intervalo Y ; e vá para a etapa 2;

(6) Conte cada intervalo que não tenha sido previamente considerado como metade de um ciclo.

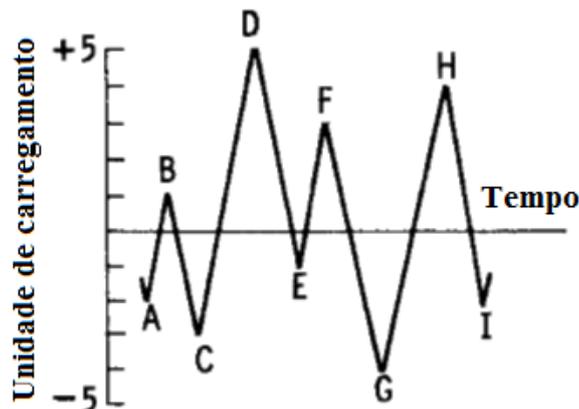


Figura 2.15 – Esquema ilustrativo do método rainflow.

(B) A história de carregamento da Fig. 2.15 é retrazado na Fig. 2.16 e utilizada para ilustrar o processo. Os detalhes da contagem de ciclos são os seguintes:

(1) $S = A$; $Y = |A - B|$; $X = |B - C|$; $X > Y$. Y contém S , que é o ponto A . Conta-se $|A - B|$ como um meio ciclo e descarta-se o ponto A ; $S = B$ (Fig. 2.16 - (b)).

(2) $Y = |B - C|$; $X = |C - D|$; $X > Y$. Y contém S , que é o ponto B . Conta-se $|B - C|$ como um meio ciclo e descarta-se o ponto B ; $S = C$ (Fig. 2.16 - (c)).

(3) $Y = |C - D|$; $X = |D - E|$; $X < Y$.

(4) $Y = |D - E|$; $X = |E - F|$; $X < Y$.

(5) $Y = |E - F|$; $X = |F - G|$; $X > Y$. Conta-se $|E - F|$ como um ciclo e descarta-se os pontos E e F (Fig. 2.16 - (d)). Nota-se que o ciclo é formado pelo emparelhamento dos intervalos $E - F$ e a porção do intervalo $F - G$.

(6) $Y = |C - D|$; $X = |D - G|$; $X > Y$, Y contém S , que é o ponto C . Conta-se $|C - D|$ como um meio ciclo e descarta-se o ponto C . $S = D$ (Fig. 2.16 - (e)).

(7) $Y = |D - G|$; $X = |G - H|$; $X < Y$.

(8) $Y = |G - H|$; $X = |H - I|$; $X < Y$. Fim dos dados.

(9) Conta-se $|D - G|$ como um meio ciclo, $|G - H|$ como um meio ciclo, e $|H - I|$ como um meio ciclo (Fig. 2.16 - (f)).

(10) Fim da contagem.

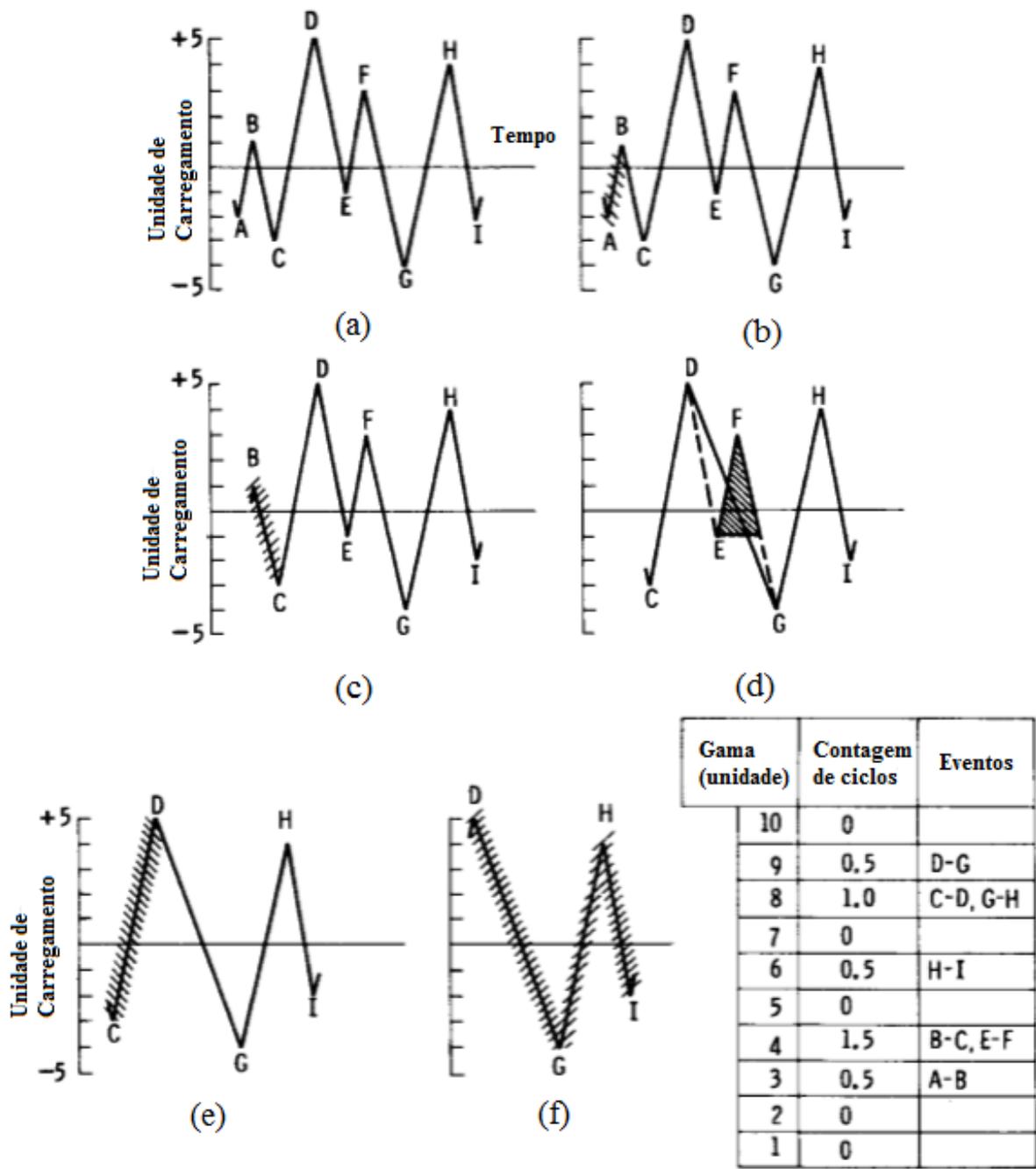


Figura 2.16 – Esquema ilustrativo da contagem de ciclos.

Usando a curva S-N, a regra de Miner é possível estimar o quanto da vida do cabo foi consumido no período da medição. Entendendo que a medição é representativo da média de solicitações que o cabo sofre ao longo de sua vida é possível extrapolar e estimar o quanto da vida do cabo foi consumido em n anos de serviço e qual a previsão para ocorrer a falha no cabo condutor.

2.8 Método previsão de vida

2.8.1 Domínio da Frequência

A caracterização de processos aleatórios pode ser expressada de duas maneiras, pelo domínio na frequência e no tempo, a análise de domínio na frequência consiste na representação por meio da transformada de Fourier, do carregamento aleatório, a que um componente estrutural esta submetido na forma de espectro de potência (PSD – Power Spectrum Density), a forma mais adequada para armazenar ciclos de amplitude de tensão é por meio de uma função de densidade de probabilidade (PDF), segundo (Bishop, 1999) (9).



Figura 2.17 – Previsão de vida de fadiga no domínio da frequência (9)

2.8.2 Domínio do Tempo

O carregamento no domínio do tempo é o tipo de carregamento que não apresenta uma amplitude constante, e para fazer o calculo de previsão de vida a fadiga de um elemento e sujeito a tensões é necessário se aplicar o método de contagem de ciclos Rainflow. Para isso um Histograma das faixas de tensão juntamente com o número de ciclos é realizado, dessa maneira a aplicação da regra de Palmgren-Miner é realizada e assim a fadiga é estimada.

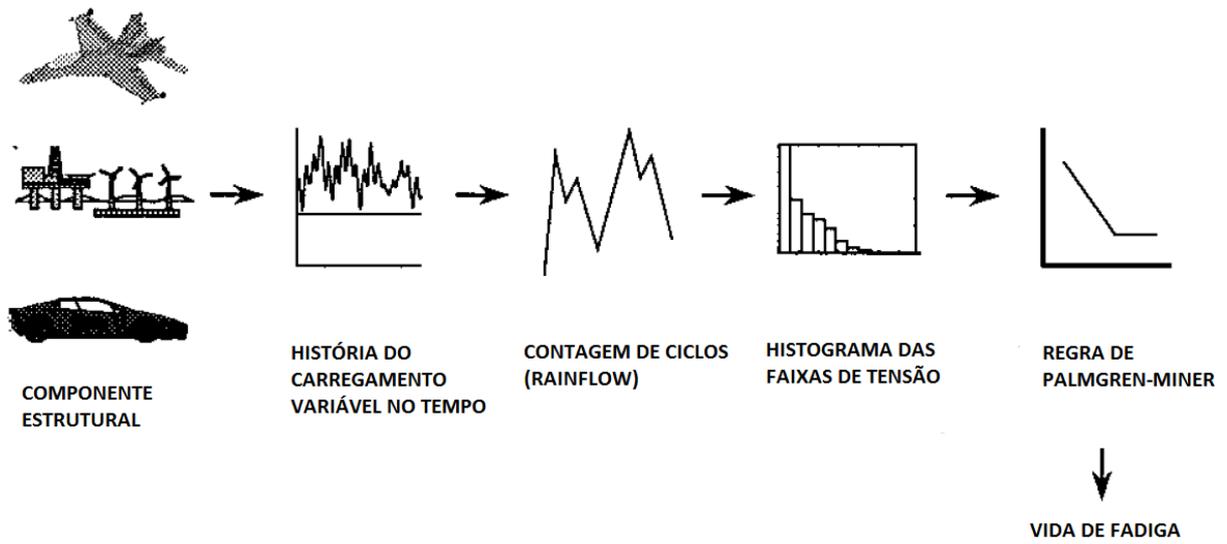


Figura 2.18 – Previsão de vida de fadiga no domínio do tempo (9)

3 Metodologia

A metodologia do trabalho se divide em duas partes a Experimental e a Computacional. A ideia central do trabalho é verificar qual o tempo necessário para monitorar um cabo condutor de energia e fazer a coleta das vibrações eólicas a qual ele está submetido, a fim de que se possa fazer uma estimativa de vida consistente do seu tempo de vida com relação à falha por fadiga. O trabalho foi inteiramente em ambiente computacional, tendo como base principal os ensaios experimentais feitos por (Watanabe, 2014) (27).

3.1 Análise Experimental

Watanabe (2014) estudou o efeito da aplicação de carregamentos aleatórios sobre a vida de fadiga de cabos condutores. Em seu trabalho, foram realizados ensaios experimentais de fadiga, com condições controladas, em cabos condutores de energia no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. O objetivo era analisar a forma clássica de previsão de vida em cabos condutores, baseando-se nas curvas de fadiga obtidas através dos experimentos.

O cabo utilizado para os ensaios foi o CAA 397,5 MCM (IBIS), possui fios de alumínio com alma de aço. O alumínio apresenta uma boa condutância de eletricidade tendo a densidade de $2,7 \text{ g/cm}^3$. O aço serve para conferir uma resistência mecânica adicional.

Para a realização do ensaio experimental foi utilizada a bancada de ensaios mecânicos à fadiga de cabos condutores de energia do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia – LABCABOS/UNB.

A Fig. 3.1 apresenta uma forma esquemática do ensaio experimental realizado, primeiramente com o auxílio de uma talha de alavanca o cabo é tracionado a carga equivalente a uma EDS de 20%, o cabo fica fixado ao Shaker eletromecânico para que o mesmo faça a excitação do cabo até que ocorra a quebra do primeiro fio de alumínio, pois esse foi o critério de falha por fadiga adotado.

Os cabos foram ensaiados em situações diferentes, em um momento o cabo foi submetido a carregamentos com amplitudes constantes e em outra a carregamento de

amplitudes variáveis e de banda estreita.

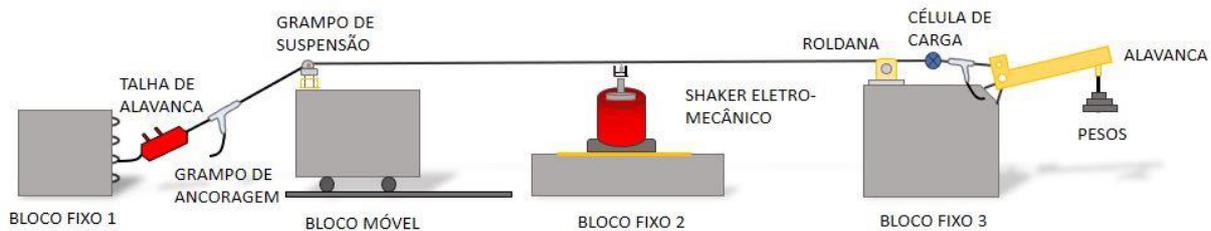


Figura 3.1 – Esquema da bancada de ensaios para ensaio de fadiga

Cada condutor foi esticado com o vão ativo de 41,5 m, após esticada foi fixada uma das extremidades do grampo de ancoragem do bloco fixo 3 (Fig. 3.1). Em seguida o corpo de prova é colocado dentro do grampo de suspensão (montado sobre o bloco móvel), tomado o devido cuidado de não danificar a região do cabo que se encontra em contato com o grampo, e os parafusos de fixação do grampo de suspensão são instalados, porém as porcas não apertadas.

A outra extremidade da amostra foi fixada no grampo de ancoragem no grampo de suspensão localizado no vão passivo de ancoragem, o bloco fixo 1, o corpo de prova é então tracionado até que a carga de tracionamento atinja o equivalente à EDS de 30%, e após o período de acomodação de 24 horas é então retirado os contra pesos até que os 20% de EDS seja atingido, em seguida se aperta as porcas do grampo de suspensão até um torque de 50Nm.

O condutor é então afixado no excitador eletromecânico (shaker), através da mesa de fixação dotada de um acelerômetro que monitora a quebra do fio através do sensor laser. O ensaio é controlado pelo software SignalStar Vector Shaker Controller através do acelerômetro que se encontra posicionado na mesa em cima do shaker.

O objetivo de Watanabe ao realizar os ensaios e experimentos era o de melhorar a curva S-N para o cabo, montando uma curva de tendência para os dados experimentais obtidos e fazer uma comparação com a curva da CIGRÉ Safe Border Line (CSBL). Analisando os resultados encontrados na Fig. 3.2 é possível verificar que para um mesmo nível de amplitude de tensão a curva S-N prevê uma vida maior do que a curva CSBL.

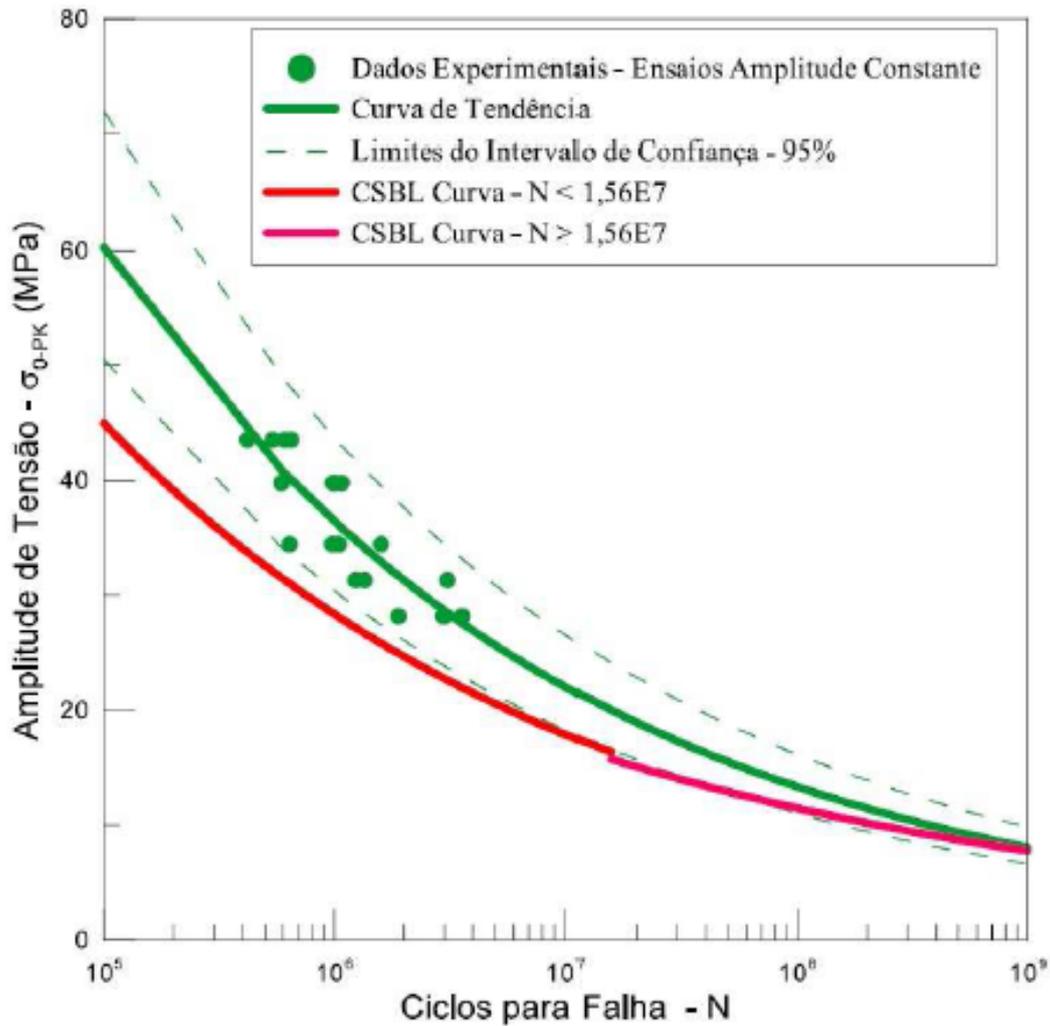


Figura 3.2 – Curva S-N experimental do condutor IBIS – Estimada com base nos resultados dos ensaios de amplitude constante.

Os experimentos com amplitudes variáveis foram feitos em 13 amostras de cabo. Para cada amostra ensaiada, foi feita uma varredura de frequência para detectar as frequências naturais do cabo. Quando a frequência de vibração de um componente é igual à natural, o fenômeno da ressonância. Caracteriza pelo aumento da amplitude de vibração, levando o material à ruptura.

Em todas as amostras, blocos de carregamentos aleatórios com uma duração de 30 minutos cada um foram aplicados nos cabos até que eles rompessem. Em cada bloco, o sinal correspondente à amplitude de deslocamento foi gravado por 10 minutos.

Os experimentos foram divididos em três grupos quanto ao nível médio de aceleração do instrumento de excitação eletromecânica. Cinco ensaios foram feitos com um nível médio de aceleração igual a $1,0g$, quatro foram feitos com $0,8g$ e outros quatro com $1,5g$, em que g corresponde à aceleração da gravidade, equivalente a aproximadamente $9,81m/s^2$. Após realizar os 13 ensaios experimentais, (Watanabe, 2014) (27) obteve como resultados as vidas experimentais dos cabos e as estimativas de dano acumulado e previsão de vida

em ciclos.

Após realizar os 13 ensaios experimentais, (Watanabe, 2014) (27) obteve como resultados as vidas experimentais dos cabos e as estimativas de dano acumulado e previsão de vida em ciclos, com base nas curvas de fadiga levantadas S-N e σ_{eq} e também na CSBL.

3.2 Análise Computacional

Ao realizar o ensaio experimental de fadiga em um cabo condutor, a intensidade de vibração eólica foi adquirida por um sistema composto de um acelerômetro e de um software, que armazenava por 10 segundos a cada 30 minutos os dados de excitação do cabo, armazenando assim blocos, do início do ensaio até a ruptura do primeiro fio de alumínio, esses blocos contabilizavam o histórico de carregamento do ensaio.

Outros resultados além desses armazenados contam a história do ensaio como o RMS, o fator de irregularidade (FI), o parâmetro de largura de banda (PL), a taxa de cruzamento de zeros e o tipo de classificação de cada ensaio.

De posse dos dados adquiridos pelos ensaios experimentais como o número de Blocos armazenados, o valor do RMS, a Frequência dominante de excitação do cabo, a largura de banda, o sinal, que relaciona a amplitude de deslocamento do cabo (amplitude zero a pico) para um determinado tempo t , será reconstruído no software Matlab e toda a análise de fadiga será feita baseado nele. A relação de Y_{0-pk} e t é representada por:

$$Y_{0-pk}(t) = A \sin 2\pi ft + \phi \quad (3.1)$$

em que $A = RMS\sqrt{2}$; f é a frequência e ϕ é o ângulo de fase, determinado de forma randômica através de um comando do software Matlab. A soma dos pares ordenados $(0 - pk, t)$ determina o sinal aleatório pretendido, possuindo uma característica estacionária e gaussiana, pois a sua média é nula e o desvio padrão é equivalente ao valor RMS.

A partir do sinal construído no software Matlab, a análise de fadiga é feita aplicando diretamente o método Rainflow e a regra de Palmgren-Miner, a análise da fadiga é feita a partir de uma rotina própria criada.

Uma maneira de observar por quanto tempo um vibrógrafo deve captar os dados de vibração eólica, para que se possa fazer uma estimativa consistente do tempo de vida de fadiga, foi realizar todo o procedimento de análise de fadiga em sinais construídos com intervalos de tempo de duração diferentes. Dessa forma, o estudo deste trabalho é feito em sinais que duram $t = [5, 10, 30, 50, 90, 120, 300, 600, 900, 1500, 1800]$ segundos.

Assim, considerando a falha por fadiga, o tempo de vida de fadiga V , fazendo a análise dos dados no domínio do tempo, dado em segundos, será calculado pela Eq. 3.2.

$$V = \frac{T_S}{D_S} \quad (3.2)$$

em que T_S , é o tempo de duração do sinal construído no Matlab e D_S o acumulado calculado com base no respectivo sinal.

Para uma melhor compreensão do procedimento adotado deste trabalho, um fluxograma foi feito, como pode ser visto na Fig. 3.3.



Figura 3.3 – Fluxograma dos procedimentos para a realização da análise numérica.

4 Resultados

O Anexo A apresenta os resultados que serão analisados neste trabalho e que foram realizados por (Watanabe, 2014) (27). Com estes resultados é possível obter as entradas necessárias para a geração do sinal aleatório, sejam elas: o valor de RMS médio da amostra, a determinação da frequência dominante, o fator de irregularidade e o dano acumulado. A partir do fator de irregularidade é possível calcular a largura de banda. Junto aos outros valores obtidos é possível alimentar o programa que realiza a análise numérica.

A Tabela 4 mostra um resumo destes valores coletados.

Utilizando estes valores é possível realizar reconstrução do sinal aleatório a partir da rotina mostrada no Apêndice A.

Com a geração deste sinal é possível realizar a predição de vida em fadiga utilizando os métodos Rainflow e de Palgrem-Miner. Para isso foram realizadas 100 simulações para cada um dos 7 ensaios, para os tempos de $t = [5, 10, 30, 50, 90, 120, 300, 600, 900, 1500, 1800]$. Para estes resultados realizaram-se regressões em potência para estimar suas curvas de convergência, conforme mostram as Figs. 4.1-4.7.

Os resultados encontrados o Ensaio 1 estão representados na Fig. 4.1, assim como a regressão em potência dos seus valores.

Tabela 4 – RMS, frequência dominante, largura de banda e tempo real de vida do cabo condutor obtidos pela análise experimental.

Ensaio	RMS (Hz)	Frequência Dominante (Hz)	Largura de Banda (λ , Hz)	Tempo real de vida do cabo condutor (Dias)
Ensaio 1	0,214	22,46	0,7806	1,5625
Ensaio 2	0,208	22,46	0,5892	1,9583
Ensaio 3	0,208	23,46	0,5577	3,0000
Ensaio 4	0,194	22,09	0,1609	5,1042
Ensaio 5	0,182	21,97	0,3299	8,9375
Ensaio 6	0,218	21,97	0,2622	1,4500
Ensaio 7	0,269	22,22	0,1094	4,3958

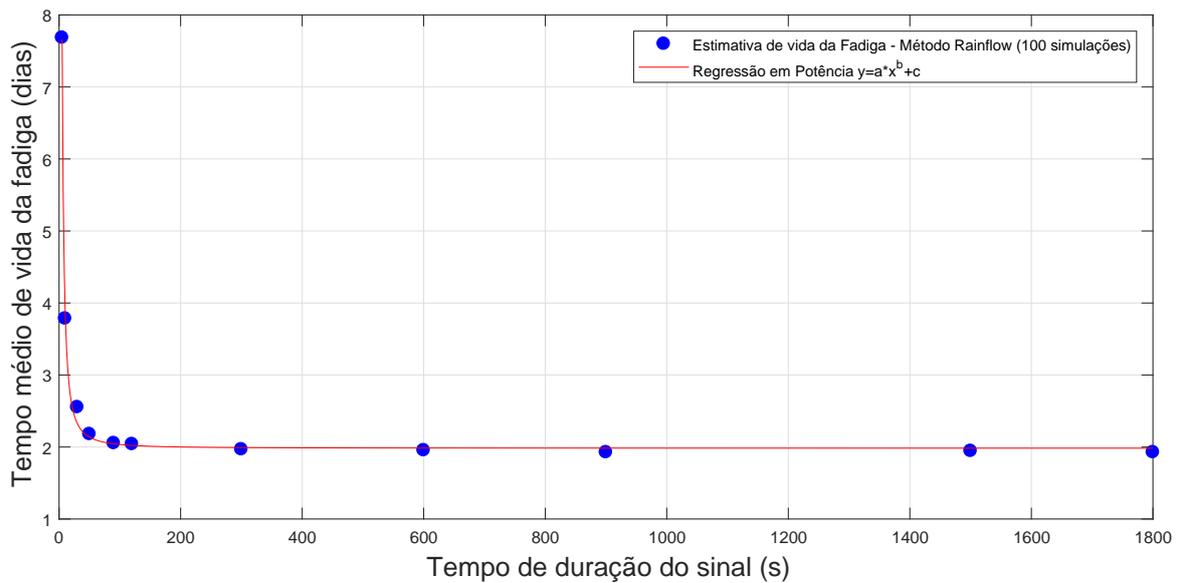


Figura 4.1 – Resultados das 100 simulações para cada tempo proposto e a regressão em potência dos valores obtidos para o ensaio 1

Os respectivos valores do tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação são mostrados na Tab. 5.

Tabela 5 – Tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação para as 100 simulações obtidas para diferentes tempos de duração do sinal gerado para o Ensaio 1

ENSAIO 1			
Tempo de duração do sinal	Tempo médio de vida (dias)	Desvio padrão (dias)	Coefficiente de variação (%)
5	7,68	16,20	210,80
10	3,78	5,18	136,76
30	2,55	0,79	30,95
50	2,18	0,57	26,06
90	2,05	0,29	14,30
120	2,04	0,14	6,95
300	1,97	0,11	5,82
600	1,96	0,11	5,54
900	1,93	0,10	4,97
1500	1,95	0,10	5,23
1800	1,93	0,10	5,09

Os resultados encontrados o Ensaio 2 estão representados na Fig. 4.2, assim como a regressão em potência dos seus valores.

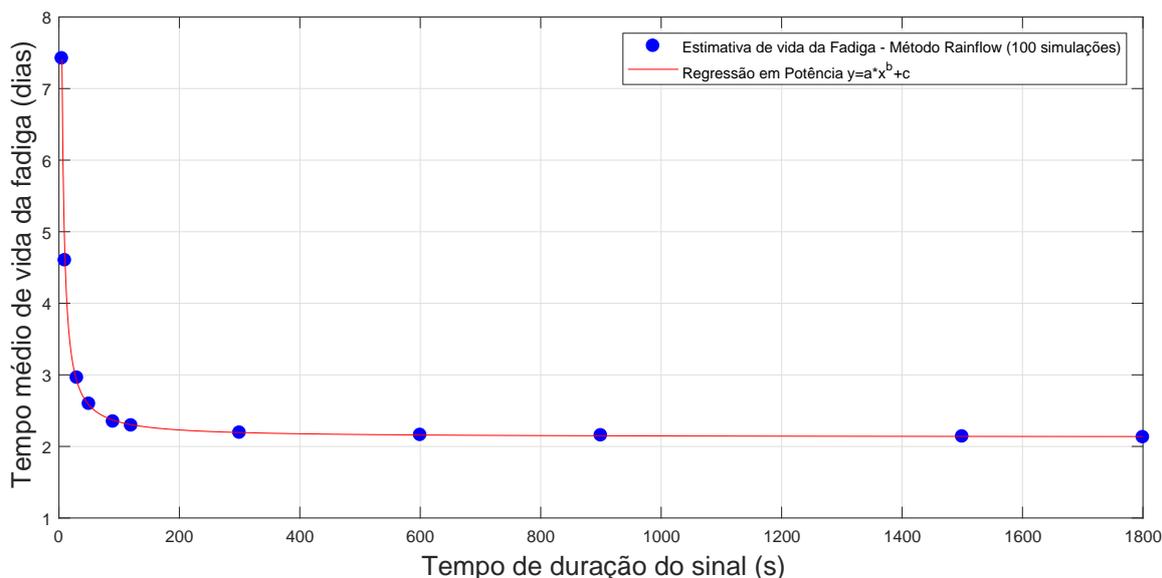


Figura 4.2 – Resultados das 100 simulações para cada tempo proposto e a regressão em potência dos valores obtidos para o ensaio 2

Os respectivos valores do tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação são mostrados na Tab. 6.

Tabela 6 – Tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação para as 100 simulações obtidas para diferentes tempos de duração do sinal gerado para o Ensaio 2

ENSAIO 2			
Tempo de duração do sinal	Tempo médio de vida (dias)	Desvio padrão (dias)	Coeficiente de variação (%)
5	7,42	9,68	130,46
10	4,60	3,79	82,28
30	2,96	1,49	50,39
50	2,59	0,71	27,19
90	2,35	0,39	16,63
120	2,29	0,30	12,89
300	2,19	0,15	6,79
600	2,16	0,13	6,06
900	2,15	0,11	5,27
1500	2,14	0,10	4,64
1800	2,15	0,10	4,97

Os resultados encontrados o Ensaio 3 estão representados na Fig. 4.3, assim como a regressão em potência dos seus valores.

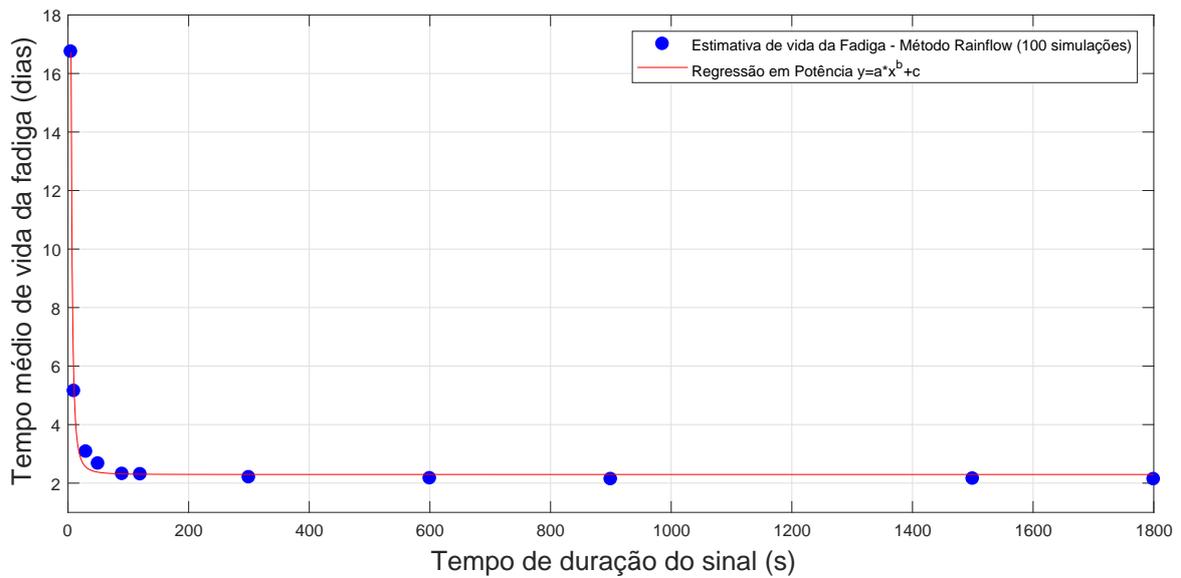


Figura 4.3 – Resultados das 100 simulações para cada tempo proposto e a regressão em potência dos valores obtidos para o ensaio 3

Os respectivos valores do tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação são mostrados na Tab. 7.

Tabela 7 – Tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação para as 100 simulações obtidas para diferentes tempos de duração do sinal gerado para o Ensaio 3

ENSAIO 3			
Tempo de duração do sinal	Tempo médio de vida (dias)	Desvio padrão (dias)	Coefficiente de variação (%)
5	16,75	66,81	398,95
10	5,15	5,84	113,46
30	3,07	1,20	39,09
50	2,67	1,02	38,41
90	2,31	0,49	21,16
120	2,30	0,30	13,18
300	2,20	0,13	6,08
600	2,16	0,13	5,80
900	2,14	0,11	4,97
1500	2,15	0,11	5,23
1800	2,13	0,11	5,07

Os resultados encontrados o Ensaio 4 estão representados na Fig. 4.4, assim como a regressão em potência dos seus valores.

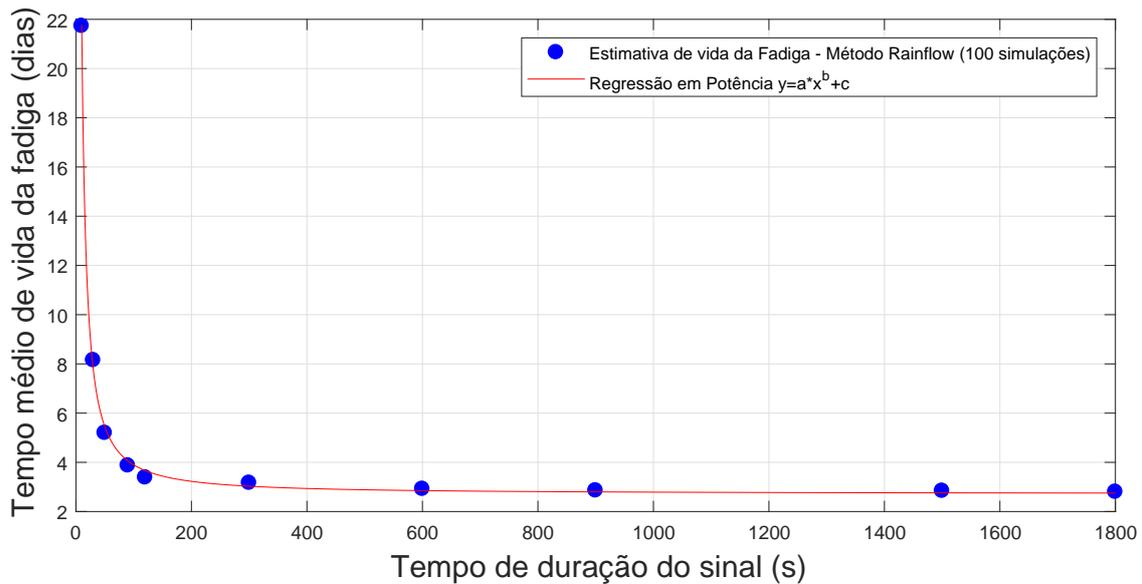


Figura 4.4 – Resultados das 100 simulações para cada tempo proposto e a regressão em potência dos valores obtidos para o ensaio 4

Os respectivos valores do tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação são mostrados na Tab. 8.

Tabela 8 – Tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação para as 100 simulações obtidas para diferentes tempos de duração do sinal gerado para o Ensaio 4

ENSAIO 4			
Tempo de duração do sinal	Tempo médio de vida (dias)	Desvio padrão (dias)	Coeficiente de variação (%)
5	706,40	923,12	648,65
10	21,77	18,45	101,77
30	6,27	4,72	75,36
50	4,80	3,44	71,68
90	4,01	1,88	46,99
120	3,71	1,60	43,12
300	3,04	0,54	18,01
600	2,93	0,18	6,36
900	2,85	0,24	8,68
1500	2,79	0,18	6,57
1800	2,79	0,15	5,54

Os resultados encontrados o Ensaio 5 estão representados na Fig. 4.5, assim como a regressão em potência dos seus valores.

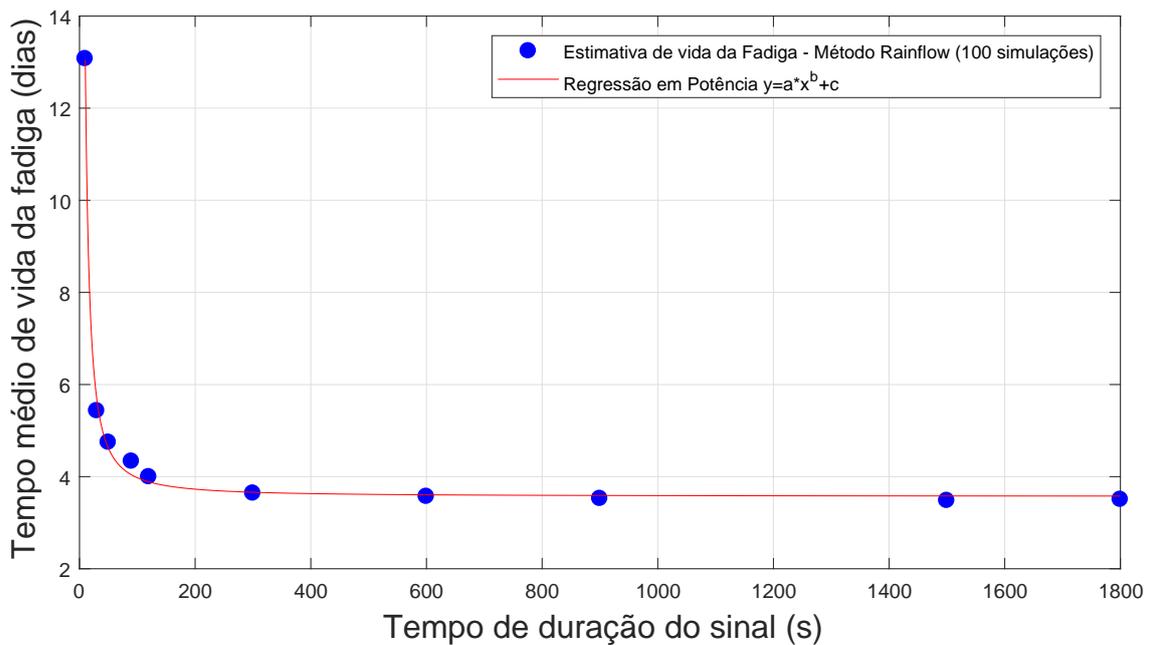


Figura 4.5 – Resultados das 100 simulações para cada tempo proposto e a regressão em potência dos valores obtidos para o ensaio 5

Os respectivos valores do tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação são mostrados na Tab. 9.

Tabela 9 – Tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação para as 100 simulações obtidas para diferentes tempos de duração do sinal gerado para o Ensaio 5

ENSAIO 5			
Tempo de duração do sinal	Tempo médio de vida (dias)	Desvio padrão (dias)	Coefficiente de variação (%)
5	151,76	943,88	621,95
10	13,07	16,19	123,81
30	5,43	2,92	53,80
50	4,74	1,97	41,46
90	4,33	1,16	26,73
120	3,99	0,83	20,79
300	3,64	0,18	4,95
600	3,57	0,16	4,49
900	3,52	0,17	4,70
1500	3,48	0,18	5,06
1800	3,50	0,17	4,87

Os resultados encontrados o Ensaio 6 estão representados na Fig. 4.6, assim como a regressão em potência dos seus valores.

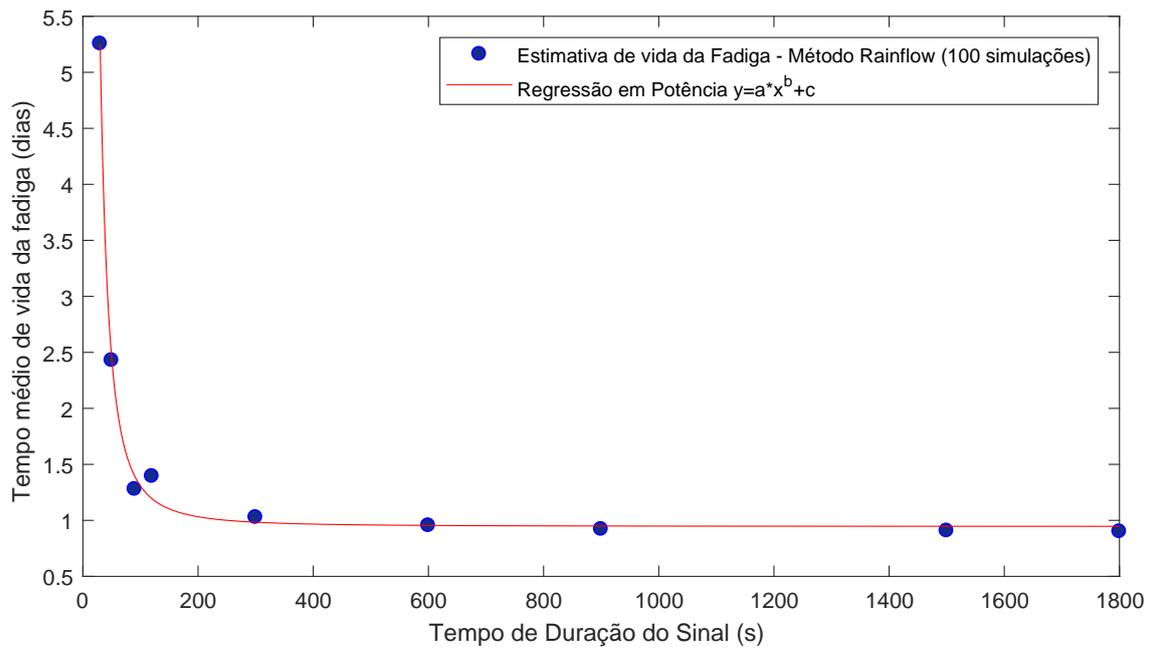


Figura 4.6 – Resultados das 100 simulações para cada tempo proposto e a regressão em potência dos valores obtidos para o ensaio 6

Os respectivos valores do tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação são mostrados na Tab. 10.

Tabela 10 – Tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação para as 100 simulações obtidas para diferentes tempos de duração do sinal gerado para o Ensaio 6

ENSAIO 6			
Tempo de duração do sinal	Tempo médio de vida (dias)	Desvio padrão (dias)	Coeficiente de variação (%)
5	195,71	1035,18	528,93
10	85,58	352,05	411,36
30	5,26	17,33	329,79
50	2,43	2,06	84,71
90	1,28	0,66	51,38
120	1,39	0,70	50,53
300	1,03	0,26	25,54
600	0,95	0,14	14,61
900	0,92	0,05	5,03
1500	0,91	0,07	7,29
1800	0,90	0,04	4,92

Os resultados encontrados o Ensaio 7 estão representados na Fig. 4.7, assim como a regressão em potência dos seus valores.

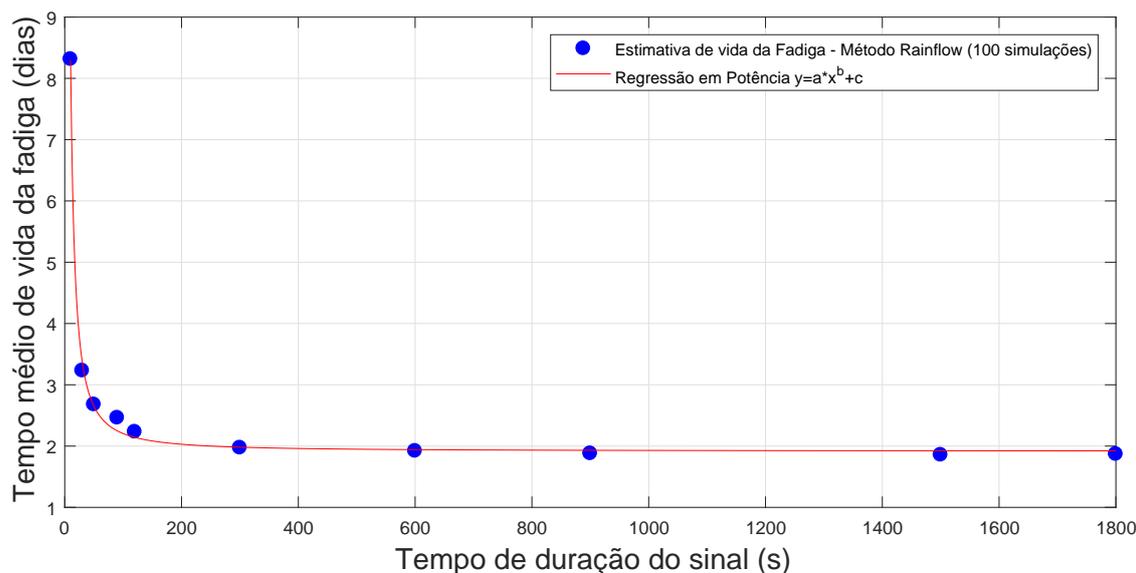


Figura 4.7 – Resultados das 100 simulações para cada tempo proposto e a regressão em potência dos valores obtidos para o ensaio 7

Os respectivos valores do tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação são mostrados na Tab. 11.

Tabela 11 – Tempo médio de vida, desvio padrão e coeficiente de variação para as 100 simulações obtidas para diferentes tempos de duração do sinal gerado para o Ensaio 7

ENSAIO 7			
Tempo de duração do sinal	Tempo médio de vida (dias)	Desvio padrão (dias)	Coeficiente de variação (%)
5	232,52	1496,77	643,71
10	8,31	12,21	146,94
30	3,23	2,06	63,64
50	2,68	1,22	45,73
90	2,46	0,93	37,62
120	2,23	0,61	27,41
300	1,97	0,21	10,88
600	1,92	0,14	7,34
900	1,88	0,11	5,66
1500	1,86	0,10	5,13
1800	1,87	0,10	5,12

Para o tempo de duração do sinal selecionado de 5 segundos é possível observar que os desvios padrões dos Ensaio 4 ao 7 extrapolam valores maiores que 900 dias. Isto acarretou em uma imprecisão das constantes de regressão em potência e por isso estes valores de 5 segundos para estes ensaios foram ignorados. Os valores das constantes de regressão são mostrados na Tab. 12.

Tabela 12 – Valores das constantes de regressão para os ensaios de 1 a 7

	a	b	c
Ensaio 1	70,40	-1,564	1,983
Ensaio 2	29,59	-1,071	2,129
Ensaio 3	557,40	-2,270	2,296
Ensaio 4	307,10	-1,207	2,715
Ensaio 5	221,80	-1,369	3,571
Ensaio 6	4744,00	-2,060	0,946
Ensaio 7	141,10	-1,345	1,916

4.0.1 Discussão dos Resultados Numéricos

Analisando as Figs. 4.1 à 4.7, juntamente com as respectivas Tabs. 5 à 11, é possível apurar que a partir de um tempo de duração do sinal gerado há uma convergência em determinado ponto do tempo médio de vida em fadiga.

Além disso, foi constatado que a estimativa do tempo de fadiga para o tempo $t = 5segundos$ não é consistente, o desvio padrão alto indica uma oscilação considerável de tempos de fadiga calculados e conclui-se não ser confiável basear-se em um sinal curto. Nota-se que a partir de determinados valores tempos de fadiga as curvas das regressões convergem para um valor de tempo médio de vida constante.

Segundo (Rigonatto, 2017) (37), se o coeficiente de variação for menor ou igual a 15%, o grau de dispersão é baixo, dando uma característica homogênea para os dados analisados. Com base nos dados obtidos é possível majorar o tempo de duração do sinal para coeficientes de variação menores que 15% conforme mostra a Tab. 13.

Tabela 13 – Valores de tempo de duração do sinal, gerados numericamente, para coeficientes menores que 15% obtidos com 100 simulações.

Ensaio	Tempo de duração do sinal (Seg)	Tempo médio de vida (Dias)	Desvio padrão (Dias)	Coeficiente de variação (%)
ENSAIO 1	90	2,05	0,29	14,3
ENSAIO 2	120	2,29	0,3	12,89
ENSAIO 3	120	2,3	0,3	13,18
ENSAIO 4	600	2,93	0,18	6,36
ENSAIO 5	300	3,64	0,18	4,95
ENSAIO 6	600	0,95	0,14	14,61
ENSAIO 7	300	1,97	0,21	10,88

A partir destes resultados percebeu-se a necessidade de refinar os valores para estimar os tempos de duração do sinal a partir de coeficientes de variação próximos e inferiores a 15%. Sobre esta perspectiva, como as simulações para estes tempos de geração

do sinal não demandam custo computacional elevado, foi realizada uma nova análise agora com 500 simulações para faixas de valores (de 5 em 5 segundos) próximas a 15% do coeficiente de variação. A partir destes resultados, selecionou-se para cada ensaio o resultado mais próximo conforme mostra a Tab. 14.

Tabela 14 – Valores de tempo de duração do sinal, gerados numericamente, para coeficientes menores que 15% com valores "refinados" com 500 simulações.

	Tempo de duração sinal	Tempo médio de vida (dias)	Desvio padrão (dias)	Coeficiente de variação (%)
Ensaio 1	80	2,10	0,31	14,69
Ensaio 2	110	2,31	0,39	14,33
Ensaio 3	115	2,31	0,34	14,86
Ensaio 4	395	2,98	0,43	14,56
Ensaio 5	200	3,76	0,53	14,16
Ensaio 6	600	0,95	0,13	14,50
Ensaio 7	245	2,01	0,28	14,30

Buscando encontrar uma estimativa coerente do tempo de vida à fadiga, usaremos as informações já coletadas que são, o tempo real de vida do cabo condutor (Dias) (tabela 4), valor esse retirado experimentalmente por Watanabe (2014), e o tempo mínimo necessário de gravação de dados de vibração eólica sofrida pelo cabo condutor, gerados numericamente para coeficientes inferiores a 15% (Tabela 14), primeiramente vamos encontrar o Tempo em porcentagem necessário de gravação para estimar a vida do cabo condutor, $T\%$.

$$T\% = \frac{T_{sinal} \cdot 100}{T_{real} \cdot 8640} \quad (4.1)$$

onde: $T\%$: é o Tempo em porcentagem necessário de gravação para estimar a vida do cabo em porcentagem.

T_{sinal} : Tempo encontrado numericamente em segundos no momento em que ocorre uma estabilização do tempo médio de vida valor em segundos.

T_{real} : Tempo real de vida do cabo, valor esse encontrado no laboratório em Dias.

Após encontrar o tempo em porcentagem ($T\%$), será necessário extrapolar esse valor para a realidade, dando conformidade a CIGRÉ (1979), que diz que a vida útil de um cabo condutor ser considerada economicamente e tecnicamente satisfatória, o cabo deve ter a vida estimada de forma mais conservativa pelo período de 30 anos. Então usaremos o tempo em porcentagem necessário de gravação para estimar a vida do cabo correlacionada com o tempo de vida estimado pela CIGRÉ, para encontrar em dias o tempo necessário de gravação de forma contínua pelo vibrógrafo para estimar o tempo de vida à fadiga do cabo condutor, da seguinte maneira.

$$T_{dias(grav)} = \frac{T_{cigré} \cdot T\%}{100 \cdot 1440} \quad (4.2)$$

onde: $T_{dias(grav)}$: Tempo de gravação contínuo para estimar a vida do cabo condutor em dias.

$T_{cigré}$: Tempo estimado de vida do cabo de acordo com a CIGRÉ em dias.

T%: Tempo em porcentagem necessário de gravação para estimar a vida do cabo em porcentagem.

Baseado na tabela em anexo chegamos ao resultado deste trabalho ao encontrar o tempo necessário de gravação de forma contínua do vibrógrafo para estimar a vida do cabo em dias.

Tabela 15 – Valores referente ao tempo necessário de gravação estimativo da vida em fadiga do cabo condutor.

ENSAIOS	Tempo de duração do sinal que apresentou variação inferior a 15% (Seg)	Tempo real de vida do cabo (Dias)	Tempo de gravação necessário para estimar a vida do]cabo (%)	Tempo necessário de gravação contínuo do vibrógrafo para estimar a vida (Dias)
ENSAIO 1	80	1,5625	0,059	6,49
ENSAIO 2	110	1,9583	0,065	7,12
ENSAIO 3	115	3,000	0,044	4,86
ENSAIO 4	395	5,1042	0,090	9,81
ENSAIO 5	200	8,9375	0,026	2,84
ENSAIO 6	600	1,4500	0,479	52,48
ENSAIO 7	245	4,3958	0,065	7,07

5 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo realizar uma análise computacional que permitisse avaliar a vida em fadiga de cabos condutores, através de uma análise temporal, utilizando os métodos Rainflow e de Palmgren-Miner. A partir de alguns ensaios experimentais realizados por (Watanabe, 2014) (27) foi possível obter os valores de entrada (o tempo de duração do sinal, a frequência dominante, a largura de banda e o valor RMS) que alimentassem a rotina numérica codificada em MATLAB.

O algoritmo proposto realiza a geração de um sinal aleatório que permite realizar a análise temporal de predição de vida em fadiga. Para cada um dos 7 ensaios sugeridos realizou-se 100 simulações para diferentes tempos de duração do sinal gerado. Concluiu-se que a partir de um determinado tempo de duração do sinal, há uma convergência do tempo médio de vida em fadiga. Foi realizada uma regressão em potência que auxiliasse a extrapolação dos dados obtidos para os 7 ensaios.

Além de determinar os tempos médios de vida, realizou-se os cálculos dos coeficientes de variação. Para se determinar a característica homogênea dos dados coletados, (Rigonatto, 2017) (37) sugere que o coeficiente de variação seja menor que 15%. Realizou-se, portanto, uma análise mais refinada destes resultados com a finalidade de se obter coeficientes de variação próximos do valor sugerido. Para tanto, simulou-se 500 novas iterações para cada tempo e para cada ensaio, obtendo-se com precisão a convergência ideal. Como resultado final foi possível obter, para cada ensaio, o tempo médio de duração do sinal gerado, que seja suficiente para a obtenção da previsão média de vida em fadiga.

Desconsiderando os fatores como intervalo, tempo de gravação e temperatura ambiente que são fatores que podem interferir na autonomia do vibrógrafo, no melhor dos casos um gravador da marca comercial Vibrec que pode captar dados de 10 segundos a cada 15 minutos por 12 meses (tabela 3), proporcionaria uma totalidade de 4,05 dias de gravação. Foi possível verificar de acordo com os resultados da tabela 15 que o tempo necessário para gravar as informações e realizar uma previsão de vida do cabo condutor, seria possível apenas no Ensaio 5, que apresenta um tempo de gravação inferior a capacidade do vibrógrafo, em todos os outros ensaios o tempo superior ao que o equipamento pode armazenar.

5.1 Perspectivas

- Buscar realizar estudo numérico para melhorar o tempo médio de vida do cabo, entendendo todas as variáveis que faz com que em alguns casos esse valor fca muito longe do tempo real de vida.
- Realizar um trabalho numérico usando o método no domínio da frequência e fazer um comparativo com o trabalho atual feito no domínio do tempo

Referências

- 1 BOTHMA, J. Transmission line tower collapse investigation: A case study. In: *IEEE Power and Energy Society Conference and Exposition in Africa: Intelligent Grid Integration of Renewable Energy Resources (PowerAfrica)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–8. Citado 3 vezes nas páginas [x](#), [2](#) e [4](#).
- 2 EPRI. *Industry Standard Reference on Transmission Line Vibration*. [S.l.: s.n.], 1979. Citado 3 vezes nas páginas [x](#), [2](#) e [3](#).
- 3 FADEL, A. A. Avaliação do efeito de tracionamento em elevados níveis de eds sobre a resistência em fadiga do condutor ibis (caa 397,5 mcm). *243 f. Tese (Doutor) - Universidade de Brasília*, 2012. Citado 6 vezes nas páginas [x](#), [4](#), [7](#), [9](#), [12](#) e [17](#).
- 4 BENDAT, J. S.; PIERSOL, A. G. *Random data: Analysis and measurement procedures*. *Wiley-Interscience*, 1971. Citado 2 vezes nas páginas [x](#) e [13](#).
- 5 JOHANNESSON, P. Rainflow analysis of switching markov loads. *Tese (Doutorado)*. *Lund Institute of Technology*, 1999. Citado 2 vezes nas páginas [x](#) e [14](#).
- 6 PFISTERER, A. Vibrec recorders. *Lucerna, Suíça*, 2015. Citado 2 vezes nas páginas [x](#) e [16](#).
- 7 M., M.; T., E. *Fatigue of metals subjected to varying stress – Fatigue lives under random loading*. [S.l.: s.n.], 1968. Citado 3 vezes nas páginas [x](#), [1](#) e [20](#).
- 8 DONALDSON, K. H. Field data classification and analysis techniques. *USA: SAE Technical Paper 820685*, 1982. Nenhuma citação no texto.
- 9 BISHOP, N. W. M. Vibration fatigue analysis in the finite element environment. *XVI Encuentro del Grupo Español de Fractura*, 1999. Citado 3 vezes nas páginas [x](#), [23](#) e [24](#).
- 10 FURTADO, T. Vibração eólica em linhas de transmissão e subtransmissão, treinamento técnico. *CEMIG*, 2001. Citado 2 vezes nas páginas [xiii](#) e [12](#).
- 11 HENRIQUES, A. M. D. Bancada de ensaios mecânicos a fadiga de cabos condutores de energia. *162 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília*, 2006. Citado 5 vezes nas páginas [xiii](#), [4](#), [11](#), [12](#) e [18](#).
- 12 PALMGREN, A. *Die Lebensdauer von Kugellagern*. [S.l.: s.n.], 1924. Citado 2 vezes nas páginas [1](#) e [17](#).
- 13 A., M. M. *Cumulative Damage in Fatigue*. [S.l.: s.n.], 1945. p. A159-A164 p. Citado 2 vezes nas páginas [1](#) e [17](#).
- 14 STOCKBRIDGE, G. H. *Overcoming vibration in transmission cables*. [S.l.: s.n.], 1925. p. 1334-1335 p. Citado na página [3](#).

- 15 VARNEY, T. *Notes on the Vibration of Transmission-Line Conductors*. [S.l.: s.n.], 1926. p. 791-795 p. Citado na página 3.
- 16 J., N. *Dérangements occasionnés par les oscillations mécaniques des conducteurs aériens et leur remède*. [S.l.: s.n.], 1933. Citado na página 3.
- 17 LABEGALINI, P. R. et al. *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*. [S.l.: s.n.], 1992. Citado na página 3.
- 18 JR., R. F. S. *Strains Induced in Transmission Line Cable by Aeolian Vibration*. [S.l.: s.n.], 1954. Citado na página 3.
- 19 HARD, A. R. *Studies of conductor Vibration in laboratory span, Outdoor Test Span and Actual Transmission Lines*. [S.l.: s.n.], 1958. Citado na página 3.
- 20 ZETTERHOLM, O. D. *Report on the work of the international CIGRÉ SC, 110,6: bare conductors and mechanical calculation of overhead lines*. [S.l.: s.n.], 1960. Citado na página 3.
- 21 EDWARDS, A. T.; BOYD, J. M. *Ontario Hydro Live-Line Vibration Recorder For Transmission Line Conductors*. [S.l.: s.n.], 1963. v. 82 p. Citado na página 3.
- 22 POFFENBERGER, J. C.; SWART, R. L. *Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain*. [S.l.: s.n.], 1965. v. 84, n.4, p.281-289 p. Citado na página 4.
- 23 JR, W. G. F.; RAWLINS, C. B. *Importance of Fretting in Vibration Fatigue of Stranded Conductors*. [S.l.: s.n.], 1968. Vol. PAS-87, No 6, pp.1381-1384 p. Citado na página 4.
- 24 RAMEY, G. E.; SILVA, J. M. *An experimental evaluation of conductor aeolian fatigue damage mitigation by amplitude reduction*. [S.l.: s.n.], 1981. p. 4935-4940 p. Citado na página 4.
- 25 GOPALAN, T. V. New excitation system for indoor testing of overhead conductors. *Journal of Energy Engineering, ASCE*, p. p. 159–167, 1993. Citado na página 4.
- 26 ZHOU, Z. R.; GOUDREAU, S.; CARDOU, A. Single wire fretting fatigue test for electrical conductor bending fatigue evaluation. *WEAR*, p. p. 181–183, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 11.
- 27 WATANABE, L. Análise da vida à fadiga de cabos condutores de energia submetidos a carregamentos aleatórios. *Tese de doutorado em ciências mecânicas, Universidade de Brasília*, 2014. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/18038/1/2014_LarissaWatanabe.pdf>. Citado 8 vezes nas páginas 5, 15, 25, 27, 28, 30, 41 e 53.
- 28 HALFPENNY, A. *A practical Introduction to Fatigue*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 6.
- 29 ARIDURU, S. Fatigue life calculation by rainflow cycle counting method. *Middle East Technical University*, 2004. Citado na página 6.
- 30 CIGRÉ. *SC22 WG04. Endurance capability of conductors*. [S.l.: s.n.], 1988. 19 p. p. Citado na página 10.
- 31 BARNARD, R. H. Aerodynamic characteristics and instabilities of catenary-suspended roadway luminaries. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995. Citado na página 11.

- 32 BISHOP, N. W. M.; SHERRAT, F. Fatigue life prediction from power spectral density data. 1989. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.
- 33 PEREIRA, B. d. B.; PAIS, M. B. Z.; SALES, P. R. d. H. Análise espectral de séries temporais. *Rio de Janeiro: Arte Final Leasing Editorial Ltda*, 1986. Citado na página 13.
- 34 HAYKIN, S. Communication systems. *John Wiley & Sons*, 2001. Citado na página 13.
- 35 LEE, Y.-l. Fatigue testing and analysis. *Elsevier*, 2005. Citado na página 15.
- 36 LANGER, B. F. Fatigue failure from stress cycles of varying amplitude. *Journal of Applied Mechanics*, p. v. 59, p. A160–A162, 1937. Citado na página 17.
- 37 RIGONATTO, M. Coeficiente de variação. *Brasil Escola*. Acesso em 04 de dezembro de 2017., 2017. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/matematica/coeficiente-variacao.htm>>. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 41.

Apêndices

A Rotinas Numéricas

Neste apêndice são apresentadas as rotinas numéricas para a geração do sinal aleatório e métodos Rainflow e Palmgren-Miner.

A.1 Programa Principal

Algoritmo 1 *main.m*: Programa principal - Geração do sinal/ Método Rainflow/ Palmgren-Miner

```
1 % function [t_dias_rain, t_dias_dirlik_pwelch, rms_sinal] = main
2 close all; clear all; clc;
3 addpath tempo frequencia
4
5 %% Dados para a geração do sinal
6 nb = 70; %Número de blocos
7 t_real = nb*1800./(3600*24); %[Dias] - Tempo real de vida
8
9 %Frequencia dominante [Hz]
10 Fd = 22.22; %Colocar a variável de entrada
11
12 %Largura de Banda
13 B = 0.1094; %Colocar a variável de entrada
14
15 %Valor RMS previsto para cada banda do Sinal [mm]
16 RMSp_1 = 0.269; %Colocar a variável de entrada
17
18 %Número de simulações
19 N_simul=100;
```

Algoritmo 2 *main.m*: continuação parte 1

```
1 %% Sinal Gerado
2
3 PASSO=1;
4 PASSO_FIG=1;
5 %%Tamanho da Amostra
6 for tempo_amostra = [5 10 30 50 90 120 300 600 900 1500 1800] %[s]
7     %% Cálculos Preliminares
8     %%Constante de Aquisição (relação entre a frequência de aquisição ...
9     e a máxima frequência contida no sinal)
10    C = 2;
11    %%Número de componentes espectrais
12    K = 100;
13    Fmax_1 = Fd+B/2; %(Frequência dominante 1 + largura de banda 1)/2
14    Faq_1 = C*Fmax_1;
15    dt = 1/Faq_1;
16
17    N = ceil((tempo_amostra/dt));
18
19    %%RMS = AMPLITUDE/RAIZ DE 2
20    A_1 = RMSp_1*(2/K)^0.5;
21
22    %%Amplitudes das componentes espectrais e Vetor Frequencia
23    for i=1:K
24        t1 = (Fd-B/2+i*(B/K));
25        f_1(i) = 2*pi()*t1;
26        Amp_1(i) = A_1;
27    end
28
29    %% Estimativa de vida de fadiga
30    for i = 1:N_simul
31        fase_1 = 2*pi()*rand(K,1);
32        %% Geração do Sinal - Soma
33        for n = 1:N
34            SINAL(n) = 0;
35            T(n) = n*dt;
36            for j=1:K
37                SINAL(n) = SINAL(n) + ...
38                    Amp_1(j)*sin(f_1(j)*T(n)+fase_1(j));
39            end
40        end
41    end
42 end
```

Algoritmo 3 *main.m*: continuação parte 2

```
1      tempo_de_amostra = N*dt;
2      media_sinal(i) = mean(SINAL);
3      rms_sinal(i) = std(SINAL);
4
5      d_rainflow(i) = rainflow(SINAL);
6      t_dias_rain(i) = tempo_de_amostra/(d_rainflow(i).*60*60*24);
7  end
8  t_dias_rainflow(PASSO,:) = [tempo_amostra mean(t_dias_rain) ...
9      std(t_dias_rain) 100*std(t_dias_rain)/mean(t_dias_rain)]
10 figure(PASSO_FIG)
11 histogram(t_dias_rain)
12 xlabel('Tempo (dias)', 'FontSize',16); ylabel('Número de ...
13     Observações', 'FontSize',16)
14 legend('Histograma - Tempo de vida de Rainflow (100 ...
15     simulações)', 'Location', 'NorthEast');
16
17 figure(PASSO_FIG+1)
18 gauss_y = gaussmf(0:0.01:max(t_dias_rain), [std(t_dias_rain) ...
19     mean(t_dias_rain)]);
20 plot(0:0.01:max(t_dias_rain), gauss_y)
21 xlabel('Tempo (dias)', 'FontSize',16); ylabel('Número de ...
22     Observações', 'FontSize',16)
23 legend(('Gaussiana'), 'Location', 'NorthEast');
24 PASSO=PASSO+1;
25 PASSO_FIG=PASSO_FIG+2;
26 end
27
28 %% Fit: 'untitled fit 1'.
29 [xData, yData] = prepareCurveData( t_dias_rainflow(:,1), ...
30     t_dias_rainflow(:,2) );
31
32 % Set up fitype and options.
33 ft = fitype( 'power2' );
34
35 % Fit model to data.
36 [fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft)
37
38 % Plot fit with data.
39 figure( 'Name', 'untitled fit 1' );
40 h = plot( fitresult, xData, yData);
41 set(h, 'MarkerSize',25)
42 legend( h, 'Estimativa de vida da Fadiga - Método Rainflow (100 ...
43     simulações)', 'Regressão em Potência y=a*x^b+c', 'Location', ...
44     'NorthEast' );
45
46 % Label axes
47 xlabel('Tempo de duração do sinal (s)', 'FontSize',16)
48 ylabel('Tempo médio de vida da fadiga (dias)', 'FontSize',16)
49 grid on
```

A.2 Método Rainflow

Algoritmo 4 *rainflow.m*: Método Rainflow

```
1 function [dano_RF] = rainflow(SINAL)
2
3 %---ESTIMATIVA DO DANO USANDO RAINFLOW MAIS REGRA DE PALMGREN-MINER---%
4 %PARAMETROS DA CURVA Ypp-N PICO A PICO
5 KP = 1.761203*(10^6); mP = -3.490179;
6
7 %PARAMETROS DA CURVA Y0p-N 0 A PICO
8 KA = 1.567331*(10^-5); mA = 3.490179;
9
10 %IDENTIFICAÇÃO DE PICOS E VALES
11 num= length(SINAL); R = num; k = 1; i = 2;
12 PCV(1)=SINAL(1);
13 while i < R
14     flag = 1;
15     while flag == 1 && i < R
16         b = PCV(k);
17         c = SINAL(i);
18         d = SINAL(i+1);
19         slope1=(c-b);
20         slope2=(d-c);
21         DELTA = abs(slope1-slope2);
22         if ((slope1*slope2)<0 && DELTA > 0 )
23             k=k+1;
24             PCV(k)=SINAL(i); % dá os valores de pico e vale
25             flag = 0;
26         end
27         i = i + 1;
28     end
29 end
30 N = length(PCV); %Quantidade de picos e vales (quantidade de ...
    extremos locais)
31
32 %ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO DAS GAMAS DE TENSÃO
33 %Contagem dos ciclos Rainflow - Coluna 1: Pico - vale ou vale - pico ...
    Coluna 2: Quantidade de ciclos
34 AA = RFa(PCV,0.001);
35 [LINHA, ~] = size(AA); %size = número de linhas, número de colunas
36 TOLER = 0.001;
37 j = 1;
38 for k = 1:LINHA
39     if (AA(k,2) == 0.5 && AA(k,1) ≥ TOLER)
40         GAMAS(j) = AA(k,1);
41         j = j + 1;
42     elseif AA(k,1) ≥ TOLER
43         GAMAS(j) = AA(k,1);
44         GAMAS(j+1) = AA(k,1);
45         j = j+2;
46     end
47     J = j-1;
48 end
49 TAM = length(GAMAS);
50 A = (GAMAS./2).^mA;
51 D_rainf = KA*sum(A); dano_RF = D_rainf;
52 end
```

A.3 Leitura de Picos e Vales

Algoritmo 5 *RF.m*: Leitura de Picos e Vales

```
1 function [RESPOSTA] = RF(a,TOL)
2 %a - Matriz que contém os picos e vales identificados
3 pontos = 3;
4 Npontos = numel(a);%Quantidade de elementos
5 j = 1;
6 flag_2 = 'C';
7 while(pontos < Npontos)
8     flag_1 = 1;
9     while(flag_1)
10        while(pontos < 3 )
11            pontos = pontos + 1;
12        end
13        if pontos > Npontos
14            flag_2 = 'A';
15            break;
16        end
17        E = abs(a(pontos - 2) - a(pontos - 1)); D = abs(a(pontos - ...
18            1) - a(pontos));
19        if E > D
20            pontos = pontos + 1;
21        else flag_1 = 0;
22        end
23        if flag_2 == 'C'
24            B(j,1)= E; j = j+1;
25        end
26        if pontos == 3 && flag_2 == 'C' % Identificou que o evento está no ...
27            início da Contagem (ponto de Start) ou no final da contagem
28            B(j-1,2)= 0.5;
29            for k = 2:Npontos
30                a(k - 1) = a(k);
31            end
32            Npontos = Npontos - 1;
33            elseif flag_2 == 'C'
34                % Identificou que o evento está no meio da contagem
35                B(j-1,2)= 1;
36                for k = pontos:Npontos
37                    a(k - 2) = a(k);
38                end
39                Npontos = Npontos - 2;
40                pontos = pontos - 1;
41            end
42        end
43        TAM = length(B); kk = 1;
44        for k = 1:TAM
45            if B(k,1) > TOL
46                BB(kk,1) = B(k,1);
47                BB(kk,2) = B(k,2); kk = kk+1;
48            end
49        end
50        RESPOSTA = BB;
51    end
```

Anexos

A Resultados Experimentais

Neste capítulo são mostrados os resultados para diferentes ensaios experimentais obtidos por (Watanabe, 2014) (27).

A.0.1 Ensaio 1

Os resultados encontrados para este ensaio foram:

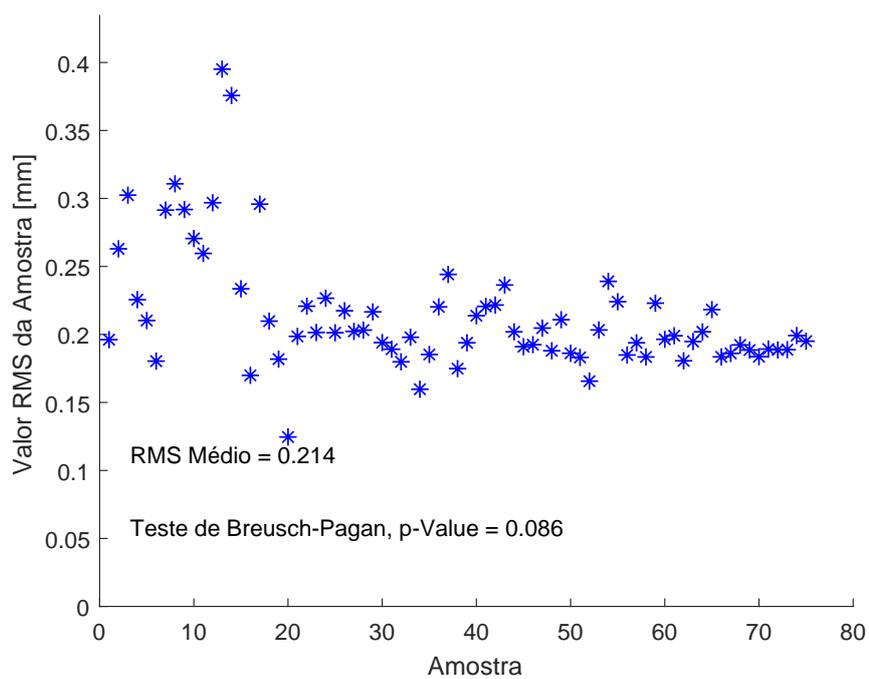


Figura A.1 – Valor RMS da amostra para o Ensaio 1

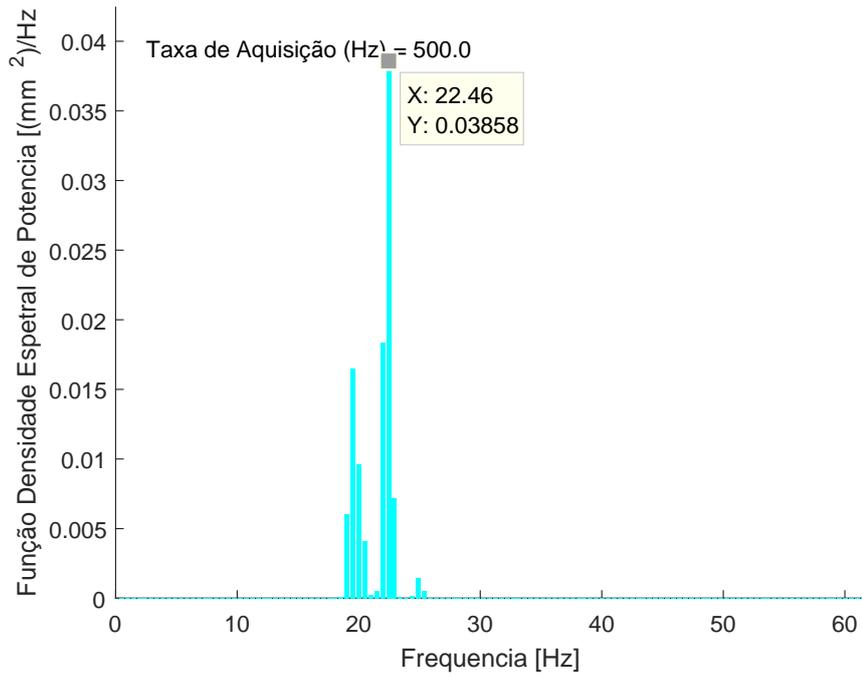


Figura A.2 – Função densidade espectral para o Ensaio 1

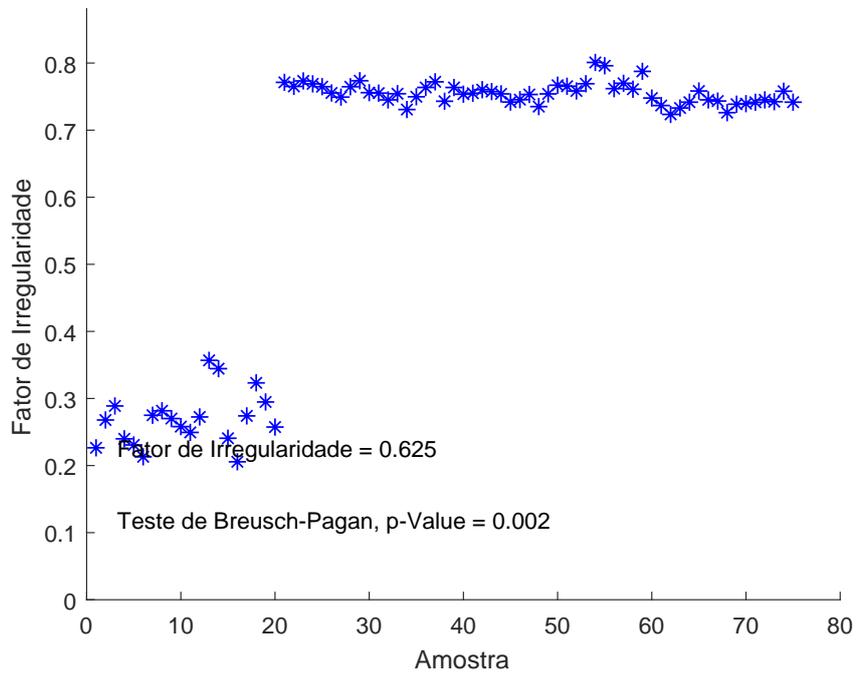


Figura A.3 – Fator de irregularidade para o Ensaio 1

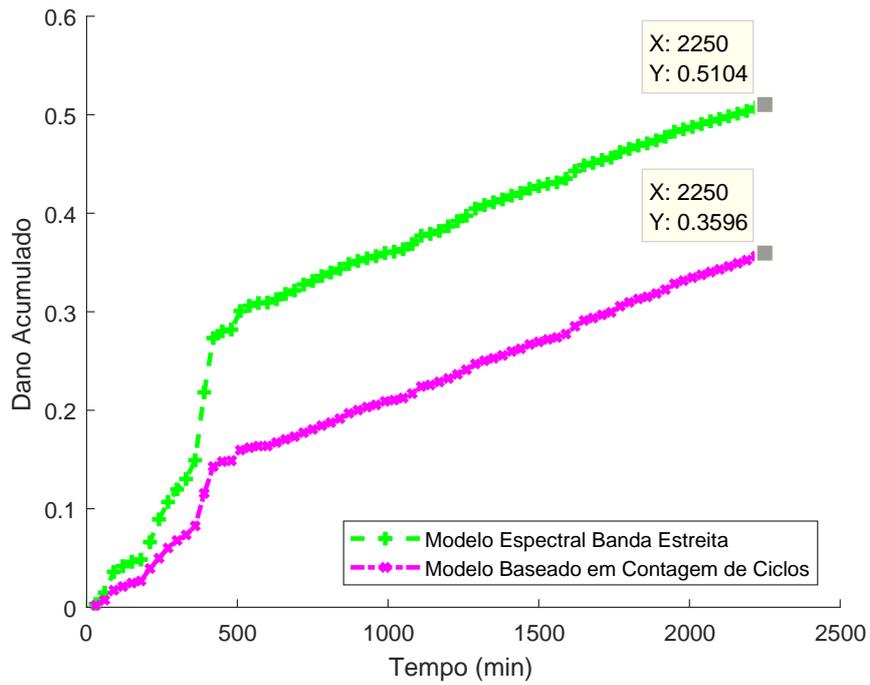


Figura A.4 – Dano acumulado para o Ensaio 1

A largura de banda pode ser calculada utilizando o fator de irregularidade $\lambda = \sqrt{1 - \gamma^2} = \sqrt{1 - 0,625^2} = 0,7806$.

A.0.2 Ensaio 2

Os resultados encontrados para este ensaio foram:

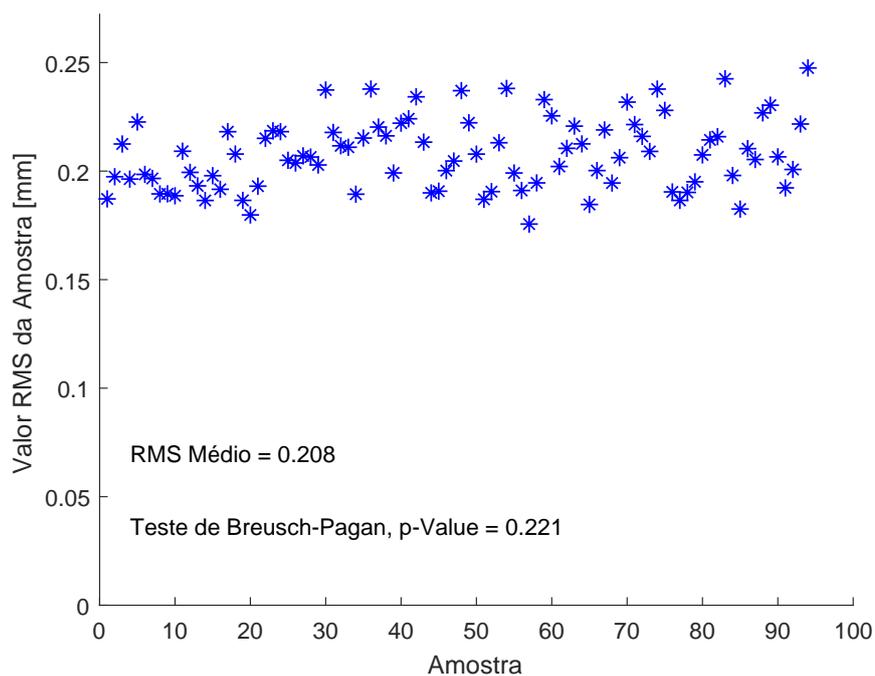


Figura A.5 – Valor RMS da amostra para o Ensaio 2

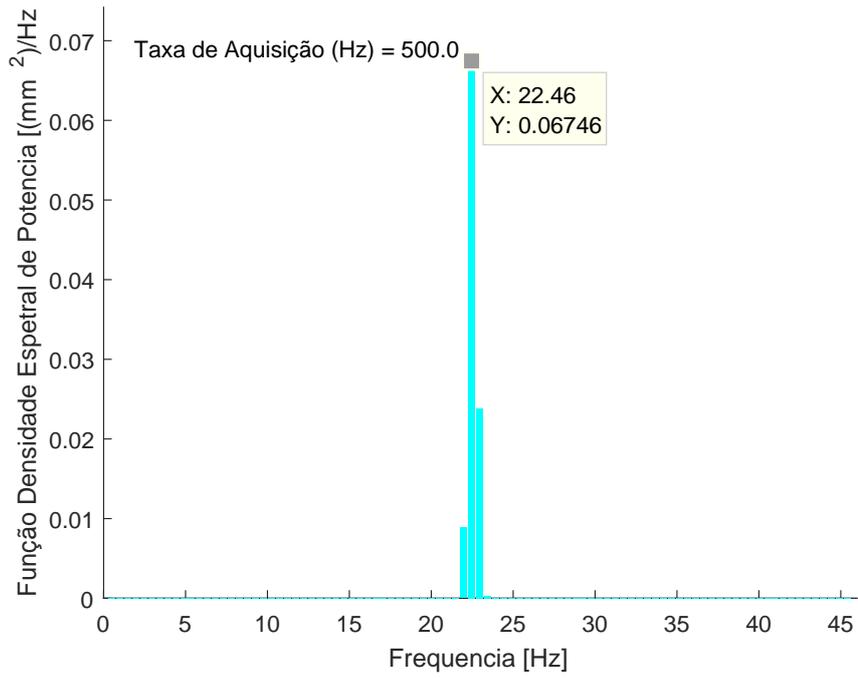


Figura A.6 – Função densidade espectral para o Ensaio 2

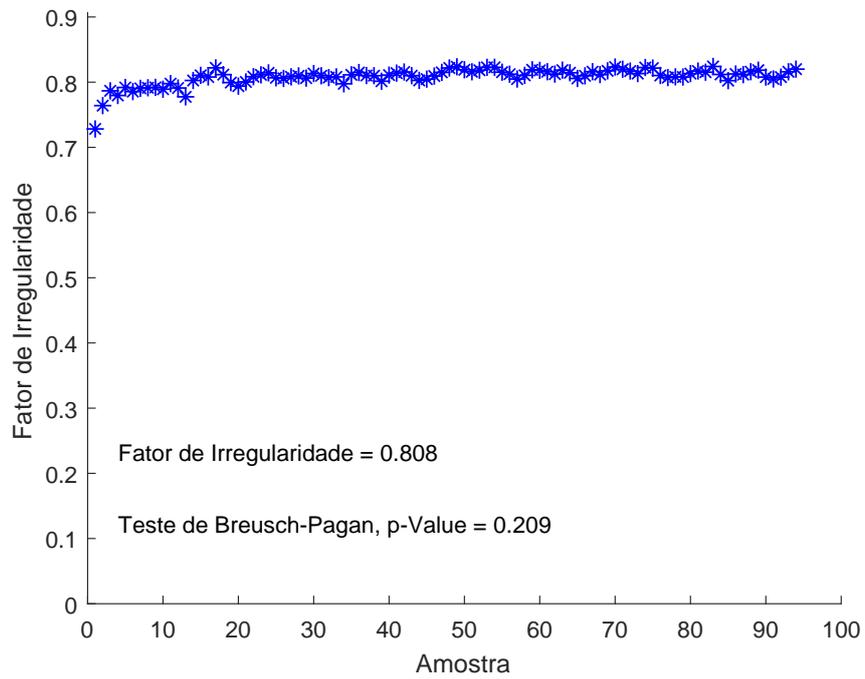


Figura A.7 – Fator de irregularidade para o Ensaio 2

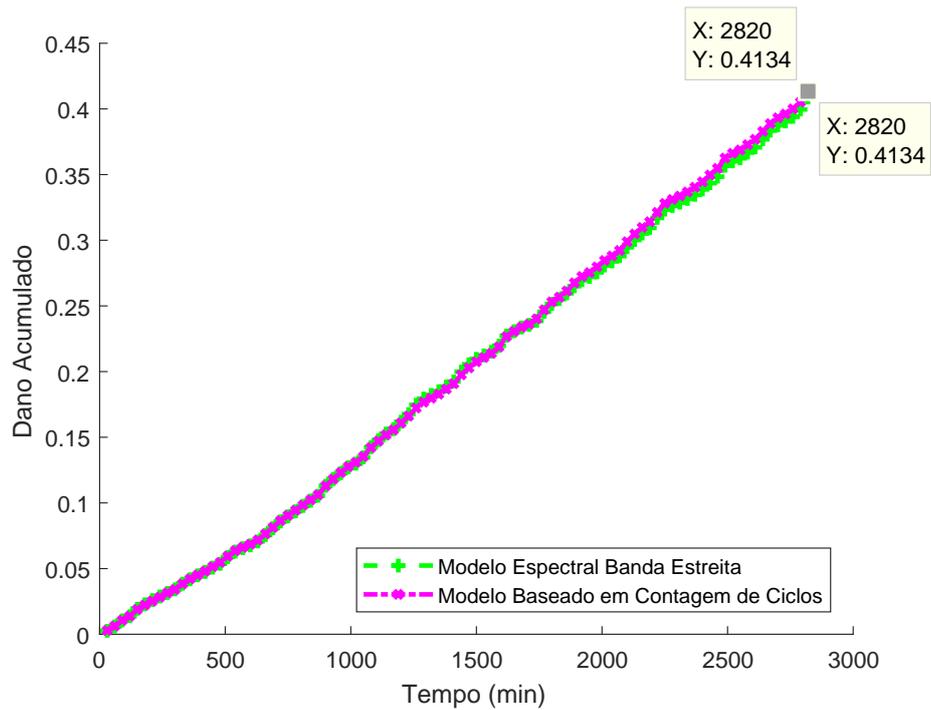


Figura A.8 – Dano acumulado para o Ensaio 2

A largura de banda pode ser calculada utilizando o fator de irregularidade $\lambda = \sqrt{1 - \gamma^2} = \sqrt{1 - 0,808^2} = 0,5892$.

A.0.3 Ensaio 3

Os resultados encontrados para este ensaio foram:

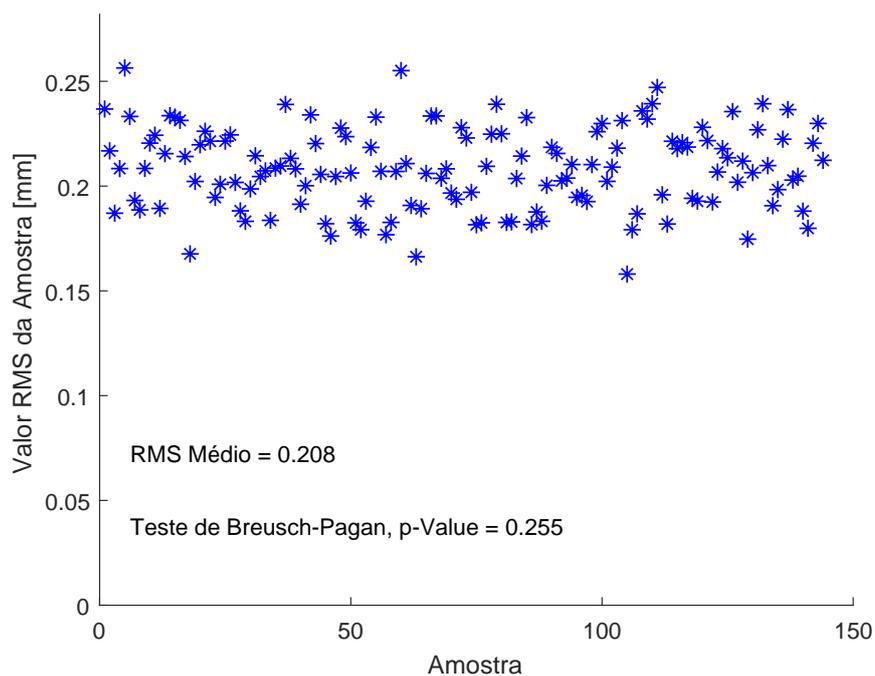


Figura A.9 – Valor RMS da amostra para o Ensaio 3

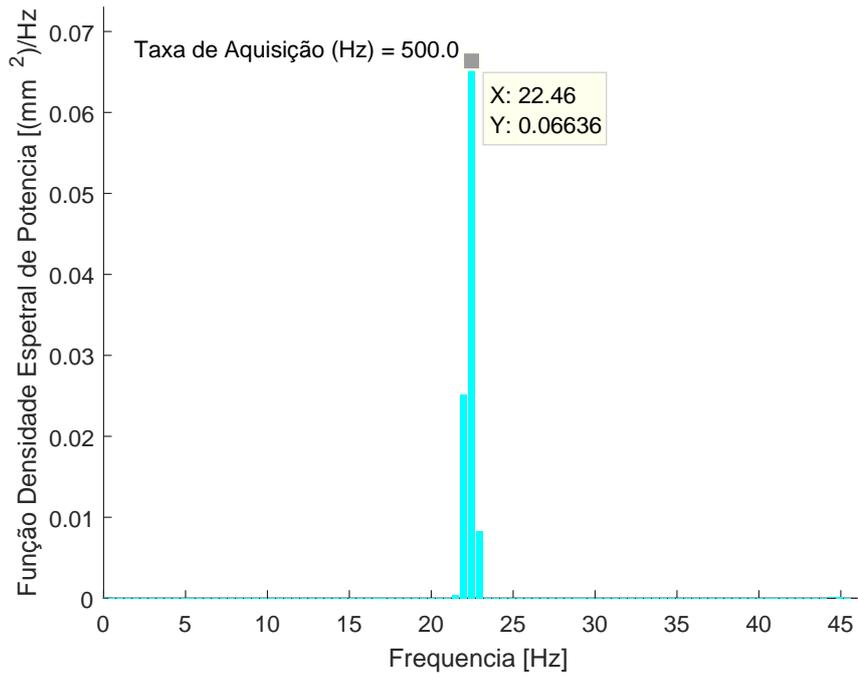


Figura A.10 – Função densidade espectral para o Ensaio 3

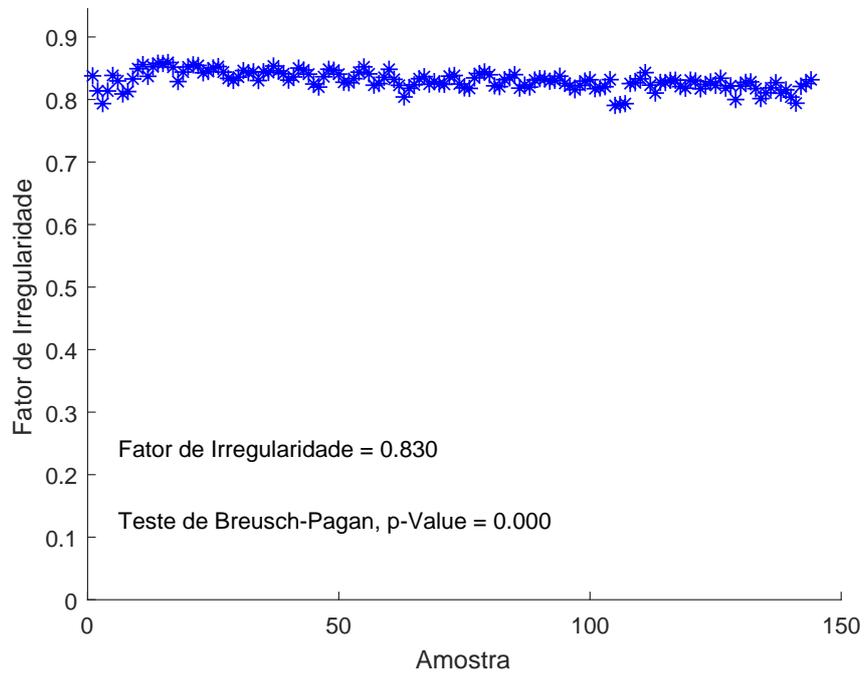


Figura A.11 – Fator de irregularidade para o Ensaio 3

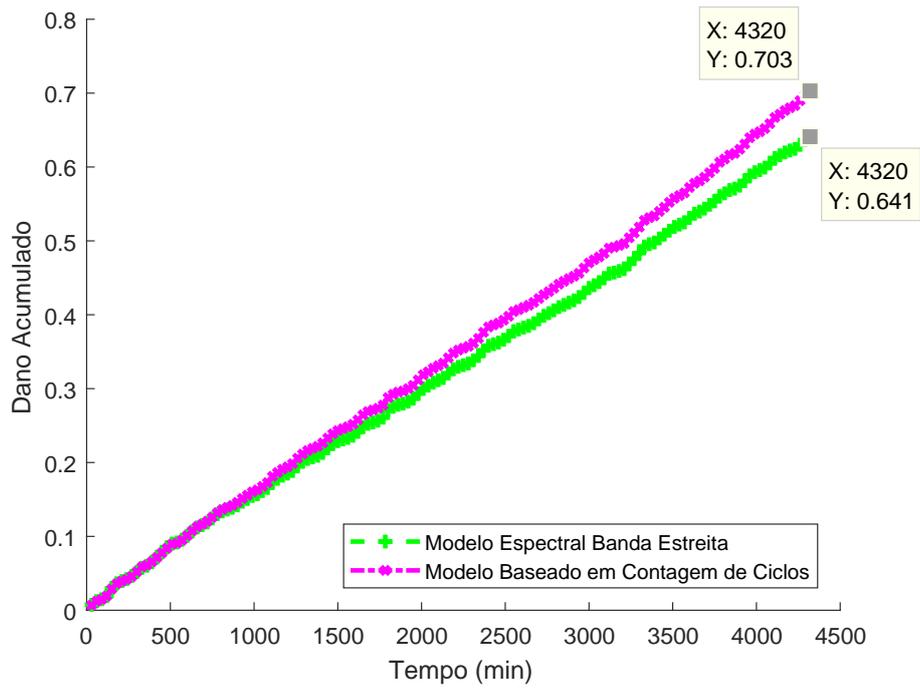


Figura A.12 – Dano acumulado para o Ensaio 3

A largura de banda pode ser calculada utilizando o fator de irregularidade $\lambda = \sqrt{1 - \gamma^2} = \sqrt{1 - 0,808^2} = 0,5577$.

A.0.4 Ensaio 4

Os resultados encontrados para este ensaio foram:

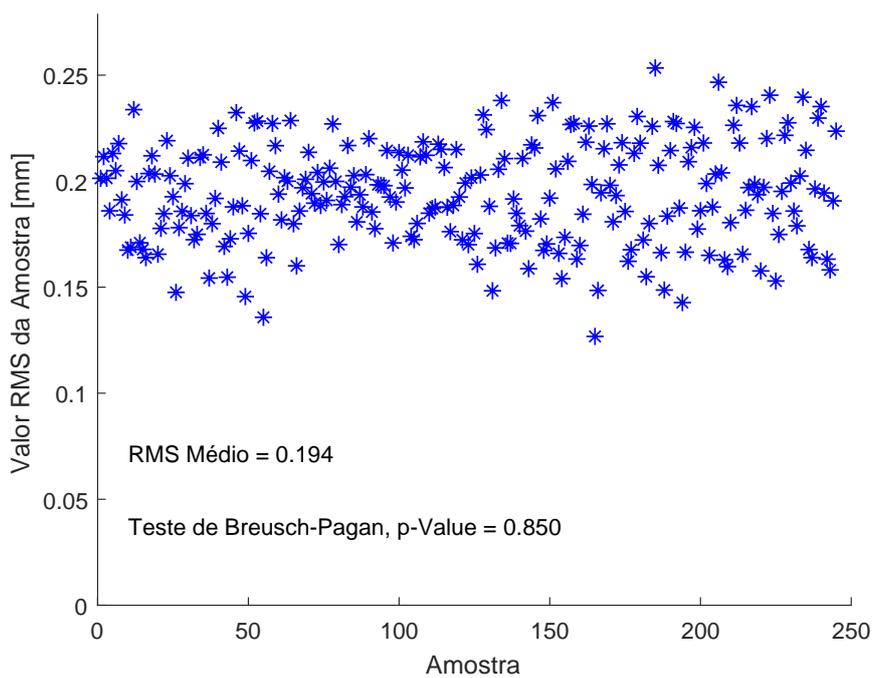


Figura A.13 – Valor RMS da amostra para o Ensaio 4

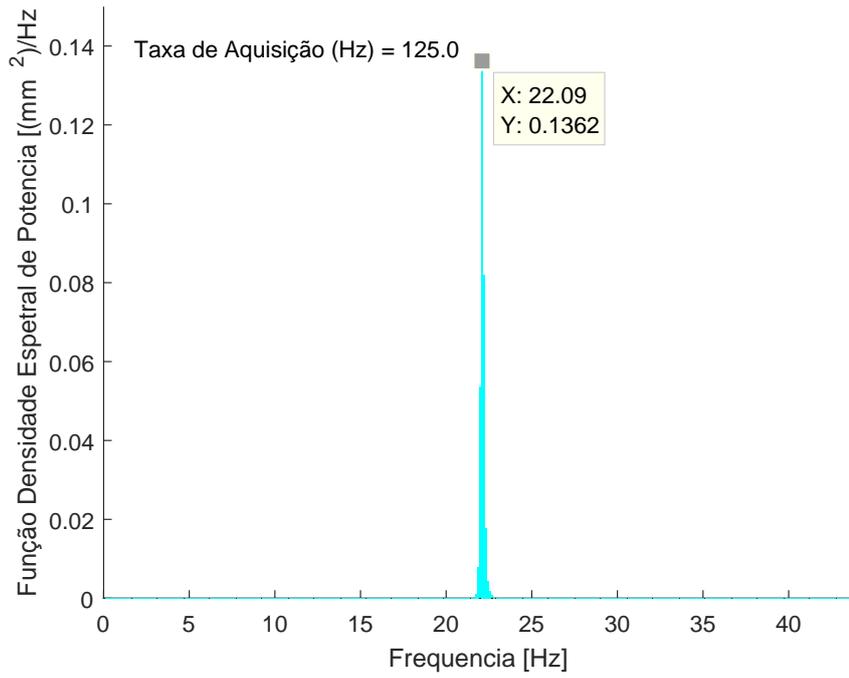


Figura A.14 – Função densidade espectral para o Ensaio 4

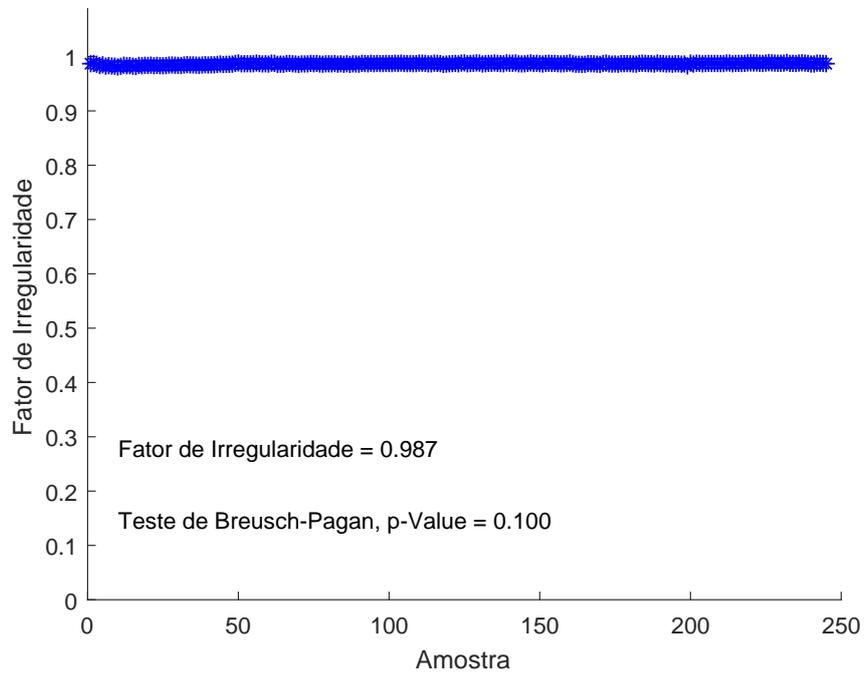


Figura A.15 – Fator de irregularidade para o Ensaio 4

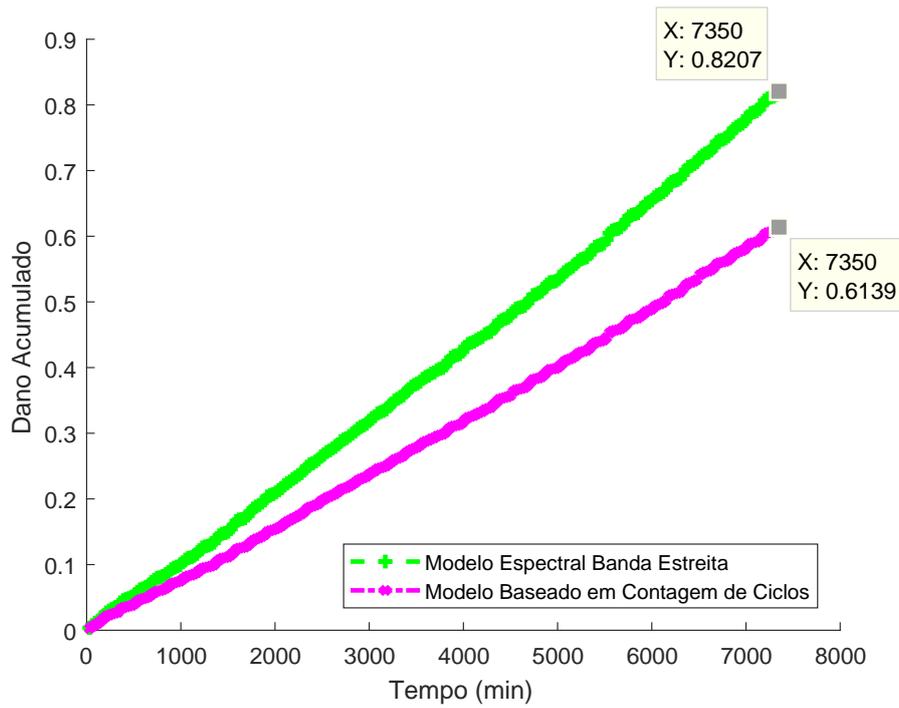


Figura A.16 – Dano acumulado para o Ensaio 4

A largura de banda pode ser calculada utilizando o fator de irregularidade $\lambda = \sqrt{1 - \gamma^2} = \sqrt{1 - 0,987^2} = 0,1609$.

A.0.5 Ensaio 5

Os resultados encontrados para este ensaio foram:

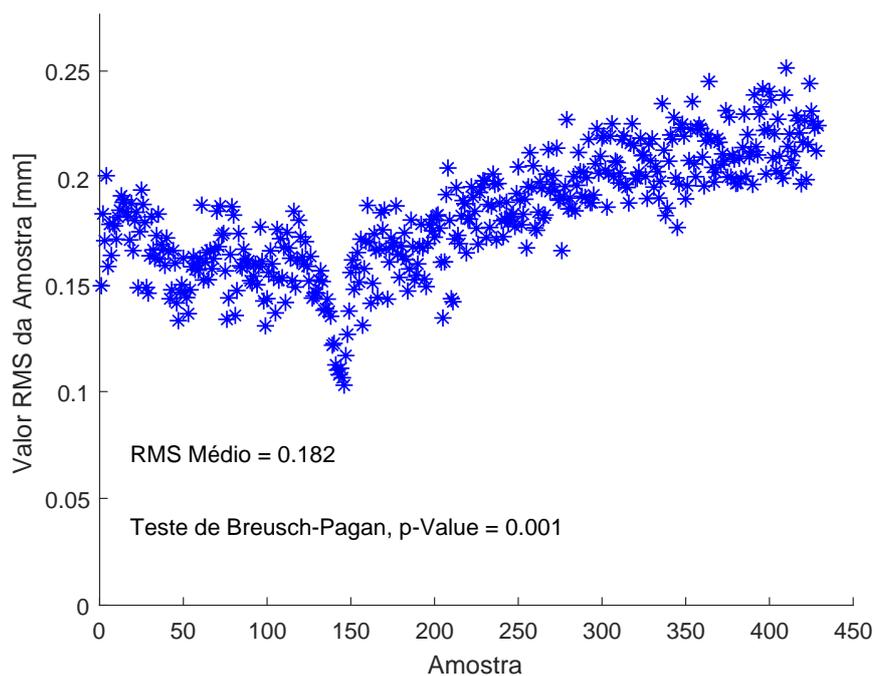


Figura A.17 – Valor RMS da amostra para o Ensaio 5

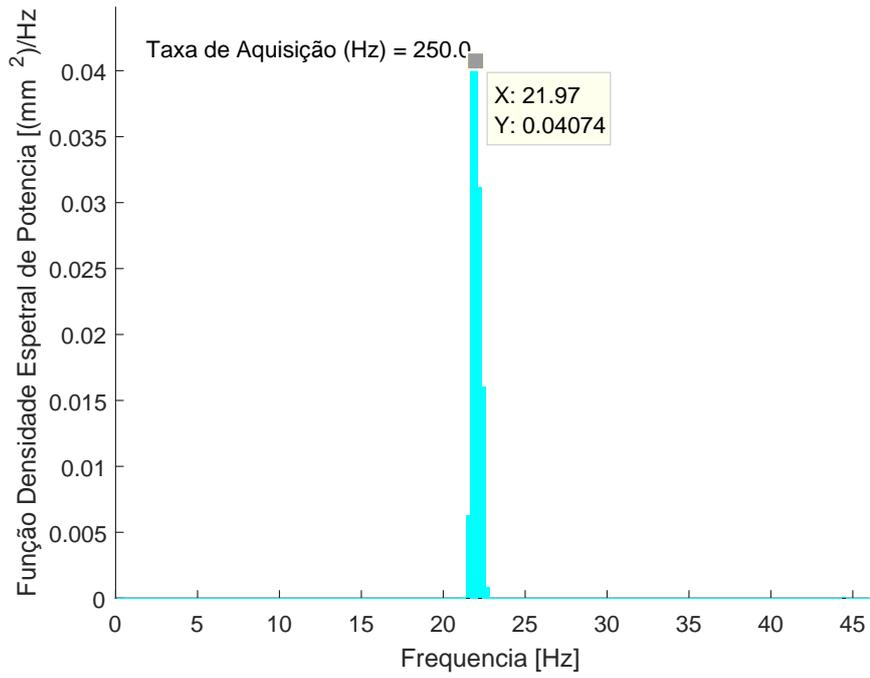


Figura A.18 – Função densidade espectral para o Ensaio 5

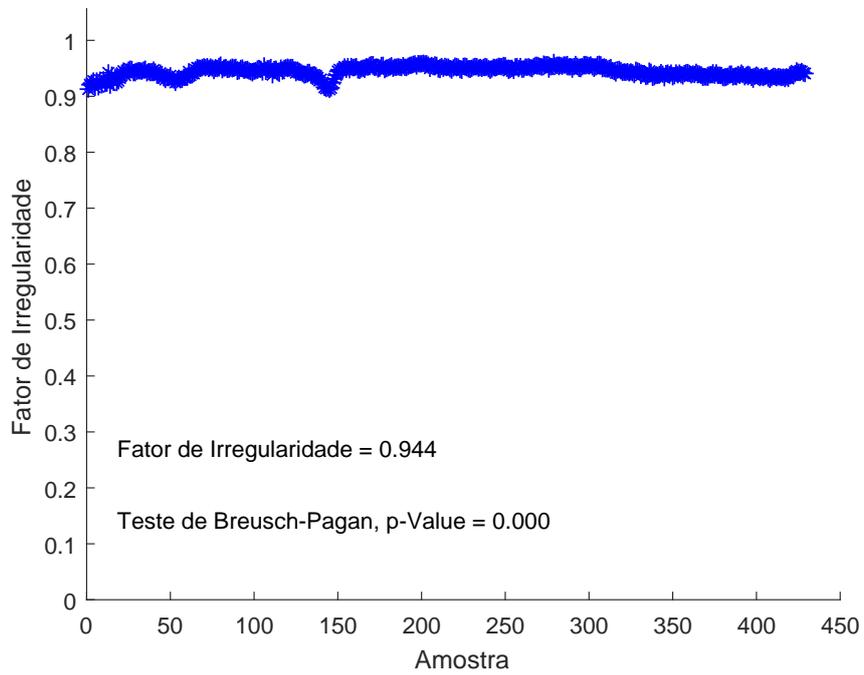


Figura A.19 – Fator de irregularidade para o Ensaio 5

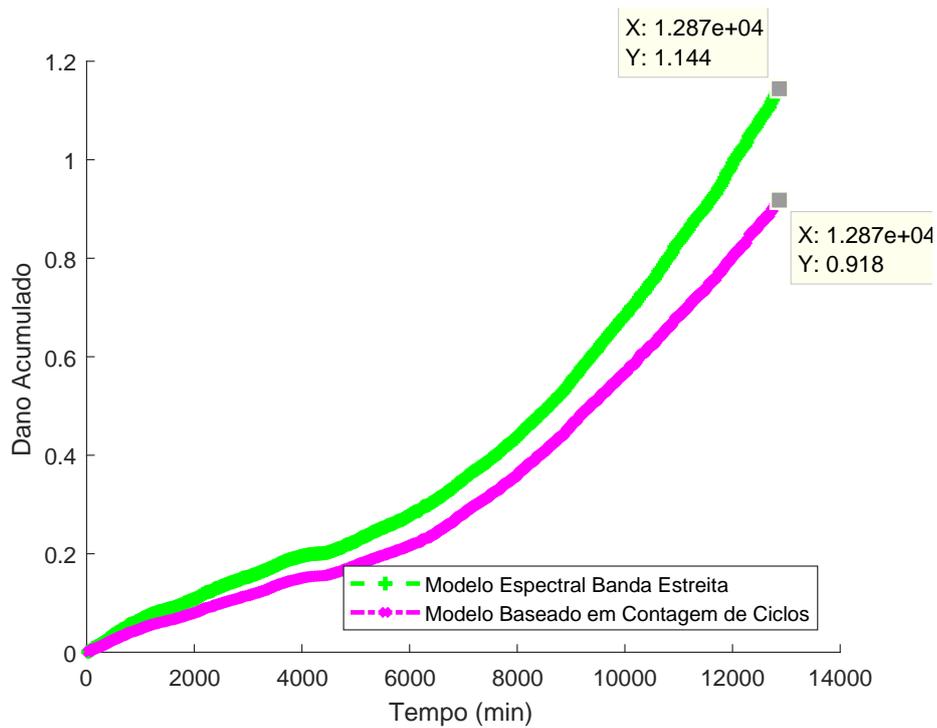


Figura A.20 – Dano acumulado para o Ensaio 5

A largura de banda pode ser calculada utilizando o fator de irregularidade $\lambda = \sqrt{1 - \gamma^2} = \sqrt{1 - 0,944^2} = 0,330$.

A.0.6 Ensaio 6

Os resultados encontrados para este ensaio foram:

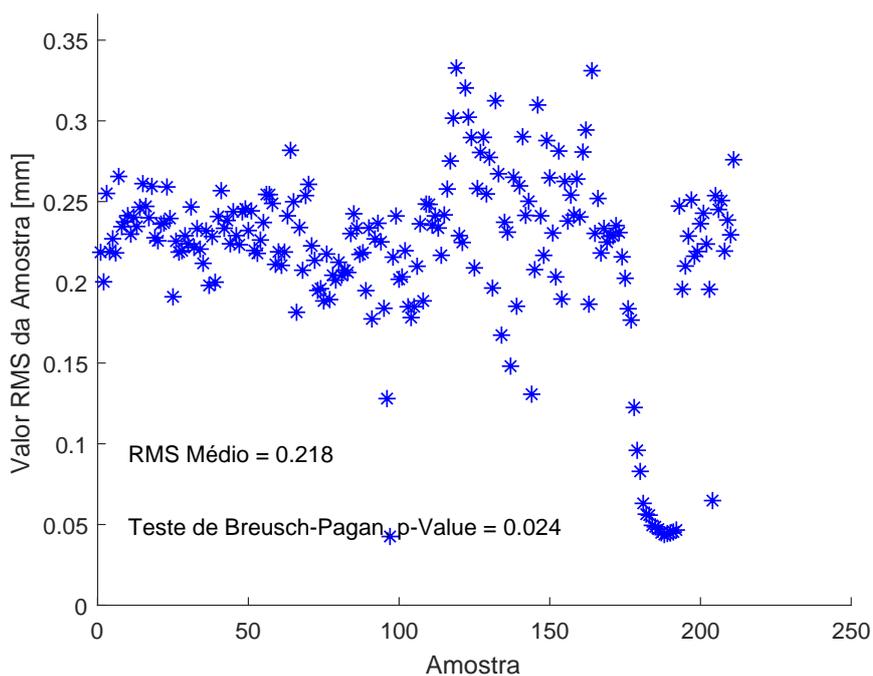


Figura A.21 – Valor RMS da amostra para o Ensaio 6

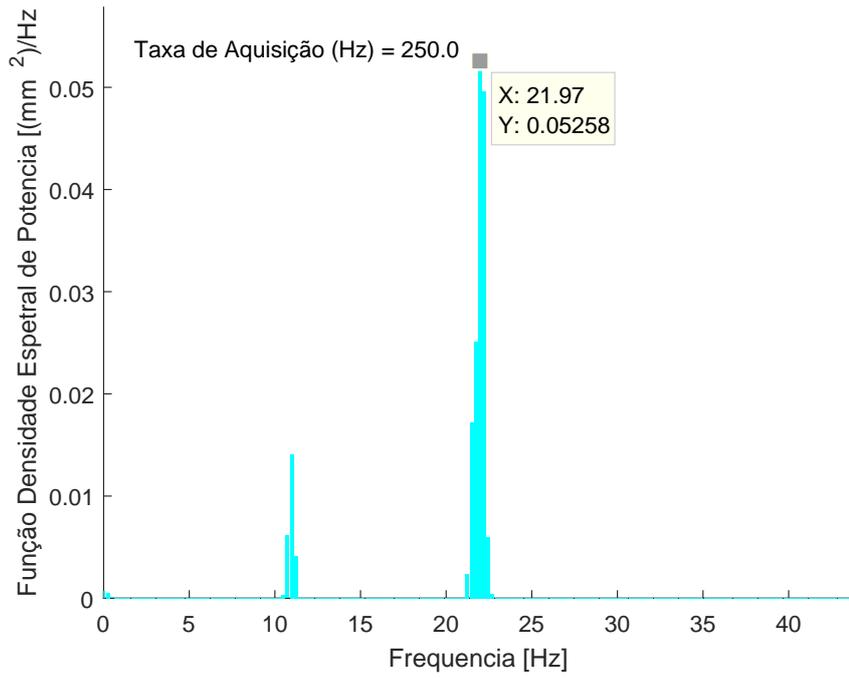


Figura A.22 – Função densidade espectral para o Ensaio 6

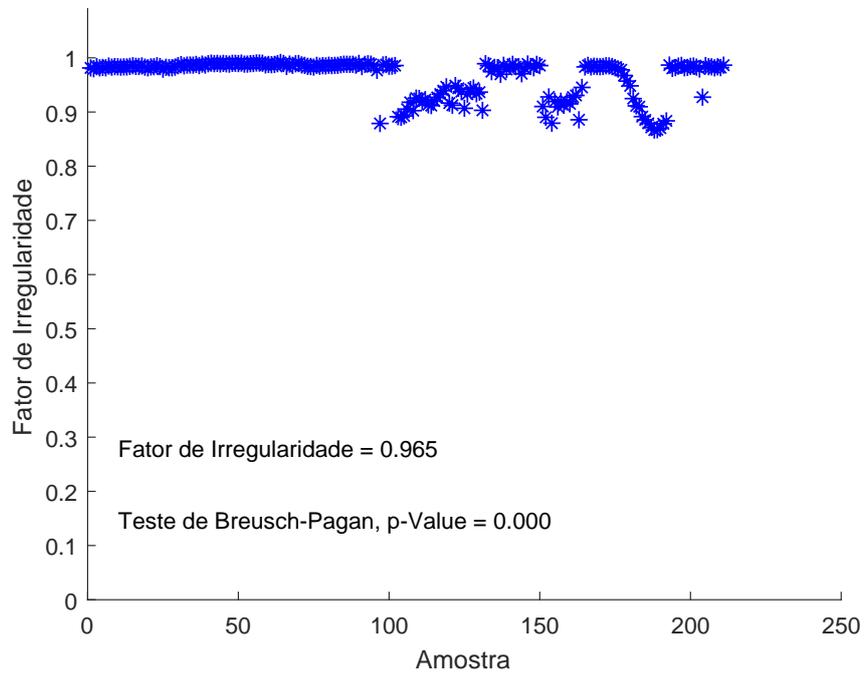


Figura A.23 – Fator de irregularidade para o Ensaio 6

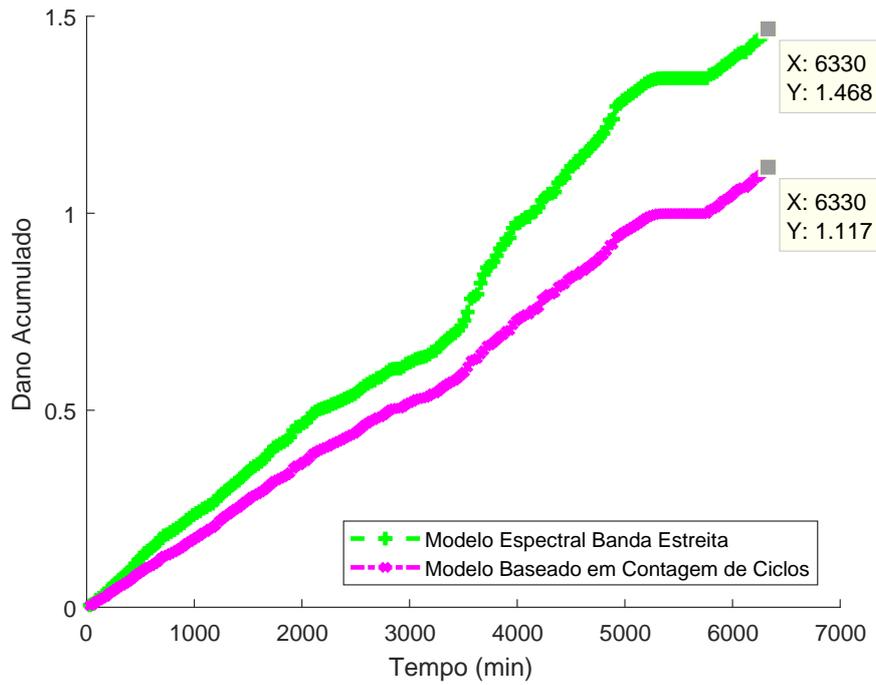


Figura A.24 – Dano acumulado para o Ensaio 6

A largura de banda pode ser calculada utilizando o fator de irregularidade $\lambda = \sqrt{1 - \gamma^2} = \sqrt{1 - 0,965^2} = 0,2622$.

A.0.7 Ensaio 7

Os resultados encontrados para este ensaio foram:

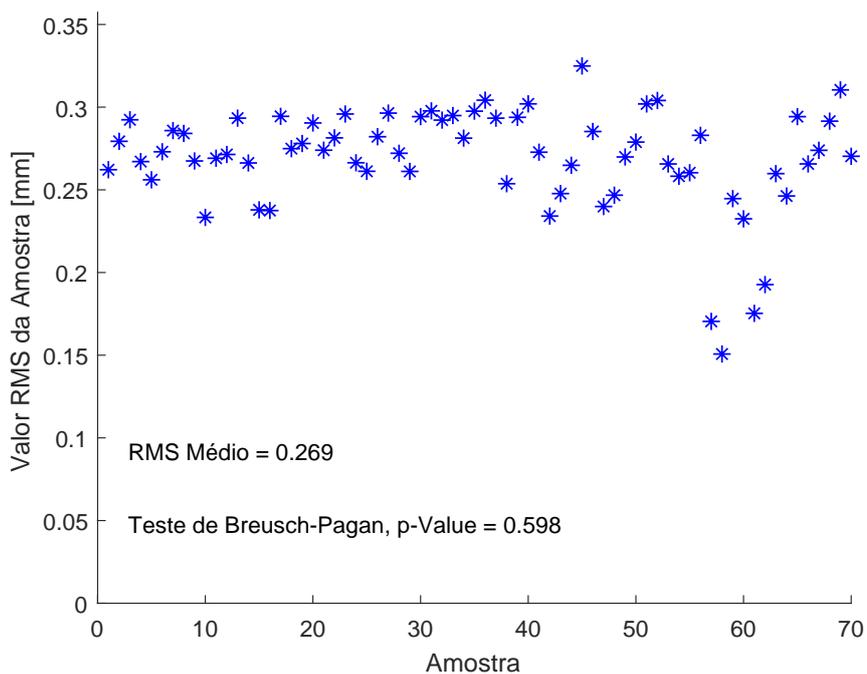


Figura A.25 – Valor RMS da amostra para o Ensaio 7

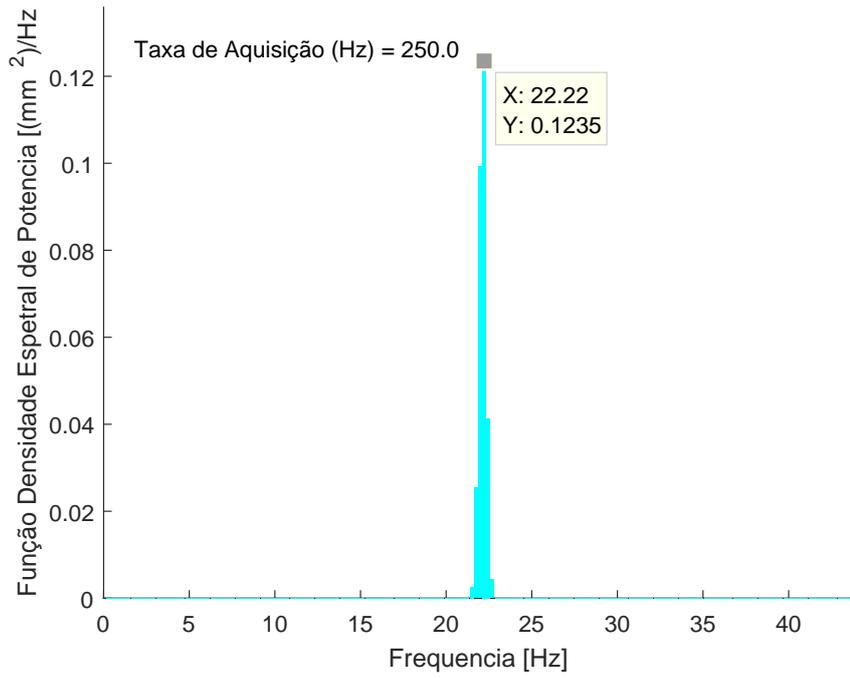


Figura A.26 – Função densidade espectral para o Ensaio 7

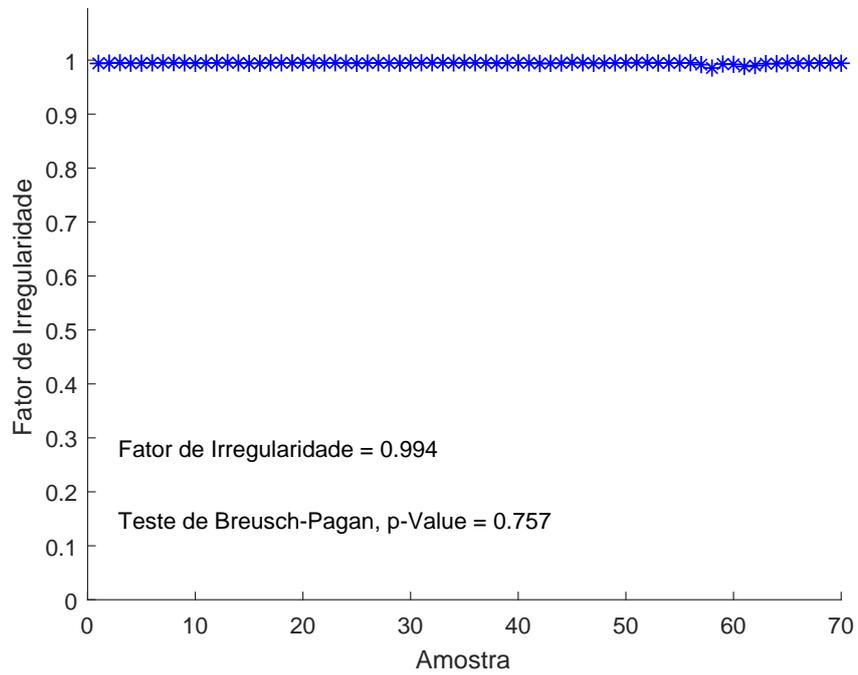


Figura A.27 – Fator de irregularidade para o Ensaio 7

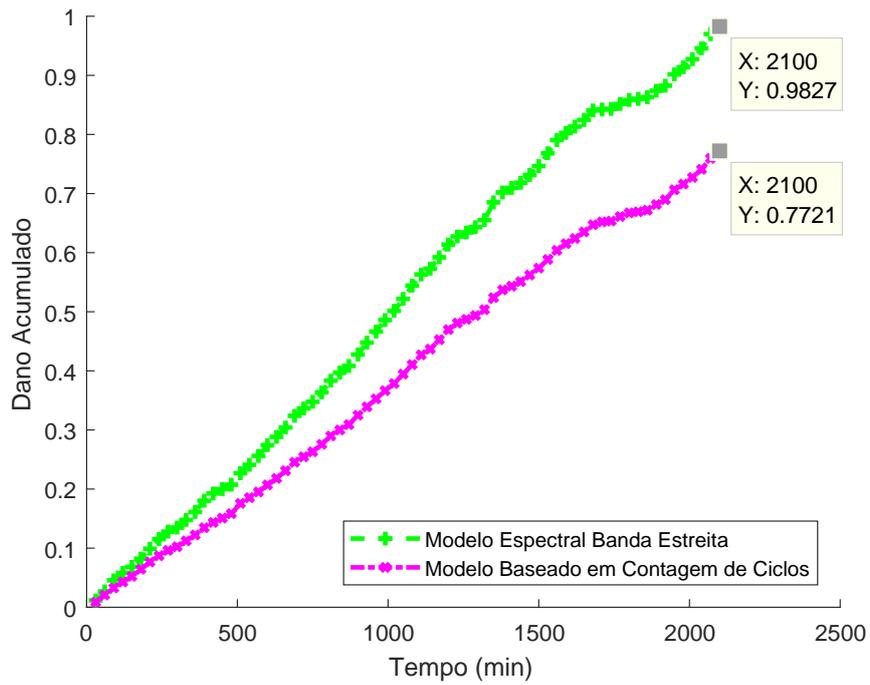


Figura A.28 – Dano acumulado para o Ensaio 7

A largura de banda pode ser calculada utilizando o fator de irregularidade $\lambda = \sqrt{1 - \gamma^2} = \sqrt{1 - 0,994^2} = 0,1094$.