



PROJETO DE GRADUAÇÃO

EFEITO DA PRESENÇA DE MOSSAS NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA ELÉTRICA

Por,
ERICK ROCHA VIEIRA

Brasília, 23 de novembro de 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**EFEITO DA PRESENÇA DE MOSSAS NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE FIOS DE
LIGA DE ALUMINÍNIO 1350 DO CABO CONDUTOR IBIS**

Por,
Erick Rocha Vieira

Relatório submetido como requisito para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico

Banca Examinadora

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, UnB/ ENM
(Orientador)

Prof. José Alexander Araújo, UnB/ ENM

Prof. Thiago de Carvalho Rodrigues Doca, UnB/ ENM

Brasília, 23 de novembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus pelo seu cuidado, proteção e sabedoria e por tudo mais que me proporcionou para que eu pudesse chegar ao fim do curso de engenharia mecânica.

Quero agradecer imensamente a minha família que luta ao meu lado, meus grandes amigos e companheiros meus pais Messias e Cristiane e a minha irmã Evelyn por sempre acreditarem em mim e por me conceder recursos e meios para eu realizar a minha graduação. Quero dizer um muito obrigado ao meu grande amor Lissyane por fazer os meus dias mais felizes e me apoiar em tudo, também quero agradecer a sua família por terem me acolhido e feito me sentir em casa numa terra onde sou peregrino.

Quero agradecer a todos os meus professores, técnicos e funcionários da Universidade de Brasília. Em especial ao meu professor e orientador Jorge Luiz de Almeida Ferreira por suas instruções e paciência comigo durante o processo deste projeto de graduação.

E por fim quero agradecer aos meus colegas José, Maurício, Lucas e Remy que conheci durante os trabalhos de laboratório, e que me passaram grande conhecimento e ensinamentos, sem eles meu trabalho seria muito mais difícil.

Erick Rocha Vieira

“Porque Deus amou o mundo de tal maneira que deu seu único filho, para que todos que nele crer não pereçam, mas tenham a vida eterna.” João 3:16

RESUMO

Para evitar o desprendimento entre o cabo condutor de energia elétrica e o grampo de suspensão é aplicado sobre o grampo um torque de aperto no valor 50 Nm. Este aperto causa o contato entre os fios que formam o cabo condutor, induzindo assim a formação de mossas. Além disso, quando o cabo está em operação ele fica submetido a oscilações que podem acarretar o fenômeno de *fretting* nos fios do cabo condutor. O objetivo deste projeto é analisar o efeito da presença de mossas sobre a resistência a fadiga. Para isso foram induzidas mossas em fios de liga de alumínio 1350 para que pudesse realizar ensaios de fadiga uniaxial. O trabalho foi estruturado em duas configurações, a primeira com mossas que estão sob a presença de *fretting* e a segunda as que estão livres do *fretting*. Além dos ensaios de fadiga, houve também análises da resistência mecânica, quantificação da massa perdida do fio no ensaio de fadiga com *fretting* e a caracterização geométrica da moessa. Após obter os resultados verificou-se que a curva com *fretting* até a falha possui uma maior resistência a fadiga quando comparada a curva que possui 30 mil e 100 mil ciclos de *fretting*. A curva intermediária foi a que possui 30 mil ciclos e a que possui a menor resistência a fadiga entre elas é a de 100 mil ciclos de *fretting*. Esses dados gerou uma certa incoerência pois ao verificar que a curva de *fretting* pleno possui a maior resistência a fadiga esperava-se que a de 100 mil ciclos obtive-se uma maior vida em relação a de 30 mil ciclos. Para poder compreender melhor poderão ser realizados em trabalhos futuros uma maior quantidade de ensaios além de mapear o crescimento das trincas nas regiões de fratura.

Palavras chaves: Resistência a fadiga; Resistência a fadiga em ligas com a presença de *fretting*; Análise da resistência a fadiga em cabos condutores; Resistência a fadiga na Liga AA 1350.

ABSTRACT

A tightening torque of 50 Nm is applied to the clamp to prevent the disconnection between the electric power cable and the suspension clamp. This tightening causes contact between the wires forming the conductor cable, thus inducing the formation of dents. In addition, when the cable is in operation it is subjected to oscillations that can lead to the phenomenon of fretting in the cables of the conductor cable. The objective of this project is to analyze the effect of the presence of dents on the resistance to fatigue. For this, dies were induced in 1350 aluminum alloy wires so that it could perform uniaxial fatigue tests. The work was structured in two configurations, the first one with dents that are under the presence of fretting and the second those that are fretting free. In addition to the fatigue tests, there were also analyzes of the mechanical strength, quantification of the lost mass of the wire in the fatigue test with fretting and the geometric characterization of the weave. After obtaining the results it was verified that the curve with fretting until failure has a greater resistance to fatigue when compared to the curve that has 30 thousand and 100 thousand cycles of fretting. The intermediate curve was the one that has 30 thousand cycles and the one that has the least resistance to fatigue among them is the one of 100 thousand cycles of fretting. These data generated a certain incoherence because when checking that the full fretting curve has the greatest resistance to fatigue, it was expected that the one of 100 thousand cycles got a longer life in relation to 30 thousand cycles. In order to be able to understand better, a greater number of tests can be performed in future works, besides mapping the crack growth in the fracture regions.

Key words: Resistance to fatigue; Resistance to fatigue in alloys with the presence of fretting; Analysis of fatigue strength in conductive cables; Fatigue resistance in the AA 1350 League.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contextualização e apresentação do problema	13
1.2	Objetivos	15
1.3	Estrutura do Trabalho	15
2	FADIGA.....	16
2.1	Conceito de fadiga	16
2.2	Mecanismos da fadiga	16
2.2.1	Nucleação de trincas	16
2.2.2	Propagação das trincas.....	17
2.2.3	Falha catastrófica.....	18
2.3	Conceitos essenciais sobre fadiga.....	18
2.4	Critérios de projeto para fadiga	20
2.5	Abordagem de Tensão -Vida	21
2.5.1	Curva de Wöhler (método S-N).....	21
2.5.2	Fatores que modificam a resistência à fadiga.....	23
2.5.3	Concentradores de tensão e sensibilidade ao entalhe	25
2.5.4	Critério de falha por fadiga para tensão flutuante	27
3	FADIGA EM CABOS	30
3.1	Fadiga em cabos condutores de energia elétrica.....	30
3.2	Tipos de vibração de cabos condutores de energia elétrica	30
3.2.1	Galope.....	31
3.2.2	Oscilação de sub-vão	31
3.2.3	Vibração Eólica	32
3.3	Mecanismo de falha por fadiga em cabos condutores de energia elétrica.....	33
3.3.1	Cabos condutores de energia elétrica e grampos de suspensão.....	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	Materiais utilizados	36
4.1.1	Cabo condutor	36
4.2	Equipamentos utilizados	37
4.2.1	MTS	37

4.2.2	Dispositivo pneumático de Fretting.....	38
4.2.3	Microscópio Confocal	38
4.3	Procedimentos experimentais	39
4.3.1	Estiramento dos fios - obtenção dos corpos de prova	39
4.3.2	Caracterização das mossas e ensaio de fadiga.....	41
4.3.3	Avaliação da resistência mecânica e caracterização da região de fratura após o ensaio de fretting por determinado número de ciclos	44
5	RESULTADOS E ANÁLISES	46
5.1	Ensaio de fadiga	46
5.1.1	Mossas com a presença de fretting	46
5.1.2	Mossas geradas pelo contato entre o fio e a sapata	47
5.2	Avaliação da resistência mecânica do fio submetido a condição de fretting por determinado número de ciclos; perda de massa; geometria da massa.....	48
6	CONCLUSÕES.....	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
	APÊNDICE	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Curva S-N dos Cabos CAA e CAL (ARAUJO et al, 2013)	14
Figura 2.1 - Ciclo de propagação de uma trinca (GARCIA, 2012).....	17
Figura 2.2 - Estrias na microestrutura (DORDRECHT, 1988 apud NORTON 2013).....	18
Figura 2.3 - - Esquema do processo de fratura por fadiga (modificado: DOWLING, 2007)...	18
Figura 2.4 - Tensões cíclicas: (a) tensão alternada idealizada; (b) tensão flutuante; (c) tensão irregular aleatória. (NORTON, 2004)	19
Figura 2.5- Máquina de ensaios R. R. Moore (modificado: JUVINALL & MARSHEK, 2011)	22
Figura 2.6 - Curva S-N - (a) materiais ferrosos; (b) materiais não ferrosos (CALLISTER, 2008).....	22
Figura 2.7 - Sensibilidade de entalhe versus raio de entalhe (BUDYNAS & NISBETT, 2011)	26
Figura 2.8 - Sensibilidade de entalhe cisalhamento versus raio de entalhe (BUDYNAS & NISBETT, 2011).....	27
Figura 2.9 - (a) Limite de resistencia a fadiga em relação a razão de tensões; (b) Amplitude de tensão em relação as tensões médias (modificado: GARCIA, 2012).....	28
Figura 2.10 - Critérios de falha envolvendo fadiga (BUDYNAS & NISBETT, 2011)	28
Figura 3.1 - Principais tipos de vibração de cabos condutores de linhas de transmissão aéreas de energia elétrica (Modificado: EPRI, 2006).....	31
Figura 3.2 - Configuração dos fios no cabo condutor e a superfície em contato dentro do grampo, representadas pelas letras A, B, C e D. (BELLORIO, 2009)	35
Figura 4.1 – MTS	38
Figura 4.2 – (a) Dispositivo de fretting acoplado a MTS; (b) Representação esquemática do dispositivo de fretting (DIAZ, et al. (2017).....	38
Figura 4.3 - Microscópio Confocal Olympus LEXT OST 4100	39
Figura 4.4 – Peça cortada do cabo IBIS	39
Figura 4.5 (a) Fio antes do ensaio de estiramento; (b) Fios após o estiramento	40
Figura 4.6 - Corpos de prova da liga AA 1350 antes de possuir as mossas	40
Figura 4.7 – (a) Fio sendo marcado pelo dispositivo de fretting; (b) Posição relativa entre a sapata e o CP	42
Figura 4.8 – Mossa induzida no CP.....	43
Figura 5.1 - Resultado das curvas S-N	47
Figura 5.2 - Vida vs Perda de massa	49
Figura 5.3 - Vida do fio x área da mossas.....	50
Figura 5.4 - Superfícies das mossas no microscópio Confocal com 10x de aumento.....	51
Figura A 1 - Tensão x Deformação CP 27	57
Figura A 2 - Tensão x Deformação CP 28	58
Figura A 3 - Tensão x Deformação CP 29	58
Figura A 4 - Tensão x Deformação CP 30	59
Figura A 5 - Tensão x Deformação CP 31	59
Figura A 6 - Tensão x Deformação CP 32	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Acabamento superficial em relação a seus fatores (modificado: BUDYNAS & NISBETT, 2011)	24
Tabela 2.2 - Fator de carregamento (modificado: BUDYNAS & NISBETT, 2011)	24
Tabela 2.3 - Fator de temperatura (modificado: NORTON, 2013)	25
Tabela 2.4 - Fator de confiabilidade (modificado: BUDYNAS & NISBETT, 2011)	25
Tabela 3.1 - Comparação entre os tipos de vibrações dos cabos condutores de energia elétrica induzidos pelo vento (modificado: EPRI, 2006 e Furtado, 2001)	32
Tabela 3.2 - Principais tipos de construção de cabos condutores (FADEL, 2010)	34
Tabela 4.1- Propriedades do cabo IBIS (NEXANS, 2013)	37
Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas da liga AA 1350-H19 (ARAUJO et al, 2013)	37
Tabela 4.3 - Parâmetros de estiramento de fios	40
Tabela 4.4 - Características da curva S-N de referência	41
Tabela 4.5 - Características das curvas S-N levantadas	41
Tabela 4.6 - Quantidade de CP's em cada amplitude de tensão nas curvas 1 e 2	42
Tabela 4.7 - Parâmetros da curva 1	43
Tabela 4.8 - Parâmetros da curva 2	44
Tabela 4.9 - Quantidade de ciclos de fretting para cada CP	44
Tabela 5.1 - Vida para cada corpo de prova da curva 1	46
Tabela 5.2 – Vida para cada corpo de prova da curva 2	46
Tabela 5.3 - Vida em fadiga para um CP com mossa de 1000 N em uma tensão alternada de 54 MPa	48
Tabela 5.4 – Resistência a tração	48
Tabela 5.5 - Caracterização geométrica das mossas	49
Tabela A 1 - Características geométricas dos CP's utilizados	56

LISTA DE ABREVIACOES

ASTM	American Society for Testing and Materials
CA (AAC)	Cabos de Alumínio (All Aluminum Conductor)
CAA (ACSR)	Cabos de Alumínio com Alma de Ao (Aluminum Conductor Steel Reinforced)
CAL (AAAC)	Cabos de Alumínio Liga (All Aluminum Alloy Conductor)
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Electriques (International Council on Large Electric Systems)
CP's	Corpos de provas
EPRI	Electric Power Research Institute
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MTS	Material Test System
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
S-N	Curva tensão-vida
SG9	Prédio localizado na Universidade de Brasília
SIN	Sistema Interligado Nacional
TW	Fios Trapezoidais
UnB	Universidade de Brasília

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

A	Fator de acabamento.
A	Razão de amplitude.
B	Expoente de Basquin.
B	Constante B
D	Diâmetro, mm.
k_a	Fator de condição superficial.
k_b	Fator de tamanho.
k_c	Fator de carregamento.
k_d	Fator de temperatura.
k_e	Fator de confiabilidade.
k_f	Fator de efeitos variados.
K_f	Fator de concentrador de tensões de fadiga.
K_{fs}	Fator de concentrador de tensões cisalhantes a fadiga.
K_t	Fator de concentrador de tensões.
K_{ts}	Fator de concentrador de tensões cisalhantes.
N	Fator de segurança do projeto.
NCP	Quantidade de corpos de prova.
Nt	Quantidade de níveis de tensão.
n_f	Número de fios.
N_f	Número de ciclos até a falha sob um mesmo nível de tensão.
Q	Sensibilidade ao entalhe.
$Q_{\text{cisalhamento}}$	Sensibilidade ao entalhe no cisalhamento.
R	Razão de tensões.
S	Tensão nominal, MPa.
S_e	Limite de resistência à fadiga, MPa.
S'_e	Limite de resistência à fadiga obtido em laboratório, MPa.
S_f	Resistencia resistência à fadiga, MPa.
St	Número de Strouhal.
S_{rup}	Tensão de ruptura, MPa.
S_{ut}	Limite de resistência à tração, MPa.
S_y	Limite de resistência ao escoamento, MPa.
T	Temperatura, °C

Gregos

ε	Deformação, strain.
τ_0	Tensão de cisalhamento nominal, MPa.
$\tau_{m\acute{a}x}$	Tensão de cisalhamento máxima, MPa.
σ_0	Tensão normal nominal, MPa.
σ_a	Tensão alternada ou amplitude de tensão, MPa.
σ'_f	Coefficiente de resistência à fadiga.
σ_m	Tensão média, MPa.
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima, MPa.
$\sigma_{m\acute{í}n}$	Tensão mínima, MPa.
σ_r	Intervalo de tensão, MPa.

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo explicita a problemática que motivou este projeto de graduação. Expondo os objetivos pretendidos além de explicar a estrutura deste trabalho.

1.1 Contextualização e apresentação do problema

Vinculado a expansão industrial e tecnológica, o acesso e distribuição da energia é um fator determinante para o desenvolvimento econômico e social, pois fornece apoio mecânico, térmico e elétrico às ações e operações humanas. Para a geração e transmissão da energia elétrica o Brasil dispõe do Sistema Interligado Nacional (SIN), sistema de linhas de transmissão elétrica que abrange grande extensão do território nacional, e os Sistemas Isolados, não conectados ao SIN concentrados na região Amazônica (ANEEL, 2008).

Em 2014, de acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o Sistema Interligado Nacional, isto é, os segmentos de transmissão, possuía 125.640 mil km de extensão de linhas de tensão variando de 88 kV a 750 kV (EPE, 2015). Essa vasta extensão de cabamentos é consequência da configuração do segmento de geração de energia, que em sua maioria, é composto por usinas hidrelétricas instaladas em regiões distantes dos polos consumidores.

O cabo condutor é o componente mais importante em uma linha de transmissão, cuja função é transmitir energia e sua contribuição para o custo total da linha é significativa, cerca de 40% do custo de investimento (CIGRÉ, 2008; FONTIN, 2010). Conseqüentemente, em virtude da dimensão da malha e da idade média das linhas de transmissão, entre 20 a 30 anos, a manutenção e inspeção periódica desse componente torna-se vital para as empresas transmissoras, juntamente com o estudo para aperfeiçoar os mecanismos de prevenção e controle de falhas.

O tempo de vida das linhas de transmissão está estreitamente relacionado aos processos de fadiga que os cabos são expostos em sua operação. Destaque para a fadiga por *fretting*, devido a frequência e oneroso custo de reparo, causada pela vibração ou cargas cíclicas oriundas de ações eólicas. Vibrações eólicas são provocadas pela formação regular de vórtices devido a iteração entre o fluido e a estrutura (CIGRÉ, 2005; IEEE, 2007).

Assim, normalmente, os pontos mais propensos as ocorrências dessas falhas estão localizadas em regiões onde há restrições ao movimento vibratório do cabo condutor, tais como grampos, espaçadores, entre outros (CIGRÉ, 2005; IEEE, 2007). Essa restrição faz com que os fios que constituem o cabo escorreguem entre si, e as forças de fricção aliadas a este movimento relativo causam o *fretting* entre os fios e nos contatos do cabo com os grampos de sustentação. Uma vez que uma trinca, induzida por *fretting* é formada, a mesma poderá propagar por fadiga levando ao rompimento do fio ou, em casos extremos ao rompimento do cabo, como o que ocorreu no Rio Paraná em 2002 (FADEL, 2010; AZEVEDO *et al*, 2009).

Existem fenômenos de falha distintos nos cabos condutores de energia elétrica que atuam simultaneamente: desgaste abrasivo do material, fadiga devido a presença de concentrador de tensões resultante da alteração geométrica do fio na região de contato com outro fio e fadiga por *fretting*. A montagem do cabo no grampo de suspensão gera uma carga transversal de compressão sobre o condutor, aplicada com a finalidade de restringir o escorregamento do condutor escorregue sobre o grampo. Essa configuração provoca o surgimento de moissas nessa região, devido ao contato entre os fios. Devido a ocorrência dos três modos de falha atuarem simultaneamente deixa o entendimento do fenômeno muito difícil (ARAUJO *et al*, 2013).

Um dos métodos de caracterizar o desempenho de materiais de engenharia com relação a vida a fadiga é realizado através do uso do diagrama de Wöhler, também chamado de curva S-N. O objetivo desse diagrama é correlacionar o número de ciclos necessários para causar a fratura completa de corpos de prova similares, sendo que os mesmos são submetidos a níveis de tensão nominal cíclica prescritas. Este procedimento é utilizado juntamente com a formulação de Poffenberger-Swart, exposta em 1965. Este relaciona a tensão nominal na zona de falha com a amplitude de descolamento causado pela flexão do cabo, num determinado ponto (POFFENBERGER; SWART, 1965).

Atualmente, considerando o estado dos estudos que avaliam a problemática da fadiga eólica em cabos condutores, há um significativo desconhecimento sobre os diversos aspectos relacionados aos mecanismos de falha atuantes. Sendo assim, os procedimentos experimentais, apesar de dispendiosos e trabalhosos, são alternativas consideráveis que possibilitm uma melhor compreensão dos fenômenos mecânicos envolvidos no processo de falha do condutor (ARAUJO *et al*, 2013).

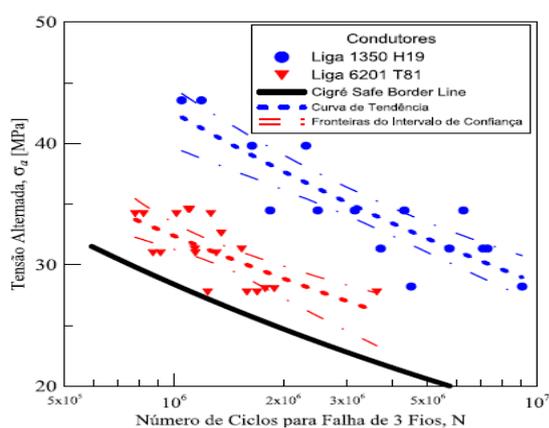


Figura 1.1 - Curva S-N dos Cabos CAA e CAL (ARAUJO *et al*, 2013)

A figura 1.1 mostra a curva tensão *versus* vida entre os cabos CAA e CAL. Dentre os cabos mais utilizados para condução de energia encontram-se o CAA e CAL, onde se utiliza respectivamente as ligas de alumínio 1350 H19 a 6201 T81. A liga 6201 mesmo não possuindo a mesma condutividade elétrica da liga 1350 ela possui vantagens em determinados aspectos como resistência a corrosão, abrasão e também das propriedades mecânicas. O leitor ao ver essas informações poderia pensar que o cabo CAL que é formado da liga 6201 T81 possuiria uma resistência a fadiga consideravelmente maior em relação ao cabo CAA, contudo após

resultados obtidos no Laboratório de Ensaio de Cabos da UnB verificou-se que os cabos CAA possuem uma resistência a fadiga superior. Esta problemática descrita foi o que desencadeou estudos sobre fadiga nos fios que formam os cabos condutores de energia.

1.2 Objetivos

Este trabalho é de cunho experimental e tem por objetivo geral isolar parte do fenômeno de fadiga que ocorre dentro da ligação cabo-grampo para analisar o efeito da presença de mocha na resistência a fadiga do fio de liga de alumínio AA 1350-H19. Obtendo os resultados de vida em fadiga para mochas marcadas com uma força de 1000 N sem a presença de *fretting*, com a presença de *fretting* por 30 mil ciclos e com a presença de *fretting* por 100 mil ciclos além de conseguir imagens da superfície da mocha, caracterizando-a geometricamente e relacionando-a com o processo de falha dos fios ensaiados além de quantificar a perda de material dos fios após sofrerem o *fretting*.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado com seis capítulos e mais anexos. O primeiro capítulo é a introdução que apresenta ao leitor a problemática que incentivou o estudo sobre o tema deste projeto.

O segundo e o terceiro capítulo faz com que o leitor possa usufruir de conhecimentos teóricos pontuais para o entendimento do restante do projeto. Sendo que o segundo capítulo traz à tona conhecimento sobre o fenômeno da fadiga e o terceiro contextualiza o leitor com informações sobre cabos condutores de energia juntamente com os modos de falhas que estão associados a eles.

O quarto capítulo trata das metodologias utilizadas neste projeto, fazendo uma descrição dos equipamentos e materiais utilizados, juntamente com a descrição dos procedimentos experimentais.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos juntamente com as análises dos mesmos. Já o sexto capítulo é a conclusão do projeto indicando se os objetivos propostos foram alcançados e também indicando formas de como prosseguir com análises futuras relacionadas ao tema abordado neste projeto.

Neste capítulo é apresentado uma fundamentação teórica sobre o conceito de fadiga, explicitando seu modo de propagação, além de mostrar como analisar este fenômeno. Também é mostrado como os concentradores de tensões modifica a resistencia a fadiga de componentes mecânicos.

2.1 Conceito de fadiga

A falha por fadiga é um dos principais modos de falhas em componentes estruturais, a fadiga ocorre em elementos sujeitos a tensões variáveis, que são originadas por carregamentos dinâmicos, sobre uma mesma região (ASTM E1049-85, 2005). Levando este elemento mecânico a ceder mesmo em tensões abaixo daquelas obtidas em ensaios estáticos de tração, flexão ou torção de um material. Este fenômeno ocorre devido ao aparecimento de microtrincas e com o passar dos ciclos ficam em escalas macroscópicas chegando a falha (DOWLING, 2007).

Na década de 1850 August Wöhler observando as falhas em eixos ferroviários mesmo em tensões admissíveis iniciou seus estudos sobre o comportamento dos metais com relação a esforços alternados e repetitivos. Devido a sua dedicação importantes fatores foram obtidos principalmente o gráfico que relaciona a tensão *versus* ciclo de vida a fratura (hoje essa curva é chamada de curva de Wöhler em sua homenagem) (DOWLING, 2007).

2.2 Mecanismos da fadiga

Os materiais metálicos sofrem rupturas quando expostos a cargas cíclicas, e essa ruptura do componente se dá em três etapas distintas: nucleação de trincas; propagação das trincas (fenômeno lento); falha catastrófica (fenômeno rápido). (LEE et al., 2005)

2.2.1 Nucleação de trincas

Os surgimentos das trincas ocorrem em regiões de alta concentração de tensões ou baixa resistência localizada. Detalhes como entalhes, mau acabamento superficial, regiões anguladas são os principais fatores para a nucleação de trincas em peças manufaturadas. Já na estrutura cristalina os defeitos microestruturais devido ao processo de conformação são os candidatos a nucleação das trincas. Em estruturas livres de defeitos a nucleação pode ser iniciada devido a concentradores locais de tensão correspondente a deformações locais em bandas de deslizamento (NORTON, 2013).

A nucleação em materiais dúcteis e frágeis se diferem. O primeiro quando está em um carregamento cíclico gera um processo de escorregamento de planos cristalográficos que formam bandas de deslizamento que sobressai na superfície do material na forma de extrusões ou intrusões. Já no segundo tipo de material pode não existir as bandas de deslizamento, sendo

assim as microtrincas só aparecerão a partir de discontinuidades como poros ou inclusões (FORSYTH, 1961).

2.2.2 Propagação das trincas

A propagação de trincas ocorre em dois estágios. No estágio I o que é significativo é o desenvolvimento das tensões cisalhantes, nesta fase a trinca se propaga de modo microscópico, tendo seu tamanho na ordem de grandeza de um grão. A proliferação das trincas no estágio II caracteriza-se pelo surgimento de estrias microscópicas que é a marcação do aumento da fissura a cada ciclo de carregamento, para que ocorra a propagação também é necessárias tensões de tração no extremo da trinca, o que favorece planos de deslizamento de 45° com o plano da trinca, isto pode ser visto na figura 2.2 (ROSA, 2002; NORTON, 2013).

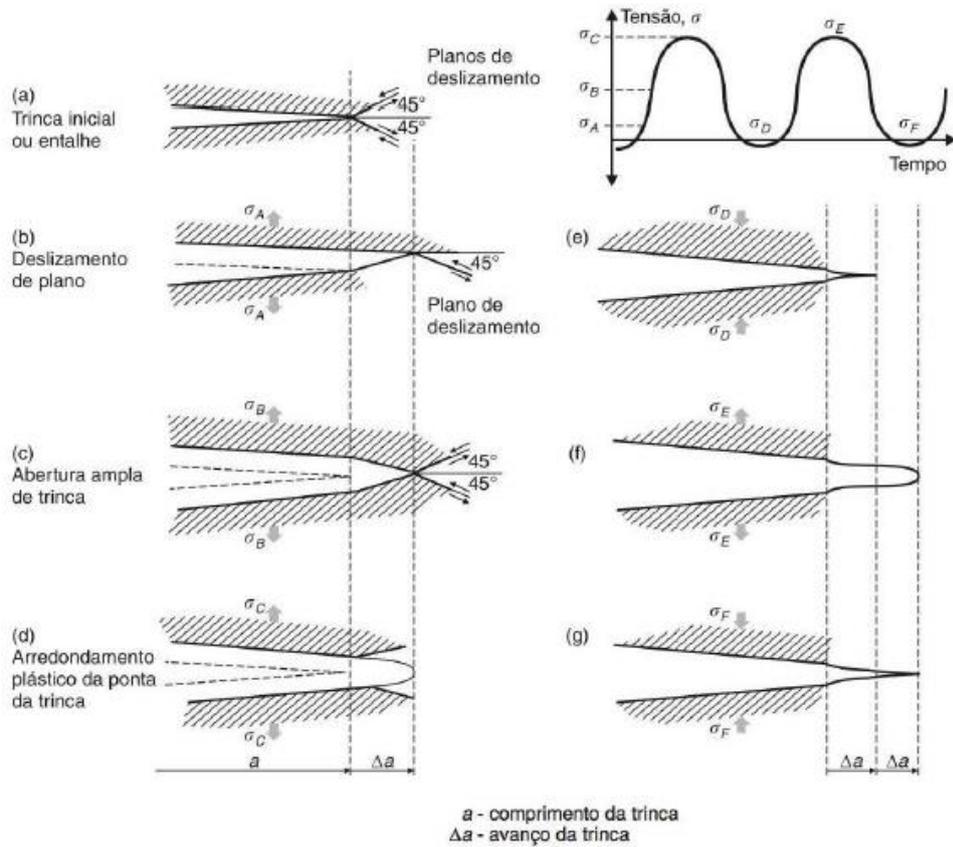


Figura 2.1 - Ciclo de propagação de uma trinca (GARCIA, 2012)

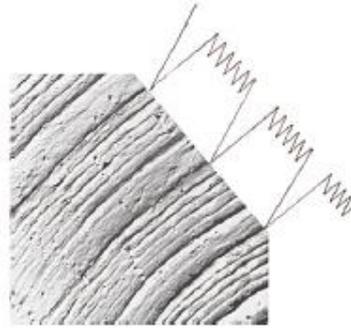


Figura 2.2 - Estrias na microestrutura (DORDRECHT, 1988 apud NORTON 2013)

2.2.3 Falha catastrófica

A falha na estrutura ocorre em nível macroscópico. O componente recebe mudanças agudas de carga de fadiga, com isso há o surgimento de marcas de praias, essas marcas estão curvadas em relação a origem de falha. As marcas de praias possuem bandas claras e escuras, sendo a primeira decorrente de propagação plana com níveis de tensões menores e as escuras correspondem a uma propagação mais tortuosa com elevados níveis de tensão. É importante salientar que as marcas de praias são distintas em relação as estrias, dentro de uma marca de praia pode ocorrer centenas ou dezenas de estrias (NORTON, 2013).

Após o surgimento dessas marcas de praias no componente o processo de crescimento da trinca se torna irreversível e a falha catastrófica ocorre causando a ruptura do material. Na figura 2.3 é mostrada uma superfície característica de fratura em fadiga (NORTON,2013).

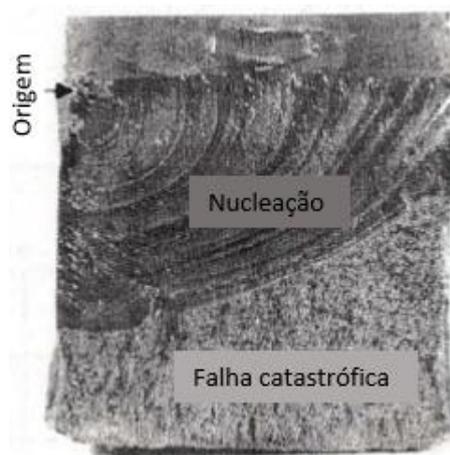


Figura 2.3 - - Esquema do processo de fratura por fadiga (modificado: DOWLING, 2007)

2.3 Conceitos essenciais sobre fadiga

O fenômeno da fadiga é um dos maiores responsáveis por falhas e para compreender melhor este fenômeno é necessário conhecer importantes fatores sobre seu funcionamento.

Existem três tipos de tensões cíclicas ou variáveis no tempo, são elas: alternada idealizada, flutuante e irregular aleatória (vibrações complexas). Estas estão exemplificadas na figura 2.4. Tensões alternadas idealizadas são as que possuem tensões máximas e mínimas com o mesmo módulo, entretanto com sinais opostos, estas possuem tensão média (σ_m) nula. As tensões flutuantes são as que oscilam em torno de uma tensão média (σ_m) e as tensões máximas ($\sigma_{m\acute{a}x}$) e mínimas ($\sigma_{m\acute{i}n}$) são diferentes entre si. Já as tensões irregulares aleatórias são oriundas de ciclos complexos (JUVINALL & MARSHEK, 2011; DOWLING 2007; NORTON, 2004).

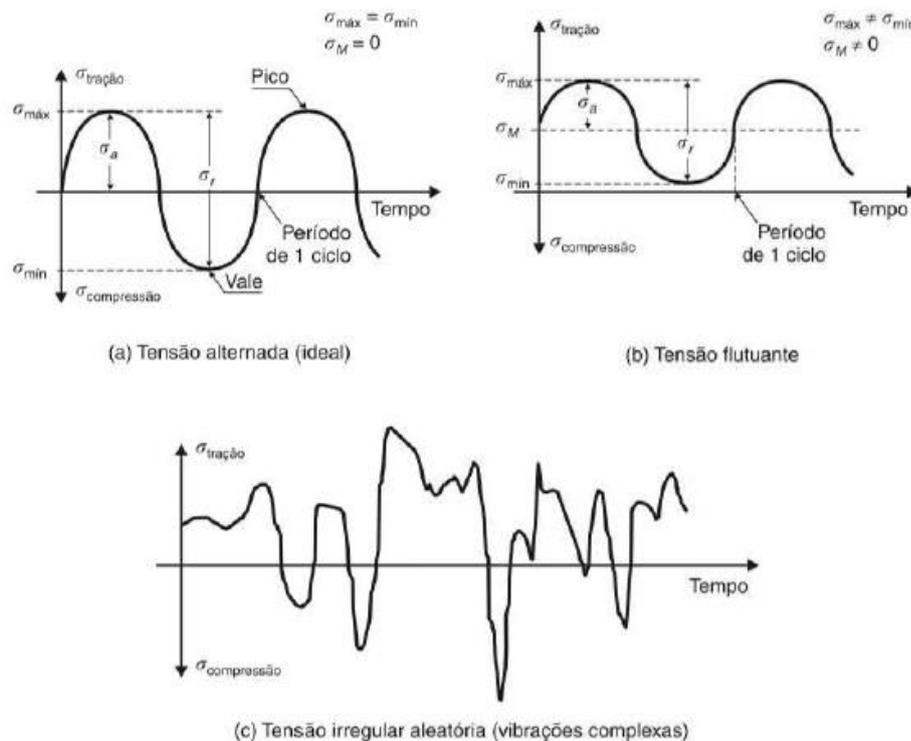


Figura 2.4 - Tensões cíclicas: (a) tensão alternada idealizada; (b) tensão flutuante; (c) tensão irregular aleatória. (NORTON, 2004)

Temos os seguintes parâmetros retirados da figura 2.5:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão máxima

$\sigma_{m\acute{i}n}$ = tensão mínima

σ_m = tensão média

σ_a = tensão alternada

σ_r = Intervalo de tensões

E com esses parâmetros pode-se obter as seguintes equações:

- **Tensão média (σ_m)**

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (2.1)$$

- **Tensão alternada (σ_a)**

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (2.2)$$

- **Variação de tensão (σ_r)**

$$\sigma_r = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (2.3)$$

- **Razão de tensões (R)**

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (2.4)$$

- **Razão de amplitude (A)**

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (2.5)$$

2.4 Critérios de projeto para fadiga

Para Rosa (2002) cada caso que envolve fadiga deve ser analisado e considerado de acordo com os materiais utilizados, finalidade de ciclos de cargas, exigências de segurança, pré-requisitos, entre outros fatores. Os principais projetos para se prevenir de falhas contra fadigas serão descritos a seguir.

- Projeto para vida infinita

Neste projeto as tensões operantes são projetadas para bem abaixo da tensão limite de fadiga. Este critério foi utilizado nos primeiros projetos mecânicos contra a fadiga. Atualmente ainda existem muitas peças que operam em milhões de ciclos durante a sua vida. Tendo como exemplo eixos de motores, engrenagens industriais.

- Projeto para vida finita

Em carregamentos voláteis onde a tensão é instável, ou seja, ocasionalmente surgem tensões bem acima da carga média, fica inviável projetar a peça para vida infinita pois os custos

e dimensões serão extremamente altos e desnecessários. Para esse projeto deve ser levado em consideração uma margem de segurança que se adeque a volatilidade de operação. A análise do projeto pode se realizar com a tensão vida ($\sigma - N$), propagação de trincas já existentes ($a - \Delta k$), e deformação vida ($\epsilon - N$). Temos como exemplo mancais de rolamento, componentes de automóveis e motores a jato.

- Projeto para falha em segurança

Muito utilização na indústria aeronáutica por não poder permitir peso extra e nem um grande coeficiente de segurança, este critério considera a ocorrência de trinca de fadiga e também sua detecção e controle do seu tamanho até o momento de a peça ser reparada. Temos como exemplo fuselagem aeronáutica e cascos de navios.

- Projeto com tolerância ao dano

Este projeto é um aprimoramento do projeto de falha em segurança, onde se utiliza a teoria da mecânica da fratura para evitar o crescimento da trinca a um tamanho que cause a falha da estrutura. Este critério se adapta melhor a materiais com grande tenacidade e com baixa velocidade de propagação de trincas. Ocorre um ensaio preliminar onde estima o tamanho inicial do defeito, se a estrutura se mantém intacta no ensaio então se assegura que o elemento está livre de defeitos. Este é um tipo de projeto que está sempre utilizando metodologias modernas. Temos como principais exemplos fuselagens e asas de aeronaves.

2.5 Abordagem de Tensão -Vida

Primeiramente precisamos entender alguns conceitos relacionados a tensão vida. São esses: limite de resistência a fadiga; resistência a fadiga; vida em fadiga. O primeiro representa uma tensão limite no qual a estrutura não falhará para um número de ciclos infinitos (geralmente esse efeito não ocorre em ligas não ferrosas). Já a resistência a fadiga é o ponto de tensão onde ocorrerá a falha para um certo número de ciclos. E por último temos a vida em fadiga (N_f) que representa a quantidade de ciclos para ocorrer a falha em uma determinada tensão (CALLISTER, 2008).

2.5.1 Curva de Wöhler (método S-N)

Para encontrar a resistência dos materiais sujeitos a cargas de fadiga, corpos de provas são submetidos a carregamentos cíclicos de magnitude especificada e com isso se contabiliza o número de ciclos até acontecer a falha. O dispositivo mais utilizado para esse tipo de ensaio é a máquina de viga rotativa de R. R. Moore mostrado na figura 2.5. Contudo também existe outras máquinas disponíveis para ensaios com tensões axiais e torcionais.

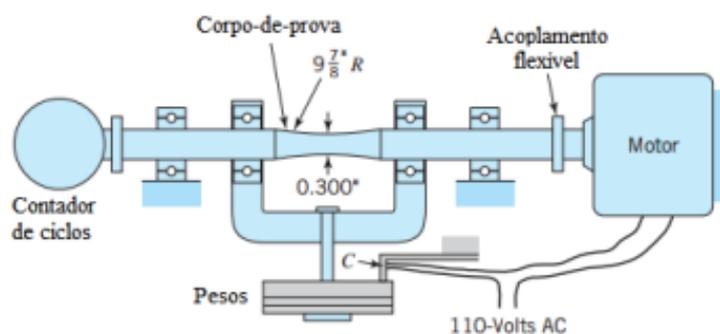


Figura 2.5- Máquina de ensaios R. R. Moore (modificado: JUVINALL & MARSHEK, 2011)

Para conhecer a resistência à fadiga de um dado material é necessária uma gama de ensaios devido à forte natureza estatística do fenômeno da fadiga. O ensaio primitivo é feito com uma tensão um pouco a baixo do limite de resistência a tração (S_{ut}), para realização do teste secundário é utilizada uma tensão menor do que a adotada no primeiro, e assim segue continuamente até satisfazer os requisitos do ensaio. Os valores de tensão e números de ciclos são plotados em um diagrama S- N, podendo ser traçado em escala log-log ou semi-log. O exemplo da curva de Wöhler é mostrado na figura 2.6 (BUDYNAS & NISBETT, 2011).

Na figura 2.6 pode-se observar a curva S-N em materiais ferrosos e de ligas não ferrosas, vemos que o limite de resistência a fadiga (S_e) só existem em matérias ferrosos e em ligas de titânio, esse limite é o nível de uma determinada tensão em que independentemente do número de ciclos o material não terá mais falhas. Todavia em ligas não ferrosas como o alumínio esse critério (S_e) não existe já que sempre haverá falhas no material após um número de ciclos. A resistência a fadiga (S_f) para ligas não ferrosas é mostrada por um número de ciclos substancialmente grande, no caso de ligas de alumínio esse número varia de 10^7 a 10^8 (CALLISTER, 2008).

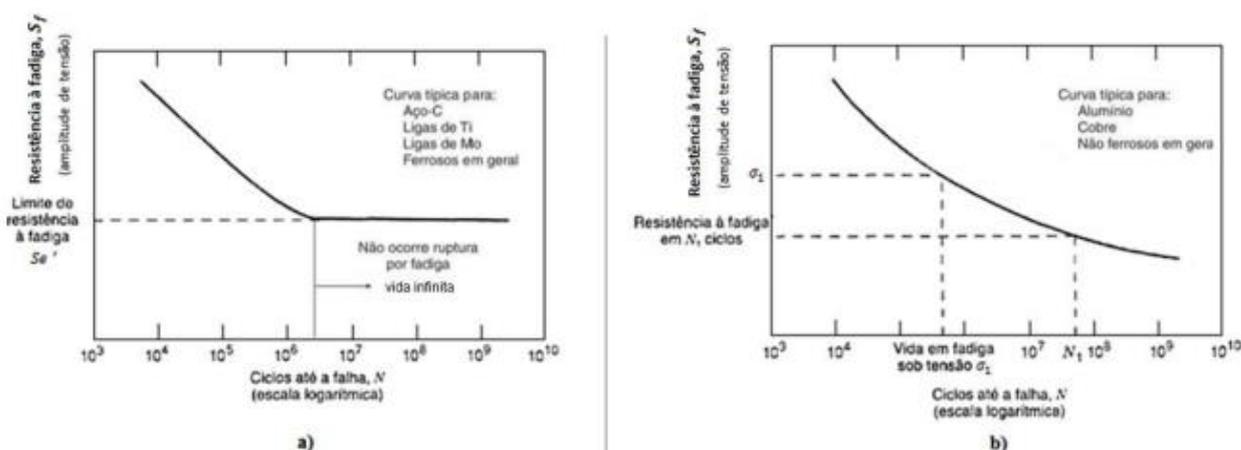


Figura 2.6 - Curva S-N - (a) materiais ferrosos; (b) materiais não ferrosos (CALLISTER, 2008)

A equação de Basquin de 1910 (equação 2.6) facilita a compreensão algébrica e numérica do comportamento da curva S-N pois mostra esta curva descrita em termos logarítmicos o que evita erros durante sua leitura.

$$\sigma_a = \sigma_f'(2N_f)^b \quad (2.6)$$

Em que σ_a representa a amplitude de tensão, σ_f' é o coeficiente de resistência a fadiga do material, N_f é a quantidade de ciclos em que ocorre a falha e b é o expoente de Basquin. Para um componente verdadeiramente mecânico em que $S_e < 0,5 S_{ut}$, a equação de Basquin se reduz a equação 2.7. Em que A e B são determinados em ensaios uniaxiais em corpos de provas padronizados (BUDYNAS & NISBETT, 2011).

$$\sigma_a = AN_f^B \quad (2.7)$$

$$A = 2^b \sigma_f' \quad (2.8)$$

$$B = b \quad (2.9)$$

2.5.2 Fatores que modificam a resistência à fadiga

Existem vários fatores responsáveis pela modificação do limite de endurance (S_e) de um material, podendo ser de natureza do material, ou da manufatura, ou ambiente, ou até mesmo do projeto que está sendo realizado. Marin pesquisou e identificou fatores que são multiplicados ao limite de endurance obtido em laboratório (S'_e) para que deste modo se obtenha um novo valor de S_e que seja mais coerente com a realidade de operação. Segue a equação de Marin (BUDYNAS & NISBETT, 2011).

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (2.10)$$

- **Fator de condição superficial - k_a**

Os espécimes utilizados nos ensaios de fadiga são polidos e bem-acabados para evitar que sofrerão com intensificadores de tensão devido a imperfeições superficiais. Contudo nos componentes mecânicos utilizados nos projetos o acabamento nem sempre é tão bem cuidado, para corrigir esse problema Horger reproduziu alguns dados para certas condições de acabamento superficial. Esses dados são representados pela equação 2.11 (BUDYNAS & NISBETT, 2011).

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (2.11)$$

Tabela 2.1 - Acabamento superficial em relação a seus fatores (modificado: BUDYNAS & NISBETT, 2011)

Acabamento superficial	Fator $a S_{ut}$, (MPa)	Expoente b
Retificado	1,58	-0,085
Usinado ou laminado a frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

- **Fator de tamanho - k_b**

Após analisar 133 conjuntos de pontos de dados pode-se obter equações para determinados diâmetros de corpos de provas. Para carregamento axial $k_b=1$. (BUDYNAS & NISBETT, 2011)

$$k_b = 1,24 d^{-0,107} \quad 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \quad (2.12)$$

$$k_b = 1,51 d^{-0,157} \quad 51 \leq d \leq 254 \text{ mm} \quad (2.13)$$

- **Fator de carregamento - k_c**

Os valores médios mais apropriados para k_c estão mostrados na tabela 2.2 (BUDYNAS & NISBETT, 2011).

Tabela 2.2 - Fator de carregamento (modificado: BUDYNAS & NISBETT, 2011)

Kc	Tipo de carregamento
1	Flexão
0,85	Axial
0,59	Torção

- **Fator de temperatura - k_d**

Segundo Norton (2013) os ensaios de fadiga são comumente realizados a temperatura ambiente. A resistência ao escoamento diminui com o aumento da temperatura, em temperaturas superiores a 50% da temperatura de fusão a análise tensão-vida não é mais possível pois a fluência passa a ser mais significativa que a fadiga. Shigley e Mitchell define o fator de temperatura de acordo com a tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Fator de temperatura (modificado: NORTON, 2013)

Faixa de temperatura (°C)	Kd
T ≤ 450	1
450 < T ≤ 550	1-0,0058(T-450)

- **Fator de confiabilidade - k_e**

Os dados apresentados por Haugen e Wirching mostram desvios padrão de resistência a fadiga menor que 8%. Deste modo o fator de confiabilidade é descrito pela equação 2.14. (BUDYNAS & NISBETT, 2011)

$$k_e = 1 - 0,08Za \quad (2.14)$$

A tabela 2.4 mostra valores do fator de confiabilidade para certos números de confiabilidade.

Tabela 2.4 - Fator de confiabilidade (modificado: BUDYNAS & NISBETT, 2011)

Confiabilidade (%)	Variante de transformação Za	Fator de confiabilidade
50	0	1,000
90	1,288	0,897
95	1,645	0,868
99	2,326	0,814
99,9	3,091	0,753
99,99	3,719	0,702
99,999	4,265	0,659
99,99999	4,753	0,620

- **Fator de efeitos variados - k_f**

Este fator engloba efeitos como ambiente de trabalho, tensões residuais, dentre outros fatores que modificam a vida da peça mecânica quando associada aos corpos de prova (ROSA, 2012).

2.5.3 Concentradores de tensão e sensibilidade ao entalhe

Segundo Norton (2013) entalhe é uma descontinuidade geométrica que interrompe o “fluxo de forças” pela peça, em termos práticos essa descontinuidade pode ser um furo, ranhura, amassamento, chanfro ou até mesmo uma mudança repentina na seção do espécime. Estes

entalhes causam uma determinada concentração de tensões que aumenta os níveis de tensões localmente podendo levar a peça a um escoamento localizado. E na presença de cargas dinâmicas componentes dúcteis procedem como se fossem frágeis em falha por fadiga.

Em uma análise ou em um projeto mecânico que envolva entalhes deve-se primeiro encontrar o fator de concentração de tensões (K_t) e a partir deste fator encontra-se o fator de concentração de tensão de fadiga (K_f). Neuber e posteriormente Peterson aprofundaram-se nos estudos sobre esses fatores e conseguiram chegar em fórmulas que relacionam esses dois fatores. (BUDYNAS & NISBETT, 2011)

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (2.15)$$

$$q_{\text{cisalhamento}} = \frac{K_{fs} - 1}{K_{ts} - 1} \quad (2.16)$$

O termo q representa a sensibilidade ao entalhe e é obtido experimentalmente. De forma análoga existem os fatores K_{ts} e K_{fs} , que representam fator de concentração de tensões cisalhantes e fator de concentração de tensão cisalhante a fadiga, respectivamente.

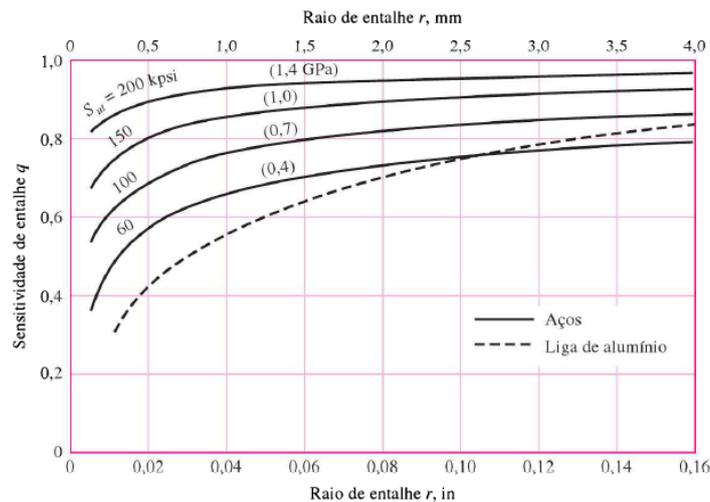


Figura 2.7 - Sensibilidade de entalhe versus raio de entalhe (BUDYNAS & NISBETT, 2011)

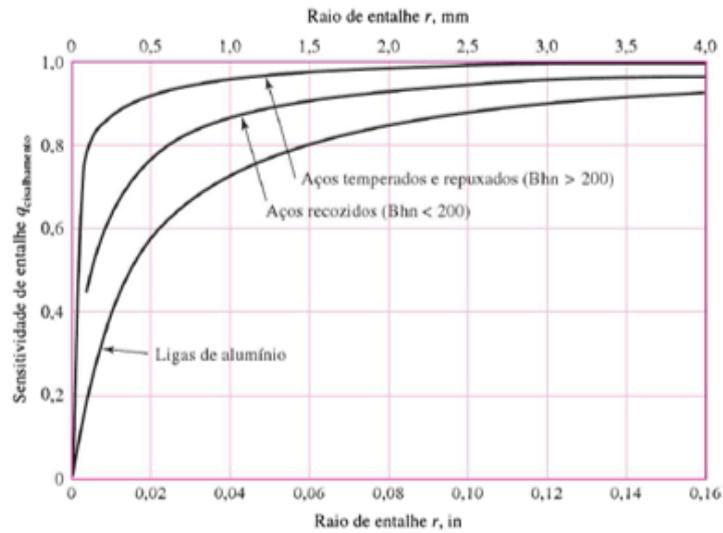


Figura 2.8 - Sensibilidade de entalhe cisalhamento versus raio de entalhe (BUDYNAS & NISBETT, 2011)

As figuras 2.7 e 2.8 mostram alguns valores de sensibilidade de entalhes para determinados materiais. Após conseguir obter os valores de K_f e K_{fs} finalmente pode-se encontrar o valor da tensão normal máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) e a tensão de cisalhamento máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$) que o componente mecânico pode suportar em fadiga. Estas tensões est\ao representadas nas equa\c{c}o\es 2.17 e 2.18 (BUDYNAS & NISBETT, 2011)

$$\sigma_{m\acute{a}x} = K_f \sigma_0 \quad (2.17)$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = K_{fs} \tau_0 \quad (2.18)$$

Onde σ_0 e τ_0 s\ao respectivamente tens\ao normal nominal e tens\ao de cisalhamento nominal.

2.5.4 Crit\erio de falha por fadiga para tens\ao flutuante

Segundo Garcia (2012) \e muito frequente a tens\ao m\edia nas pe\c{c}as mec\anicas n\ao serem nulas em condi\c{c}o\es pr\aticas de opera\c{c}o\es. Este fator modifica o limite de resist\encia a fadiga, nota-se na figura 2.12 (a) que o limite de resist\encia a fadiga aumenta \a medida que a raz\ao de tens\o\es R cresce. J\aa a figura 2.12 (b) mostra a amplitude de tens\ao em termos do n\umero de ciclos (N).

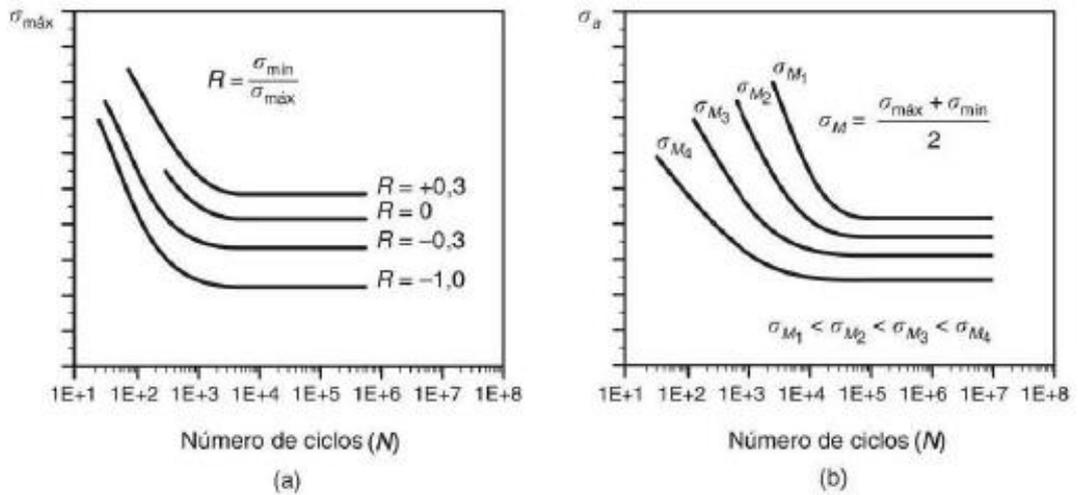


Figura 2.9 - (a) Limite de resistencia a fadiga em relação a razão de tensões; (b) Amplitude de tensão em relação as tensões médias (modificado: GARCIA, 2012)

Em projetos mecânicos para facilitar as análises são utilizados critérios de falhas, sendo cinco critérios mais utilizados quando envolve fadiga, são estes: o de Sodeberg, o de Goodman modificado, o Gerber, ASME-elíptico e o de escoamento. Estes critérios estão exemplificados na figura 2.10 (BUDYNAS & NISBETT, 2011).

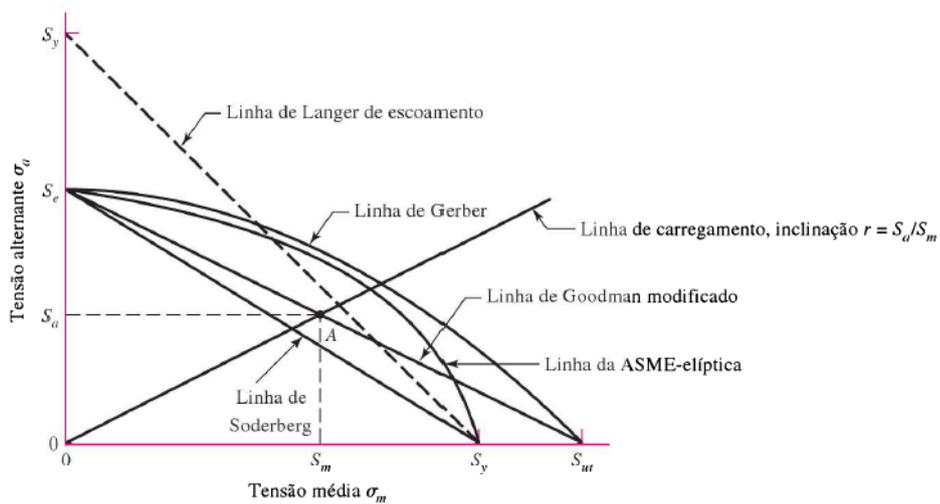


Figura 2.10 - Critérios de falha envolvendo fadiga (BUDYNAS & NISBETT, 2011)

As equações que regem as curvas do diagrama de critérios de falha são apresentadas a seguir, em que n representa o fator de segurança do projeto.

- **Sodeberg**

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n} \quad (2.19)$$

- **Goodman modificado**

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (2.20)$$

- **Gerber**

$$\frac{n \sigma_a}{S_e} + \left(\frac{n \sigma_m}{S_{ut}} \right)^2 = 1 \quad (2.21)$$

- **ASME-elíptico**

$$\left(\frac{n \sigma_a}{S_e} \right)^2 + \left(\frac{n \sigma_m}{S_y} \right)^2 = 1 \quad (2.22)$$

- **Escoamento**

$$\sigma_a + \sigma_m = \frac{S_y}{n} \quad (2.23)$$

3 FADIGA EM CABOS

Neste capítulo explica como o fenômeno da fadiga age sobre cabos condutores de energia elétrica, além de expor como são formados diferentes tipos de cabos condutores e ainda mostrando como ocorre a falha nestes cabos.

3.1 Fadiga em cabos condutores de energia elétrica

O cabo condutor é o componente fundamental das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, cuja a falha neste componente implica num gigantesco impacto financeiro, devido ao corte de energia elétrica nos diversos seguimentos e imensuráveis prejuízos causados pelos danos, além de considerar que o cabo condutor representa 40% do custo de investimento em capital de rede (FRONTIN, 2010). Assim sendo, a falha deste componente representa um dos maiores problemas mecânicos nas linhas de transmissão, por isso, a resistência à fadiga do cabo condutor é um parâmetro de extrema importância tanto na fase de concepção de projeto, como na programação de manutenção preditiva e preventiva (CIGRÉ, 2008).

O mecanismo de falha de fadiga de cabos condutores em linhas de transmissão aéreas é causado, em sua maioria, pela amplitude de vibração devido os efeitos do vento. O condutor sob a ação do vento é induzido à elevadas tensões por movimentos oscilatórios ou vibrações resultando no fenômeno de fadiga (CIGRÉ, 1995).

A vibração causada pelo vento ocorre em praticamente qualquer linha de transmissão, em qualquer momento, e em níveis moderados e baixos de vento (EPRI, 2006). Esta vibração, determina o comportamento do condutor, e é dependente da velocidade do vento, ângulo de incidência do vento no cabo, a carga de esticamento, tipo e massa do cabo condutor, carga de esticamento e o tamanho do vão livre (FADEL, 2010). Mesmo os cabos submetidos à ventos amenos, de baixa velocidade, se a frequência de vibração for igual a frequência natural do cabo condutor, ocasionará numa crescente absorção da energia do movimento de oscilação nos cabos e conseqüentemente um aumento na amplitude de vibração (FADEL, 2010).

A vibração no condutor pode gerar falhas localizadas em fios condutores, devido aos dispositivos instalados no condutor, como grampos de suspensão, braçadeiras, espaçadores, amortecedores entre outros dispositivos instalados, também pode gerar falha a itens associados para apoio e proteção do próprio condutor.

3.2 Tipos de vibração de cabos condutores de energia elétrica

Há três ocorrências distintas entre de vibrações que ocorre sobre os condutores a partir da excitação eólica, e possuem diferentes efeitos sobre os condutores e dispositivos associados aos condutores, são elas: vibração eólica, oscilação de sub-vão e galope (EPRI, 2006; HENRIQUES, 2006). A Figura 3.1 ilustra o comportamento do condutor em função do tipo de vibração.

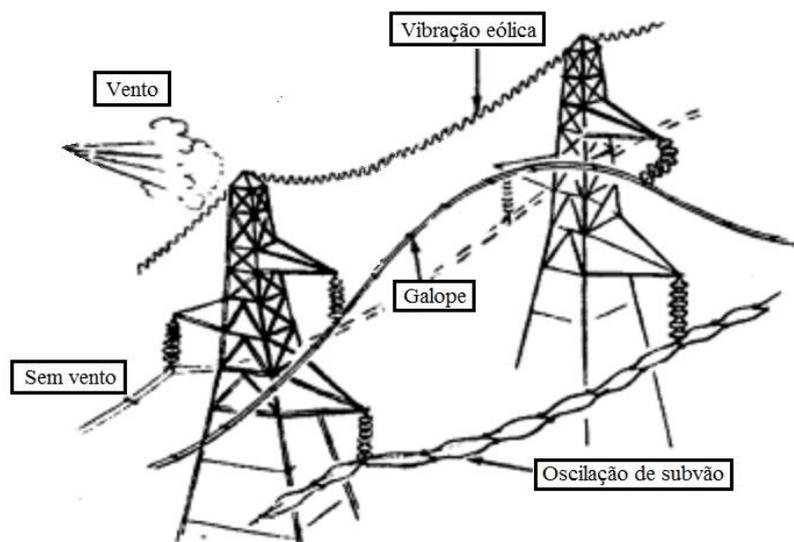


Figura 3.1 - Principais tipos de vibração de cabos condutores de linhas de transmissão aéreas de energia elétrica (Modificado: EPRI, 2006)

3.2.1 Galope

O galope ocorre na presença de ventos fortes e laterais, normalmente entre 7 m/s a 18m/s. Apresentando grandes amplitudes, de 5 a 300 vezes o diâmetro do condutor, cujo o movimento é primariamente vertical, e baixas frequências que variam de 0,1 a 3 Hz. (FURTADO, 2001). Trata-se de um tipo de vibração capaz de gerar mais prejuízos em curto período de tempo causando danos, devido aos grandes esforços dinâmicos envolvidos, não só aos condutores mais se estendendo aos diversos componentes a torre de transmissão.

Segundo Henriques (2006), uma das principais causas deste tipo de vibração é o acúmulo de gelo sobre o condutor propiciando instabilidade no perfil aerodinamicamente dos condutores, este comportamento pode ocasionar em elevadas cargas dinâmicas que conseqüentemente induz perigosos esforços nos condutores e na estrutura. Já no Brasil, há o registro da ocorrência deste tipo de oscilação devido ao regime de ventos.

3.2.2 Oscilação de sub-vão

As oscilações de sub-vão são conhecidas também como oscilações induzidas por esteira. Elas ocorrem em linhas de transmissão que utilizam feixes de condutores dispostos paralelamente e em direção perpendicular ao fluxo de vento, com velocidade entre 4 m/s a 18 m/s e frequência variando entre 1 e 5 Hz (FURTADO, 2001).

Segundo Kiessling (2003), este tipo de vibração apresenta grandes amplitudes de vibração, podendo alcançar valores de até 20 vezes o diâmetro do condutor, que podem ocasionar choques mecânicos entre os condutores. Isto é, as oscilações podem ficar limitada a um único sub-vão ou a um pequeno número de sub-vãos vizinhos. As oscilações de sub-vão

podem ocorrer de diversas formas, já que dependem da magnitude e da fase das forças atuando sobre o feixe de cabos (EPRI, 2006).

3.2.3 Vibração Eólica

Segundo Henriques (2006), a vibração eólica é caracterizada por movimentos de pequenas amplitudes, que raramente excedem o diâmetro do cabo, e elevada frequência, sendo assim de difícil detecção em inspeção visual. São causadas por ventos com velocidade entre 1 m/s e 7 m/s. Como dito anteriormente, a amplitude de oscilação deste tipo de vibração fica restrita a faixas próximas ao diâmetro do condutor e a frequência de vibração varia entre 3 Hz até 150 Hz, que dependem do tipo de cabo, carga de esticamento e local de construção da linha de transmissão (EPRI, 2006).

Produzem flexões alternadas de pequena amplitude, mas que produzem deformações nos pontos de suspensão e ancoragem do condutor. A vibração eólica é o tipo de vibração mais frequente, no entanto, como dito anteriormente sua detecção não é fácil, a junção destas características a torna perigosa, e deve ser levada em consideração nos projetos de linhas de transmissão.

De acordo com os dados apresentados por Amarante *et al.* (2001) sobre o potencial eólico do Brasil, há a predominância de ventos com velocidade média de 7,5 m/s, que corresponde a faixa de risco, por conseguinte os cabos condutores no Brasil estão propensos a apresentar o tipo de vibração eólica.

Na Tabela 3.1 apresenta de forma resumida as características gerais comparativas entre esses três diferentes tipos de vibração que ocorrem nas linhas de transmissão aéreas.

Tabela 3.1 - Comparação entre os tipos de vibrações dos cabos condutores de energia elétrica induzidos pelo vento (modificado: EPRI, 2006 e Furtado, 2001)

Características da vibração	Vibração eólica	Galope	Oscilação de sub-vão
Tipo de LT afetada	Todas	Todas	Feixe de condutores
Faixa de frequência (Hz)	3 a 150	0,1 a 3	0,15 a 10
Intervalo de amplitude pk-pk (Valor em relação ao diâmetro do cabo)	0,01 a 1	5 a 300	Modo corpo rígido: 0,5 a 80 Modo de sub-vão: 0,5 a 20
Condições favoráveis	Vibração eólica	Galope	Oscilação de sub-vão
Tipo de vento	Laminar	Laminar	Laminar

Velocidade do vento (m/s)	1 a 7	7 a 18	4 a 18
Superfície do cabo	Desimpedida ou faixa uniforme de gelo.	Coberta por camada assimétrica de gelo	Desimpedida e seca
Condições de projeto que influenciam o movimento do condutor	Auto amortecimento dos cabos, tensão de esticamento, uso de amortecedores e armaduras	Razão da frequência natural vertical com a torção, catenária, ângulo de mergulho e condições de suporte	Distância entre espaçadores, torção do feixe, arranjo dos subcondutores, separação dos subcondutores.
Danos causados	Vibração eólica	Galope	Oscilação de sub-vão
Tempo aproximado para dano severo se desenvolver	2 meses a 20 anos ou mais	1 a 48 horas	1 mês a 8 anos ou mais
Causas diretas do dano	Falha devido à fadiga ocasionada pela tensão cíclica de flexão.	Elevadas cargas dinâmicas	Impacto dos cabos condutores, abrasão, altos níveis de desgaste nos pontos de fixação
Componentes mais afetados	Cabos condutores e para-raios	Condutores, todos os elementos de fixação, ferragens, isoladores, estrutura da torre.	Ferragens de suspensão, espaçadores, amortecedores e os cabos

3.3 Mecanismo de falha por fadiga em cabos condutores de energia elétrica

As falhas por fadiga dos cabos condutores são mais propensas de ocorrerem nos pontos de restrição da movimentação do cabo, como amortecedores, espaçadores e em especial nos locais de suspensão. As restrições de movimento alteram a curvatura do cabo condutor fazendo com que os fios constituintes dos cabos deslizem entre si ou em relação às estruturas de fixação (EPRI, 2006). Esse movimento de micro deslizamentos juntamente com as forças de fricção causam o *fretting*. Segundo Azevedo, *et al* (2009) e Lindley (1997), esse fenômeno, resultado do desgaste por atrito entre as superfícies, ocasiona na liberação de um pó amarronzado constituído de principalmente de partículas duras de óxido de alumínio, resultado da oxidação do alumínio, assim esse movimento age como acelerador do processo de nucleação e propagação de trincas.

Segundo Mourão (2004), a vulnerabilidade dos cabos ao *fretting* pode resultar na ruptura completa do cabo condutor com o aumento do carregamento da linha. Pois, tanto os fios

da camada externa do condutor, por efeito do contato entre o cabo e o grampo, quanto os fios das camadas internas, em razão do deslizamento relativos entre os fios, estão sujeitas as trincas causadas pelo *fretting*. Nas inspeções de manutenção, a identificação dessas rupturas internas é trabalhosa, devido a sua localização, além de que o mesmo vento que causa a vibração eólica, responsável por essas falhas, é o mesmo que resfria os fios, mascarando o efeito térmico da fadiga.

Como são muitas as superfícies em contato no caso da montagem cabo e grampo associados à ocorrência de *fretting*, será necessário introduzir sobre a forma como os cabos condutores são estruturados e fixados aos grampos de suspensão.

3.3.1 Cabos condutores de energia elétrica e grampos de suspensão.

Os cabos condutores de energia elétrica são formados principalmente por fios ou ligas de alumínio, que podem conter fios de aço afim de agregar maior resistência ao material. Para a constituição dos cabos os fios estão dispostos torcidos de forma helicoidal, constituindo camadas concêntricas, cada camada em direção oposta em comparação a um fio central, que em conjunto com outros fios centrais compõem o condutor. A Tabela 3.2 apresenta os principais tipos de construção de cabos condutores e suas respectivas nomenclaturas.

Tabela 3.2 - Principais tipos de construção de cabos condutores (FADEL, 2010).

Nomenclatura	Descrição
CA (AAC)	Cabos de Alumínio (<i>All Aluminium Conductor</i>)
CAA (ACSR)	Cabos de Alumínio com alma de Aço (<i>Aluminium Conductor Steel Reinforced</i>)
CAL (AAAC)	Cabos de Alumínio Liga (<i>All Aluminium Alloy Conductor</i>)
ACAR	Cabos de Alumínio com Alma de Liga de Alumínio (<i>Alluminium Conductor Alloy Reinforced</i>)
TW	Fios Trapezoidais (<i>Trapezoidal Wires</i>)

Há vários tipos de grampos de suspensão, os convencionais são constituídos por material metálico resistente à corrosão e planejados para acondicionar movimentos vibratórios dos cabos condutores de pequena magnitude, além disso, sua estrutura de perfil suave garante a curvatura natural do cabo sem danificá-lo. A principal função deste dispositivo é a sustentação dos cabos nas torres de transmissão afim de reduzir a possibilidade de danos de diversas naturezas. A Figura demonstra a configuração dos fios dentro do cabo condutor e a superfície

de contato dentro do mesmo, que correspondem aos pontos de origem de trincas devido ao *fretting*, que podem ter origem em um dos diferentes pontos de contato (letras A, B, C e D).

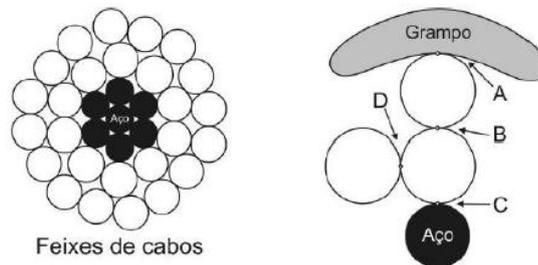


Figura 3.2 - Configuração dos fios no cabo condutor e a superfície em contato dentro do grampo, representadas pelas letras A, B, C e D. (BELLORIO, 2009)

Na montagem do cabo e o grampo, as superfícies em contato do condutor são pressionadas entre si em consequência aos componentes de força que surgem pelo entrelaçamento dos fios do cabo quando tracionadas, o aperto do cabo contra o grampo quando fixado e as forças de fricção desenvolvidas pela movimentação das superfícies submetidas à vibração eólica. Esses apertos causam marcas na superfície dos fios, chamadas de *mossas*, que atuam como concentrador de tensão e favorecem a redução da resistência do fio através do favorecimento da nucleação de trincas e a suscetível falha do componente do cabo. O tipo de material componente dos fios, a forma de construção do cabo e a carga de contato entre os componentes são fatores que determinam a forma das *mossas*.

De acordo com Fadel (2010) e Bellorio (2009), a carga de esticamento aplicada sobre o condutor altera o perfil de contato entre os fios e o grampo, originando diversas superfícies de *fretting*, nucleação e o aumento de inúmeras trincas no mesmo fio. Essas trincas sob a ação da carga de tração facilita o avanço das trincas.

O estiramento do cabo tem ligação direta com os entalhes presentes no cabo condutor. Quanto maior for a carga de estiramento o fio de liga de alumínio sofrerá uma maior carga de esmagamento e conseqüentemente *mossas* mais profundas em sua superfície. (BELLORIO, 2009).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste projeto é verificar o efeito causado na resistência a fadiga pela presença de mossas em fios de cabos condutores de energia elétrica. Para realizar essa verificação foram realizados ensaios de fadiga em fios de liga de alumínio 1350. Os ensaios foram feitos com mossas induzidas nos corpos de prova, sendo a primeira configuração com uma mossa gerada apenas pelo contato entre os fios e a outra configuração devido a presença de *fretting*. Para tal procedimento foi necessário adquirir duas curvas tensão-vida (método S-N), com configurações diferentes. A primeira foi feita utilizando uma mossa devido ao *fretting* de 30 mil ciclos durante o ensaio de fadiga e a segunda utilizando 100 mil ciclos de *fretting*.

A metodologia utilizada neste trabalho para a análise da resistência a fadiga em fios entalhados é a Tensão-Vida (método S-N). Este método consiste em relacionar o número de ciclos de um determinado espécime até sua falha com a sua respectiva tensão. Após obter as curvas S-N foram feitas inferências empíricas sobre os dados obtidos e comparação com outros trabalhos, além de análises das imagens de superfícies da fratura.

Para poder realizar os ensaios de fadiga e por fim as análises, antes foi necessário obter os corpos de prova (CP), depois a caracterização das mossas nos corpos de prova, realização dos ensaios de fadiga, aferição da massa dos corpos de prova antes e depois do ensaio de fadiga, análise da geometria da mossa, ensaio de tração para verificar se houve aumento significativo entre as forças de ruptura após o ensaio de *fretting* para marcar as mossas.

Os próximos subitens possuem a descrição do material e dos equipamentos além de explicar com maior detalhamento os procedimentos experimentais para alcançar o objetivo proposto por este projeto.

4.1 Materiais utilizados

4.1.1 Cabo condutor

O cabo condutor de energia elétrica utilizado para a realização dos ensaios foi o IBIS, este cabo foi obtido no laboratório de cabos da Universidade de Brasília.

O cabo IBIS é um condutor de alumínio com alma de aço (CAA) que possui 26 fios de alumínio 1350 H19 com diâmetro de 3,14 mm e uma alma de aço com 7 fios e diâmetro de 2,44 mm., formando assim um diâmetro total do cabo é de 19,88 mm. A massa linear é de 813,5 kg/km (ALUBAR, 2010).

As propriedades do cabo IBIS estão apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1- Propriedades do cabo IBIS (NEXANS, 2013)

Condutor	Bitola (kcmil)	Área nominal do alumínio (mm ²)	Diâmetro nominal do cabo (mm)	Massa linear (kg/km)	Carga de ruptura (kgf)
IBIS	397,5	201,34	19,88	813,5	7386

A liga AA 1350 faz parte da série 1xxx que são as ligas não tratáveis termicamente e que possui um controle intenso sobre o percentual de impurezas pois na presença dessas a condutibilidade elétrica do fio cai abruptamente. Segundo a IACS (*International Annealed Copper Standard*), essa liga possui uma condutividade elétrica de 62% quando comparada a um fio de cobre de mesmo diâmetro. Além de possuir uma boa condutividade elétrica ela também possui alta resistência a corrosão, boa conformabilidade e soldabilidade. Na sua forma natural a liga AA 1350 é dúctil, mas para ser usada como um fio no cabo IBIS ela sofre um tratamento H19 para ser endurecida. As propriedades mecânicas da liga de alumínio 1350-H19 que será utilizada como o material para confecção do corpo de prova estão mostradas na tabela 4.2 (ARAÚJO *et al*, 2013).

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas da liga AA 1350-H19 (ARAÚJO *et al*, 2013)

Liga de Alumínio	Módulo de Young (GPa)	Limite de resistência a tração S_{ut} (MPa)	Limite de resistência ao escoamento S_y (MPa)	Limite de resistência a fadiga S_e (MPa)	Dureza (HBn)	Alongamento na quebra (%)
AA 1350-H19	68,9	186	165	48,3	50	$\geq 1,7$

4.2 Equipamentos utilizados

4.2.1 MTS

A MTS (*Material Test System*) é uma máquina universal de ensaios e ela se encontra no prédio SG9 da Universidade de Brasília, ela foi utilizada neste projeto para o estiramento dos fios AA 1350 – H19, e também para realização dos ensaios de fadiga com os fios já entalhados. Este equipamento possui o seu próprio *software* responsável por fornecer os dados de força e a quantidade de ciclos até o momento de ruptura do corpo de prova.



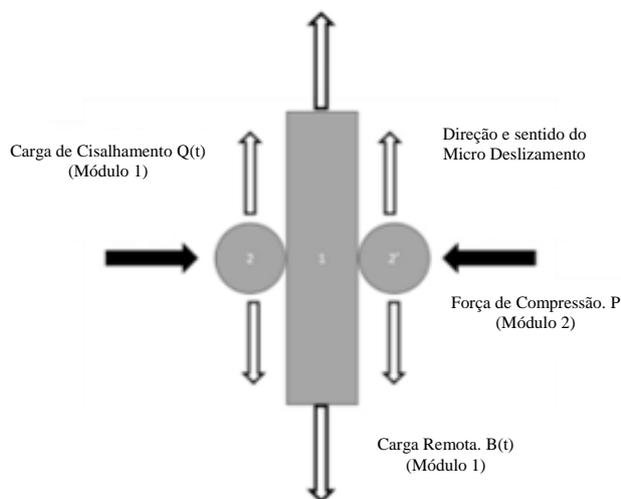
Figura 4.1 – MTS

4.2.2 Dispositivo pneumático de *Fretting*

O dispositivo de *fretting* é um equipamento pneumático projetado por alunos de pós-graduação da Universidade de Brasília, e ele foi utilizado neste projeto para aplicar uma carga perpendicular nos fios para simular o *fretting* e conseqüente induzir a formação da moessa. Ele está mostrado na figura 4.2.



(a)



(b)

Figura 4.2 – (a) Dispositivo de *fretting* acoplado a MTS; (b) Representação esquemática do dispositivo de *fretting* (DIAZ, *et al.* (2017))

4.2.3 Microscópio Confocal

O microscópio utilizado neste projeto é o Confocal Olympus LEXT OST 4100. Este possui feixes de laser com comprimento de onda de 405 nm e uma resolução máxima de 0,12

µm quando definido um plano xy. Ele ainda gera imagens topográficas e pode ter um aumento de até 17800x de uma determinada imagem.

Este *hardware* possui um *software* próprio, e se encontra dentro do SG9 na Universidade de Brasília. Neste projeto ele foi utilizado para gerar imagens das superfícies das mossas.



Figura 4.3 - Microscópio Confocal Olympus LEXT OST 4100

4.3 Procedimentos experimentais

4.3.1 Estiramento dos fios - obtenção dos corpos de prova

Para a obtenção dos corpos de prova foram utilizados apenas os fios da 3ª camada do cabo IBIS. Desconsiderou 1ª e a 2ª camadas por serem de aço. A 4ª camada, por ser a mais externa e possuir maiores defeitos do enrolamento na bobina, transporte, arranhões, entre outros, não foi utilizada para a confecção de corpos de prova, contudo foi aproveitada para a fabricação de sapatas que simularam o *fretting* nos ensaios de fadiga.

Ao desenrolar o cabo IBIS e conseguir o fio da liga AA 1350 – H19 foi necessário estica-los, e para esta etapa utilizou a MTS. A forma do cabo está mostrada na figura 4.4.

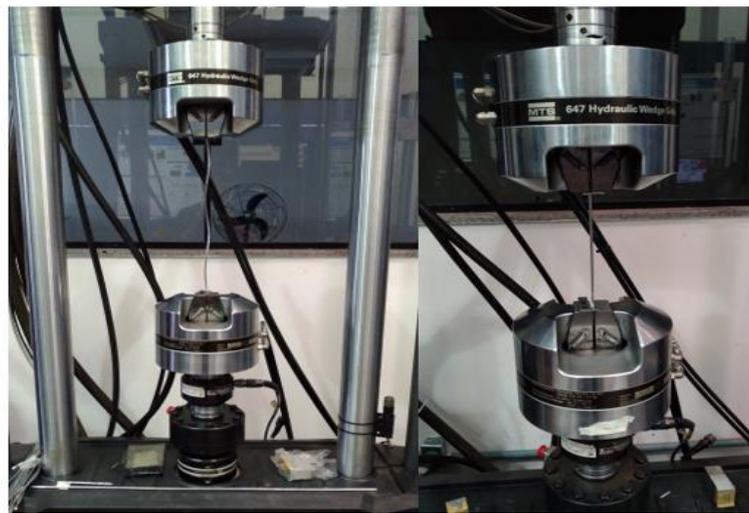


Figura 4.4 – Pedaço cortado do cabo IBIS

Para esticar o fio foi necessário a realização de um ensaio monotônico axial na MTS. Este procedimento ocorre posicionando os fios nos mordentes da máquina e aplicando os parâmetros mostrados na tabela 4.3. A figura 4.5 mostra o fio antes e após o estiramento.

Tabela 4.3 - Parâmetros de estiramento de fios

1º Esticamento	
Velocidade (mm/min)	Força (N)
10	0 – 150
5	150 – 500
2	500 – 1000
1	Até a ruptura
2º Esticamento	
Velocidade (mm/min)	Força (N)
1	Até a ruptura



(a)

(b)

Figura 4.5 (a) Fio antes do ensaio de estiramento; (b) Fios após o estiramento

Este procedimento foi realizado em todos os fios da 3ª camada e foi realizado em duas etapas, a primeira variando a velocidade de esticamento de acordo com a força medida e a segunda utilizando uma velocidade constante. Após conseguir esticar todos os fios, foi utilizado um alicate para cortar os fios, o tamanho de cada CP foi de 220 mm, este tamanho foi definido de acordo com o espaço disponível dentro da MTS que possui o dispositivo pneumático de *fretting* acoplado. Ao todo foram confeccionados 55 corpos de prova que tiveram seu diâmetro medido por um micrômetro, os diâmetros dos CP's utilizados no projeto estão listados na Tabela A1.



Figura 4.6 - Corpos de prova da liga AA 1350 antes de possuir as mossas

4.3.2 Caracterização das mossas e ensaio de fadiga

- Considerações iniciais

Segundo a norma E739-91 (2004) que rege o método de obtenção da curva S-N, para este tipo de experimento o índice de replicação de testes deve ser entre 33 a 50%, e a quantidade de corpos de prova a serem utilizados em cada ensaio deve estar entre a faixa de 6 a 12 CP's.

Para definir a quantidade de CP's (NCP) nos ensaios utilizou a equação 4.1. Por hipótese inicial o índice de replicação adotado para este projeto foi de 33%, e a quantidade de níveis de tensões (Nt) ensaiadas 4.

$$\text{replicação} = 100 \times \left(\frac{1-Nt}{NCP} \right) \quad (4.1)$$

Ao isolar o fator NCP da equação 4.1 foi possível constatar que o número mínimo de CP's requeridos para estar dentro da norma supracitada foi de 9.

Após conseguir obter o número mínimo de CP's, foi escolhida uma curva S-N de referência, para comparação dos resultados deste projeto, esta curva foi obtida do relatório parcial do ano 3 sobre "Desenvolvimento de metodologia para redução de custos na estimativa de vida a fadiga de cabos condutores de energia" de Diaz, *et al.* (2017). As características dos ensaios desta curva estão descritas na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Características da curva S-N de referência

Cabo condutor	Tipo de ensaio	Força de compressão da mossa (N)	Razão de tensões (R)
IBIS	Ensaio de fadiga com a presença de <i>fretting</i> até a falha	1000	0,1

Como hipótese inicial para os testes escolheu-se levantar duas curvas S-N com CP's marcados por mossas com força de compressão de 1000 N, contudo a diferença entre elas está na forma em que cada mossa foi construída, na curva 1 a mossa foi realizada fazendo 30 mil ciclos de *fretting* durante o ensaio de fadiga, já a curva 2 foi feita utilizando 100 mil ciclos de *fretting*. Esses valores de ciclos de *fretting* foram escolhidos por serem quantidades suficientemente baixas em relação ao número de ciclos de menor vida da curva de referência. As características dessas curvas estão de forma simplificada na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Características das curvas S-N levantadas

Cabo condutor	Tipo de ensaio	Força de compressão da mossa (N)	Razão de tensões (R)	Quantidade de níveis de Tensão	Quantidade de CP's
IBIS	Ensaio de fadiga com <i>fretting</i> até 30 mil ciclos (curva 1)	1000	0,1	4	12
IBIS	Ensaio de fadiga com <i>fretting</i> até 100 mil ciclos (curva 2)	1000	0,1	4	9

A tabela 4.6 descreve os níveis de tensões adotados para a realização dos ensaios de fadiga.

Tabela 4.6 - Quantidade de CP's em cada amplitude de tensão nas curvas 1 e 2

Tipo de curva	Quantidade de CP's utilizados em cada nível de Amplitude tensão				
	120 MPa	100 MPa	90 MPa	83 Mpa	80 MPa
Curva 1	3	3	3	-	3
Curva 2	2	2	2	3	-

- Indução da moossa e ensaios de fadiga

Ao determinar todos os parâmetros iniciais houve o início da indução das moosas juntamente com os ensaios de fadiga, eles foram realizados na MTS com o dispositivo de *fretting* acoplado.

As moosas foram induzidas por dois procedimentos, sendo o primeiro pelo contato da sapata com o fio com uma força de 1000 N e a segundo forma também utilizou a mesma força no entanto diferiu por aplicar essa carga em *fretting*.

Para indução da moossa e realização do *fretting* foi necessário utilizar uma sapata do mesmo material do fio ensaiado, esta sapata fica posicionada a 29° em relação ao fio conforme é mostrado no desenho esquemático da figura 4.7. Esta sapata precisou ser apertada no atuador do dispositivo de *fretting*, e para isso aumentou a força gradativamente até 200 N no software de controle do dispositivo de *fretting*. Após comprimir a sapata retirou-se a força e por fim aparafusou a sapata no atuador.

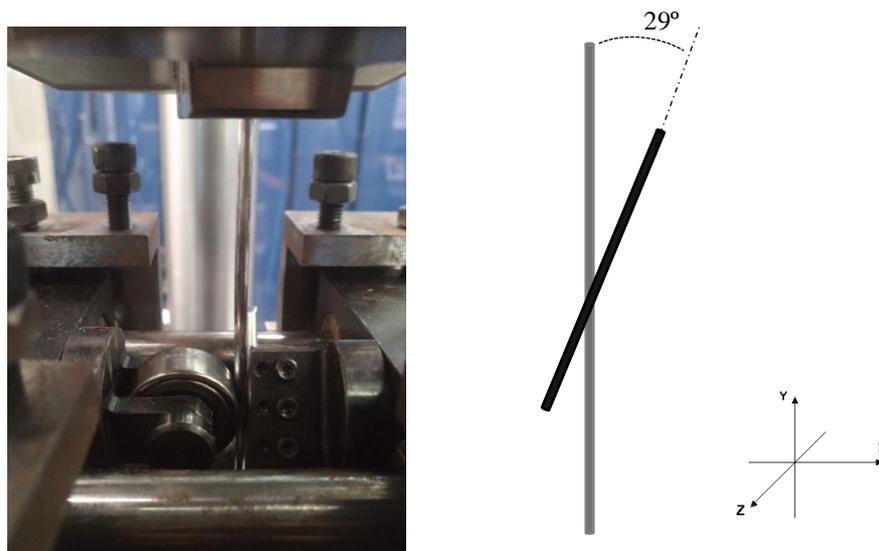


Figura 4.7 – (a) Fio sendo marcado pelo dispositivo de *fretting*; (b) Posição relativa entre a sapata e o CP

Depois de colocar a sapata colocou o CP que possui 220 mm de comprimento, sendo que 40 mm é utilizado para prender o CP nos mordentes superior e inferior da MTS. Após

fechar os mordentes (com pressão de 2 MPa) foi aplicada a força média (tensão média multiplicada pela área circular do fio) para esticar o CP. Depois de estica-lo finalmente iniciou-se a indução da moessa, que foi feita pelo dispositivo de *fretting*, este possui o seu próprio software de controle no qual aumenta gradativamente a força aplicada sobre o fio, primeiramente iniciou-se com 30 N, depois 750 N e por fim 1000 N. A configuração do ensaio cíclico no software de controle da MTS foi realizada inserindo a força média, força alternada e a frequência de ciclagem, que nesta etapa foi de apenas 10 Hz. Após todas estas etapas o ensaio é iniciado.

Ao completar determinada quantidade de ciclos (depende da configuração da curva 1 ou 2) o ensaio foi parado e, portanto, retirou-se a força do atuador do dispositivo de *fretting* para que pudesse encerrar o *fretting*. Devido aos procedimentos descritos anteriormente a moessa foi induzida, e finalmente pode-se iniciar o ensaio puramente de fadiga, aumentando a frequência de ciclagem para 30 Hz.



Figura 4.8 – Moessa induzida no CP

Os parâmetros de área, tensão e força para cada corpo de prova estão descritos nas tabelas 4.7 e 4.8 para as curvas 1 e 2 respectivamente.

Tabela 4.7 - Parâmetros da curva 1

Nº do CP	Área (mm ²)	Tensão máxima (MPa)	Tensão mínima (MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão alternada (MPa)	Força média (N)	Força alternada (N)
1	7,682	120	12	66	54	507,024	414,838
2	7,647	120	12	66	54	504,676	412,917
3	7,678	120	12	66	54	506,781	414,639
4	7,814	100	10	55	45	429,779	351,637
5	7,678	100	10	55	45	422,317	345,532
6	7,666	100	10	55	45	421,642	344,980
7	7,745	90	9	49,5	40,5	383,375	313,670
8	7,565	90	9	49,5	40,5	374,454	306,371
9	7,715	90	9	49,5	40,5	381,911	312,473
10	7,761	80	8	44	36	341,483	279,395
11	7,617	80	8	44	36	335,158	274,220
12	7,787	80	8	44	36	342,625	280,329

Tabela 4.8 - Parâmetros da curva 2

Nº do CP	Área (mm ²)	Tensão máxima (MPa)	Tensão mínima (MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão alternada (MPa)	Força média (N)	Força alternada (N)
13	7,533	120	12	66	54	497,183	406,786
14	7,583	120	12	66	54	500,479	409,483
15	7,522	100	10	55	45	413,717	338,496
16	7,584	100	10	55	45	417,133	341,291
17	7,735	90	9	49,5	40,5	382,887	313,271
18	7,734	90	9	49,5	40,5	382,826	313,221
19	7,683	83	8,3	45,65	37,35	350,748	286,975
20	7,439	83	8,3	45,65	37,35	339,568	277,828
21	7,720	83	8,3	45,65	37,35	352,418	288,342

4.3.3 Avaliação da resistência mecânica e caracterização da região de fratura após o ensaio de *fretting* por determinado número de ciclos

Esta avaliação consistiu em analisar a resistência mecânica dos CP's ensaiados com *fretting* com uma carga de adesão de 1000 N e uma tensão alternada de 45 MPa com R=0,1 e depois observou a região da superfície da moesa para caracterizá-la, nesta etapa foram utilizados seis corpos de prova. Entretanto antes de realizar este ensaio foram necessárias outras etapas que estão descritas nos parágrafos subsequentes.

Primeiramente utilizou uma balança de precisão com resolução de 0,1 mg para aferir a massa dos cinco fios antes de qualquer procedimento para poder verificar posteriormente a perda de massa. Após esta etapa os corpos de prova foram ensaiados em fadiga na presença de *fretting* com determinados números de ciclos. A quantidade de ciclos de *fretting* estão informadas na tabela 4.9. Depois disso verificou novamente a massa dos CP's para verificar qual foi a perda de material durante o processo de *fretting*.

Tabela 4.9 - Quantidade de ciclos de *fretting* para cada CP

CP	Quantidade de ciclos com <i>fretting</i>
27	500000
28	100000
29	30000
30	9000
31	2700
32	810

- Perda de massa

Para realizar tal procedimento utilizou uma balança de precisão com resolução de 0,1 mg onde verificou a massa de cada CP por quatro vezes antes de serem ensaiados em fadiga sobre condição de *fretting*. Após os ensaios verificou novamente a massa de cada CP e anotou a diferença de massa entre o peso final e inicial.

- Caracterização da geometria

Após a verificação da massa os CP's foram levados ao microscópio Confocal para caracterizar a geometria das mossas feitas pelo *fretting*, obtendo o comprimento dos semieixos maior e menor, e a sua profundidade.

- Ensaio de tração

Depois de todas essas etapas foi possível realizar o ensaio de tração, este ensaio foi feito na MTS utilizando uma velocidade de 1 mm/min, com intuito de verificar a força de ruptura de cada corpo de prova.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 Ensaios de fadiga

Nos subitens a seguir estão descritos os resultados obtidos em cada etapa deste projeto.

5.1.1 Mossas com a presença de *fretting*

As tabelas 5.1 e 5.2 relacionam a tensão aplicada (S) no CP com a vida (N) para as curvas 1 e 2 respectivamente.

Tabela 5.1 - Vida para cada corpo de prova da curva 1

CP	Tensão máxima (MPa)	Razão de tensões (R)	Tensão alternada (MPa)	Vida, N (ciclos)	<i>Run Out</i>
1	120	0,1	54	90626	-
2	120	0,1	54	262512	-
3	120	0,1	54	152067	-
4	100	0,1	45	736668	-
5	100	0,1	45	245973	-
6	100	0,1	45	823744	-
7	90	0,1	40,5	1159657	-
8	90	0,1	40,5	748770	-
9	90	0,1	40,5	4009499	Sim
10	80	0,1	36	2341008	-
11	80	0,1	36	5155106	Sim
12	80	0,1	36	9247208	Sim

Tabela 5.2 – Vida para cada corpo de prova da curva 2

CP	Tensão máxima (MPa)	Razão de tensões (R)	Tensão alternada (MPa)	Vida, N (ciclos)	<i>Run out</i>
13	120	0,1	54	206104	-
14	120	0,1	54	233304	-
15	100	0,1	45	330033	-
16	100	0,1	45	331733	-
17	90	0,1	40,5	686144	-
18	90	0,1	40,5	1124093	-
19	83	0,1	37,35	1121964	-
20	83	0,1	37,35	445974	-
21	83	0,1	37,35	3554349	Sim

A figura 5.1 mostra os dados da tabela, facilitando a interpretação.

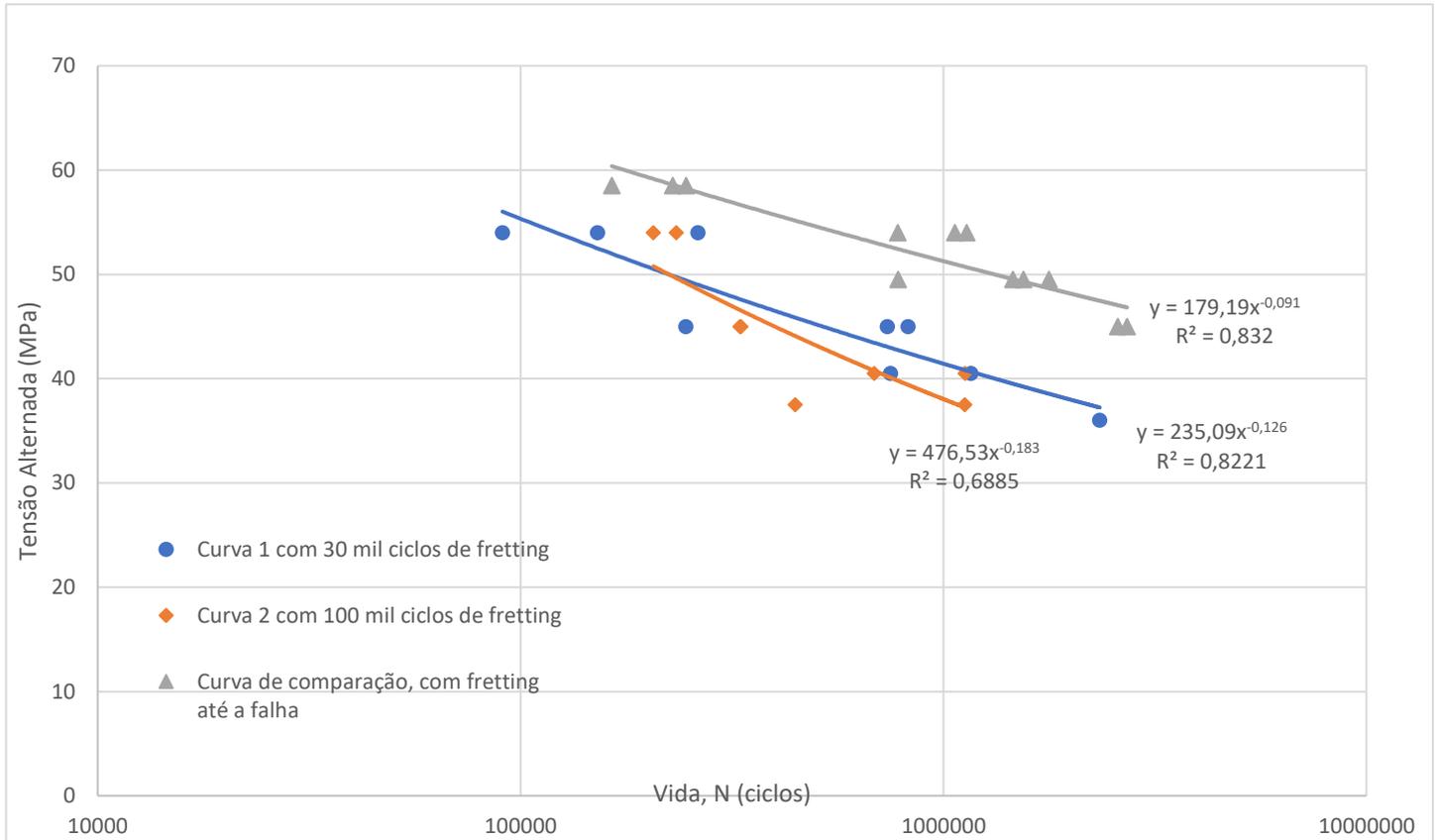


Figura 5.1 - Resultado das curvas S-N

Ao observar as curvas contidas na figura 5.1 pode-se inferir empiricamente que a curva de referência apresentou maior resistência a fadiga em relação as curvas 1 e 2. E também que a curva 1 possui uma resistência a fadiga ligeiramente superior a curva 2.

Após concluir os ensaios da curva 1 verificou que a curva de referência possuía uma vida maior, devido a isso esperava-se que quanto mais aumentasse a quantidade de ciclos de *fretting* maior a resistência a fadiga, contudo depois de obter os resultados da curva 2 que possui 100 mil ciclos de *fretting* para a indução da mocha observou um decréscimo na resistencia a fadiga quando comparado com a curva 1.

5.1.2 Mossas geradas pelo contato entre o fio e a sapata

Os resultados obtidos do ensaio de fadiga quando a indução da mocha foi gerada apenas pelo contato entre os fios são mostrados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Vida em fadiga para um CP com moosa de 1000 N em uma tensão alternada de 54 MPa

Tensão média de 66 MPa e Tensão alternada de 54 MPa		
CP	Quebrou na moosa?	Vida (ciclos)
22	Sim	366091
23	Não	436788
24	Sim	431298
25	Não	292819
26	Não	229833

Os resultados descritos na tabela 5.3 foram obtidos através de ensaio de fadiga com uma amplitude de tensão de 120 MPa e $R=0,1$. Percebe-se que para esta tensão a moosa não foi o maior concentrador de tensão presente nos fios ensaiados pois apenas 2/5 falharam em sua região, os outros 3/5 falharam em regiões dentro do comprimento útil do CP, próxima moosa A causa desse acontecimento pode ser relacionada a vários fatores como a fabricação do fio, enrolamentos dos fios para formação do cabo, enrolamento na bitola, ou ao esticamento dos fios, etc. Devido a isso não foram realizados mais ensaios nesta configuração de moosa sem o *fretting* pois a taxa de falha é muito baixa.

Ao se comparar os dados desta tabela com a curva de referência (com *fretting* em sua plenitude) observa-se que vida média é consideravelmente menor. Uma das hipóteses para explicar este fato pode ser que durante o *fretting* o fio está sendo lixado e diminuindo a velocidade de propagação de suas trincas. Contudo fica difícil afirmar isso pois este fio não seguiu uma ordem de falha na região da moosa, ou seja, existem outros concentradores de tensões desconhecidos no comprimento útil do CP.

5.2 Avaliação da resistência mecânica do fio submetido a condição de *fretting* por determinado número de ciclos; perda de massa; geometria da moosa

Os resultados da resistência mecânica do fio após o ensaio de tração estão expressados na tabela 5.4. Os gráficos de tensão vs deformação de cada CP estão apresentados nos anexos deste trabalho.

Tabela 5.4 – Resistência a tração

CP	N (ciclos)	S_{rup} (MPa)	Força de ruptura (N)
27	500000	166,33	1268
28	100000	167,60	1282
29	30000	161,92	1233
30	9000	166,66	1276
31	2700	171,63	1308
32	810	170,18	1298

O ensaio de tração realizado com os CP's' após sofrerem *fretting* teve o intuito de obter informações para explicar a incoerência relatada no subitem 5.1.1. Contudo ao analisar esses dados da tabela 5.4 verificou-se que há apenas pequenas variações na força de ruptura

quando comparadas entre si, o que não explica muito sobre o porquê de tal comportamento das curvas S-N.

A perda de massa de cada CP depois de determinadas quantidades de ciclos em fadiga está mostrada na figura 5.2.

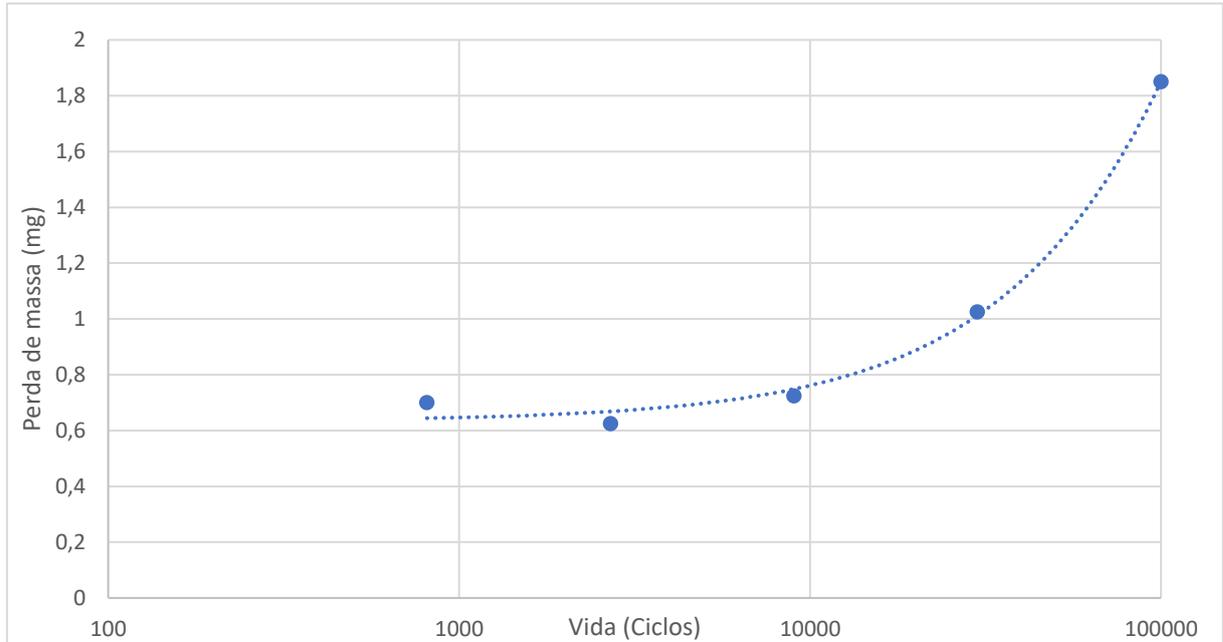


Figura 5.2 - Vida vs Perda de massa

A partir dos dados da figura 5.2 verifica-se que a taxa de perda de massa dos CP's evolui de forma exponencial com o aumento do número de ciclos de *fretting*, o que pode indicar que a medida o componente é ciclado as trincas são lixadas do CP. Contudo para verificar se esta inferência está correta será necessário realizar análises na superfície de fratura em microscópios mais precisos como o MEV (microscópio eletrônico de varredura).

A tabela 5.5 mostra as medidas da geometria das mossas dos CP's ensaiados em determinados ciclos de *fretting*. A figura 5.3 relaciona a vida dos componentes com área da elipse (forma geométrica que se aproxima da moessa).

Tabela 5.5 - Caracterização geométrica das mossas

CP	N (ciclos)	Semieixo maior (μm)	Semieixo menor (μm)	Profundidade (μm)
27	500000	5875,47	1386,98	292,63
28	100000	5689,64	1348,35	242,23
29	30000	5776,10	1316,73	249,32
30	9000	5404,82	1218,41	208,00
31	2700	5555,01	1315,24	214,72
32	810	5315,99	1279,06	227,07

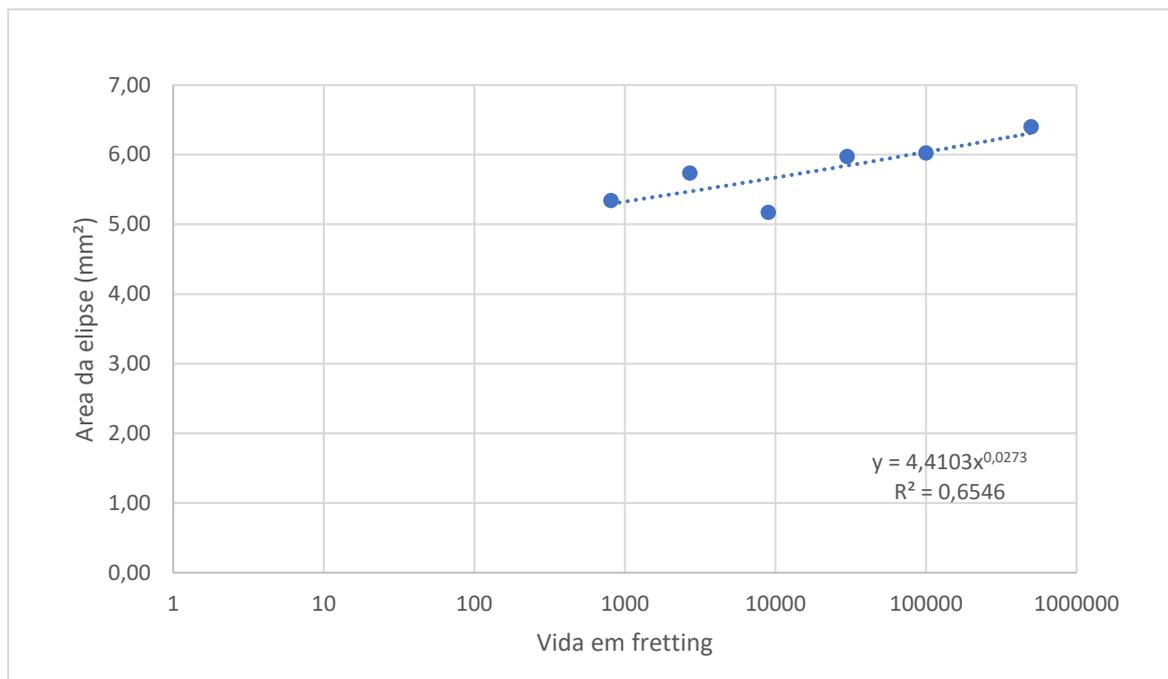


Figura 5.3 - Vida do fio x área da moessa

Observa-se na figura 5.3 que a área de contato da moessa e sapata aumenta a medida que o número de ciclos de *fretting* também aumenta, ou seja, o concentrador de tensões que atua sobre esse componente cresce com o número de ciclos de *fretting*. Esperava-se com esses dados que a curva de comparação (com *fretting* durante toda a vida) durasse menos do que as curvas que são ensaiadas com menores quantidades de ciclos com *fretting*. Contudo os resultados não mostraram isso. Ao aceitar o resultado e construir uma determinada lógica sobre ele esperava-se que a curva 2 (possui 30 mil ciclos de *fretting*) tivesse uma vida menor em relação a curva com 100 mil ciclos de *fretting*, todavia novamente não ocorreu o que era esperado.

Para avaliar o motivo desses acontecimentos foram feitas imagens das superfícies da moessa no microscópio Confocal, estas imagens estão representadas na figura 5.4. Ao analisar as moessas pode-se verificar que o CP que ensaiou fadiga em *fretting* por menos ciclos possui a menor área e não chega a aparecer marcas de *fretting* devido ao escorregamento, só aparece a marca de adesão (força de contato entre o fio e a sapata, no caso 1000 N). A partir da moessa de 30 mil ciclos já é possível ver que ela está mais desgastada e também já apresenta marcas de uma nova elipse em sua superfície, o que está claro de enxergar nas moessas de 100 mil e 500 mil ciclos. O surgimento dessa nova elipse deve-se ao fato da força de escorregamento entre a superfície do fio e da sapata.

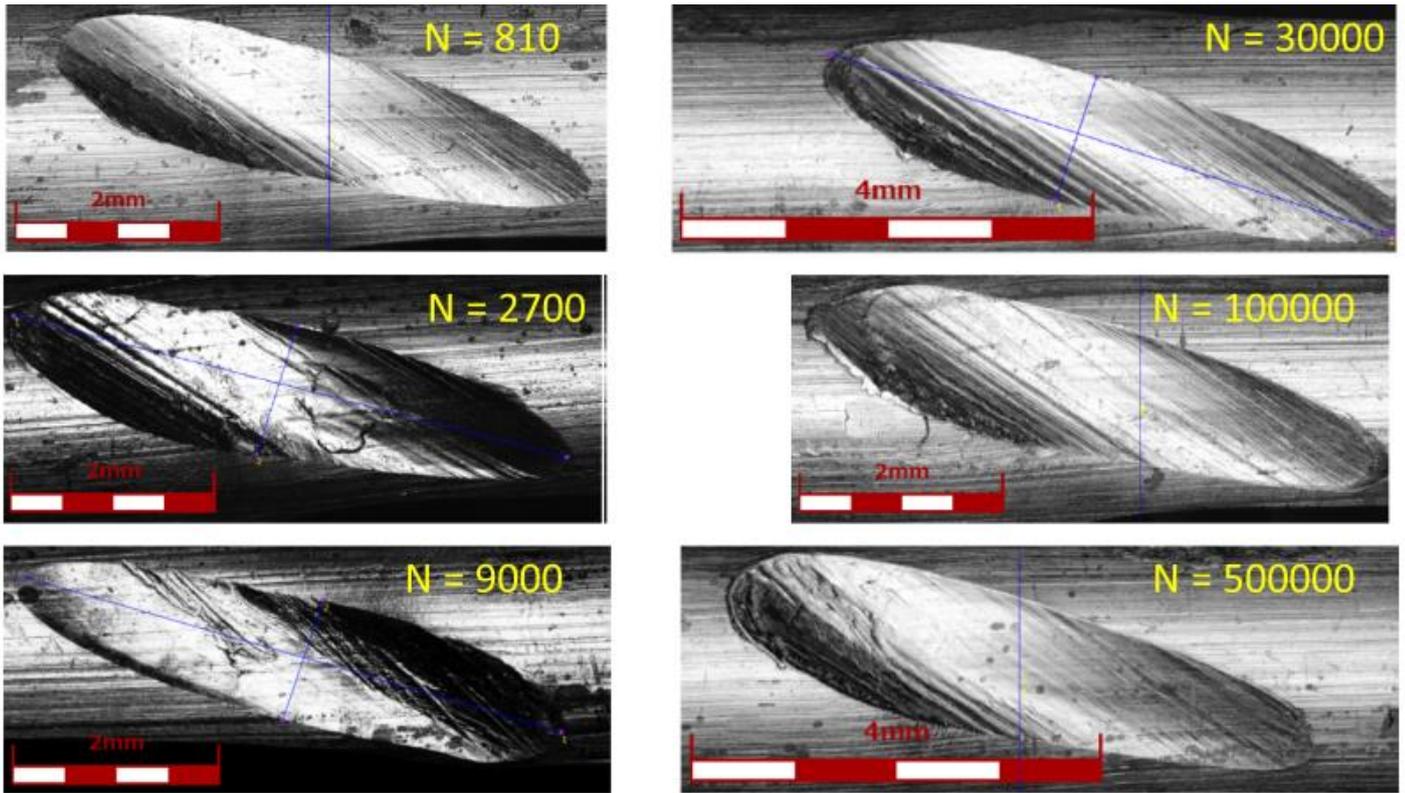


Figura 5.4 - Superfícies das mossas no microscópio Confocal com 10x de aumento

Mesmo com essa análise da superfície da mossa não foi possível ter explicações conclusivas dos resultados das curvas S-N apresentados no item 5.4. Sendo assim seria necessária uma análise da região de fratura, o qual não foi realizada neste trabalho por não ter tido acesso ao microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Um fato importante a se relatar é que ao analisar os CP's a marca do rolamento do dispositivo de *fretting* que fica de trás do fio não fica sempre na mesma altura que a sapata, isso pode causar um aumento significativo na concentração de tensão fora do plano da mossa marcada pela sapata.

6 CONCLUSÕES

Os objetivos para este projeto não foram totalmente alcançados em sua plenitude ao passo que o efeito da moessa na resistência a fadiga não obteve explicações concretas para os fenômenos observados neste projeto de graduação.

O ensaio de fadiga em que a moessas são induzidas apenas pelo contato entre o fio e a sapata não foi satisfatório pois a taxa de falha na região da moessa foi de apenas 40 %, ou seja, tem uma chance maior de o corpo de prova falhar em outra região por outros defeitos não identificados na composição do fio que podem ser oriundos de sua fabricação e montagem no cabo.

Nos ensaios em que as moessas sofrem com a presença de *fretting* foi possível inferir que os corpos de prova submetidos a 100 mil ciclos de *fretting* possuem menor resistência a fadiga quando comparada aos espécimes que submetidos a 30 mil ciclos e *fretting* durante toda sua vida. Ao se comparar este resultado com a curva de referência em que os fios são submetidos ao *fretting* até a falha observa-se uma falta de linearidade o que torna o fato de difícil explicação. Contudo mesmo depois de realizar análises adicionais como a de resistência mecânica, perda de massa e análise de imagens no microscópio Confocal não foi possível compreender a razão para tal fenômeno.

Para trabalhos futuros que queiram compreender o motivo dos comportamentos das curvas S-N obtidas neste projeto deve-se realizar uma maior quantidade de ensaios em mais níveis de quantidade de *fretting* e com diferentes cargas de pressão da sapata sobre o fio, e modificar partes do dispositivo de *fretting*, retirando o rolamento e substituindo por um espaço para introduzir outra sapata deixando assim o ensaio mais parecido com o que acontece dentro do cabo condutor. Além disso é de suma importância realizar análises micrográficas das superfícies de fratura dos corpos de prova com o MEV para verificar o comportamento de crescimento da trinca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALUBAR. **Condutores elétricos de alumínio** – 2010. Brasil, 2010. Disponível em: <http://www.alubar.net.br/downloads/produtos/cabos_caa_condutores_de_aluminio_com_alma_de_aco.pdf>

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. *Atlas da Energia Elétrica do Brasil*. 3ª ed. Brasília, 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/atlas3ed_.pdf/ad6dfab8-d770-47fc-9472-2f80ee18c97f?version=1.0>

AMARANTE, O. A.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2001. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>

ARAÚJO, J. A. ; FERREIRA, J. L. A. ; FADEL, A. A. ; HENRIQUES, A. M. D. ; CESAR, M. ; TAKAI, M. N. WATANABE, L. . avaliação comparativa da resistência à fadiga de cabos caa e cal. in: xxii seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, 2013, Brasília - df. xxii snptee. Out., 2013

ASTM E1049-85(2005). **Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.

AZEVEDO, C. R. F.; HENRIQUES, A. M. D.; PULINO FILHO, A. R.; FERREIRA, J. L. A.; ARAÚJO, J. A. **Fretting fatigue in overhead conductors: Rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminium cable steel reinforced conductor**. *Engineering Failure Analysis*, v. 16, n. 1, p. 136–151, 2009.

BELLORIO, M. B. **Fadiga para cabos condutores de energia e uso de metodologia para estimativa de sua vida remanescente**. 2009. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. 8ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 1084 p.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Traduzido por Sérgio Murilo Stamile Soares. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2008. 705 p.

CIGRÉ. WG 22.11 **Guide to Vibration Measurements on Overhead Lines**. *ELECTRA* n°. 163; December. 1995.

CIGRÉ. TF B2. 11.04. **Overhead conductor safe design tension with respect to aeolian vibration**, June. 2005.

CIGRÉ. WG B2.30, **Engineering guidelines relating to fatigue endurance capability of conductor/clamp systems**, October. 2008.

DIAZ, J. I. M.; ARAÚJO, J. A.; FERREIRA, J. L. A. *Testes em Modelo Reduzido de Resistência à Fadiga por Fretting*. Desenvolvimento de Metodologia para Redução de Custos na Estimativa de Vida à Fadiga de Cabos condutores de Energia. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2017. 21 f. Relatório não publicado.

DOWLING N. E. **Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue**. 3 ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2007. 936 p.

E739 – 91. **Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data**1 - Reapproved 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, *Balanco Energético Nacional 2015 – Ano base 2014*: Relatório Síntese. Rio de Janeiro. 2015. 62 p.

ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE - EPRI. *EPRI Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion*. Palo Alto, CA: 2006. 1012317.

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)**. 2010. 185 f. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF

FORSYTH, P. J. E. “**A two stage process of fatigue crack growth**”, Proc. Crack Propagation Symposium, Cranfield, 1961, pp. 76-94.

FRONTIN, S. O (Coord.). **Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão**. 1 ed. Brasília: Goya, 2010. 368 p.

FURTADO, T.A., **Vibração Eólica em Linhas de Transmissão e Subtransmissão**, Treinamento Técnico, CEMIG, 2001.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 365 p.

HENRIQUES, A. M. D. **Bancada de ensaios mecânicos à fadiga de cabos condutores de energia**. 2006. 182f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

INSTITUTE OF ELETRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE. **Guide for aeolian vibration field measurements of overhead conductors**. IEEE Std 1368; New York: Jun, 2007.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 500 p.

KIESSLING, F., NEFZGER, P., NOLASCO, J.F., KAINZKYK, U. **Overhead power lines: planning, design, construction**. Berlin, Heidelberg. Springer. 2003.

LEE, Y., PAN, J., HATHAWAY, R. B., BARKEY, M. E. **Fatigue testing and analysis: Theory and Practice.** Oxford: Elsevier, 2005.

LINDLEY, T. C. **Fretting Fatigue Engineering** Alloys. Cambridge University Press, 1997.

MOURÃO, M. *Informe tecnológico.* Nº. 24, CEMIG, 2004

NEXANS. **Alumínio: Condutores Nus.** Brasil: 2013. Disponível em: https://www.nexans.com.br/eservice/Brazilpt_BR/navigateproduct_540012753/Ibis.html#characteristics

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada.** 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1055 p.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada.** 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 931p.

POFFENBERGER, J. C.; SWART, R. L. **Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain.** IEEE Transactions Paper, Vol. PAS-84, 1965, pp. 281-289.

ROSA, E. **Análise de resistência mecânica – mecânica da fratura e fadiga.** UFSC, 2002. 407 p.

APÊNDICE

Tabela A 1 - Características geométricas dos CP's utilizados

CP'S	1	2	3	4	Diâmetro médio	Desvio Padrão	Área circular (mm ²)
1	3,120	3,126	3,128	3,136	3,128	0,007	7,682
2	3,121	3,123	3,116	3,121	3,120	0,003	7,647
3	3,138	3,126	3,123	3,120	3,127	0,008	7,678
4	3,137	3,129	3,117	3,119	3,126	0,009	7,672
5	3,126	3,128	3,120	3,133	3,127	0,005	7,678
6	3,130	3,124	3,119	3,124	3,124	0,004	7,666
7	3,146	3,140	3,136	3,139	3,140	0,004	7,745
8	3,100	3,105	3,105	3,104	3,104	0,002	7,565
9	3,133	3,134	3,135	3,135	3,134	0,001	7,715
10	3,144	3,138	3,146	3,146	3,144	0,004	7,761
11	3,106	3,123	3,125	3,103	3,114	0,011	7,617
12	3,144	3,142	3,156	3,153	3,149	0,007	7,787
13	3,096	3,094	3,101	3,097	3,097	0,003	7,533
14	3,108	3,090	3,113	3,118	3,107	0,012	7,583
15	3,080	3,089	3,100	3,110	3,095	0,013	7,522
16	3,107	3,113	3,100	3,110	3,108	0,006	7,584
17	3,125	3,134	3,146	3,148	3,138	0,011	7,735
18	3,136	3,137	3,137	3,142	3,138	0,003	7,734
19	3,114	3,120	3,152	3,125	3,128	0,017	7,683
20	3,080	3,073	3,066	3,091	3,078	0,011	7,439
21	3,102	3,093	3,074	3,076	3,086	0,014	7,720

22	3,153	3,154	3,149	3,146	3,151	0,004	7,796
23	3,148	3,135	3,127	3,127	3,134	0,010	7,715
24	3,138	3,141	3,155	3,152	3,147	0,008	7,776
25	3,128	3,126	3,129	3,144	3,132	0,008	7,703
26	3,133	3,125	3,123	3,123	3,126	0,005	7,675
27	3,110	3,119	3,123	3,110	3,116	0,007	7,623
28	3,115	3,120	3,128	3,120	3,121	0,005	7,649
29	3,100	3,115	3,120	3,120	3,114	0,009	7,615
30	3,127	3,127	3,110	3,125	3,122	0,008	7,656
31	3,116	3,119	3,110	3,115	3,115	0,004	7,621
32	3,119	3,119	3,115	3,112	3,116	0,003	7,627

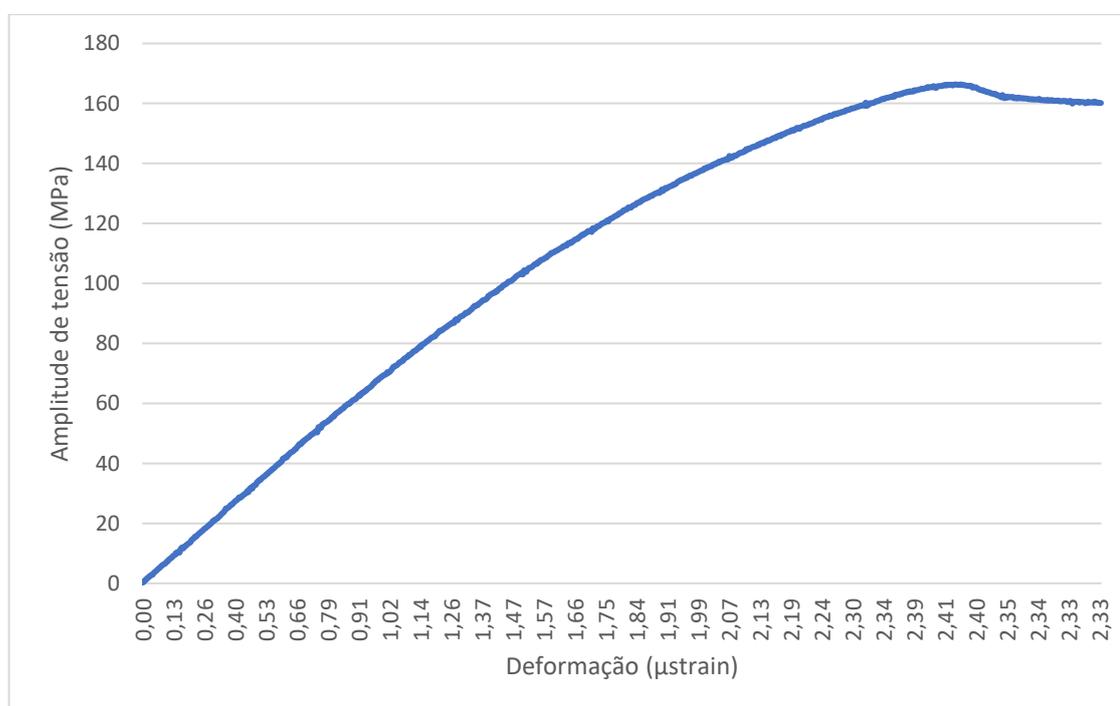


Figura A 1 - Tensão x Deformação CP 27

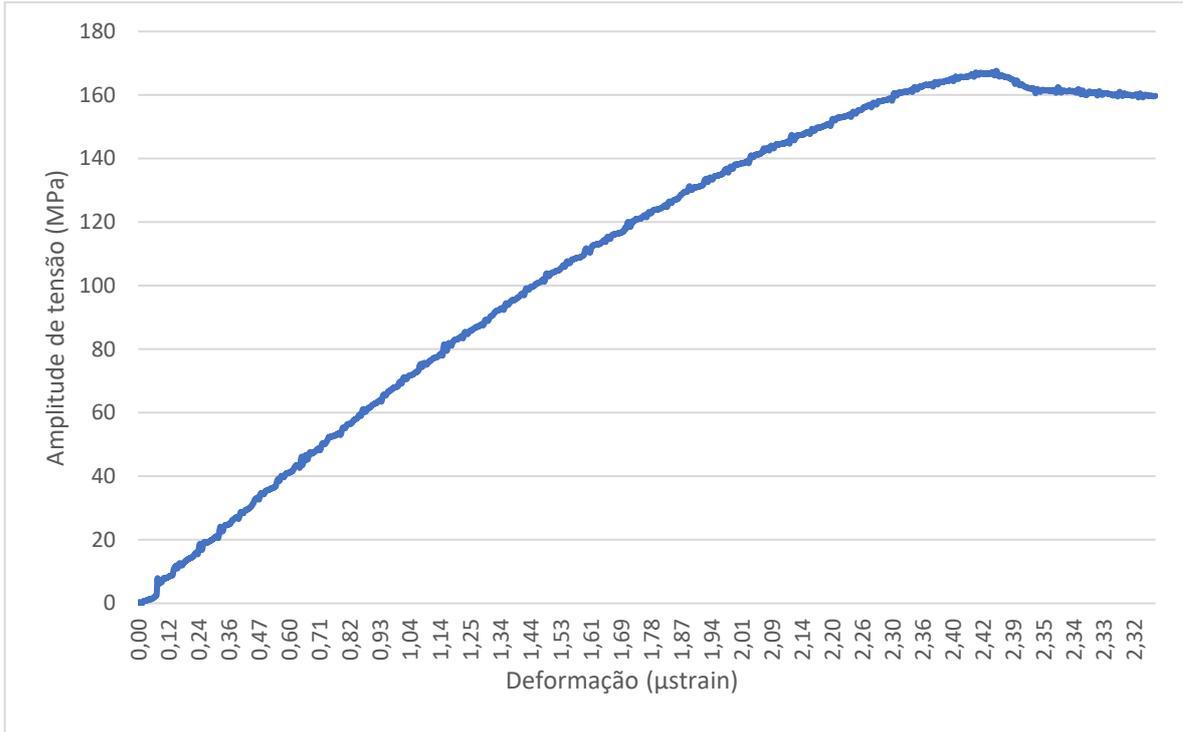


Figura A 2 - Tensão x Deformação CP 28

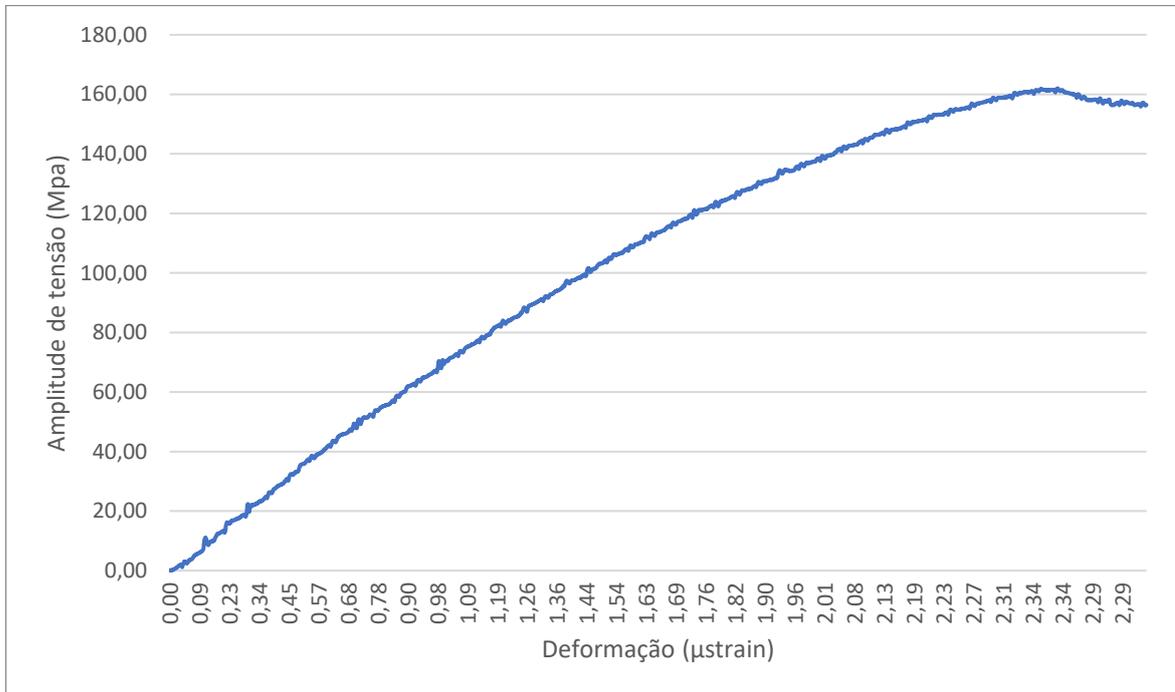


Figura A 3 - Tensão x Deformação CP 29

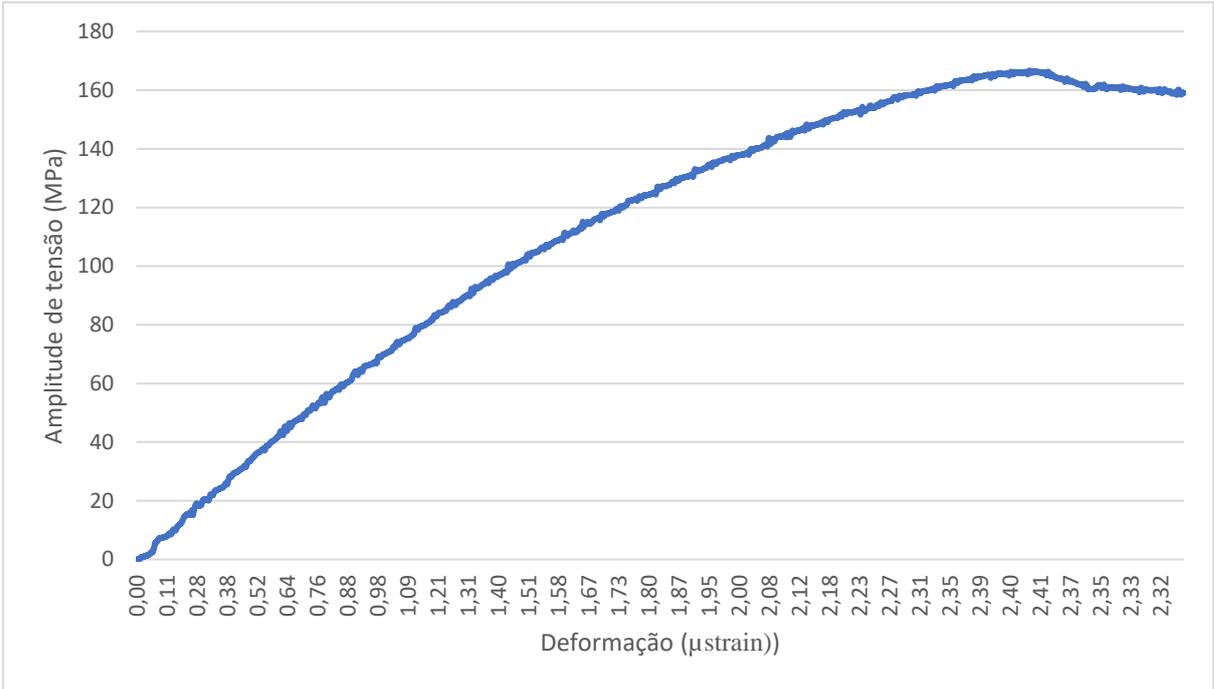


Figura A 4 - Tensão x Deformação CP 30

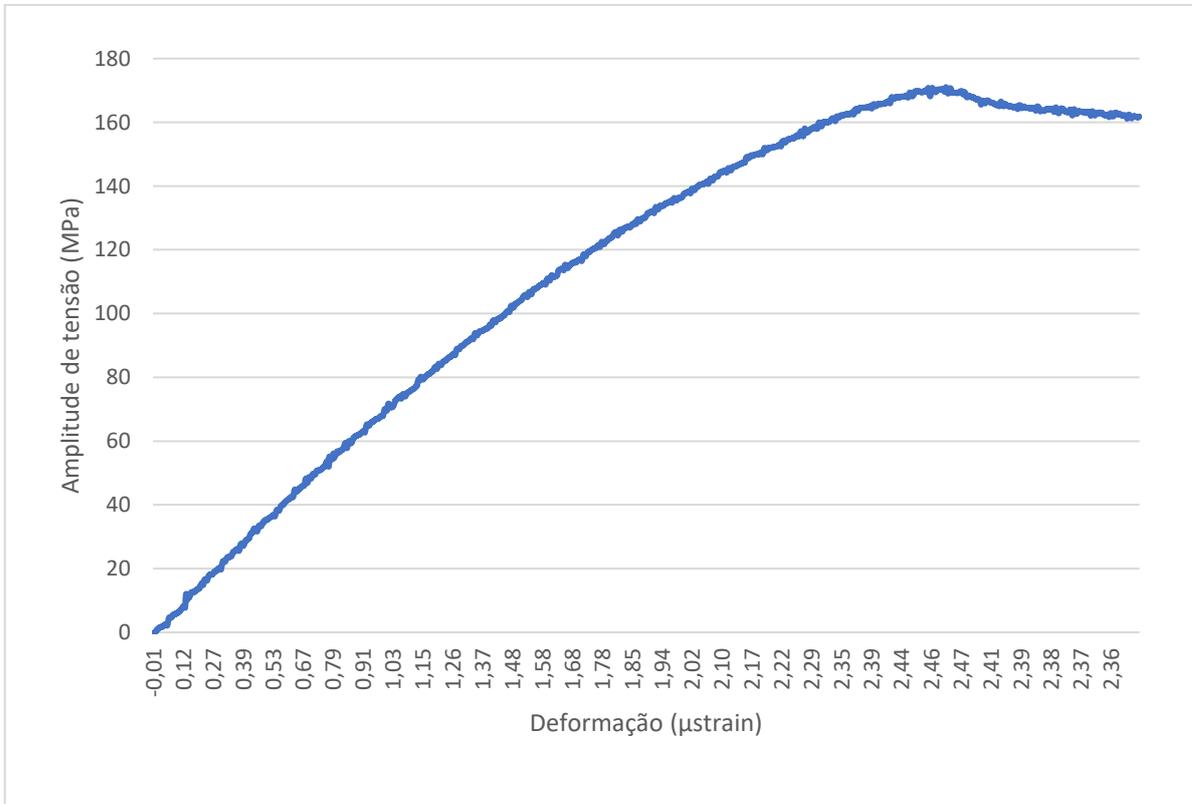


Figura A 5 - Tensão x Deformação CP 31

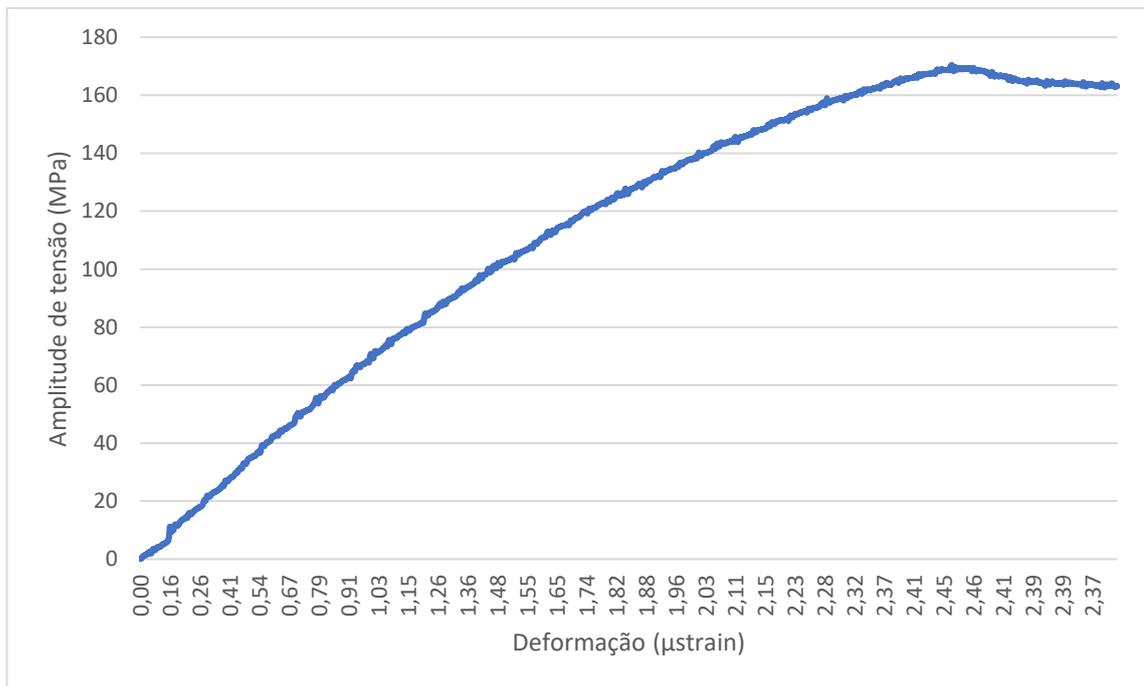


Figura A 6 - Tensão x Deformação CP 32