

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
MECÂNICAS**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA VALIDADE DA FÓRMULA DE
POFFENBERGER-SWART NA DETERMINAÇÃO DE TENSÕES
FLEXURAS PARA DIFERENTES CONDUTORES DE ENERGIA**

THAMISE SAMPAIO VASCONCELOS VILELA

**ORIENTADORA: AIDA ALVES FADEL
CO-ORIENTADOR: JORGE LUIZ DE ALMEIDA FERREIRA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO DE 2013

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
MECÂNICAS**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA VALIDADE DA FÓRMULA DE
POFFENBERGER-SWART NA DETERMINAÇÃO DE TENSÕES
FLEXURAS PARA DIFERENTES CONDUTORES DE ENERGIA**

THAMISE SAMPAIO VASCONCELOS VILELA

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS MECÂNICAS DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

APROVADA POR:

**Prof^a Aida Alves Fadel, DSc. (ENM-UnB)
(Orientadora)**

**Prof^o José Alexander Araujo, PhD (ENM-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof^o Antonio Manoel Dias Henriques, DSc. (ENM-UnB)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 22 DE NOVEMBRO DE 2013.

FICHA CATALOGRÁFICA

VILELA, THAMISE SAMPAIO VASCONCELOS

Avaliação Comparativa da Validade da Fórmula de Poffenberger-Swart na Determinação de Tensões Flexurais para Diferentes Condutores de Energia [Distrito Federal] 2013.

126p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2013).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica

Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas.

1. Linha de Transmissão 2. Cabos Condutores 3. Fórmula de Poffenberger-Swart
4. Extensometria 5. Carga de aperto 6. EDS

I. ENM/FT/UnB

II. Título ENM. DM - 205/2013

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VILELA, T.S.V. (2013). Avaliação Comparativa da Validade da Fórmula de Poffenberger-Swart na Determinação de Tensões Flexurais para Diferentes Condutores de Energia. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Publicação ENM.DM - 205/2013, Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 126p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Thamise Sampaio Vasconcelos Vilela

TÍTULO: Avaliação Comparativa da Validade da Fórmula de Poffenberger-Swart na Determinação de Tensões Flexurais para Diferentes Condutores de Energia [Distrito Federal] 2013

GRAU: Mestre ANO: 2013

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

Thamise Sampaio Vasconcelos Vilela
thamisevilela@yahoo.com.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Gilzeli Vasconcelos e Aderivaldo Vilela, pelo amor, dedicação e paciência que sempre tiveram comigo. “Obrigada Mãe e Pai. Meu eterno agradecimento pelos momentos em que estiveram ao meu lado, me apoiando e me fazendo acreditar que eu conseguiria tudo que eu quisesse desde que eu tivesse força de vontade e coragem de enfrentar o caminho que escolhi”.

Às minha avós Valdecy Dias e Gilza Vasconcelos, que dedicaram a mim, aos meus irmãos e primos um amor incondicional. Elas estão sempre torcendo e rezando para o sucesso de seus netos.

Aos meus irmãos “pela presença constante na minha vida, pela paciência de aguentar as minhas mudanças de humor. Obrigada Thâmara e Frederico”.

Aos meus amigos, pela verdadeira amizade que foi construída, por todos os momentos.

Aos professores do grupo do Laboratório de Cabos, principalmente à minha orientadora professora Aida Fadel, que me ajudou na conclusão desse trabalho, perdendo até o fim de semana com sua família. “Professora excepcional, amiga, mãe, que sempre terá meu afeto e respeito”. Os professores José Alexander e Jorge Luiz merecem, também, meus agradecimentos. Durante o meu trabalho no laboratório tive o total apoio dos dois, tanto em assuntos acadêmicos quanto assuntos pessoais.

Agradeço aos amigos e colegas de laboratório Leonardo Brant, Larissa Watanabe e Rafael Alencar por me ajudarem na realização dos meus ensaios e pela amizade construída entre nós. Por fim agradeço aos técnicos do Laboratório de Ensaios Mecânicos (SG9) pelos momentos de descontração que eles me forneceram e ajuda na manutenção do LabCabos.

E a Deus.

Muito obrigada.

Thamise Sampaio Vasconcelos Vilela

DEDICATÓRIA

Dedico este projeto aos meus pais, que me propiciaram uma vida digna, sendo as peças fundamentais para o meu desenvolvimento pessoal e acadêmico. E aos meus irmãos que apoiaram as minhas decisões.

RESUMO

O presente trabalho de natureza experimental, realizado por meio da utilização de extensometria, visa a validação da Fórmula de Poffenberger-Swart (P-S), aplicada extensivamente em todo o mundo para a determinação da tensão flexural nominal considerada responsável pela falha por fadiga de cabos condutores. Para efeito de comparação e determinação das limitações da expressão analítica foram realizados medições e cálculos aplicando a fórmula de P-S para seis cabos condutores com diferentes: i) materiais (alumínio, alumínio liga, alma de aço, alma de compósito); ii) geometrias (fios de seção circular ou em forma de Z); iii) configuração (com e sem alma); iv) dimensões. Os ensaios foram executados, de acordo com as recomendações da CIGRE (1985), EPRI (1979) e IEEE (1978), em uma bancada de 46,8 metros de comprimento, em ambiente climatizado, com sistema de controle dos equipamentos totalmente automatizado. Para a verificação da consistência da fórmula foram aplicadas diferentes amplitudes de flexão. A tensão nominal encontrada pela média dos extensômetros apresentou uma boa aproximação com o valor teórico obtido pela fórmula de P-S. Dois estudos adicionais compõem este trabalho: o estudo baseado na avaliação da influência da variação da carga de esticamento (variação da EDS – *Every Day Stress*), aplicada em cabos condutores de energia elétrica sobre a tensão média residual encontrada nos fios de alumínio da camada mais externa; e o estudo para avaliação da influência da sequência da carga de aperto dos parafusos do grampo de suspensão, que é avaliada a partir de células de carga (*load washers*). A carga de aperto é outro fator que influencia na vida de um condutor.

ABSTRACT

The aim of this experimental work is to evaluate the effects of aeolian vibration, concerned the analysis of stress at the last point of contact of the assembly cable/suspension clamp (LPC) is an important factor to determine fretting fatigue resistance has it focus on the construction of a Wöhler curve or SN curve for a chosen cable/clamp conductors set. The LPC is the most likely point of failure. Thus, one studied in this work is the validation of Poffenberger - Swart Formula through the strain gages. Strain gages are glued on aluminum wires of the outer layer of the conductor at the point diametrically opposite to the LPC. For this purpose, the evaluation was carried out in six different cables in different displacement amplitudes Y_B . These cables differ in the geometry of the aluminum wire (circular or shaped Z) or the core that may be of steel, aluminum or composite . The tests were performed according to CIGRE (1985), EPRI (1979) and IEEE (1978) recommendations, in a rig fully instrumented and closed loop controlled, on a total span of 46,8 meters long, operating on a climatized environment. The nominal stress found by averaging the strain is a good approximation to the stress found by the P-S formula. The study based on the evaluation of the influence of load stretch variation (variation of EDS - Every Day Stress) applied at cable conductors of electricity, on average stress aluminum wires found in the outermost layer. Such assessment is carried out from strain gauges glued at two meters of distance from the last point of contact. Another study was to evaluate the influence of the sequence of the load screw tightening the suspension clamp, which is evaluated from load cells (load washers). The clamping load is another factor that influences the conductor life.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xiv
Lista de ABREVIACÕES	xv
Lista de símbolos.....	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	1
1.2 Contextualização da temática.....	2
1.3 OBJETIVO DO TRABALHO	4
1.4 JUSTIFICATIVA TÉCNICA PARA REALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	5
1.5 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	8
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	11
2 Revisão Teórica.....	12
2.1 Fadiga.....	12
2.1.1 Definições Fundamentais dos Ciclos de Tensão	16
2.1.2 Métodos De Previsão Da Vida Em Fadiga.....	17
2.1.3 Abordagem pela tensão	18
2.1.4 Abordagem pela deformação.....	18
2.1.5 Abordagem pela mecânica da fratura	19
2.2 Determinação da Curva S-N	19
2.2.1 Fatores que Influenciam na Curva S-N	21
2.2.2 Efeito da Tensão Média sobre a Vida em Fadiga.....	23
2.3 Fadiga em Cabos Condutores.....	26
2.3.1 Fadiga por <i>Fretting</i>	27
2.3.2 Excitação eólica.....	28
2.3.3 Determinação da Tensão Nominal no Fio mais Solicitado do condutor	31

2.3.4	Metodologias de previsão de vida e critérios de projeto contra fadiga em cabos condutores	33
2.3.5	Limites de Resistência à Fadiga de Cabos Condutores	35
2.3.6	A Curva Limite de Segurança da CIGRE	36
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E	38
	MÉTODOS	38
3.1	BANCADA DE ENSAIOS DE CABOS CONDUTORES.....	38
3.1.1	Aspectos gerais.....	38
3.1.2	Mecanismo de Tracionamento do Cabo.....	41
3.1.3	Montagem do Grampo de Suspensão.....	42
3.1.4	Dispositivo para Fixação do Grampo de Suspensão	43
3.1.5	Sistema de controle do ensaio	43
3.1.6	Mecanismo do Excitador (Shaker).....	44
3.1.7	Sistema de Aquisição de Dados	45
3.2	MATERIAIS	46
3.2.1	Cabo Condutor	46
3.2.2	Grampo de Suspensão	49
	Figura 3.14 – Geometria do grampo de suspensão monoarticulado Forjasul 55101/003.	49
3.2.3	Extensometria.....	50
3.3	Preparação do corpo de prova	50
3.3.1	Montagem do corpo de prova na bancada.....	51
3.4	AVALIAÇÃO DA FÓRMULA de POFFENBERGER-SWART	53
3.4.1	Planejamento do Experimento.....	53
3.4.2	Preparo da Amostra.....	54
3.4.3	Procedimento Experimental	55
3.5	OBTENÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL PROVOCADA PELA VARIAÇÃO NA	
EDS	56	
3.5.1	Planejamento do Experimento.....	57
3.5.2	Preparo da amostra	57
3.5.3	Procedimento Experimental	59

3.6	PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA OBTENÇÃO DA CARGA DE APERTO	60
3.6.1	Carga Estática de Aperto.....	60
3.6.2	Célula de Carga - Load Washers (LWs)	61
3.6.3	Planejamento do Experimento.....	62
3.6.4	Preparo do Conjunto.....	65
3.6.5	Procedimento Experimental	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1	RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DA FÓRMULA DE P-S	68
4.1.1	Resultados para o Carregamento Dinâmico	68
4.2	OBTENÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL PROVOCADA PELA VARIAÇÃO NA EDS 75	
4.3	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DAS CARGAS DE APERTO.....	80
4.3.1	Resultados obtidos pela montagem 1	80
4.3.2	Resultados obtidos pela montagem 2	82
5	CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS.....	93
	FUTUROS.....	93
5.1	CONCLUSÕES.....	93
5.2	Proposta para trabalhos futuros	94
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
7	ANEXOS.....	100
7.1	ANEXO A – Controle da bancada de testes.....	100
7.2	ANEXO B	103
7.2.1	Colagem dos Extensômetros	103
7.2.2	Teste dos Extensômetros	106
7.2.3	Calibração dos Extensômetros	106
7.3	ANEXO C – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DA CARGA DE APERTO	107
7.3.1	Resultados da carga de aperto na montagem 1	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Custos por nível de tensão dos principais componentes das linhas de transmissão [1].....	6
Figura 2.1 – Aparência típica de superfície onde ocorre fratura por fadiga.....	13
Figura 2.2 – Nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos [34].	13
Figura 2.3 – Mecanismo de crescimento da trinca [8].	13
Figura 2.4 – Estágio de crescimento da trinca devido ao processo de fadiga [20].....	14
Figura 2.5 – Representação clássica dos cíclicos de tensão.	16
Figura 2.6 – (a) Ciclo com amplitude de tensão constante – alternado[31]; (b) ciclo com amplitude de tensão constante - pulsante [31].....	17
Figura 2.7 – (a) Ciclo com amplitude de tensão variável em blocos[31]; (b) ciclo com amplitude de tensão variável irregular ou aleatória [31].	17
Figura 2.8– Curvas S-N esquemáticas para aço e uma liga de alumínio [27].....	20
Figura 2.9 – Gráfico comparativo dos modelos de Goodman, Gerber, Soderberg, Morrow e STW.	25
Figura 2.10 – (a) Seção transversal de um cabo CAA (ou ACSR); (b) Contatos entre os fios e o grampo.....	26
Figura 2.11 – (a) Cabo condutor CAA rompido após ensaio de fadiga; (b) Óxido de alumínio formado pelo desgaste do fio (c) Fratura de fios de alumínio de marcas de <i>fretting</i> [8].....	27
Figura 2.12 – Esquema do problema de contato entre dois cilindros 5equivqle o contato entre dois fios) [8].	28
Figura 2.13 – Escoamento ao redor de um corpo cilíndrico em função do número de Reynolds [38].	29
Figura 2.14- Esquema de montagem cabo-grampo.....	31
Figura 2.15– (a) Vibrógrafo tipo Pavica; (b) Esquemático da montagem vibrógrafo/cabo.	35
Figura 2.16 – Curva Safe Border Line, bem como as demais curvas compiladas pela CIGRE ([3]1985 - modificado).	37
Figura 3.1 – Desenho esquemático da montagem da bancada de ensaios[8].	39
Figura 3.2 – Talha de alavanca ancorada ao bloco de fixação 1[8].	40
Figura 3.3 – a) Fixação do cabo através do grampo de ancoragem passante no bloco fixo 3, b) Detalhe do grampo de ancoragem passante e a célula de carga [8].	40
Figura 3.4 – Grampo de ancoragem montado em uma base de concreto com rolamentos e os trilhos [8].	41
Figura 3.5 – Bloco fixo 2, posicionamento dos <i>shakers</i> . [8].	41
Figura 3.6 – Bloco fixo 3 que contém os dispositivos para controle de tração do cabo [8].	42
Figura 3.7 – Esquemático da montagem cabo/grampo de suspensão.	42
Figura 3.8 – Montagem cabo/grampo vista de frente e de topo [8].	43
Figura 3.9 – Montagem do grampo de suspensão sobre o bloco móvel e o ponto 89 [8].	43

Figura 3.10 – Esquema de controle da bancada para realização dos ensaios [8].	44
Figura 3.11- Fixação do cabo ao <i>shaker</i> [8].	45
Figura 3.12 – Sistema de Aquisição de Dados ADS-2000 -Lynx Tecnologia.	46
Figura 3.13 – (a) Vista em corte e esquemático da seção do cabo Ibis 397,5 MCM; (b) Vista em corte e esquemático da seção do cabo Grosbeak; (c) Vista em corte e esquemática do cabo CAL; (d)Vista em corte e esquemático da seção do cabo Aero-Z.	48
Figura 3.14 – Geometria do grampo de suspensão monoarticulado Forjasul 55101/003.	49
Figura 3.15 – Conjunto: cabo condutor/grampo de suspensão monoarticulado.	50
Figura 3.16 – Codificação utilizada para os extensômetros (Excel Sensores).	50
Figura 3.17 – Retirada do cabo condutor da bobina.	51
Figura 3.18 – Polias auxiliares posicionadas ao longo do vão do teste.	51
Figura 3.19 – Amplitude de deslocamento, Y_B .	54
Figura 3.20 – (a) Esquemático do posicionamento dos extensômetros na região do grampo de suspensão (adaptada de [9]); (b) Posicionamento dos extensômetros no cabo Aero-Z - B em relação à boca do grampo.	55
Figura 3.21 – Posicionamento dos extensômetros no cabo CAA – A distantes 2 metros do UPC.	58
Figura 3.22- Foto da <i>Load Washer</i> utilizada.	62
Figura 3.23- Ligação de sensor de ponte completa para célula de carga.	62
Figura 3.24 – Esquema de montagem das células de carga.	63
Figura 3.25 – Posicionamento do conjunto sobre a placa metálica.	65
Figura 3.26 – Posicionamento dos elementos de montagem 1.	65
Figura 3.27 – Convenção da numeração adotada.	66
Figura 3.28 – Montagem 2 - (a) calço da LW, (b) montagem com as quatro LWs.	66
Figura 4.1 – Gráfico com as curvas comparativas $\sigma_{Exp}-\sigma_{P.S}$ do condutor tipo CAA – A, além da representação dos valores das tensões de cada extensômetros.	71
Figura 4.2 – Gráfico com as curvas comparativas $\sigma_{Exp}-\sigma_{P.S}$ do condutor tipo CAA – B, além da representação dos valores das tensões de cada extensômetros.	71
Figura 4.3 – Gráfico com a curva σ_{Exp} do condutor tipo Aero-Z – A, além da representação dos valores das tensões de cada extensômetros.	72
Figura 4.4 – Gráfico com a curva σ_{Exp} do condutor tipo Aero-Z – B, além da representação dos valores das tensões de cada extensômetros.	73
Figura 4.5 – Gráfico com as curvas comparativas $\sigma_{Exp}-\sigma_{P.S}$ do condutor tipo CAL – A, além da representação dos valores das tensões de cada extensômetros.	74
Figura 4.6 – Gráfico com as curvas comparativas $\sigma_{Exp}-\sigma_{P.S}$ do condutor tipo CAL – B, além da representação dos valores das tensões de cada extensômetros.	74
Figura 4.7 – Disposição dos extensômetros no cabo CAA – A.	75

Figura 4.8 – Gráficos Tensão x EDS do cabo tipo CAA – A conforme a aplicação da EDS: (a) decrescente e (b) crescente.....	76
Figura 4.9 – Disposição dos extensômetros no cabo CAA – A após aplicação da carga de esticamento.....	77
Figura 4.10 – Gráficos Tensão x EDS do cabo tipo Aero-Z - B conforme a aplicação da EDS: (a) decrescente e (b) crescente.	78
Figura 4.11 – (a) Posicionamento dos extensômetros no condutor Aero-Z – B antes da aplicação da carga de esticamento; (b) Posicionamento dos extensômetros após a aplicação da carga de esticamento.....	79
Figura 4.12 – Gráficos Tensão x EDS do cabo tipo CAL – A conforme a aplicação da EDS: (a) decrescente e (b) crescente.....	80
Figura 4.13 - Resultados da montagem 1, aperto circular.....	82
Figura 4.14-Resultados da montagem 2, aperto circular.....	84
Figura 4.15- Resultados da montagem 2, aperto cruzado.	85
Figura 4.16 - Resultados da montagem 2, aperto circular com salto.	85
Figura 4.17 - Detalhe da montagem da LW na posição 1.	86
Figura 4.18- Variação da tração em função do número de apertos, sequência circular.	90
Figura 4.19 - Variação da tração em função do número de apertos, sequência cruzada.	91
Figura 4.20 - Variação da tração em função do número de apertos, sequência circular com salto.	92
Figura 4.21 - Detalhe do acabamento superficial da rosca.....	92
Figura 7.1 – Representação gráfica da varredura de um condutor nas frequências de 15 a 30 Hz.	101
Figura 7.2 – Limpeza da superfície, previa à colagem do extensômetro [24].....	103
Figura 7.3 – Cabo após jateamento de óxido de alumínio	103
Figura 7.4 – Posicionamento do extensômetro na amostra [24].	104
Figura 7.5 – Colocação de cola (super bonder®) no extensômetro [24].....	104
Figura 7.6 – Colagem do extensômetro na amostra [24].	105
Figura 7.7 – Extensômetros no cabo sob a fita adesiva e soldados trocar foto.	105
Figura 7.8 – Extensômetros com camada de resina protetora e soldados.	106

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fator de acabamento superficial [36]	21
Tabela 2.2 – Fator de carregamento k_c [32].....	22
Tabela 2.3 – Fator de temperatura, k_d [36].	22
A Tabela 2.4 mostra os tipos e características em cabos condutores aéreos [38].	30
Tabela 2.4 – Comparação entre os tipos de vibração em condutores [19].	30
Tabela 2.5 – Limites de Resistência à Fadiga EPRI.....	33
Tabela 3.1.– Características dos excitadores eletrodinâmicos [8].....	45
Tabela 3.2– Características dos cabos condutores (NEXANS) [19].	47
Tabela 3.3 – Definição das condições de ensaio [9].	48
Tabela 3.4– Planejamento dos ensaios dinâmicos para avaliação da Fórmula P-S.....	54
Tabela 3.5 – Carga de esticamento em kgf para cada EDS aplicada nos condutores CAA - A, Aero-Z - B e CAL - A.	57
Tabela 3.6 – Dados da rosca do parafuso “U”.	61
Tabela 3.7– Planejamento dos ensaios de aperto.	63
Tabela 3.8 - Planejamento de ensaio, montagem 2.	64
Tabela 4.1 – Carga de esticamento com EDS de 20% dos condutores avaliados.	69
Tabela 4.2 – Carga de esticamento em kgf para EDS de 0 – 30%.	75
Tabela 4.3 - Dados obtidos pela sequência de aperto circular.	81
Tabela 4.4 - Média dos resultados para sequência de aperto circular.	83
Tabela 4.5 -Média dos resultados para sequência de aperto cruzado.	83
Tabela 4.6 -Média dos resultados para sequência de aperto circular com salto.	84
Tabela 4.7 - Valores medidos na LW da posição 3.	89

LISTA DE ABREVIACÕES

ASTM :	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
CA (AAC):	Cabos de Alumínio (<i>All Aluminium Conductor</i>).
CAA (ASCR):	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>).
CIGRE:	<i>Conseil International des Grands Réseaux Electriques (International Council on Large Electric Systems).</i>
EDS:	<i>Every Day Stress</i> ou Carga diária média de tracionamento à qual o cabo é submetido ao longo da vida em serviço. É um percentual da tensão limite de ruptura à tração do condutor.
EPRI:	<i>Electric Power Research Institute.</i>
IEEE:	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>).
LT:	Linha de Transmissão.
P-S:	Poffenberger-Swart (expressão que correlaciona severidade de vibração e tensão).
STW	Smith-Thomson-Watson
TW:	Condutor com Fios Trapezoidais (<i>Trapezoidal Wire</i>).
CRT	Carga de Ruptura à Tração
UTS	<i>Ultimate Tension Stress</i>
CP	Corpo de prova

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

a	comprimento da trinca.
Δa	avanço do comprimento da trinca.
a_f	limite da área de adesão no contato por <i>fretting</i> , [mm].
c	limite da área de escorregamento no contato por <i>fretting</i> [mm].
d	diâmetro, [mm].
D	fator de dano.
D	diâmetro do condutor, [mm].
d_a	diâmetro do fio de aço, [mm].
d_{al}	diâmetro do fio de alumínio, [mm].
E	módulo de elasticidade, [GPa].
E_a	módulo de elasticidade do aço, [GPa].
E_{al}	módulo de elasticidade do alumínio, [GPa].
K	constante da fórmula de <i>Poffenberger-Swart</i> .
I	momento de inércia, [kg·m ²].
I_{min}	momento de inércia mínimo.
EDS	<i>Every Day Stress</i> , [%].
f	frequência de aplicação da carga em ciclos por segundo, [Hz].
f	coeficiente de atrito nas superfícies em contato (<i>fretting</i>).
f_s	frequência com que os vórtices se descolam na esteira de Von Karman frequência de oscilação do condutor na direção vertical, [Hz].
S_r	Número de Strouhal.
R_e	Número de Reynolds.
ka	fator de acabamento superficial.

k_b	fator de escala.
k_c	fator de carga.
k_e	fator de temperatura.
k_d	fator para outros efeitos.
n	quantidade de ciclos para os respectivos níveis de tensão obtidos em campo.
n_a	número de fio de aço.
n_{al}	número de fio de alumínio.
N	número de ciclos, [ciclos].
N_f	número de ciclos de vida, [ciclos].
P	carga radial no contato em <i>fretting</i> , [N].
Q	carga axial cíclica no contato em <i>fretting</i> , [N].
R	razão de tensão.
S_e	tensão limite de fadiga da peça real, [Mpa].
S_T	resistência à temperatura de operação.
S_{RT}	resistência à temperatura ambiente, [MPa].
S_u	limite de ruptura do material, [MPa].
t	tempo.
T	tração no cabo condutor, [N].
U	velocidade do fluxo livre em escoamento, [m/s].
V	duração da vida do condutor, [anos].

Gregos

ε	Deformação, [μ strain].
σ_a	tensão alternada, [MPa].
σ_{acq}	tensão limite de fadiga no ciclo alternado com $\sigma_m = 0$, [MPa].
σ_{ar}	tensão normal média, [MPa].
σ_m	tensão média, [MPa].
$\sigma_{m\acute{a}x}$	tensão máxima, [MPa].

- σ_{\min} tensão mínima, [MPa].
- σ_{rt} tensão equivalente, a ser ajustada de acordo com o método de avaliação de tensão média, quando $\sigma_m \neq 0$. É igual a σ_u ou σ_y dependendo do método, [MPa].
- σ_u tensão última ou limite de resistência, [MPa].
- σ_y tensão limite de escoamento, [MPa].
- $\Delta\sigma$ intervalo de tensão, [MPa].
- σ'_f coeficiente de fadiga ou tensão limite de resistência à fadiga do material, [Mpa].
- $\tilde{\sigma}_{fB}$ tensão verdadeira de resistência a fratura, [MPa].
- ν coeficiente de viscosidade cinemática do fluido, [m²/s].

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Em uma linha de transmissão de energia elétrica, o cabo condutor é o componente mais importante. Ele pode contribuir com até 40% do custo do investimento de uma linha de transmissão [1]. O cabo condutor precisa sustentar os esforços mecânicos, elétricos e ambientais durante seu tempo de operação, que pode superar 50 anos. Nesse contexto, a falha por fadiga por *fretting* de cabos provocada pela ação dos ventos deve receber uma atenção diferenciada quando se fala de manutenção de condutores. Estudos publicados pelo CIGRÉ revelam que 85% de todas as falhas que já ocorreram em sistemas de transmissão foram devidas a ventos e/ou neve com vento [1]. Junto à avaliação da inspeção de linhas e a avaliação da vida residual dos condutores tem-se a avaliação quantitativa do fenômeno de fadiga.

Uma falha inesperada por fadiga de uma linha de transmissão provoca um impacto financeiro gigantesco. O pior evento ocorrido devido à fadiga mecânica provocada pela ruptura por fadiga de uma linha de transmissão no Brasil foi no ano de 2001. Na ocasião, houve um blecaute que deixou 11 estados da federação sem energia elétrica devido ao rompimento de um cabo condutor de uma linha de transmissão na região Sudeste. Todo o setor produtivo das regiões afetadas foi interrompido, provocando prejuízos. Portanto, o aumento do conhecimento nesta área é fundamental para dar confiabilidade ao sistema e propiciar a redução de custos desnecessários associados a falhas repentinas.

A fadiga por *fretting* em cabos condutores é afetada por: variação da carga de esticamento do cabo (carga média); geometria do grampo de suspensão; carga de aperto no grampo; tipo de material; e geometria do contato dos fios e da alma (quando há); etc. A principal causa de falha em condutores é a fadiga resultante da tensão de flexão cíclica imposta por vibrações eólicas em pontos onde há uma restrição ao movimento, que normalmente correspondem aos grampos de suspensão que fixam o condutor à torre [2].

Tais fatores podem levar ao rompimento de cabos sob condições de carregamentos dinâmicos com idêntica severidade em períodos completamente distintos. É possível, em laboratório, a partir de testes acelerados, avaliar a vida em condições nas quais esses parâmetros são mantidos constantes bem como quantificar a influência de cada variável sobre a resistência à fadiga do condutor. Isso pode levar ao desenvolvimento de técnicas de projeto e planos de manutenção mais apropriados e que minimizem os riscos de falhas, além de reduzir os custos de novas linhas.

Com relação aos procedimentos de projetos de linhas usados para avaliação da vida de fadiga em cabos de energia elétrica, o Comitê de Estudos 22 do Grupo de Trabalho 04 -CIGRÉ [3,4] recomenda o uso de uma metodologia para estimativa da vida útil do cabo, que usa basicamente a teoria de acúmulo de dano de Palmgren-Miner [5] associada à curva S-N do conjunto cabo/grampo. A validação desta metodologia não é uma tarefa trivial, pois além de depender da constatação em campo da durabilidade do cabo (que é um processo caro e pode se estender por um período superior a trinta anos), não existe um controle dos outros parâmetros que influenciam na vida do cabo.

Uma forma de avaliação laboratorial do comportamento dos cabos condutores é definir, por meio de extensômetro, as amplitudes de tensão (zero a pico) sofrida pelos condutores no UPC em diferentes amplitudes de deslocamento (pico a pico). Essas tensões são usadas no levantamento da curva S-N de cabos condutores de energia. Outra avaliação pode ser feita utilizando diferentes cargas de esticamento (*EDS – Every Day Stress*) nos cabos, encontrando as tensões residuais média dos condutores. E por fim, a avaliação experimental da carga de aperto nos parafusos do conjunto grampo/cabo é um fator importante na predição da vida útil de um condutor. É neste contexto que se insere este trabalho.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DA TEMÁTICA

A resistência à solitação dinâmica de cabos condutores, proveniente principalmente da interação vento/cabo, é um importante parâmetro para o projeto de linhas de transmissão; assim como a vida remanescente do condutor também é relevante para a manutenção das linhas.

A falha em cabos tem início nas regiões de contato entre o condutor e as ferragens (grampos de suspensão, espaçadores, sinalizadores, amortecedores, etc). As trincas propagam nos fios de alumínio que constituem o cabo condutor até a completa ruptura desses, levando a perda de eficiência na transmissão de energia elétrica. Em casos mais críticos, as trincas também podem propagar na alma do cabo causando, eventualmente, a ruptura total da linha.

Estudos sobre o processo de iniciação e propagação de trincas em fios de condutores foram realizados e foi detectado que há um estado de tensão complexo provocado pelo contato mecânico e a presença de desgaste superficial provocado pelo movimento relativo de pequena amplitude (fadiga por *fretting*) entre os fios, tornando a quantificação do problema um desafio.

A resistência à fadiga de metais sob condições de *fretting* é substancialmente reduzida com relação à condição sem o *fretting*, Cigré [6]. A fórmula de Poffenberger-Swart (P-S) [7] correlaciona uma amplitude de deslocamento medida em uma posição padronizada a partir do grampo de suspensão com uma amplitude de tensão no último ponto de contato cabo/grampo

(UPC) e, assim, determinar a curva S-N. Essa fórmula é baseada em modelos de barra e viga engastadas.

Para a determinação da curva S-N (Curva de Wohler) de condutores são realizados testes em níveis de tensões distintos (pelo menos três níveis), que são associados às amplitudes de deslocamentos diferentes, contabilizando o número de ciclos gravados na ruptura do terceiro fio de alumínio ou o equivalente de 10% do número de fios de alumínio - prevalecendo o maior número [8].

Após diversos resultados de fadiga para cabos ACSR em espaçadores e grampos de suspensão para um mesmo nível de esticamento, Cardou et al. [9] e Zhou et al. [10] ressaltaram uma limitação importante no uso desta fórmula de P-S, pois a ruptura do fio é provocada pelo movimento alternado do cabo e por um estado de tensão local extremamente complexo oriundo do contato mecânico sob um regime de escorregamento parcial. Apesar destas restrições, a fórmula de Poffenberger-Swart é uma importante ferramenta para avaliação da severidade dos níveis de vibração em cabos condutores, devido à sua aplicação direta e simples. Contudo, ela se tornou um padrão para a conversão de uma amplitude de flexão medida em uma amplitude de tensão idealizada.

A fadiga é a principal causa de falha em cabos condutores de linhas aéreas de transmissão de energia. A falha ocorre devido à ação de ventos, que provocam, em função da sua velocidade, o aparecimento de vórtices a uma frequência característica deslocando a camada limite ao redor do cabo resultando na vibração. Quando a frequência de emissão de vórtices é próxima à frequência de ressonância do condutor, as tensões atuantes podem ser atenuadas, já que a amplitude de vibração pode se tornar muito elevada. E com isso, o processo de fadiga pode ser acelerado.

Devido à vibração, o atrito causado pelo deslizamento dos fios do cabo entre si e em relação ao grampo de suspensão (e outras ferragens) influencia, fortemente, o processo de falha por fadiga. Esse movimento relativo entre as superfícies dos fios em relação ao grampo e entre si induzem um problema conhecido como *fretting* [11]. Esse fenômeno leva à perda de material da parte do condutor que está em contato com o grampo de suspensão, reduzindo, consideravelmente, a vida útil do cabo condutor; e aumentando a complexidade de modelagens analíticas ou numéricas.

Cargas de aperto aplicadas na montagem cabo/grampo ou a tensão de esticamento (tensão residual média) do cabo são variáveis de processo que afetam as forças de interação entre os fios do condutor e destes com o grampo. Estas variáveis promovem deformações significativas no condutor causando o aumento na concentração de tensão localizada, impactando fortemente a atuação da fadiga por flexão e também por *fretting* [12]. O aumento da tensão média causada pela carga de esticamento apenas, pode provocar redução de até 50% na vida do condutor [8].

Não há registro de resultados satisfatórios descrevendo o campo de tensões gerado pela carga de aperto do grampo de suspensão atuando sobre o condutor [12]. A obtenção de modelos confiáveis acerca do problema pode levar a novas conclusões sobre a ocorrência de falhas em condutores aéreos de linhas de transmissão elétrica, e fornecer parâmetros para procedimentos de montagem e manutenção de linhas e para o projeto de novos componentes para linhas de transmissão aérea.

Normalmente, a falha ocorre sobre a região do cabo que está próxima ou dentro da região de contato entre o grampo de suspensão e o cabo do condutor ou outras ferragens. Assim, nos condutores, a falha normalmente se dá em locais onde a inspeção visual ou aplicação de sensores para medir as tensões e monitorar o processo de falha não é possível.

Portanto, há um avanço em estudos para entender a complexidade do fenômeno do *fretting* em cabos condutores. Esses estudos incluem análises computacionais e experimentais para corroborar o comportamento dos cabos condutores de energia elétrica. Estudos experimentais são simulações do comportamento real do cabo a partir de um deslocamento a uma frequência próxima a de ressonância, simulando o comportamento da vibração eólica sobre o condutor. Isso leva a desenvolvimentos significativos na engenharia, possibilitando o melhor entendimento de problemas físicos e permitindo a determinação de parâmetros de projeto. Nesse trabalho serão enfatizados os métodos experimentais a partir de extensometria, validando as teorias existentes (fórmula de P-S) e avaliando a influência da aplicação de diferentes cargas de esticamento (EDS) no condutor na tensão residual média. Outro procedimento experimental apresentado nesse trabalho é a avaliação da sequência da carga de aperto nos parafusos do grampo de suspensão sobre o condutor.

1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

O presente trabalho é de natureza experimental e visa comparar os valores das tensões teóricas obtidas pela fórmula de Poffenberger-Swart com os valores de amplitudes de tensão obtidos a partir da extensometria, avaliando a representatividade da fórmula de P-S. As medições experimentais das amplitudes de tensão foram realizadas em diversos tipos de condutores com materiais e geometrias distintos, tais como os condutores: CAA – Cabo de Alumínio com Alma de Aço; Aero-Z; e CAL – Cabo de Alumínio Liga, por meio da técnica de extensometria. Além de verificar, por meio de extensometria, o efeito da aplicação de diferentes cargas de esticamento (EDS) na distribuição do campo de tensões residuais médias em diferentes condutores elétricos.

Outro estudo experimental é a verificação da influência da sequência da carga de aperto nos parafusos do grampo de suspensão sobre o cabo condutor de alma de aço, CAA 397,5 MCM – Ibis, utilizando células de carga - *load washers*.

Os dados experimentais obtidos trarão informações para a avaliação do fenômeno de fadiga sobre condições de *fretting* em cabos condutores. Tais dados, associados a informações pré-existentes propiciarão descobertas no sentido de esclarecer melhor as ocorrências de falhas nos cabos, elementos importantes para o sistema de distribuição e transmissão aéreo de energia elétrica no Brasil.

1.4 JUSTIFICATIVA TÉCNICA PARA REALIZAÇÃO DO TRABALHO

Com a necessidade de entender melhor o comportamento dos cabos condutores de energia e os motivos que os levam à falha, esse trabalho justifica-se na melhor compreensão dos eventos que podem levar à falha das linhas de transmissão. Com isso, três fatores terão uma atenção especial para a investigação das falhas de condutores, que são: validação da tensão teórica (P-S) com a tensão experimental no UPC do conjunto cabo/grampo de suspensão, local de maior sollicitação dinâmica, e, portanto, maior probabilidade de ocorrência de falha; a influência da carga de esticamento na tensão residual média; e a sequência da carga de aperto no conjunto cabo/grampo.

Um projeto de linha de transmissão busca atender os seguintes requisitos de planejamento de sistema: transmitir uma potência em regime normal de operação e em emergência a certo nível de tensão. No entanto, esse projeto deve ter um custo total baixo com o menor impacto ambiental e social possível, altos índices de confiabilidade e disponibilidade, atendendo aos requisitos técnicos mínimos tanto elétrico quanto mecânico [1].

O desenvolvimento integrado de um projeto de linha de transmissão voltado à otimização de todos os fatores constitui-se um desafio permanente ao setor elétrico. Daí a necessidade de contínuo aprimoramento tecnológico na busca de inovações que possibilitem ganhos contínuos tanto para o empreendedor quanto para a sociedade como um todo, contribuindo para o aumento do nível de riqueza e desenvolvimento do país.

O componente mais importante em uma linha de transmissão (LT) é o cabo condutor, que pode contribuir com até 40% do custo em investimento de capital na rede, conforme Figura 1.1. Ele tem que sustentar cargas de origem mecânica, elétrica e ambiental ao longo de sua vida operacional que pode superar os 50 anos. Nesse contexto, o estudo sobre a fadiga por *fretting* de cabos provocada pela vibração eólica é um fator importante para a manutenção dos condutores [1].

CUSTOS POR NÍVEL DE TENSÃO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO (R\$/KM)

TENSÃO	230 kV CS	%	230 kV CD	%	500 kV CS	%	500 kV CD	%	±600kVcc	%
Projeto	6079,33	1,96	7955,77	1,86	4178,87	0,78	6371,968	0,49	1816,842	0,24
Levantamento topográfico	3221,64	1,04	2123,20	0,50	3228,46	0,60	4036,164	0,31	2578,947	0,35
Sondagens	1096,05	0,35	2099,86	0,49	917,13	0,17	2758,381	0,21	1067,368	0,14
Meio ambiente/fundiário	16069,93	5,18	12450,04	2,91	12721,14	2,38	35088,79	2,70	37023,15	4,97
TOTAL ENG.	26466,94	8,53	24628,87	5,76	21045,61	3,93	48255,31	3,72	42486,31	5,71
Suporte Estruturas	54025,47	17,42	54770,45	12,82	83513,50	15,61	239535,3	18,46	98783,16	13,27
Suporte Fundações	14473,63	4,67	6073,78	1,42	4169,15	0,78	6175,199	0,48	4273,684	0,57
Cabo condutor	66838,68	21,55	151605,85	35,47	167218,49	31,25	393253,4	30,30	291905,3	39,21
Cabo para-raios	15526,63	5,01	8523,54	1,99	16551,71	3,09	20005,43	1,54	15877,89	2,13
Contrapesos	2369,43	0,76	1324,34	0,31	6769,79	1,27	5738,438	0,44	1825,474	0,25
Ferragens cadeias	7670,68	2,47	41958,60	9,82	12724,40	2,38	38001,98	2,93	19146,14	2,57
Isoladores	7859,09	2,53	8302,97	1,94	15189,07	2,84	30468,09	2,35	21247,13	2,85
Espaçador (amortec)	4454,79	1,44	7318,51	1,71	5157,27	0,96	4478,302	0,35	8014,737	1,08
Acessórios	3898,10	1,26	2692,32	0,63	10454,51	1,95	5762,081	0,44	20282,11	2,72
TOTAL MATERIAL	177116,49	57,09	282570,36	66,12	321747,89	60,14	743418,2	57,28	481355,6	64,65
Faixa de servidão e acessos	12610,03	4,06	13055,49	3,05	23638,68	4,42	104392,5	8,04	20751,58	2,79
Execução fundações	27892,64	8,99	25396,09	5,94	74150,78	13,86	209915,2	16,17	57486,32	7,72
Montagem e suportes	18194,83	5,87	39580,60	9,26	37139,06	6,94	94255,4	7,26	42915,39	5,76
Instalação cabos e acess.	25040,29	8,07	10962,41	2,56	35803,95	6,69	41407,94	3,19	56952,63	7,65
Instal. Contrapeso (aterr.)	5342,12	1,72	1211,13	0,28	4070,01	0,76	18418,96	1,42	5893,684	0,79
TOTAL CONSTR. E MONT.	89079,90	28,72	90205,73	21,11	174802,48	32,67	468389,9	36,09	183999,6	24,71
Adminstr.e Fiscaliz.	12993,77	4,19	8439,65	1,97	10734,44	2,01	22507,3	1,73	23219,31	3,12
Eventuais	4563,69	1,47	21543,94	5,04	6690,87	1,25	15270,85	1,18	13473,68	1,81
TOTAL GERAL	310220,79	100,00	427388,55	100,00	535021,30	100,00	1297842	100,00	744534,5	100,00

CS – Circuito Simples
CD – Circuito Duplo

Fonte: ANEEL

Figura 1.1 – Custos por nível de tensão dos principais componentes das linhas de transmissão [1].

Em abril de 2004, houve o rompimento do cabo condutor 397,5MCM – Ibis, de uma linha de sub-transmissão da CELG D, chamada LT 138 kV Brasília Sul - Marajoara. Este acidente deixou, aproximadamente, 636.700 habitantes sem energia elétrica durante 33 horas devido à ruptura da estrutura em implantação durante os serviços de içamento. Após estudos, foi comprovado que o rompimento do cabo ocorreu no ponto de fixação do grampo de suspensão e que, a primeira estrutura utilizada em substituição a que foi danificada, quebrou porque a resistência do concreto da peça era inferior ao prescrito por norma [13]. Resumindo, uma falha localizada, provocada por fadiga, deu início a uma sucessão de falhas afetando inclusive as estruturas de sustentação; acarretando em prejuízos financeiros ainda maiores para a transmissora.

No ano de 2001, houve um blecaute que deixou 11 estados da federação sem energia elétrica devido ao rompimento de um cabo condutor de uma linha de transmissão na região sudeste. O acidente provocou o desligamento de 13 das 18 turbinas da usina de Itaipu, que é responsável por 30% do fornecimento de energia do Brasil, resultando em prejuízos estimados em 100 milhões de reais, além

daqueles incomensuráveis como a perda de vidas e o prejuízo à imagem do país no cenário mundial. Esse foi o pior episódio devido à fadiga mecânica provocada por vibrações eólicas.

Percentualmente, eventos gerados por indisponibilidade da linha de transmissão devido às falhas por fadiga são pequenos comparados com a totalidade das ocorrências no Sistema apontados pelo Operador Nacional do Sistema - ONS em seus relatórios de faltas de transmissão de energia por motivos menores. No entanto, o custo gerado por esses eventos podem ser extremamente elevados, pois o tempo de localização e reparo destas falhas pode demandar um tempo longo.

Portanto, criar e aperfeiçoar mecanismos que possibilitem avaliar os aspectos referentes ao estado de operação das linhas de transmissão existentes trará benefícios, não somente econômicos para as empresas transmissoras, como também para a população em geral, que contará com um serviço mais confiável.

O aumento da demanda de energia elétrica tem propiciado o surgimento de novos condutores que operam em temperaturas mais elevadas que o convencional, como os termorresistentes a 150°C e 210°C, com capacidade de transmissão 50% e 100% maiores, respectivamente. A operação em temperaturas elevadas traz o aumento das perdas por efeito Joule e o aumento das flechas. A utilização dos condutores em temperaturas elevadas atende situações de emergência, como em horários de pico.

Para as flechas dos condutores não ultrapassarem os limites estabelecidos, propôs-se a substituição do núcleo mecânico de alma de aço de condutores (CAA – Cabo de Alumínio com Alma de Aço), por outro núcleo com resistência mecânica igual ou superior e coeficiente de expansão térmica menor, para viabilizar a operação em temperaturas elevadas. Recentemente, surgiram novos materiais para a alma de cabos condutores no mercado como as almas de compósitos (fibras de óxido de alumínio e fibras de carbono) que possibilitam uma operação segura, mesmo em temperaturas elevadas, sem violar a altura de segurança do cabo condutor.

Cada projeto de uma linha de transmissão é específico, uma correta parametrização e escolha dos condutores podem trazer um impacto significativo nos custos como um todo. Portanto, é importante que se façam as análises detalhadas e os estudos específicos com as novas possibilidades e novos condutores.

Além disso, a avaliação experimental tem uma grande importância na validação das teorias existentes para configurar um bom projeto e determinar indicadores que podem causar a falha por fadiga no cabo condutor melhorando também os procedimentos de inspeção e manutenção. Com isso, pode-se obter uma linha de transmissão com maior vida útil em relação às existentes.

Assim, a avaliação experimental permite a comparação da resposta mecânica dos diferentes tipos de cabos condutores de energia elétrica à fadiga, configurando-se em um instrumento de

grande valia para o desenvolvimento de novas ferragens e acessórios, e o estudo de novas geometrias e materiais para condutores.

1.5 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Estudos relacionados à fadiga caracterizada pela ação dos ventos sobre os cabos condutores foram iniciados no século passado (1925-1933) com trabalhos de Stockbrige (1925), Varney (1926) e Nefzger (1933). Portanto, a revisão será feita de ordem cronológica de desenvolvimento de estudos sobre fadiga de cabos condutores, facilitando a visualização e compreensão do tempo.

Em 1953, a Cigré criou o grupo de estudos do sub-comitê SC-06 para investigação das causas de danos em linhas de transmissão devido à vibração eólica. Nesse mesmo sub-comitê, em 1960, Zetterholm tabulou para diversos condutores, valores de tensão de esticamento abaixo da qual o cabo não estaria sujeito a dano. Definia parâmetros para projetos como a EDS (*Every Day Stress*), que corresponde à maior carga de tração à qual um condutor pode ser submetido na temperatura de trabalho pré-estabelecida e é definida em valor percentual da carga de ruptura à tração do condutor.

Poffenberger e Swart (P-S) [14], 1965, desenvolveram uma solução analítica definindo a relação entre o deslocamento e a flexão sofrida pelos fios de cabos condutores. Tal relação depende da tensão no cabo condutor, do comprimento do cabo de grampo a grampo e a sua rigidez a flexão. Os estudos de P-S foram fundamentais para o desenvolvimento de teorias de durabilidade de cabos baseadas em propostas modernas no âmbito da fadiga de metais.

Os primeiros estudos (no laboratório e em campo) que comprovaram a importância da fadiga por *fretting* em condutores devido à vibração eólica foram realizados por Fricke e Rawlins [15], no ano de 1968. Salto importante no estudo da evolução do dano em condutores devido ao *fretting*.

Moecks [16] fez análises metalográficas para estudar a falha de cabos ACSR devido ao desgaste por *fretting*, confirmando a corrosão friccional nos cabos encordoados, em 1970. No ano seguinte, Dulhunty [17] apresentou, em um trabalho, fotos de fios quebrados próximos ao ponto de fixação dos amortecedores, indicando que as marcas de *fretting* eram os pontos de início das trincas nos fios de alumínio de condutores do tipo ACSR.

Em 1978, a IEEE [12] elaborou metodologia para cálculo da severidade de vibração eólica em condutores, sugerindo que a amplitude de flexão não pode ultrapassar o limite de fadiga do material em mais de 5% do total de ciclos e de que apenas 1% do total de ciclos poderá ultrapassar 1,5 vezes o limite de fadiga. Além disso, a IEEE considera que em nenhum ciclo da história de carregamentos a tensão (σ) poderá alcançar 2 vezes o limite de fadiga. No mesmo

ano, Claren [18] introduziu o conceito H/w para determinação da tensão mecânica em condutores, onde H representa a carga de esticamento do cabo e w sua densidade linear.

No ano seguinte, Rawlins [12] apresentou uma revisão do processo de iniciação e propagação de trincas em fios de condutores, correlacionando os valores de resistência à fadiga com os dados de amplitude de vibração medidos em campo e reconheceu a dificuldade de completo entendimento do fenômeno. Isso porque há uma complexidade do estado de tensão no contato mecânico aliado a um desgaste superficial provocado pelo *fretting* entre os fios.

Nesse mesmo ano, 1979, a EPRI [19] elaborou uma metodologia para cálculo da severidade da ação dos ventos em condutores, sugerindo valores máximos de amplitude de flexão e de amplitude de tensão para vários tipos de cabos. Caso esses patamares de amplitude fossem ultrapassados, a integridade do cabo estaria condenada pelo critério de fadiga.

Ainda em 1979, o Grupo de Trabalho 04 do Comitê de Estudo 22 da Cigré [8] demonstrou graficamente que a resistência em fadiga de metais sob condições de *fretting* era substancialmente reduzida em relação à condição sem o *fretting*.

Ramey e Townsend [20], em 1981, afirmaram que o *fretting* é o parâmetro mais importante na identificação da localização da quebra do fio, além de ser o maior parâmetro para determinação do número de ciclos que causará esta quebra para um dado nível de amplitude. No mesmo ano, Ramey, juntamente com Silva, realizou uma série de testes em laboratório a fim de avaliar a eficiência da redução da amplitude de vibração na vida à fadiga de cabos condutores. Os resultados mostraram que, a redução na amplitude de vibração dos cabos aumentava a vida em fadiga consideravelmente. Assim, os autores sugeriram o uso de amortecedores para reduzir os níveis de vibração eólica nos cabos, sendo uma forma eficiente de conter a falha por fadiga.

Em 1985 o Guia de Testes de Resistência de Condutores Montados em Grampos (GT-WG 04 SC 22) – Cigré [21] relatou-se que o efeito do *fretting* ocorre nos fios das camadas mais externas do condutor com as ferragens (acessórios de linhas de transmissão) e entre os fios da camada interna do condutor. Foi elaborado, também, as metodologias para avaliação da vida remanescente em condutores, que considera o efeito acumulativo dos ciclos de vibração utilizando a regra de Miner.

Em 1986, Ramey et al [22] realizaram importantes estudos experimentais para o levantamento de curvas S-N de cabos condutores, observando o aumento da dispersão de dados para níveis de tensão mecânica de ensaio mais baixos. No mesmo ano, Preston et al [23] observaram uma relação entre o raio de curvatura do grampo de suspensão e os níveis de tensão mecânica no condutor: quanto maior o raio de curvatura do grampo, menores os níveis de tensão registrados e, por consequência, maior resistência em fadiga do condutor. E verificaram que os fios se rompiam na região de contato do cabo com o grampo, onde havia o desgaste por *fretting*.

Cigré [24] apresentou, em 1988, os princípios básicos e os efeitos do mecanismo do *fretting* em cabos encordoados. Além de relatar que o aparecimento de Al_2O_3 (devido ao desgaste do alumínio e seu contato com o ar) na região de contato cabo/grampo.

Foi apresentado por Hardy e Brunelle [25], em 1991, os princípios básicos do dimensionamento e análise de vibrações eólicas sobre cabos condutores utilizando o vibrógrafo PAVICA. Para análise foi utilizado o método da Cigré para definir a probabilidade de falha do cabo.

Em 1993 foi proposto por Gopalan [5] experimentos alternativos para execução de testes de vibração em laboratório que diminuía o custo e o tempo de ensaio. No ano seguinte, Hardy e Dyke [6] desenvolveram importantes conclusões a respeito de vibrações eólicas, que são [4]:

- A frequência e a amplitude da vibração são independentes a correntes de ar paralelas;
- A turbulência colabora significativamente na atenuação da vibração do condutor;
- Altos índices de EDS aumentam a sensibilidade a vibrações;
- O uso de espaçadores anti-vibração (*damping spacers*) foi de grande benefício no controle das vibrações eólicas, porém, para vibrações induzidas por esteiras turbulentas o uso não é adequado.

Zhou et al [7] elaboraram experimentos a fim de comparar o comportamento à fadiga do fio testado isoladamente e em conjunto com o cabo, em 1995 [4]. Já em 1996 Zhou et al [26] mostraram que as zonas em contato eram divididas em uma zona de adesão, sem desgaste, e uma zona de escorregamento, com perda de material, em ensaio de fadiga do fio. O tamanho destas zonas dependia das condições de carregamento aplicadas ao fio. Foi observado que maiores amplitudes da carga de fadiga provocavam um crescimento da zona de escorregamento e uma redução na vida à fadiga do fio.

Em 1997, Papailiou [27] tentou estabelecer modelos numérico-analíticos para retratar o problema dinâmico em cabos. Já em 2002, foi concluído que a regra de Miner para um contexto de vibração de cabos é mais satisfatória que o a metodologia EPRI, Cardou [28].

Goudreau et al [29], em 2003, apresentaram resultados de testes de fadiga no qual o carregamento aplicado ao cabo seguiu a distribuição de Rayleigh.

Em relação aos trabalhos realizados na Universidade de Brasília:

- 2006, Henriques [30] desenvolveu uma bancada de ensaios mecânicos à fadiga de cabos condutores;
- 2009, Bellorio [4] desenvolveu um trabalho de revisão sobre critérios de fadiga sobre cabos condutores. No mesmo ano, Hortêncio [31] elaborou uma dissertação de mestrado com tema relacionado à fadiga de cabos condutores sob condição de *fretting*.

- 2010, Fadel [32] desenvolveu tese de doutorado que investigou o efeitos da EDS nos condutores sobre a vida em fadiga destes.
- 2011, Murça [33] elaborou um estudo experimental do efeito da sequência de carregamento sobre a resistência à fadiga de cabos condutores.

O estudo para determinar um campo de distribuição de tensões na interação cabo/grampo em linhas de transmissão de energia elétrica tem sido realizado por alguns pesquisadores, atualmente, devido à necessidade de construção de novas de linhas de transmissão, expansão e renovação das linhas existentes. Porém, um modelo representativo eficiente que traga resultados confiáveis ainda não foi alcançado. Segundo relatório da CIGRE de 2005 [12], modelos teóricos e numéricos estão disponíveis para avaliar o comportamento estrutural de um condutor num ponto específico. Entretanto, modelos analíticos realísticos, relacionando todas as tensões envolvidas, incluindo tensões de contato e micro-escorregamento para um sistema grampo-condutor específico ainda não foram publicados.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se estruturado em seis capítulos, sendo este o primeiro, o qual descreve os objetivos, o cenário que justifica o trabalho realizado, aspectos relacionados ao problema em estudo, uma revisão do estado da arte, bem como a definição da proposta da dissertação. A seguir, são descritos os temas dos capítulos seguintes.

O capítulo 2 apresenta uma revisão teórica do fenômeno de fadiga, de forma geral e em cabos condutores, influência da tensão média e fadiga por *fretting* (fadiga do contato).

No capítulo 3 é apresentada a metodologia do processo experimental, que se encontra dividido em três blocos: validação da fórmula de Poffenberger-Swart a partir da extensometria em diversos condutores; estudo da influência da variação de EDS na tensão residual média de diferentes condutores; e o estudo da sequência da carga de aperto nos parafusos do conjunto cano/grampo de suspensão. Neste capítulo são apresentadas as características dos materiais utilizados no ensaios, o planejamento dos teste, além da bancada experimental e métodos experimentais para determinação das tensões (nominal e média) e força de aperto.

O capítulo 4 refere-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos no programa experimental. Este capítulo também é subdividido em três partes: avaliação dos resultados da extensometria para validar a fórmula de P-S; avaliação do efeito da aplicação de diferentes EDS na estimativa da tensão residual média dos condutores em estudo; e a apresentação dos resultados das diferentes formas de apertos e sua influência sobre o cabo.

O capítulo 5 apresenta as conclusões e as considerações finais acerca dos resultados obtidos e a proposta para trabalhos futuros.

2 REVISÃO TEÓRICA

Este capítulo visa fornecer ao leitor os subsídios teóricos para o melhor entendimento do problema de fadiga em cabos condutores, tema importante na avaliação do comportamento dos condutores em uma linha de transmissão. Nesse sentido, este capítulo traz uma revisão dos conceitos de fadiga e uma abordagem conceitual dos fatores que influenciam na vida remanescente de cabos condutores, a influência da vibração eólica e as diferentes metodologias que abordam esse assunto.

2.1 FADIGA

Dentre as distintas causas de falha de componentes mecânicos, a mais comum deve-se à fadiga do material que representa de 50% a 90% do número total de falhas [1]. A fadiga equivale a uma redução gradual da capacidade de suportar carga do componente, pela ruptura lenta do material em consequência do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam em seu interior. O avanço da falha ocorre para cada flutuação do estado de tensões. As cargas variáveis, sejam cíclicas ou não, fazem com que, ao menos em alguns pontos, tenhamos deformações plásticas também variáveis com o tempo. Estas deformações levam o material a uma deterioração progressiva, dando origem à trinca, a qual cresce até atingir um tamanho crítico, suficiente para a ruptura final, em geral brusca.

As características de fadiga são parâmetros importantes para a caracterização dos materiais e fornecem subsídios para estimar ou prever a vida de componentes estruturais no âmbito da engenharia [26]. Além de permitir o desenvolvimento de métodos de concepção e de projeto de novos componentes e estruturas, resultando em economia e segurança aos projetos.

Falhas por fadiga estão associadas a tensões cisalhantes e a deformações plásticas, e sua progressão é acelerada pela aplicação de cargas trativas, as quais tendem a “abrir” a trinca, facilitando sua propagação. O processo de fadiga de um material resultante de tensões dinâmicas pode envolver os estágios representados pela Figura 2.1: nucleação da trinca; propagação da trinca; ruptura final.

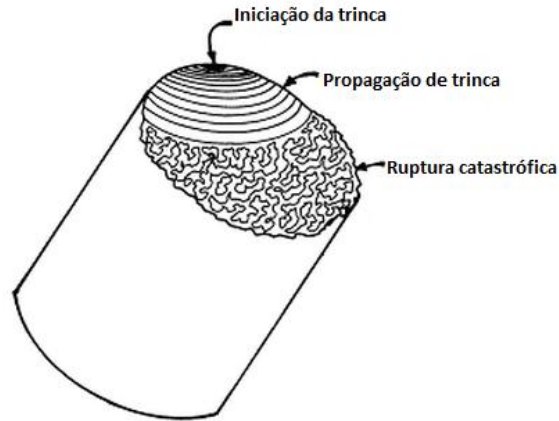


Figura 2.1 – Aparência típica de superfície onde ocorre fratura por fadiga.

A nucleação, primeiro estágio, ocorre em um ou mais pontos no plano de cisalhamento ou próximo às concentrações de máxima tensão. Nessa etapa observam-se mudanças causadas por danos permanentes gerando fissuras microscópicas. Na Figura 2.2 são apresentados os elementos da nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos.

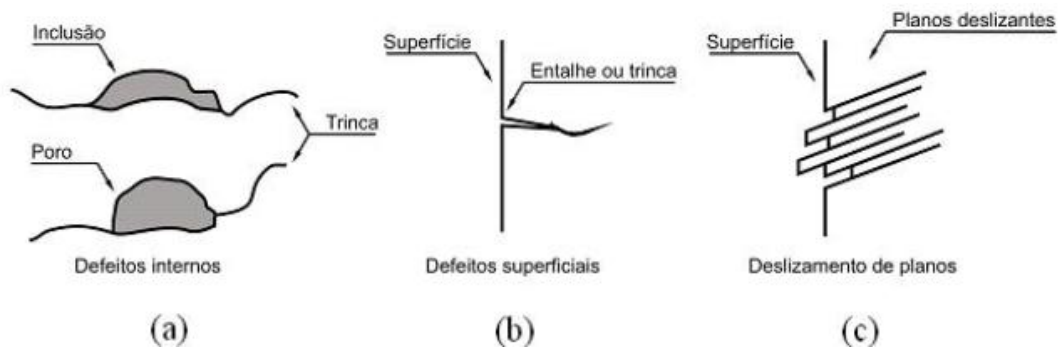


Figura 2.2 – Nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos [34].

Na Figura 2.3 ilustra estágio I e estágio II atuando no processo de crescimento da trinca sob carga cíclica.

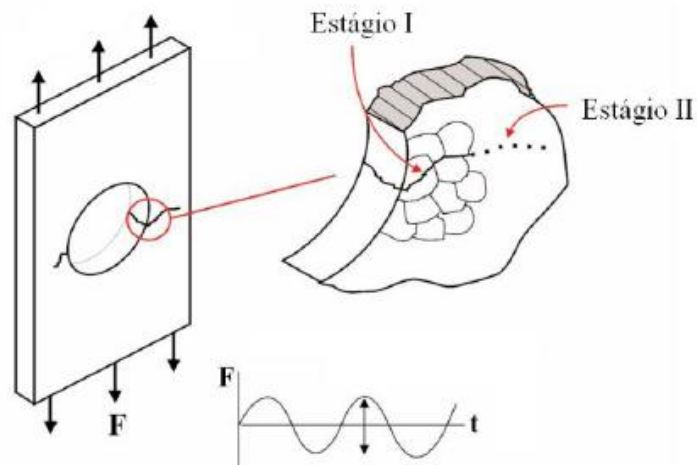


Figura 2.3 – Mecanismo de crescimento da trinca [8].

No estágio I, a trinca é considerada embrionária, pequena para ser visualizada. Quando essa micro trinca atinge as bordas do grão da microestrutura ela é transferida para grãos adjacentes. A micro trinca cresce então na direção do cisalhamento máximo e atinge 45° na direção da aplicação da carga. Após atingir o tamanho de aproximadamente três grãos, a trinca altera seu comportamento, torna-se grande o suficiente para formar uma concentração geométrica de tensão. No estágio II a trinca cria uma zona de tração plástica em sua extremidade e cresce na direção perpendicular à da carga aplicada. A concentração de tensão na ponta da trinca favorece o deslizamento de planos de 45° com o plano da trinca. Como resposta à deformação plástica localizada, a ponta da trinca altera seu formato, arredondando-se e consequentemente aliviando as tensões locais, que ocorrem durante os ciclos de tração do material [20]. A

Figura 2.4 esquematiza o processo de avanço da trinca.

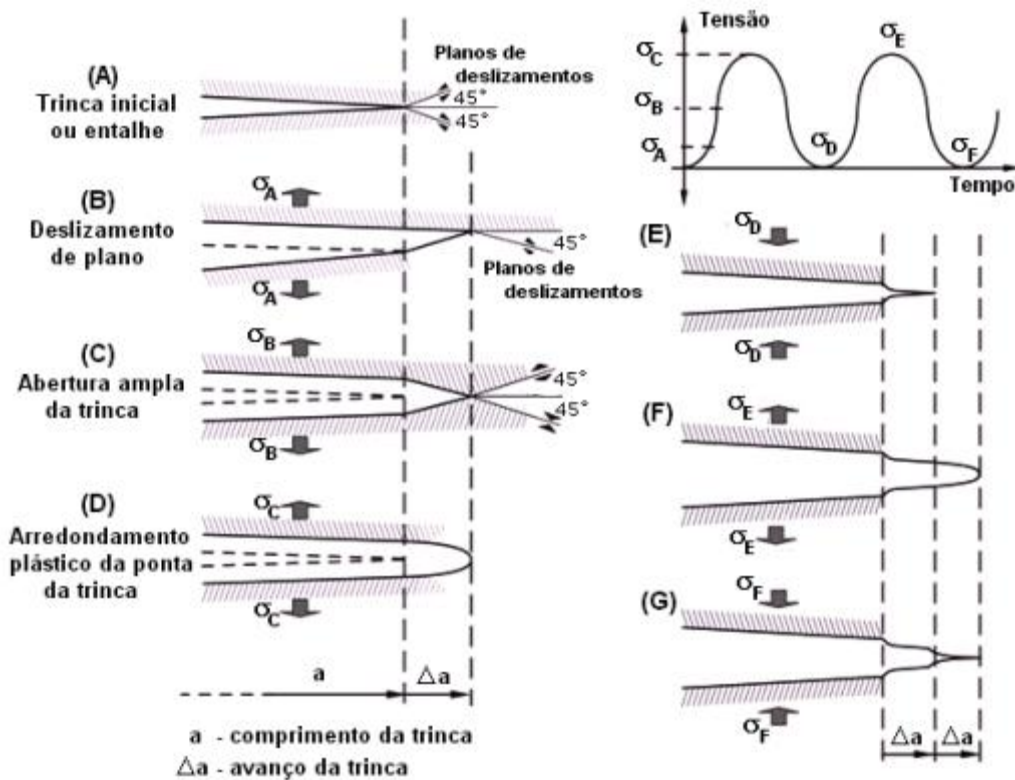


Figura 2.4 – Estágio de crescimento da trinca devido ao processo de fadiga [20].

O estágio II, propagação da trinca, é dividido em duas fases: crescimento baixo de trincas e o crescimento alto de trincas. O crescimento baixo é considerado como o início da propagação da trinca. A região de uma superfície de fratura que se formou durante o estágio II de propagação pode ser caracterizada por dois tipos de marcas denominadas marcas de praia e estrias. Ambas indicam a posição da ponta da trinca em algum ponto no tempo enquanto se expandem para fora a partir dos sítios de iniciação da trinca, frequentemente numa forma circular ou semi-circular;

marcas de praia são de dimensões macroscópicas e podem ser observadas a olho nú [16]. Já as estrias de fadiga são observadas microscopicamente.

O último estágio ocorre no ciclo de carga final e resulta na fratura rápida e repentina (falha catastrófica), a qual ocorre quando é atingido o limite de tenacidade à fratura ou valor crítico do comprimento da trinca, a_c , momento em que a seção transversal da peça não suporta mais a carga aplicada. A ruptura pode apresentar características diversas: dúcteis ou frágeis, dependendo do material e dos níveis e tipo de tensão aplicados à peça.

A vida à fadiga de um material é expressa, normalmente, em número de ciclos, sendo o resultado do somatório do número de ciclos de cada estágio (nucleação das trincas, propagação e ruptura do material) A nucleação da trinca é o estágio predominante no processo de fadiga em regimes de alto número de ciclos. Já para regimes de baixos ciclos a propagação de trinca predomina.

Os metais, dentre os inúmeros materiais presentes na natureza, são os mais utilizados na engenharia. Isso deve-se à suas características de usinabilidade, condutividade, resistência mecânica, dentre outros. Desta forma, foram os metais os pioneiros em estudos em fadiga de materiais.

O aço e o alumínio foram os primeiros materiais a terem suas propriedades de fadiga estudadas, devido ao grande uso desses materiais industrialmente. Esses dois metais são os responsáveis, atualmente, pela transmissão da maior parte da energia gerada em grandes usinas ao redor do mundo, por meio de sua aplicação na constituição dos cabos condutores de energia.

Os cabos condutores estão sujeitos a flutuações dinâmicas de tensão ao longo da vida útil, como qualquer outro componente mecânico. Para tanto, é importante uma cuidadosa manutenção preventiva e preditiva, evitando o comprometimento de fornecimento de energia elétrica à população e, conseqüentemente, prejuízos e danos às empresas fornecedoras e geradoras de energia. Portanto, entender a fadiga dos metais é compreender, em parte, o comportamento das linhas de transmissão e seus componentes, que são estruturas complexas.

2.1.1 Definições Fundamentais dos Ciclos de Tensão

O tema fadiga é representado pela história cíclica de carregamento uniaxial cuja amplitude é constante. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são definidas a tensão máxima (σ_{\max}) e a tensão mínima (σ_{\min}), exemplificando a história de tensão controlada.

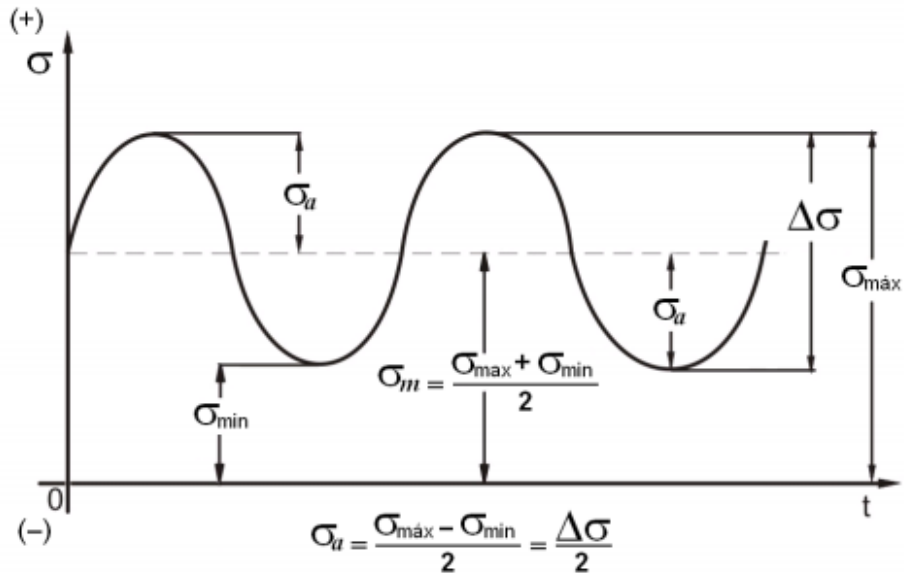


Figura 2.5 – Representação clássica dos cíclicos de tensão.

O intervalo de tensões $\Delta\sigma$ é definido como:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.1)$$

A amplitude de tensão (ou componente alternada) é dada por:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.2)$$

Tensão média é:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.3)$$

Razão de tensão pode ser definida por:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.4)$$

A razão de amplitude é:

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

Os ciclos de tensão de fadiga podem se dividir em dois grandes grupos: ciclos com amplitude de tensão constante, tais como alternado ($R=-1$ e $\sigma_m=0$) (Figura 2.6(a)), repetido ($R=0$ e $A=1$) e pulsante (Figura 2.6 (b)) ($A \geq 0$ e $0 \leq R \leq 1$), e ciclos com amplitudes de tensão variável, quais sejam, blocos e irregular ou aleatório (Figura 2.7)[27].

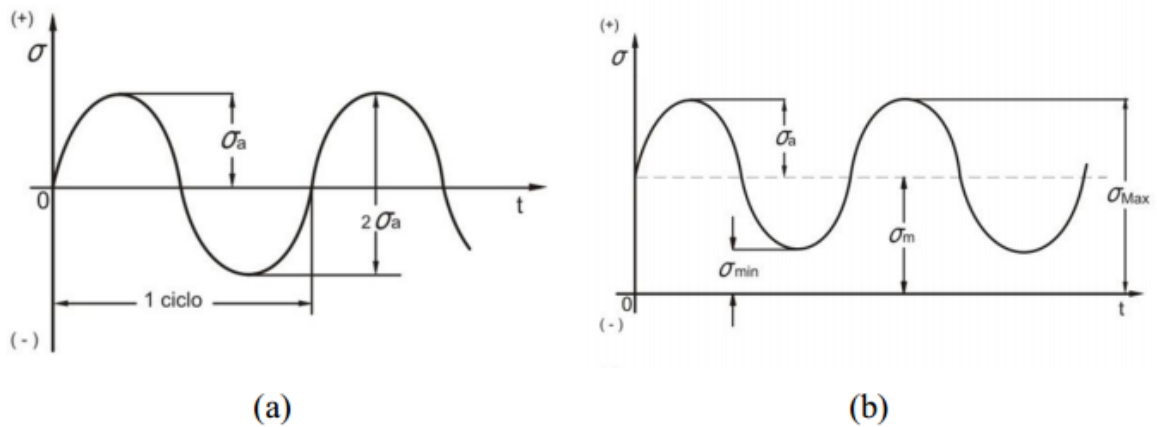


Figura 2.6 – (a) Ciclo com amplitude de tensão constante – alternado[31]; (b) ciclo com amplitude de tensão constante - pulsante [31].

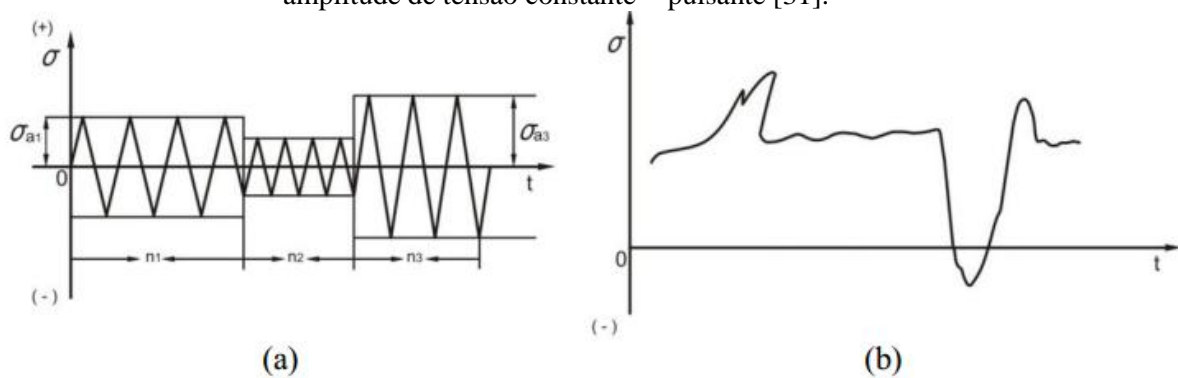


Figura 2.7 – (a) Ciclo com amplitude de tensão variável em blocos[31]; (b) ciclo com amplitude de tensão variável irregular ou aleatória [31].

Denomina-se ciclo de tensão a menor parte da função tensão (ou carga) que é periódica e repetida. No ciclo de tensão alternado a tensão média (σ_m) é nula e a tensão máxima (σ_{max}) é igual, em módulo, à tensão mínima negativa ($-\sigma_{min}$). Já no ciclo repetido, a tensão média (σ_m) é diferente de zero. O ciclo é chamado pulsante quando a tensão mínima (σ_{min}) é nula.

2.1.2 Métodos De Previsão Da Vida Em Fadiga

Há três métodos clássicos de previsão da vida de um componente sob esforços cíclicos, que são baseados nos dois principais critérios para projeto em fadiga:

- Vida segura, vida infinita;
- Vida segura, vida finita;
- Tolerância ao dano.

A primeira filosofia (vida segura, vida infinita) tem como metodologia de projeto a correlação entre tensão e vida, representada em uma curva S-N. Enquanto a filosofia de vida segura e finita tem sua metodologia relacionada à deformação e vida, sendo que a principal representação dos dados do material é ϵ -N. Já a tolerância ao dano é baseada na mecânica da fratura e sua curva representativa é a $da/dN-\Delta K$ [26].

2.1.3 Abordagem pela tensão

A caracterização do comportamento do material sobre um processo de fadiga é geralmente obtida experimentalmente a partir de ensaios em componente estrutural ou corpos de prova padrão (CPs) do material que deseja trabalhar submetidos a diferentes tensões aplicadas. Cada CP é submetido a uma determinada amplitude de tensão que se mantém constante durante o ensaio, que termina quando o corpo de prova é rompido ou quando exceder um determinado número de ciclos muito longos (10^7 , por exemplo). Relaciona-se a amplitude de tensão ou deformação com o número de ciclos necessários para a falha completa dos CPs, que são sujeitos a um carregamento cíclico uniaxial.

Quanto maior o nível de tensão aplicado no ensaio, menor será o número de ciclos de falha. Após a contagem de ciclos para cada nível de tensão, traça-se uma curva de Tensão-Vida (*S-N* ou curva de Wöhler), em que a amplitude de tensão σ_a ou a tensão nominal é plotada em função do número de ciclos necessários para falhar, ou a vida em fadiga N_f [22].

A abordagem S-N também pode ser classificada como uma metodologia tipicamente usada para avaliar fadiga sob condição de alto número de ciclos, e leva em consideração a manutenção do regime de comportamento elástico dos componentes analisados. A representação da curva *S-N* deve ser feita com o número de ciclos N (ou $\log N$) no eixo das abscissas e com os valores da amplitude de tensão, σ_a , no eixo das ordenadas, que também poderão ser expressos em escala logarítmica.

2.1.4 Abordagem pela deformação

A ocorrência do fenômeno de plasticidade, que acompanha a falta de proporcionalidade entre tensão e deformação, levou à utilização de deformação como parâmetro de controle [28]. Devido ao fato da iniciação da trinca envolver escoamento, uma aproximação baseada na tensão é incapaz de modelar adequadamente esse estágio do processo de fadiga.

Um modelo baseado na deformação plástica em regiões de concentração de tensão fornece uma visão mais precisa do estágio de iniciação da trinca. Este método é aplicado com maior frequência em regimes de fadiga de baixo ciclo (aproximadamente de 10^2 a 10^5 ciclos) e em

problemas de vida finita, nos quais as tensões cíclicas são elevadas o suficiente para causarem escoamento local. [29].

2.1.5 Abordagem pela mecânica da fratura

A abordagem é baseada na teoria de mecânica da fratura que trata do crescimento da trinca. A análise em questão toma por base o campo de tensões existentes na extremidade de uma fissura já existente, sendo, assim, quantificado pelo fator de intensidade de tensão K . Assim, ao comparar K com o valor de tenacidade à fratura de um determinado material, pode-se avaliar quão severo é o defeito e se a peça irá falhar ou não mediante alguma sollicitação.

Para cabos condutores de energia elétrica adota-se o método de vida por tensão (S-N) por tratar-se de um problema de fadiga de alto ciclo, uma vez que o fenômeno ocorre por anos sob a ação de ventos e, em geral, demanda milhões de ciclos até a ocorrência da falha.

2.2 DETERMINAÇÃO DA CURVA S-N

A abordagem mais tradicional para o projeto de resistência à fadiga foi estabelecida pelo engenheiro August Wöhler. Ele determinou a curva de tensão aplicada em função do número de ciclos necessários para que ocorra a ruptura do material. Essa curva é conhecida como Curva de Wöhler ou Curva S-N (S-Stress – N-Number).

Cada ponto da curva é obtido ao submeter corpos de prova do material à determinada amplitude de tensão (S), que se mantém constante durante todo o ensaio até a falha após determinado número de ciclos (N). O procedimento é repetido para outros valores de tensão, diminuindo-a gradativamente até atingir o valor de tensão em que não haja ruptura do CP. Essa tensão é considerada como limite de resistência à fadiga do material (σ_f').

No eixo das abscissas é colocado o número de ciclos, geralmente em escala logarítmica e os níveis de tensão experimentados pelas amostras são registrados no eixo das ordenadas.

O número de ciclos associado a cada nível de tensão (σ_a) é dado por N_f . A correlação entre os níveis de tensão e o número de ciclos, e a tensão limite de resistência à fadiga do material por meio da equação de Basquim, é expressa por (Equação 2.6):

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

Onde,

σ_f' : coeficiente de resistência para fadiga;

b : expoente de resistência à fadiga (ou expoente de Basquim);

σ_a : amplitude de tensão;

N_f : vida a fadiga.

O parâmetro b é obtido a partir de ensaios uniaxiais em corpos de prova não entalhados.

A Figura 2.8 apresenta esquemático de curvas S-N para um aço e uma liga de alumínio, sob ciclo de carregamento com tensão média nula.

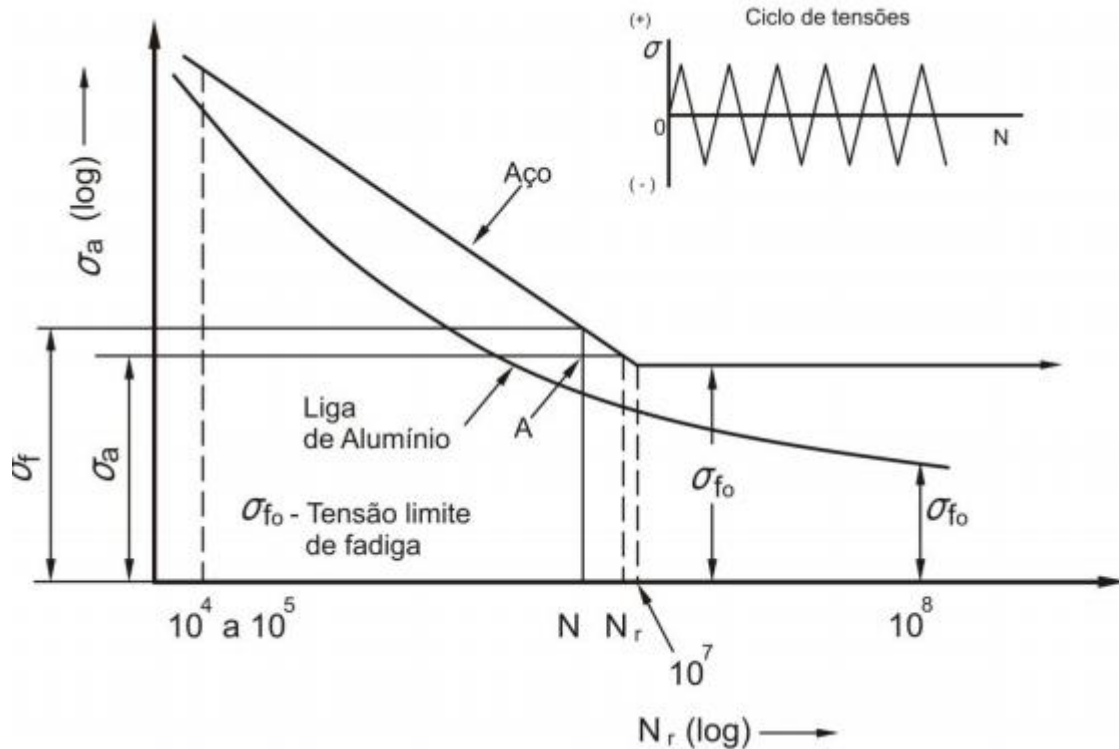


Figura 2.8– Curvas S-N esquemáticas para aço e uma liga de alumínio [27]

O número de ciclos no eixo das abscissas será dividido em três regiões:

1. $N_r < (10^4 \text{ a } 10^5)$: zona de fadiga de baixo ciclo ou fadiga oligocíclica. Nessa região as tensões e extensões na peça são predominantemente plásticas, que, na maioria dos testes, são controladas as deformações plásticas (ϵ - N).
2. $10^7 > N_r > 10^4 \text{ a } 10^5$, quanto maior a amplitude de tensão (σ) aplicada, menor será o número de ciclos até a falha, N_f .
3. $N_r > 10^7$, para aços e titânio, a curva S-N torna-se horizontal a partir de uma determinada tensão limite (σ_f'). Para tensões abaixo da tensão limite (tensão limite de fadiga), o material poderá suportar, provavelmente, um número infinito de ciclos sem romper. No entanto, este comportamento não é válido para todos materiais, pois para metais como o alumínio a curva S-N tem um inclinação que decresce gradualmente com o número de ciclos de ruptura.

A resistência à fadiga se define em relação a uma determinada duração ou número de ciclos até a falha, exceto para a tensão limite de fadiga, que corresponde a uma duração infinita.

Dados experimentais de um ensaio de fadiga uniaxial gera-se um gráfico log-linear, cuja curva pode ser representada por [35]:

$$\sigma_a = S_a = C + D \log(N_f) \quad (2.7)$$

Onde C e D são parâmetros constantes do material. O mesmo gráfico pode ser apresentado em escala log-log onde a equação linearizada é dada por:

$$\sigma_a = S_a = A(N_f)^B \quad (2.8)$$

Os parâmetros A e B referem-se às constantes do material e são obtidos após levantamento da curva experimental.

2.2.1 Fatores que Influenciam na Curva S-N

Como a curva S-N é obtida a partir de corpos de prova padrão em laboratório, a resistência à fadiga ou o limite de fadiga obtidos nesses ensaios devem ser modificadas para considerar, em valores finais, as diferenças entre os CPs e a peça real que é projetada. Fatores que reduzem a resistência à fadiga obtida em laboratório são: fator de acabamento superficial (k_a); fator da escala (k_b); fator de carga (k_c); fator de temperatura (k_d) e o fator para outros efeitos (k_e). Com esses fatores a tensão limite de fadiga da peça real (S_e) é obtida pela Equação (2.9) (Expressão de Marin [30]):

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e \quad (2.9)$$

O fator de modificação de condição de superfície k_a [32] ou fator de acabamento depende da qualidade da superfície de acabamento e da resistência à tração do material que a constitui, podendo ser obtido por meio de Equação (2.10) [17]:

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (2.10)$$

Sendo S_{ut} a resistência à tração mínima e **a** e **b** são obtidas da Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Fator de acabamento superficial [36]

Tipo de Superfície	Fator “a” (MPa)	Expoente “b”
Retificada	1.58	-0,085
Usinada ou laminada a frio	4.51	-0,265
Laminado a quente	57.7	-0,718
Forjada	272	-0,995

O fator de tamanho k_b [32] depende das dimensões do corpo de prova. O efeito de k_b é diferente para os casos de carregamento axial e flexão e torção.

a) Casos de torção e flexão rotativa:

Se o diâmetro do corpo de prova estiver entre 2,8 mm e 51 mm, então:

$$k_b = \left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0,1133} \quad (2.11)$$

Para diâmetros maiores que 51 mm, $k_b \approx 0,60$ a $0,75$

b) Peças submetidas a carregamentos axiais: $k_b = 1$

O fator de carregamento k_c , e seus valores estão de acordo com a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Fator de carregamento k_c [32].

Carregamento Axial	Carregamento com Flexão rotativa	Carregamento Torcional
$k_c = 0,85$	$k_c = 1$	$k_c = 0,59$

O fator k_d é função da temperatura de trabalho da peça. Ele pode ser obtido por meio da equação (Figura 2.12):

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad (\text{Figura 2.12})$$

Onde S_T é igual a resistência à temperatura de operação e S_{RT} é igual a resistência à temperatura ambiente, os quais poderão ser obtidos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Fator de temperatura, k_d [36].

Temperatura ° C	ST/SRT
20	1,000
50	1,010
100	1,020
150	1,025
200	1,020
250	1,000
300	0,975
350	0,943
400	0,900
450	0,840
500	0,766
550	0,670
600	0,546

A tensão limite de fadiga de ensaio (S_e') é dada por:

$$S_e' = 0,504 S_{ut} \text{ se } S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa}$$

$$S_e' = 700 \text{ MPa se } S_{ut} > 1400 \text{ MPa}$$

2.2.2 Efeito da Tensão Média sobre a Vida em Fadiga

A tensão média tem um efeito significativo na resistência à fadiga. Quando a componente de tensão média de tração é somada à componente alternada, o material apresenta tensões alternadas inferiores às que ocorreriam sob um carregamento puramente alternado [29]. A tensão média pode atuar diretamente na velocidade de propagação da trinca, aumentando ou retardando este processo. Neste trabalho a avaliação do efeito da tensão média nos cabos condutores tem uma grande relevância, uma vez que condutores operam sob ação de cargas de esticamento que estão diretamente associadas às cargas de contato entre os fios do cabo e as ferragens de suporte. Desta forma, as cargas médias alteram a severidade da fadiga por *fretting*.

Os primeiros estudos para estabelecer o efeito da tensão média nas propriedades à fadiga do material foram iniciados por Goodman em 1899, e a partir de então, várias outras teorias procuraram traduzir matematicamente os resultados experimentais que se analisava este efeito, dentre elas se destacam Gerber e Soderberg [16]. Estes modelos relacionam amplitude de tensão e a tensão média experimentada pelo material, estabelecendo limites onde um componente possa operar sem falhar por fadiga após um número de ciclos de carregamento. As Equações (2.13), 2.14 e 2.15 apresentam as expressões propostas por Goodman, Gerber e Soderberg, respectivamente:

$$\text{Goodman: } \sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{US}}\right)} \quad (2.13)$$

$$\text{Gerber: } \sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{US}}\right)^2} \quad (2.14)$$

$$\text{Soderberg: } \sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_y}\right)} \quad (2.15)$$

Onde,

σ_a : limite de fadiga na presença de σ_m ;

σ_m : tensão normal média;

σ_{ar} : limite de fadiga para $\sigma_m=0$;

σ_{US} : limite de resistência à tração;

σ_y : limite de escoamento.

Em geral, a curva de Goodman é usada para metais com baixa ductilidade como aços de alta resistência, por outro lado, materiais frágeis como o ferro fundido tendem a apresentar seus dados experimentais abaixo dessa.

O método de Soderberg é muito conservativo e fornece a margem de segurança mais alta quando usada para dimensionamento, tensão limite de fadiga mais baixa, sendo mais usada por definida pela tensão de escoamento, que traduz melhor o comportamento real do material e, assim, garante a não ocorrência de falha por fadiga ou escoamento do material.

Para obter uma curva que se ajuste aos materiais frágeis, J. Morrow (Equações 2.16 e 2.17) propôs modificações na equação de Goodman, como a substituição do limite de resistência σ_{US} pelo coeficiente de resistência à fadiga σ_f' do material ou pela tensão verdadeira de resistência à fadiga $\tilde{\sigma}_{fB}'$, quando $\sigma_f' > \sigma_{US}$. As equações propostas por Morrow apresentam resultados razoáveis para aços e ligas de alumínio [23]:

$$\text{Morrow 1: } \sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\tilde{\sigma}_{fB}'}\right)} \quad (2.16)$$

$$\text{Morrow 2: } \sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_f'}\right)} \quad (2.17)$$

A equação de Smith-Thomson-Watson (STW) é aplicável para todos os materiais, já que não possui variáveis relativas às características dos materiais.

$$\text{STW: } \sigma_{ar} = \sqrt{\sigma_{max}\sigma_a} \quad (2.18)$$

$$\sigma_{ar} = \sigma_a \left(\frac{2}{1-R}\right)^2 \quad (2.19)$$

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as curvas padrão indicadas por Goodman, Gerber, Soderberg, Morrow e STW. Elas permitem correções dos efeitos do valor da tensão média não nula sobre a vida em fadiga. Para cada critério, pontos na (ou acima da) respectiva linha indicam região de falha por fadiga.

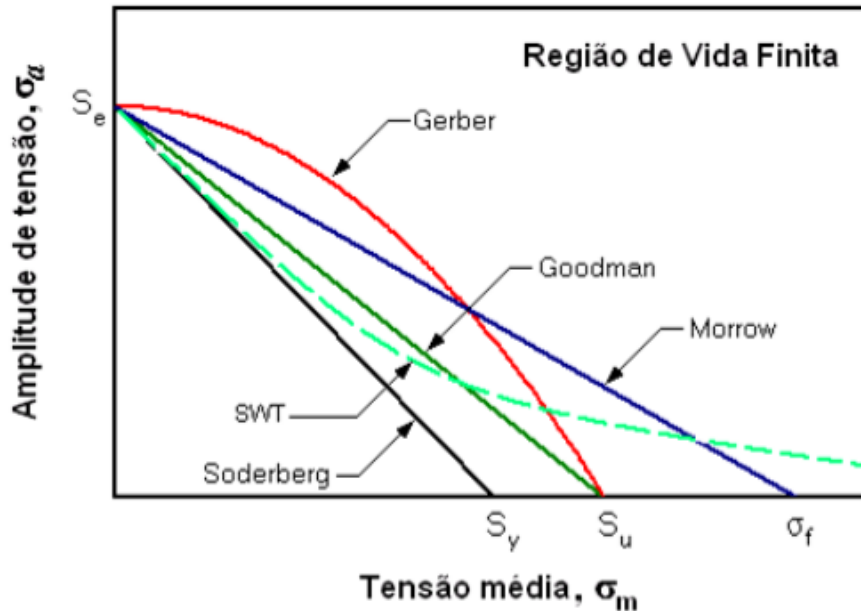


Figura 2.9 – Gráfico comparativo dos modelos de Goodman, Gerber, Soderberg, Morrow e STW.

Para casos em que a tensão média é pequena em relação à tensão alternada ($R \ll 1$), existe uma diferença entre os métodos.

A relação STW não apresenta variáveis relativas às características do material usado, oferecendo bons resultados para a maioria dos metais e ótimos resultados para ligas de alumínio. Com isso, seria uma boa opção no desenvolvimento de um modelo de influência da tensão média sobre a resistência à fadiga de um condutor. A tensão de base seria diferente de zero, na tensão equivalente à EDS aplicada ao cabo condutor.

2.3 FADIGA EM CABOS CONDUTORES

A principal causa de falhas em cabos condutores é a falha por fadiga em flexão cíclica imposta por vibrações decorrentes da ação do vento. A falha ocorre, frequentemente, em pontos de restrição ao movimento do condutor que existem ao longo da linha de transmissão. Esses pontos são, por exemplo, grampos e espaçadores. Quando o movimento é restringido, os fios que constituem o cabo escorreguem entre si, e as forças de fricção aliadas a esse movimento relativo causam o *fretting* entre os fios e nos contatos do cabo com os grampos de suspensão.

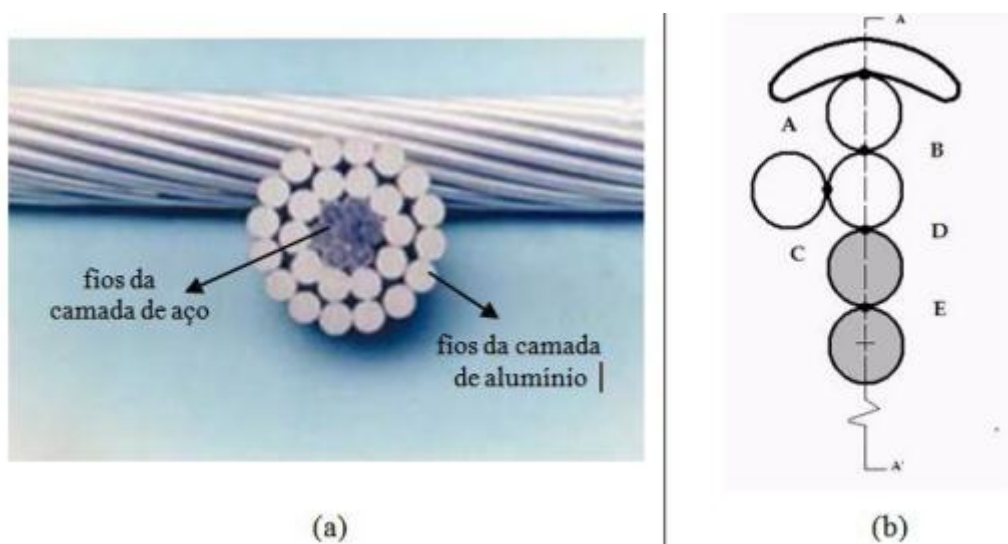


Figura 2.10 – (a) Seção transversal de um cabo CAA (ou ACSR); (b) Contatos entre os fios e o grampo.

A Figura 2.10(a) apresenta a seção transversal de um cabo CAA (ou ACSR), cujas camadas externas são de alumínio e a alma é de aço. A Figura 2.10(b) mostra um esquemático dos contatos entre o cabo e o grampo (ponto 'A'), entre os fios de alumínio adjacentes (pontos 'B' e 'C'), entre os fios de alumínio e os fios de aço (ponto 'D') e entre os fios de aço (ponto 'E'). Essas regiões representadas na Figura 2.10 (b) são as regiões críticas do processo de fadiga por *fretting* em cabos condutores. No entanto, as falhas ocorrem, em quase a totalidade dos casos, dentro ou próximos aos grampos e ferragens de sustentação e amortecimento do condutor.

A fadiga por *fretting* é influenciada pelos fatores que seguem: a carga de contato e a amplitude do escorregamento entre os fios, o coeficiente de fricção, condições da superfície do material, tipo de material em contato e as condições do ambiente externo. Uma vez formada, a trinca induzida por *fretting*, poderá se propagar por fadiga levando ao rompimento do fio (Figura 2.11) ou, em casos extremos, ao rompimento total do cabo [1].

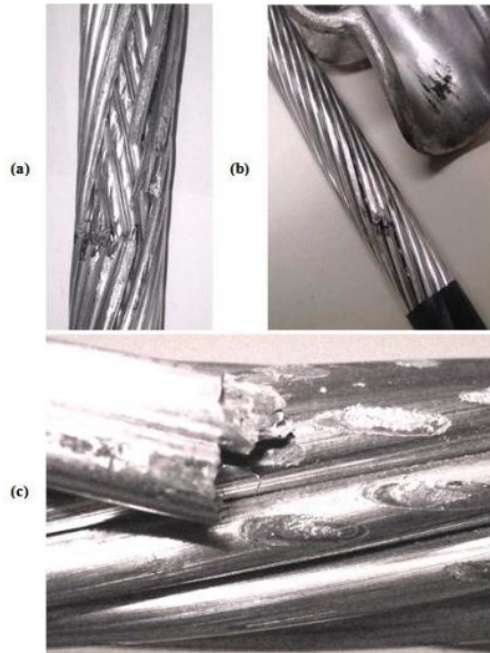


Figura 2.11 – (a) Cabo condutor CAA rompido após ensaio de fadiga; (b) Óxido de alumínio formado pelo desgaste do fio (c) Fratura de fios de alumínio de marcas de *fretting* [8].

2.3.1 Fadiga por *Fretting*

Segundo Lindley (1997), *fretting* é um fenômeno que ocorre quando duas superfícies em contato estão sujeitas a forças tangenciais oscilatórias, que deslizam uma sobre a outra, formando regiões de microdeslizamento.

Além do movimento vibratório no acoplamento, a fadiga por *fretting* envolve a presença de uma tensão remota cíclica em pelo menos um dos componentes da montagem. Ela pode levar o sistema prematuramente ao colapso, pois acelera os processos de nucleação e de crescimento de trincas devido ao desgaste superficial e à concentração de tensões provocada pelas cargas de contato (carga radial compressiva) ‘P’. Tipicamente, o *fretting* ocorre em montagens sob regime de escorregamento parcial (caracterizado por uma região de contato onde existe uma zona de adesão circundada por uma zona de escorregamento) com movimento relativo, provocado por uma carga axial cíclica ‘Q’, gerando na zona de contato uma marca da interação dos cilindros (Figura 2.12).

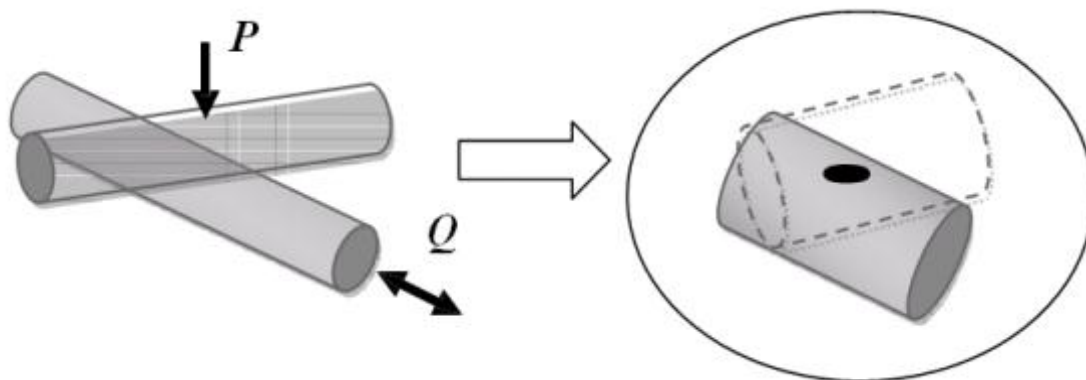


Figura 2.12 – Esquema do problema de contato entre dois cilindros (equivalente ao contato entre dois fios) [8].

Nos cabos condutores, o fenômeno de *fretting* nos fios de alumínio inicia-se com a remoção do filme oxidante presente no alumínio, decorrente da fricção fio-fio e fio-grampo. No primeiro momento, as superfícies friccionadas tendem a se aderir, que serão rompidas posteriormente devido ao movimento relativo das partes. Esse processo gera resíduos, que é acumulado entre os corpos friccionados (Figura 2.11 (b)), surgindo, então, uma fina e quebradiça camada de óxido de alumínio Al_2O_3 [36,37]. Com a camada desse óxido, a formação de microtrincas é inevitável, podendo levar à falha do material, caso essas se propagem por debaixo da camada de Al_2O_3 . Na Figura 2.11 mostra um corpo de prova rompido depois de realizado ensaio de fadiga, e é possível visualizar o detalhe das marcas de *fretting* ocasionadas devido ao contato dos fios de alumínio (Figura 2.11 (c)).

Em cabos condutores, deve-se observar que a carga de esticamento tem relação direta com as forças de contato, alterando significativamente a área de deslizamento e influenciando na rigidez do cabo, e por consequência, nas tensões geradas na zona de falha e na severidade do dano causado pelo *fretting* [8].

2.3.2 Excitação eólica

O fenômeno vibratório dos cabos é provocado pela ação dos ventos, que fazem o cabo deslocar em movimento alternado, para cima e para baixo. Existem três tipos de vibrações de cabos induzidas pelo vento [38] que são:

1. Vibrações eólicas simples;
2. Vibrações de galopes;
3. Vibrações de esteira, que se divide em: vibrações de sub vão, de galope horizontal e vertical e de torção.

As vibrações mais comuns são as eólicas simples, que são causadas pelo escoamento do ar ao redor do condutor, que pode ser simplificado como um corpo cilíndrico. O camada limite do fluido pode ou não deslocar, dependendo da velocidade do escoamento. Quando há

deslocamento ocorre a formação de vórtices, que são gerados em certa frequência, a qual é transmitida ao condutor fazendo-o oscilar.

Dois parâmetros são usados na análise da formação de vórtices: o número de Reynolds, que define o tipo de escoamento (laminar ou turbulento), e o número de Strouhal, que fornece a frequência de oscilação do cabo. A Equação (2.20) define o número de Reynolds:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (2.20)$$

Onde,

V: velocidade d escoamento;

d: diâmetro do condutor;

ν : viscosidade cinemática do fluido.

A Equação 2.21 define o número de Strouhal:

$$S_t = \frac{f_s d}{V} \quad (2.21)$$

Onde, f_s é a frequência com que os vórtices são emitidos na saída do cilindro ou o número de ciclos completos da esteira de vórtices em Hz.

A formação de vórtices ao redor de um corpo cilíndrico em função do número de Reynolds é ilustrada na Figura 2.13. Situação assemelha com o comportamento do condutor.

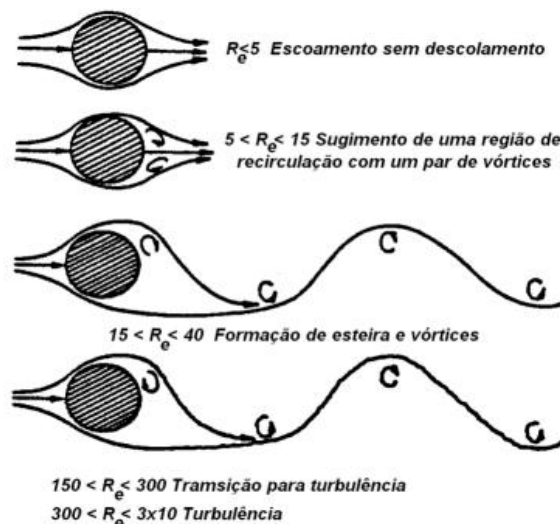


Figura 2.13 – Escoamento ao redor de um corpo cilíndrico em função do número de Reynolds [38].

No Brasil é incomum encontrar vibrações do tipo galope, que são causadas devido à presença de uma camada de gelo sobre os condutores. A camada de gelo altera o coeficiente de arrasto do

condutor, podendo gerar movimento vertical. Esse movimento causa um desequilíbrio maior de forças, uma vez que a velocidade relativa do escoamento estará em constante mudança e a massa do condutor desbalanceada.

As vibrações de esteira ocorre em dois ou mais condutores que estão conectados de alguma forma. Esse comportamento ocorre quando um feixe de cabos é submetido a um escoamento do ar.

A Tabela 2.4 mostra os tipos e características em cabos condutores aéreos [38].

Tabela 2.5 – Comparação entre os tipos de vibração em condutores [19].

Parâmetro	Tipo de Vibração		
	Eólica	Galope	Esteira
Tipos de condutores afetados	Todos	Todos	Linhas paralelas no plano horizontal
Faixa de frequência [Hz]	3 a 150	0,08 a 3	0,15 a 10
Amplitude pico a pico (n° de diâmetro)	0,01 a 1	5 a 300	0,5 a 80
Tipo de vento que provoca a excitação	Permanente	Permanente	Permanente
Velocidade do vento [km/h]	3 a 23	23 a 60	15 a 60
Superfície do condutor	sem cobertura ou com depósito simétrico de gelo	com gelo depositado assimetricamente	limpa, seca

A literatura usa o valor de 0,185 [19] para o número de Strouhal, como referência, para escoamentos em torno de cabos ACSR. Uma condição crítica de vibração acontece quando a frequência de oscilação dos vórtices coincide com uma das frequências naturais do condutor. Portanto, as frequências e velocidades a serem evitadas poderão ser descritas pela Equação 2.23:

$$f = \frac{0,185V}{d} \quad (2.23)$$

Outro fator que afeta diretamente a vibração eólica é a tensão de esticamento (ou EDS - Every Day Stress) dos condutores. A EDS está associada à tensão média diária a qual o condutor é submetido ao longo da sua vida útil e é definida como sendo uma porcentagem da carga de ruptura à tração (CRT) ou UTS (Ultimate Tension Stress) a que o cabo é tracionado. Portanto a carga de tração 'T' de um condutor é dada em função da sua EDS:

$$T = EDS \cdot CRT \quad (2.24)$$

Normalmente, é utilizado uma tensão média de esticamento de 18,5% a 20% de EDS em condutores em operação nas linhas de transmissão. O auto-amortecimento do condutor também é influenciado pela EDS. Quanto maior a EDS, menor é o amortecimento do cabo quando submetido à vibrações.

A carga de esticamento tem grande relevância no projeto de uma linha de transmissão, já que um cabo mais esticado reduziria a quantidade de cabos ao longo da linha, mas teria uma vida reduzida [8] devido à a maior quantidade de ciclos de vibração de um cabo quando comparado a um esticamento menor. Ou seja, o condutor mais esticado vibraria mais vezes ao longo de um mesmo período de tempo quando comparado a um condutor menos esticado nas mesmas condições de vento.

2.3.3 Determinação da Tensão Nominal no Fio mais Solicitado do condutor

A partir de 1966 foi estabelecida pela IEEE uma metodologia padrão para o cálculo da tensão dinâmica para condutores em vibração. Essa metodologia estabelece uma relação entre o movimento e a severidade da fadiga, baseando-se na Fórmula de Poffenberger-Swart (P-S) [7].

A fórmula de P-S é usualmente utilizada para correlacionar uma amplitude de tensão com o deslocamento, pico a pico) de um ponto distante a 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão (UPC). O modelo teórico experimental proposto considera a parcela do cabo na vizinhança do ponto de restrição como uma viga de Euler (Figura 2.14). O nível de tensão nominal em um fio da camada mais externa do cabo é obtido pela correlação com uma amplitude de deslocamento vertical pico a pico (Y_B), do condutor com relação ao grampo de suspensão.

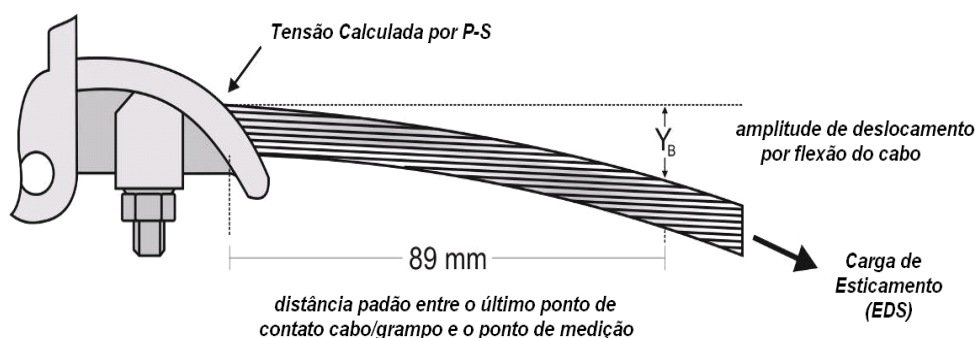


Figura 2.14- Esquema de montagem cabo-grampo.

Como pode ser visto na Figura 2.14, o valor Y_B é medido a 89 mm (3,5”) do último ponto de contato (UPC) entre o grampo e o condutor (localizado na “boca do grampo”).

A tensão é calculada considerando-se a regidez flexural, como se o condutor fosse uma viga de Euler, conforme a Equação 2.24, apresentada a seguir:

$$\sigma_a = KY_B \quad (2.24)$$

onde σ_a é a faixa de tensão dinâmica (zero a pico), Y_B é a amplitude de deslocamento (pico a pico¹), medida a partir de um ponto sobre o cabo distante 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, e o valor do coeficiente de Poffenberger, K [N/mm³] é obtido pela Equação 2.25.

$$K = \frac{E_a d_a p^2}{4(e^{-px} - 1 + px)} \quad (2.25)$$

sendo E_a [MPa] e d_a [mm], o módulo de elasticidade (Módulo de Young) e o diâmetro dos fios de alumínio da camada externa do cabo, respectivamente; x é a distância ao longo do cabo entre o UPC e o ponto de medição, padronizado como 89 mm (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) .O valor de p é igual a:

$$p = \sqrt{\frac{T}{EI}} \quad (2.26)$$

onde T [N] é a carga de esticamento para a temperatura média durante a medição, EI_{min} [N.mm²] é a rigidez a flexão do cabo, cujo valor mínimo é dado pela Equação 2.27

$$EI_{min} = n_a E_a \frac{\pi d_a^4}{64} + n_s E_s \frac{\pi d_s^4}{64} \quad (2.27)$$

na qual n_a , E_a , d_a são respectivamente, o número, diâmetro individual e o módulo de elasticidade dos fios de alumínio(a-aluminum), e n_s , E_s , d_s são respectivamente, o número, diâmetro individual e o módulo de elasticidade dos fios de aço (s-steel).

Azevedo [39] ressalta que o uso da Equação 2.25 demanda atenção especial, pois a variação dinâmica da rigidez à flexão do cabo não é considerada nesta formulação. Enfatiza também que, para pequenos níveis de amplitude de tensão, deve-se esperar que os fios individuais do condutor não deslizem entre si e, portanto o cabo se comporta como uma barra rígida, respondendo a flexão com sua máxima rigidez. Por outro lado, à medida que a amplitude de vibração aumenta mais e mais, os fios passam a escorregar e a rigidez a flexão se aproxima de EI_{min} , apresentada pela expressão 2.27. Conclui-se que, neste caso, a fórmula de Poffenberger-Swart torna-se uma melhor aproximação para os níveis de tensão na camada mais externa do cabo.

¹ Na fórmula original a constante no quociente era 2 e não 4, pois a medida de Y_B era tomada 0-pico. Como a medida usualmente executada em campo é pico a pico, o valor passou a ser 4.

2.3.4 Metodologias de previsão de vida e critérios de projeto contra fadiga em cabos condutores

No projeto de uma linha de transmissão é necessário definir critérios que visem proteger os condutores com relação ao processo de fadiga. Dois critérios podem ser adotados neste caso: a metodologia EPRI [38] e a metodologia IEEE [40], sendo necessário quantificar a intensidade de vibração e adotar parâmetros de medida de resistência do conjunto cabo/grampo de suspensão à fadiga para prevenir a ocorrência de falhas. Portanto, as metodologias estabeleceram limites máximos de vibração que possam ser suportados pelos condutores, possibilitando o trabalho dos condutores abaixo do limite de resistência à fadiga em uma região segura visando vida infinita.

As condições reais de campo podem extrapolar as condições previstas em projeto. Para isso é necessário aplicar metodologias que permitam prever a vida remanescente em cabos condutores. A abordagem mais utilizada é a abordagem do dano cumulativo proposta pela CIGRÉ [41], que tem por base a regra de acúmulo de dano proposta por Miner (1945) [42].

2.3.4.1 Metodologia do EPRI

A metodologia do EPRI sugere valores máximos de amplitude de flexão e de amplitude de tensão, que tende ao “limite de resistência à fadiga”, para cabos condutores CAA. Caso esses valores forem ultrapassados, a integridade do cabo estaria condenada pelo critério de fadiga.

Para cabo CAA com mais de uma camada de fios de alumínio, a amplitude máxima de flexão varia entre 0,2 e 0,3mm ou pode-se considerar um valor de 0,23mm. Essas amplitudes de flexão foram calculadas por meio de Poffenberger-Swart baseando-se nos limites de resistência à fadiga, que foram obtidos mediante testes laboratoriais para diferentes tipos de cabos CAA de diferentes tamanhos [22].

Na

Tabela 2.6 é apresentado os limites de resistência de acordo com o número de camadas de fios de alumínio do condutor. Eles são recomendados para ligas de alumínio 1350 e 5005, para a liga 6201 ou similar o limite de resistência é 5,7 MPa.

Tabela 2.6 – Limites de Resistência à Fadiga EPRI.

Número de Camadas de Fois de Alumínio do Cabo	Limite de Resistência [MPa]
1	22,5

Na literatura não é apresentado os limites de resistência para tipos de cabos diferentes do CAA, como por exemplo, o CAL e Aero-Z. Há uma referência a extensão do critério EPRI, amplamente usada, que consiste em três tópicos:

1. Admissível até 5% do total de ciclos ultrapasse a vibração referente ao limite de resistência;
2. 1% do total de ciclos pode exceder 1,5 vezes o limite de resistência;
3. Nenhum ciclo pode ultrapassar duas vezes o limite de resistência.

2.3.4.2 Metodologia IEEE

A metodologia é baseada na deformação máxima admissível. A extrapolação do limite de resistência proposto pelo IEEE [43] segue as regras de que a máxima deformação admissível na flexão alternada de um condutor CAA sem a indução do dano por fadiga é de 150 μ strain pico a pico. O IEEE considera que, em nenhum ciclo da história de carregamentos, a tensão (σ_a) poderá alcançar duas vezes o limite de fadiga [22].

Atualmente, é possível observar que o valor imposto pela IEEE é conservador. Dependendo do caso e das definições de projeto, costuma-se aplicar valores de uma a duas vezes maiores, ou seja, algo em torno de 300 μ strain.

2.3.4.3 Metodologia do Cigré WG 22-04 – Avaliação da vida remanescente de condutores

A metodologia do CIGRÉ WG 22-04 considera a quantificação do dano sofrido pelo condutor durante sua vida em serviço. O método é baseado na superposição das curvas S-N de cabos obtidas em laboratório ou utilizar uma curva teórica obtida a partir de um banco de dados para cabos condutores denominado de Safe Border Line (CIGRÉ WG 22-04), e dos dados de campo que avalia a severidade da vibração sofrida pelo condutor, utilizando um medidor de vibrações (vibrógrafo - Figura 2.15) instalado na linha viva, mede-se os níveis de amplitude de vibração pico a pico (Y_B) no ponto 89 mm e as respectivas frequências durante um tempo especificado. As amplitudes de deslocamento são armazenadas na matriz gerada com os dados coletados são extrapoladas para o período de um ano, sendo posteriormente convertidas em tensões de flexão com o auxílio de uma equação semiempírica proposta por Poffenberger-Swart. Aplicando a regra de Miner é possível quantificar a fração de dano provocada por unidade de bloco de amplitude de tensão devidamente armazenado na matriz do vibrógrafo.

Usando a curva S-N, que estabelece os ciclos que o cabo resiste para cada tensão, e aplicando a Regra de Miner é possível estimar a vida do cabo consumido no período de medição, que será extrapolada para estimar a vida remanescente do condutor, apresentada em anos [22,1].

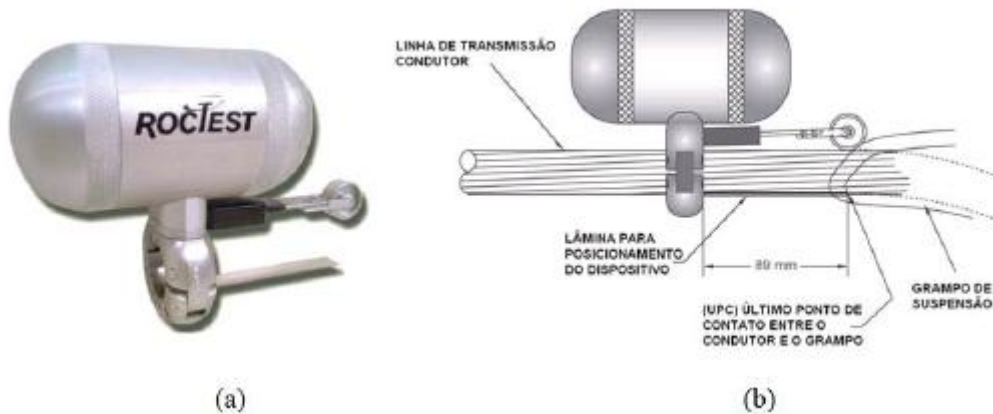


Figura 2.15– (a) Vibrógrafo tipo Pavica; (b) Esquemático da montagem vibrógrafo/cabo.

2.3.5 Limites de Resistência à Fadiga de Cabos Condutores

Segundo publicações da CIGRE (1979 e 1995), a vida útil média do cabo condutor considerada econômica e tecnicamente satisfatória é de aproximadamente trinta anos.

Há duas abordagens principais para a definição da vida em fadiga de condutores aéreos [37]:

- Abordagem do dano acumulativo;
- Abordagem do limite de resistência.

2.3.5.1 Abordagem do Dano Acumulativo (Cumulative Damage Approach)

Baseada no método CIGRE, na qual, a evolução do processo de fadiga aumenta gradativamente a cada ciclo de vibração durante a vida útil do condutor, até a ocorrência da ruptura. Parte-se da premissa que esta acumulação é linear, utilizando a Teoria de Miner. Nesta teoria são feitas considerações probabilísticas quanto à recorrência de ventos que ocasionam vibração e, quanto às curvas de resistência à fadiga do condutor (curva S-N ou de Wölher). Assim, são calculadas tensões seguras a partir da definição de uma vida útil do condutor considerada aceitável;

2.3.5.2 Abordagem do Limite de Resistência (Endurance Limit Approach).

Baseada nos métodos IEEE e EPRI, na qual se considera que a manutenção dos níveis de vibração abaixo de determinados limites proporciona uma vida infinita ao condutor, isto é, as

tensões seguras são determinadas de forma que estes limites não seja ultrapassados. As abordagens citadas acima foram concebidas a partir de resultados de ensaios de fadiga e, portanto são igualmente aceitas no meio técnico científico, sendo que a Abordagem do Dano Acumulativo possibilita considerar a variação da vibração do cabo ao longo do tempo, isto é, períodos com pequena, grande ou até mesmo sem qualquer vibração. Já a Abordagem do Limite a Resistência pode ser considerada como um caso específico da Abordagem do Dano Acumulativo, na qual a vida útil estimada do condutor tende ao infinito e, portanto é mais conservativa.

2.3.6 A Curva Limite de Segurança da CIGRE

A metodologia proposta pela CIGRE (1985), que utiliza a abordagem do dano cumulativo, foi definida a partir de uma curva proposta pelo Comitê de Estudos de Linhas Aéreas (SC 22), intitulada *Cigre's Safe Border Line* (CSBL), a qual foi obtida a partir da compilação de vários resultados de ensaios de fadiga realizados em diversos laboratórios do mundo, utilizando: fios de alumínio, fios de liga de alumínio, cabos de alumínio e de ligas de alumínio.

A partir destas curvas a CSBL foi concebida para ficar abaixo da série de resultados obtidos nos ensaios citados, representando uma estimativa conservadora da vida útil dos cabos e/ou fios. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 16 ilustra a curva *Safe Border Line*, bem como as demais curvas compiladas pela CIGRE. À direita é possível ver que as curvas superiores se referem a fios separados (Al liga e Al puro) e as curvas inferiores se referem aos cabos diversos.

A curva CSBL pode ser representada pela seguinte equação:

$$\sigma_a = AN^b \quad (2.28),$$

onde σ_a é a tensão dinâmica em MPa, N é a vida em ciclos e A e b são constantes obtidas através da Tabela 2.6 na qual pode-se observar que para estas constantes são utilizados valores diferenciados para cabos com uma ou mais camadas de fios de alumínio. Logo, para o cabo IBIS a CSBL é dada pela expressão:

$$\sigma_a = 450N^{-0,2} \quad (2.29),$$

Tabela 2.6 – Constantes da Curva Limite de Segurança (CSBL). [3]

Nº de camadas de fios de alumínio do cabo condutor	N < 2.10 ⁷		N > 2.10 ⁷	
	A	b	A	b

1	730	-0,2	430	-0,168
>1	450	-0,2	263	-0,168

A abordagem da CIGRE para estimativa da vida do condutor será adotada neste trabalho e uma comparação da previsão de vida fornecida pela CSBL será estabelecida com aquela fornecida pela curva S-N obtida para a montagem cabo IBIS/grampo de suspensão, avaliada.

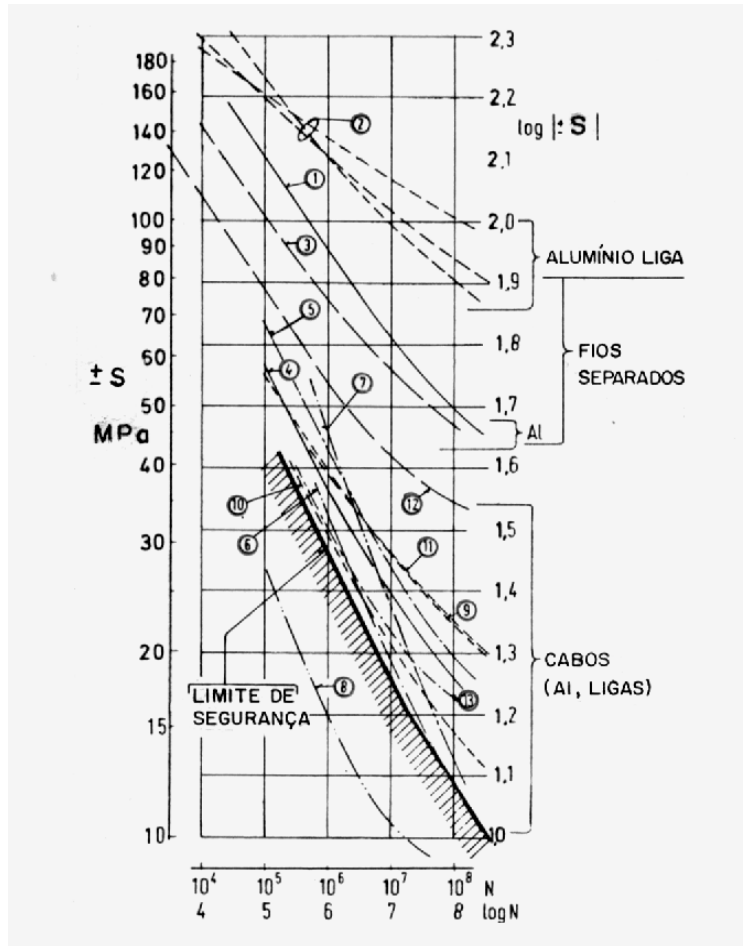


Figura 2.16 – Curva Safe Border Line, bem como as demais curvas compiladas pela CIGRE ([3]1985 - modificado).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo encontra-se descrito o procedimento experimental da pesquisa, compreendendo seus objetivos, materiais utilizados, planejamento dos testes, da descrição bancada utilizada, além da apresentação da metodologia segundo a qual foram realizados os ensaios.

O procedimento experimental encontra-se dividido em três etapas: *i*) Avaliação da Fórmula de Poffenberger-Swart (P-S), por meio do uso de extensômetros posicionados no último ponto de contato na montagem cabo/grampo, UPC; *ii*) Avaliação do comportamento das tensões médias residuais, nos fios do cabo condutor, em decorrência da variação na carga de esticamento (EDS), aplicando extensometria; *iii*) Estudo da influência da sequência de aperto nos parafusos da montagem cabo/grampo, utilizando *loads washers*.

A seguir serão descritos: a bancada de ensaio², os materiais utilizados e o procedimento de montagem da amostra. Bem como, cada etapa do processo experimental detalhada, incluindo seus objetivos, o planejamento e a metodologia aplicada nos ensaios realizados para seu desenvolvimento, de acordo com as etapas anteriormente descritas.

3.1 BANCADA DE ENSAIOS DE CABOS CONDUTORES

O presente tópico de descrição da bancada foi extraído, com modificações, dos trabalhos de Henriques, Fadel [32], Brant [13], bem como do Manual de Descrição, Procedimentos e Operações do LabCabos/UnB.

3.1.1 Aspectos gerais

O desenho esquemático da bancada² de ensaios é apresentado na Figura 0.1. O comprimento total do vão é de 46,8 metros, o qual é dividido em dois sub-vãos: ativo e passivo. O sub-vão ativo define o comprimento do cabo ensaiado, é nele que encontra-se o excitador eletromecânico responsável por gerar o valor de Y_B pré-definido. Ele está delimitado pelo centro da roldana do bloco fixo 3 e o centro do grampo de suspensão, posicionado no bloco móvel, variando seu comprimento de 31 a 41 m, segundo o posicionamento escolhido para o bloco móvel. No vão ativo são posicionados os instrumentos e mecanismos para efetuar o controle do ensaio. O sub-vão passivo é utilizado tão somente para a fixação do cabo.

² Bancada de Ensaio Mecânico à Fadiga de Cabos Condutores de Energia do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia (LabCabos/UnB), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Brasília - DF.

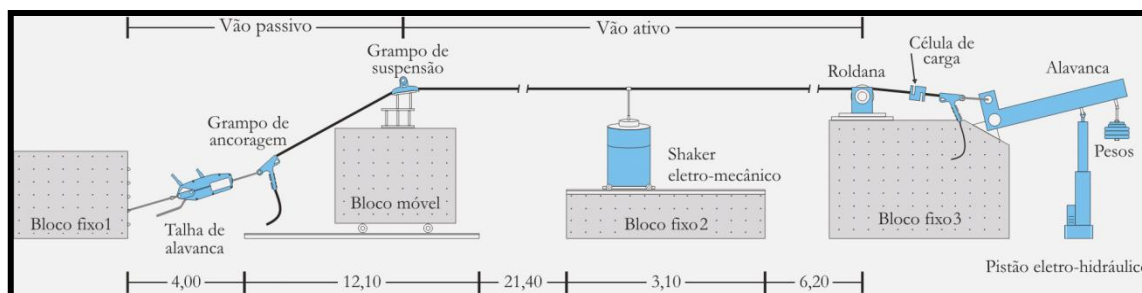


Figura 0.1 – Desenho esquemático da montagem da bancada de ensaios[8].

Os seguintes parâmetros devem ser mantidas durante o ensaio de fadiga em cabos condutores de energia:

- 1- Ângulo de mergulho - Simula o ângulo que o cabo faz com o grampo de suspensão. O ângulo de mergulho é função de diversos parâmetros, dentre os quais os mais importantes podem ser citados: i) tensão mecânica diária (EDS – *Every Day Stress*), ii) densidade do cabo, iii) comprimento do vão e iv) flecha admissível. Neste trabalho adotou-se um ângulo de mergulho de 10° , que considerado como a condição menos crítica para a fadiga. O limite inferior de 10° é limitado devido basicamente à carga de EDS que pode ser aplicada no cabo.
- 2- Torque de aperto dos parafusos de fixação do cabo no grampo de suspensão -Normalmente o torque máximo de aperto das porcas que fixam os parafusos ao grampo de suspensão é fornecido pelo fabricante do grampo. Esse torque de aperto insere uma carga compressiva no conjunto cabo/grampo, evitando-se o escorregamento do cabo sobre o grampo de suspensão. Nos testes utilizou-se um grampo de suspensão monoarticulado que possibilita a montagem de cabos com diferentes diâmetros. Para estes ensaios foi utilizado um torque de 50Nm, que é usualmente utilizado nas linhas de transmissão.
- 3- A carga de pré-esticamento – A carga de pré-esticamento está associada à tensão média mecânica (EDS- *Every Day Stress*) que o cabo é solicitado ao longo de sua vida.
- 4- Amplitudes de deslocamento que são aplicadas no cabo durante a realização dos testes no ponto localizado a 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão são também uma das variáveis de controle.

A rigidez da montagem é garantida a partir do uso de quatro blocos de concreto armado maciços (três blocos fixos e um bloco móvel), os quais são mostrados no esquemático (Figura 0.1). A amostra de cabo é disposta sobre dois pontos de apoio, o grampo de suspensão e a roldana, que funcionam como pontos de articulação. Então, é fixada nas extremidades (blocos fixos 1 e 3) por meio de grampos de ancoragem, os quais viabilizarão a aplicação da carga.

O grampo de ancoragem localizado próximo ao grampo de suspensão, é preso ao bloco fixo 1, por meio de um dispositivo extensor, Tifor (Figura 0.2) , o qual permite a fixação e o pré-tensionamento do condutor antes da aplicação da carga de ensaio.



Figura 0.2 – Talha de alavanca ancorada ao bloco de fixação 1[8].

Na outra extremidade da amostra, no final do vão passivo, a qual é localizada no bloco fixo 3, o condutor é fixado a um grampo de ancoragem passante o qual é interligado a célula de carga, responsável pela leitura da carga de tração no condutor (Figura 0.3), que por fim é ligada ao braço de alavanca responsável pelo controle de tração do cabo (controle da EDS durante o ensaio).



Figura 0.3 – a) Fixação do cabo através do grampo de ancoragem passante no bloco fixo 3, b) Detalhe do grampo de ancoragem passante e a célula de carga [8].

O controle da EDS durante o ensaio é realizado com o uso de contrapesos inseridos na gaiola fixada ao braço de alavanca.

O bloco móvel movimenta-se, com auxílio de rolamentos, sobre trilhos de aço, com perfil I, fixados no piso do laboratório. Isso possibilita a variação do comprimento do vão ativo, conforme é possível ver na Figura 0.4.



Figura 0.4 – Grampo de ancoragem montado em uma base de concreto com rolamentos e os trilhos [8].

O bloco fixo 2, mostrado na Figura 0.5 serve de suporte para o excitador eletromecânico (*shaker*). Nesse bloco é possível ajustar a posição do excitador, movendo-o sobre os trilhos de aço com perfil em C, para melhorar o posicionamento do excitador em relação ao nó, ou anti-nó em dada frequência de excitação, melhorando assim a estabilidade do ensaio.



Figura 0.5 – Bloco fixo 2, posicionamento dos *shakers*. [8].

3.1.2 Mecanismo de Tracionamento do Cabo

A carga é aplicada depois da fixação da amostra nos grampões de ancoragem. E essa carga é controlada a partir do sinal da célula de carga. O primeiro passo no mecanismo de tracionamento é elevar, com uso da talha, o braço de alavanca para o ângulo final desejado, aliviando a carga aplicada sobre a amostra. A talha, localizada em uma das extremidades da bancada (bloco fixo 3), Figura 0.6, é então acionado para realizar o pré-esticamento do condutor.

Após isso, a talha é liberada para que os pesos colocados na balança atuem mantendo a carga desejada, com o braço na posição pré-definida.



Figura 0.6 – Bloco fixo 3 que contém os dispositivos para controle de tração do cabo [8].

3.1.3 Montagem do Grampo de Suspensão

O ponto de interesse da pesquisa está relacionado à montagem cabo/grampo. É o ponto onde há restrição de movimento, e conseqüentemente no qual as tensões dinâmicas mais elevadas são desenvolvidas. São essas tensões que levam à falha do condutor. Para o controle de deslocamento do ensaio posiciona-se um acelerômetro em um ponto sobre o cabo que dista 89 mm (“ponto 89”) do último ponto de contato entre a base do grampo de suspensão e o cabo. A boca do grampo de suspensão monoarticulado dista 68,5 mm desse ponto de referência. Então, a distância entre o do último ponto de contato (da base do grampo e o cabo) e a boca do grampo é 20,5 mm (Figura 0.7).

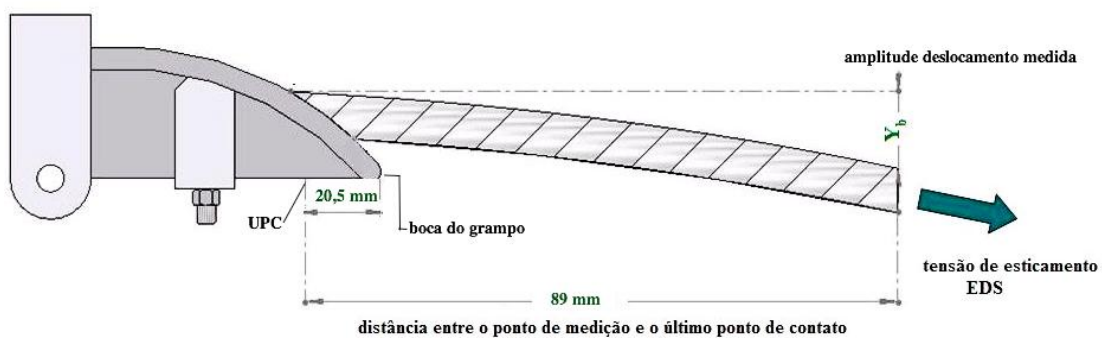


Figura 0.7 – Esquemático da montagem cabo/grampo de suspensão.

A montagem cabo/grampo e o posicionamento do acelerômetro podem ser visualizados na Figura 0.8 com vistas lateral e topo.



Figura 0.8 – Montagem cabo/grampo vista de frente e de topo [8].

3.1.4 Dispositivo para Fixação do Grampo de Suspensão

O grampo de suspensão é fixado sobre um dispositivo metálico aparafusado na face superior do bloco móvel. Esse dispositivo reproduz o ângulo de saída do condutor que é 10° para os grampos de suspensão e 0° para os grampos amortecedores (Figura 0.8), reproduzindo assim o efeito da catenária que o cabo descreve quando fixado à torre.

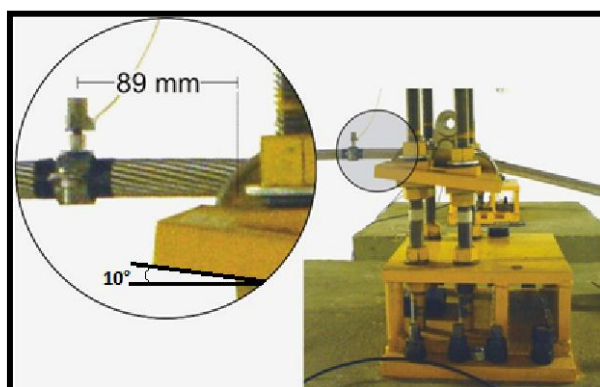


Figura 0.9 – Montagem do grampo de suspensão sobre o bloco móvel e o ponto 89 [8].

3.1.5 Sistema de controle do ensaio

A operação da bancada é realizada por meio de um controlador que é programado para manter no ponto 89 mm as condições de ensaio prescritas. É possível submeter a amostra a ensaios senoidais, a blocos de carregamentos senoidais, a ensaios randômicos ou de choque. Para o presente trabalho foi usada apenas a rotina para ensaios senoidais. Como a potência do sinal do controlador não é suficiente para garantir a atuação do é utilizado um amplificador de potência entre os dois elementos, conforme ilustra a Figura 0.10. Toda a operação da bancada é realizada por meio do software de controle da Data Physics, denominado SignalStar Vector Controller.

No detalhe da Figura 0.10 é possível ver como o monitoramento e o controle da bancada envolve a aquisição e transmissão de diversos sinais capturados pelos sensores. A estabilidade do sistema depende do perfeito balanço entre tempo de aquisição e processamento destes sinais e velocidade de atuação no sistema por meio de sensores. Para garantir o perfeito funcionamento do sistema os sensores são conectados ao ADS 2000.

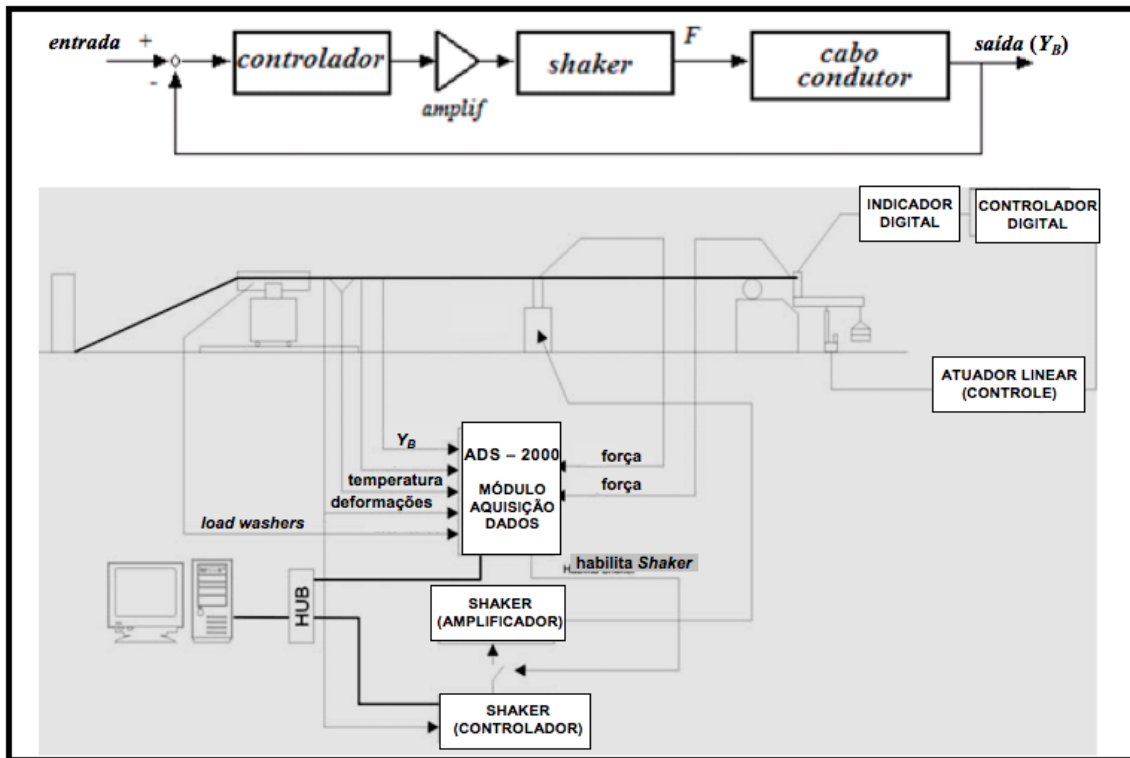


Figura 0.10 – Esquema de controle da bancada para realização dos ensaios [8].

3.1.6 Mecanismo do Excitador (Shaker)

Para conduzir os ensaios necessários para a realização deste trabalho foram utilizadas as duas bancadas existentes no Laboratório (Figura 0.5), sendo cada uma equipada com um excitador eletrodinâmico (*shaker*), cuja função é aplicar vibração de maneira controlada – amplitude, frequência, velocidade e aceleração.

Para evitar cargas laterais nos *shakers* uma mesa é fixada a este por meio de um eixo, e na parte superior desta mesa o cabo é preso por um mordente (Figura 0.11). Sobre a tampa do mordente é posicionado um acelerômetro, podendo monitorar a frequência (deslocamento, velocidade e aceleração)

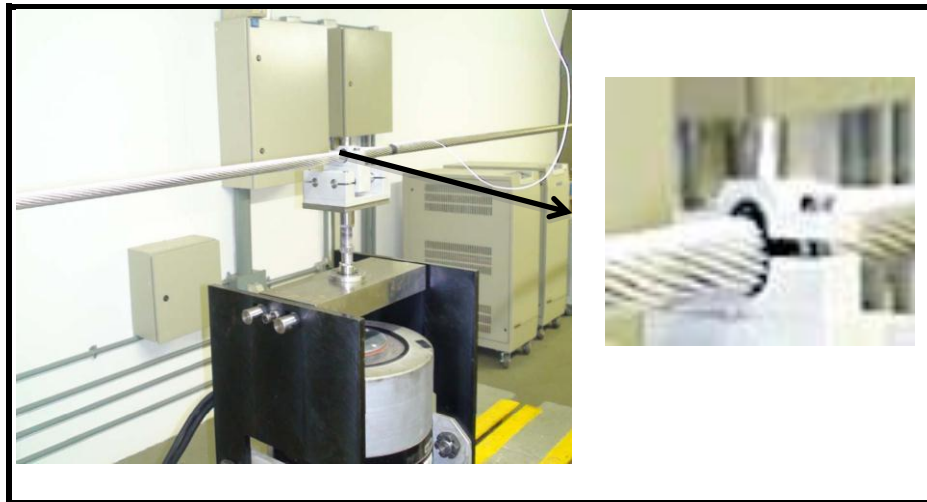


Figura 0.11- Fixação do cabo ao *shaker* [8].

As características dos excitadores eletrodinâmicos (*shaker*) usados para excitar o cabos nos ensaios são apresentadas na Tabela 0.1.

Tabela 0.1.– Características dos excitadores eletrodinâmicos [8].

Propriedades			BANCADA A	BANCADA B
Marca/Modelo	–		<i>Labworks Inc. ET – 127</i>	Data Physics Inc. V400HG/DSA1- 2K
Força senoidal max., [0-pk]	[N]		2.225	4.600
Força randômica max., [rms]	[N]		1.557	2.558
Força de choque max.,[0-pk]	[N]		4.450	9.752
Pulso de choque	[μ .s]		50	
Deslocamento max., [pk-pk],	continuamente	25,4	25,4	25,4
	entre paradas	-	30,48	-
Velocidade max., [0-pk]	[mm/s]		3.556	8.100
Acelerações máximas [0-pk]	dirigida	90	100	90
	ressonante	-	150-	-
	pulso de choque	-	300-	-
Faixa de frequência DC	[kHz]		4,5	3

3.1.7 Sistema de Aquisição de Dados

Foi utilizado um aquisitor de dados fabricado pela Lynx Tecnologia, modelo ADS 2000 (

Figura 0.12), para captar sinais digitais e analógicos (de controle e monitoramento). O *software* de aquisição de dados e o *software* de controle da bancada acoplado a um microcomputador compõem o sistema de instrumentação responsáveis pela aquisição dos dados de todo o sistema

de instrumentação utilizado na bancada de testes. O aquisitor usado nos ensaios é composto por um módulo de aquisição de 16 canais de aquisição para captar sinais digitais e analógicos (de controle e monitoramento) [8].



Figura 0.12 – Sistema de Aquisição de Dados ADS-2000 -Lynx Tecnologia.

Por meio do ADS 2000 são aquisitados sinais de: i) temperatura; ii) extensômetros; iii) células de carga; iv) sensores de deslocamento; v) acelerômetros.

3.2 MATERIAIS

A seguir serão apresentadas as principais características técnicas dos corpos de prova empregados na pesquisa. Cabe ressaltar que cada ensaio foi realizado com amostras novas, tanto de cabo quanto de grampo, de forma a evitar qualquer tipo de influência química ou mecânica nos resultados.

3.2.1 Cabo Condutor

Nos ensaios foram utilizados diferentes cabos condutores, dos tipo CAA (cabos de alumínio com alma de aço), CAL (cabos de alumínio liga) e Aero-Z de alma de aço e compósita (os fios de alumínio são em forma de 'Z', que são empregados em linhas de transmissão, os quais serão tratados nesse texto segundo a nomenclatura descrita na Tabela 0.2.

Tabela 0.2– Características dos cabos condutores (NEXANS)³ [19].

Condutor	Bitola MCM	Encordoamento (nº fios)		Carga Ruptura [kgf]
		Alumínio	Aço	
CAA - A	397,5	26	7	7394
CAA - B	636	26	7	11427
CAL - A	900	37	-	13421
CAL - B	1055	61	-	15490
Aero-Z - A	-	26	7	6700
Aero-Z - B	-	26	-	10705

Os condutores são encordoados helicoidalmente e dispostos em camadas de fios de alumínio (que se destinam a transmissão de energia), as quais são enroladas em sentido contrário em relação a camada anterior. Esses condutores podem ou não apresentar um núcleo ou alma, cuja função é de sustentação mecânica. Tal alma pode ser de material compósito ou de fios de aço. Os cabos no Brasil atendem as especificações da norma ABNT NBR7270/88.

A Figura 0.13 ilustra os diferentes tipos de cabos condutores utilizados na pesquisa. As Figura 0.13 (a) e (b) são exemplos de cabos condutores do tipo CAA, que apresentam alma de aço (7 fios) e duas camadas de fios de alumínio, totalizando 26 fios, sendo 16 na camada mais externa e 10 na camada interna. O que difere esses condutores é o diâmetro de cada fio de alumínio, o qual é maior no condutor da Figura 0.13 (b). A Figura 0.13 (c) representa os condutores do tipo CAL (ou AAC), nos quais todas as camadas são compostas de fios de alumínio da liga 6201. Já a Figura 0.13 (d) apresenta um cabo do tipo Aero-Z com alma de aço, no entanto, existem outros tipos de alma, como as formadas a partir de compósitos.

³ As amostras ensaiadas foram fornecidas pela Nexans.

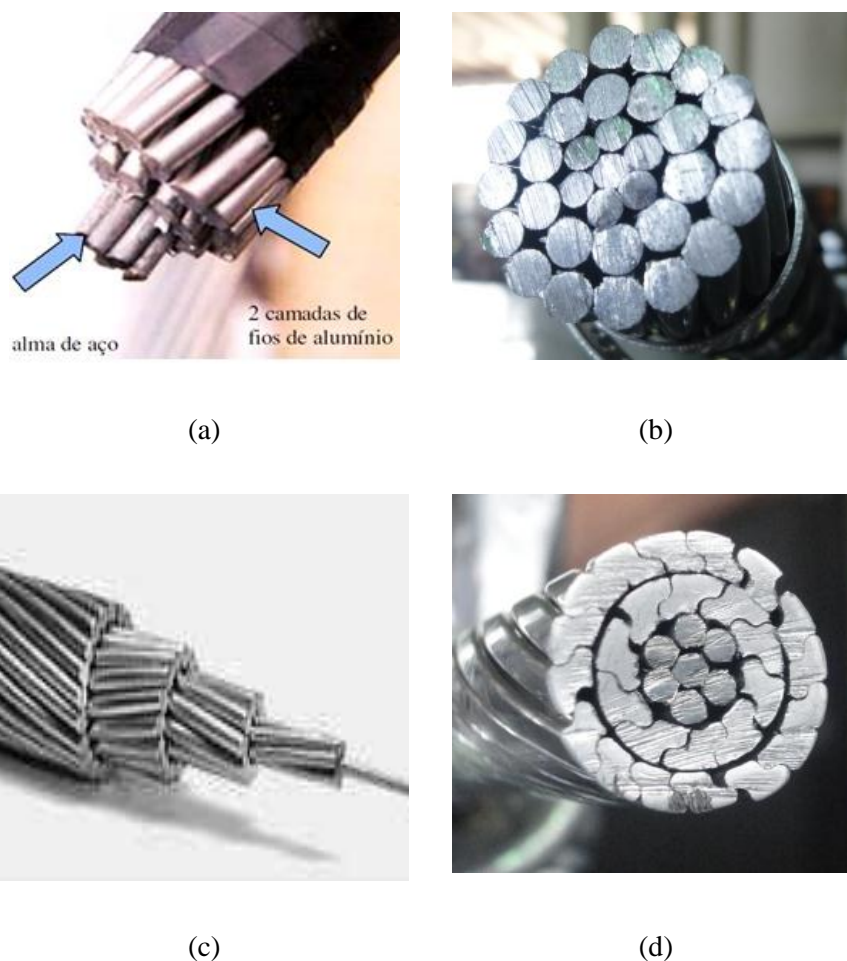


Figura 0.13 – (a) Vista em corte e esquemático da seção do cabo Ibis 397,5 MCM; (b) Vista em corte e esquemático da seção do cabo Grosbeak; (c) Vista em corte e esquemática do cabo CAL; (d) Vista em corte e esquemático da seção do cabo Aero-Z.

A

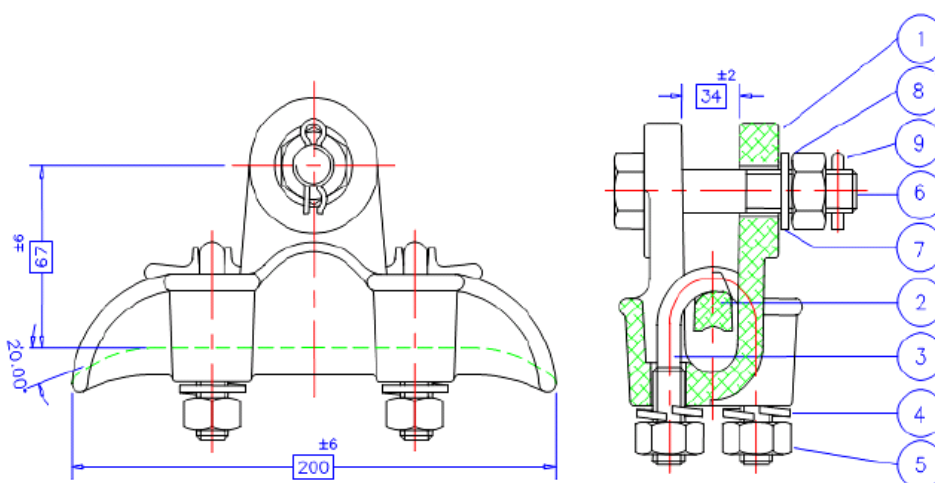
Tabela 0.3 apresenta as propriedades mecânicas dos fios de alumínio que compõem os cabos condutores de energia elétrica que foram objeto de estudo neste trabalho.

Tabela 0.3 – Definição das condições de ensaio [9].

Propriedades Físicas e Mecânicas	Unidade	Valor
Coeficiente de Poisson	-	0,33
Densidade	<i>Kg/m³</i>	2705
Dureza Brinell	-	50
Elongação na Quebra (Min)	%	1,5(min)
Limite de escoamento	<i>MPa</i>	165
Limite de Resistência à Tração	<i>MPa</i>	186
Módulo de Elasticidade	<i>GPa</i>	68,9
Resistência a Fadiga para 5x10 ⁸ Ciclos	<i>MPa</i>	48,3

3.2.2 Grampo de Suspensão

O grampo de suspensão é o elemento de ligação entre o cabo condutor e os isoladores da linha de transmissão. O grampo utilizado na realização dos ensaios foi o monoarticulado, fornecido pela Forjasul. Consiste em uma peça composta por duas partes principais, o corpo e tampa (ou telha), que são feitos de liga de alumínio de elevada resistência mecânica, não magnética e muito resistente à corrosão, de elementos ferrosos de aço carbono, zincado por imersão a quente, conforme NBR 6323 e duas cupilhas (contrapino) que podem ser de latão duro, bronze ou aço inoxidável (Figura 0.14). Na fabricação do grampo de suspensão é usada a liga metálica SAE 305, que possui uma boa fluidez e com isso é usada na fundição de peças de geometrias complexas [34].



ITEM	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	QUANT.	DIMENSÕES
1	CORPO	LIGA DE ALUMÍNIO	1	
2	TELHA		1	
3	PARAFUSO "U"	AÇO CARBONO	2	1/2" W
4	ARRUELA DE PRESSÃO		4	
5	PORCA SEXTAVADA		4	1/2" W
6	PINO DE ARTICULAÇÃO		1	5/8" W X 100 mm
7	ARRUELA LISA		1	
8	PORCA SEXTAVADA		1	5/8" W
9	CONTRAPINO	AÇO INOXIDÁVEL	1	

Figura 0.14 – Geometria do grampo de suspensão monoarticulado Forjasul 55101/003.

O grampo de suspensão deve apresentar resistência ao escorregamento, cujos limites são determinados de acordo com o condutor de maior bitola para o qual seja projetado. A resistência é definida em função de um percentual da carga de ruptura do condutor, EDS, e deve estar entre 25% e 60. O grampo padrão possui superfície lisa e uniforme, não devendo apresentar arestas cortantes e a "boca" de saída deve ter ângulo máximo de 20° para evitar danos aos cabos. Os elementos da montagem cabo condutor/grampo de suspensão monoarticulado são ilustrada na Figura 0.15.



Figura 0.15 – Conjunto: cabo condutor/grampo de suspensão monoarticulado.

3.2.3 Extensometria

Tanto na avaliação da tensão média residual decorrente da variação da carga de esticamento, quanto na avaliação da fórmula de P-S foram utilizados procedimentos de extensometria.

Nos ensaios realizados foram empregados extensômetros (*strain gauges*) de resistência elétrica (ERE) coláveis que são próprios para alumínio, de modelo unidirecional simples e forma tradicional. Eles são da marca Excel Sensores, tem um fator de sensibilidade (*gauges factor*) de 2,13, e são do tipo PA-03-120BA-350L, seguindo a classificação ilustrada na Figura 0.16.

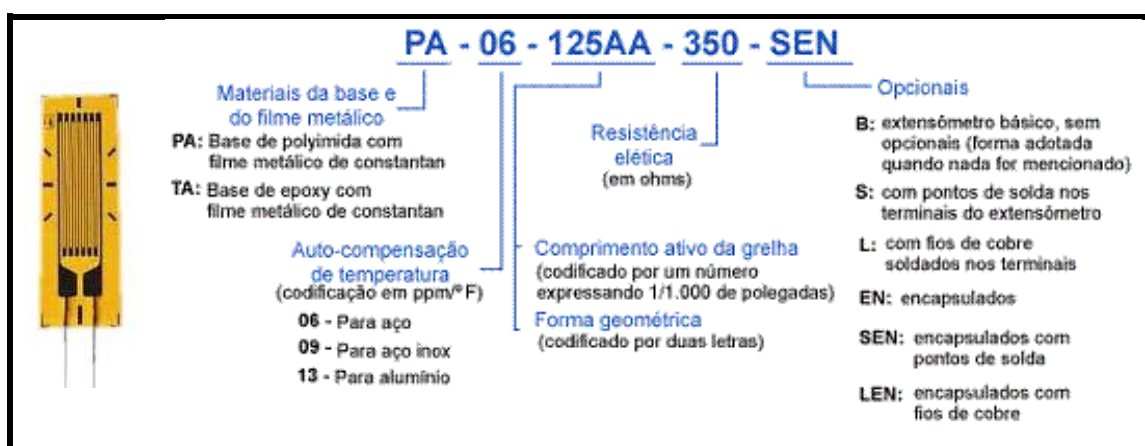


Figura 0.16 – Codificação utilizada para os extensômetros (Excel Sensores).

A ponte extensométrica utilizada foi configurada como $\frac{1}{4}$ de ponte no aquisitor ADS 2000, em um arranjo a dois fios e uma compensação interna em 350Ω e alimentação estabilizada de 7,5 VCC.

3.3 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA

Os corpos de prova foram retirados das bobinas do cabo condutor desprezando-se sempre o comprimento relativo à primeira espira e evitando torções e desdobramentos com raios de

curvaturas menores aos mínimos admissíveis, tendo como referência o raio da bobina. Todos os cuidados foram tomados para que as superfícies com as quais o cabo em lançamento tivesse contato não fossem de material metálico e não contivessem objetos cortantes, tais como pregos, parafusos, ou que pudessem danificar ou contaminar o mesmo.

A

Figura 0.17 mostra a retirada do cabo condutor da bobina, utilizando uma polia auxiliar como apoio da extremidade do cabo.



Figura 0.17 – Retirada do cabo condutor da bobina.

Para o posicionamento do corpo de prova na Bancada, utilizou-se como apoio, polias auxiliares que estavam posicionadas ao longo do vão do teste, conforme mostra a Figura 0.18.



Figura 0.18 – Polias auxiliares posicionadas ao longo do vão do teste.

3.3.1 Montagem do corpo de prova na bancada

Para a montagem dos corpos-de-prova foram seguidos os procedimentos descritos abaixo:

- i) Prender a gaiola do contrapeso a uma talha manual e colocar uma carga de cerca de 60 kg na gaiola (equivalente a uma tração no cabo de 6 kN). ver Figura 0.6;
- ii) Elevar a talha até que o braço de alcance a altura máxima;
- iii) Passar a amostra pelo grampo de ancoragem posicionado junto ao bloco de apoio do braço de alavanca (bloco fixo 3, conforme Figura 0.1 e Figura 0.3) e fixar o condutor apertando os parafusos do grampo de ancoragem suficiente para não ocorrer o escorregamento do condutor;
- iv) ajustar cuidadosamente a extremidade oposta da amostra sobre o grampo de suspensão no bloco móvel, evitar que a região do cabo que ficará em contato com o referido grampo seja danificada. Os parafusos de fixação do grampo de suspensão, nesta fase da montagem, deverão ser instalados, mas suas porcas de fixação não deverão ser apertadas;
- v) fixar a segunda extremidade a outro grampo de ancoragem de modo similar ao descrito no item iii;
- vi) prender o suporte do grampo de ancoragem à talha de alavanca (tifor) fixada na extremidade do vão (bloco fixo 1). ver Figura 0.1 e Figura 0.2;
- vii) tracionar o corpo de prova utilizando a talha de alavanca, monitorando o valor da carga de tração por meio da célula de carga posicionada entre o braço de alavanca e o grampo de ancoragem até atingir cerca de 80% da tração correspondente à eds definida para o teste. a célula de carga registra o valor e este aparece no visor digital. ver Figura 0.3b;
- viii) aliviar a talha na outra extremidade (item ii), de modo que a carga do contrapeso seja aplicada à amostra, e completar a carga na gaiola do contrapeso com anilhas adicionais até que atingir 150% da tração correspondente à eds definida para o teste;
- ix) retirar as polias auxiliares posicionadas ao longo do vão do teste (esse procedimento é realizado no procedimento experimental da avaliação da fórmula de p-s, seção 3.4);
- x) deixar a amostra por 24 horas sob ação da carga de acomodação (150% eds), de modo a acelerar o efeito de fluência (creep), evitando variações na eds durante a execução do ensaio;
- xi) após acomodação, retirar parte das anilhas até que a carga de esticamento registrada pela célula de carga atinja o valor da eds prevista para o ensaio;
- xii) fixar o grampo de suspensão por meio da colocação das arruelas de pressão e porcas e ajustar o torque aplicado às porcas de fixação no grampo de suspensão em 50 Nm, aferindo o valor por meio de um torquímetro (esse procedimento é realizado no procedimento experimental da avaliação da fórmula de P-S, seção 3.4);
- xiii) fixar o dispositivo de conexão entre excitador eletromecânico (shaker) e corpo de prova (haste ou dispositivo de alinhamento). neste ponto deve ser fixado um acelerômetro, no ponto de

conexão ao cabo, para monitoramento de deslocamento, velocidade, aceleração e frequência de excitação do sistema (esse procedimento é realizado no procedimento experimental da avaliação da fórmula de p-s, seção 3.4). ver Figura 0.11;

xiv) fixar um acelerômetro, no ponto 89 mm a partir do último ponto de contato entre cabo e grampo de suspensão, por meio de uma braçadeira, para obter o deslocamento Y_B e realizar o controle durante o ensaio (esse procedimento é realizado no procedimento experimental da avaliação da fórmula de P-S, seção 3.4).

3.4 AVALIAÇÃO DA FÓRMULA DE POFFENBERGER-SWART

O procedimento de extensometria neste trabalho é aplicado para validar e determinar a abrangência e limitações da equação de Poffenberger-Swart que é extensivamente utilizada para calcular a tensão nominal na zona de falha.

3.4.1 Planejamento do Experimento

Para avaliar a tensão flexural nominal a amostra, submetida a 20% de EDS, foi instrumentada com extensômetros colados nos fios da camada mais externa do condutor no UPC para, por meio da aplicação da Lei de Hooke, expressa pela equação **(0.1)**, estabelecer uma correlação entre a deflexão pico a pico do cabo no ponto padrão (89 mm do último ponto de contato do conjunto cabo/grampo) e a amplitude de tensão nominal no último ponto de contato cabo/grampo.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (0.1)$$

Os extensômetros têm o princípio de funcionamento baseado na variação de resistência que ocorre em um fio quando sua seção transversal é alterada e fornecem a leitura direta da deformação (ε) sofrida no ponto do fio instrumentado no condutor.

Onde E é o módulo de elasticidade (Módulo de Young) do fio de alumínio no qual o extensômetro é colado. O princípio de funcionamento as relações matemáticas da extensometria, bem como o foco da aplicação em condutores são apresentados no Anexo B.

Considerando as tensões geradas pela imposição de carregamentos dinâmicos (conforme ilustra a Figura 0.19), avaliou-se a resposta da amostra quando submetida a diferentes amplitudes de deslocamento Y_B , no ponto 89 mm. De acordo com Fadel, 2010, verificou-se que os resultados da análise estática corroboram com os resultados dinâmicos e, portanto, não é necessário repetir os ensaios de carregamentos estáticos.

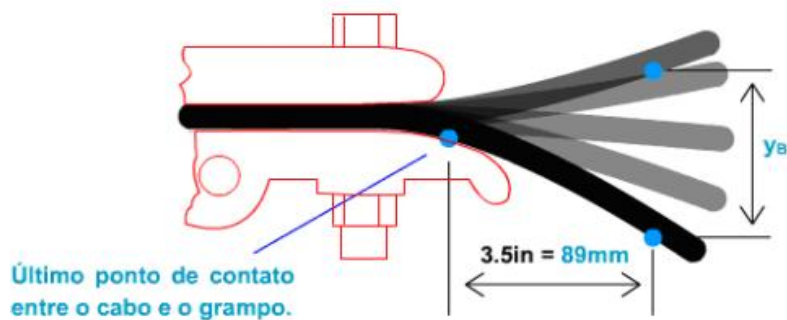


Figura 0.19 – Amplitude de deslocamento, Y_B .

Os experimentos foram realizados aplicando seis diferentes níveis de amplitude de deslocamento pico-a-pico, Y_B , de acordo com a Tabela 0.4.

Tabela 0.4– Planejamento dos ensaios dinâmicos para avaliação da Fórmula P-S.

Y_B [mm]	<i>20% EDS</i> <i>frequência</i> <i>na faixa</i>
0,2	
0,4	
0,6	15-30Hz
0,8	
1,0	
1,2	

3.4.2 Preparo da Amostra

A amostra do condutor posicionada na bancada com vão ativo de 41,5 m conforme os itens 3.1.1 e 3.3 e 3.3.1, em seguida ela é submetida a uma carga de tracionamento equivalente à EDS de 20% (tensão de base) e então instrumentada com extensômetros posicionados como mostra a Figura 0.20. Três extensômetros foram colados na linha do UPC: um no fio de topo do cabo e outros dois em cada fio adjacente, à esquerda e à direita do ERE de topo.

O processo de extensometria consiste em fixar o ERE à peça e ligá-lo ao aquisitor ADS 2000 formando uma ponte de Wheatstone para calibrá-lo e fazer as medições. A média da leitura dos três extensômetros de topo será usada para aferir a equação de P-S.

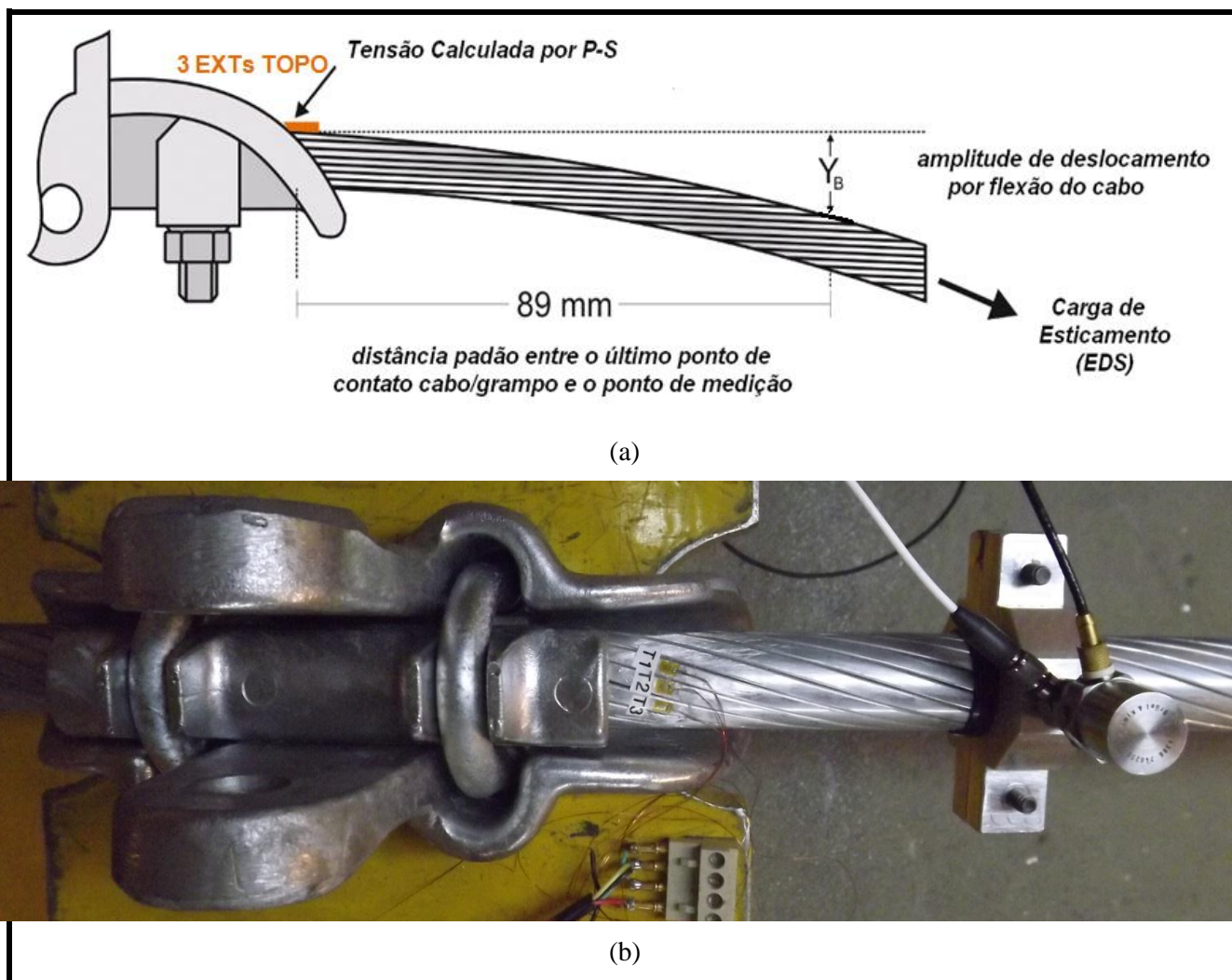


Figura 0.20 – (a) Esquemático do posicionamento dos extensômetros na região do grampo de suspensão (adaptada de [9]); (b) Posicionamento dos extensômetros no cabo Aero-Z - B em relação à boca do grampo.

Foi adotada a mesma disposição dos extensômetros (Figura 0.20) para todos os cabos condutores estudados nesse trabalho: CAA – A; CAA – B; Aero-Z – A; Aero-Z – B; CAL - A e CAL - B.

O Anexo B apresenta os procedimentos de preparo da amostra para a realização da extensometria.

3.4.3 Procedimento Experimental

Os testes foram realizados em todos os condutores relacionados na Tabela 0.2 com as amostras montadas num vão de 41,5 m, sujeitas a carregamentos equivalentes a EDS 20% e amplitudes dinâmicas conforme as condições descritas na Tabela 0.4. As amostras encontravam-se presas no grampo de suspensão com um torque de aperto nos parafusos de 50 N.m.

3.4.3.1 Testes Dinâmicos

Uma vez que a bancada experimental é ressonante a realização dos ensaios consiste de dois procedimentos principais: (i) Sweep ou varredura para determinação das frequências de ressonância do condutor, e, (ii) Aplicação do dwell ou parada em determinada frequência com amplitude de deslocamento no ponto 89 mm controlada. Esses procedimentos encontram-se descritos em detalhe no anexo A.

Os testes dinâmicos foram realizados em uma faixa de frequência de 15 a 30 Hz, escolhida próxima ao valor de ressonância do condutor, após a varredura. Para sua condução o procedimento executado foi o *dwell* ou Parada em Frequência com Amplitude Y_B constante. O controle neste caso é deslocado do acelerômetro no *shaker* para o acelerômetro no ponto 89 mm, que é o oposto do controle da varredura.

Na condução de cada teste, uma vez estabilizada a parada na frequência – escolhida após varredura – e tendo selecionado a amplitude, foram feitas coletas de dados da leitura nos extensômetros com duração de 2 minutos para cada ensaio, a uma frequência de aquisição de 500 Hz.

3.5 OBTENÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL PROVOCADA PELA VARIAÇÃO NA EDS

Em fadiga, a tensão média tem forte influencia na vida do elemento. Para quantificar esse efeito existem expressões para a correção da resistência como os critérios de Goodman, Gerber e Soderberg. Entretanto, no caso dos cabos condutores, verifica-se que a tensão média varia com parâmetros como a carga de esticamento, ou a carga de aperto no grampo. Porém, não existem critérios estabelecidos para a determinação da redução da vida em fadiga em função desses parâmetros.

Segundo Fadel, 2010, a vida de um condutor quando submetido a uma carga de tração referente a 30% de EDS apresenta redução de cerca de 50% quando comparada aquela referente a uma EDS de 20%.

A finalidade desse estudo é quantificar a tensão residual no condutor em decorrência da variação na carga de esticamento (EDS). Nos ensaios realizados, a tensão foi medida por meio de extensometria e a EDS foi variada de 0 a 30%, em sentido crescente e decrescente da aplicação da carga, em amostras de condutores dos tipos CAA - A, Aero-Z - B e CAL - A (

Tabela 0.5).

Tabela 0.5 – Carga de esticamento em kgf para cada EDS aplicada nos condutores CAA - A, Aero-Z - B e CAL - A.

EDS [%]	Carga de Esticamento [kgf]		
	CAA - A	Aero-Z - B	CAL - A
0	0	0	0
5	370	535	775
10	740	1071	1549
15	1110	1606	2323
20	1480	2141	3098
25	1850	2676	3873
30	2220	3211	4647

3.5.1 Planejamento do Experimento

Para avaliar a variação na tensão média, a amostra foi instrumentada com extensômetros colados nos fios da camada mais externa do condutor a uma distância de dois metros do último ponto de contato para evitar influencia de tensões localizadas como a carga de aperto no grampo ou o regime de escorregamento nessa região.

O princípio de funcionamento desses extensômetros já foi apresentado na seção anterior (seção 3.3.1). A tensão média é encontrada a partir da Lei de Hooke (3.1), que correlaciona a deformação (ϵ) sofrida pelo fio de alumínio instrumentado e a tensão (σ).

A variação do carregamento foi obtida pelo ajuste de carga no titor/contrapesos e monitorada através da leitura da célula de carga e deu-se segundo duas etapas - fase 1: decrescente de 30 a 0% e fase 2: crescente de 0 a 30%. Em ambas as etapas o passo de variação adotado foi de 5% em um intervalo de tempo de 30 minutos, a fim de permitir a acomodação do condutor.

3.5.2 Preparo da amostra

A amostra de cabo é posicionada na bancada com vão ativo de 41,5m conforme descrito no item 3.1.1 e tracionada de acordo com a seção 3.1.2.

Para a montagem dos corpos-de-prova foram seguidos os procedimentos descritos abaixo:

1. Foi fixada uma das extremidades do corpo de prova no grampo de ancoragem do bloco fixo 3 (Figura 3.10);

2. O corpo de prova foi colocado dentro do grampo de suspensão (montado sobre o bloco móvel), tomando-se o cuidado de não danificar a região do cabo que ficará em contato com o referido grampo (Figura 3.12). Os parafusos de fixação do grampo de suspensão, nesta fase da montagem, deverão ser instalados, mas suas porcas de fixação não deverão ser apertadas;
3. A outra extremidade do corpo de prova foi fixada no grampo de ancoragem localizado no vão passivo junto ao bloco de ancoragem -bloco fixo 1 (Figura 0.3);
4. As polias auxiliares posicionadas ao longo do vão do teste foram mantidas;

Em seguida, a amostra é instrumentada com extensômetros posicionados conforme a Figura 0.21, distantes dois metros do último ponto de contato entre cabo e grampo. Após a instrumentação a amostra é submetida a uma carga de tracionamento equivalente à 30%, e então suspensa por 24 horas com essa carga, com objetivo de evitar o efeito de fluência do cabo condutor durante o ensaio. Dados antes da acomodação da amostra do condutor e depois da acomodação são gravados.

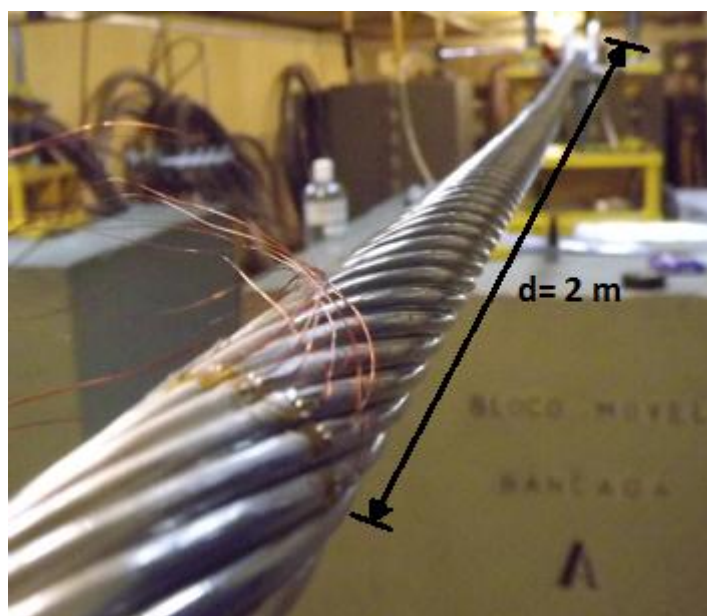


Figura 0.21 – Posicionamento dos extensômetros no cabo CAA – A distantes 2 metros do UPC.

Para o condutor CAA – A, que possui 16 fios de alumínio na camada mais externa, foram colados oito extensômetros na posição que dista dois metros do último ponto de contato. Esses extensômetros colados correspondem a metade dos fios da camada e são colados formando um semicírculo no cabo condutor. Já os condutores Aero-Z – B e o CAL – A possuem 18 fios de alumínio na camada mais externa, portanto, 9 extensômetros foram colados em cada cabo na posição de medição da tensão (dois metros do UPC), formando também um semicírculo, similar

ao que é apresentado na Figura 0.21. Os extensômetros foram numerados a partir do lado direito do cabo condutor, tomando como referência a vista para o grampo de suspensão.

A realização do procedimento de extensometria consiste em fixar o ERE à peça e ligá-lo a uma ponte de *Wheatstone* para então calibrá-lo e realizar as medições. Os procedimentos de preparo da amostra para a realização da extensometria é apresentado no Anexo B.

3.5.3 Procedimento Experimental

Os testes foram realizados com amostra posicionada em um vão de 41,5 m, sujeita a carregamentos de EDS variando de 0 a 30%.

Após a instrumentação com extensômetros, item 3.4.2, a seguinte sequência de eventos deve ser seguida para a realização dos testes:

1. Verificação dos extensômetros colados no condutor, conferindo se eles estão em pleno funcionamento;
2. Aplicação da carga de tração inicial, 30% da carga de ruptura do cabo. O corpo de prova é tracionado utilizando uma talha de alavanca e depois adicionando contrapesos ao braço de alavanca até que a carga indicada pela célula de carga atinja a carga de tração definida para o teste;
3. Registrar o valor de deformação indicado no aquisitor de dados em uma tabela do Excel (ou programa semelhante);
4. Deixar acomodar por 24 horas com 30% de EDS;
5. Após 24 horas, registrar no valor no aquisitor;
6. Aplicar uma nova carga de tração. A carga aplicada é 5% a menos da EDS utilizada no passo anterior. Para diminuir a carga de tração do cabo, parte dos contrapesos são retirados até que o valor da carga de tração no cabo atinja o valor desejado;
7. Registrar o valor de deformação indicado no aquisitor da nova carga;
8. Deixar o cabo acomodar por 30 minutos;
9. Registrar o valor da deformação indicado no ADS 2000.
10. Repetir os passos 6 ao 10, em que o ponto de parada é 0% de EDS para carga de esticamento.
11. Reiniciar a aplicação de carga no condutor, com aumento de 5% da EDS a cada 30 minutos até 30%;
12. A cada aumento de EDS deve-se registrar o valor da deformação indicado pelo Aquisitor de Dados, como nos passos 7 a 9;
13. Finalizar o teste;

14. Reproduzir os valores registrados em gráficos “Tensão média (σ) x EDS”. Deve-se diferenciar a sequência dos gráficos em ordem decrescente e crescente de EDS.

Este processo foi realizado para os cabos: CAA - A, Aero-Z – B e CAL – A.

3.6 PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA OBTENÇÃO DA CARGA DE APERTO

A carga de aperto no grampo de suspensão para fixação do condutor tem acentuada influência nas tensões localizadas na área de falha e deste modo é pré-fixada em 50 N.m e monitorada por quatro arruelas instrumentadas (*load washers*). Elas foram montadas junto às quatro porcas de aperto do grampo.

Com o objetivo de obter a carga de tração em cada parafuso em “U” da montagem cabo grampo foram realizados ensaios de medição das cargas axiais por meio de células de carga. A determinação da força de tração exercida pela porca no parafuso em “U” é fundamental para se conhecer a força com que a calha superior é empurrada sobre o cabo telha sobre e cabo. Esta carga está intimamente ligada às tensões de compressão entre os fios do condutor na região do último ponto de contato, causando uma interação de fretting bem mais intensa entre estes, chegando até mesmo a deformá-los plasticamente em muitos casos. Outro ponto avaliado durante estes experimentos foram às influências tanto da ordem de aperto dos parafusos quanto o acabamento superficial da rosca na distribuição de forças final no sistema montado. A seguir é apresentado o princípio de funcionamento das células de carga, *load washers*.

3.6.1 Carga Estática de Aperto

O outro esforço atuante sobre o conjunto é a força exercida pelo tracionamento dos parafusos em U exercido pelas porcas. Primeiramente deve-se calcular a força de tração exercida no parafuso em função do torque de aperto. Após isso elaborar um diagrama de corpo livre para identificação e quantificação da distribuição das forças em cada elemento do conjunto.

A equação 3.2 [36] o coeficiente de torque K que relaciona o torque de aperto, a força de tração no parafuso e o diâmetro do mesmo

$$K = \left[\left(\frac{d_m}{2d} \right) \left(\frac{\tan \lambda + f_{at} \sec \alpha}{l - f_{at} \tan \lambda \sec \alpha} \right) + 0,625 f_c \right] \quad (3.2)$$

Onde d_m é o diâmetro médio, l o avanço, λ o ângulo de avanço, f_{at} o coeficiente de atrito da rosca, f_c o coeficiente de atrito do colar, α é ângulo radial de rosca, e d é o diâmetro nominal.

Nota-se que a equação 3.3 [36] relaciona o torque e a força de tração:

$$F_i = \frac{T}{Kd} \quad (3.3)$$

A rosca do parafuso “U” utilizada na montagem é uma rosca padrão métrico M12, com as características mostradas na Tabela 0.6.

Tabela 0.6 – Dados da rosca do parafuso “U”.

Dado	Valor	Unidade
Rosca	M12	-
Diâmetro Nominal (d)	12	mm
Diâmetro Mínimo (d _{min})	10,441	mm
Avanço (l)	1,75	mm
Ângulo radial de rosca	60°	graus
Coefficiente de atrito da rosca, f_{at}	0,15	-
Coefficiente de atrito do colar, f_c	0,15	-
Torque aplicado	50	N.m

A partir dos dados da Tabela 0.6 e das Equações 3.2 e 3.3 encontrou-se $F_i = 16,0436 \text{ kN}$.

3.6.2 Célula de Carga - Load Washers (LWs)

Nos ensaios realizados para medir esforços axiais nos parafusos em U do conjunto foram utilizadas células de carga do tipo *load Washer* (LW), marca Interface, modelo LW2050-7.5K (Figura 0.22). A ponte de Wheatstone (Figura 0.23) foi configurada como ponte completa no aquisitor ADS 2000 em um arranjo com duas conexões, positivo e negativo, tanto para excitação quanto para o sinal de saída. A resistência da ponte é de 350 Ω e cada ramo e a tensão de alimentação estabilizada de 10 VCC, que garante correspondência mais próxima para calibração original realizada pelo fabricante. A capacidade de carga de ensaio suportada pela LW é de 33,36 kN (7500lbf), para a máxima sobrecarga de modo a evitar falha mecânica é de (11250lbf).



Figura 0.22- Foto da *Load Washer* utilizada.

Apesar de uma célula de carga funcionar não importando como ela é orientada, a montagem da correta é muito importante para garantir que a célula irá fornecer as leituras mais estáveis possíveis. As LWs possuem um sentido único de instalação para medição da carga aplicada.

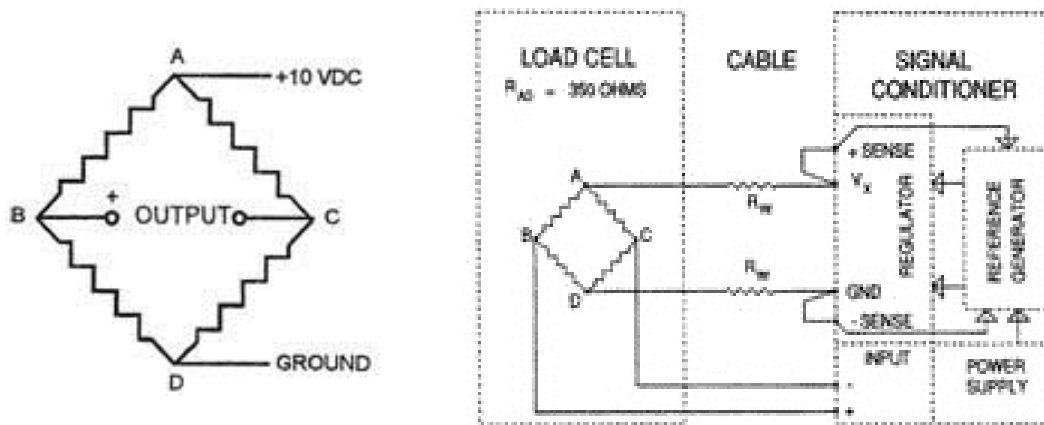


Figura 0.23- Ligação de sensor de ponte completa para célula de carga.

3.6.3 Planejamento do Experimento

Para avaliar a distribuição de cargas nos parafusos foram utilizadas células de carga (*load washer*) colocadas entre as porcas e a placa metálica de fixação do grampo, o qual foi montado com uma amostra de condutor Ibis juntamente com o conjunto já apresentado. A primeira configuração de montagem dos ensaios pode ser observada na

Figura 0.24

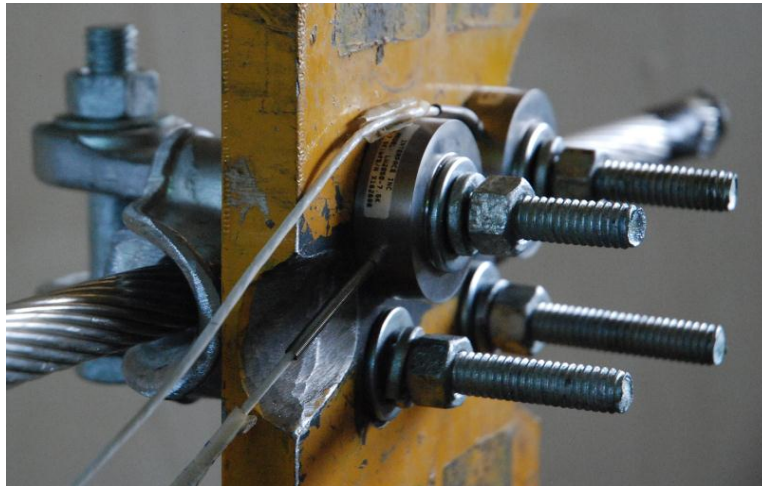


Figura 0.24 – Esquema de montagem das células de carga.

As células de carga são conectadas a um sistema de aquisição de dados, ADS 2000 da Lynx Tecnologia, e fazem a medição da força de compressão da porca ao ser puxada pelo parafuso em função do torque aplicado. Inicialmente as *Load Washers* foram calibradas utilizando a máquina de ensaios mecânicos MTS 810. As correlações entre os pontos de referencia e a curva de calibração variaram de 99,89% a 99,97 %. Um torquímetro digital da marca Techwerench modelo TECH2FRN100 com escala de leitura de 7 à 135 N.m foi utilizado para a aplicação do torque durante o aperto.

A partir de dificuldades de acomodação geométrica dos componentes de ensaio foram realizadas algumas variações nas configurações de montagem e utilização de acessórios que são descritos em detalhes ao longo desta seção. Com objetivo de melhor avaliar a relação entre toque na porca e tração axial no parafuso, foram propostos ensaios sucessivos variando-se o torque aplicado na porca, à ordem de aperto e a utilização de conjuntos virgens ou conjunto já utilizados anteriormente.

O primeiro ensaio realizado foi conduzido conforme o planejamento descrito na Tabela 3.7. A configuração da montagem foi a mesma mostrada na

Figura 0.26, devido às restrições geométricas não foi possível realizar o encaixe de quatro LW's na base do grampo de suspensão, assim, optou-se por utilizar apenas duas LW's e avaliar como seria o comportamento da distribuição de forças.

Tabela 0.7– Planejamento dos ensaios de aperto.

1ª Ensaio-Configuração de Montagem 1

Ordem de aperto	Torque aplicado (N.m)					
1-2-3-4 (Conjunto Novo)	10	20	30	40	50	60
1-2-3-4 (Conjunto Reutilizado)	10	20	30	40	50	60

2-1-4-3 (Conjunto Novo)	10	20	30	40	50	60
2-1-4-3 (Conjunto Reutilizado)	10	20	30	40	50	60
1-4-2-3 (Conjunto Novo)	10	20	30	40	50	60
1-4-2-3 (Conjunto Reutilizado)	10	20	30	40	50	60

Como será apresentado na análise de resultados (seção 4), os valores obtidos no ensaio acima descrito forneceram dados com grande dispersão para todas as sequências, implicando em baixa confiabilidade quanto a repetibilidade do ensaio. Esse comportamento parece estar relacionado à configuração de montagem. Assim, optou-se pela realização de uma nova montagem, capaz de incluir o monitoramento da carga de aperto de todos os parafusos. A configuração de montagem foi modificada para que as LWs tivessem um melhor assentamento da extremidade morta na base da placa e tivessem uma leitura mais estável, também foi criado um componente que permitiu a montagem das quatro LWs, ver Figura 0.28.

Nesta segunda etapa a variação do torque aplicado continuou a mesma, mas tanto as sequências de aperto quanto a quantidade de ensaios foram modificadas de modo a enriquecer os resultados. Inicialmente a ordem de aperto seguiu o sentido anti-horário iniciando sempre pela posição 1, ver Tabela 0.8. Posteriormente utilizou-se uma sequência de aperto em X, ordem 1-3-2-4, novamente iniciando-se sempre pela posição 1 do conjunto. Por fim, realizou-se novamente o aperto circular no sentido anti-horário, mas variando-se sempre a primeira porca a ser apertada ao fim de uma sequência de mesmo torque, ou seja, sempre se saltou uma porca após que o mesmo nível de torque de aperto fosse imposto a todas.

Tabela 0.8 - Planejamento de ensaio, montagem 2.

2ª Ensaio-Configuração de Montagem 2

Ordem de aperto	Torque aplicado (N.m)					
1-2-3-4 (Conjunto Novo)	10	20	30	40	50	60
1-2-3-4 (Conjunto 2º Aperto)	10	20	30	40	50	60
1-2-3-4 (Conjunto 3º Aperto)	10	20	30	40	50	60
1-3-2-4 (Conjunto Novo)	10	20	30	40	50	60
1-3-2-4 (Conjunto 2º Aperto)	10	20	30	40	50	60
1-3-2-4 (Conjunto 3º Aperto)	10	20	30	40	50	60
1-2-3-4/salta 1 (Conjunto Novo)	10	20	30	40	50	60

1-2-3-4/salta 1 (Conjunto 2° Aperto)	10	20	30	40	50	60
1-2-3-4/salta 1 (Conjunto 3° Aperto)	10	20	30	40	50	60

3.6.4 Preparo do Conjunto

O preparo para montagem do tipo 1 se iniciou pela separação de uma amostra do condutor CAA - A com aproximadamente meio metro de comprimento a ser introduzida no grampo de suspensão. Posteriormente fixou-se em uma morsa grande a placa metálica, semelhante encontrada no dispositivo fixado na face superior do bloco móvel que sustenta o grampo nos ensaios dinâmicos. Esta placa serve de base para a fixação do conjunto, a partir da sua fixação inicia-se a montagem do grampo fixando-se primeiramente as LWs com a extremidade morta encaixada na parte inferior da placa, seguida de uma arruela lisa de 1/2 polegada, uma arruela de pressão e a porca de fixação. A montagem do tipo 1 pode ser visualizada na Figura 0.25 e na Figura 0.26.

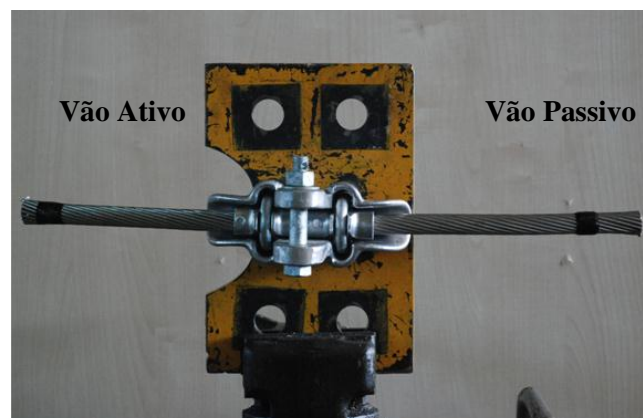


Figura 0.25 – Posicionamento do conjunto sobre a placa metálica.

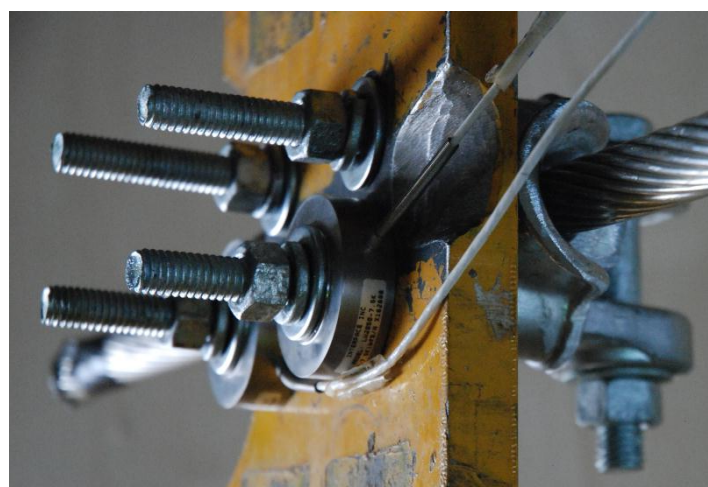


Figura 0.26 – Posicionamento dos elementos de montagem 1.

As seqüências de aperto seguiram uma convenção adotada na Tabela 0.7 na montagem 1 e na Tabela 0.8 para montagem 2. Como mencionado anteriormente, a numeração foi feita da parca inferior esquerda seguindo uma ordem circular anti-horária, ver Figura 0.27.

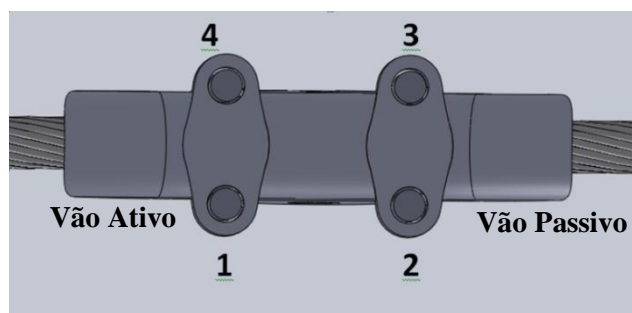


Figura 0.27 – Convenção da numeração adotada.

O preparo para montagem do tipo 2 se iniciou da mesma maneira que a anterior, com a variação da adoção do dispositivo para auxiliar na montagem das quatro LWs juntas. O componente criado funciona como calço de elevação do apoio de uma das LWs em cada lado, ver Figura 0.28(a). Com a adoção deste componente a montagem teve a configuração mostrada na Figura 0.28 (b).



(a)



(b)

Figura 0.28 – Montagem 2 - (a) calço da LW, (b) montagem com as quatro LWs.

3.6.5 Procedimento Experimental

Os testes foram realizados variando-se o torque de aperto numa faixa de 10 a 60 N.m, utilizando passos de 10 N.m. O procedimento detalhado de cada seqüência é descrito abaixo:

1. Montar o conjunto com parafusos, porcas e arruelas novas, verificando o alinhamento de todos os componentes, bem como a posição das LWs para que a esta seja apoiada no sentido correto;
2. Abrir o programa do aqisitor de dados Aqdados, iniciar o procedimento de balanceamento da ponte da célula de carga para que a força lida seja próxima de zero;
3. Definir a seqüência de aperto a ser realizada, iniciar a aplicação de cargas;

4. Certificar-se que todas as porcas estejam sobre o mesmo nível de aperto e realizar a leitura da carga medida;
5. Realizar o próximo passo de carga de aperto, respeitando a sequência pré-definida e realizar nova leitura;
6. Ao final do último passo de carregamento, retirar toda a carga reiniciar a sequência de aplicação de carga para se medir o segundo aperto;
7. Seguir os procedimentos iii ao vi novamente até o fim do ensaio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no procedimento experimental utilizado na investigação das tensões nominais na região da montagem cabo/grampo. Além do estudo do efeito da tensão média em cabos condutores e a sequência da carga de aperto.

A sequência da análise é inicializada com a discussão dos dados obtidos nos ensaios de extensometria para avaliar a Fórmula de Poffenberger-Swart que correlaciona a amplitude de vibração à tensão nominal na região de maior concentração de falhas mecânicas em condutores (último ponto de contato do conjunto cabo/grampo) Figura 0.20. Na sequência discute-se o efeito da tensão residual média em cabos condutores devido à variação da carga de tracionamento (EDS). Por fim, é conduzida a discussão da influência da sequência de aplicação da carga de aperto no grampo de suspensão para fixação do cabo condutor (Figura 0.28).

As análises e discussão dos resultados experimentalmente são elaboradas a partir dos estudos contidos na literatura, já apresentados nos capítulos iniciais. As condições particulares adotadas na condução dos ensaios foram consideradas no que diz respeito aos materiais e métodos descritos no capítulo anterior.

4.1 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DA FÓRMULA DE P-S

A Figura 0.20 – descreve a disposição dos extensômetros no cabo condutor, cujos registros, são transformados em tensões nominais pela Lei de Hooke. Essas tensões são comparadas às calculadas pela Fórmula de P-S, a qual, como já descrito em na seção 2.4 deste trabalho, calcula uma tensão nominal no fio de alumínio da camada mais externa do cabo no UPC.

4.1.1 Resultados para o Carregamento Dinâmico

Serão apresentados a seguir os resultados da extensometria sob condição de carregamento dinâmico, para os quais foi avaliado o efeito da amplitude de excitação em uma mesma faixa de frequência (15 a 30 Hz) e EDS (20%) nos seis tipos de condutores avaliados (CAA – A; CAA – B; Aero-Z – A; Aero-Z – B; CAL - A e CAL - B), Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Carga de esticamento com EDS de 20% dos condutores avaliados.

Condutores	Carga de Esticamento [kgf] (EDS a 20%)
CAA - A	1480
CAA - B	2250
Aero-Z - A	1340
Aero-Z - B	2141
CAL - A	3098
CAL - B	2683

Para cada amplitude de vibração Y_B os gráficos apresentados a seguir (

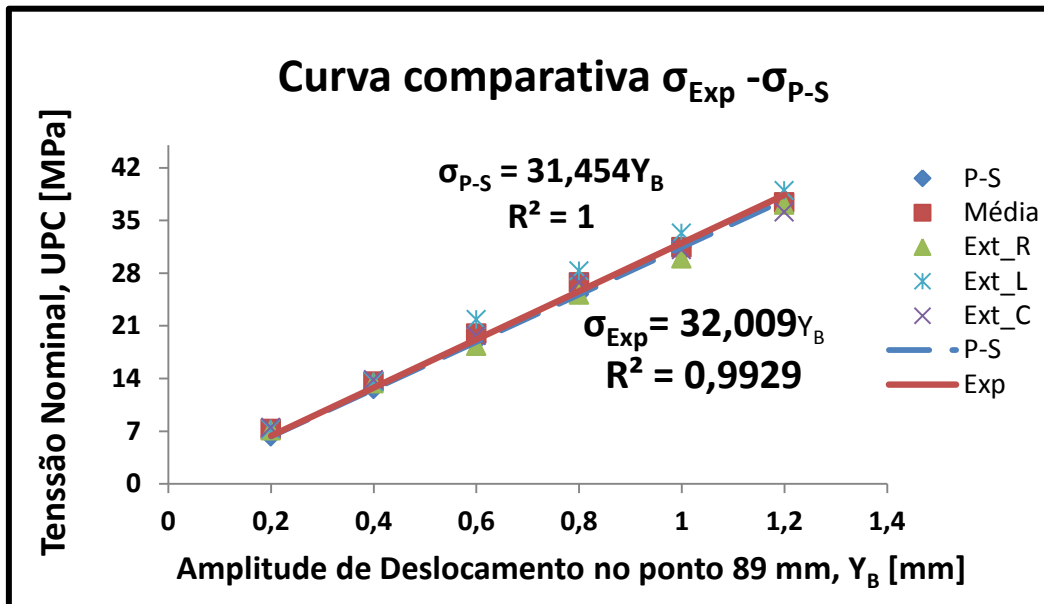


Figura 4.1 e Figura 4.6), contêm a tensão nominal experimental medida por cada extensômetro, a tensão calculada pela fórmula de P-S e a média dos valores registrados pelos três extensômetros. As duas curvas através das quais far-se-a a comparação entre os valores teóricos e os experimentais são obtidas pelo ajuste linear dos pontos calculados por P-S e da média dos extensômetros, respectivamente.

Os gráficos apresentados nas figuras a seguir apresentam no eixo das abscissas a deflexão pico a pico, Y_B , imposta no ponto 89 mm, e no eixo das ordenadas, a tensão nominal 0-pico, experimental, σ_{exp} , e aquela calculada pela fórmula de P-S, σ_{P-S} .

A partir da análise do gráfico, representado na

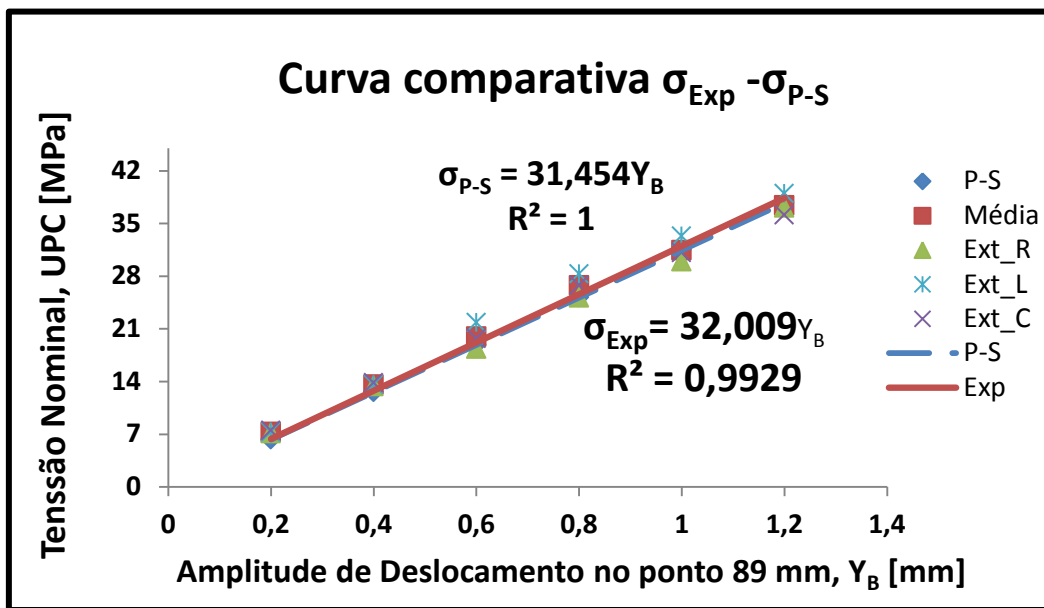


Figura 4.1, pode-se observar que a dispersão entre os pontos calculados por P-S e experimentais tende a aumentar à medida que a amplitude de deflexão aumenta, este comportamento será verificado para os demais condutores e parece dever-se à variação na rigidez, uma vez que a expressão de P-S, considera a rigidez como a soma de um feixe paralelo dos fios individuais e com o aumento da amplitude ocorre um aumento no contato e um maior escorregamento entre os fios. Há que se verificar ainda o impacto do aumento do diâmetro dos fios no cálculo da constante de Poffenberger-Swart. O extensômetro do centro (Ext_C) representa melhor a média dos valores experimentais, a partir do que pode se inferir que a utilização de um único extensômetro no topo fornecera uma medida experimental confiável. Verifica-se que os valores experimentais e teóricos (P-S) apresentam uma boa concordância, ao comparar as duas curvas, as quais estão praticamente sobrepostas.

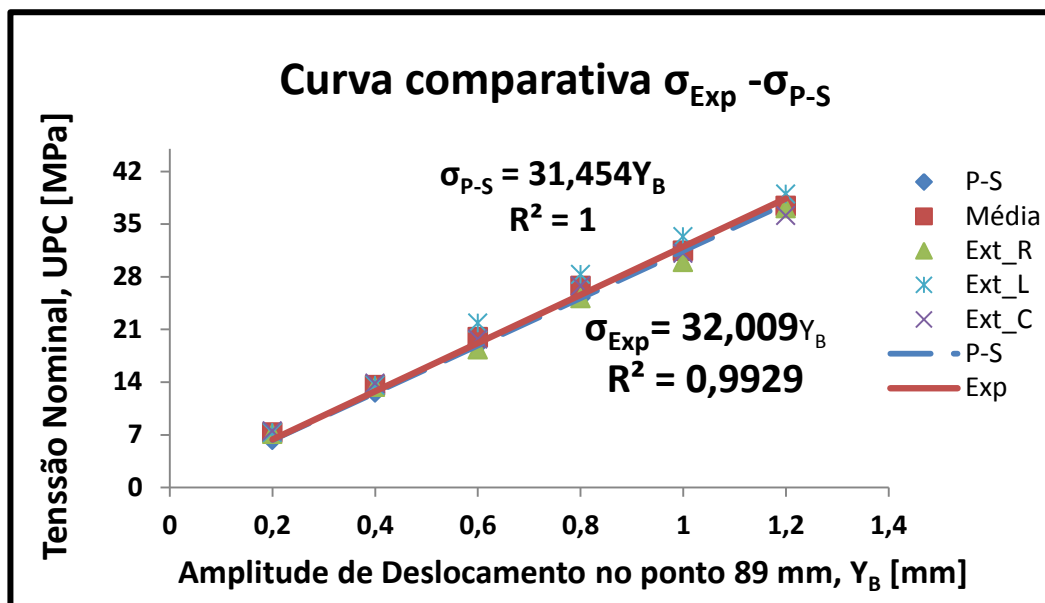


Figura 4.1 – Gráfico com as curvas comparativas $\sigma_{Exp}-\sigma_{P-S}$ do condutor tipo CAA – A, além da representação dos valores das tensões de cada extensômetros.

A partir do gráfico, representado na Figura 4.2, pode-se observar que a dispersão entre os pontos calculados por P-S e experimentais tende a aumentar à medida que a amplitude de deslocamento aumenta, o extensômetro da esquerda (Ext_L) representa melhor a média dos valores experimentais.

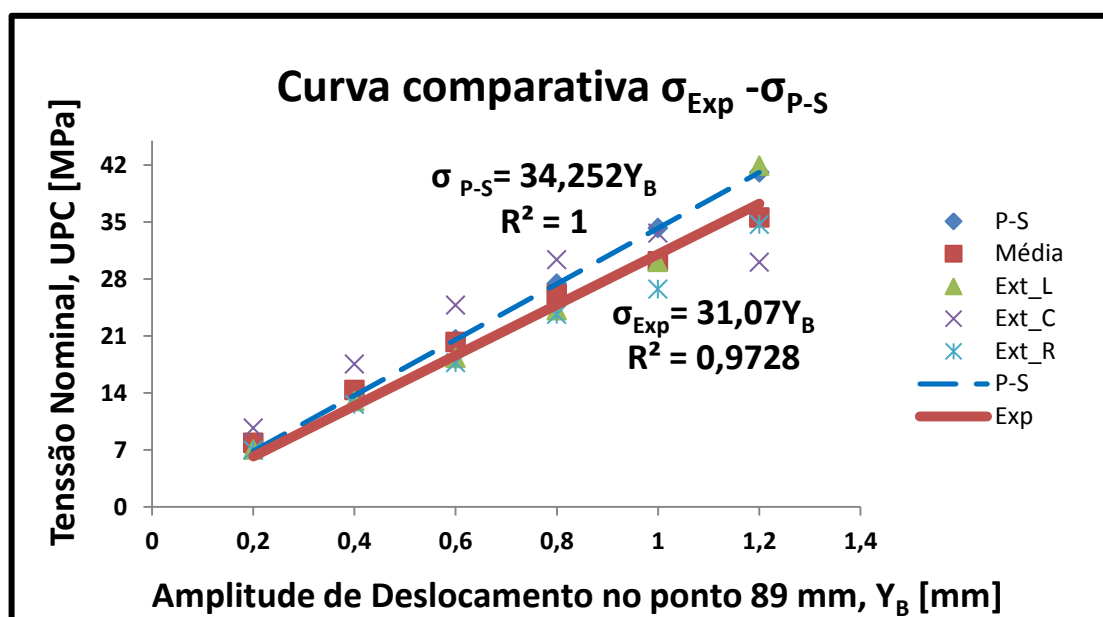


Figura 4.2 – Gráfico com as curvas comparativas $\sigma_{Exp}-\sigma_{P-S}$ do condutor tipo CAA – B, além da representação dos valores das tensões de cada extensômetros.

Pode se inferir que a mudança no comportamento do Grosbeak (25,15mm) em relação ao Ibis (19,88mm) decorre do diâmetro nominal de cada cabo. Com um diâmetro maior a posição do centro no topo do condutor passa a ser mais bem representado por dois ou três extensômetros. Esse comportamento é corroborado com o gráfico do cabo CAL 900 MCM de diâmetro 27,72mm (Figura 4.5). Verifica-se que os valores experimentais e teóricos (P-S) apresentam uma boa concordância, ao comparar as duas curvas, as quais estão praticamente sobrepostas.

Para os condutores tipo Aero-Z não foi possível calcular a tensão por meio da fórmula de P-S, uma vez que os dados referentes à geometria (no caso do Aero-Z com alma de aço e do Aero-Z com alma de compósito) e da rigidez da alma de compósito não foram fornecidos pelo

fabricante. Deste modo, os gráficos apresentados nas

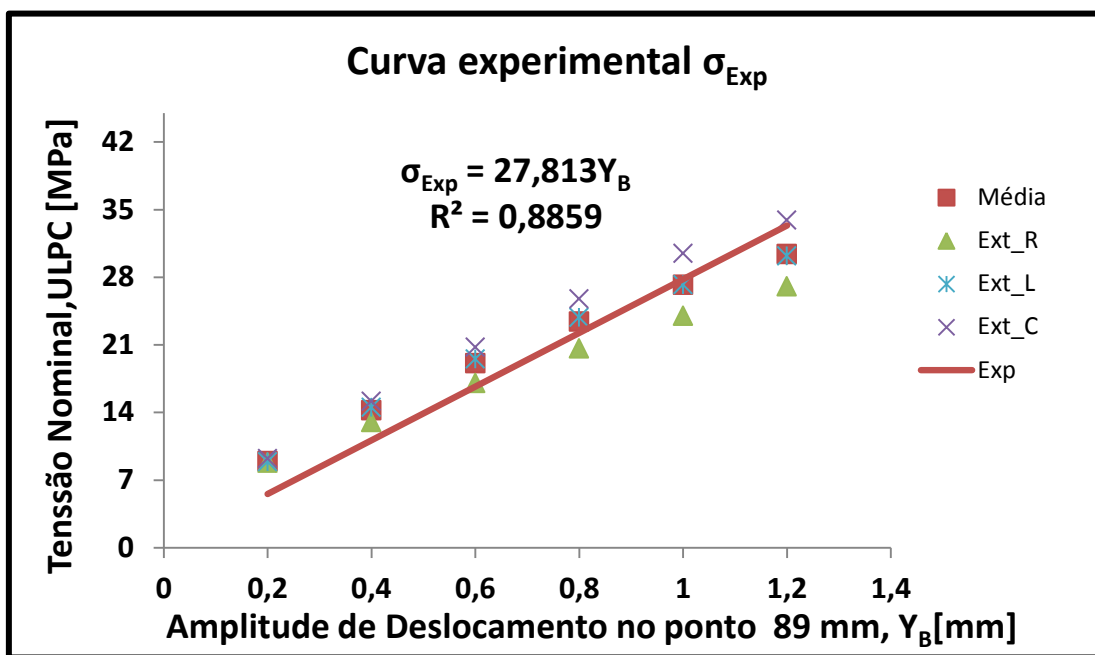


Figura 4.3 e

Figura 4.4, referentes aos cabos Aero-Z, não apresentam a curva comparativa de P-S, representando somente a curva proveniente da média dos três extensômetros de topo.

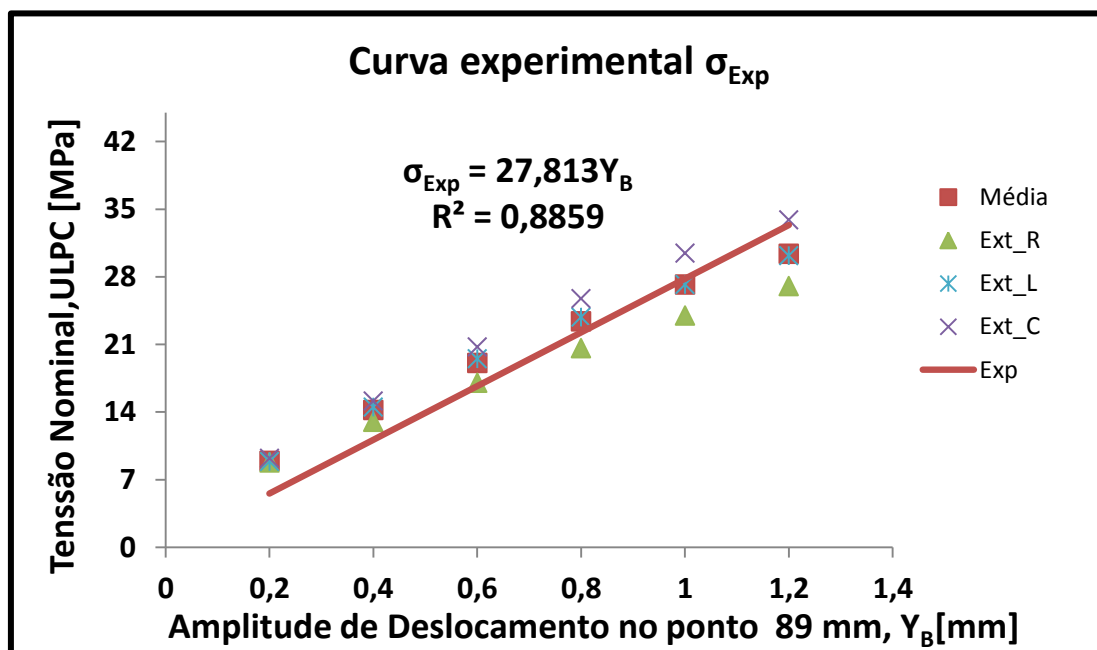


Figura 4.3 – Gráfico com a curva σ_{Exp} do condutor tipo Aero-Z – A, além da representação dos valores das tensões de cada extensômetros.

A dispersão das tensões é acentuada à medida que a amplitude de deslocamento pico a pico é aumentada para o Aero-Z – A. Já as tensões experimentais do condutor Aero-Z – B são mais dispersas (Figura 4.4), isso pode ocorrer devido ao maior diâmetro, quando comparado ao Aero-

Z – A, a alma compósita (fibra de carbono), e o contato entre os fios, que são na forma de Z, possuindo um maior encaixe um no outro.

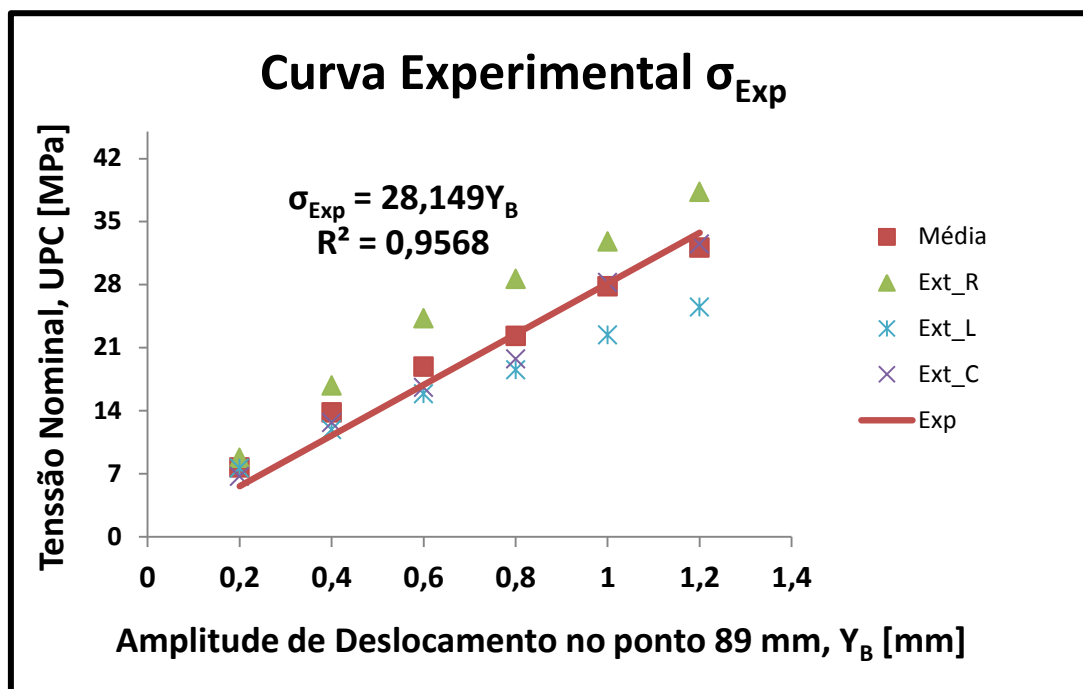


Figura 4.4 – Gráfico com a curva σ_{Exp} do condutor tipo Aero-Z – B, além da representação dos valores das tensões de cada extensômetros.

A partir da curva, representado na Figura 4.5, pode-se observar que a dispersão entre os pontos calculados por P-S e experimentais tende a aumentar à medida que a amplitude de deslocamento aumenta, o extensômetro da esquerda (Ext_L) representa melhor a média dos valores experimentais, neste caso já não se pode utilizar um único extensômetro para calcular a tensão nominal experimental do cabo, aproximando ao valor teórico.

Como dito anteriormente, as amplitudes de deslocamento deveriam ser de 0,2 a 1,2 mm, mas o cabo tipo CAL – A não ficou estável na amplitude de 1,2 mm. Isso pode ter ocorrido devido à mudança dos controladores no LabCabos – houve uma dificuldade de controlar os testes com a atualização dos controles, principalmente para condutores de diâmetros maiores, além da dificuldade de alinhar o cabo na bancada. A mudança dos controladores pode ser justificado quando compara as Figura 4.5 e Figura 4.6, uma vez que o cabo do tipo CAL – B (Figura 4.6) foi testado com o controlador “antigo” sem atualização do software e alcançou amplitudes de deslocamento acima de 1,2 mm mesmo para o condutor que possui um diâmetro maior que o CAL – A. Para o condutor CAL – A, verifica-se que os valores experimentais e teóricos (P-S) apresentam uma boa concordância, ao comparar as duas curvas, as quais estão próximas.

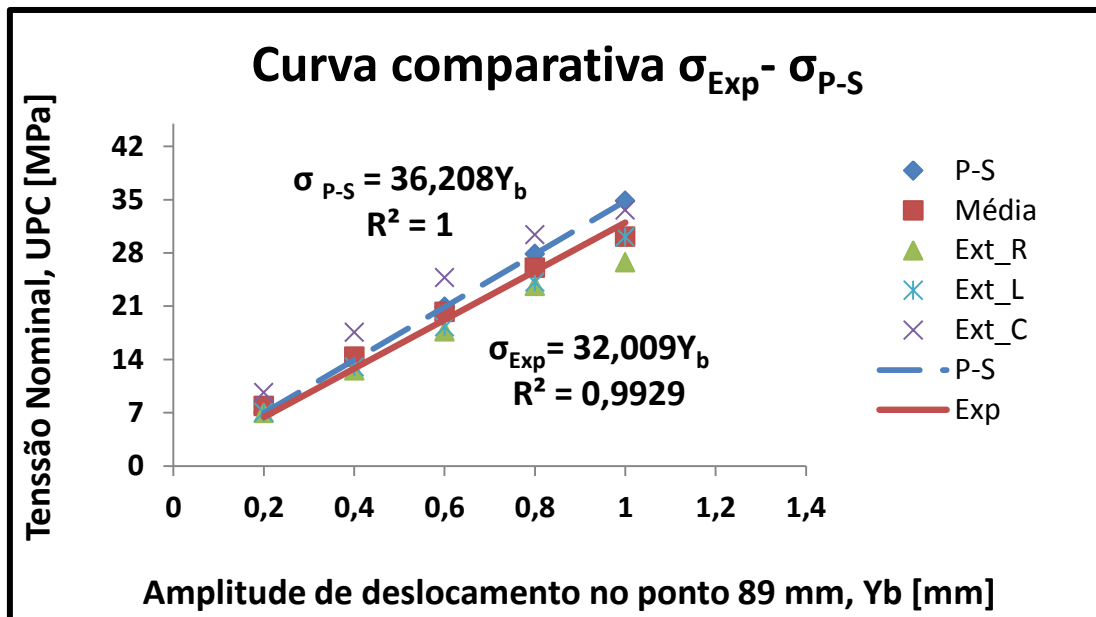


Figura 4.5 – Gráfico com as curvas comparativas $\sigma_{Exp} - \sigma_{P-S}$ do condutor tipo CAL – A, além da representação dos valores das tensões de cada extensômetros.

Para o condutor do tipo CAL – B, as amplitudes de deslocamento testadas foram diferentes das aplicadas aos demais condutores variando de 0,79 mm a 1,39 mm. Na Figura 4.6 é observado que os dados experimentais estão dispersos e a curva experimental (média dos três extensômetros) está afastada da curva obtida a partir dos valores teóricos (Poffenberger-Swart) de tensão. Este afastamento do valor experimental pode ser justificado pelo diâmetro nominal do condutor, que é de 31,5mm, aproximadamente, uma vez que a fórmula de P-S, além de não considerar a interação (contato) entre os fios, não considera o diâmetro externo (bitola) do condutor, apenas os diâmetros dos fios.

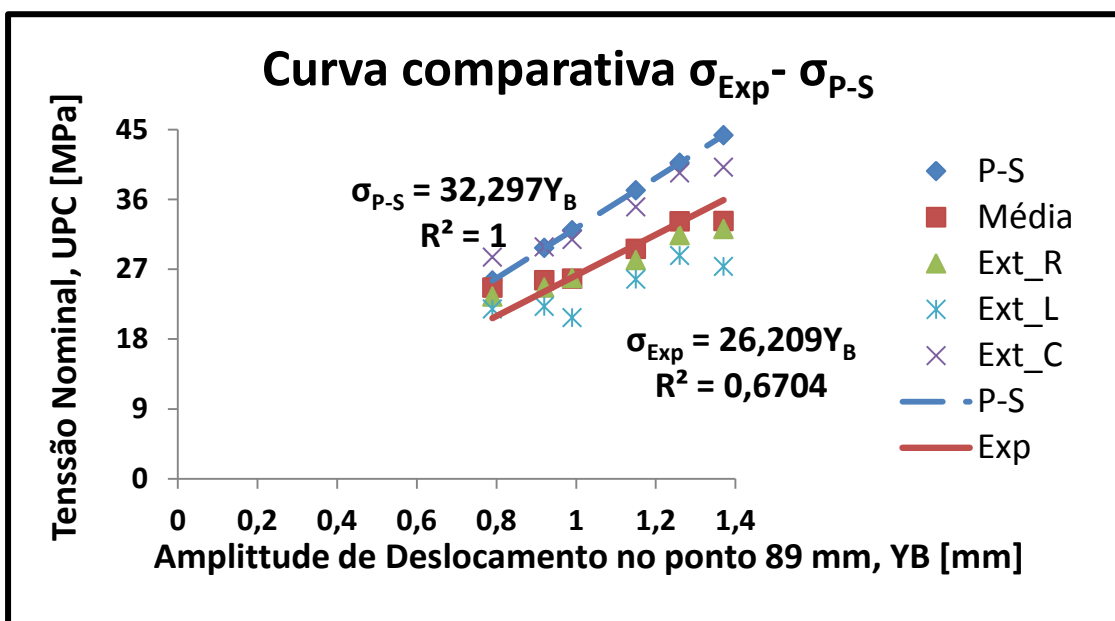


Figura 4.6 – Gráfico com as curvas comparativas $\sigma_{Exp} - \sigma_{P-S}$ do condutor tipo CAL – B, além da representação dos valores das tensões de cada extensômetros.

4.2 OBTENÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL PROVOCADA PELA VARIAÇÃO NA EDS

A Figura 4.7 descreve a disposição dos extensômetros no cabo condutor CAA - A, cujos registros, são transformados em tensões nominais pela Lei de Hooke. Essas tensões são plotadas em gráficos em função da EDS imposta ao cabo condutor. Os extensômetros colados nos demais cabos (Aero-Z - B e CAL - A) são dispostos de forma similar ao da Figura 4.7, modificando apenas o número total de extensômetros em cada cabo, que é a metade do número de fios de alumínio da camada externa.

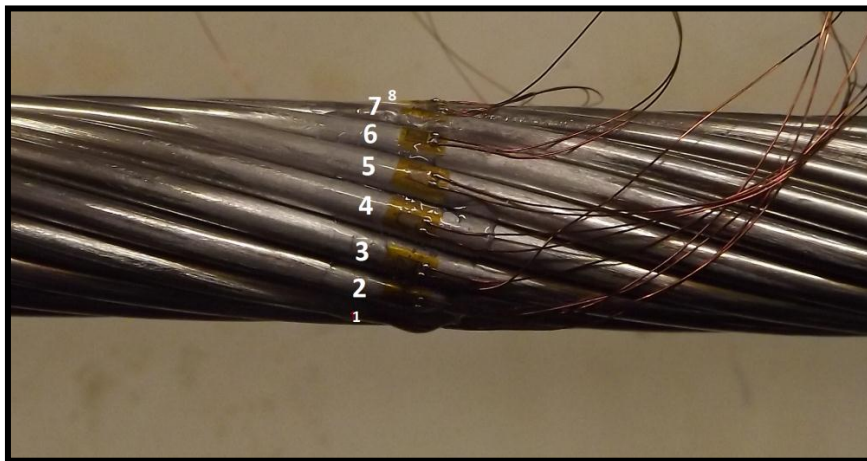


Figura 4.7 – Disposição dos extensômetros no cabo CAA – A.

Na Tabela 4.2 apresenta os valores das cargas de esticamento para cada EDS correspondente para os cabos estudados.

Tabela 4.2 – Carga de esticamento em kgf para EDS de 0 – 30%.

EDS [%]	Carga de Esticamento [kgf]		
	CAA - A	Aero-Z - B	CAL - A
0	0	0	0
5	370	535	775
10	740	1071	1549
15	1110	1606	2323
20	1480	2141	3098
25	1850	2676	3873
30	2220	3211	4647

Na Figura 4.8 são apresentados os gráficos da tensão em relação à EDS aplicada de forma decrescente (30% a 0) e crescente (0 a 30%) do condutor CAA - A. A partir da mesma é possível verificar que o extensômetro EXT 1 tem um comportamento diferente do restante para

os dois gráficos apresentados. Isso pode ser devido ao seu posicionamento após o aplicação da carga de esticamento (torção do cabo), que iniciou na lateral direita do condutor e finalizou na posição de topo, conforme Figura 4.9. Assim, o EXT 1 poder ter sofrido uma deformação maior, e por consequência uma tensão maior, por sentir mais a tração do cabo.

Os valores de tensão encontrados são devido à quantidade de deformação que o fio de alumínio da camada mais externa sofre após a aplicação da carga de esticamento. Em um cabo do tipo CAA, que possui alma de aço, tem uma distribuição não uniforme da carga total sobre suas camadas (camadas de alumínio e de aço).

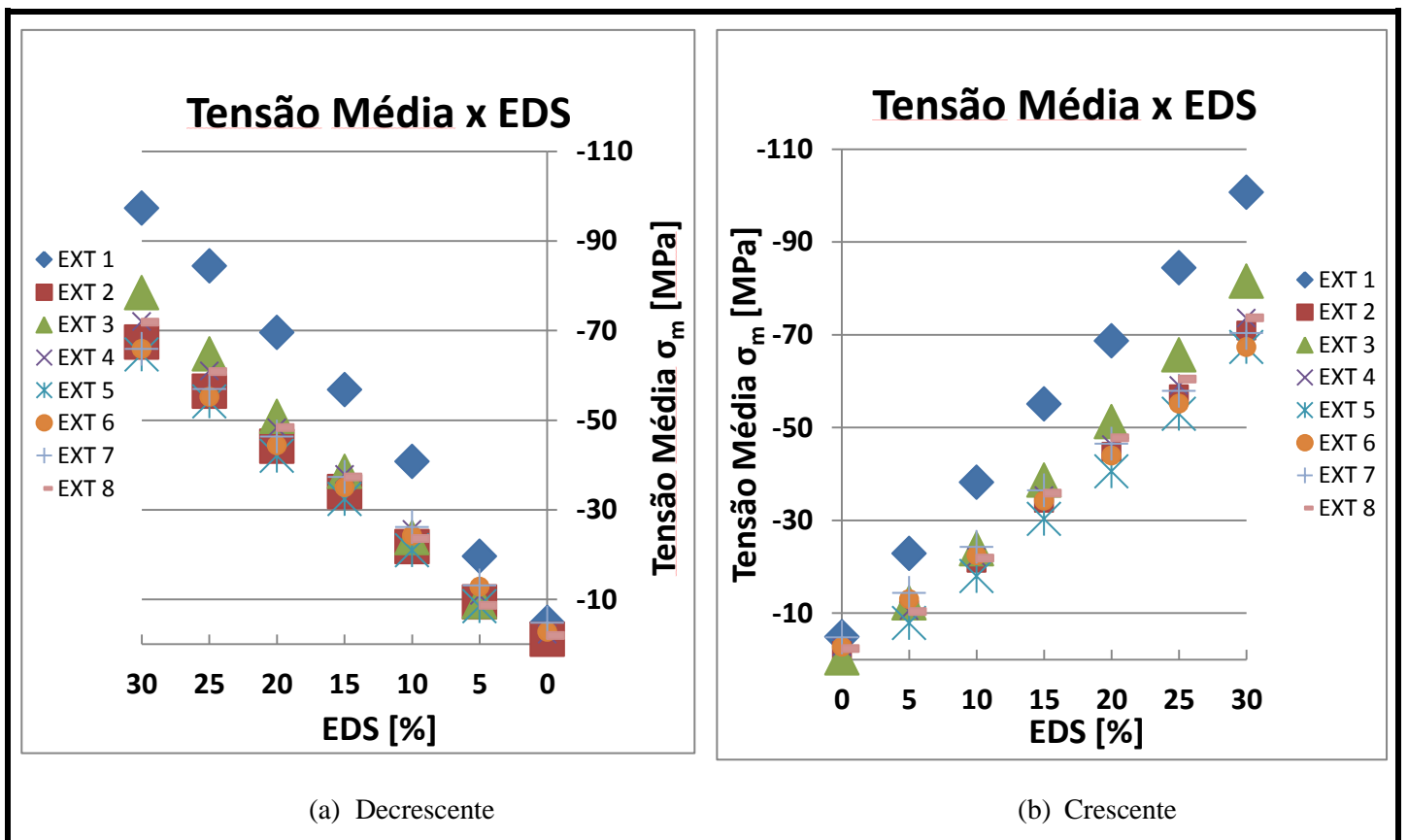


Figura 4.8 – Gráficos Tensão x EDS do cabo tipo CAA – A conforme a aplicação da EDS: (a) decrescente e (b) crescente.

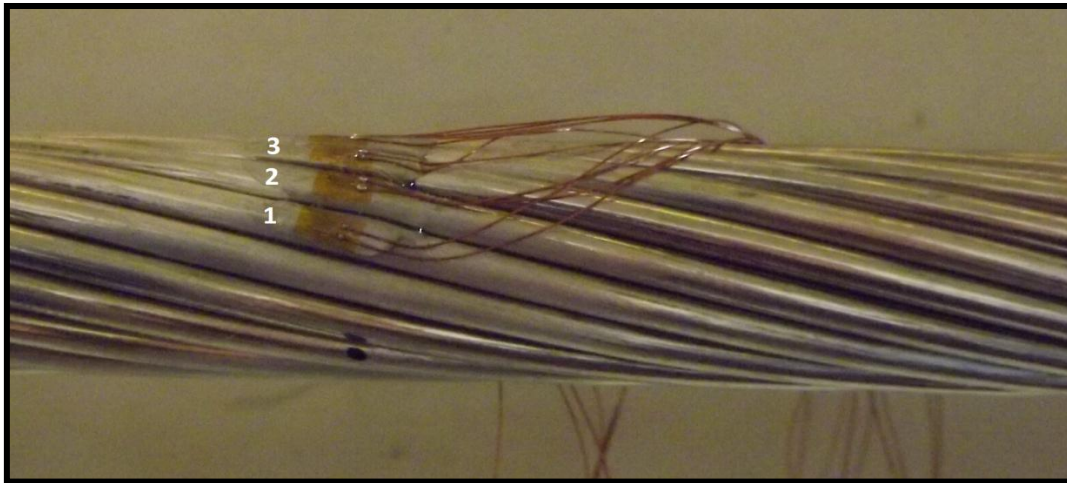


Figura 4.9 – Disposição dos extensômetros no cabo CAA – A após aplicação da carga de esticamento.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.0** são apresentados os gráficos da tensão em relação à EDS aplicada de forma decrescente (30% a 0) e crescente (0 a 30%) do condutor Aero-Z - B. A partir da mesma figura é possível verificar que há uma dispersão entre os valores encontrados para as tensões, quando o condutor foi submetido ao carregamento decrescente (**Erro! Fonte de referência não encontrada.0** (a)). Essa dispersão pode ter ocorrido pelo fato do condutor Aero-Z – B necessitar de um tempo de acomodação maior que os outros cabos em estudo devido à presença da alma de compósito, que pode suportar cargas maiores que alma de aço, e dos fios do condutor possuírem um contato maior devido o seu formato de Z quando comparados com cabos com seções transversais circulares. Já para o gráfico de carregamento crescente (**Erro! Fonte de referência não encontrada.0** (b)) apresenta um comportamento quase idêntico para todos os fios. No entanto, para pequenas cargas de esticamento há uma pequena dispersão das tensões encontradas para os extensômetros EXT_4, EXT_5 e EXT_7.

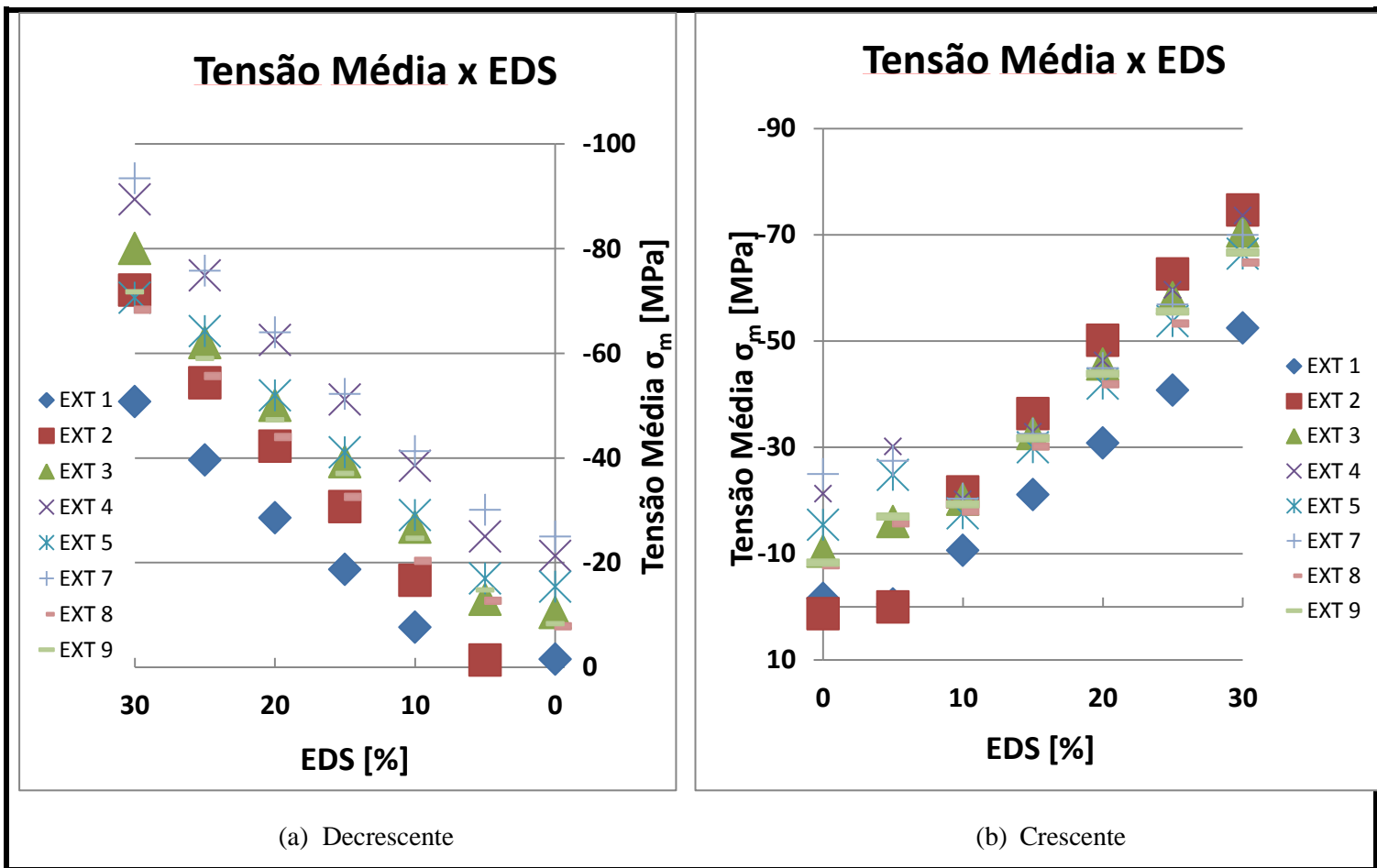


Figura 4.10 – Gráficos Tensão x EDS do cabo tipo Aero-Z - B conforme a aplicação da EDS: (a) decrescente e (b) crescente.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** pode-se observar que após a aplicação da carga de esticamento no condutor Aero-Z – B os extensômetros tiveram suas posições alteradas. O extensômetro EXT_9, que foi instrumentado na lateral do cabo, passou para a posição de topo após a aplicação de diferentes EDS. Essa mudança de posicionamento pode ter alterado os valores das tensões nos fios de alumínio. No início do carregamento os extensômetros EXT_4 e EXT_5 estão posicionados no topo o cabo condutor, e esse pode ser o motivo deles apresentarem valores absolutos de tensão superiores aos demais extensômetros.

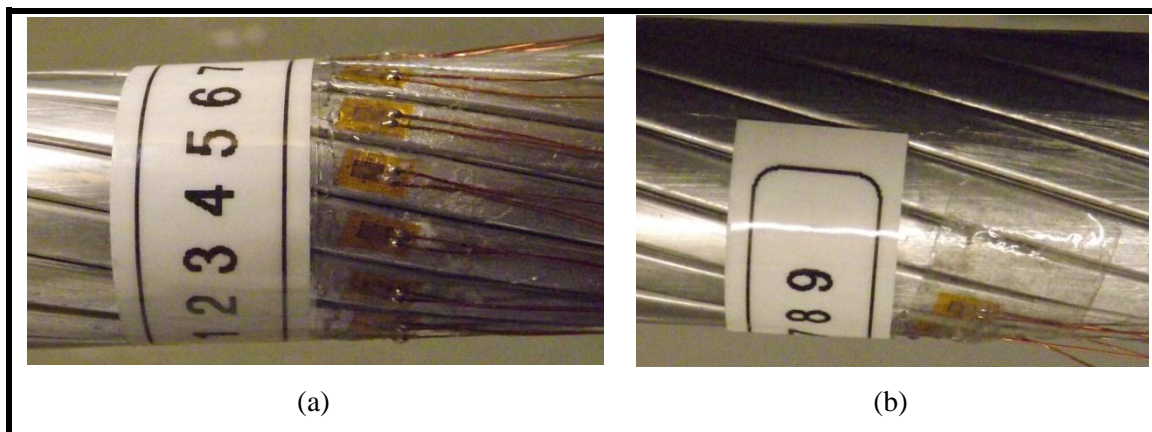


Figura 4.11 – (a) Posicionamento dos extensômetros no condutor Aero-Z – B antes da aplicação da carga de esticamento; (b) Posicionamento dos extensômetros após a aplicação da carga de esticamento.

Na Figura 4.12 são apresentados os gráficos da tensão em relação à EDS aplicada de forma decrescente (30% a 0) e crescente (0 a 30%) do condutor CAL - A. Por meio da mesma figura é possível verificar que há uma dispersão pequena entre os valores encontrados para as tensões do condutor, quando submetido ao carregamento decrescente e crescente. Isso pode ter ocorrido por esse tipo de cabo apresentar todos os fios iguais, suportando na mesma proporção à carga de esticamento. No entanto, para EDS com valores maiores, os extensômetros: EXT_5, EXT_7 e EXT_8 apresentaram uma dispersão em relação aos outros extensômetros, pode ter ocorrido devido à nova posição dos extensômetros após o esticamento. O gráfico decrescente praticamente sobrepõe o crescente.

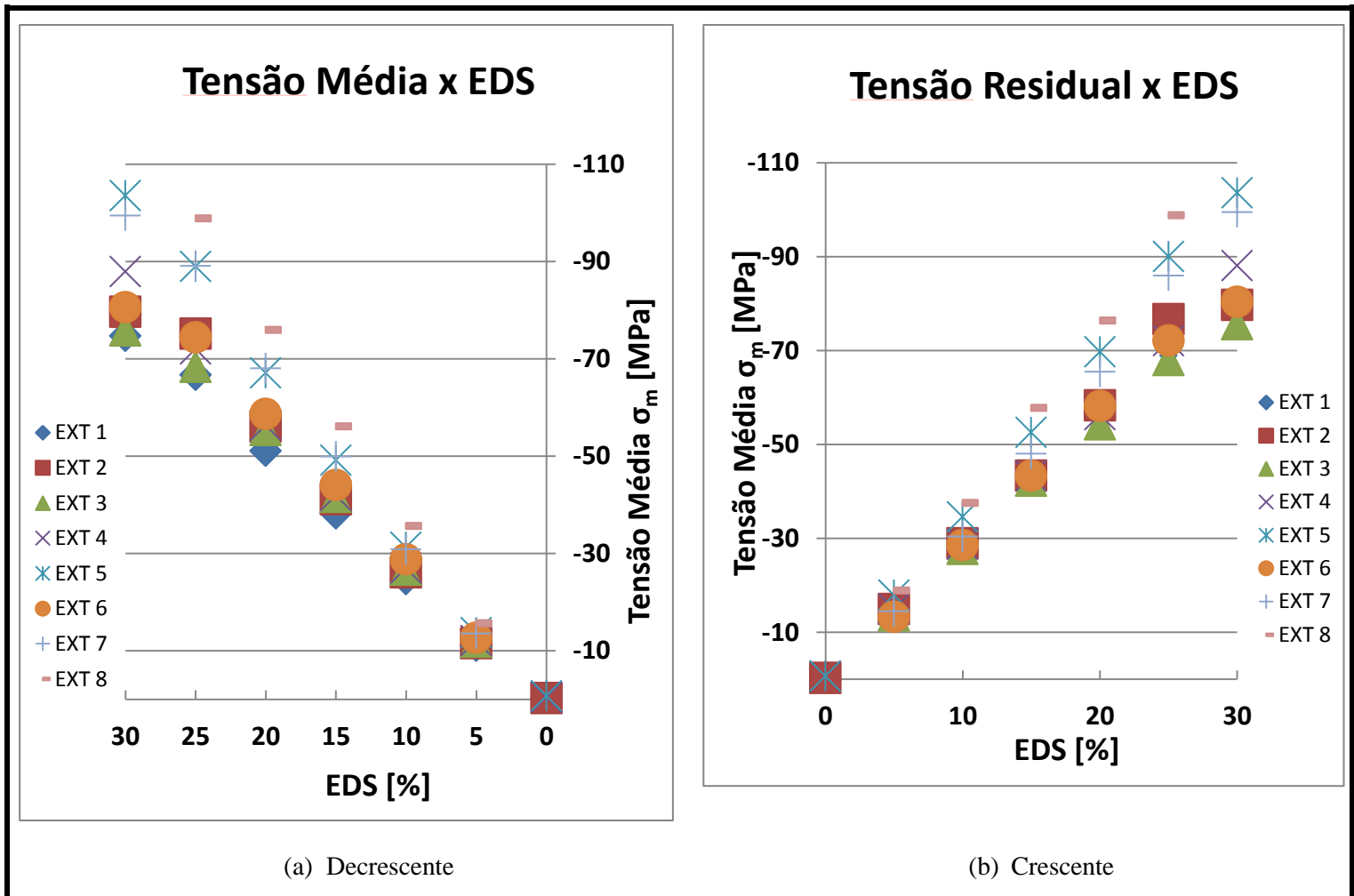


Figura 4.12 – Gráficos Tensão x EDS do cabo tipo CAL – A conforme a aplicação da EDS: (a) decrescente e (b) crescente.

4.3 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DAS CARGAS DE APERTO

Aqui são apresentados os dados coletados nos ensaios de aperto conforme programa descrito na seção 3.6.3. Os resultados são mostrados em duas subseções: obtidos pela montagem em um e dois respectivamente, e serão exibidos na forma de gráficos e tabelas.

4.3.1 Resultados obtidos pela montagem 1

A partir da aplicação da metodologia experimental de ensaio de aperto seguindo o planejamento experimental da montagem 1 relatado na seção 3.6.3, foram obtidos os dados exibidos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Dados obtidos pela sequência de aperto circular.

Torque [N.m]	Sequência 1-2-3-4					
	Forças Medidas					
	Conjunto Novo		Conjunto Reaperto		Média	
	LW1 [kN]	LW2 [kN]	LW1 [kN]	LW2 [kN]	LW1 [kN]	LW2 [kN]
10	1,56	6,11	2,55	1,73	2,06	3,92
20	3,56	9,08	5,64	2,18	4,60	5,63
30	6,64	8,16	8,70	2,92	7,67	5,54
40	6,95	10,39	10,54	3,62	8,75	7,01
50	7,61	14,70	13,29	4,67	10,45	9,69
60	8,13	15,48	14,92	5,49	11,53	10,49

No gráfico gerado (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) a partir das tabelas acima é observada uma grande dispersão nos resultados obtidos. O valor mínimo encontrado para força de aperto ocorreu na LW2 na sequência de aperto 1-2-3-4 utilizando um conjunto de porcas e parafusos reapertado, enquanto o valor máximo chegou a mais de três vezes o valor mínimo, e também ocorreu na LW2, mas com conjunto novo. A mesma divergência de resultados ocorreu para as outras sequências de aperto testadas, esses dados se encontram no Anexo C.

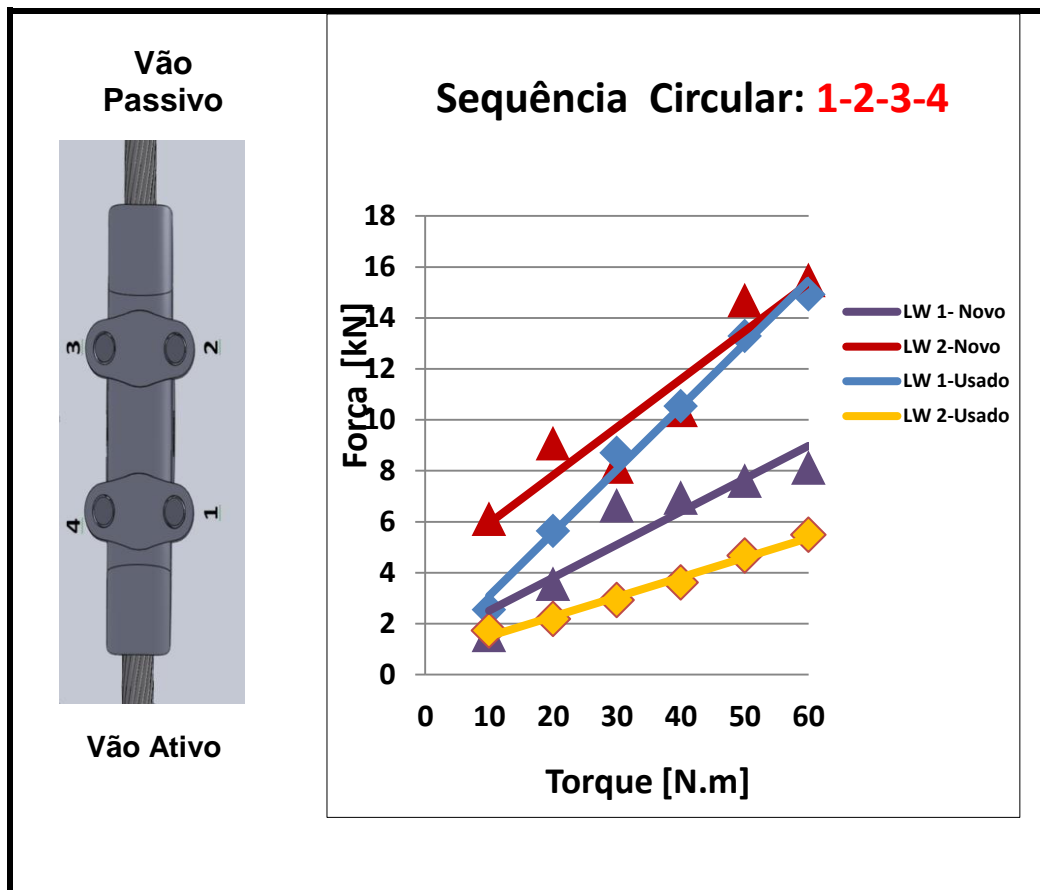


Figura 4.13 - Resultados da montagem 1, aperto circular.

A grande variação nos resultados não era esperada e se mostrou associada a fatores de montagem, como a encaixe das LWs não adequados na placa metálica de suporte, bem como escorregamento da arruela lisa montada entre a placa metálica e a arruela de pressão nos parafusos sem LWs. O escorregamento da arruela de pressão influencia diretamente o coeficiente de atrito do colar f_c da porca, que modifica o coeficiente de torque K influenciando diretamente a relação entre o torque de aperto e a força de tração no parafuso.

Diante destes fatores, decidiu-se realizar uma segunda montagem, onde todos os parafusos pudessem ter suas cargas monitoradas, permitindo melhor controle sobre os elementos da montagem.

4.3.2 Resultados obtidos pela montagem 2

Novamente, a metodologia experimental de ensaio de aperto foi aplicada seguindo o planejamento experimental da montagem 2, relatado na seção 3.6.3. Com as melhorias nas condições geométricas da montagem que permitiram o monitoramento de todos os parafusos, os resultados puderam ser avaliados com maior controle e confiabilidade.

As Tabela 4.4 - Média dos resultados para sequência de aperto circular. a Tabela 4.6 exibem uma média dos três resultados obtidos em cada aperto de uma mesma sequência. As tabelas complementares contendo todos os dados obtidos são apresentadas no Anexo C.

Tabela 4.4 - Média dos resultados para sequência de aperto circular.

Sequência 1-2-3-4 (Média)

Torque [N.m]	Forças Medidas			
	LW1 [kN]	LW2 [kN]	LW3 [kN]	LW4 [kN]
10	1,57	2,49	1,12	1,37
20	6,85	4,26	3,65	2,55
30	9,62	5,18	3,69	3,13
40	13,29	7,19	4,84	4,93
50	17,32	7,88	5,91	5,68
60	19,72	8,48	6,49	8,11

Tabela 4.5 - Média dos resultados para sequência de aperto cruzado.

Sequência 1-3-2-4 (Média)

Torque [N.m]	Forças Medidas			
	LW1 [kN]	LW2 [kN]	LW3 [kN]	LW4 [kN]
10	3,49	1,44	0,22	1,78
20	8,93	3,37	2,11	3,17
30	14,31	5,25	4,47	4,64
40	19,14	5,97	5,71	6,30
50	22,61	7,48	7,20	7,98
60	26,77	9,04	8,81	9,57

Tabela 4.6 -Média dos resultados para sequência de aperto circular com salto.

Torque [N.m]	Sequência 1-2-3-4-Salto (Média)			
	LW1 [kN]	LW2 [kN]	LW3 [kN]	LW4 [kN]
10	11,04	3,76	3,15	4,70
20	20,97	5,62	6,86	8,43
30	26,68	8,19	9,60	12,31
40		9,42	11,62	14,44
50		11,84	12,69	17,80
60		13,70	14,39	19,24

Para melhor avaliar os resultados, foram construídos gráficos que ilustram algumas informações importantes. O principal foco de comparação será influência na distribuição de tração exercida por dois fatores: a sequência de aperto, a reutilização de um conjunto de porcas e parafusos.

Primeiramente é avaliada a influência da sequência de aperto na distribuição de forças, para tal serão comparados os valores médios das trações obtidas nos reapertos em cada sequência e LW.

Baseado nesses dados, os gráficos nas Figura 4.14 a Figura 4.16 foram construídos.

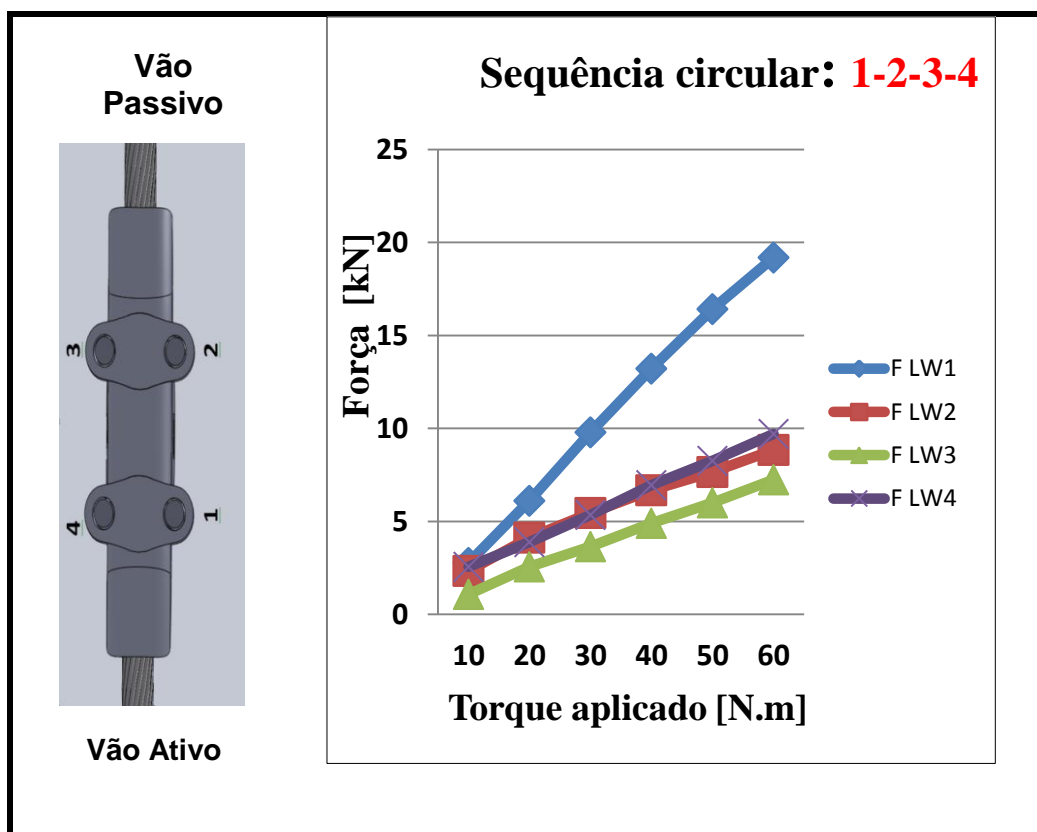


Figura 4.14-Resultados da montagem 2, aperto circular.

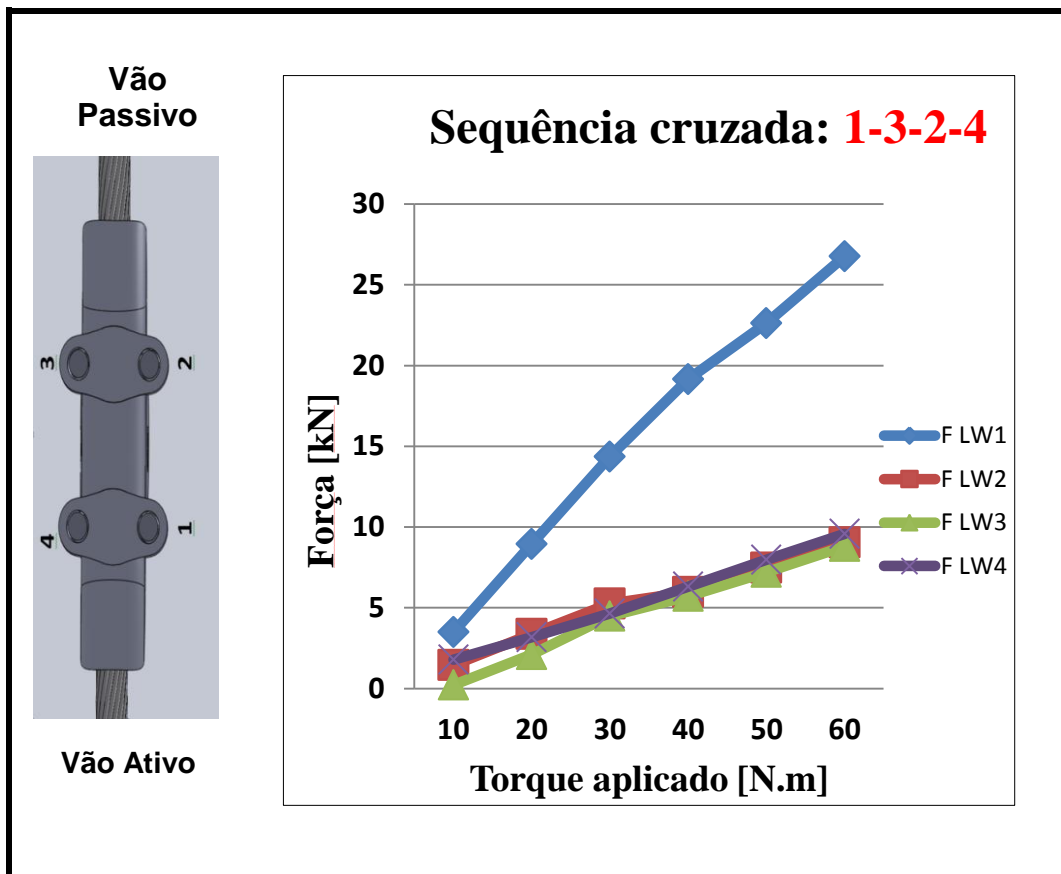


Figura 4.15- Resultados da montagem 2, aperto cruzado.

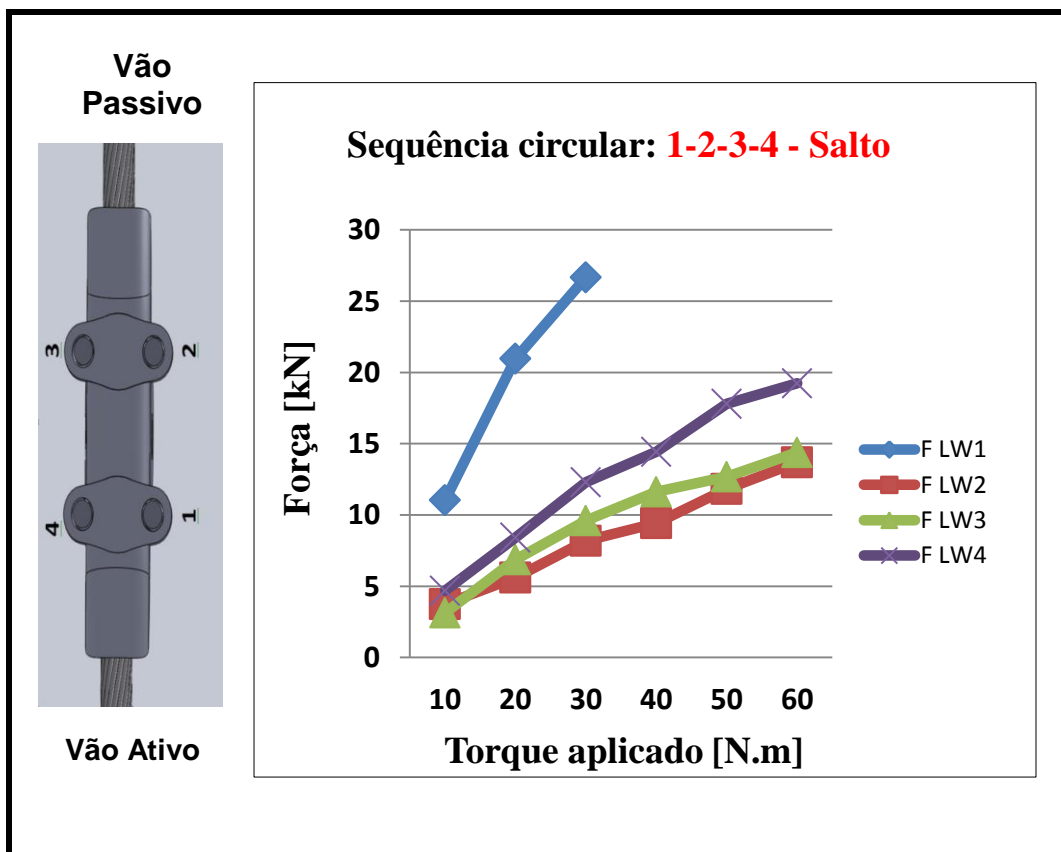


Figura 4.16 - Resultados da montagem 2, aperto circular com salto.

À primeira vista, o que chama muita atenção é a valor extremamente elevado registrado pela LW da posição 1, sempre mais 150% maior que os outros valores. Primeiramente se pensou ser um erro de leitura, então durante os ensaios a LW foram intercambiadas de posição, mas sempre sendo mantida a convenção adotada. O intercambio de local mostrou não haver erro de calibração nas LWs, pois a característica de distribuição mais elevada na posição 1 se manteve independentemente de qual LW ocupasse esta posição.

Outra possibilidade levantada foi a de que o aperto sempre iniciado nesta posição causasse essa diferença grande no valor medido, porém, o ensaio circular com salto (o primeiro torque aplicado é alterado a cada sequência de aperto, a próxima porca será a primeira apertada na próxima sequência de aperto até a quarta porca passar a ser a primeira), faz com que, obrigatoriamente, se varie a posição da primeira porca a ser apertada a medida com que os passos de torque de aperto sejam aplicados.

A conclusão foi que o apoio inadequado da LW nesta posição, devido ao rasgo de abertura maior para acomodação da boca do grampo, pudesse ser a causa de tal efeito. Na Figura 4.17 (a) e (b) é possível visualizar que uma parte significativa da base da LW na posição 1, região destacada em vermelho, não está apoiada na base metálica e pode ser a causa nas instabilidades de medição. Apesar de o mesmo rasgo existir na posição 4, esta LW estava apoiada sobre o calço de elevação, fazendo com que toda a sua base estivesse fixada sobre ele.

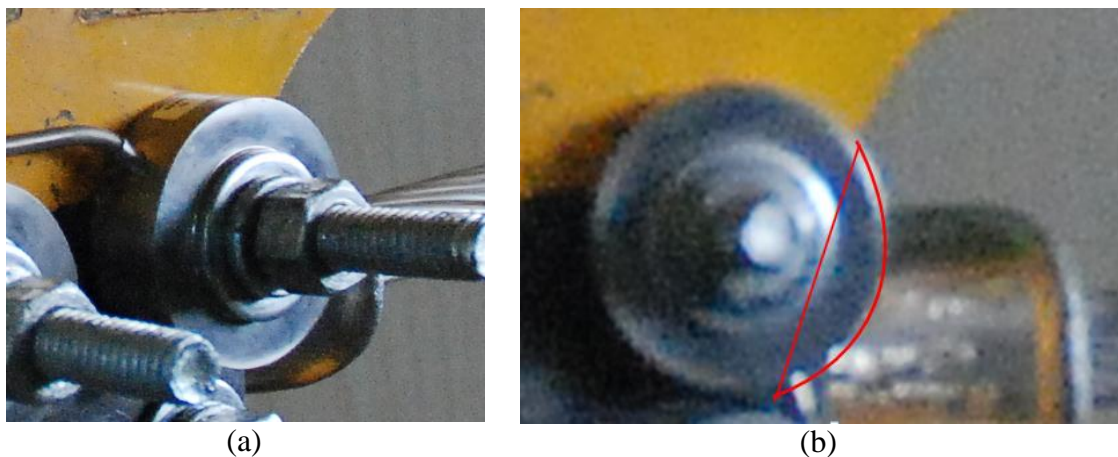


Figura 4.17 - Detalhe da montagem da LW na posição 1.

Para efeito de comparação as medições obtidas na posição 1 não serão levadas em consideração nesta análise. Ao se comparar os valores medidos pelas LWs nas posições de 2,3 e 4 mostram próximos e bem lineares, como é esperado. As pequenas variações entre 1kN e 2 kN em função da posição são justificadas pela acomodação do conjunto a cada aperto, bem como diferença no acabamento superficial da rosca, que é fundida.

Ao se avaliar a influência exercida pela sequência de aperto, é notado que a distribuição de carga mais uniforme foi à provocada pelo aperto cruzado 1-3-2-4, provocando uma variação máxima de aproximadamente 8% entre as posições 3 e 4, sendo o valor médio obtido com torque de 50 N.m de 7,5kN. Esse valor é bom inferior ao levantado na seção 3.6.1 de 16,04 kN, o que comprova que o fator do atrito assumido no cálculo teórico é bem diferente do real, vale lembrar que a rosca do parafuso é fundida e não possui bom acabamento superficial que tem influência direta no valor do fator de atrito na rosca e no colar.

O comportamento da sequência circular 1-2-3-4 foi muito parecido com o do aperto cruzado, mas foi a configuração que provocou cargas menores de tração, variando de 6kN a 8,25kN entre as LWs 3 e 4 respectivamente.

Ainda relacionado exercida pela sequência de aperto, é notado que a distribuição de carga mais elevada foi à provocada pelo aperto circular com salto: 1-3-2-4-salto, provocando uma carga de tração medida máxima de 17,8kN na posição 4. Em relação a esta sequência são válidas as observações a seguir. Para todas as outras posições foi notada uma elevação média de mais de 80% ao se aplicar essa sequencia em relação ao aperto cruzado. O valor medido na posição 1 não foi modificado a partir de 30N.m de aperto, pois o valor medido estava próximo do limite de 33kN imposto pelo fabricante das LWs. O valor médio obtido com torque de 50 N.m para o aperto circular com salto foi de 14,1kN. Esse valor é bom mais próximo ao levantado na seção 3.6.1. Além da influência do acabamento superficial, a acomodação do conjunto mostrou-se variar bastante a medida que o primeiro aperto de cada passo mudasse de posição.

Por fim, com o objetivo de se avaliar a influência causada pela reutilização do conjunto será apresentada a

Tabela 4.7 com valores medidos em uma mesma posição, mais especificamente a posição 3, em três apertos sobre a mesma sequência: primeiramente num conjunto novo, posteriormente um segundo e terceiro reapertos do mesmo conjunto.

Tabela 4.7 - Valores medidos na LW da posição 3.

Torque [N.m]	Forças Medidas na LW3 [kN]								
	Sequência 1-2-3-4			Sequência 1-3-2-4			Sequência 1-2-3-4-salto		
	Aperto1	Aperto2	Aperto3	Aperto1	Aperto2	Aperto3	Aperto1	Aperto2	Aperto3
10	0,97	1,12	1,12	0,26	0,15	0,25	2,16	2,60	4,68
20	2,17	1,86	3,65	3,75	0,90	1,68	7,31	4,59	8,69
30	4,08	3,19	3,69	5,37	3,63	4,43	10,65	7,47	10,68
40	5,15	4,71	4,84	6,41	5,12	5,60	15,40	8,55	10,91
50	5,98	6,11	5,91	8,34	6,66	6,61	15,07	10,49	12,50
60	7,65	7,58	6,49	9,17	8,62	8,65	17,26	13,04	12,88

Por meio da

Tabela 4.7 - Valores medidos na LW da posição 3.foi possível construir os gráficos Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20, os quais mostram o comportamento da tração no parafuso em função do torque de aperto aplicado, para cada sequência na LW da posição 3. Os gráficos (Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20) estão separados por sequência em que cada curva indica o número do aperto realizado. É possível notar que o valor equivale à metade daquele fornecido pela equação 3.3 a qual se refere a um parafuso simples.

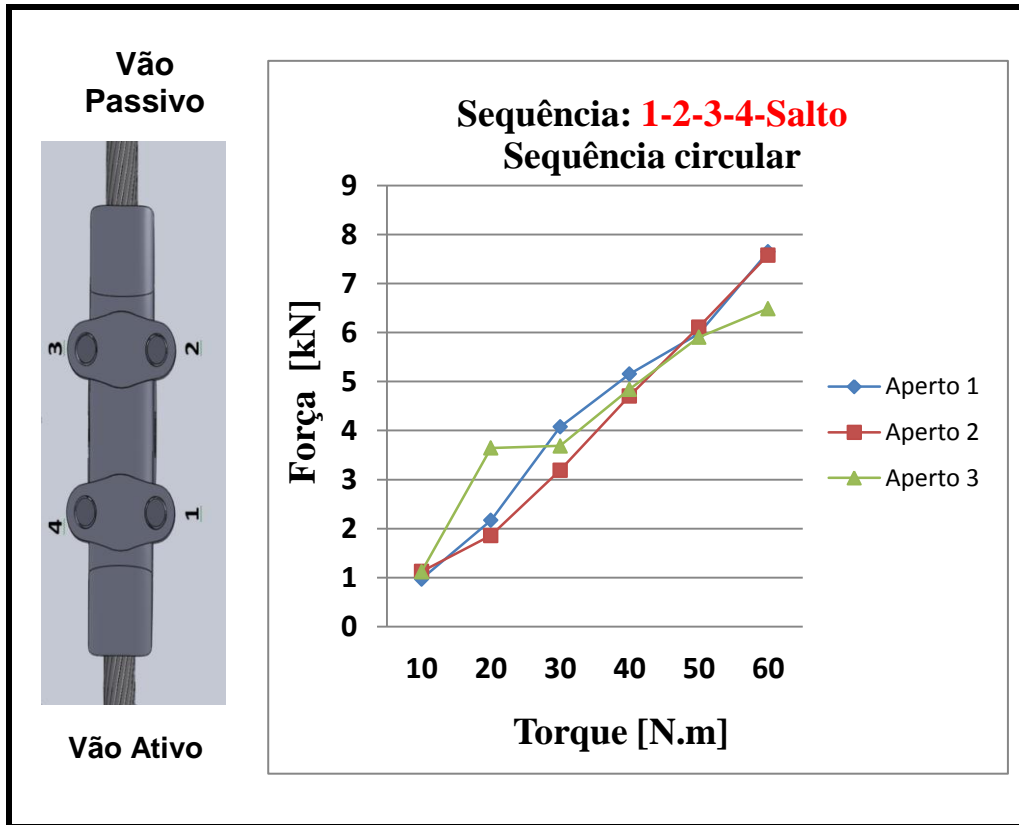


Figura 4.18- Variação da tração em função do número de apertos, sequência circular.

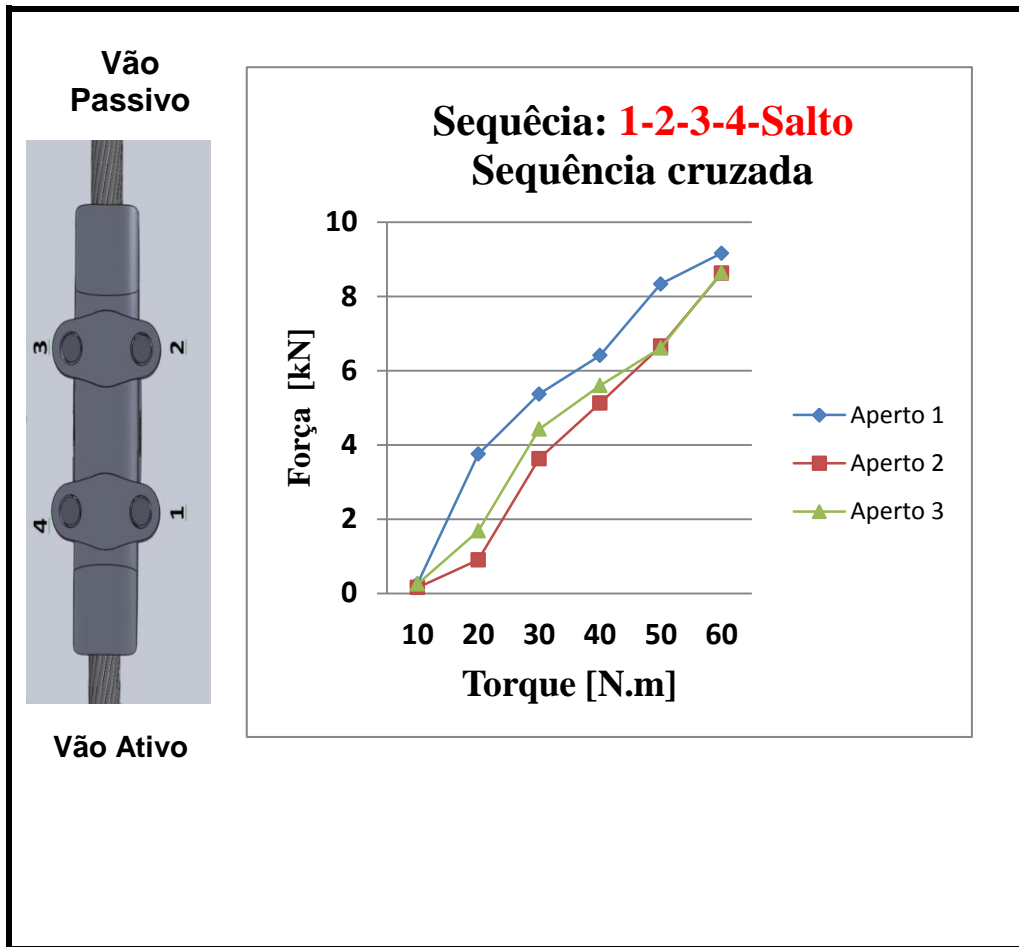


Figura 4.19 - Variação da tração em função do número de apertos, sequência cruzada.

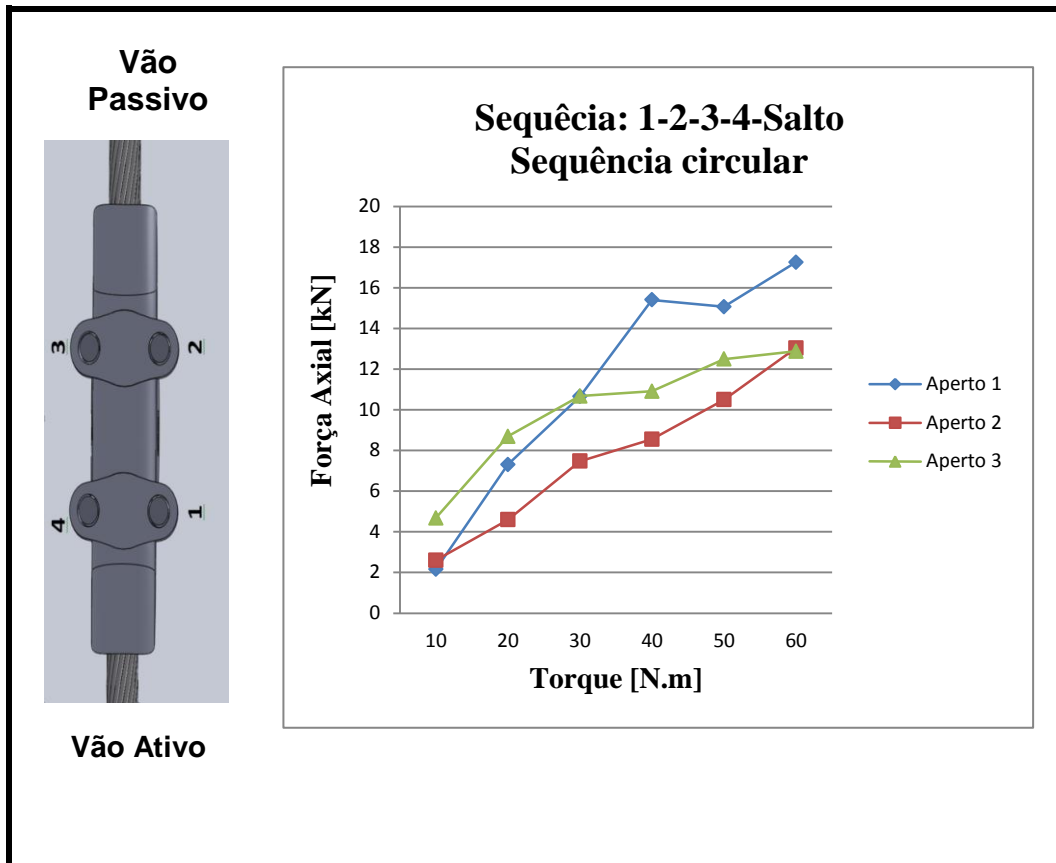


Figura 4.20 - Variação da tração em função do número de apertos, sequência circular com salto.

É possível observar uma pequena redução na carga de tração a medida que o conjunto é apertado novamente. Esse fato se mostra relacionado ao “faceamento” que ocorre na rosca do parafuso a medida que novos apertos são realizados. Como o acabamento superficial da rosca está intimamente ligado ao coeficiente de atrito f da rosca, de tal forma que f diminui quando a superfície se torna menos rugosa, é possível explicar essa diminuição. A Figura 4.21 ilustra a diferença do acabamento superficial inicial da rosca do parafuso virgem em relação ao acabamento final, a medida com que os apertos vão sendo realizados.

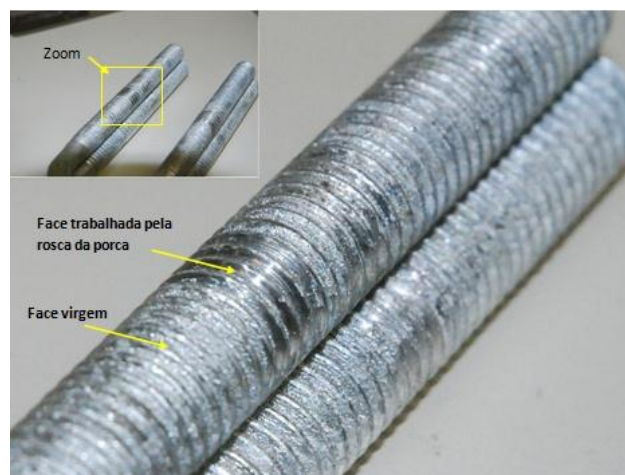


Figura 4.21 - Detalhe do acabamento superficial da rosca.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

A pesquisa revela a importância da realização de estudos capazes de mensurar o efeito de fatores que podem agravar a redução de vida, como os fatores associados à montagem (cargas de aperto no grampo de suspensão), a influência da variação da EDS sobre a tensão média em um condutor, além da validação da fórmula de Poffenberger-Swart para diferentes tipos de cabos condutores, auxiliando, assim, em projetos para linhas de transmissão.

Com base nos resultados das investigações teóricas e experimentais conduzidas ao longo deste trabalho, somadas às comparações realizadas tendo como referência os demais estudos contidos na literatura acerca do tema, podem ser extraídas as seguintes conclusões:

- O estudo buscou validar os dados fornecidos pelo uso da Fórmula de Poffenberger-Swart na obtenção dos valores de tensão nominal usados na construção das curvas S-N e constatou que a expressão empírico-analítica possui um nível de concordância bastante alto com os valores experimentais de tensão registrados nas amostras de diferentes cabos com os CAA e CAL. Em suma, para as condições do ensaio e a faixa de amplitudes avaliada, a utilização da Fórmula P-S forneceu uma boa aproximação para as tensões nominais verificadas na zona de falha (último ponto de contato do conjunto cabo/grampo de suspensão). Essas tensões nominais são utilizadas para construção das curvas S-N para cada cabo condutor de energia elétrica.
- A partir dos levantamentos experimentais foi possível entender como as tensões axiais são distribuídas ao longo dos fios externos de cabos condutores. Com os experimentos realizados se observou que a forma helicoidal do cabo influencia diretamente a distribuição das tensões axiais, causando desvios daquelas previstas pela fórmula de P-S. Além disso, foi observado que a geometria dos fios influencia o comportamento mecânico do condutor. Aero-Z possui maior contato entre os fios, assim, está mais próxima à configuração de viga. Outro ponto é o alinhamento das amostras na bancada, ele influencia na determinação dos valores de tensão nominal.
- Em relação ao estudo da tensão residual média os condutores estudados possuem um comportamento semelhante independente carga de ruptura. O que influencia no comportamento da tensão média para cada EDS aplicada é a geometria de cada condutor e alma de cada um deles, influenciando também no tempo de acomodação do cabos antes de

aplicar a carga de esticamento escolhida. Foi possível notar que os fios da camada mais externa de alumínio são submetidos a tensões médias semelhantes, demonstrando que a carga de esticamento em cada condutor é distribuída com a mesma proporcionalidade nos fios de alumínio.

- Segundo os dados levantados para obtenção das cargas de tração nos parafusos do grampo de suspensão, comprovou-se que a sequência de aperto das porcas exerce influência na distribuição de forças no conjunto. Outro ponto relevante é o uso repetitivo dos mesmos acessórios do grampo de suspensão (porcas, parafusos e arruelas) também causa efeito, embora em menor escala, sobre a distribuição da carga de aperto na montagem do grampo.
- Como parte do escopo deste trabalho de pesquisa o laboratório consolidou sua capacidade de realizar ensaios com o dobro da capacidade (em duas bancadas), com a possibilidade de ensaios longos, conduzindo testes ininterruptamente durante semanas, se necessário, com estrito controle das condições de ensaio e garantindo a confiabilidade dos testes realizados.

Por fim cabe salientar que o desenvolvimento desse trabalho de pesquisa permitiu o aprimoramento das instalações e do nível de monitoramento das variáveis de controle do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia – LabCabos, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, promovendo o aumento do nível de especialização da equipe de pesquisa, expandindo a fronteira do conhecimento no que se refere ao comportamento em fadiga de cabos condutores e acerca dos mecanismos de medição e atenuação de vibrações nesses componentes estruturais. Mais ainda, cabe enfatizar que este trabalho consolida um espaço de referência nacional no desenvolvimento de saberes relativos ao comportamento mecânico de linhas de transmissão de energia.

A condução de pesquisas desta natureza possibilita a produção de um banco de dados nacional, para as diversas montagens, realizadas com diferentes tipos de condutores, permitindo a investigação de condutores que potencialmente se adaptem melhor às condições climáticas nacionais e sua aplicação com segurança, lembrando que padrões internacionais contemplam condições climáticas e tipos de vibração diferentes daqueles característicos do Brasil. Graças ao elevado nível de controle implementado os ensaios agora permitem a investigação de ferragens, processos de montagem e acessórios potencialmente capazes de desacelerar o surgimento ou a progressão de falhas.

5.2 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento do presente trabalho apontou novos caminhos para pesquisas futuras, que incluem:

- A aplicação de diferentes EDS no levantamento de curvas S-N para consolidar as informações acerca das tendências verificadas neste trabalho em relação à tensão residual média em condutores, quantificando a influência da mesma;
- O levantamento de curvas S-N para outras montagens cabo-grampo, incluindo condutores com diferentes geometrias (TW) e outros materiais (CAA, CA), além de diversos grampos (AGS), de modo a tentar estabelecer um modelo generalizado para a previsão da redução da resistência em fadiga de condutores em função do aumento da carga de esticamento aplicada.
- Para certificar que as tensões são transferidas ao longo dos fios nas camadas mais externas do condutor é sugerido como trabalho futuro a instrumentação e o monitoramento, individualmente, de fios desde o último ponto de contato até o ponto 89 mm distante deste. Essa instrumentação deve ser realizada no fio que inicialmente se encontra na base e passa helicoidalmente até o topo, e também no fio que tem início no topo do UPC e passa pela base próximo ao ponto 89 mm.
- Estudo aprofundado na avaliação da relação entre torque de aperto e a distribuição de forças axiais nos parafusos, utilizando o cabo tracionado com diferentes EDS, aplicando os resultados num modelo numérico gerado nos *softwares* ANSYS ABAQUS para avaliação da distribuição de tensão superficial e distribuição das tensões abaixo da superfície, tendo uma previsão de crescimento de trinca.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Frontin, S. O., Saavedra, A.R., Araújo, A. A., Murça, L. B, Fragelli, R. R, Rêgo, V. B., Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão, Goya, PP. 334, 2010.
- [2] [46] EPRI, Transmission Line Reference Book:*The Orange Book*. Electric Power Research Institute. Palo Alto,CA, 1979.
- [3] CIGRE, SC22, WG04, *Guide for Endurance Tests of Conductors Inside Clamps*, Electra, No100, pp. 77-86, May, 1985.
- [4] CIGRE SC22 WG04, *Endurance capability of conductors*, Final Report Paris, July, 19 p, 1988.
- [5] MINER, M. A. *Cumulative Damage in Fatigue*, Journal of Applied Mechanics, pp. 159-164, 1945.
- [6] CIGRE WG 04 SC 22 - 02 *Recommendations for the evaluation of the lifetime of transmission line conductors*. ELECTRA 63. March 1979
- [7] Poffenberger, J.C., and Swart, R. L., *Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain*, IEEE Transactions Paper, Vol PAS 84, pp. 281-289, 1965.
- [8] Fadel, A.A., Avaliação do Efeito de Tracionamento em Elevados Níveis de EDS Sobre a Resistência em Fadiga do Condutor IBIS,UnB, 2010
- [9] Rawlins, C.B., *Fatigue of Overhead Conductors*, Transmission Line Reference Book, Electrical Power Research Institute, pp. 51-81, Palo Alto CA, 1979.
- [10] IEEE, *Standardization of Conductor Vibration Measurements*, IEEE PAS vol.85 Nº. 1, Trans.31 TP65-156, 1966.
- [11] Nowel, D., Hills, D.A, *Mechanics of Fretting Fatigue*, Kluwer Academic Publishers, pp. 1-20, 1994.
- [12] CIGRE, WG B2.30, *Engineering Guidelines Relating to Fatigue Endurance Capability of Conductor/Clamp Systems*, October, 2008.

- [13] Gladwell, G.M. L., *Contact Problems in the Classical Theory of Elasticity*, Alphen aan den Rijn, 1980.
- [14] Papailiou, K.O., *On the Bending Stiffness of Transmission Line Conductors*, IEEE Trans. Power Deliv. Vol. 12. No 4. pp. 1576-1588, 1997.
- [15] Nexans catálogo: Cabos de Alumínio Nu Com Alma de Aço Série (MCM)- Versão V05.06- 2010
- [16] Callister Jr., W. D., *Materials Science and Engineering: An introduction*. 7th Edition. John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [17] J. E. Shigley & C. R. Mischke, *Projeto de Engenharia Mecânica*, 8^aEdição. Bookman, 2005
- [18] Borelli, A. e Schmidt, R., *Estática*, 1^aed., Thomson Learning , p.339-342, 2003.
- [19] NEXANS. Catálogo do Fabricante – Características dos cabos ACSR/CAA, 2007.
- [20] Hortêncio, T.M.O.S., *Ensaio de Fadiga sob Condições de Fretting com o cabo CAA 397,5 MCM – IBIS*. Tese de Mestrado, Universidade de Brasília-UnB, 2009.
- [21] Site do Ministério de Minas e Energia.
<http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/artigos/panorama_energético_brasileiro.pdf>, acessado em 20/01/2011.
- [22] Ramey, G. E., A. M. ASCE, Roy R. Duncan, and Robert M. Brunair, (1986), *Experimental Evaluation of S-N Curves for Drake ACSR Conductor*, *Journal of Energy Engineering*, vol. 112, No 02, pp. 138-151, 1986.
- [23] Bellorío, M.B; — *Revisão Sobre os Critérios de Fadiga para Cabos Condutores de Energia e Uso de Metodologia para Estimativa de sua Vida Remanescente* Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília-UnB, Brasília, Brasil, 2009.
- [24] Site do Operador nacional do sistema de Energia.<http://www.ons.org.br/download/ampliao_reforços/par/Versão_Executiva_PAR2010-2012ONS_23-02-2010.zip>, acessado em 20/01/2011.
- [25] CIGRE, SC22, WG04, *Guide for Endurance Tests of Conductors Inside Clamps*, Electra, No100, pp. 77-86, May, 1985.
- [26] ASM HANDBOOK. *Fatigue Properties in Engineering*. *Fatigue and Fracture*, Book 19, 2002.

- [27] Branco C. M., Fernandes A. A., Castro, M.S. T., —Fadiga de Estrutura Soldadas , Ed. Gulbenkian, Lisboa, Portugal, 1986.
- [28] ASTM STP E1823, —*Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing Definitions of Terms Relating to Fatigue*, Annual Book of Standards, ASTM, Philadelphia, PA, vol. 3.01, pp. 740–49, 1996.
- [29] Norton, R.L.; Projeto de Máquinas – Uma abordagem integradal, Ed. Bookman – 2ªEdição, 2004.
- [30] Joseph Marin, *Mechanical Behavior of Engineering Materials*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., p.224, 1992.
- [31] Galing, L.A *Contact Problems in the Theory of Elasticity*, Moscow, North Carolina State College. 1953.
- [32] Shigley, J.E; Mischke, C.R.; Budynas, R.G, —Projeto de Engenharia Mecânica, Ed. Bokman, 7ªEdição,2005.
- [33] Murça, L.B., Estudo Experimental do Efeito da Sequência de Carregamento Sobre a Resistência à Fadiga de Cabos Condutores - Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação 2011 Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, DF, 100p, 2011.
- [34] Garcia,A., Spim,J.A., Santos,C.A. , Ensaios dos Materiais, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 247p, 2000.
- [35] Dowling, Norman E., *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue*, Prentice Hall, Second Ed., New Jersey-EUA, 1999.
- [36] Shigley, J.E; Mischke, C.R.; Budynas, R.G, —Projeto de Engenharia Mecânica, Ed. Bokman, 7ªEdição,2005.
- [37] CIGRE SCB2-WG11-TF 7-04-18, *Fatigue Endurance Capability of conductor / Clamp Systems-Update of Present Knowledge - Part 1 - Mechanics of the Phenomenon*, Draft August 2004
- [38] Poffenberger, J.C., and Swart, R. L. (1965), *Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain*, IEEE Transactions Paper, Vol PAS 84, pp. 281-289
- [39] Heinrich Hertz,1896, *On the contact of elastic solid*, Eds. Jones and Schott, London: Macmillan.

- [40] Johnson, K.L. *Contact Mechanics*. Cambridge University Press; 1984
- [41] Azevedo, C.R.F. et al (2009), *Fretting Fatigue in Overhead Conductors: Rig Design and Failure Analysis of a Grosbeak Aluminium Cable Steel Reinforced Conductor*, *Engineering Failure Analysis*, 16, pp 136-151.
- [42] Kyowa, *Strain Gages: A Complete Lineup of High Performance Strain Gages and Accessories*, Catálogo nº101E-U1, Kyowa Electronic Instruments Co.,Ltda.,Tokyo, Disponível em <http://www.kyowa-ei.com>
- [43] CIGRÉ SC22 WG22-11 -*Guide to vibration measurements on overhead lines*. *Electra* 100, pp 125 to 137, 1995.
- [44] Azevedo, C.R.; Henriques A.M.D.; Filho, A.R.P; 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, pp.136-151. 2009.
- [45] IEEE.- *Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors*.2007.
- [46] Henriques, A. M. D., *Bancada de Ensaios Mecânicos à Fadiga de Cabos Condutores de Energia* Tese de Doutorado, Universidade de Brasília-UnB, 2006.

7 ANEXOS

7.1 ANEXO A – CONTROLE DA BANCADA DE TESTES

A – *Sweep* ou Varredura em requência

Para a execução dos testes é necessário estabelecer as frequências naturais para o conjunto cabo/grampo com o comprimento de vão da montagem, que permite fazer a escolha da frequência de operação do teste na fase seguinte. Para tal é feita uma varredura em frequência que consiste em excitar o cabo por meio de um *shaker* eletromecânico, mantendo o controle de amplitude de deslocamento no ponto de aplicação da carga e variar a frequência de excitação dentro de uma faixa pré-definida pelo operador.

A sequência de operações para realização da varredura é descrita a seguir:

- i) Ligar o microcomputador, o controlador e o amplificador, mantendo o ganho do amplificador inicialmente em zero;
- ii) Iniciar o software de controle do excitador eletromecânico (SignalStar Vector Shaker Controller) e o sistema de aquisição de dados;
- iii) Iniciar a rotina de teste com excitação senoidal, estabelecendo a faixa de frequências na qual o shaker irá excitar o cabo e mantendo o controle do ensaio no shaker (deslocamento controlado), registrando o valor do deslocamento no ponto 89 mm;
- iv) Enquanto o *software* de controle aplica o carregamento com amplitude pico a pico controlada, o valor do deslocamento devido à vibração do cabo no ponto 89 mm é adquirido e uma função de transferência H_{xy} entre o valor da saída Y_B e Y_{shaker} é apresentada na forma gráfica pelo *software*, onde os picos representam as frequências naturais associadas a modos de vibrar como mostrado na Figura 7.1 onde o cabo é excitado em uma condição que propicia atingir a amplitude requerida no ponto 89 mm.

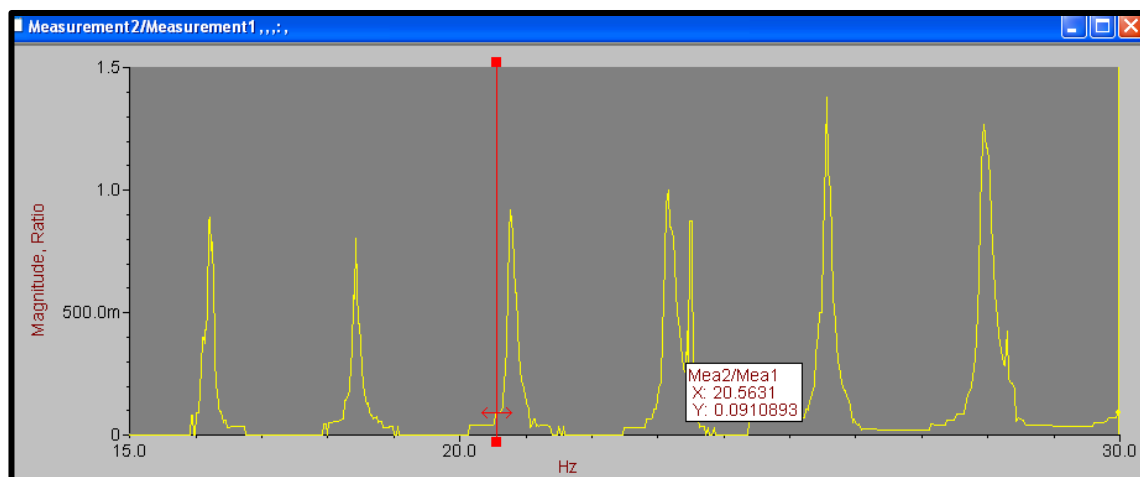


Figura 7.1 – Representação gráfica da varredura de um condutor nas frequências de 15 a 30 Hz.

v) Uma vez encerrada a varredura analisar os dados da função de transferência do condutor H_{xy} e com base nas informações adicionais monitoradas como: força aplicada no shaker, faixa de potência de drive aplicada pelo amplificador, deslocamento no ponto 89 mm e controlabilidade do ensaio por meio das faixas limites de controle, determinar o ponto próximo ao pico da frequência natural onde se dará o ensaio.

É possível notar no gráfico da Figura 7.1 que o condutor apresenta uma densidade espectral significativa (a cada intervalo de cerca de 2 Hz o cabo alcança uma frequência natural).

Entretanto apenas algumas destas frequências serão capazes de produzir no ponto 89 mm a amplitude desejada, sem ultrapassar o limite de potência do shaker. Como a potência é dada pelo produto da frequência pela amplitude de deslocamento, somente os picos mais acentuados podem garantir absorção de energia pelo sistema de modo que o shaker consiga provocar no ponto 89 mm o deslocamento necessário.

A leitura da força empregada pelo shaker, por meio da célula de carga, modelo 208C03, PCB®, assim como a razão entre as amplitudes no ponto 89 mm e no shaker servem como parâmetros para a escolha das frequências de ensaio. Uma frequência apropriada estará bem próxima a uma frequência de ressonância, e para não forçar o shaker, será escolhida de tal forma que a razão entre esses deslocamentos não ultrapasse 5, e a força medida na haste seja inferior a 200N.

B – *Dwell* ou Parada em Frequência com Amplitude Y_B constante

Uma vez definida a frequência de ensaio conforme mostrado no item anterior é possível iniciar o ensaio de durabilidade ou resistência à fadiga do condutor. Para tal a amostra deve ser submetida a ciclos de carregamento com a mesma amplitude de tensão (equivalente a uma amplitude de deslocamento Y_B pela fórmula P-S) até a ocorrência da falha. O ensaio é

novamente controlado pelo *software* (*SignalStar Vector Shaker Controller*), entretanto com outra configuração. O controle neste caso é deslocado do acelerômetro no shaker para acelerômetro no ponto 89 mm e a função *dwell* é escolhida na rotina a ser executada, definindo o valor numérico da frequência e o número de ciclos em que deve ser executada a excitação.

Os passos para execução deste procedimento de ensaio são descritos a seguir:

- i) Abrir o programa *SignalStar Vector Shaker Controller* na função de ensaio em seno;
- ii) Definir a entrada referente ao sinal de amplitude de deslocamento no ponto 89 mm como controle do ensaio, e colocar as demais variáveis de entrada do controlador: amplitude de deslocamento e força no shaker como medidas;
- iii) Definir nos limites de ensaio (reference) para a faixa de frequência escolhida, o tipo de controle como sendo de deslocamento (CD) e o limite como sendo o Y_B desejado;
- iv) Definir o script do ensaio no menu run selecionando uma frequência de ensaio próxima a uma das frequências naturais (cerca de 75% da frequência natural selecionada) e o número de ciclos em que se deseja repetir a aplicação da amplitude prescrita;
- v) Ligar o amplificador “zerando” o ganho antes de posicionar o botão em cerca de 50% do ganho máximo;
- vi) Salvar a rotina e iniciar sua execução ajustando o ganho se necessário até a estabilidade do ensaio. Nos casos em que a potência do sistema mostra-se insuficiente para alcançar a estabilidade, é recomendável ajustar a frequência natural para um valor menor.

7.2 ANEXO B

7.2.1 Colagem dos Extensômetros

A colagem do ERE é dividida em 5 etapas: i) preparo da superfície; ii) limpeza da superfície; iii) posicionamento do ERE; iv) colagem do ERE; v) soldagem dos fios do ERE. Essas etapas serão listadas abaixo:

i) Preparo da superfície: A superfície, em que o extensômetro será colado, é lixada com lixas de granulação de 80 a 120, ou jateada de modo a tornar-se livre de sujeiras e para aumentar a rugosidade superficial, permitindo uma melhor colagem (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Com isso, a peça e o extensômetro formam uma estrutura única e para tal a adesão deve ser completa.

No uso das lixas é indicado iniciar o processo da menor para a maior e lixando em direções perpendiculares. E não deve aplicar força no procedimento de lixar para não reduzir a superfície do fio.

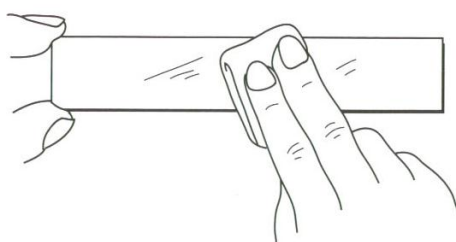


Figura 7.2 – Limpeza da superfície, previa à colagem do extensômetro [24].

No jateamento deve-se isolar a região em torno da área a ser atacada para evitar eventuais contaminações do grampo pela areia, o que acentuaria o desgaste do conjunto cabo/grampo. Usa-se um jato de óxido de alumínio de 50 a 120 microns a uma pressão de 120 psi para jatear a superfície do condutor (Figura 7.3).

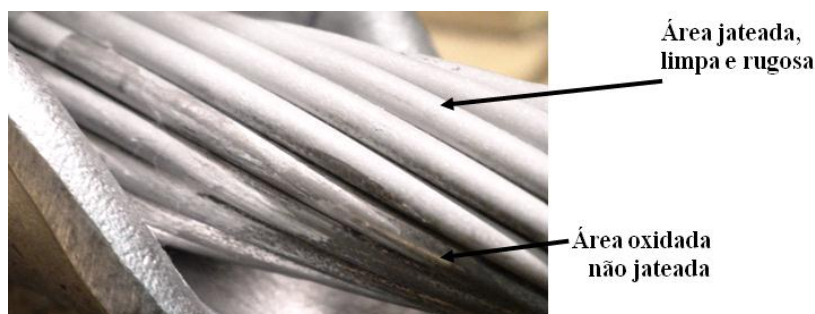


Figura 7.3 – Cabo após jateamento de óxido de alumínio

ii) Limpeza da superfície: A superfície onde extensômetro for colado deve ser limpada com álcool isopropílico e algodão para evitar que impurezas ou resíduos oriundos do processo de lixar ou jateamento fiquem na área de colagem.

iii) Posicionamento do ERE: O local de colagem do extensômetro é marcado na amostra. No entanto, antes de colar, a resistência descrita na embalagem do ERE deve ser checada com uma tolerância de $\pm 5\%$ com o uso de um multímetro. O extensômetro é, inicialmente, colado a uma fita adesiva (*durex* especial para extensometria) que é usada para posicioná-lo na posição desejada (Figura 7.4).

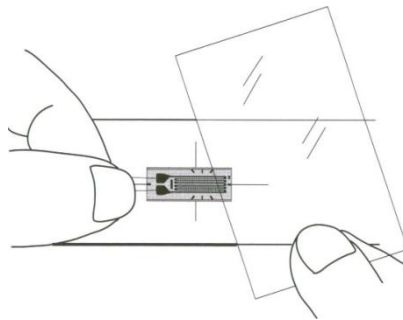


Figura 7.4 – Posicionamento do extensômetro na amostra [24].

iv) Colagem do ERE: Após o uso da fita adesiva, o extensômetro é descolado parcialmente (a borda da fita continua em contato com o cabo para conservar a posição do extensômetro) e aplica-se uma cola especial (*super bonder*®) sob a base do ERE, antes de reposicioná-lo com o auxílio da fita adesiva (Erro! Fonte de referência não encontrada.).

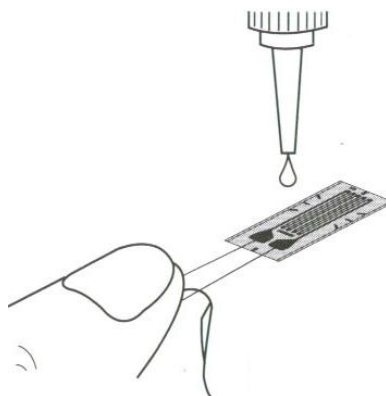


Figura 7.5 – Colocação de cola (*super bonder*®) no extensômetro [24].

Com uma almofada de silicone, o ERE é mantido pressionado contra o fio de alumínio por aproximadamente 1 minuto (Figura 7.6).

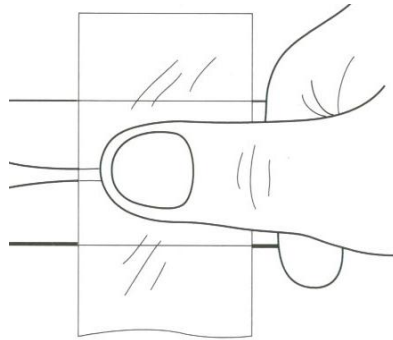


Figura 7.6 – Colagem do extensômetro na amostra [24].

Em seguida a fita adesiva é retirada e é verificado se o extensômetro está bem colado ao fio de alumínio do condutor a ser ensaiado. Para proteger o ERE de impactos mecânicos e de corrosão ou umidade adiciona-se uma camada de silicone (resina protetora) sobre ele (Figura 7.7).

v) Soldagem dos fios do ERE: Para finalizar o procedimento, os fios do ERE são soldados a um cabo que é conectado ao aquisitor de dados (Figura 7.8). Antes da conexão do cabo ao aquisitor é necessário verificar se o valor da resistência elétrica do circuito é compatível ao valor esperado.



Figura 7.7 – Extensômetros no cabo sob a fita adesiva e soldados trocar foto.



Figura 7.8 – Extensômetros com camada de resina protetora e soldados.

7.2.2 Teste dos Extensômetros

Após a colagem dos extensômetros antes de conectá-los ao ADS, é necessário verificar, medindo novamente com o multímetro, se o extensômetro foi danificado no procedimento de colagem ou se a solda não foi corretamente executada.

7.2.3 Calibração dos Extensômetros

Para garantir a confiabilidade da medida fornecida pelo extensômetro este deve ser calibrado e a ponte de Wheatstone deve ser balanceada. O zero da leitura equivale ao valor da tensão referente à carga de esticamento EDS de 20%, sendo esta então a tensão de base para a análise.

7.3 ANEXO C – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DA CARGA DE APERTO

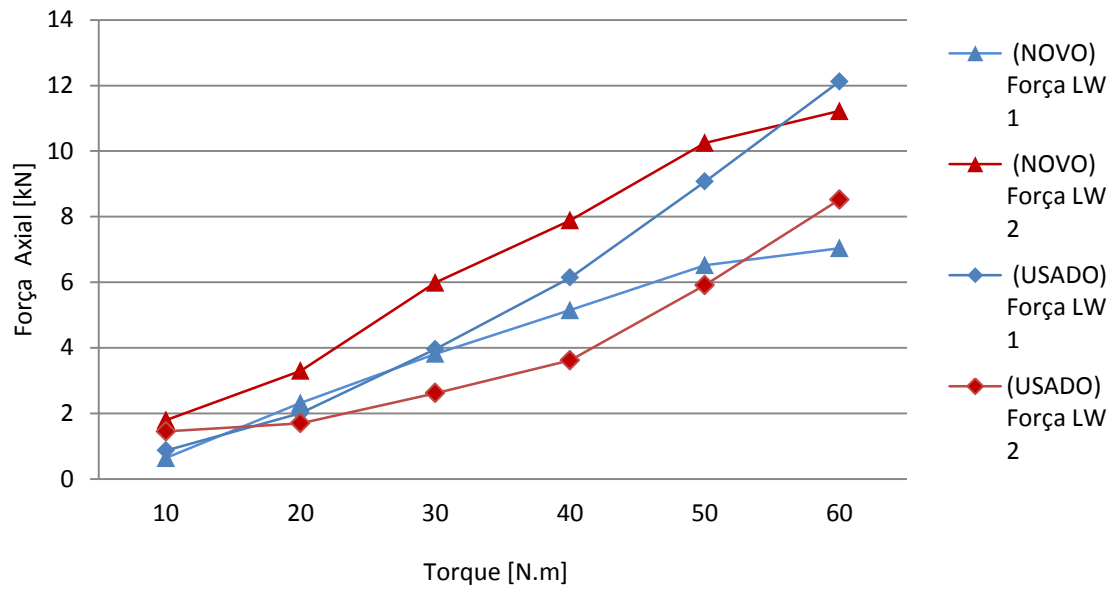
Aqui são apresentados os resultados não inseridos na seção 4.3. Estes são exibidos nas tabelas nos gráficos abaixo.

7.3.1 Resultados da carga de aperto na montagem 1

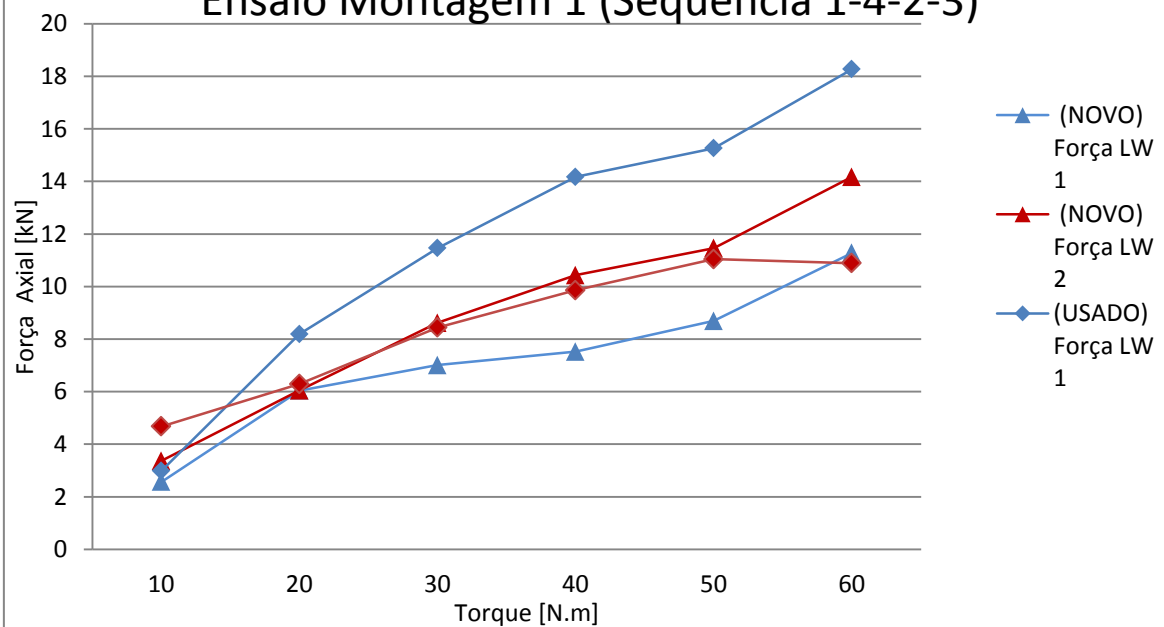
<i>Torque</i> [N.m]	<i>Sequência 2-1-4-3</i>					
	<i>Forças Medidas</i>					
	<i>Conjunto Novo</i>		<i>Conj. Reaperto</i>		<i>Média</i>	
	<i>LW1</i> [kN]	<i>LW2</i> [kN]	<i>LW1</i> [kN]	<i>LW2</i> [kN]	<i>LW1</i> [kN]	<i>LW2</i> [kN]
10	0,64	1,80	0,87	1,45	0,76	1,63
20	2,32	3,30	2,01	1,70	2,17	2,50
30	3,82	5,99	3,96	2,62	3,89	4,31
40	5,15	7,89	6,14	3,62	5,65	5,76
50	6,52	10,25	9,07	5,91	7,80	8,08
60	7,04	11,22	12,12	8,52	9,58	9,87

<i>Torque</i> [N.m]	<i>Sequência 1-4-2-3</i>					
	<i>Forças Medidas</i>					
	<i>Conjunto Novo</i>		<i>Conj. Reaperto</i>		<i>Média</i>	
	<i>LW1</i> [kN]	<i>LW2</i> [kN]	<i>LW1</i> [kN]	<i>LW2</i> [kN]	<i>LW1</i> [kN]	<i>LW2</i> [kN]
10	2,57	3,37	2,99	4,68	2,78	4,03
20	6,04	6,05	8,19	6,29	7,12	6,17
30	7,01	8,62	11,46	8,44	9,24	8,53
40	7,52	10,43	14,17	9,86	10,85	10,15
50	8,69	11,46	15,26	11,04	11,98	11,25

Ensaio Montagem 1 (Sequência 2-1-4-3)



Ensaio Montagem 1 (Sequência 1-4-2-3)



<i>Torque</i> [N.m]	<i>Sequência 1-2-3-4 (Conjunto Novo)</i>			
	<i>Forças Medidas</i>			
	<i>LW1 [kN]</i>	<i>LW2 [kN]</i>	<i>LW3 [kN]</i>	<i>LW4 [kN]</i>
10	1,35	1,27	0,97	2,01
20	5,11	4,15	2,17	4,71
30	9,60	5,81	4,08	6,99
40	12,42	6,41	5,15	7,90
50	14,85	7,26	5,98	9,14
60	18,36	8,88	7,65	10,44

<i>Torque</i> [N.m]	<i>Sequência 1-2-3-4 (primeiro reaperto)</i>			
	<i>Forças Medidas</i>			
	<i>LW1 [kN]</i>	<i>LW2 [kN]</i>	<i>LW3 [kN]</i>	<i>LW4 [kN]</i>
10	5,36	3,25	1,12	4,28
20	6,39	3,94	1,86	4,41
30	10,13	5,34	3,19	5,91
40	13,94	6,44	4,71	8,03
50	17,09	7,80	6,11	9,95
60	19,51	9,18	7,58	10,54

<i>Torque</i> [N.m]	<i>Sequência 1-2-3-4 (segundo reaperto)</i>			
	<i>Forças Medidas</i>			
	<i>LW1 [kN]</i>	<i>LW2 [kN]</i>	<i>LW3 [kN]</i>	<i>LW4 [kN]</i>
10	1,57	2,49	1,12	1,37

20	6,85	4,26	3,65	2,55
30	9,62	5,18	3,69	3,13
40	13,29	7,19	4,84	4,93
50	17,32	7,88	5,91	5,68
60	19,72	8,48	6,49	8,11

<i>Torque</i> [N.m]	<i>Sequência 1-2-3-4 (Média)</i>			
	<i>Forças Medidas</i>			
	<i>LW1 [kN]</i>	<i>LW2 [kN]</i>	<i>LW3 [kN]</i>	<i>LW4 [kN]</i>
10	1,57	2,49	1,12	1,37
20	6,85	4,26	3,65	2,55
30	9,62	5,18	3,69	3,13
40	13,29	7,19	4,84	4,93
50	17,32	7,88	5,91	5,68
60	19,72	8,48	6,49	8,11

<i>Torque</i> [N.m]	<i>Sequência 1-3-2-4 (Conjunto Novo)</i>			
	<i>Forças Medidas</i>			
	<i>LW1 [kN]</i>	<i>LW2 [kN]</i>	<i>LW3 [kN]</i>	<i>LW4 [kN]</i>
10	2,24	2,23	0,26	1,40
20	9,62	4,16	3,75	3,08
30	13,20	5,67	5,37	4,74
40	17,89	6,70	6,41	6,55
50	22,91	8,08	8,34	8,21
60	26,14	9,40	9,17	10,09

<i>Torque</i> [N.m]	<i>Sequência 1-3-2-4 (primeiro reaperto)</i>			
	<i>Forças Medidas</i>			
	<i>LW1 [kN]</i>	<i>LW2 [kN]</i>	<i>LW3 [kN]</i>	<i>LW4 [kN]</i>
10	3,99	0,93	0,15	2,64
20	7,63	2,81	0,90	3,88
30	14,13	4,76	3,63	5,07
40	18,69	5,66	5,12	6,69
50	22,42	6,89	6,66	8,32
60	26,29	8,85	8,62	9,66

<i>Torque</i> [N.m]	<i>Sequência 1-3-2-4 (segundo reaperto)</i>			
	<i>Forças Medidas</i>			
	<i>LW1 [kN]</i>	<i>LW2 [kN]</i>	<i>LW3 [kN]</i>	<i>LW4 [kN]</i>
10	4,24	1,17	0,25	1,30
20	9,55	3,16	1,68	2,56
30	15,60	5,32	4,43	4,12
40	20,84	5,56	5,60	5,66
50	22,50	7,48	6,61	7,41
60	27,87	8,86	8,65	8,97

<i>Torque</i> [N.m]	<i>Sequência 1-3-2-4 (Média)</i>			
	<i>Forças Medidas</i>			
	<i>LW1 [kN]</i>	<i>LW2 [kN]</i>	<i>LW3 [kN]</i>	<i>LW4 [kN]</i>
10	3,49	1,44	0,22	1,78
20	8,93	3,37	2,11	3,17

30	14,31	5,25	4,47	4,64
40	19,14	5,97	5,71	6,30
50	22,61	7,48	7,20	7,98
60	26,77	9,04	8,81	9,57

<i>Torque</i> <i>[N.m]</i>	<i>Sequência 1-2-3-4-Salto (Conjunto Novo)</i>			
	<i>Forças Medidas</i>			
	<i>LW1</i> <i>[kN]</i>	<i>LW2</i> <i>[kN]</i>	<i>LW3</i> <i>[kN]</i>	<i>LW4</i> <i>[kN]</i>
10	12,37	2,94	2,16	4,38
20	22,15	5,30	7,31	6,99
30	26,76	9,64	10,65	12,54
40	-	10,84	15,40	14,59
50	-	13,54	15,07	20,02
60	-	16,72	17,26	22,33

<i>Torque</i> <i>[N.m]</i>	<i>Sequência 1-2-3-4-Salto (primeiro reaperto)</i>			
	<i>Forças Medidas</i>			
	<i>LW1</i> <i>[kN]</i>	<i>LW2</i> <i>[kN]</i>	<i>LW3</i> <i>[kN]</i>	<i>LW4</i> <i>[kN]</i>
10	8,44	5,47	2,60	5,58
20	18,48	6,43	4,59	9,58
30	25,51	8,66	7,47	13,64
40	31,29	10,03	8,55	17,23
50	-	13,06	10,49	19,53
60	-	14,34	13,04	20,19

<i>Torque</i> [N.m]	<i>Sequência 1-2-3-4-Salto (segundo reaperto)</i>			
	<i>Forças Medidas</i>			
	<i>LW1</i> [kN]	<i>LW2</i> [kN]	<i>LW3</i> [kN]	<i>LW4</i> [kN]
10	12,32	2,86	4,68	4,14
20	22,29	5,12	8,69	8,71
30	27,76	6,28	10,68	10,76
40	27,66	7,39	10,91	11,50
50	33,30	8,92	12,50	13,86
60	-	10,04	12,88	15,21

<i>Torque</i> [N.m]	<i>Sequência 1-2-3-4-Salto (Média)</i>			
	<i>Forças Medidas</i>			
	<i>LW1</i> [kN]	<i>LW2</i> [kN]	<i>LW3</i> [kN]	<i>LW4</i> [kN]
10	11,04	3,76	3,15	4,70
20	20,97	5,62	6,86	8,43
30	26,68	8,19	9,60	12,31
40		9,42	11,62	14,44
50		11,84	12,69	17,80
60		13,70	14,39	19,24