



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DAS ÁREAS DE CONTATO E DOS
NÍVEIS DE TENSÃO MÉDIA E ALTERNADA EM
FIOS DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA**

RENATO EWERTON RODRIGUES VIEIRA

Brasília, março de 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DAS ÁREAS DE CONTATO E DOS NÍVEIS DE
TENSÃO MÉDIA E ALTERNADA EM FIOS DE CABOS
CONDUTORES DE ENERGIA**

Renato Ewerton Rodrigues Vieira

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção
do grau de Mestre em Ciências Mecânicas

Banca Examinadora

Prof. José Alexander Araújo, UnB/ENM (Orientador)

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, UnB/ENM

Prof. Luiz Augusto Veloso, UnB/ENM

Brasília, março de 2019

AGRADECIMENTOS

À Deus pela oportunidade de estar vivenciando este momento;

Aos meus pais Vicente e Rosângela e à minha irmã Evelyn pelo carinho e apoio nas mais diversas situações;

À minha esposa Keyla que sempre esteve ao meu lado em todas as etapas da minha vida acompanhando diariamente minha jornada com muito amor e compreensão, sendo uma das principais motivadoras para escrita deste trabalho;

Aos colegas de trabalho por todo auxílio prestado durante a execução dos procedimentos experimentais e por transformar o local de trabalho em um ambiente de amigos;

Aos professores que contribuíram de alguma forma no desenvolvimento desta dissertação pela disponibilidade em retirar dúvidas pertinentes ao assunto.

RESUMO

A fadiga de cabos condutores ocorre devido aos esforços cíclicos gerados nas restrições de movimento durante as vibrações provocadas pelo vento. O objetivo deste trabalho é analisar a tensão mecânica atuante nos condutores de energia em função do parâmetro H/w , onde H representa a carga de esticamento do cabo e w seu peso linear. Os parâmetros H/w estudados são: 1820, 2144 e 2725 m . Serão analisados os cabos CAA TERN, CA ORCHID, CAL 1055 e CAL 823. A tensão média é avaliada por meio de ensaios estáticos. A componente alternada é verificada através de ensaios dinâmicos. Os dados experimentais são obtidos por meio de extensômetros. É apresentado um estudo sobre a formulação de Poffenberger-Swart para determinação da tensão atuante na região de falha dos cabos e sobre o uso da formulação que relaciona o parâmetro H/w com o nível de tensão atuante na camada externa do condutor. A região de maior severidade em relação ao *fretting* entre os fios no interior do grampo de suspensão é analisada através de microscopia confocal para o cabo CAA TERN. Os ensaios foram realizados no laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia da Universidade de Brasília. Os ensaios estáticos e dinâmicos mostraram que os modelos teóricos propostos apresentam ótima correlação com os dados experimentais. As amostras mantiveram erro percentual abaixo de 10% nos ensaios estáticos e abaixo de 8% nos ensaios dinâmicos. Os ensaios estáticos sugeriram que cabos de alumínio tem maior adequação ao modelo teórico. O maior desgaste dos fios ocorreu nas vizinhanças do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, com marcas de *fretting* severas em até 15 mm de distância no interior do grampo.

Palavras chave: Fadiga, Cabo condutor, Parâmetro H/w , *fretting*.

ABSTRACT

Power cable fatigue happens due to cyclical stress caused by restrictions of movement during wind caused vibrations. Objective: to evaluate the mechanical stress applied on the energy conductors as a function of the parameter H/w , where H represents the stretching load of the cable and w its linear weight. The H/w parameters to be studied will be: 1820, 2144 and 2725m. The cables to be evaluated will be ACSR TERN, AAC ORCHID, AAAC 1055 and AAAC 823. The mean stress is evaluated through static trials. The alternating component is verified through dynamic trials. Experimental data is obtained through the use of strain gages. It is presented a study about the Poffenberger-Swart formula to determinate the stress on the cable's fault region and about the use of the formulation relating the H/w parameter with the stress level on the external layer of the conductor. The region in which there's the most fretting between the wires on the inside of the suspension clamp is evaluated through confocal microscopy for the ACSR TERN. The trials were realized on the laboratory of fatigue and structural integrity of conductor cables on the Universidade de Brasília. The static and dynamic trials concluded that the proposed model theory show great correlation with the experimental data. The samples maintained the error under 10% for the static and under 8% for the dynamic trials. The static trials suggested that aluminium cables are better suited to the theory model. The higher rate of wire abrasion occurred on regions close to the last point of contact between the cable and the suspension clamp, with broad fretting marks up to 15mm of distance from the interior of the clamp.

Key words: Fatigue, power cable, H/w parameter, fretting

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização e Apresentação do Problema	1
1.2	Objetivo.....	3
1.3	Estrutura do Trabalho.....	4
2	REVISÃO TEÓRICA - FADIGA.....	5
2.1	Caracterização do Processo de Fadiga	5
2.2	Definições Fundamentais	7
2.3	Projeto Contra Fadiga: Tensão x Vida	10
2.4	Efeito da Tensão Média na Resistência à Fadiga	12
2.5	Conceito de Dano em Fadiga: Cálculo da Vida Remanescente	15
3	FADIGA EM CABOS	18
3.1	Fadiga em Cabos Condutores de Energia.....	18
3.2	Tipos de Cabos Condutores.....	19
3.3	Tipos de Vibração de Cabos Condutores	21
3.3.1	Vibração eólica.....	23
3.3.2	Galope	24
3.3.3	Oscilações de subvão	25
3.4	Mecanismo de Falha.....	25
3.5	Esforços Dinâmicos em Cabos Condutores: A Formulação de Poffenberger-Swart	27
3.6	Metodologias de Análise da Vida Residual do Cabo Condutor	30
3.6.1	Máxima deformação do IEEE	30
3.6.2	Limite de resistência do EPRI.....	30
3.6.3	Método de estimativa de tempo de vida do condutor da CIGRE	31
3.7	Esforços Estáticos em Cabos Condutores	32
3.7.1	Every Day Stress (EDS).....	33
3.7.2	Parâmetro H/w.....	33
4.	PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	Cabos Condutores Analisados.....	36
4.2	Bancada de Ensaio Experimentais	37
4.3	Preparação da Amostra na Bancada de Ensaio Experimentais	41

4.4	Instrumentação da Amostra.....	44
4.4.1	Extensometria.....	44
4.4.2	Posicionamento dos sensores de deslocamento.....	49
4.5	Execução dos Ensaios Estáticos e Dinâmicos.....	50
4.5.1	Ensaio estático.....	51
4.5.2	Ensaio dinâmico.....	53
4.6	Microscopia.....	55
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1	Resultados dos Ensaios Estáticos.....	59
5.1.1	Cabo condutor: TERN.....	59
5.1.2	Cabo condutor: ORCHID.....	62
5.1.3	Cabo condutor: CAL 1055	64
5.1.4	Cabo condutor: CAL 823	66
5.2	Resultados dos Ensaios Dinâmicos	68
5.2.1	Cabo condutor: TERN.....	69
5.2.2	Cabo condutor: ORCHID.....	73
5.2.3	Cabo condutor: CAL 1055	78
5.2.4	Cabo condutor: CAL 823	83
5.3	Microscopia.....	87
6.	CONCLUSÕES.....	98
6.1	Conclusão.....	98
6.2	Proposta para Trabalhos Futuros.....	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
A.	APÊNDICE A	103
B.	APÊNDICE B	108
C.	APÊNDICE C	115

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 - Elementos de nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos (modificado: GARCIA, 2012).</i>	6
<i>Figura 2.2 - Mecanismo de propagação da trinca (FADEL, 2010).</i>	6
<i>Figura 2.3 - (a) Superfície de fratura de um fio de um cabo CAL 900 MCM, (b) Local de iniciação da trinca e marcas de praia (KALOMBO, 2016).</i>	7
<i>Figura 2.4 - Tensões cíclicas em fadiga: (a) tensão alternada reversa; (b) tensão flutuante.</i>	8
<i>Figura 2.5 - Tensões cíclicas em fadiga: (a) Blocos de carregamento (b) Ciclo Aleatório.</i>	8
<i>Figura 2.6 - Parâmetros básicos de um ciclo de carregamento.</i>	9
<i>Figura 2.7 - Métodos para o levantamento da Curva S-N: a) Método para poucos corpos de prova; b) Tensão constante (modificado: GARCIA, 2012).</i>	11
<i>Figura 2.8 - Curva S-N para um aço maciço e para uma liga de alumínio.</i>	12
<i>Figura 2.9 - Curvas S-N para a liga de alumínio 7075-T6 em ensaios de carregamento axial para diferentes valores de tensão média (modificado: DOWLING, 2013).</i>	13
<i>Figura 2.10 - Diagrama de vida constante generalizado (modificado: SHIGLEY, 2011).</i>	14
<i>Figura 2.11 - Modelo de RainFlow (modificado: WIRSCHING, 1997).</i>	15
<i>Figura 2.12 - Modelo de Palmgren-Miner: Acúmulo de dano linear (modificado: LEE, 2005).</i>	16
<i>Figura 3.1 - Acessórios utilizados em cabos condutores de energia: a) Armor Rod; b) Stockbridge Damper; c) Armor Grip; d) Cushion Grip (PERFORMED LINE PRODUCTS, 2013).</i>	18
<i>Figura 3.2 - Comparação das propriedades elétricas e mecânicas de ligas de alumínio para fios de 3 mm de diâmetro (modificado: BARBER, 1995).</i>	21
<i>Figura 3.3 - Tipos de vibração de cabos condutores (modificado: EPRI, 2006).</i>	21
<i>Figura 3.4 - Número de Strouhal em função do número de Reynolds. Curva obtida experimentalmente para escoamento sobre cilindros circulares (modificado: FUCHS, 1992).</i>	23
<i>Figura 3.5 - Regimes de fluxo em torno de um cilindro liso (LIENHARD, 1966).</i>	24
<i>Figura 3.6 - Pontos de origem de trincas devido ao fretting.</i>	26
<i>Figura 3.7 - Configuração esquemática do problema de contato entre dois cilindros (equivalente a dois fios de camadas distintas do cabo) (FADEL, 2010).</i>	26
<i>Figura 3.8 - Construção típica de cabos condutores de energia (CIGRE, 2008).</i>	27
<i>Figura 3.9 - Montagem esquemática cabo/grampo com destaque para a posição padrão para medida da amplitude de deslocamento Y_b (ROCHA, 2016).</i>	28
<i>Figura 3.10 - Vibrógrafo VIBREC 500 WT.</i>	29
<i>Figura 3.11 - a) Matriz obtida por meio de um vibrógrafo extrapolada pelo período de um ano (BELLORIO, 2009); b) Instalação do vibrógrafo modelo PAVICA (modificado: ROCTEST, 2005).</i>	32
<i>Figura 4.1 - Seção transversal dos cabos condutores utilizados durante a pesquisa: a) TERN; b) ORCHID; c) CAL 1055; d) CAL 823 (ALUBAR, 2010).</i>	37
<i>Figura 4.2 - Bancada de ensaios experimentais do laboratório de fadiga e integridade estrutural da Universidade de Brasília (modificado: ROCHA, 2016).</i>	38
<i>Figura 4.3 - Talha de alavanca.</i>	39
<i>Figura 4.4 - Célula de carga CSR-5000 kgf.</i>	39
<i>Figura 4.5 - Blocos móveis das bancadas A, B e C.</i>	40
<i>Figura 4.6 - Blocos fixos com trilhos para deslocamento do excitador eletromecânico.</i>	40
<i>Figura 4.7 - Sistema de ar condicionado e isolamento térmico.</i>	41
<i>Figura 4.8 - a) Polias de sustentação utilizadas para movimentação do cabo durante o esticamento; b) Elementos de proteção.</i>	41
<i>Figura 4.9 - a) Bobina; b) Grampo de suspensão monoarticulado Forjasul 55101/003.</i>	42
<i>Figura 4.10 - Conexão da célula de carga através de um grampo de ancoragem.</i>	42
<i>Figura 4.11 - Braço de alavanca e talha de alavanca.</i>	43

<i>Figura 4.12 - Caracterização do ERE utilizado: PA-13-120BA-350-L (Excel Sensores).</i>	44
<i>Figura 4.13 - Preparo da camada externa do cabo para colagem dos extensômetros.</i>	45
<i>Figura 4.14 - Limpeza da camada externa do cabo para colagem dos extensômetros.</i>	45
<i>Figura 4.15 - Fixação dos extensômetros à amostra.</i>	46
<i>Figura 4.16 - a) Extensômetros colados em todos os fios de alumínio da camada externa do cabo condutor para realização dos ensaios estáticos; b) Extensômetros colados nos três fios mais altos e opostos ao UPC para realização dos ensaios dinâmicos.</i>	47
<i>Figura 4.17 - Soldagem dos fios dos extensômetros.</i>	48
<i>Figura 4.18 - Adição de uma camada de silicone para proteção dos extensômetros.</i>	48
<i>Figura 4.19 - Conexão entre o Shaker e a amostra.</i>	49
<i>Figura 4.20 - Instrumentação da seção transversal 89 mm distante do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão.</i>	50
<i>Figura 4.21 - Identificação dos pontos de referência e da área de interesse do ensaio de análise topográfica dos fios do cabo CA TERN.</i>	56
<i>Figura 4.22 - Procedimento de soldagem dos fios que contenham possíveis marcas de contato a serem analisada na zona de interesse do ensaio.</i>	57
<i>Figura 4.23 - Eixo de referência com base no UPC para identificação das marcas de contato que serão analisadas no microscópio.</i>	57
<i>Figura 4.24 - Microscópio confocal Olympus LEXT OLS 4100.</i>	58
<i>Figura 4.25 - Distância entre o UPC e o centro das marcas de contato identificadas para análise topográfica.</i>	58
<i>Figura 5.1 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor TERN.</i>	60
<i>Figura 5.2 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo TERN.</i>	61
<i>Figura 5.3 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo TERN em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento.</i>	61
<i>Figura 5.4 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor ORCHID.</i>	62
<i>Figura 5.5 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo ORCHID.</i>	63
<i>Figura 5.6 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo ORCHID em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento.</i>	63
<i>Figura 5.7 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor CAL 1055.</i>	64
<i>Figura 5.8 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo CAL 1055.</i>	65
<i>Figura 5.9 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo CAL 1055 em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento.</i>	66
<i>Figura 5.10 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor CAL 823.</i>	66
<i>Figura 5.11 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo CAL 823.</i>	67
<i>Figura 5.12 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo CAL 823 em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento.</i>	68
<i>Figura 5.13 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor TERN em função da amplitude de deslocamento (H/w=1820 m).</i>	69
<i>Figura 5.14 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo TERN (H/w=1820 m).</i>	70
<i>Figura 5.15 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor TERN em função da amplitude de deslocamento (H/w=2144 m).</i>	71
<i>Figura 5.16 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo TERN (H/w=2144 m).</i>	71
<i>Figura 5.17 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor TERN em função da amplitude de deslocamento (H/w=2725 m).</i>	72
<i>Figura 5.18 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo TERN (H/w=2725 m).</i>	72
<i>Figura 5.19 - Erro percentual médio entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo TERN em função do parâmetro H/w.</i>	73

<i>Figura 5.20 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor ORCHID em função da amplitude de deslocamento ($H/w=1820$ m).</i>	74
<i>Figura 5.21 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo ORCHID ($H/w=1820$ m).</i>	74
<i>Figura 5.22 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor ORCHID em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2144$ m).</i>	75
<i>Figura 5.23 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo ORCHID ($H/w=2144$ m).</i>	76
<i>Figura 5.24 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor ORCHID em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2725$ m).</i>	76
<i>Figura 5.25 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo ORCHID ($H/w=2725$ m).</i>	77
<i>Figura 5.26 - Erro percentual médio entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo ORCHID em função do parâmetro H/w.</i>	78
<i>Figura 5.27 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor CAL 1055 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=1820$ m).</i>	79
<i>Figura 5.28 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 1055 ($H/w=1820$ m).</i>	79
<i>Figura 5.29 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor CAL 1055 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2144$ m).</i>	80
<i>Figura 5.30 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 1055 ($H/w=2144$ m).</i>	80
<i>Figura 5.31 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor CAL 1055 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2725$ m).</i>	81
<i>Figura 5.32 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 1055 ($H/w=2725$ m).</i>	82
<i>Figura 5.33 - Erro percentual médio entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 1055 em função do parâmetro H/w.</i>	82
<i>Figura 5.34- Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor CAL 823 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=1820$ m).</i>	83
<i>Figura 5.35 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 823 ($H/w=1820$ m).</i>	84
<i>Figura 5.36 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor CAL 823 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2144$ m).</i>	84
<i>Figura 5.37 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 823 ($H/w=2144$ m).</i>	85
<i>Figura 5.38 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor CAL 823 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2725$ m).</i>	86
<i>Figura 5.39 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 823 ($H/w=2725$ m).</i>	86
<i>Figura 5.40 - Erro percentual médio entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 823 em função do parâmetro H/w.</i>	87
<i>Figura 5.41 - Parâmetros de medida das marcas de contato entre os fios do cabo condutor CAA TERN.</i>	88
<i>Figura 5.42 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=1820$ m e $Y_b=0,84$ mm a uma distância $d_1=8,58$ mm do UPC.</i>	88
<i>Figura 5.43 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=1820$ m $Y_b=0,84$ mm).</i>	89
<i>Figura 5.44 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=1820$ m e $Y_b=0,88$ mm a uma distância $d_2=12,14$ mm do UPC.</i>	91
<i>Figura 5.45 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=1820$ m e $Y_b=0,98$ mm a uma distância $d_2=11,23$ mm do UPC.</i>	92

<i>Figura 5.46 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2144$ m e $Y_b=0,80$ mm a uma distância $d_2=11,42$ mm do UPC.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 5.47 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2144$ m e $Y_b=0,84$ mm a uma distância $d_2=9,46$ mm do UPC.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5.48 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2144$ m e $Y_b=0,93$ mm a uma distância $d_1=5,30$ mm do UPC.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5.49 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2725$ m e $Y_b=0,74$ mm a uma distância $d_1=1,43$ mm do UPC.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5.50 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2725$ m e $Y_b=0,74$ mm a uma distância $d_2=10,91$ mm do UPC.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 5.51 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2725$ m e $Y_b=0,78$ mm a uma distância $d_1=8,13$ mm do UPC.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 5.52 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2725$ m e $Y_b=0,86$ mm a uma distância $d_1=3,35$ mm do UPC.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 5.53 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2725$ m e $Y_b=0,86$ mm a uma distância $d_1=12,37$ mm do UPC.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 5.54 - Desgaste dos fios da camada externa do cabo devido ao contato com o grampo de suspensão. ...</i>	<i>97</i>
<i>Figura A.1 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo TERN.</i>	<i>104</i>
<i>Figura A.2 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo ORCHID.</i>	<i>105</i>
<i>Figura A.3 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo CAL 1055.</i>	<i>106</i>
<i>Figura A.4 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo CAL 823.</i>	<i>107</i>
<i>Figura B.1 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo TERN em função da amplitude de deslocamento ($H/w=1820$ m).</i>	<i>109</i>
<i>Figura B.2 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo TERN em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2144$ m).</i>	<i>109</i>
<i>Figura B.3 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo TERN em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2725$ m).</i>	<i>110</i>
<i>Figura B.4 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo ORCHID em função da amplitude de deslocamento ($H/w=1820$ m).</i>	<i>110</i>
<i>Figura B.5 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo ORCHID em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2144$ m).</i>	<i>111</i>
<i>Figura B.6 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo ORCHID em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2725$ m).</i>	<i>111</i>
<i>Figura B.7 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 1055 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=1820$ m).</i>	<i>112</i>
<i>Figura B.8 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 1055 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2144$ m).</i>	<i>112</i>
<i>Figura B.9 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 1055 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2725$ m).</i>	<i>113</i>
<i>Figura B.10 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 823 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=1820$ m).</i>	<i>113</i>
<i>Figura B.11 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 823 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2144$ m).</i>	<i>114</i>
<i>Figura B.12 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 823 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2725$ m).</i>	<i>114</i>
<i>Figura C.1 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=1820$ m $Y_b=0,88$ mm).</i>	<i>116</i>
<i>Figura C.2 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=1820$ m $Y_b=0,98$ mm).</i>	<i>117</i>
<i>Figura C.3 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=2144$ m $Y_b=0,80$ mm).</i>	<i>118</i>

<i>Figura C.4 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=2144$ m $Y_b=0,84$ mm).....</i>	<i>119</i>
<i>Figura C.5 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=2144$ m $Y_b=0,93$ mm).....</i>	<i>120</i>
<i>Figura C.6 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=2725$ m $Y_b=0,74$ mm).....</i>	<i>121</i>
<i>Figura C.7 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=2725$ m $Y_b=0,78$ mm).....</i>	<i>122</i>
<i>Figura C.8 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=2725$ m $Y_b=0,86$ mm).....</i>	<i>123</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 3.1 - Propriedades dos fios de alumínio liga 1350 e 6201 (KALOMBO, 2016).</i>	20
<i>Tabela 3.2 - Movimentos induzidos pelo vento (EPRI, 2006).</i>	22
<i>Tabela 3.3 - Linhas danificadas em função do nível de EDS (CIGRE, 1999).</i>	33
<i>Tabela 3.4 - Valores recomendados do parâmetro H/w em função das características do terreno (CIGRE, 1999).</i>	34
<i>Tabela 4.1 - Propriedades geométricas e mecânicas dos cabos condutores utilizados durante a pesquisa (NEXANS, 2013).</i>	36
<i>Tabela 4.2 - Planejamento do ensaio estático.</i>	52
<i>Tabela 4.3 - Constante de P-S em função do parâmetro H/w e do tipo de cabo condutor.</i>	54
<i>Tabela 4.4 - Parâmetros de ensaio para análise topográfica com o cabo CA TERN.</i>	56
<i>Tabela 5.1 - Níveis teóricos de tensão média e deformação em função do tipo de fio que compõe a camada externa do condutor.</i>	59
<i>Tabela 5.2 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão ($H/w=1820$ m $Y_b=0,84$ mm).</i>	90
<i>Tabela C.1 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão ($H/w=1820$ m $Y_b=0,88$ mm).</i>	116
<i>Tabela C.2 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão ($H/w=1820$ m $Y_b=0,98$ mm).</i>	117
<i>Tabela C.3 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão ($H/w=2144$ m $Y_b=0,80$ mm).</i>	118
<i>Tabela C.4 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão ($H/w=2144$ m $Y_b=0,84$ mm).</i>	119
<i>Tabela C.5 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão ($H/w=2144$ m $Y_b=0,93$ mm).</i>	120
<i>Tabela C.6 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão ($H/w=2725$ m $Y_b=0,74$ mm).</i>	121
<i>Tabela C.7 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão ($H/w=2725$ m $Y_b=0,78$ mm).</i>	122
<i>Tabela C.8 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão ($H/w=2725$ m $Y_b=0,86$ mm).</i>	123

LISTA DE ABREVIACÕES

ASTM	American Society for Testing and Materials
CA (AAC)	Condutores de Alumínio (<i>All Aluminum Conductor</i>)
CAA (ACSR)	Condutores de Alumínio com Alma de Aço (<i>Aluminum Conductor Steel Reinforced</i>)
CAL (AAAC)	Condutores de Alumínio Liga (<i>All Aluminum Alloy Conductor</i>)
CALA (ACAR)	Condutores de Alumínio Reforçados com Alumínio Liga (<i>Aluminum Conductor Aluminum Alloy Reinforced</i>)
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Electriques (<i>International Council on Large Electric Systems</i>)
EDS	Every Day Stress
EPRI	Electric Power Research Institute
ERE	Extensômetro de Resistência Elétrica
IACS	International Annealed Copper Standard
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LT	Linha de Transmissão
P-S	Poffenberger-Swart
UnB	Universidade de Brasília
UPC	Último Ponto de Contato entre o cabo e o grampo de suspensão

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

A	Razão de amplitude.
A	Área da elipse gerada pela marca de contato, mm ²
a	Constante de Basquim
A_a	Área ocupada pelos fios de aço do condutor, m ² .
A_{al}	Área ocupada pelos fios de alumínio do condutor, m ² .
b	Constante de Basquim
D	Dano linear acumulado.
d	Distância entre o UPC e a marca de contato, mm.
d	Diâmetro de um fio da camada mais externa do condutor, mm.
d_a	Diâmetro de um fio de aço, mm.
d_{al}	Diâmetro de um fio de alumínio, mm.
d_c	Diâmetro do condutor, m.
E	Módulo de elasticidade, MPa.
E_a	Módulo de elasticidade do fio de aço, MPa.
E_{al}	Módulo de elasticidade do fio de alumínio, MPa.
EI	Rigidez do cabo à flexão, kgf.
$EI_{mín}$	Mínima rigidez do cabo à flexão, kgf.
f	Frequência de carregamento, Hz.
f_s	Frequência de desprendimento de vórtices, Hz.
g	Constante gravitacional, m/s ² .
H	Carga de esticamento, kgf.
H	Semieixo maior da elipse gerada pela marca de contato, mm.
K	Fator de conversão da formulação de P-S, MPa/mm.
L	Comprimento do vão, m.
N	Número de ciclos.
n	Fator de projeto.
n_a	Número de fios de aço.
n_{al}	Número de fios de alumínio.
n_i	Número de ciclos aplicado a um componente.
$N_{i,f}$	Número de ciclos até a falha sob um mesmo nível de tensão.
N_f	Número de ciclos até a falha.
P	Carga radial compressiva.
Q	Carga axial cíclica.
R	Razão de tensões.
Re	Número de Reynolds.
s	Catenária produzida pelo cabo no vão

S_e	Limite de resistência à fadiga, MPa.
S_m	Tensão média atuante no condutor, MPa.
S_a	Tensão alternada atuante no condutor, MPa.
$S_{m,a}$	Tensão média atuante nos fios de aço do condutor, MPa.
$S_{m,al}$	Tensão média atuante nos fios de alumínio do condutor, MPa.
St	Número de Strouhal.
S_{ut}	Limite de resistência à tração, MPa.
S_y	Limite de resistência ao escoamento, MPa.
t	Tempo, s.
U	Velocidade do vento, m/s.
V	Vida.
V	Semieixo menor da elipse gerada pela marca de contato, mm
V_r	Vida remanescente.
w	Peso específico do condutor, kgf/km
x	Distância entre o ponto de medida da amplitude de deslocamento do cabo e o último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, mm.
Y_b	Amplitude de deslocamento pico a pico, mm.

Gregos

ε	Deformação, strain.
ν	Viscosidade cinemática do fluido, m ² /s.
π	Constante pi.
ρ_a	Massa específica dos fios de aço do condutor, kg/m ³ .
ρ_{al}	Massa específica dos fios de alumínio do condutor, kg/m ³ .
σ	Tensão, MPa.
σ_a	Tensão alternada ou amplitude de tensão, MPa.
σ_{exp}	Tensão obtida experimentalmente, MPa.
σ_m	Tensão média, MPa.
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima, MPa.
$\sigma_{m\acute{i}n}$	Tensão mínima, MPa.
σ_r	Varição de tensão, MPa.
σ_{P-S}	Tensão obtida analiticamente pela formulação de Poffenberger-Swart

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Apresentação do Problema

As linhas de transmissão de alta tensão são compostas basicamente pelos seguintes elementos: cabos condutores de energia, acessórios e estruturas isolantes, estruturas de suporte e suas fundações, cabos de guarda ou para-raios, aterramentos e acessórios diversos. Tendo em vista que o cabo condutor é o elemento mais importante da linha, podendo contribuir com até 40% do custo em investimento de capital da rede, fica evidente a importância de estudos para prevenção de falhas inesperadas e conhecimento da vida remanescente do condutor (FRONTIN, 2010).

A falha inesperada de um cabo condutor em uma linha de transmissão implica num impacto financeiro gigantesco devido ao corte de energia elétrica nos diversos segmentos de consumidores, além de prejuízos incomensuráveis como a perda de vidas e danos a imagem do país no cenário mundial. Em 2001 por exemplo, aproximadamente 67 milhões de habitantes das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil ficaram sem energia elétrica devido a um *blackout* provocado pela ruptura por fadiga de uma linha de transmissão de 460 kV que atravessava o Rio Paraná, no estado de São Paulo. A falha do cabo condutor provocou a paralisação das atividades de todo o setor produtivo dessas regiões devido ao desligamento de 13 das 18 turbinas da usina de Itaipu, a qual era responsável por cerca de 30% do fornecimento de energia de todo o país, resultando num prejuízo estimado de 100 milhões de reais (FRONTIN, 2010).

A maioria das falhas em cabos condutores estão relacionadas ao efeito de forças eólicas que provocam vibrações de alta frequência e baixa amplitude que levam à fadiga do material (CIGRE, 2008). Este fato destaca a necessidade de uma base de conhecimento acerca do fenômeno de fadiga em cabos condutores de energia no que tange ao projeto de novas linhas de transmissão (LT) ou aos planos de manutenção desenvolvidos pelas empresas concessionárias.

O estudo da vida em serviço de cabos aéreos de transmissão torna-se um problema de grande complexidade ao englobar fenômenos não lineares atuando em conjunto à fadiga devido à flexão alternada. Dentre estes fenômenos destaca-se o *fretting*, o qual ocorre sempre que uma junção entre componentes é submetida a forças oscilatórias, dando origem a deslocamentos tangenciais ao longo da interface de contato (HILLS, 1994). O movimento relativo entre os fios do próprio condutor ou restrições de movimento impostas por ferragens, inserem o *fretting* no contexto de análise da vida do cabo ao propiciar a nucleação de trincas devido ao desgaste superficial e à concentração de tensões provocadas por cargas de contato. Parâmetros como pressão de contato, tensão remota, amplitude de deslizamento entre interfaces de contato e quantidade de ciclos em um sistema cabo-grampo são difíceis de serem quantificados; além disso, não é possível realizar uma análise de todo o sistema a partir da resistência individual de um fio com relação à fadiga por *fretting* (ZHOU, 1994).

Junto aos esforços dinâmicos provocados pela ação do vento, o cabo condutor está submetido a tensões oriundas de carregamento estático devido à carga de esticamento necessária para montagem nas torres de transmissão. Em 1953 o conselho internacional de grandes sistemas elétricos (CIGRE) estabeleceu um conceito para análise do efeito da carga de esticamento na vida em serviço de cabos condutores, conhecido no meio científico como *Every Day Stress* (EDS), o qual define a maior carga de esticamento que o cabo pode ser submetido, considerando a temperatura de maior incidência na região de montagem, sem que nenhum risco de falha devido à vibrações eólicas ocorra durante sua vida em serviço (CIGRE, 1999). O EDS é expresso como um percentual da carga de ruptura do condutor, com valores frequentes entre 15 e 20%. Embora o EDS tenha estabelecido um critério de segurança contra falha por fadiga devido à vibração eólica, parâmetros que exercem grande influência na resistência à fadiga do condutor não foram levados em consideração, como por exemplo: o diâmetro e a configuração do cabo, os quais estão diretamente relacionados à capacidade de dissipar energia mecânica durante a vibração.

Tendo em vista as limitações do EDS, um novo conceito foi proposto para estabelecer um melhor guia contra fadiga devido às vibrações eólicas, o qual está relacionado à catenária produzida pelo cabo entre duas torres de transmissão. O parâmetro H/w , onde H representa a carga de esticamento do cabo e w seu peso por unidade de comprimento, está relacionado com a tensão atuante nos fios que compõem o cabo condutor e conseqüentemente às suas propriedades de auto amortecimento. A vantagem proposta por esse conceito é apresentar para um mesmo valor de H/w a mesma vida em campo independente do cabo analisado; pois, para uma mesma flecha gerada no vão, todos os condutores devem apresentar a mesma resistência à fadiga (BARRETT, 2001). Entretanto, apesar do nível de tensão média atuante nos fios do condutor estar relacionado ao parâmetro H/w , sabe-se que a vida em fadiga deste componente sofre grande influência da componente alternada de tensão, sendo observado uma resistência à fadiga distinta mesmo em cabos submetidos ao mesmo H/w .

Apesar de se tratar de uma metodologia relativamente nova, o parâmetro H/w vem sendo bastante utilizado para projeto contra fadiga de cabos condutores pelas empresas concessionárias, destacando a importância do levantamento de dados acerca do assunto. Uma vez que a tensão média atuante nos fios do condutor pode ser determinada em termos do parâmetro H/w , o estudo da relação existente entre essas variáveis é fundamental para melhor compreensão do mecanismo de falha, tornando-se uma das motivações deste trabalho.

Além do projeto do condutor contra fadiga, o plano de manutenção da LT é essencial para prevenção de falhas. A utilização de uma metodologia experimental capaz de se aproximar das reais condições de trabalho e apresentar resultados satisfatórios em relação ao comportamento dinâmico do condutor é fundamental para garantir a integridade do cabo e evitar eventuais acidentes. A formulação de Poffenberger-Swart, apresentada em 1965, relaciona a tensão nominal na zona de falha à amplitude de deslocamento por flexão do cabo em um ponto distante de 3,5" (89 mm) do último ponto de contato (UPC) entre o cabo e o grampo de suspensão usado em sua fixação na torre de transmissão (POFFENBERGER, 1965). Tal metodologia é utilizada até os dias atuais para determinação da vida remanescente do cabo e sua efetividade será verificada no decorrer deste trabalho para diferentes tipos de condutores.

A ferramenta mais utilizada para estudo do processo de desgaste durante o projeto e manutenção de linhas de transmissão, a fim de evitar a ocorrência de falhas, baseia-se na utilização da formulação de P-S em conjunto com as curvas de resistência à fadiga, as quais relacionam o valor nominal, S, da tensão aplicada no condutor à respectiva vida, N (FADEL, 2010). A literatura mostra que carregamentos variáveis com tensão média diferente de zero provocam alterações significativas nas curvas de resistência a fadiga. A presença de uma tensão média não nula positiva ($\sigma_m > 0$) por exemplo, desloca a curva para a esquerda, provocando uma redução no número de ciclos, o que pode ser explicado pela contribuição do carregamento para propagação de trincas. Já uma tensão média não nula negativa ($\sigma_m < 0$) contribui com o fechamento de trincas, resultando num deslocamento da curva no sentido de maiores vidas.

Os esforços dinâmicos atuantes no cabo condutor em uma linha de transmissão podem ser determinados através de um equipamento conhecido como vibrógrafo, o qual é responsável pela leitura da amplitude de deslocamento (Y_b) para utilização da formulação de P-S. Já as curvas de resistência à fadiga podem ser obtidas por meio de ensaios em ambiente laboratorial em função dos níveis de tensão média e alternada atuantes na zona de falha do cabo condutor, evidenciando a importância de avaliar-se experimentalmente o comportamento destas em relação aos modelos teóricos. Neste contexto, este trabalho propõe metodologias de ensaio para avaliação da formulação que correlaciona o nível de tensão média atuante no cabo condutor em termos do parâmetro H/w e para avaliação da formulação de P-S utilizada para determinar a tensão dinâmica atuante na zona de falha do condutor.

1.2 Objetivo

O presente trabalho é de natureza experimental e tem como objetivo geral analisar, via extensometria, o comportamento dos níveis de tensão média e alternada atuantes na zona de falha de cabos condutores de energia em termos do tipo de cabo utilizado e do parâmetro H/w. Pretende-se ainda analisar por microscopia confocal a região de maior severidade com relação ao *fretting* entre os fios no interior do grampo de suspensão. Durante a pesquisa serão analisados quatro tipos de cabos: um condutor de alumínio (CA ORCHID), um condutor de alumínio com alma de aço (CAA TERN) e dois condutores de alumínio liga (CAL 1055 e CAL 823).

A partir dos dados obtidos experimentalmente pretende-se atingir os seguintes objetivos:

- Avaliar o uso da formulação que relaciona o parâmetro H/w com o nível de tensão média, S_m , atuante nos fios de alumínio da camada externa do cabo condutor.
- Avaliar a efetividade da formulação de P-S para determinação da tensão dinâmica atuante na zona de falha do condutor.
- Determinar, no interior do grampo de suspensão, a região crítica em relação à severidade das marcas de *fretting* geradas entre os fios do cabo condutor devido ao contato fio-fio durante a vibração.

Este trabalho visa cooperar com a contínua pesquisa desenvolvida acerca do fenômeno de fadiga em cabos condutores de energia, trazendo novos dados principalmente ao laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia da Universidade de Brasília, local de desenvolvimento da presente pesquisa, contribuindo com novas informações para melhor esclarecimento deste fenômeno de falha.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, a começar por este primeiro, no qual foi apresentado o objetivo do trabalho junto a uma contextualização do tema, informando ao leitor a motivação em que se baseia o estudo de fadiga em cabos condutores e o impacto que falhas inesperadas podem provocar. Foram apresentados ainda alguns dos vários fenômenos responsáveis por eventuais falhas desses elementos além de trazer as principais metodologias empregadas para análise do problema.

O segundo capítulo será destinado a uma rápida revisão teórica acerca do fenômeno de fadiga. Neste capítulo serão abordados conceitos fundamentais que servirão como base para o permitir ao leitor o pleno entendimento dos fatores que influenciam a vida destes componentes durante sua vida em serviço.

A apresentação do tema fadiga em cabos condutores propriamente dita encontra-se no terceiro capítulo. Os tipos de vibrações responsáveis por provocar danos aos condutores e as principais metodologias utilizadas para projeto são apresentadas neste capítulo.

O procedimento experimental encontra-se descrito no quarto capítulo, onde será apresentado o passo a passo adotado durante a execução dos ensaios estáticos e dinâmicos. O procedimento adotado para análise das marcas de contato entre os fios do cabo condutor também é apresentado neste capítulo, assim como a descrição da técnica de extensometria.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos por meio do programa experimental, junto à discussão acerca dos dados coletados.

O sexto capítulo destina-se às conclusões e as considerações finais.

Por fim, encontram-se as referências pertinentes ao assunto e os apêndices gerados durante a execução do trabalho.

2 REVISÃO TEÓRICA - FADIGA

2.1 Caracterização do Processo de Fadiga

De acordo com a *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 1996), "Fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado que ocorre num material sujeito a condições que produzem, num ponto ou em vários pontos, tensões ou deformações dinâmicas capazes de culminar em trincas ou numa fratura completa após um número suficiente de variações de carga".

Os primeiros estudos sobre o comportamento de materiais metálicos sujeitos a esforços dinâmicos foram feitos por August Wöhler na década de 1850. Uma informação muito importante levantada por Wöhler foi a apresentação das curvas S-N, as quais mostram os resultados de ensaios de fadiga correlacionando os principais fatores deste tipo de falha: a existência de tensões cíclicas e um número de ciclos suficientemente alto para que ocorram a nucleação e a propagação de trincas até a falha.

Em geral, a falha provocada por fadiga é catastrófica; pois, mesmo se tratando de materiais dúcteis, a ruptura resultante deste fenômeno não provoca deformações plásticas consideráveis. Em outras palavras, diferentemente da falha devido ao escoamento do material, o rompimento devido à fadiga costuma ocorrer repentinamente e sem grandes alterações macroscópicas na estrutura do material.

O desenvolvimento de uma falha por fadiga possui basicamente três estágios: *i*) nucleação de trincas, *ii*) propagação ou crescimento macroscópico da trinca e *iii*) ruptura do componente estrutural. O primeiro estágio do mecanismo de falha compreende a iniciação de uma ou mais microtrincas que surgem devido à deformação plástica cíclica e a consequente propagação cristalográfica que se estende de dois a cinco grãos (SHIGLEY, 2011). Deve-se ressaltar que o surgimento de trincas pode ser acelerado devido às descontinuidades presentes no material (Figura 2.1), provocadas principalmente pelos seguintes eventos:

- Elementos sob altas pressões de contato que podem provocar crateramento devido à abrasão ou formação de cavidades superficiais capazes de resultar em falha devido ao *fretting*;
- Alterações geométricas provocadas por furos, rasgos de chaveta, reduções na seção transversal do elemento, entalhes, entre outros. Tais modificações resultam em concentradores de tensão, responsáveis por elevar o nível de tensão ao qual o material está submetido nas proximidades imediatas da descontinuidade. Deve-se ressaltar que a proporcionalidade do efeito do concentrador (fator concentração de tensão) pode ser determinado para cada situação particular, em função de parâmetros geométricos;
- Composição do próprio material, podendo conter: inclusões de outros materiais na estrutura cristalina (impurezas), porosidade acentuada, defeitos de solidificação, bandas de deslizamento entre outros.

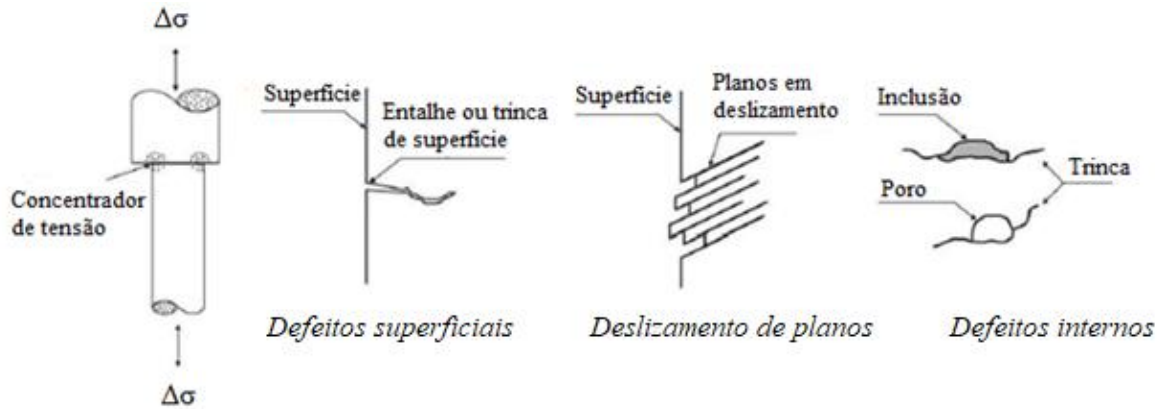


Figura 2.1 - Elementos de nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos (modificado: GARCIA, 2012).

O surgimento de uma trinca microscópica pode gerar um concentrador de tensões que, devido ao seu formato pontiagudo em conjunto com as imperfeições internas do material e ao carregamento repetido, provoca deformações plásticas em suas proximidades. Tais deformações promovem a propagação da trinca em uma direção predominantemente perpendicular à tensão de tração aplicada, caracterizando o segundo estágio do mecanismo de falha por fadiga: propagação ou crescimento macroscópico da trinca.

Conforme ilustrado pela Figura 2.2, as trincas embrionárias em estágio I tendem a crescer na direção do cisalhamento máximo, responsável por dar início ao processo de fadiga em materiais dúcteis, atingindo 45° na direção da aplicação da carga. Ao atingir um tamanho significativo, a trinca atinge o estágio II e altera seu comportamento ao tornar-se grande o suficiente para formar uma concentração geométrica de tensão. Uma zona de tração plástica é gerada em sua extremidade e, além desse ponto, o crescimento da trinca se dá na direção perpendicular ao da carga aplicada (FADEL, 2010).

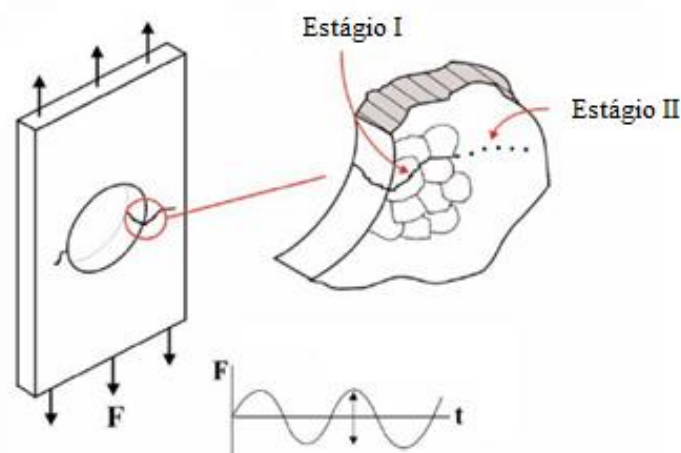


Figura 2.2 - Mecanismo de propagação da trinca (FADEL, 2010).

A propagação da trinca durante os ciclos de carregamento até a ruptura do componente mecânico caracteriza a falha por fadiga. Caso ocorram mudanças abruptas no carregamento durante o ciclo de tensão, características como marcas de praia (*beach lines*) podem ser

formadas na superfície de fratura durante a propagação da trinca. Essas marcas apresentam-se em padrão circular curvadas em relação à origem da falha, o que permite estudos de análise de falha para investigação do motivo da fratura conforme ilustrado pela Figura 2.3 para o fio de um cabo condutor de energia.

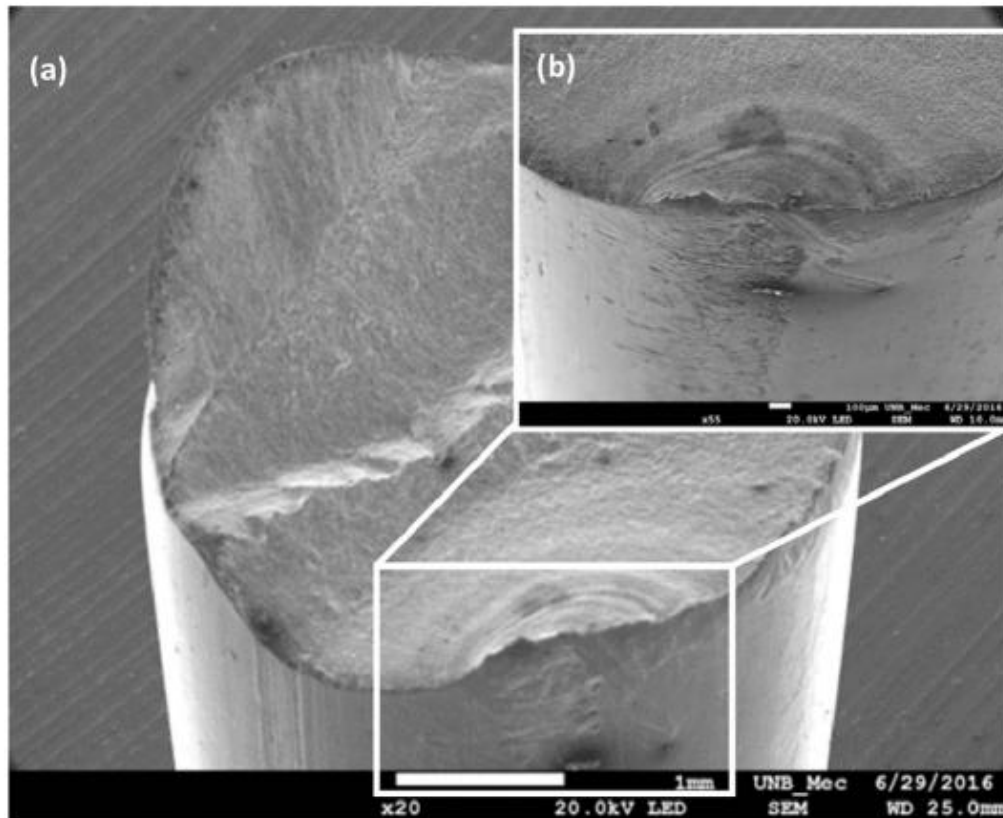


Figura 2.3 - (a) Superfície de fratura de um fio de um cabo CAL 900 MCM, (b) Local de iniciação da trinca e marcas de praia (KALOMBO, 2016).

2.2 Definições Fundamentais

As diversas aplicações de engenharia submetem materiais aos mais variados ciclos de carregamento, os quais podem estar muito bem definidos ou serem completamente aleatórios. A tipificação do comportamento da tensão com o tempo é fundamental para definição da metodologia mais adequada para abordagem do problema. Logo, a classificação do ciclo em termos das tensões média e alternada torna-se fundamental para análise do fenômeno.

Os ciclos de carregamento podem ser classificados em: *i*) tensão alternada completamente reversa, onde se observa simetria em relação ao eixo das abscissas, caracterizando uma situação com as tensões máximas e mínimas iguais em magnitude (Figura 2.4a); *ii*) tensão flutuante, em que a onda se apresenta deslocada de um valor médio não nulo e translada o ciclo ao longo do eixo das ordenadas, podendo situá-lo totalmente no campo de tração ou compressão, ou em situações onde as tensões máximas e mínimas possuem sinais opostos (Figura 2.4b). Caso o vale do ciclo flutuante apresente valor nulo, adota-se a nomenclatura de tensão repetida. Já os ciclos complexos e sem simetria são classificados em: *iii*) ciclo de tensão aleatória.

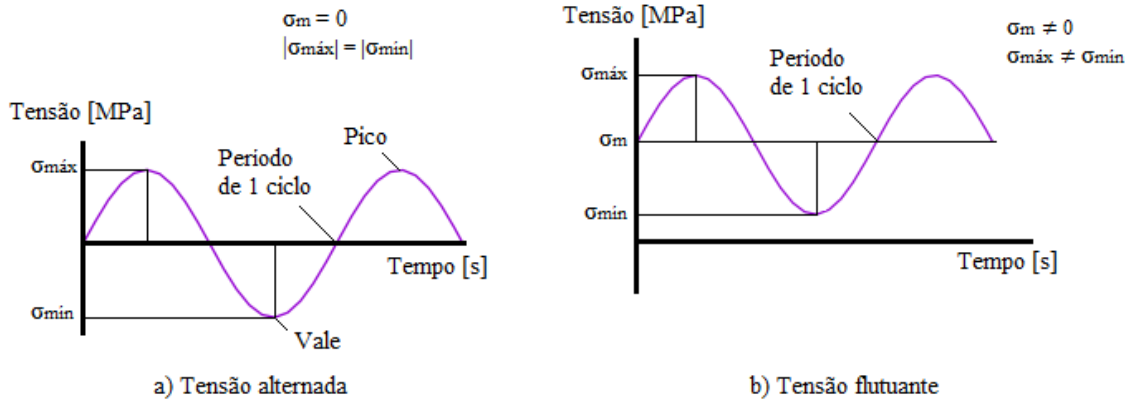


Figura 2.4 - Tensões cíclicas em fadiga: (a) tensão alternada reversa; (b) tensão flutuante.

A Figura 2.5 mostra dois exemplos em que se observa variações na amplitude do carregamento: (a) o ciclo de tensão por blocos, que é caracterizado pelo número de ocorrências de um mesmo par de tensão média e alternada (σ_m, σ_a) que se apresenta em uma sucessão de ocorrências e, (b) o ciclo aleatório ou irregular, no qual não se observa nenhum padrão na sequência de carregamentos. Vale ressaltar que existem ferramentas para caracterização de ciclos aleatórios em sequências de carregamentos bem definidos, como por exemplo o método RainFlow para contagem dos ciclos de tensão.

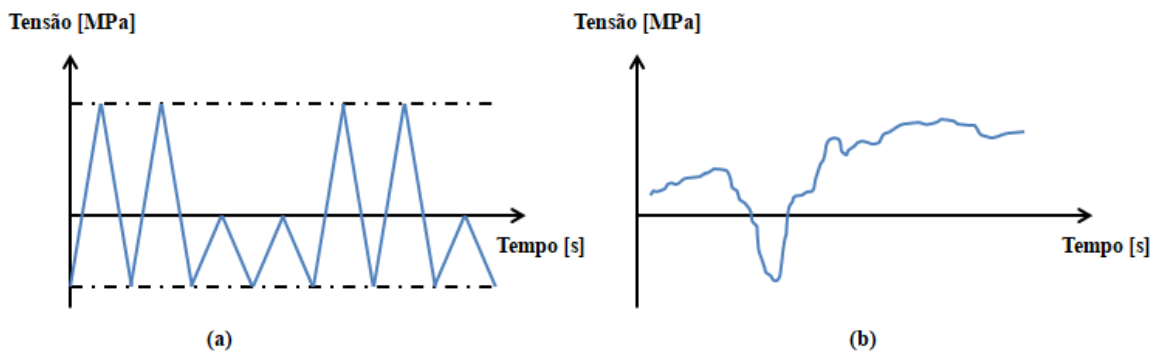


Figura 2.5 - Tensões cíclicas em fadiga: (a) Blocos de carregamento (b) Ciclo Aleatório.

Em geral, a caracterização da curva de resistência à fadiga de materiais é realizada por meio de ensaios experimentais com carregamentos cíclicos harmônicos, representados pela curva senoidal, cuja equação governante é expressa por:

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \text{sen}(2\pi ft) \quad (1)$$

Onde:

σ_m : Tensão média

f : Frequência de carregamento

σ_a : Tensão alternada

t : Tempo

A frequência, f , do carregamento é dada pela Equação (2) onde N representa o número de ciclos. A partir desta equação pode-se perceber que uma vez que as componentes de tensão

média e alternada de um carregamento cíclico estejam definidas, a resistência de um material à fadiga depende apenas do número de ciclos ao qual este será submetido durante sua vida em serviço.

$$f = \frac{N}{t} \quad (2)$$

A Figura 2.6 ilustra os parâmetros básicos de um ciclo de carregamento. Como pode ser observado, as componentes de tensão podem ser combinadas para definir outras variáveis capazes de descrever o ciclo. A variação de tensão ou intervalo de tensões por exemplo, é definida como a diferença entre a máxima e a mínima tensão gerada pelo carregamento, caracterizando a faixa do ciclo. As combinações entre as variáveis (Equações 3 a 7) tornam-se interessantes uma vez que são necessários apenas dois parâmetros independentes para descrever o carregamento (DOWLING, 2013).

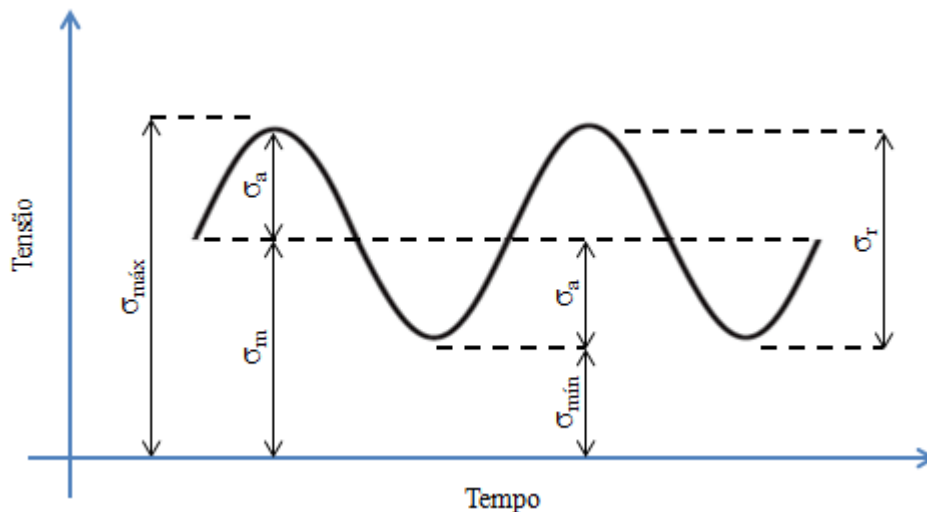


Figura 2.6 - Parâmetros básicos de um ciclo de carregamento.

➤ Tensão média

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (3)$$

➤ Tensão alternada

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (4)$$

➤ Variação de tensão ou intervalo de tensão

$$\sigma_r = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (5)$$

Outras duas variáveis comumente empregadas em fadiga são a razão de tensão e a razão de amplitude, sendo a primeira definida como a relação entre os valores mínimo e máximo de tensão no ciclo de carregamento e a segunda pela razão entre as componentes alternada e média definidas pelo ciclo:

➤ Razão de tensões

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (6)$$

➤ Razão de amplitude

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (7)$$

Alguns casos especiais podem ser citados, quando o ciclo é composto apenas pela componente alternada por exemplo (Figura 2.4a), nota-se que a razão de tensões será -1, enquanto a razão de amplitude tenderá ao infinito. Já o caso de tensão repetida, caso particular de tensão flutuante com vale nulo, é caracterizado por uma razão de tensões nula e uma razão de amplitude unitária.

2.3 Projeto Contra Fadiga: Tensão x Vida

Uma prática comum de engenharia é a caracterização da resistência de um componente mecânico a partir das circunstâncias em que se inserem os carregamentos a fim de observar comportamentos semelhantes entre elementos que estejam sujeitos aos mesmos tipos de esforços e sob as mesmas condições de trabalho. Para tal, utiliza-se o valor de uma tensão nominal, S , que pode ou não ser igual ao valor da tensão real, σ , para realização de projetos (DOWLING, 2013).

Existem basicamente três metodologias de projeto para estudo da vida em fadiga do componente mecânico em termos do número de ciclos até a ocorrência de falha. Apesar de se tratar da abordagem menos acurada, especialmente para os casos de fadiga de baixo ciclo - onde se observa níveis significativos de plasticidade - o projeto sob o método tensão-vida tem seu uso justificado devido à grande quantidade de dados disponíveis publicados e por representar adequadamente as situações em que se observa fadiga de alto ciclo ($N > 10^3$). Já a metodologia deformação-vida envolve uma análise mais detalhada da deformação plástica em regiões cujas tensões e deformações são consideradas críticas para a estimativa da vida, sendo mais utilizada quando se observa fadiga de baixo ciclo. Essas duas metodologias admitem que o componente iniciará sua vida em serviço livre de defeitos pré-existentes em sua estrutura. Por outro lado, quando a presença de trincas é admitida, a mecânica da fratura pode ser utilizada para o estudo da taxa de crescimento da trinca em relação à intensidade de tensão, mantendo o componente em serviço apenas durante sua fase estável de propagação.

O projeto para vida infinita segundo a metodologia tensão-vida, é a filosofia de projeto mais tradicional e de maior facilidade de implementação, uma vez que apenas as tensões nominais atuantes na região mais crítica do componente são utilizadas para determinação da resistência à fadiga do material. Essa abordagem se atenta a sempre manter os níveis de tensão abaixo de um limite de resistência, evitando a nucleação de trincas nos componentes analisados a partir do controle da deformação elástica sofrida pelo material; ou seja, supõe-se no projeto que as tensões e deformações permanecerão apenas no regime elástico, não ocorrendo escoamento localizado para nucleação e propagação de trincas (NORTON, 2013).

A fim de minimizar a influência de fatores externos e permitir a correlação dos resultados experimentais com dados obtidos em campo, a caracterização da resistência à fadiga ou limite de fadiga de um material com base nas Curvas S-N é feita a partir de ensaios realizados em laboratório sob condições específicas de carregamento, seguindo os padrões estabelecidos pelas normas ASTM aplicáveis aos procedimentos experimentais. Duas possibilidades se destacam para a execução do experimento: o método utilizado para poucos corpos de prova e o método da tensão constante (Figura 2.7).

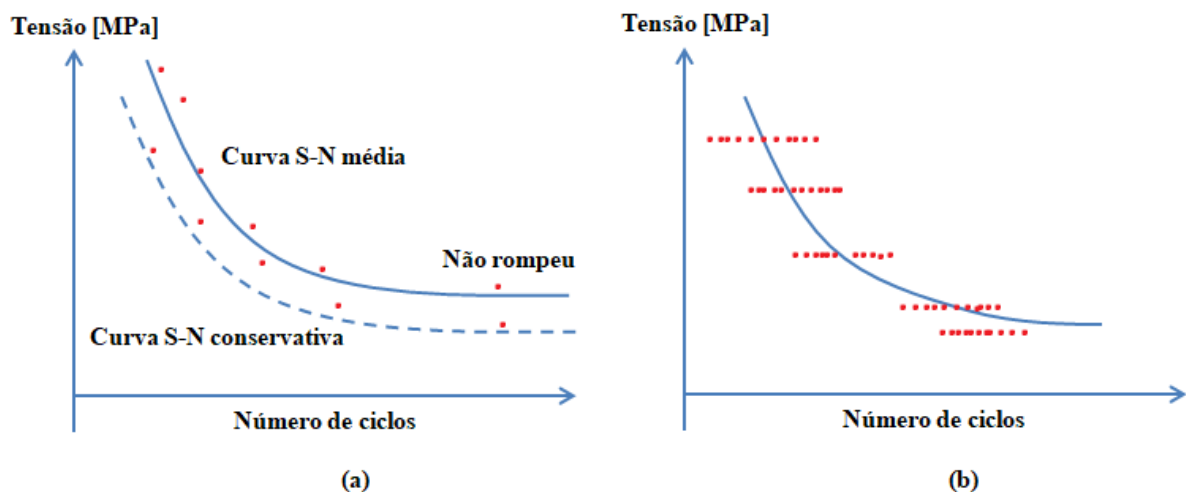


Figura 2.7 - Métodos para o levantamento da Curva S-N: a) Método para poucos corpos de prova; b) Tensão constante (modificado: GARCIA, 2012).

- Método para poucos corpos de prova: utilizado quando poucos corpos de prova estão disponíveis para o ensaio. Um ou dois corpos de prova são testados para determinada tensão e, se para o primeiro corpo de prova a vida esperada for atingida, o próximo é submetido a uma tensão mais alta e assim por diante;
- Método da tensão constante: os testes são realizados com os níveis de tensão selecionados em valores espaçados e com uma quantidade de corpos de prova específica, obtendo-se uma nuvem de pontos de acordo com a norma ASTM aplicável ao propósito do ensaio, com controle da força ou deformação do espécime. O ensaio de fadiga em cabos condutores em particular faz uso do método da tensão constante, levantando a Curva S-N geralmente a partir de nove pontos, sendo cada conjunto de três testados em um nível de tensão pré-estabelecido.

O comportamento da Curva S-N pode ser descrito matematicamente por meio da equação de Basquim (Equação 8), onde σ_a é a amplitude de tensão, N_f representa o número de ciclos até a ocorrência de falha e as constantes "a" e "b" são determinadas a partir de ensaios experimentais.

$$\sigma_a = aN_f^b \quad (8)$$

As curvas S-N permitem a caracterização da resistência à fadiga de diversos materiais, uma vez que todas as curvas apresentam um comportamento decrescente do número de ciclos até a ruptura a medida que o nível de tensão é elevado. Quando a amostra utilizada no ensaio é feita de titânio, aço ou materiais ferrosos em geral, a curva apresenta um "joelho" ao atingir determinado valor de tensão, caracterizando a resistência à fadiga do material. Já as curvas obtidas para o alumínio, cobre ou materiais não ferrosos, não possuem um limite de resistência à fadiga definido; ou seja, a curva decresce continuamente em função do número de ciclos mesmo para pequenos níveis de tensão, como pode ser visto na Figura 2.8. Para o alumínio em particular, admite-se para fins práticos que a vida infinita é dada pela tensão que resultará em um número consideravelmente grande de ciclos até a ocorrência de falha: aproximadamente 10^8 ciclos.

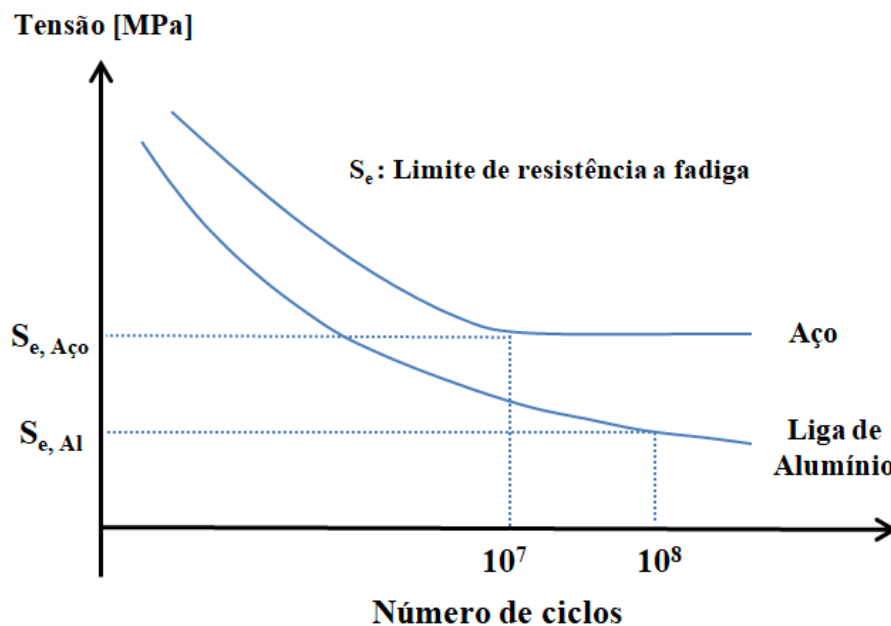


Figura 2.8 - Curva S-N para um aço maciço e para uma liga de alumínio.

2.4 Efeito da Tensão Média na Resistência à Fadiga

A presença de uma componente de tensão média possui efeito significativo no número de ciclos até a ocorrência de falha, acelerando ou retardando a propagação de trincas em função do tipo de carregamento. Ou seja, a vida de um componente mecânico pode ser modificada em função de uma componente média, σ_m , ao provocar uma redução da vida quando sujeito à tração enquanto tensões compressivas contribuem com o aumento do número

de ciclos necessário à ocorrência de falha. Dessa forma, a componente alternada pode ser expressa em termos do nível de tensão média para um determinado número de ciclos, como pode ser observado pela Figura 2.9.

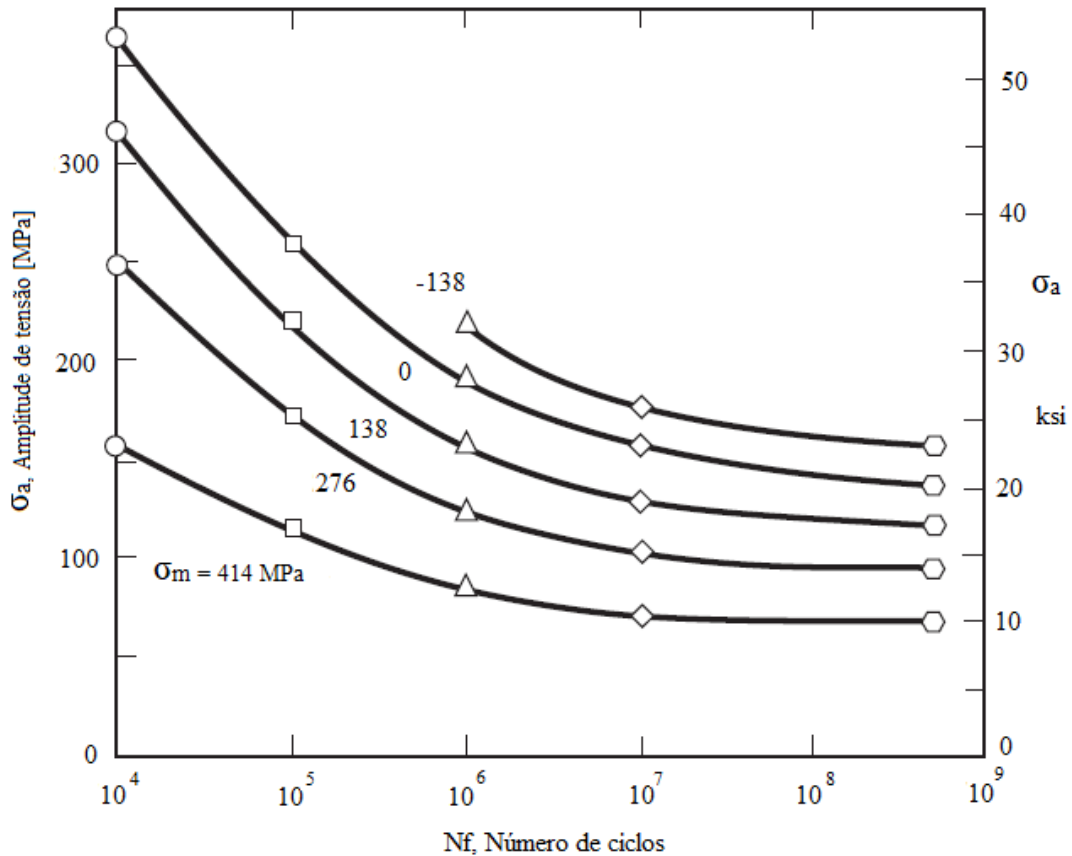


Figura 2.9 - Curvas S-N para a liga de alumínio 7075-T6 em ensaios de carregamento axial para diferentes valores de tensão média (modificado: DOWLING, 2013).

O efeito da tensão média pode ser representado em termos de diagramas de fadiga para vida constante, conforme ilustrado pela Figura 2.9. Entretanto, quando resultados experimentais não estão disponíveis, diagramas generalizados (Figura 2.10) podem ser utilizados para definir regiões de segurança contra fadiga após certo número de ciclos. Nota-se em um diagrama $\sigma_a \times \sigma_m$ uma região que divide as combinações seguras das combinações inseguras das componentes de tensão média e alternada (SHIGLEY, 2011).

As equações de projeto propostas pelas curvas da Figura 2.10 são descritas em termos do fator de projeto ou segurança, n , das resistências à tração, S_{ut} , e ao escoamento, S_y , do material além do limite de resistência à fadiga, S_e , e das componentes média, S_m , e alternada, S_a , da tensão atuante no ponto mais crítico do elemento sob análise.

➤ Critério de Soderberg

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n} \quad (9)$$

➤ Critério de Goodman modificado

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (10)$$

➤ Critério de Gerber

$$\frac{n \sigma_a}{S_e} + \left(\frac{n \sigma_m}{S_{ut}} \right)^2 = 1 \quad (11)$$

➤ Critério ASME elíptico

$$\left(\frac{n \sigma_a}{S_e} \right)^2 + \left(\frac{n \sigma_m}{S_y} \right)^2 = 1 \quad (12)$$

➤ Linha de Langer

$$\sigma_a + \sigma_m = \frac{S_y}{n} \quad (13)$$

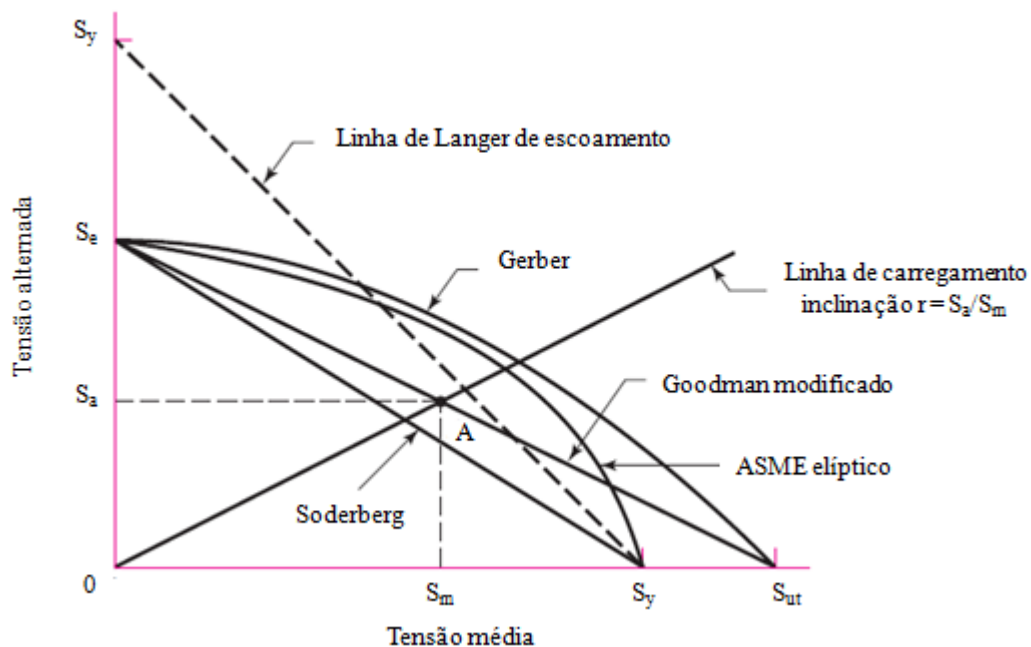


Figura 2.10 - Diagrama de vida constante generalizado (modificado: SHIGLEY, 2011).

Apesar da linha de Langer (Equação 13) não ser um critério de falha por fadiga, sua presença no diagrama é justificada para considerar a possibilidade de ocorrência de escoamento de primeiro ciclo. Por ser um critério muito conservador, em geral a linha de Soderberg não é utilizada. Já os critérios de Gerber e ASME-elíptico, são bastante

empregados quando segurança e conservadorismo devem estar aliados à redução de custos. Por se tratar da primeira abordagem quanto ao estudo do efeito da tensão média nas propriedades de fadiga, a linha proposta por Goodman sempre é descrita nos diagramas de vida constante devido ao seu valor histórico, sendo até hoje utilizado pelos projetistas mais conservadores.

2.5 Conceito de Dano em Fadiga: Cálculo da Vida Remanescente

A análise da vida remanescente sob fadiga de um componente mecânico torna-se mais complexa no caso de ciclos com carregamentos aleatórios. Uma vez que este tipo de ciclo não apresenta componentes de tensão bem definidas, foram desenvolvidas metodologias, como o modelo proposto por RainFlow, para caracterização das componente de tensão do ciclo a partir de uma soma de carregamentos bem definidos, conforme ilustrado pela Figura 2.11.

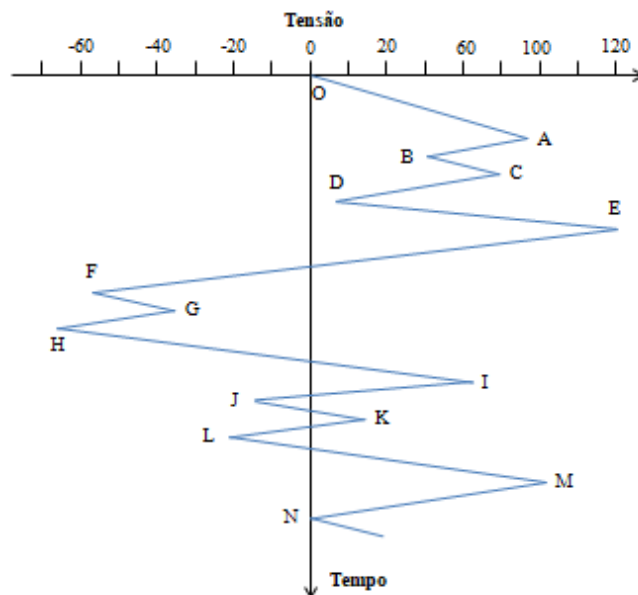


Figura 2.11 - Modelo de RainFlow (modificado: WIRSCHING, 1997).

A abordagem deste modelo pode ser entendida pela analogia entre o histórico de carregamento e o fluxo de chuva escorrendo sobre o telhado de construções típicas do Japão, onde as gotas d' água podem se deslocar tanto para a direita quanto para a esquerda, representando os carregamentos de tração e compressão respectivamente. O eixo das abscissas está direcionado para baixo para ilustrar a analogia com o fluxo de chuva e as letras representam os picos e os vales do ciclo de tensão. O algoritmo proposto por RainFlow é baseado na identificação dos picos e vales que se sobressaem durante a contagem do ciclo de tensão. A vantagem dessa metodologia é a capacidade de considerar todas as variações de tensão que ocorrem ao longo do tempo.

A partir do histórico de carregamento e da resistência à fadiga obtida por meio de dados laboratoriais, é possível fazer uma análise de durabilidade por meio do conceito de dano em fadiga (D). Esse conceito consiste na perda parcial da funcionalidade do componente

a cada ciclo; ou seja, todo ciclo de tensão atuante em um componente irá consumir uma parcela de sua vida remanescente sob fadiga, reduzindo sua durabilidade.

O primeiro modelo linear de dano por fadiga surgiu em 1924, quando Palmgren apresentou o conceito conhecido como "regra de dano linear" para uso na indústria sueca de rolamentos de esferas. Desde então, diversas metodologias foram sendo desenvolvidas até que em 1945, Miner aplicou a regra de dano linear a uma liga de alumínio utilizada em revestimentos de aeronaves. Os experimentos de Miner demonstraram uma excelente correlação entre o modelo teórico e os dados experimentais. Por meio desta pesquisa, o conceito de Palmgren foi matematicamente descrito pela Equação 14, onde D é o dano linear acumulado, n_i é o número de ciclos aplicados ao componente sob o nível de tensão S_i e $N_{i,f}$ é o número total de ciclos até a falha (curva S-N) sob este mesmo valor de tensão (LEE, 2005). Assim, no caso de carregamento com apenas um único nível de tensão, a falha ocorrerá quando $n_i=N_{i,f}$, conforme pode ser observado na Figura 2.12.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_{i,f}} \quad (14)$$

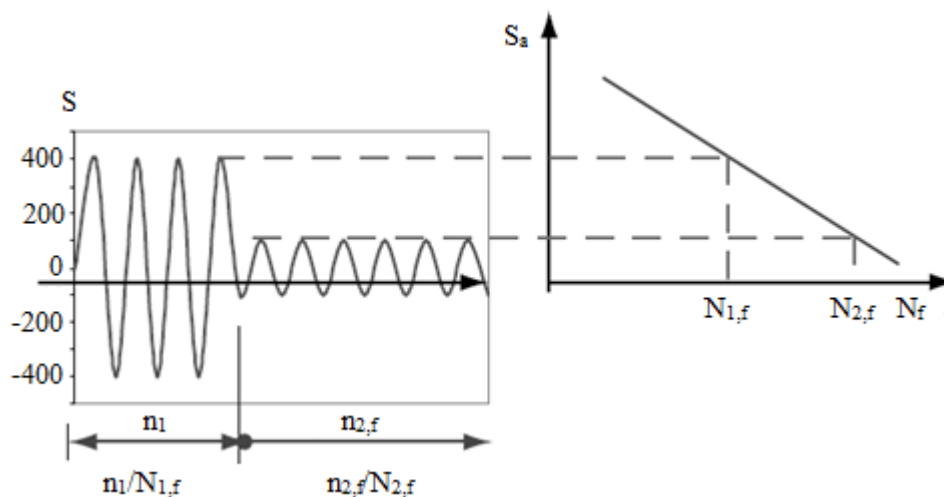


Figura 2.12 - Modelo de Palmgren-Miner: Acúmulo de dano linear (modificado: LEE, 2005).

O modelo proposto por Palmgren-Miner admite que o dano provocado por cada sollicitação é acumulativo e irreversível, variando entre $D=0$ (peça virgem) e $D=1$ (falha), podendo ser quantificado em termos da razão entre o número de ciclos aplicados (n_i) e o número de ciclos necessários à ocorrência de falha por fadiga ($N_{i,f}$). Nota-se que a soma linear da razão de ciclos independe do nível de tensão ou do local de aplicação do carregamento; logo, qualquer sollicitação contribuirá com o acúmulo do dano.

A equação de acúmulo de dano linear de Palmgren-Miner é amplamente utilizada na estimativa de vida à fadiga devido a sua confiabilidade e simplicidade matemática. Porém, muitas vezes o valor de dano acumulado até a ocorrência de falha difere da unidade, demonstrando certa imprecisão no modelo proposto. Essa discrepância pode ser explicada devido a não considerações de aspectos importantes como a sequência e o nível dos carregamentos, ou ainda, a interação das cargas, de modo que o fenômeno de aceleração ou

atraso da velocidade de propagação da trinca seja desprezado (GARCIA, 2012). Por outro lado, uma vantagem desse modelo matemático é a possibilidade de estimar a vida de um componente mecânico por meio do inverso da equação de dano:

$$V = \frac{1}{D} \quad (15)$$

Sendo assim, para $V > 1$, a vida remanescente, V_r , do elemento será dada por V menos a parcela consumida pelo dano já sofrido (Equação 16). Nota-se que no caso de V menor ou igual à unidade, a falha do material já teria ocorrido, pois o dano acumulado seria equivalente ao consumo de 100% da vida do componente.

$$V_r = V - 1 \quad (16)$$

3 FADIGA EM CABOS

3.1 Fadiga em Cabos Condutores de Energia

A resistência à fadiga do cabo condutor representa um parâmetro de extrema importância tanto na fase de concepção de projeto quanto em programas de manutenção, uma vez que a falha desse componente é um dos maiores problemas mecânicos das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica (CIGRE, 2008).

A falha inesperada de um cabo condutor em uma linha de transmissão implica num impacto financeiro gigantesco devido ao corte de energia elétrica dos diversos seguimentos de clientes, além de prejuízos incomensuráveis como a perda de vidas e danos à imagem do país no cenário mundial. A prática comum trata a causa mais frequente de fadiga de condutores, a amplitude de vibração devido à ação do vento, com a finalidade de determinar apropriadamente os parâmetros de projeto para avaliação da vida do cabo nas linhas de transmissão; ou ainda, quanto à necessidade de utilização de acessórios de segurança (Figura 3.1), como dispositivos de proteção entre o cabo e o grampo de suspensão (CIGRE, 2008).

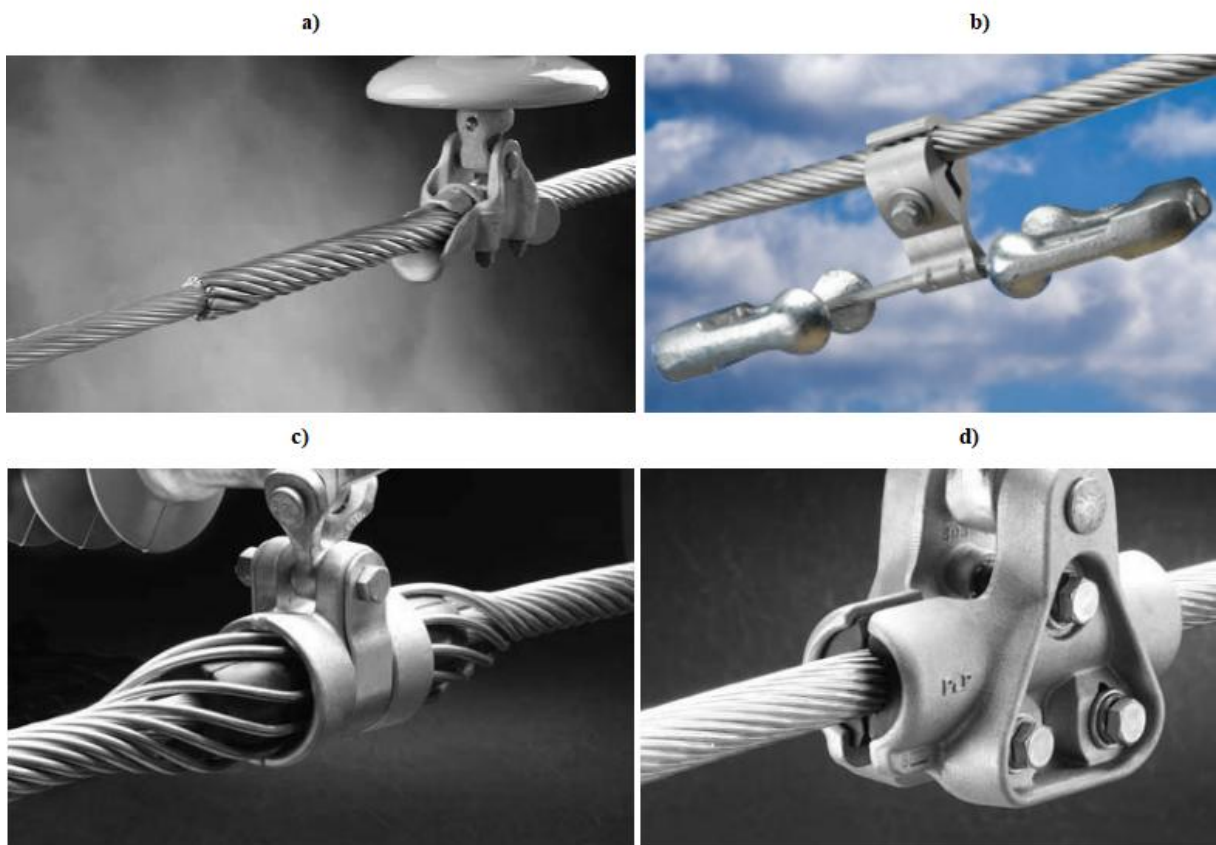


Figura 3.1 - Acessórios utilizados em cabos condutores de energia: a) *Armor Rod*; b) *Stockbridge Damper*; c) *Armor Grip*; d) *Cushion Grip* (PERFORMED LINE PRODUCTS, 2013).

Os acessórios utilizados nas linhas de transmissão tem a função de proteger o cabo contra a ação de diversos fenômenos, aumentando seu tempo de vida em serviço. O uso de amortecedores por exemplo, visa reduzir a amplitude de vibração do condutor devido às vibrações eólicas. Já os dispositivos utilizados entre o cabo e o grampo de suspensão, são projetados para reduzir a influência de efeitos como flexão alternada e abrasão no local de restrição de movimento do condutor. Entretanto, deve-se destacar que independente do uso de amortecedores, o condutor fica mais vulnerável às vibrações eólicas a medida que o nível de tensão média nos fios de alumínio é elevado. Sendo assim, nota-se a necessidade de pesquisas acerca do assunto a fim de definir um limite superior quanto à carga de esticamento capaz de garantir uma vida em serviço por significativos períodos de tempo (CIGRE, 1999).

3.2 Tipos de Cabos Condutores

O cabo condutor é o componente mais importante em uma linha de transmissão, podendo contribuir com até 40% do custo em investimento de capital da rede, o que evidencia o impacto financeiro associado à correta seleção deste componente dentre os diversos tipos de cabos existentes no mercado tendo em vista o tipo de aplicação. Os cabos fazem uso do alumínio como material condutor de corrente elétrica devido as suas características mecânicas e elétricas e, principalmente, por proporcionar economia de capital para a LT em relação à outros materiais, sendo divididos basicamente em três grandes grupos (NEXANS, 2013):

i) Condutores de alumínio (CA) e condutores de alumínio com alma de aço (CAA)

Os condutores formados exclusivamente de fios de alumínio 1350 (CA) - cuja composição é superior à 99% de alumínio - são largamente utilizados nas linhas de transmissão desde o início do século XX devido à alta condutividade apresentada por este tipo de cabo: acima de 60% IACS (*International Annealed Copper Standard*). Entretanto, algumas aplicações exigem alta resistência mecânica do condutor, fato que favorece a utilização de condutores de alumínio 1350 com alma de aço (CAA), nos quais um conjunto de fios de alumínio é entrelaçado de forma helicoidal e equidistante de uma alma de aço responsável por elevar a resistência mecânica do cabo.

ii) Condutores de alumínio liga (CAL) e condutores reforçados com alumínio liga (CALA):

A resistência mecânica apresentada pelos CA propiciou o desenvolvimento de ligas com maior tensão de ruptura, S_{ut} , para composição dos condutores, as quais, em determinadas situações, podem eliminar a necessidade da alma de aço como reforço mecânico acarretando num menor custo para as linhas de transmissão.

Os condutores tipo CAL são aqueles que apresentam um encordoamento concêntrico homogêneo, formado apenas por fios de alumínio liga. Já os condutores reforçados com alumínio liga (CALA) são formados por fios de alumínio encordoados sobre uma alma de fios de alumínio liga.

A Tabela 3.1 fornece dados comparativos entre as ligas de alumínio 1350 e 6201. Como pode ser visto, os fios de alumínio liga 6201 - constituídos principalmente por alumínio, magnésio e silício - apresentam aproximadamente o dobro da resistência mecânica proporcionada por fios de alumínio 1350, além de um resultar num grande aumento da dureza superficial do fio, conferindo aos condutores maior resistência à abrasão.

Outra vantagem da liga 6201 é proporcionar um aumento significativo na resistência à corrosão do condutor, favorecendo a utilização de cabos tipo CAL em regiões com atmosfera agressiva de alta poluição ou salinidade marítima. Entretanto, deve-se ressaltar que os fios de alumínio liga 6201 apresentam condutividade inferior à liga 1350, com cerca de 52,5% IACS.

Tabela 3.1 - Propriedades dos fios de alumínio liga 1350 e 6201 (KALOMBO, 2016).

Fios de alumínio liga	Tensão de escoamento S_y [MPa]	Tensão de ruptura S_{ut} [MPa]	Dureza [HBn]	Massa específica [g/cm ³]
1350	165	186	50	2,705
6201	310	330	88	2,690

Devido aos altos custos relacionados às perdas durante a transmissão de energia, o desenvolvimento de novos tipos de cabos condutores é essencial para otimização dos investimentos. A liga 1120 (também conhecida como Al 59) foi desenvolvida inicialmente na Suécia, no fim da década de 70, para oferecer uma alternativa capaz de reduzir o custo da LT devido a sua maior condutividade - 59% IACS - em relação à outros tipos de CAL. A maior parte das linhas de transmissão da Suécia fazem uso do Al 59, com exceção apenas de locais onde o carregamento de gelo demanda a utilização de cabos ACSR (PETTERSON, 1988). Apesar de ser vantajosa ao apresentar características elétricas próximas às ligas 1350, a resistência mecânica de cabos construídos com a liga 1120 é inferior àquela apresentada pela liga 6201 ou por cabos CAA, conforme ilustrado pela Figura 3.2.

iii) Condutores termorresistentes.

Os cabos de alumínio convencionais podem operar em regime contínuo de trabalho a uma temperatura máxima de 90°C. Acima desta temperatura inicia-se o processo de recozimento do material e conseqüentemente a deterioração de suas características mecânicas.

Tendo em vista que o limite de temperatura do condutor pode ser extrapolado por diversas razões - como por exemplo, o aumento da densidade populacional de uma cidade junto ao acréscimo da demanda energética - uma classe especial de cabos foi desenvolvida: os chamados condutores de alumínio termorresistentes (TAI), os quais podem ser utilizados em regime contínuo de trabalho em temperaturas de até 150°C sem que haja deterioração das características mecânicas do condutor, permitindo uma corrente elétrica no cabo até 50% maior em relação aos condutores de mesma bitola que utilizam fios de alumínio 1350.

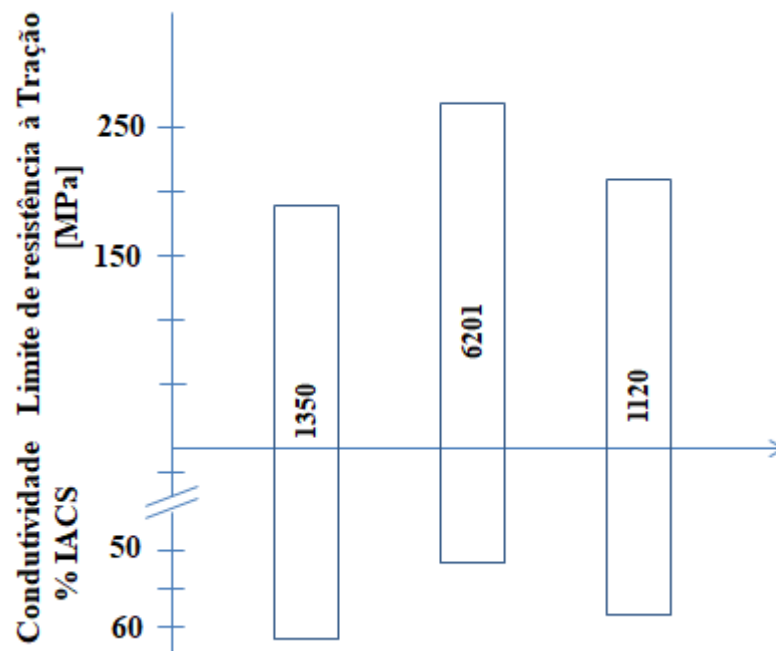


Figura 3.2 - Comparação das propriedades elétricas e mecânicas de ligas de alumínio para fios de 3 mm de diâmetro (modificado: BARBER, 1995).

3.3 Tipos de Vibração de Cabos Condutores

O fenômeno de fadiga em cabos condutores de energia é provocado pela ação do vento, que induz forças aerodinâmicas sobre o cabo induzindo tensões oriundas de três tipos de vibração: eólica (*aeolian vibrations*), galope (*galloping*) e subvão (*subspan oscillations*). A Figura 3.3 ilustra didaticamente o comportamento do condutor em função destes três tipos de vibração.

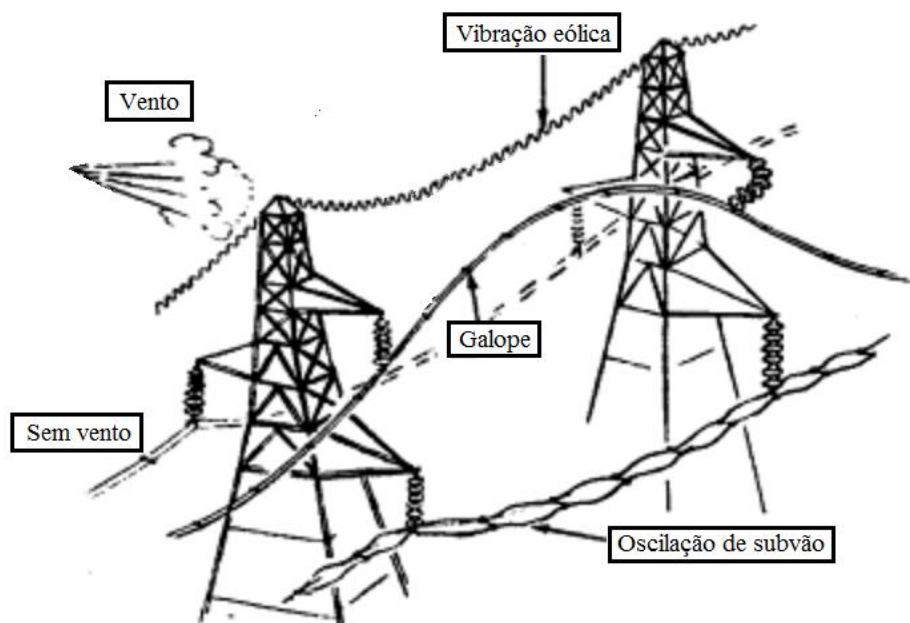


Figura 3.3 - Tipos de vibração de cabos condutores (modificado: EPRI, 2006).

O comportamento do condutor é uma função do tipo de vibração, que por sua vez depende de fatores como: velocidade do vento, ângulo de incidência do vento no cabo, tipo e massa do cabo, tamanho do vão livre e carga de esticamento, tornando a caracterização do tipo de vibração uma parte fundamental da análise do fenômeno de fadiga em cabos condutores (FADEL, 2010). A Tabela 3.2 apresenta uma comparação entre os fatores que levam aos três tipos de vibração mencionados, expondo as condições favoráveis à ocorrência de cada tipo de vibração junto ao respectivo dano provocado na linha de transmissão.

Tabela 3.2 - Movimentos induzidos pelo vento (EPRI, 2006).

Características	Vibração eólica	Galope	Oscilação de subvão
Tipo de LT afetada	Todas	Todas	Feixe de condutores
Faixa de frequência (Hz)	3 - 150	0,08 - 3	0,15 - 10
Intervalo de amplitude pk-pk (em relação ao diâmetro do cabo)	0,01 - 1	5 - 300	Modo corpo rígido: 0,5 a 80 Modo de subvão: 0,5 a 20
Condições favoráveis à ocorrência de cada tipo de vibração			
Tipo de vento	Laminar	Laminar	Laminar
Velocidade do vento (m/s)	1 a 7	7 a 18	4 a 18
Superfície do cabo	Nua ou com gelo uniforme	Gelo assimétrico	Nua, seca
Condições de projeto que influenciam o movimento do condutor	Tensão de esticamento, autoamortecimento dos cabos, uso de amortecedores, armaduras	Razão de frequência natural vertical para a de torção, catenária e condições de suporte	Separação dos subcondutores, torção do feixe, arranjo dos subcondutores, distância entre espaçadores
Dano			
Tempo aproximado para ocorrência	2 meses a mais de 20 anos	1 a 48 horas	1 mês a mais de 8 anos
Causas diretas	Falha devido à fadiga	Altas cargas dinâmicas	Impacto de condutores. Abrasão, desgaste acelerado de ferragens
Componentes mais afetados	Cabos condutores e para-raios	Condutores, ferragens, isoladores, estruturas	Ferragens de suspensão, espaçadores, amortecedores, cabos

3.3.1 Vibração eólica

A ocorrência de vibrações eólicas, também conhecidas como vibrações de von Karmán, representa a principal causa de falha por fadiga em linhas de transmissão. Esse tipo de vibração é caracterizada por oscilações de alta frequência (3 - 150 Hz) e baixa amplitude (menores ou iguais ao diâmetro do condutor), que dependem de fatores como: tipo de cabo, carga de esticamento e local de construção da linha de transmissão (EPRI, 2006).

O uso de dois parâmetros de mecânica dos fluidos se destacam na análise das vibrações eólicas: os números adimensionais de Reynolds e de Sthouhal. A forma em que se dará a perturbação do vento (formação de vórtices) ao incidir no cabo condutor é uma função do regime de escoamento, laminar ou turbulento, que pode ser expresso pelo número de Reynolds (Equação 17). Já o número de Sthouhal pode ser utilizado para cálculo da frequência de desprendimento de vórtices devido ao vento transversal conforme a Equação 18. A Figura 3.4 mostra o vínculo existente entre estes parâmetros para uma geometria circular evidenciando que a frequência de vibração do cabo está intimamente relacionada à frequência de desprendimento de vórtices devido à velocidade de incidência do vento.

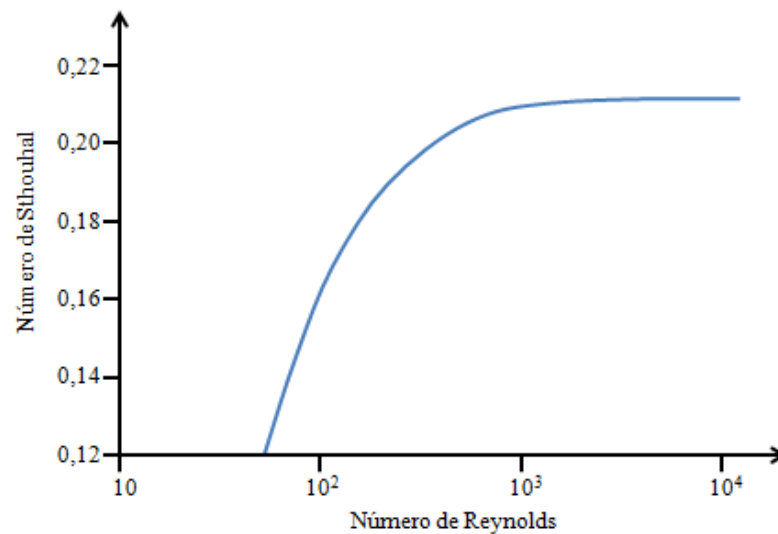


Figura 3.4 - Número de Strouhal em função do número de Reynolds. Curva obtida experimentalmente para escoamento sobre cilindros circulares (modificado: FUCHS, 1992).

$$Re = \frac{U d_c}{\nu} \approx \frac{\text{efeitos inerciais}}{\text{efeitos viscosos}} \quad (17)$$

$$f_s = \frac{St U}{d_c} \quad (18)$$

Re: Número de Reynolds

U: Velocidade do vento, m/s

St: Número de Sthouhal

ν : Viscosidade cinemática do vento, m²/s

f_s : Frequência de desprendimento de vórtices, Hz

d_c : Diâmetro do cabo, m

A Figura 3.5 ilustra a formação de vórtices em função do regime de escoamento. Em geral, a vibração eólica do cabo condutor origina-se através de um processo iterativo entre o fluido (ar) e a estrutura (cabo) na ocorrência de vento sob regime laminar ($500 < Re < 20000$) com velocidade entre 1 e 7 m/s.

Por se tratar de uma estrutura esbelta apoiada sobre torres de transmissão construídas com um espaçamento significativamente grande, nota-se que o cabo é um elemento dotado de um espectro bastante denso de frequências naturais, o que favorece o sincronismo entre a frequência de desprendimento de vórtices, f_s , e os modos naturais de vibração. Sendo assim, pode-se inferir que o regime laminar é o mais perigoso ao propiciar a ocorrência de vibrações eólicas que, devido à alta frequência e baixa amplitude, consomem a vida útil do condutor de maneira quase imperceptível.

Os cabos condutores brasileiros em particular estão mais propensos a desenvolver o tipo de vibração eólica, uma vez que a velocidade média do vento que predomina em praticamente todo o território nacional se encontra dentro da faixa de risco, entre 1 e 7 m/s (CEPEL, 2001).

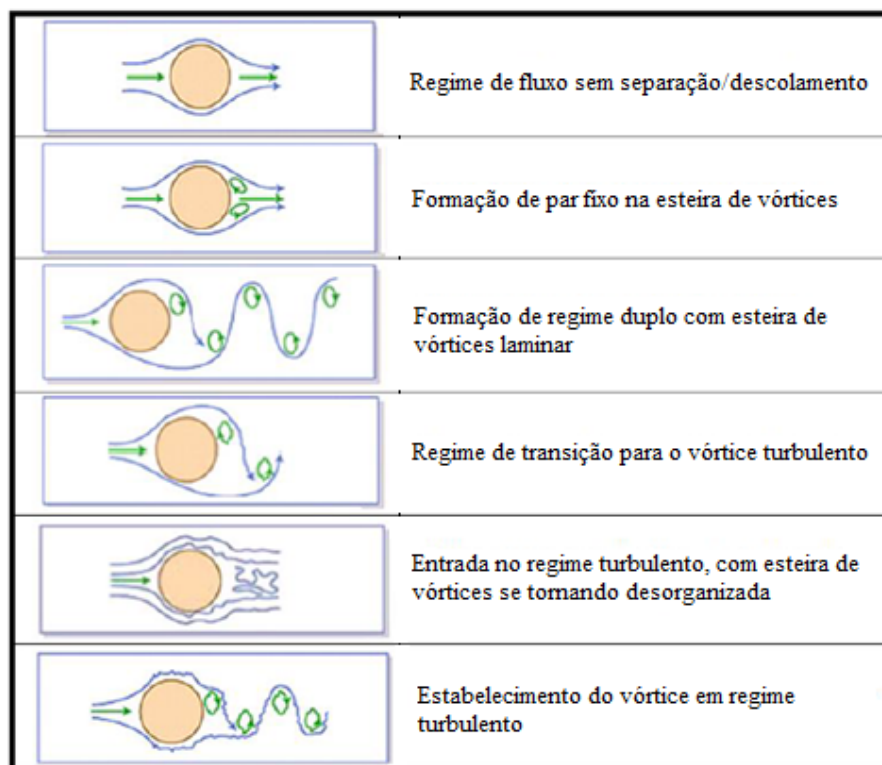


Figura 3.5 - Regimes de fluxo em torno de um cilindro liso (LIENHARD, 1966).

3.3.2 Galope

Esse tipo de vibração, caracterizado por baixas frequências (0,1 a 3 Hz) e grandes amplitudes - entre 5 e 300 vezes o diâmetro do condutor - pode ocorrer tanto em condutores singelos quanto em feixes de condutores, principalmente devido ao perfil aerodinâmico formado pelo acúmulo de gelo na linha de transmissão e na incidência de ventos de 7 a 18 m/s (EPRI, 2006).

O grande deslocamento do cabo devido ao galope introduz elevadas cargas dinâmicas nos componentes da linha de transmissão expondo-os à ocorrência de falhas em curtos períodos de tempo. Nota-se ainda que esse tipo de vibração pode provocar choques mecânicos entre os condutores, além de comprometer a segurança pública devido à violação da distância mínima entre a catenária formada pelo cabo e o solo.

3.3.3 Oscilações de subvão

As oscilações de subvão, também chamadas de oscilações induzidas por esteira, ocorrem em linhas de transmissão que utilizam feixes de condutores dispostos paralelamente e em direção perpendicular ao fluxo de vento. A frequência de vibração das oscilações de subvão varia entre 1 e 5 Hz e são causadas por ventos de moderados a fortes, que variam entre 4 e 18 m/s. Esse tipo de vibração pode apresentar grandes amplitudes de vibração, podendo ocasionar choques mecânicos entre os condutores (KIESSLING, 2002).

Ao incidir sobre o primeiro cabo, a corrente de ar é perturbada de forma a propiciar a ocorrência de movimentos aerodinâmicos do condutor seguinte, gerando componentes de forças que induzem o cabo a apresentar movimentos elípticos irregulares, capazes de resultar na falha por fadiga do condutor em um pequeno número de ciclos.

3.4 Mecanismo de Falha

O fenômeno de fadiga em cabos condutores ocorre devido aos esforços cíclicos gerados nas restrições de movimento do cabo durante as vibrações decorrentes da ação do vento. Esses pontos de restrição surgem devido ao uso de ferragens como amortecedores, espaçadores e grampos de suspensão. Como o nível de restrição e, conseqüentemente, a sollicitação mecânica é maior nos arredores do grampo de suspensão, danos devido à abrasão e falhas por fadiga frequentemente ocorrerem em suas proximidades após algum período de tempo, representando a principal causa de falha em linhas de transmissão (EPRI, 2006).

As restrições de movimento do condutor fazem com que os fios que constituem o cabo escorreguem entre si ou em relação às estruturas de fixação, gerando microdeslizamentos que junto às forças de fricção causam o *fretting*, conforme ilustrado pela Figura 3.6. Esse fenômeno resulta no desgaste por atrito entre as superfícies, gerando um pó de cor marrom constituído por partículas duras de óxido de alumínio (Al_2O_3), acelerando o processo de nucleação e propagação de trincas devido ao movimento relativo entre os elementos em contato (AZEVEDO, 2009).

As trincas devido ao *fretting* podem surgir tanto nos fios da camada externa do condutor, devido ao contato entre o cabo e o grampo, quanto internamente em consequência do deslizamento relativo entre fios. Caso a ruptura ocorra no interior do grampo de suspensão, dificilmente ela será vista durante as inspeções de manutenção, uma vez que o mesmo vento que produz a vibração eólica resfria de forma acentuada o cabo condutor, mascarando o efeito térmico do ponto de fadiga. Essa vulnerabilidade pode provocar a ruptura completa do cabo devido ao aumento do carregamento da linha (MOURÃO, 2004).

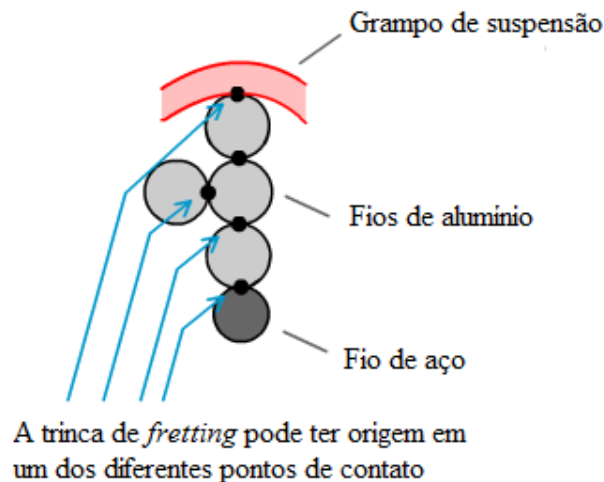


Figura 3.6 - Pontos de origem de trincas devido ao *fretting*.

A fadiga por *fretting* é influenciada por diversos fatores, tais como: 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 (FRONTIN, 2011). A Figura 3.7 representa o problema que ocorre nos cabos de transmissão por meio de um modelo de contato entre dois cilindros, os quais estão sujeitos a uma carga radial compressiva P e atritam pelo efeito da carga axial cíclica Q , gerando na zona de contato uma marca da interação dos cilindros devido ao escorregamento, que aparece no detalhe como uma elipse negra (FADEL, 2010).

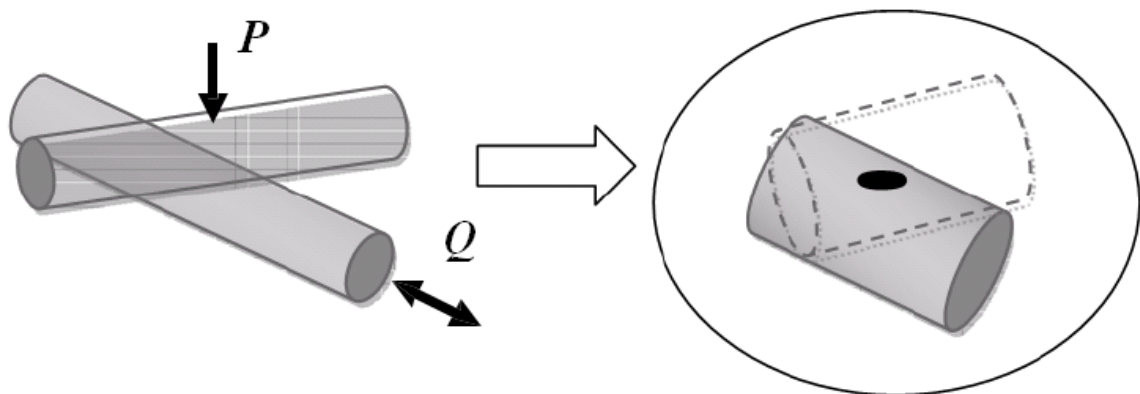


Figura 3.7 - Configuração esquemática do problema de contato entre dois cilindros (equivalente a dois fios de camadas distintas do cabo) (FADEL, 2010).

Por se tratar de uma superposição de fenômenos, o mecanismo de fadiga em cabos condutores de energia torna-se bastante complexo. Logo, o desenvolvimento de critérios que garantam a segurança desses elementos por um considerável período de tempo é fundamental para o projeto de novas linhas.

Nesse sentido, o IEEE (1966) apresentou uma metodologia padrão para avaliação de sobrecargas em cabos condutores de energia: o método da amplitude de flexão. A proposta deste método é a existência de uma relação linear entre a amplitude de flexão e a tensão

atuante na zona crítica do condutor - independente da frequência de vibração. Esta metodologia está baseada na formulação de Poffenberger-Swart, a qual correlaciona a tensão nominal na zona de falha ao deslocamento sofrido pelo cabo a uma distância padrão de 3,5" (89 mm) do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão. Essa metodologia, associada ao uso das curvas S-N, é a mais empregada até os dias de hoje para o projeto de novas linhas de transmissão bem como para o plano de manutenção de linhas já existentes.

3.5 Esforços Dinâmicos em Cabos Condutores: A Formulação de Poffenberger-Swart

As oscilações decorrentes da ação do vento nos cabos condutores - em particular as vibrações eólicas - representam a principal causa de falha das estruturas presentes em uma linha de transmissão. Uma vez que o cabo condutor é o componente mais afetado pelas vibrações, a análise das tensões atuantes neste elemento é fundamental para garantir a integridade da LT.

Os cabos condutores de energia são formados por diferentes camadas de fios entrelaçados helicoidalmente em sentidos opostos conforme ilustrado pela Figura 3.8. A complexa disposição dos fios, junto aos diversos fenômenos que atuam em conjunto durante o movimento do cabo, tornam a determinação dos esforços atuantes no condutor uma tarefa bastante complicada. Além disso, o difícil acesso ao cabo após a instalação deste na linha de transmissão impõe uma limitação prática quanto à avaliação das tensões atuantes na região crítica do condutor. Dessa forma, foi desenvolvida uma metodologia para determinação de uma tensão nominal, S , calculada em um ponto específico do cabo, a partir de medições da amplitude de deslocamento do cabo devido à flexão.

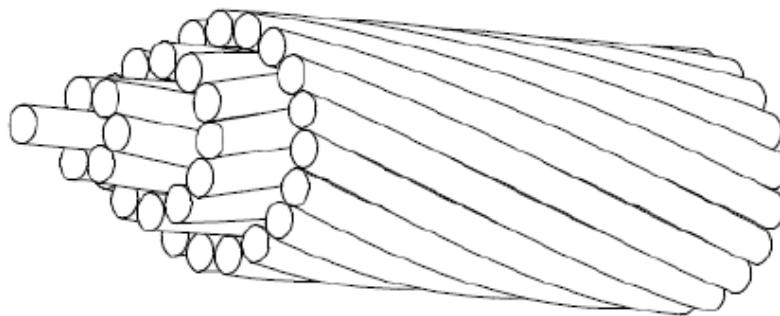


Figura 3.8 - Construção típica de cabos condutores de energia (CIGRE, 2008).

A fadiga dos fios dos condutores ocorre em locais onde há dispositivos de retenção de movimento do cabo em relação à vibração transversal, sendo notada uma maior incidência de falha nos pontos onde a restrição ocorre de forma mais acentuada (EPRI, 2010). Sendo assim, o grampo de suspensão se torna um dispositivo crítico para o condutor ao impor uma severa restrição ao cabo na direção vertical devido a sua rigidez (FADEL, 2011).

Nesse cenário, a fórmula de Poffenberger-Swart tem sido amplamente utilizada ao relacionar linearmente o deslocamento vertical, Y_b , de um ponto 3,5" (89 mm) distante do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, conforme a Figura 3.9, com a amplitude de tensão atuante em um fio de alumínio da camada mais externa do cabo na boca

do grampo. Boas correlações entre o cálculo teórico proposto por P-S e resultados obtidos por meio de ensaios em laboratório foram encontradas para uma amostragem significativa de condutores (IEEE, 2007). Segundo Fadel (2010), a formulação de P-S possui um alto nível de concordância com resultados experimentais, fornecendo boas aproximações para as tensões nominais verificadas na zona de falha dos condutores e mostrando-se adequada para construção de curvas S-N.

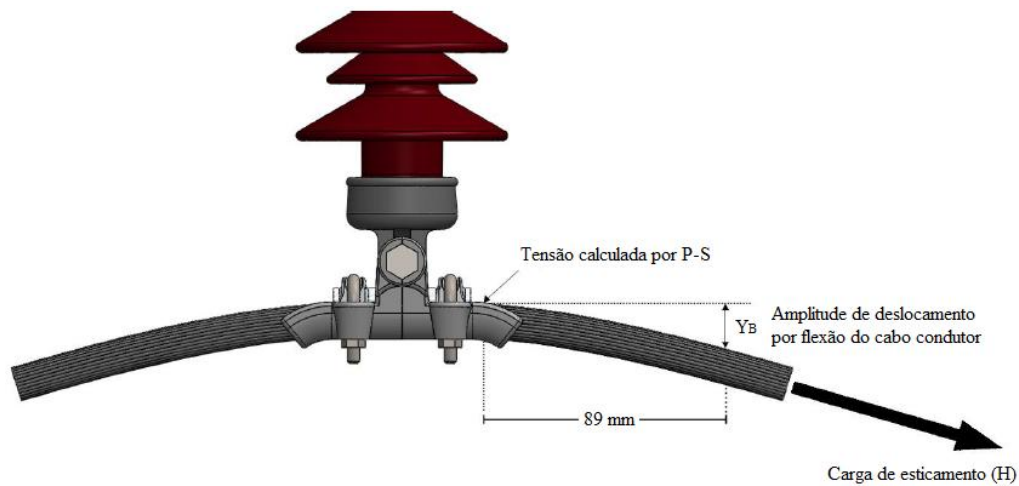


Figura 3.9 - Montagem esquemática cabo/grampo com destaque para a posição padrão para medida da amplitude de deslocamento Y_b (ROCHA, 2016).

A relação entre os esforços dinâmicos e a amplitude de vibração, que em campo é medida por vibrógrafos posicionados nas proximidades do grampo, é dada segundo P-S por:

$$\sigma_a = KY_b \quad (19)$$

Em que σ_a é amplitude de tensão zero a pico na camada mais externa do condutor e no último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão (UPC), Y_b é o deslocamento pico a pico medido em um ponto 89 mm distante do UPC e K é um fator de conversão, o qual é pode ser determinado por:

$$K = \frac{Edp^2}{4(e^{-px} - 1 + px)} \quad (20)$$

Onde E (MPa) e d (mm) são respectivamente, o módulo de elasticidade e o diâmetro de um fio da camada mais externa do condutor e x (mm) é a distância entre o ponto de medida da amplitude de deslocamento do cabo (Y_b) e o último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão; ou seja, pelo padrão adotado pelo IEEE (1966), $x = 89 \text{ mm}$. Já o parâmetro p é determinado por:

$$p = \sqrt{\frac{H}{EI}} \quad (21)$$

Em que H (N) é a carga de esticamento do cabo e EI ($N.mm^2$) é a rigidez do cabo à flexão, cujo valor mínimo é dado por:

$$EI_{min} = n_{al}E_{al}\frac{\pi d_{al}^4}{64} + n_aE_a\frac{\pi d_a^4}{64} \quad (22)$$

Onde os sobrescritos "al" e "a" caracterizam respectivamente as características dos fios de alumínio e de aço, sendo n o número de fios, E o módulo de elasticidade do material e d o diâmetro individual dos fios.

Deve-se ressaltar que a Equação (22) é utilizada na equação de P-S para favorecer o projeto da linha de transmissão sob o ponto de vista de segurança, uma vez que a variação da rigidez a flexão do cabo em função do comportamento dinâmico não é levada em consideração. Para pequenos níveis de amplitude de deslocamento, espera-se que os fios individuais do condutor não deslizem entre si, aproximando-se do comportamento de um corpo rígido, o que corresponde à máxima rigidez à flexão. Por outro lado, a medida que a amplitude de vibração aumenta, os fios tendem a deslizar entre si e a rigidez a flexão se aproxima de EI_{min} , situação de maior vulnerabilidade do cabo a falhas por fadiga.

A leitura da amplitude de deslocamento sofrida pelo cabo condutor na linha de transmissão é obtida em campo por meio de vibrógrafos, conforme ilustrado pela Figura 3.10. Estes aparelhos permitem a coleta de dados em pontos críticos da linha, possibilitando a adoção de medidas preventivas como o uso de acessórios de segurança ou para prever a durabilidade da LT em anos de serviço.



Figura 3.10 - Vibrógrafo VIBREC 500 WT.

3.6 Metodologias de Análise da Vida Residual do Cabo Condutor

Devido à complexidade do mecanismo de falha de cabos condutores não há critério analítico capaz de representar adequadamente os diversos fenômenos que atuam em conjunto, como a superposição do problema de fadiga devido às tensões cíclicas com o *fretting* decorrente de microdeslizamentos entre superfícies em contato. Entretanto, o desenvolvimento de metodologias para análise da durabilidade de cabos condutores de energia é fundamental para o projeto de uma linha de transmissão, sendo necessário a caracterização de parâmetros que garantam a integridade da linha.

Nesse contexto, algumas metodologias foram propostas a partir da padronização do método da amplitude de flexão pelo IEEE (1966) e da formulação proposta por P-S, nas quais a deformação ou a tensão no cabo, medida com base no ponto 89 *mm* distante do UPC, é comparada com limites obtidos por meio de ensaios em laboratório para avaliar a severidade dos danos resultantes das vibrações eólicas. Em geral, três metodologias são utilizadas:

1. IEEE: Máxima deformação devido à flexão;
2. EPRI: Limite de resistência à fadiga;
3. CIGRE: Estimativa do tempo de vida do condutor.

3.6.1 Máxima deformação do IEEE

O Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica (IEEE) apresentou um critério baseado na formulação de P-S, junto ao método padrão de amplitude de flexão, para avaliar a durabilidade do condutor em função da máxima deformação sofrida pelo cabo durante a vibração. Foi estabelecido que, apesar da máxima deformação tolerada por um condutor de alumínio com alma de aço (ACSR) sem eventuais falhas por fadiga não poder ser precisamente especificada, valores entre 150 e 200 $\mu\text{in/in}$ (*microstrains*) pico a pico podem ser tomados como um guia de valores seguros (IEEE, 1966). Apesar de se tratar de um critério bastante conservativo, muitos países ainda utilizam essa referência para avaliar o sistema de amortecimento de linhas de transmissão (EPRI, 2010).

3.6.2 Limite de resistência do EPRI

Em 1979, o *Orange Book* do Instituto de Pesquisa em Energia Elétrica (EPRI) usado como padrão por muitas empresas do setor elétrico, apresentou os valores limites de amplitude de tensão e máxima amplitude de vibração que poderia ocorrer durante a vida em serviço de diversos tipos de cabos, abaixo dos quais não haveria falhas por fadiga. Assim como a máxima deformação estabelecida pelo IEEE, o limite de durabilidade da EPRI é baseada na formulação de Poffenberger-Swart.

A partir de uma quantidade significativa de dados - obtidos mediante testes laboratoriais para diferentes tipos e tamanhos de cabos de alumínio com alma de aço, assumindo que a vida infinita do condutor seja atingida em 5×10^8 ciclos - essa metodologia

estabelece que cabos ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*) com mais de uma camada de fios tem um limite de resistência à fadiga de $8,5 \text{ MPa}$ ou um deslocamento máximo de $Y_b = 0,23 \text{ mm}$. Esses valores podem ainda ser aplicados à condutores de alumínio homogêneos (AAAC - *All Aluminium Alloy Conductor*) que utilizam fios de alumínio liga 1350 ou 5005, enquanto os condutores com fios liga 6201 ou similar possuem um limite de $5,7 \text{ MPa}$ (EPRI, 2010).

Se a máxima amplitude de flexão for usada como critério para o limite de durabilidade, algumas concessões são permitidas (IEEE, 2007):

1. A amplitude de flexão pode exceder o valor limite em até 5% do número total de ciclos;
2. Não mais do que 1% dos ciclos pode exceder 1,5 vezes a amplitude limite;
3. Nenhum ciclo pode exceder 2 vezes o valor limite.

3.6.3 Método de estimativa de tempo de vida do condutor da CIGRE

O método de estimativa de vida de cabos condutores proposto pela CIGRE, leva em consideração o efeito de todos os ciclos de vibração por meio da teoria de acúmulo de dano. A vantagem dessa metodologia é a determinação da vida residual do condutor em quantidade de anos através de modelos como o de Palmgren-Miner a partir de medições de campo durante certo período de tempo.

Os vibrógrafos instalados nas linhas de transmissão são utilizados para verificar a amplitude de flexão do condutor durante sua vida em serviço. Para tal, esse dispositivo é posicionado nas proximidades do grampo de suspensão e realiza medições de 1 a 12 segundos, com um intervalo entre 1 e 60 minutos durante 24 horas por dia e por até 3 meses a partir da instalação para o modelo PAVICA. Os dados coletados são armazenados em matrizes e extrapolados para o período de um ano, relacionando o número de ocorrências (número de ciclos) em função do deslocamento sofrido pelo cabo e da frequência de vibração, conforme ilustrado pela Figura 3.11.

Os dados de amplitude de vibração coletados pelo vibrógrafo são convertidos em amplitude de tensão via formulação de P-S e, por meio da regra de Palmgren-Miner, pode-se então quantificar a fração de dano provocada por unidade de bloco de amplitude de tensão devidamente armazenado pelo vibrógrafo. Note que o cálculo da fração de dano por nível de amplitude de tensão faz uso do número de ciclos de carregamento que o material resiste para determinado nível de tensão (curva S-N). Para tal, é possível obter curvas S-N em laboratório ou utilizar uma curva teórica obtida a partir de um banco de dados experimentais para cabos condutores denominada de *Safe Border Line* (CIGRE, 1999). Vale ressaltar que a curva teórica disponibilizada pela CIGRE apresenta dados referentes a diversos tipos de cabos, mostrando-se bastante conservativa na maior parte dos casos. A grande vantagem apresentada pelo resultado dessa metodologia é fornecer a vida remanescente do condutor em anos de serviço (FRONTIN, 2010).

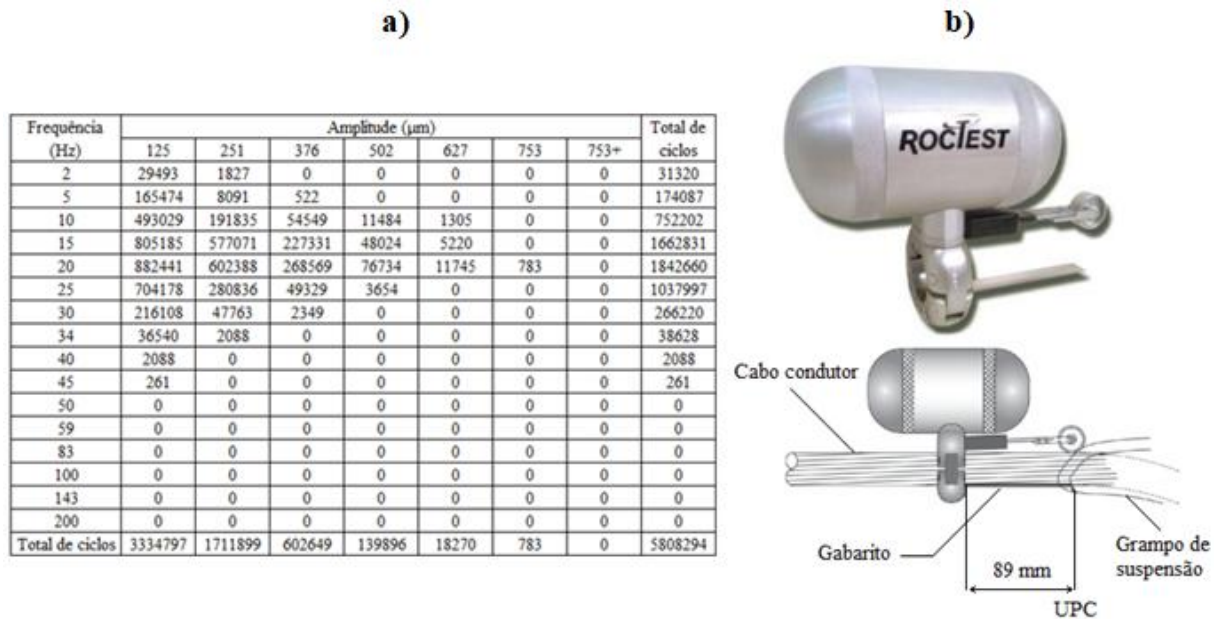


Figura 3.11 - a) Matriz obtida por meio de um vibrógrafo extrapolada pelo período de um ano (BELLORIO, 2009); b) Instalação do vibrógrafo modelo PAVICA (modificado: ROCTEST, 2005).

3.7 Esforços Estáticos em Cabos Condutores

A ruptura de fios de um cabo condutor de energia pode ocorrer devido à combinação de diversos fenômenos não previstos na fase de projeto de uma linha de transmissão, como por exemplo: mudança da velocidade ou do regime do vento incidente na região de montagem da linha, variações de temperatura fora da faixa esperada em uma série histórica, acúmulo de neve no cabo condutor, entre outros.

É de conhecimento geral que o uso de altas cargas de esticamento do cabo condutor diminui a quantidade de cabo necessária à LT reduzindo o investimento de capital da rede. Entretanto, deve-se destacar que os fios do condutor se tornam mais vulneráveis às vibrações eólicas a medida que o nível de tensão é elevado, evidenciando a necessidade de definir um limite superior para a carga de esticamento capaz de garantir a integridade do condutor por um período de tempo significativo.

Neste contexto, a definição de uma carga de esticamento conservativa sob o ponto de vista de vibrações eólicas, capaz de manter o projeto da LT economicamente viável e dar margem a variações decorrentes de fenômenos não esperados durante a vida de serviço do cabo condutor torna-se uma tarefa bastante complicada. Dessa forma, o CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*) estabeleceu dois parâmetros de projeto para a determinação do limite seguro para a carga de esticamento do condutor: o *Every Day Stress* (EDS), que determina o carregamento em termos do percentual da carga de ruptura do condutor e o parâmetro H/w , relacionado à curva catenária gerada pelo cabo entre duas torres de transmissão.

3.7.1 Every Day Stress (EDS)

Em 1953 o comitê 6 da CIGRE exibiu o relatório conhecido como "*EDS Panel*" com o propósito de expor dados de pesquisas realizadas pelo mundo sobre cabos condutores de energia. Esse estudo foi realizado com condutores de diversos materiais sob condições de vibração e acreditava-se ser a melhor forma de se evitar falhas por fadiga em linhas de transmissão. O painel definia a EDS como a tensão atuante no cabo - definida em termos da carga de ruptura à tração do condutor - na maior parte de sua vida em serviço sob condições próximas da temperatura do dia mais frio do ano em uma série histórica e sem sobrecargas (BARRET, 2001).

Entretanto, o conceito de EDS aparentou ser insuficiente para explicar as ocorrências de falha por fadiga em linhas de transmissão, uma vez que o valor proposto como seguro não era capaz de garantir a integridade dos condutores por um período de tempo significativo. Conforme pode ser observado pela Tabela 3.3, dentre as linhas que estiveram em serviço entre 10 e 20 anos por exemplo, 45% com $EDS < 18\%$ e 78% com $EDS \geq 18\%$ foram danificadas devido às vibrações. Devido às ocorrências de falha mesmo dentro dos limites de segurança propostos, novos critérios foram desenvolvidos a fim de fornecer um melhor guia para as empresas concessionárias.

Tabela 3.3 - Linhas danificadas em função do nível de EDS (CIGRE, 1999).

Vida em serviço (anos)	% de linhas danificadas	
	EDS < 18%	EDS ≥ 18%
≤ 5	5,26	25,00
> 5 ≤ 10	20,93	35,29
> 10 ≤ 20	45,00	78,00
> 20	58,93	91,67

Pesquisas e testes realizados desde a apresentação do "*EDS Panel*" revelaram informações que não foram avaliadas na época, como a influência da carga de esticamento sobre o autoamortecimento do condutor (CIGRE, 1999). Para representar esse efeito, é mais conveniente a utilização de um critério capaz de considerar a influência do diâmetro e do tipo de cabo analisado, permitindo estabelecer um melhor guia em relação à fadiga de cabos condutores de energia.

3.7.2 Parâmetro H/w

Além do Every Day Stress, outro parâmetro de projeto que pode ser utilizado para fornecer um limite seguro para a carga de esticamento é a catenária (flecha) gerada pelo condutor entre duas torres de transmissão. A catenária "s" pode ser definida em função do parâmetro H/w conforme a Equação 23, onde H representa a carga de esticamento do cabo, w seu peso por unidade de comprimento e L o comprimento do vão. Uma vez que o aumento do H/w reduz a flecha gerada pelo condutor, a quantidade e a altura das torres de transmissão

poderão ser reduzidas, assim como a quantidade de cabo utilizada na LT, representando uma grande economia de capital. Por outro lado, a utilização de maiores cargas de esticamento aumentam a incidência do problema de fadiga, o que pode reduzir de forma significativa a vida do condutor e provocar falhas inesperadas.

$$s = \frac{H}{w} \left[\cosh \left(\frac{Lw}{2H} \right) - 1 \right] \quad (23)$$

O parâmetro H/w não surgiu com o intuito de ser um guia completo contra as falhas por fadiga dos cabos condutores, porém espera-se que este conceito apresente uma melhor orientação em relação ao EDS ao possuir algumas vantagens. Além do reconhecimento de que a tensão estática atuante nos fios de alumínio é um importante fator para a falha devido à fadiga, o H/w está diretamente relacionado às propriedades de autoamortecimento do cabo (BARRET, 2001). O deslizamento relativo entre os fios está intimamente relacionado ao nível de tensão média atuante no condutor; ou seja, ao elevar a carga de esticamento, a aderência entre os fios aumenta e o movimento relativo entre eles é reduzido. Conseqüentemente, o cabo terá uma menor capacidade de autoamortecimento, o que poderá gerar um aumento das amplitudes de vibração e uma eventual falha por fadiga.

Estudos revelaram que as características do terreno em que a linha de transmissão será construída também exerce grande influência na vida em fadiga do condutor. A ocorrência de vibrações eólicas está relacionada à intensidade da turbulência do vento, que por sua vez é função do tipo de vegetação local. A partir do conhecimento de campo obtido através de dados históricos relacionados às linhas de transmissão, em relação à tensão de projeto e a ocorrência ou não de falha por fadiga, uma tabela de referência dos limites de segurança do parâmetro H/w foi construída em função das características do terreno em que a LT se encontra (Tabela 3.4). É importante destacar que esses valores são válidos para condutores nus não amortecidos do tipo AAC, AAAC, ACAR e ACSR. Já a carga de esticamento H se refere ao carregamento inicial, antes da influência do vento, gelo ou fluência, na temperatura média do mês mais frio do ano.

Tabela 3.4 - Valores recomendados do parâmetro H/w em função das características do terreno (CIGRE, 1999).

Categoria do terreno	Características do terreno	H/w (m)
A	Aberto, plano, sem árvores, sem obstruções, com cobertura de neve, próximo a grandes lagos, rios largos ou mares, desertos planos.	1000
B	Aberto, plano, sem árvores, sem obstruções, sem neve, como em áreas rurais sem obstruções.	1125
C	Aberto, plano, sem ondulações com pouquíssimos obstáculos, vegetação rasteira ou fazendas com poucas árvores, sebes e outras barreiras, além de prados e tundra.	1225
D	Área construída com algumas árvores e prédios, por exemplo, subúrbios residenciais, pequenas cidades, bosques e arbustos, campos com pequenos arbustos, árvores e sebes.	1425

Os terrenos da Tabela 3.4 foram divididos em quatro categorias de acordo com suas características gerais. Nota-se que terrenos com grandes obstruções, como árvores e prédios, possibilitam o uso de maiores cargas de esticamento uma vez que esta categoria resulta em grandes perturbações no escoamento do vento, provocando a mudança de regime de laminar para turbulento e reduzindo a probabilidade de ocorrência de vibrações eólicas dos cabos condutores. Analogamente, a redução dos obstáculos presentes no terreno favorecem o regime de escoamento laminar e, conseqüentemente, a ocorrência de vibrações eólicas, provocando uma redução nos níveis seguros do parâmetro H/w . Deve-se destacar que caso exista alguma dúvida sobre a categoria do terreno, a classe mais conservadora deve ser selecionada.

O parâmetro H/w pode ser expresso como uma relação das áreas (A_a , A_{al}), tensões ($S_{m,a}$, $S_{m,al}$) e as massas específicas (ρ_a , ρ_{al}) dos fios de aço e alumínio, respectivamente, do condutor conforme a Equação (24), onde g é a aceleração da gravidade (CLAREN, 1978).

$$\frac{H}{w} = \frac{A_a S_{m,a} + A_{al} S_{m,al}}{g(A_a \rho_a + A_{al} \rho_{al})} \quad (24)$$

Para demonstrar que existe uma relação linear entre a tensão média atuante nos fios de alumínio do cabo condutor e o parâmetro H/w é necessário admitir as seguintes aproximações para os módulos de elasticidade e as massas específicas dos materiais:

$$E_a \cong 3E_{al} \quad (25)$$

$$3\rho_{al} \cong \rho_a \quad (26)$$

Sabe-se pela Lei de Hooke que a tensão, σ , atuante em um componente mecânico é diretamente proporcional à deformação, ϵ , sofrida pelo material, de forma que:

$$\sigma = E\epsilon \quad (27)$$

Dessa forma, admitindo-se que ambos os fios de aço e alumínio apresentam uma mesma deformação, a equação (24) pode ser escrita por:

$$S_{m,al} = g\rho_{al} \frac{H}{w} \quad (28)$$

Uma vez que o parâmetro H/w é determinado na fase de projeto da LT, a Equação (28) se destaca ao permitir a determinação do nível de tensão média atuante nos fios do cabo condutor a partir da constante gravitacional e da massa específica da liga de alumínio utilizada. Entretanto, nota-se que durante a dedução dessa equação algumas aproximações tiveram que ser efetuadas com respeito ao módulo de elasticidade e massa específica dos materiais, além de considerar implicitamente uma deformação uniforme da seção transversal do condutor durante a aplicação do carregamento.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Cabos Condutores Analisados

Os procedimentos experimentais da presente pesquisa serão realizados em quatro tipos de condutores: *i*) CAA TERN, condutor de alumínio com alma de aço; *ii*) CA ORCHID, condutor de alumínio 1350; *iii*) CAL 1055, constituído de alumínio liga 6201 e *iv*) CAL 823, condutor de alumínio 1120. A Figura 4.1 ilustra a seção transversal dos condutores, já as propriedades geométricas e mecânicas são expostas pela Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Propriedades geométricas e mecânicas dos cabos condutores utilizados durante a pesquisa (NEXANS, 2013).

Condutor	Bitola (mcm)	Área Nominal Alumínio (mm ²)	Área Nominal Aço (mm ²)	Fios Alumínio (mm)	Fios Aço (mm)	Diâmetro Nominal Cabo (mm)	Massa Linear (kg/km)	Carga Ruptura (kgf)
TERN	795,0	402,82	27,83	45x3,376	7x2,250	27,01	1333,4	9998
ORCHID	636,0	322,24	-	37x3,330	-	23,31	888,4	5143
CAL 1055	1055,0	534,46	-	61x3,340	-	30,06	1461,0	15549
CAL 823	823,8	417,42	-	37x3,790	-	26,53	1149,6	9705

i) Condutor de alumínio com alma de aço (TERN): Os condutores de alumínio com alma de aço (CAA) ou *Aluminum Conductors Steel Reinforced (ACSR)*, são do tipo concêntrico, reunidos em uma ou mais camadas de fios de alumínio liga 1350/H19 ao redor de uma alma de aço galvanizado. A combinação de fios de diferentes materiais visa a obtenção da melhor relação entre capacidade de transporte de corrente e resistência mecânica em função de cada aplicação (ALUBAR, 2010).

O condutor TERN em particular é constituído de sete fios de aço, com 2,250 mm de diâmetro cada, que compõem a alma do cabo e 45 fios de alumínio liga com diâmetro de 3,376 mm, resultando numa área nominal de 430,65 mm². O diâmetro nominal do condutor é de 27,01 mm e sua massa linear é de 1333,4 kg/km. Já a carga de ruptura é de 9998 kgf.

ii) Condutor de alumínio (ORCHID): Os condutores de alumínio (CA) ou *All Aluminum Conductors (AAC)* são encordoados de forma concêntrica com uma ou mais camadas de fios de alumínio 1350. O condutor ORCHID possui 23,31 mm de diâmetro, sendo constituído por 37 fios de 3,330 mm de diâmetro cada, com uma área nominal de 322,24 mm². A massa linear do condutor é de 888,4 kg/km e sua carga de ruptura é de 5143 kgf.

iii) *Condutor de alumínio liga (CAL 1055)*: Os condutores de alumínio liga (CAL) ou *All Aluminum Alloy Conductors (AAAC)*, são encordoados de forma concêntrica e compostos de fios de alumínio liga, no caso: liga 6201-T81. Esses condutores foram desenvolvidos com o intuito de reduzir os custos, em relação aos condutores com alma de aço, nas aplicações em que a resistência mecânica obtida pelos condutores de alumínio puro não supriam a necessidade de projeto. Em comparação com a liga de alumínio 1350/H19, as ligas de alumínio 6201-T81 possuem maior resistência a corrosão e, por serem mais duros, apresentam maior resistência à abrasão (ALUBAR, 2010).

O cabo condutor CAL 1055 possui 30,06 mm de diâmetro nominal, resultante de sua construção com 61 fios de alumínio de 3,340 mm de diâmetro cada e uma área nominal de 534,46 mm². Sua massa linear é de 1461 kg/km com carga de ruptura de 15549 kgf.

iv) *Condutor de alumínio liga (CAL 823)*: Ao comparar condutores de mesma bitola, pode-se perceber que os cabos de alumínio que fazem uso da liga 1120 apresentam maior resistência mecânica quando comparados à liga 1350 e menor resistividade quando comparados à liga 6201. Como vantagem econômica, a liga 1120 não necessita dos processos de solubilização e tratamento térmico como ocorre com a liga 6201 (ALUBAR, 2010).

O CAL 823 em particular é constituído de 37 fios de 3,790 mm de diâmetro, resultando num diâmetro nominal de 26,53 mm e 417,42 mm² de área da seção transversal. Sua massa linear é de 1150 kg/km e a carga de ruptura do cabo é de 9705 kgf.

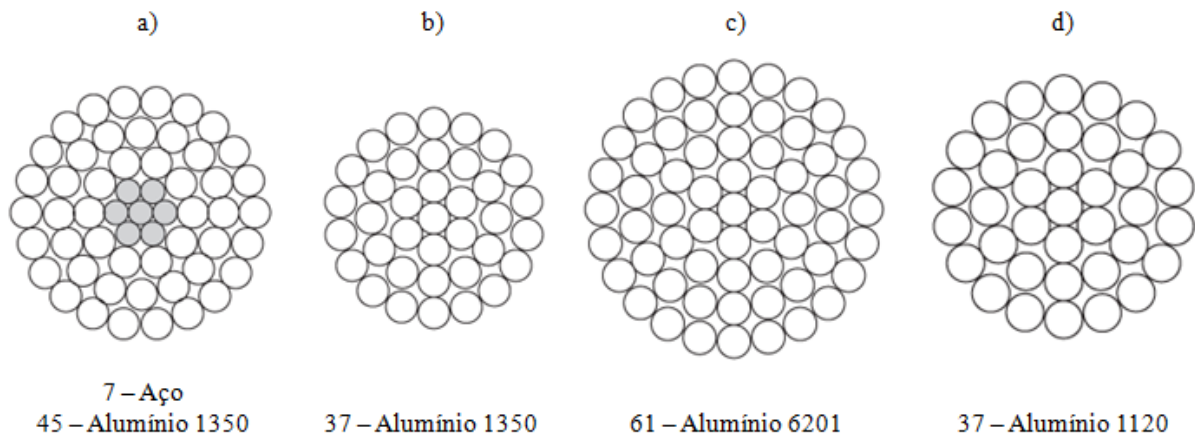


Figura 4.1 - Seção transversal dos cabos condutores utilizados durante a pesquisa: a) TERN; b) ORCHID; c) CAL 1055; d) CAL 823 (ALUBAR, 2010).

4.2 Bancada de Ensaios Experimentais

O desenho esquemático da bancada de ensaios de cabos condutores de energia do laboratório de fadiga e integridade estrutural da Universidade de Brasília está descrita na Figura 4.2. O comprimento total do vão é de 46,8 m divididos em dois vãos: ativo e passivo. O vão ativo define o comprimento da amostra de ensaio, sendo delimitado pelo centro da roldana do bloco fixo e o centro do grampo de suspensão posicionado no bloco móvel. Já o vão passivo é utilizado apenas para ancoragem e tracionamento do cabo.

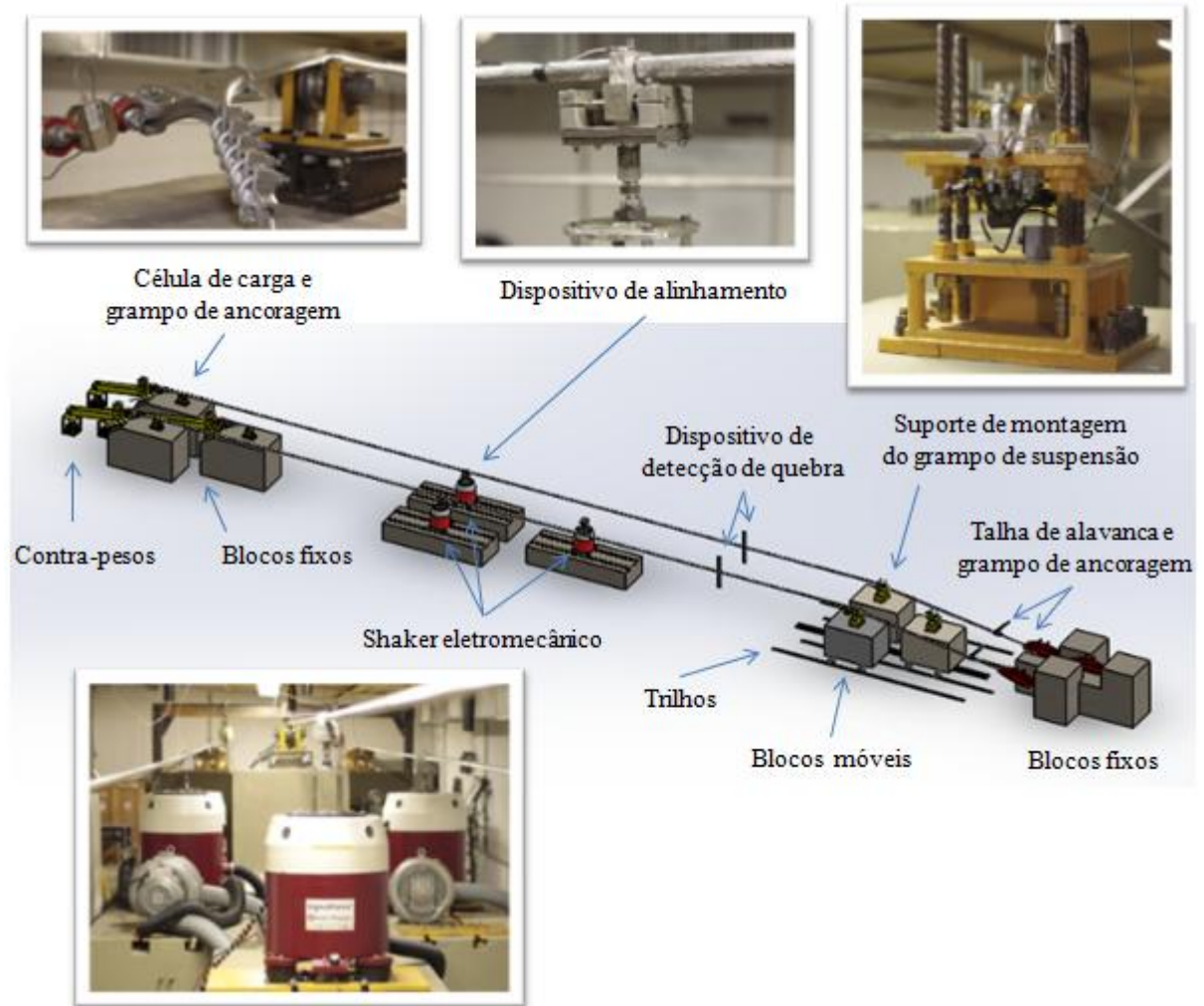


Figura 4.2 - Bancada de ensaios experimentais do laboratório de fadiga e integridade estrutural da Universidade de Brasília (modificado: ROCHA, 2016).

A amostra do cabo condutor é posicionada sob dois pontos de apoio que funcionam como pontos de articulação: o grampo de suspensão e a roldana do bloco fixo. Nas extremidades do cabo, grampos de ancoragem são utilizados para conexão com a talha de alavanca no vão passivo e com a célula de carga na extremidade oposta, permitindo a aplicação da carga de ensaio. Neste ponto do ensaio é importante destacar o correto posicionamento do grampo uma vez que a carga de esticamento da amostra pode causar danos a este elemento caso seja disposto de modo invertido: a alça do grampo de ancoragem deve estar direcionada para o vão ativo em ambos os lados da bancada de ensaio.

O grampo de ancoragem do vão passivo faz a conexão da amostra ao bloco fixo por meio de uma talha de alavanca, a qual pode ser visualizada na Figura 4.3. Esse equipamento é manuseado a fim de controlar a altura do braço de alavanca utilizado na outra extremidade da amostra e permitir um intervalo relativamente grande com relação à carga de esticamento. Para realizar o carregamento do braço de alavanca são utilizados tarugos de ferro fundido que aos poucos são adicionados ou retirados para manipulação da carga de esticamento. O tracionamento do cabo é controlado por meio de uma célula de carga posicionada entre o grampo de ancoragem e o braço de alavanca, cuja montagem está ilustrada pela Figura 4.4,

para permitir o monitoramento da carga de esticamento do condutor durante o ensaio. De forma resumida, a carga de esticamento do cabo é imposta por meio de um sistema de peso (talha de alavanca) e contrapeso (braço de alavanca) controlado por uma célula de carga responsável pela leitura da carga de ensaio.



Figura 4.3 - Talha de alavanca.



Figura 4.4 - Célula de carga CSR-5000 kgf.

Tanto os blocos fixos quanto os blocos móveis foram construídos em concreto armado para garantir alta rigidez à bancada. Os blocos móveis, ilustrados pela Figura 4.5, estão posicionados sobre uma espessa chapa de aço com rolamentos nas extremidades que proporcionam a movimentação sobre trilhos com perfil I, permitindo a variação do comprimento do vão ativo no intervalo de 31 a 41 m.

Atualmente o laboratório possui três bancadas similares capazes de realizar ensaios estáticos e dinâmicos e uma dentre elas (bancada C) capaz de realizar ensaios de auto amortecimento de cabos condutores. Nos ensaios dinâmicos, o excitador eletromecânico (*Shaker*) fica posicionado sobre uma chapa de aço que permite sua movimentação em um trilho de aço com perfil C para melhor posicionamento do excitador em relação ao nó ou ao anti-nó em cada frequência de excitação, melhorando a estabilidade do ensaio e evitando possíveis pausas (Figura 4.6).



Figura 4.5 - Blocos móveis das bancadas A, B e C.



Figura 4.6 - Blocos fixos com trilhos para deslocamento do excitador eletromecânico.

Como a variação de temperatura possui um efeito bastante significativo na resposta do cabo condutor, existe no laboratório um sistema de condicionamento de ar para garantir a estabilidade da temperatura durante a execução dos ensaios. Além disso, um revestimento isolante é utilizado no teto para reduzir a transferência de calor, como pode ser observado na Figura 4.7.



Figura 4.7 - Sistema de ar condicionado e isolamento térmico.

4.3 Preparação da Amostra na Bancada de Ensaio Experimentais

Como qualquer procedimento experimental, os ensaios serão realizados por meio de uma série de etapas pré definidas que devem ser respeitadas para permitir a verificação e a validade dos dados coletados. A primeira etapa dos ensaios é o posicionamento da amostra na bancada, conforme ilustrado pela Figura 4.2, seguido do esticamento do cabo condutor. Um intervalo de tempo será dado para permitir a acomodação do cabo e garantir que as deformações coletadas pelos extensômetros sejam apenas devido à variação da carga de esticamento, no caso do ensaio estático, e devido à flexão durante o ensaio dinâmico. O posicionamento do cabo condutor na bancada de ensaios e o esticamento da amostra deve seguir rigorosamente as seguintes etapas:

- I. Posicionamento das polias para movimentação do cabo condutor e dos elementos de proteção para evitar o atrito entre o cabo e estruturas que possam danificá-lo, como por exemplo, os blocos fixos e o excitador eletromecânico, conforme ilustrado pela Figura 4.8;

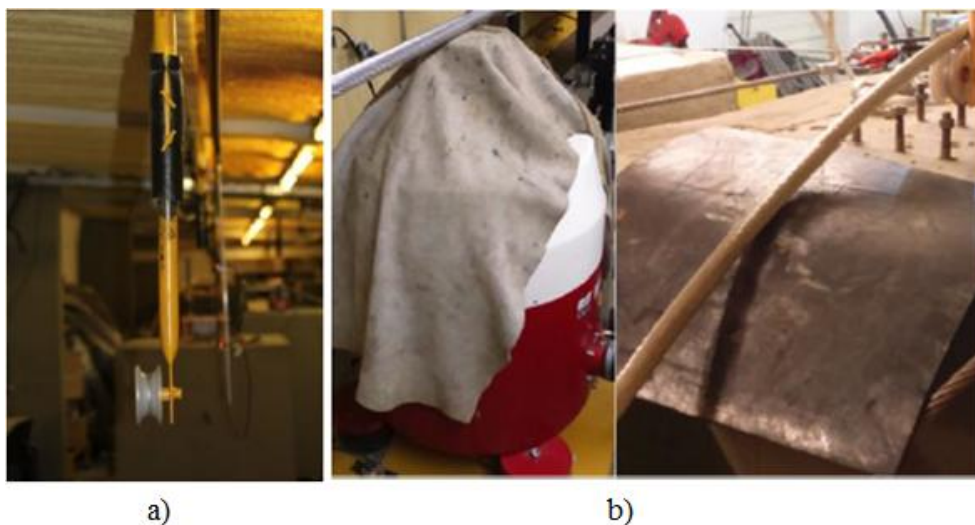


Figura 4.8 - a) Polias de sustentação utilizadas para movimentação do cabo durante o esticamento; b) Elementos de proteção.

- II. Movimentar a bobina na qual o cabo sob análise é fornecido (Figura 4.9a), puxando-o até atingir a bancada fixa da extremidade oposta;
- III. A Figura 4.9b ilustra o grampo de suspensão do condutor que deve ser posicionado no suporte de montagem localizado no bloco móvel. Deve-se ressaltar que os parafusos não devem ser apertados neste momento, sendo apenas posicionados para impedir a movimentação da telha (parte superior do grampo);

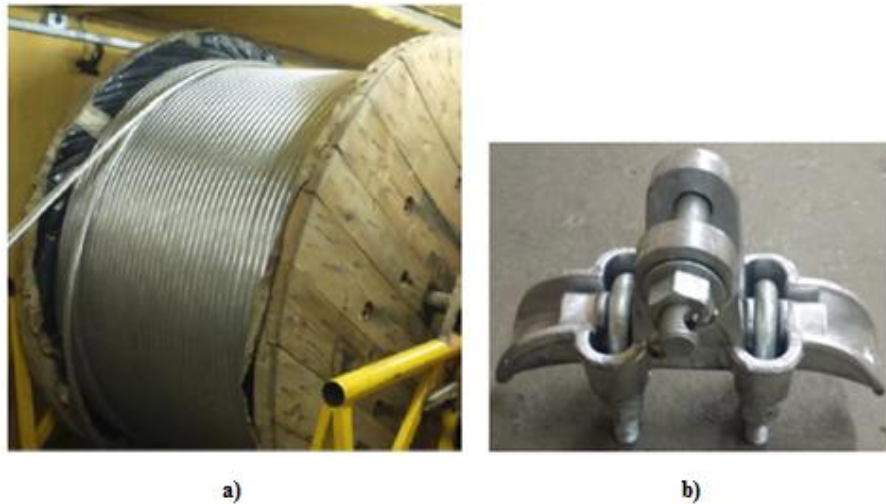


Figura 4.9 - a) Bobina; b) Grampo de suspensão monoarticulado Forjasul 55101/003.

- IV. Em seguida, o cabo deve ser fixado aos grampos de ancoragem. Os parafusos deste componente devem ser apertados de forma gradual e cruzada para evitar o possível empenamento dos mesmos. O grampo de ancoragem de uma das extremidades deve ser conectado à célula de carga para leitura do carregamento, conforme a Figura 4.10. Na extremidade oposta, deve-se realizar a conexão entre o cabo e a talha de alavanca.



Figura 4.10 - Conexão da célula de carga através de um grampo de ancoragem.

Uma vez que as extremidades do cabo estão fixas aos grampos de ancoragem, o tracionamento do condutor é realizado. Primeiramente deve-se imprimir uma pré-carga ao cabo utilizando apenas a talha de alavanca; em seguida, a carga de esticamento equivalente ao H/w de ensaio é obtida por meio do braço de alavanca na outra extremidade do condutor. Ambos os componentes utilizados no tracionamento do cabo estão ilustrados pela Figura 4.11. O valor do carregamento, H , pode ser conferido por meio da célula de carga ilustrada pela Figura 4.4.

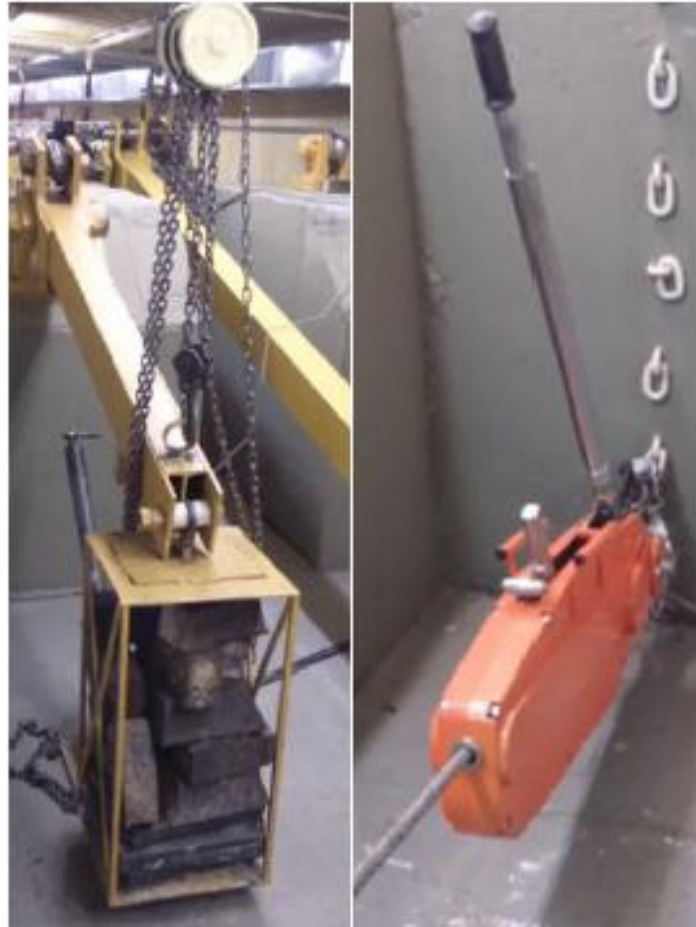


Figura 4.11 - Braço de alavanca e talha de alavanca.

- V. As roldanas devem ser retiradas e o leitor da célula de carga deve ser verificado para garantir que a carga de esticamento condiz com o planejamento do ensaio.
- VI. O cabo deve repousar por 8 horas no caso dos ensaios dinâmicos e por 24 horas para os ensaios estáticos para minimizar o efeito de deformações dos fios devido à acomodação da amostra por fluência.
- VII. No caso dos ensaios dinâmicos, a carga deve ser reduzida até o valor definido para o ensaio e os parafusos do grampo de suspensão devem ser apertados. Deve-se ressaltar que as porcas deste elemento devem ser fixadas de forma gradual e cruzada para garantir a uniformidade e apresentar 50 Nm de torque ao final do procedimento.
- VIII. Uma vez preparada a amostra, realiza-se os procedimentos de instrumentação para início dos ensaios.

4.4 Instrumentação da Amostra

No ensaio estático os extensômetros serão colados em todos os fios do cabo a uma distância de 2 m a partir do último ponto de contato entre o cabo e o grampo. Já no ensaio dinâmico, serão utilizados sensores de deslocamento para controle e monitoração da vibração do condutor e apenas três extensômetros serão colados nos fios mais altos da camada superior oposta ao UPC.

4.4.1 Extensometria

O ERE (Extensômetro de Resistência Elétrica) é um dispositivo utilizado para medição de deformações. No laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia da Universidade de Brasília, o ERE utilizado durante a execução dos procedimentos experimentais está ilustrado pela Figura 4.12 e suas características são: extensômetro de forma tradicional, unidirecional e próprio para alumínio. No contexto de análise da tensão média atuante em componentes mecânicos esse dispositivo se torna um elemento de grande importância pois, o conhecimento da deformação do material devido à algum tipo de carregamento, junto ao módulo de elasticidade do mesmo, permite a determinação da tensão atuante na estrutura do componente a partir da Lei de Hooke (Equação 27).

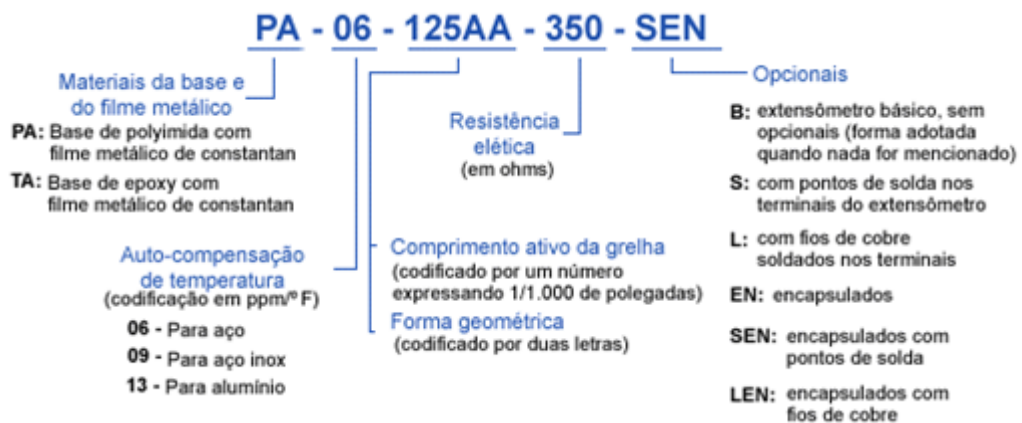


Figura 4.12 - Caracterização do ERE utilizado: PA-13-120BA-350-L (Excel Sensores).

A técnica utilizada para colagem dos extensômetros pode ser dividida basicamente em 6 etapas: *i*) preparo da superfície; *ii*) limpeza da superfície; *iii*) verificação e posicionamento do ERE; *iv*) colagem do ERE; *v*) soldagem dos fios do ERE; *vi*) verificação do funcionamento do ERE.

i) Preparo da superfície: O primeiro passo do procedimento de colagem dos extensômetros é a remoção de impurezas da superfície do cabo a fim de garantir o pleno funcionamento do ERE. Assim, a superfície deve ser lixada ou jateada com óxido de alumínio para aumentar a rugosidade superficial e permitir que a colagem resulte numa boa aderência entre o sensor e a amostra. Deve-se ressaltar que o preparo das amostras utilizadas durante a

pesquisa será realizado por meio do lixamento da superfície dos fios de interesse dos cabos condutores, conforme ilustrado pela Figura 4.13.

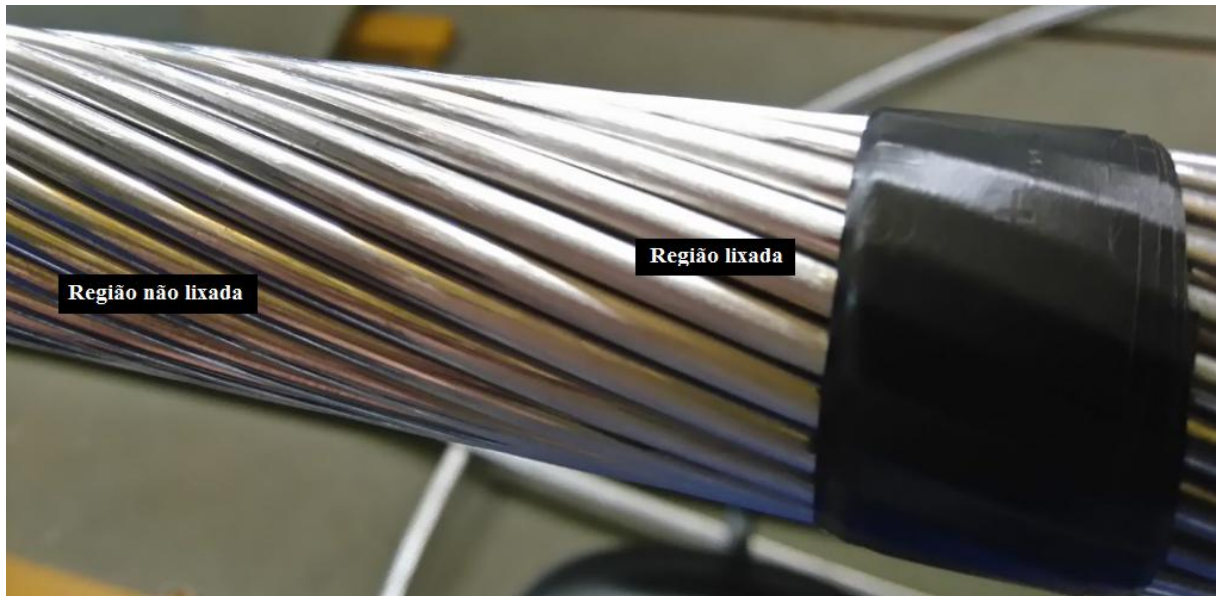


Figura 4.13 - Preparo da camada externa do cabo para colagem dos extensômetros.

ii) Limpeza da superfície: A Figura 4.14 ilustra o procedimento de limpeza da superfície do cabo condutor onde o extensômetro será colado, na qual utiliza-se álcool isopropílico e cotonete. Deve-se passar o cotonete nos fios do cabo em um movimento unidirecional para remoção dos resíduos deixados pela etapa de preparo da superfície.

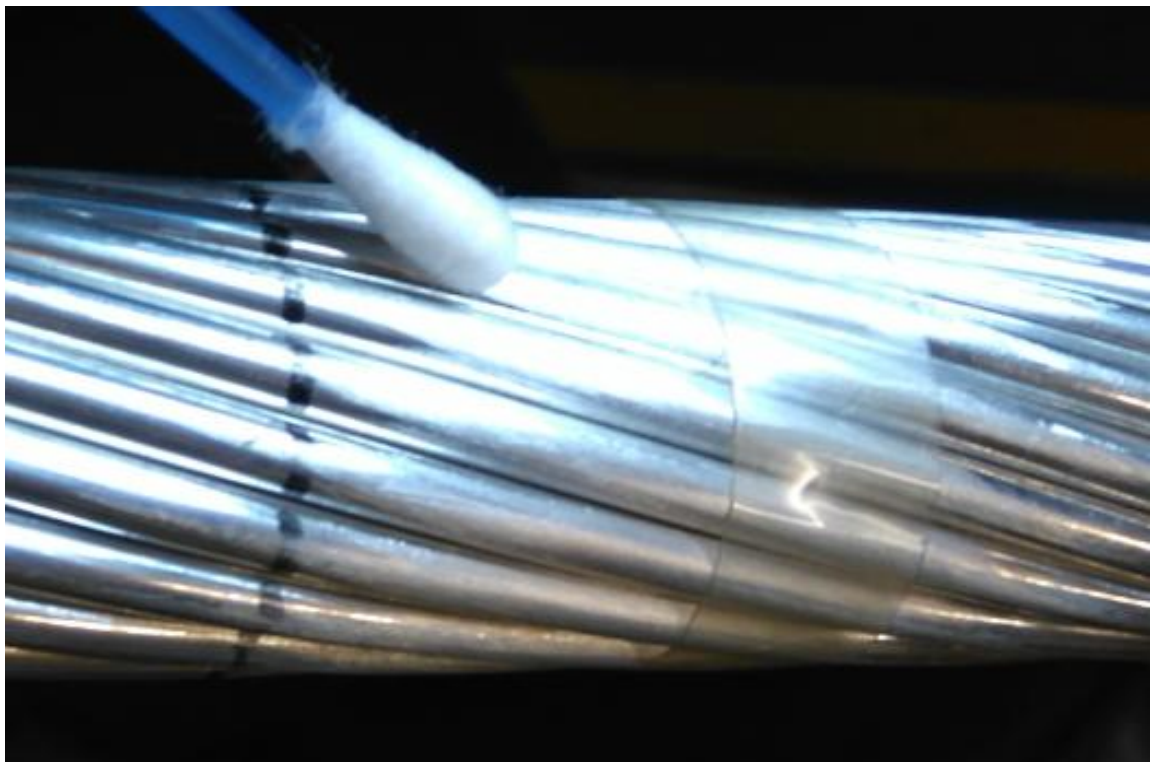


Figura 4.14 - Limpeza da camada externa do cabo para colagem dos extensômetros.

iii) *Verificação e posicionamento do ERE:* A resistência dos extensômetros deve ser verificada, sendo tolerado um intervalo de $\pm 5\%$ em relação ao valor descrito pelo fabricante. O ERE é colado a uma fita adesiva no lado oposto ao da leitura para facilitar a aplicação da cola e o posicionamento na amostra. Deve-se atentar ao alinhamento do extensômetro com relação ao fio do cabo condutor, uma vez que a leitura de deformação é unidirecional.

iv) *Fixação do ERE à amostra:* Um ponto de cola instantânea deve ser aplicado sob a fita adesiva e, com a ajuda de um cotonete ou de uma almofada de silicone, o ERE é mantido pressionado contra o fio de alumínio por cerca de 1 minuto para garantir a aderência entre o sensor e o fio do cabo condutor. A colagem do ERE está ilustrada pela Figura 4.15.

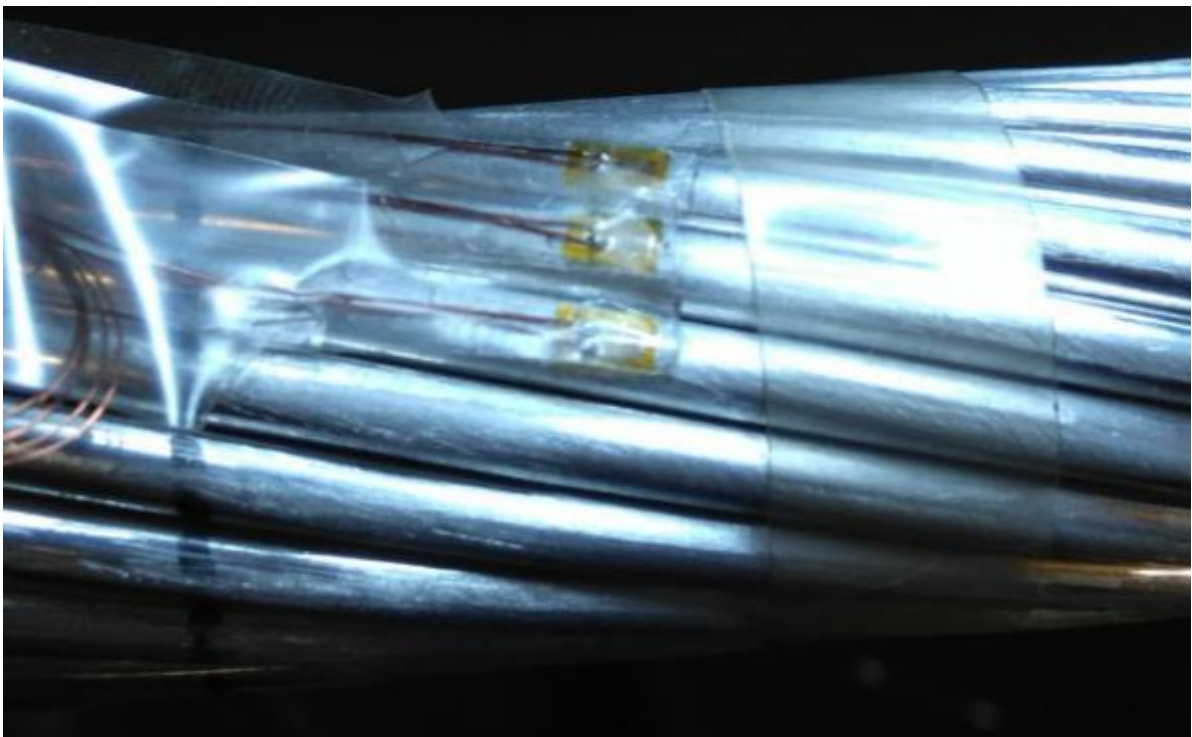


Figura 4.15 - Fixação dos extensômetros à amostra.

Em seguida, a fita adesiva é retirada e verifica-se se o extensômetro está de fato aderido ao fio de alumínio. A resistência do dispositivo deve ser novamente medida para garantir que o valor permanece dentro do limite tolerável. Os procedimentos descritos até este item serão repetidos para todos os fios de alumínio da camada externa da amostra no caso do ensaio estático e apenas para os três fios mais altos da seção transversal que contém o UPC nos ensaios dinâmicos conforme a Figura 4.16.

v) *Soldagem dos fios do ERE:* Por fim, os fios dos extensômetros são separados um a um e soldados a um cabo responsável pela conexão entre os ERE e o aquisitor de dados (ADS) conforme ilustrado pela Figura 4.17. Após a soldagem e conexão de todos os fios, a relação entre o fio de alumínio, o extensômetro e a respectiva entrada utilizada no aquisitor de dados deve ser realizada. Por exemplo: o fio 1 está conectado ao canal 1 do aquisitor de dados por meio do extensômetro 1.



a)



b)

Figura 4.16 - a) Extensômetros colados em todos os fios de alumínio da camada externa do cabo condutor para realização dos ensaios estáticos; b) Extensômetros colados nos três fios mais altos e opostos ao UPC para realização dos ensaios dinâmicos.



Figura 4.17 - Soldagem dos fios dos extensômetros.

vi) *Verificação do funcionamento do ERE:* Esta etapa se insere nos procedimentos experimentais para garantir a correta execução da técnica de extensometria, evitando leituras incoerentes de deformação. A resistência do ERE deve ser verificada no local onde foi realizada a soldagem e comparada com a leitura obtida na entrada do aquisitor de dados, sendo considerado aceitável uma mudança na resistência dentro do intervalo de $\pm 5\%$.

A extensometria é finalizada com a adição de uma camada de silicone sobre os extensômetros para protegê-los de impactos mecânicos, corrosão ou umidade, conforme ilustrado pela Figura 4.18.

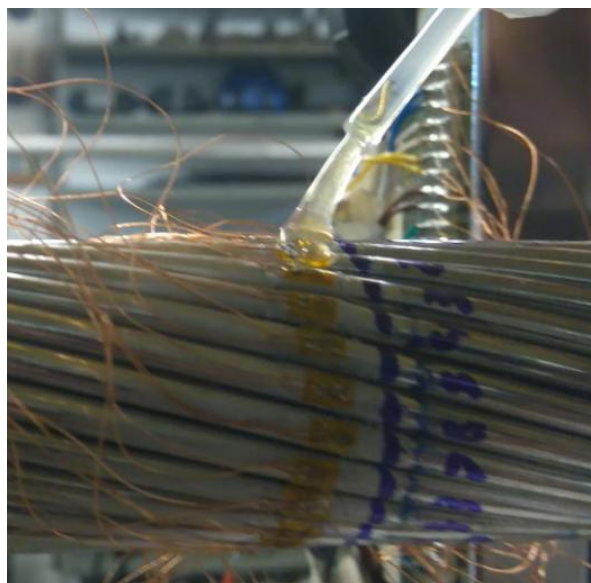


Figura 4.18 - Adição de uma camada de silicone para proteção dos extensômetros.

4.4.2 Posicionamento dos sensores de deslocamento

Para realização dos testes dinâmicos, o excitador eletromecânico deve iniciar uma vibração controlada na amostra de forma a manter a amplitude de deslocamento pico a pico constante durante todo o ensaio. Sendo assim, a etapa de instrumentação dos ensaios dinâmicos possui uma quantidade adicional de sensores em relação aos ensaios estáticos, devendo-se ainda seguir os seguintes passos:

- I. Realizar a conexão entre o excitador eletromecânico (*Shaker*) e a amostra de cabo condutor por meio de uma braçadeira e um dispositivo de alinhamento conforme a Figura 4.19. Um acelerômetro também deve ser posicionado para verificação e/ou controle do deslocamento do *Shaker*. Durante os ensaios, foi utilizado um acelerômetro piezoelétrico tipo PZ 23.

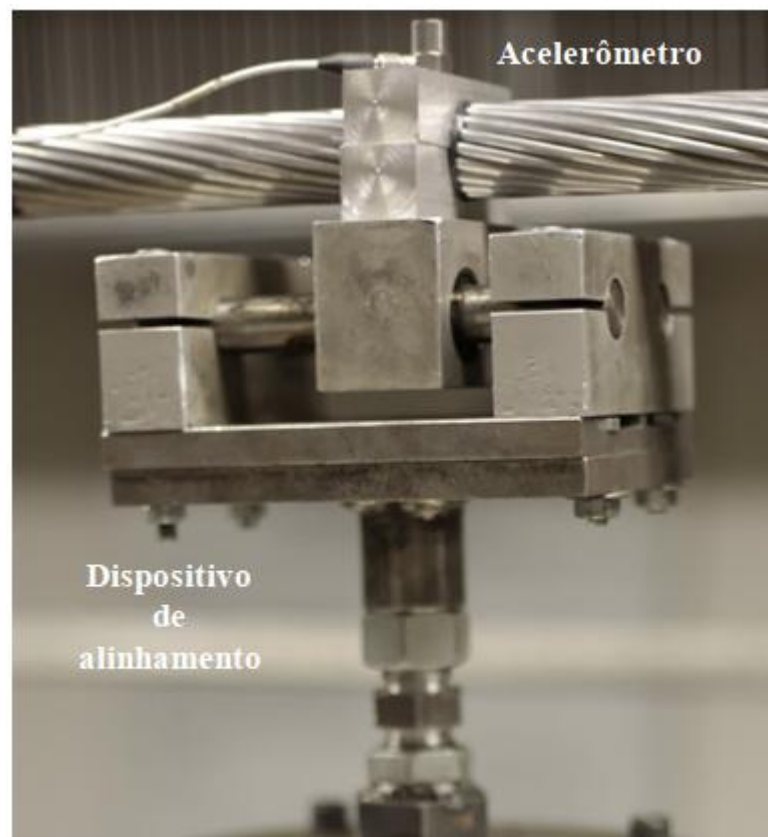


Figura 4.19 - Conexão entre o *Shaker* e a amostra.

- II. Fixar uma braçadeira na seção transversal 89 mm distante do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão. Um acelerômetro também deve ser posicionado para medir o deslocamento pico a pico do cabo (Y_b). Para realização deste procedimento, deve-se utilizar um gabarito existente no laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores da Universidade de Brasília. Por fim, deve-se posicionar um sensor de deslocamento para contagem de ciclos na parte inferior do suporte do grampo de suspensão conforme ilustrado pela Figura 4.20.

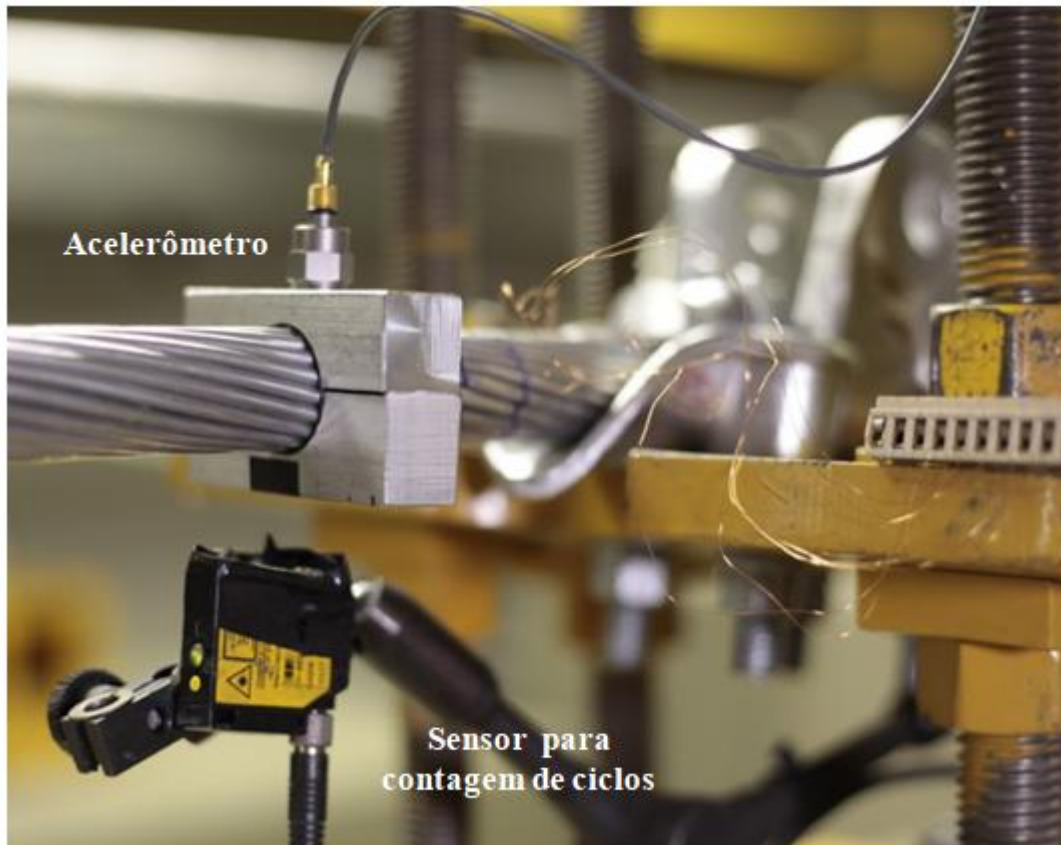


Figura 4.20 - Instrumentação da seção transversal 89 mm distante do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão.

4.5 Execução dos Ensaios Estáticos e Dinâmicos

O objetivo dos estudos relacionados ao comportamento de cabos condutores de energia com relação à fadiga é a determinação de sua vida remanescente após a construção das linhas de transmissão a fim de evitar danos devido a falhas inesperadas. Como se sabe, a vida remanescente do cabo condutor pode ser determinada pela amplitude de tensão ao qual este está submetido, via formulação de Poffenberger-Swart, junto à teoria de acúmulo de dano, como o modelo proposto por Palmgren-Miner.

Uma variável que exerce forte influência na vida do condutor é a tensão média atuante nos fios de alumínio devido a carga de esticamento, uma vez que 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 àquela referente a uma EDS de 20% (FADEL, 2010).

Neste contexto, uma das finalidades deste estudo é analisar a formulação que relaciona a tensão média atuante nos fios de alumínio da camada mais externa do condutor em função de parâmetros de projeto e avaliar a efetividade da formulação de P-S para determinação da tensão atuante no condutor na zona de falha. O procedimento experimental se baseia na execução de ensaios estáticos e dinâmicos realizados em valores preestabelecidos para o parâmetro H/w , junto ao monitoramento da deformação do condutor via análise de extensometria.

A escolha dos condutores analisados neste trabalho foi motivada pelo tipo de liga que compõe cada cabo, uma vez que os condutores TERN (CAA) e ORCHID (CA) utilizam alumínio 1350 e os condutores tipo CAL 823 e CAL 1055 são constituídos pelas ligas de alumínio 1120 e 6201 respectivamente. Deve-se ressaltar que em ambos os ensaios, estáticos e dinâmicos, os níveis de H/w de interesse são iguais a 1820, 2144 e 2725 *m*.

4.5.1 Ensaio estático

Para avaliação da tensão média dos cabos condutores em função dos três valores H/w, a amostra será primeiramente esticada no maior valor de carregamento (H/w=2725 *m*) para facilitar a instrumentação com extensômetros, os quais serão colados em todos os fios da camada mais externa do condutor. O posicionamento dos extensômetros no cabo será feita a uma distância de dois metros do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, a fim de evitar a influência de tensões localizadas como a carga de aperto no grampo ou o regime de escorregamento nessa região (VILELA, 2013).

O início do ensaio estático terá como referência o esticamento do condutor a um carregamento de 5% de EDS para os condutores TERN e CAL 1055; já os cabos ORCHID e CAL 823 terá a referência de 10% de EDS. O valor do carregamento foi definido a fim de garantir que o intervalo de carga necessário ao experimento fosse atingido apenas pela variação de altura do braço de alavanca, reduzindo a probabilidade de falha dos extensômetros, uma vez que a utilização da talha de alavanca produz movimentos bruscos da amostra.

A variação da carga de esticamento será realizada de maneira crescente, elevando a carga de forma gradativa e em passos definidos (Tabela 4.2). Ao atingir o maior valor H/w, o carregamento será reduzido com o mesmo passo de variação até atingir o valor inicial do ensaio. Em ambas as etapas um intervalo de 30 minutos será dado entre os passos de variação para garantir a acomodação do condutor e a estabilidade da leitura dos extensômetros.

O uso dos extensômetros visa determinar a tensão atuante no cabo durante a realização do ensaio e possibilitar a comparação com os valores calculados analiticamente. Os valores teóricos esperados para cada carga de esticamento foram obtidos aplicando-se a Lei de Hooke à formulação que relaciona o parâmetro H/w com o nível de tensão média atuante nos fios do condutor (Equação 28), resultando em:

$$\varepsilon = \frac{g\rho_{al} H}{E_{al} w} \quad (29)$$

Onde ε é a deformação que deve ser lida pelos extensômetros, H/w é o parâmetro de projeto dado pela razão entre a carga de esticamento e a massa linear do condutor, ρ_a e E_a são, respectivamente, a massa específica e o módulo de elasticidade da liga de alumínio dos fios que compõem a camada externa do cabo e g é a constante gravitacional.

É importante destacar que, como os extensômetros serão zerados em um nível específico de EDS devido às limitações práticas da metodologia experimental, a deformação

teórica obtida nessa referência deverá ser acrescida ao valor lido pelo ERE para coerência entre os resultados. Essa decisão não deverá afetar a análise, uma vez que a proposta da formulação é uma relação linear entre a deformação e a carga de esticamento.

Apesar de o laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia da Universidade de Brasília possuir sistemas de climatização, pequenas variações de temperatura são inerentes ao experimento, o que pode dilatar a amostra e influenciar a leitura dos extensômetros. Além da influência da temperatura, oscilações na resistência do ERE são inevitáveis durante o uso desse dispositivo, sendo tolerado uma variação de $\pm 5\%$ durante o procedimento de extensometria. Logo, nota-se que por se tratar de um procedimento experimental, erros associados às leituras de deformação podem ocorrer devido à influência de fatores externos ao ensaio.

Tabela 4.2 - Planejamento do ensaio estático.

Condutor	EDS [%]	H/w [m]	H [kgf]	Tensão teórica, $S_{m,al}$ [MPa]	Deformação teórica, ϵ [μ strain]
TERN	5	374	501	9,92	143,83
	15	1122	1502	29,77	431,50
	24	1820	2437	48,30	699,94
	29	2144	2871	56,89	824,54
	36	2725	3648	72,31	1047,98
CAL 1055	5	534	778	14,09	204,23
	10	1061	1555	28,00	405,78
	17	1820	2668	48,03	696,06
	20	2144	3143	56,58	819,97
	25	2725	3995	71,91	1042,17
CAL 823	10	844	971	22,36	323,99
	15	1266	1457	33,53	485,98
	22	1820	2094	48,21	698,64
	25	2144	2467	56,79	823,02
	32	2725	3136	72,18	1046,04
ORCHID	10	579	514	15,36	222,67
	20	1157	1029	30,70	444,96
	31	1820	1617	48,30	699,94
	37	2144	1905	56,89	824,54
	47	2725	2422	72,31	1047,98

Os procedimentos experimentais para realização do ensaio estático podem ser descritos, em ordem cronológica, pelas seguintes etapas:

1. Esticamento do cabo no maior valor H/w que será analisado pela pesquisa conforme o item 4.3 apresentado anteriormente;
2. Intervalo de 24 horas para acomodação da amostra na bancada de testes;

3. Marcação da seção transversal do condutor no local de colagem dos extensômetros: 2 metros a partir do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão;
4. Execução dos procedimentos de extensometria, conforme o item 4.4.1;
5. Verificação da leitura dos extensômetros: Inicia-se uma gravação teste dos dados dos extensômetros para analisar os valores coletados de deformação;
6. Redução da carga de esticamento para a referência da pesquisa;
7. Os extensômetros são calibrados e balanceados para início da coleta de dados;
8. A gravação de dados dos extensômetros é iniciada. Deve-se realizar uma gravação contínua, que se prolongará sem intervalos durante todo o ensaio;
9. Aplicar a nova carga de esticamento, referente ao valor H/w seguinte (Tabela 4.2). Vale lembrar que apenas a altura do braço de alavanca deve ser alterado, uma vez que a utilização da talha de alavanca pode provocar dano aos extensômetros devido a movimentos bruscos da amostra;
10. Aguardar 30 minutos para acomodação da amostra. A leitura estável dos extensômetros deve ser checada ao final deste intervalo para garantir que a estabilidade da leitura foi alcançada;
11. Repetir os procedimentos 9 e 10 até que o maior valor de carregamento seja atingido ($H/w=2725 m$);
12. Reiniciar a variação do carregamento de forma decrescente, segundo os procedimentos 9 e 10, por meio dos mesmos passos descritos na Tabela 4.2 até retornar ao valor de referência;
13. Finalizar o teste;
14. Reproduzir os valores registrados em gráficos, relacionando a tensão média e a deformação de cada fio ao respectivo valor H/w .

4.5.2 Ensaio dinâmico

Os ensaios dinâmicos serão realizados com o intuito de avaliar o uso da formulação de Poffenberger-Swart para determinação da tensão nominal atuante na zona de falha do condutor durante as vibrações eólicas. Para execução dos testes, o cabo deve ser devidamente esticado e instrumentado conforme os itens 4.3 e 4.4 apresentados anteriormente. Com relação a análise dos resultados, será construída uma curva comparativa entre a tensão teórica, calculada por P-S, e a tensão experimental obtida via extensometria: $\sigma_{P-S} \times \sigma_{exp}$. O valor da constante "K" necessário ao cálculo teórico da componente alternada de tensão via formulação de P-S, foram obtidos por meio da Equação (20) e estão apresentados na Tabela 4.3 em função do parâmetro H/w e do tipo de cabo condutor.

O procedimento experimental se inicia por meio de uma varredura em seno da amostra para obtenção das frequências de ressonância do cabo. Para realizar a varredura, a vibração do condutor foi iniciada a partir da frequência de 18 Hz e com o deslocamento do Shaker fixo em 0,5 mm pico a pico. Deve-se ressaltar que os picos de interesse deste trabalho serão aqueles que ocorrerem no intervalo entre 18 e 25 Hz, sendo escolhido o que apresentar melhor comportamento.

Tabela 4.3 - Constante de P-S em função do parâmetro H/w e do tipo de cabo condutor.

Cabo condutor	H/w [m]	K [MPa/mm]	Cabo condutor	H/w [m]	K [MPa/mm]
TERN	1820	32,00	CAL 1055	1820	30,80
	2144	33,66		2144	32,36
	2725	36,38		2725	34,92
CAL 823	1820	32,66	ORCHID	1820	30,91
	2144	34,20		2144	32,49
	2725	36,74		2725	35,07

Uma vez definida a frequência de trabalho, os extensômetros devem ser calibrados e balanceados para garantir a coerência do ensaio com relação às leituras de deformação. Em seguida, o teste dinâmico pode ser iniciado: o excitador eletromecânico introduz uma vibração com amplitude de deslocamento pico a pico constante em uma frequência próxima a uma das frequências de ressonância encontradas, impondo ao cabo condutor o carregamento dinâmico responsável pela deformação dos fios devido ao movimento de flexão. Uma vez estabilizado o ensaio, a gravação da leitura dos extensômetros é efetuada por 30 segundos e os dados são devidamente analisados. Ao final da gravação, o ensaio deve ser pausado e repetido seguindo os mesmos procedimentos para um total de três gravações, as quais devem ser realizadas a partir do mesmo passo a passo estabelecido pela metodologia de ensaio.

Com o intuito de analisar a formulação de P-S, os testes dinâmicos serão realizados para uma sequência crescente de amplitudes de deslocamento a partir de 0,1 mm pico a pico até atingir o deslocamento de 1 mm pico a pico, em passos de 0,1 mm, para os três níveis do parâmetro H/w de interesse da pesquisa. A partir da deformação lida pelos extensômetros a tensão experimental será calculada pela Lei de Hooke, uma vez que o módulo de elasticidade da liga de alumínio que compõe os condutores pode ser obtido da literatura. Em seguida, uma curva comparativa será construída para verificação dos valores teóricos obtidos via formulação de P-S.

Os procedimentos experimentais para realização do ensaio dinâmico podem ser descritos, em ordem cronológica, pelas seguintes etapas:

1. Tracionamento do cabo em um carregamento 10% maior que o definido para o ensaio conforme o item 4.3. Para o ensaio dinâmico será dado um intervalo de 8 horas para acomodação da amostra na bancada de testes;
2. Na carga de ensaio, o torque de 50 Nm nas porcas do grampo de suspensão deve ser verificado por meio de um torquímetro;
3. Execução dos procedimentos de instrumentação, conforme o item 4.4 apresentado anteriormente;
4. Varredura em seno para definição da frequência de ensaio;
5. Balanceamento e calibração dos extensômetros;
6. Início do teste dinâmico na frequência encontrada e com a amplitude de deslocamento definida para o ensaio. Uma sequência de amplitudes pico a pico será seguida em passos de 0,1 mm, de forma que o intervalo entre $0,1 \leq Y_b \leq 1,0$ mm pico a pico seja analisado;

7. Aguardar a estabilização do ensaio;
8. Proceder com a leitura de deformação dos extensômetros durante 30 segundos de gravação;
9. Copiar a gravação de dados para uma tabela;
10. Parar o ensaio e repetir os procedimentos de 5 a 9 até obter um total de três gravações para cada amplitude de deslocamento;
11. Finalizar o teste;
12. Reproduzir os valores registrados em gráficos, relacionando a tensão experimental encontrada por meio das leituras de deformação com a tensão teórica calculada pela formulação de P-S.

4.6 Microscopia

A análise topográfica tem o intuito de avaliar a severidade das marcas de *fretting* provocadas pelo movimento relativo entre os fios durante a vibração. Apenas amostras do cabo CA TERN serão levadas ao microscópio para análise devido à agenda de ensaios do laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia da Universidade de Brasília. Pretende-se mapear a área de contato entre os fios internos do cabo que provoca maior desgaste no interior do grampo de suspensão. Para tal, será realizada a vibração da amostra de cabo durante um número de 8×10^5 ciclos. Essa quantidade foi motivada ao permitir o crescimento das marcas de *fretting* sem que ocorra a quebra de nenhum fio da amostra. Finalizada a parte dinâmica do experimento, as camadas do cabo condutor serão removidas para determinação das marcas analisadas via microscopia confocal.

Note que existem três diferentes possibilidades de contato entre os fios do cabo condutor na montagem com o grampo de suspensão: contato externo entre os fios da última camada do cabo e o grampo de suspensão ou telha de contenção, contato lateral entre os fios da mesma camada, formando uma linha de contato e; por fim, o contato interno entre os fios de camadas distintas do cabo. A visualização destas possibilidades pode ser melhor visualizada na Figura 3.6, que mostrou os possíveis pontos de origem de trincas devido ao *fretting*. A análise pretendida por este estudo restringe-se aos pontos de contato gerados entre os fios de camadas distintas do cabo. De forma mais precisa, serão analisadas as elipses geradas nos fios da última camada do condutor devido ao contato com a camada interna adjacente durante o deslocamento da amostra.

O procedimento experimental inicia-se com a realização do ensaio dinâmico para verificação da tensão de P-S, conforme o item 4.5.2, para as amplitudes de deslocamento expostas pela Tabela 4.4. Os parâmetros de ensaio (Y_b e H/w) foram definidos para manter o nível de tensão, σ , condizente com o padrão pré-estabelecido para os ensaios de fadiga de cabos realizados até a falha dos fios no laboratório para construção de curvas S-N, os quais levam em consideração questões como tempo de execução do ensaio e capacidade dos equipamentos. Uma vez que a tensão atuante na amostra condiz com o nível de solicitação obtido analiticamente, dá-se início a uma excitação dinâmica no cabo condutor com Y_b constante durante a quantidade de ciclos fixada.

Tabela 4.4 - Parâmetros de ensaio para análise topográfica com o cabo CA TERN.

H/w [m]	Amplitude de deslocamento Y_b [mm]		
	Tensão, σ (MPa)		
	26,80	28,22	31,35
1820	0,84	0,88	0,98
2144	0,80	0,84	0,93
2725	0,74	0,78	0,86

Ao final do ensaio, as seções transversais que identificam o UPC e a boca do grampo de suspensão são marcados na amostra para definir os pontos de referência. O carregamento proveniente do braço e da talha de alavanca devem ser reduzidos com cautela para permitir que os grampos de ancoragem sejam desacoplados com segurança sem provocar movimentos bruscos no condutor. Para evitar deformações dos fios, duas braçadeiras são fixadas à amostra em cada seção transversal que será cortada e, com relação ao corte: deve ser efetuado com o auxílio de um arco de serra para prevenir a ocorrência de deformações acentuadas durante a retirada do cabo.

Com a amostra fora da bancada de ensaios, a área de interesse do estudo, entre a boca do grampo e o primeiro parafuso tipo U, deve ser devidamente identificada. Primeiramente, as duas seções transversais que limitam a área de interesse do estudo devem ser marcadas conforme ilustrado pela Figura 4.21. Uma vez que um dos objetivos deste trabalho é mapear e analisar o contato interno entre os fios da última camada do condutor na região de falha, a manutenção da posição relativa entre os fios durante a fragmentação do cabo em camadas é de extrema importância. Sendo assim, os fios adjacentes ao UPC que contenham possíveis marcas de contato serão soldados antes da desmontagem, conforme mostra a Figura 4.22. Vale ressaltar que deslocamentos durante o procedimento de soldagem serão minimizados através da fixação de duas braçadeiras próximas à área de interesse da pesquisa.

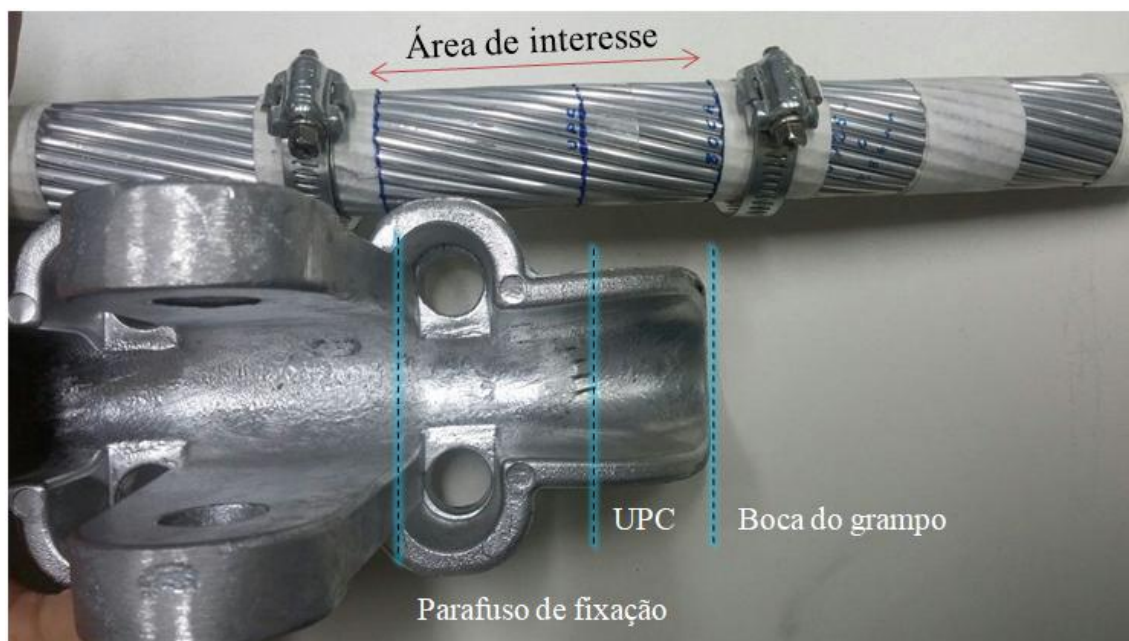


Figura 4.21 - Identificação dos pontos de referência e da área de interesse do ensaio de análise topográfica dos fios do cabo CA TERN.

Os fios do cabo condutor devem ser retirados em sequência até que permaneçam na última camada apenas o conjunto de fios que foram soldados. Em seguida, o desacoplamento das camadas deve ser realizado da forma mais suave possível, a fim de evitar a criação de marcas posteriores ao ensaio. Na parte interna da última camada, a referência do estudo (UPC) deve ser identificada. A partir da referência, uma reta é virtualmente traçada na amostra para indicação das marcas de *fretting* entre os fios na base do grampo de suspensão que serão analisadas no microscópio, conforme pode ser observado pela Figura 4.23. Note que foram selecionadas para análise as elipses que mais se aproximaram do eixo traçado como referência.

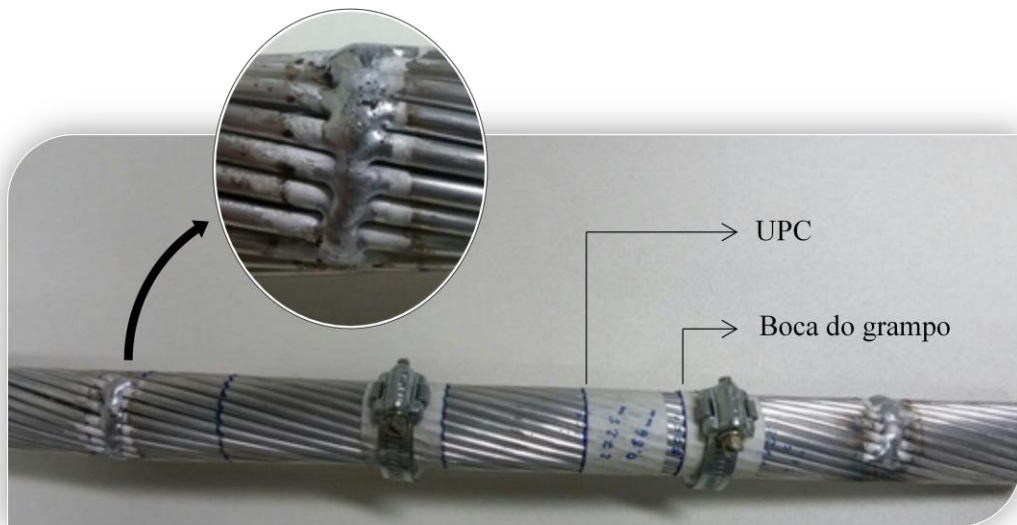


Figura 4.22 - Procedimento de soldagem dos fios que contenham possíveis marcas de contato a serem analisada na zona de interesse do ensaio.

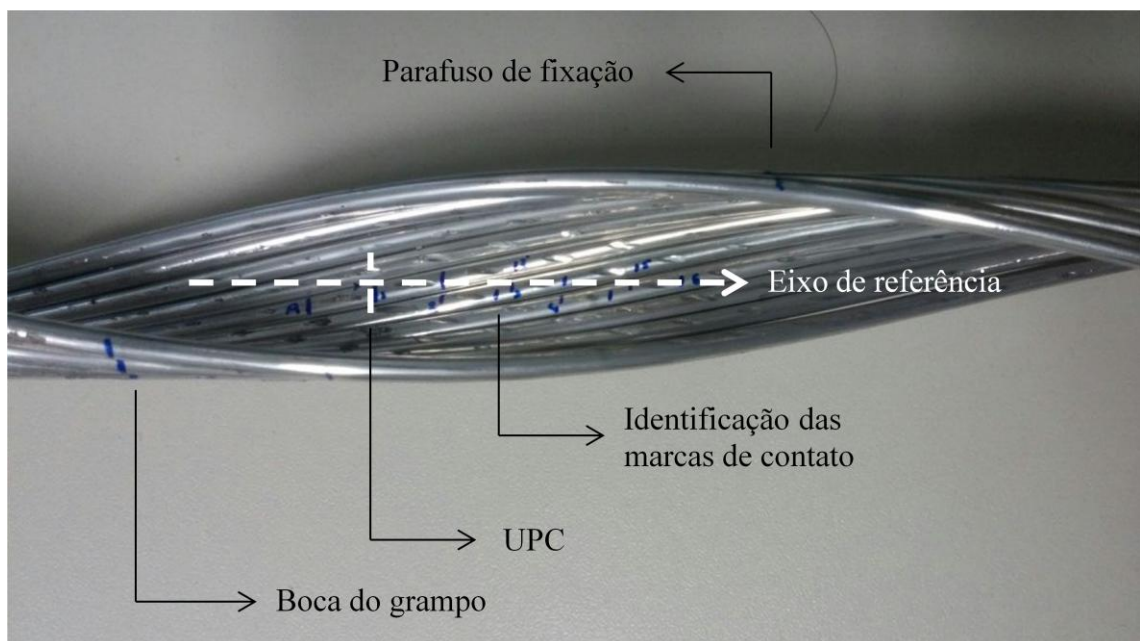


Figura 4.23 - Eixo de referência com base no UPC para identificação das marcas de contato que serão analisadas no microscópio.

A Figura 4.23 mostra de forma clara a análise que será realizada no microscópio. Serão estudados os fios da camada mais externa do cabo. A análise topográfica restringe-se às marcas de contato geradas durante o ensaio devido ao movimento relativo entre os fios da camada mais externa e da camada interna adjacente, seguindo a base do grampo de suspensão e tendo como referência o UPC. As análises foram realizadas no laboratório de metalurgia e materiais da Universidade de Brasília através de microscopia confocal com um equipamento Olympus, modelo LEXT OLS 4100, conforme ilustrado pela Figura 4.24.

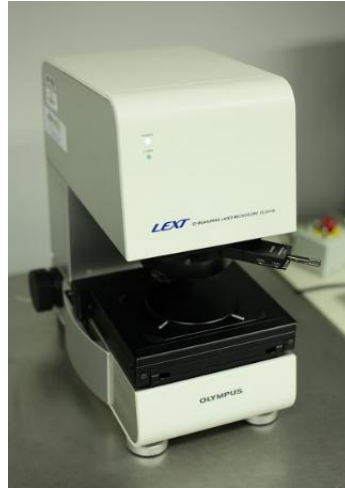


Figura 4.24 - Microscópio confocal Olympus LEXT OLS 4100.

Uma vez que todas as marcas de contato de interesse foram identificadas, a distância entre o ponto de referência (UPC) e o centro de cada elipse deve ser mensurada com o auxílio de um paquímetro, conforme esquematizado pela Figura 4.25. Após a realização de todas as marcações e medições, os fios que contêm as marcas de contato identificadas são cortados e levados ao microscópio para análise de sua superfície.

As amostras foram analisadas em cada combinação de Y_b e H/w relacionada pela Tabela 4.4 para determinação da área, comprimento e largura das zonas de adesão e escorregamento em cada marca de contato, além do ângulo formado entre o semieixo maior da elipse e o eixo de laminação do fio. A distância de cada marca em relação UPC está denominada pelos índices d_1 a d_4 , onde 1 representa a marca mais próxima ao UPC e 4 a marca que mais se aproximou do parafuso U utilizado no grampo de suspensão.

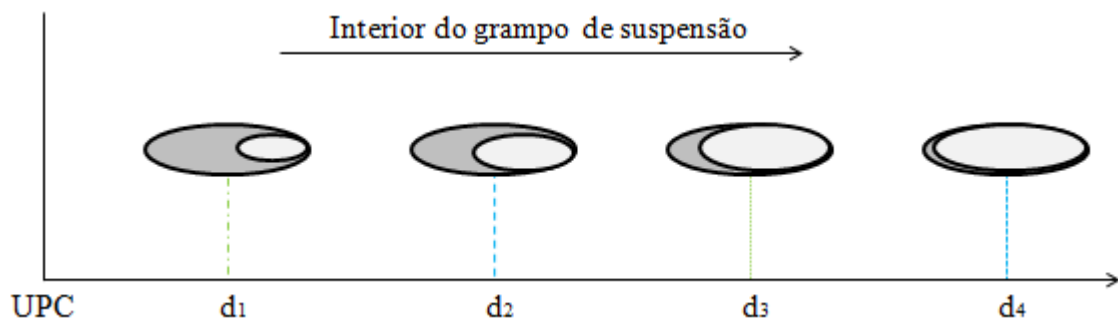


Figura 4.25 - Distância entre o UPC e o centro das marcas de contato identificadas para análise topográfica.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados dos Ensaio Estáticos

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos sob condições de carregamento estático para os condutores TERN, ORCHID, CAL 1055 e CAL 823 nos seguintes valores de H/w : 1820, 2144 e 2725 m .

Ambos os condutores CAA TERN e CA ORCHID possuem em sua camada externa fios de alumínio 1350 enquanto o CAL 1055 e o CAL 823 são constituídos respectivamente por fios de alumínio liga 6201 e 1120. Uma vez que a deformação do condutor está relacionada à massa específica dos fios da camada externa do cabo (Equação 29), os níveis de tensão teóricos calculados para o ensaio serão modificados em função do tipo de fio conforme a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Níveis teóricos de tensão média e deformação em função do tipo de fio que compõe a camada externa do condutor.

Liga de Alumínio	H/w [m]	Tensão média, $S_{m,al}$ [MPa]	Deformação, ϵ [μ strain]
Alumínio 1350	1820	48,30	699,94
	2144	56,89	824,54
	2725	72,31	1047,98
Alumínio 6201	1820	48,03	696,06
	2144	56,58	819,97
	2725	71,91	1042,17
Alumínio 1120	1820	48,21	698,64
	2144	56,79	823,02
	2725	72,18	1046,04

5.1.1 Cabo condutor: TERN

Conforme mencionado na seção 4.5.1, inicialmente os ensaios estáticos foram executados de forma crescente com relação à carga de esticamento, iniciando-se na referência de 5% de EDS até atingir o maior valor de H/w . Na sequência do ensaio o carregamento foi modificado no sentido inverso até que a referência de 5% de EDS fosse novamente atingida. A influência do sentido de carregamento em função do parâmetro H/w para o condutor TERN é ilustrada pela Figura 5.1, onde pode-se notar um comportamento semelhante na leitura dos extensômetros em ambos os sentidos.

Uma vez que a leitura de deformação não sofreu modificações de forma significativa em função do sentido de carregamento, optou-se por exibir no apêndice deste trabalho apenas

as leituras individualizadas dos extensômetros no sentido crescente de carregamento. Dessa forma, os gráficos da Figura A.1 apresentam os resultados dos ensaios estáticos com relação aos níveis de tensão média e deformação dos fios da camada externa do condutor TERN em função do parâmetro H/w no sentido crescente de carregamento. A correlação entre a deformação obtida experimentalmente e o respectivo nível de tensão atuante em cada fio da camada externa do cabo condutor apresentou um comportamento semelhante nas três cargas de esticamento sob análise, mantendo o formato do gráfico e evidenciando uma relação de dependência proporcional ao parâmetro H/w .

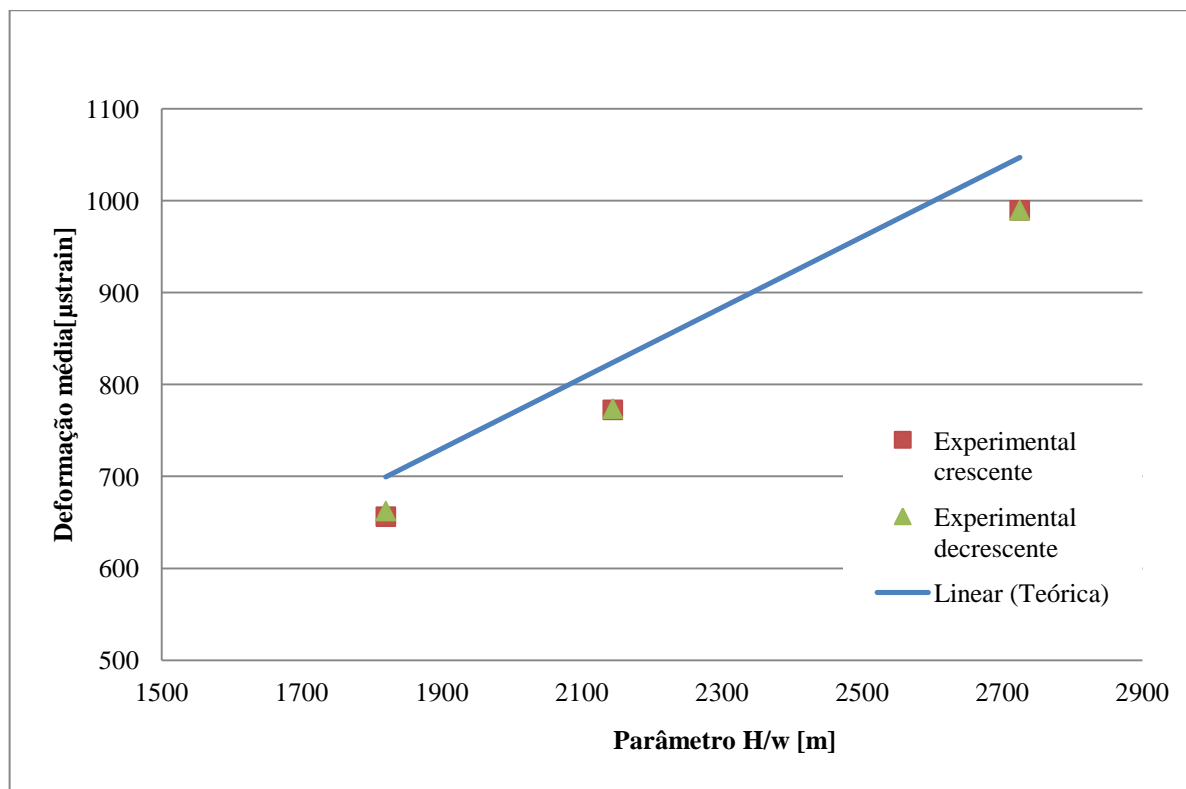


Figura 5.1 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor TERN.

Com relação aos valores médios de tensão estática atuante nos fios da camada externa do cabo TERN em função do parâmetro H/w , percebe-se na Figura 5.2 que o aspecto linear das curvas evidencia a conformidade entre os resultados experimentais e o modelo matemático proposto. Entretanto, uma discrepância entre a correlação ideal (curva em azul) e os valores obtidos por meio do ensaio estático pode ser observada.

A divergência entre os resultados experimentais e o modelo teórico pode estar associado às simplificações adotadas na etapa de dedução da Equação 28 quanto à deformação dos fios do cabo condutor além das aproximações entre o módulo de elasticidade e a massa específica dos materiais que compõem o cabo TERN. Além disso, deve-se ressaltar as fontes de erro inerentes ao procedimento, como por exemplo: variações na resistência dos extensômetros durante o ensaio ou mudanças de temperatura capazes de modificar o carregamento atuante na amostra, uma vez que o cabo condutor se trata de um componente bastante esbelto.

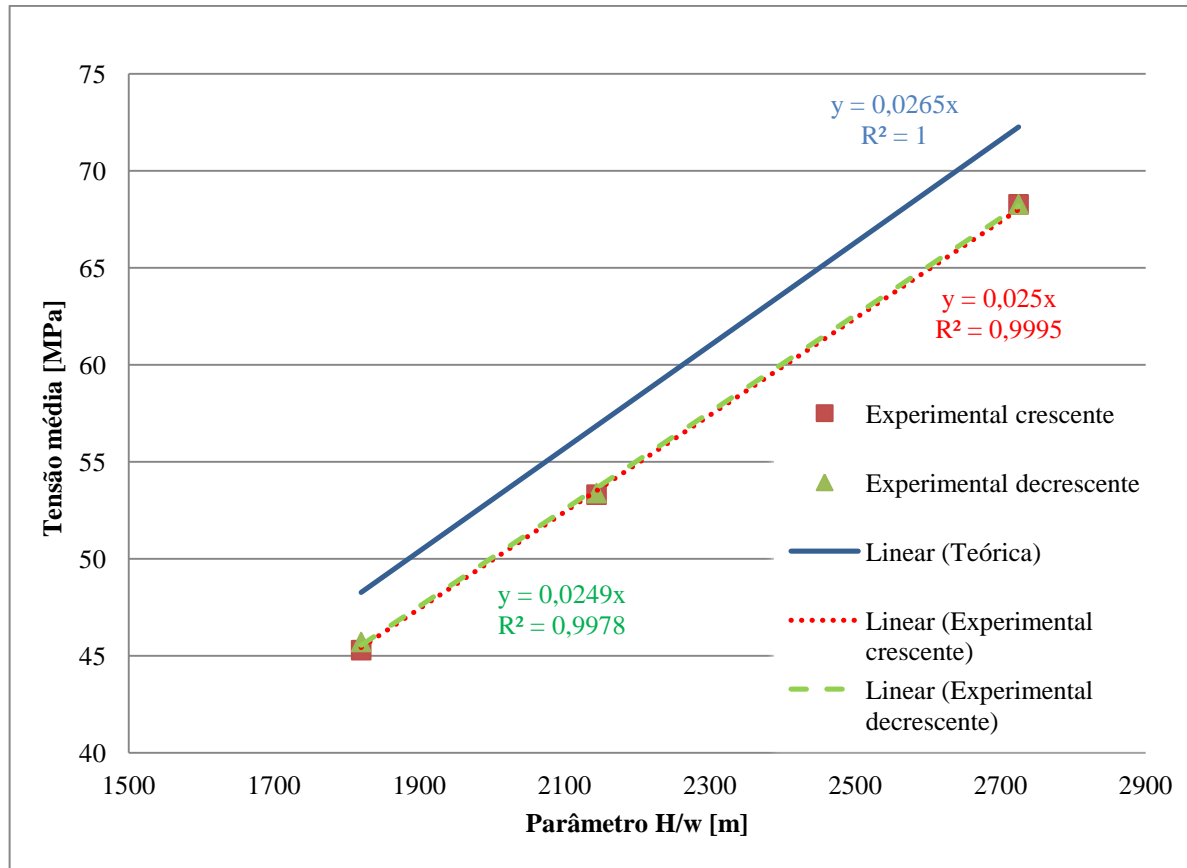


Figura 5.2 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo TERN.

A figura 5.3 foi construída a fim de quantificar o erro percentual em cada nível de carregamento e em ambos os sentidos de variação do parâmetro H/w. Para tal, foi comparada a tensão estática atuante no cabo, a partir da deformação média dos extensômetros, com o modelo teórico apresentado pela Equação 28. Nota-se que existe uma relação bastante satisfatória entre os resultados experimentais e o modelo matemático uma vez que o erro manteve-se reduzido - abaixo de 7% - em todos os pontos de interesse do ensaio.

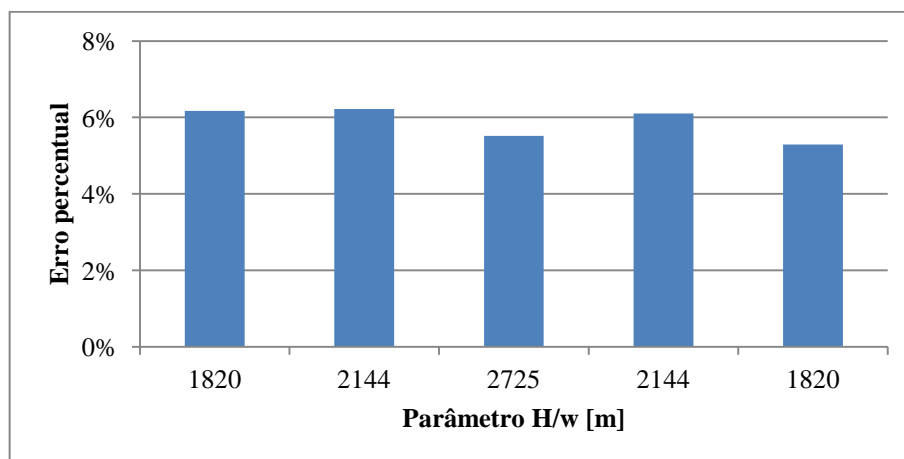


Figura 5.3 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo TERN em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento.

5.1.2 Cabo condutor: ORCHID

A Figura 5.4 mostra a deformação média sofrida pelos fios da camada externa do cabo ORCHID em função do parâmetro H/w nos sentidos crescente e decrescente de variação da carga de esticamento. Percebe-se a partir da dispersão dos resultados que, assim como o cabo TERN, não houve uma diferença significativa na leitura dos extensômetros em função do sentido de carregamento. Para o condutor ORCHID em particular, a dispersão dos resultados destacam uma aproximação quase ideal entre a deformação teórica - obtida através da Equação 28 - e a média da deformação individual dos fios que compõem a camada externa do cabo.

Uma vez que o cabo condutor ORCHID é composto apenas por fios de alumínio 1350, cuja composição supera 99% de Al, a alta acurácia apresentada pelos pontos do gráfico pode ser justificada pela dedução do modelo teórico ao eliminar o efeito das aproximações de 3:1 e 1:3, respectivamente, entre os módulos de elasticidade e massas específicas dos fios de alumínio e aço que fazem parte da composição de cabos do tipo CAA, como o condutor TERN apresentado anteriormente.

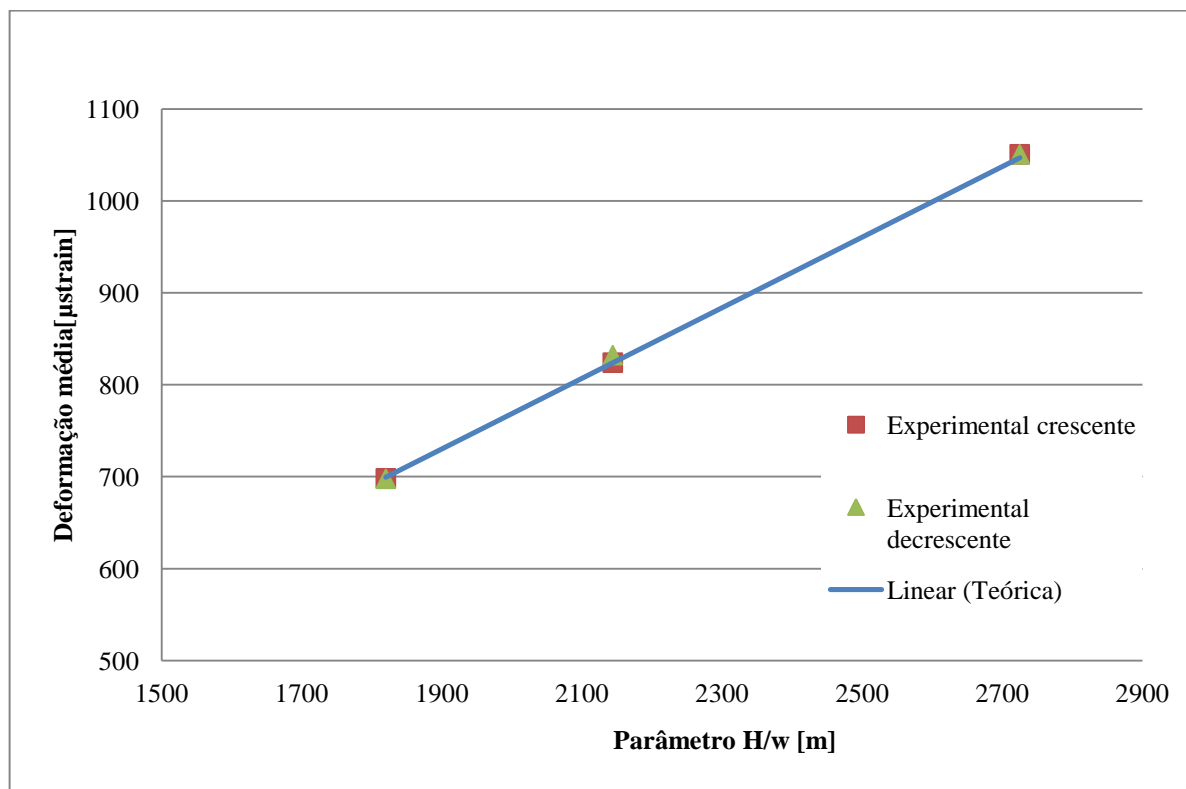


Figura 5.4 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor ORCHID.

A Figura 5.5 mostra o valor médio do nível de tensão estática atuante nos fios da camada externa do cabo condutor ORCHID em função do parâmetro H/w e em ambos os sentidos de variação da carga de esticamento. Nota-se que ambas as curvas experimentais convergiram ao modelo teórico. Vale ressaltar que a lei de Hooke foi utilizada para obtenção do nível de tensão a partir da deformação média dos fios da camada externa do cabo.

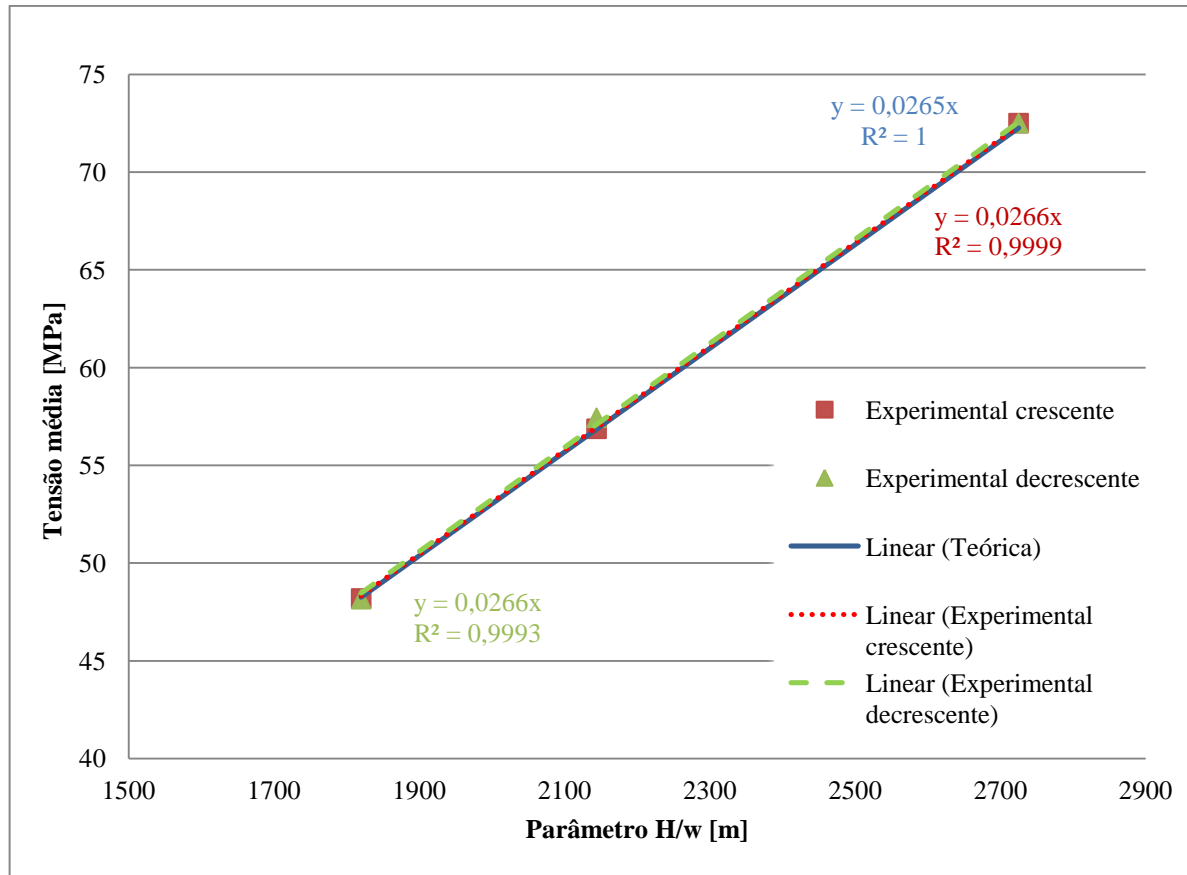


Figura 5.5 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo ORCHID.

A Figura 5.6 foi construída para permitir uma melhor visualização do erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo ORCHID em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento. Nota-se que erros percentuais na faixa de 1% foram observados durante o ensaio com este condutor. Este fato observado mostra que a formulação (Equação 28) pode ser utilizada para mensurar de forma bastante satisfatória o nível de tensão média atuante no cabo condutor ORCHID.

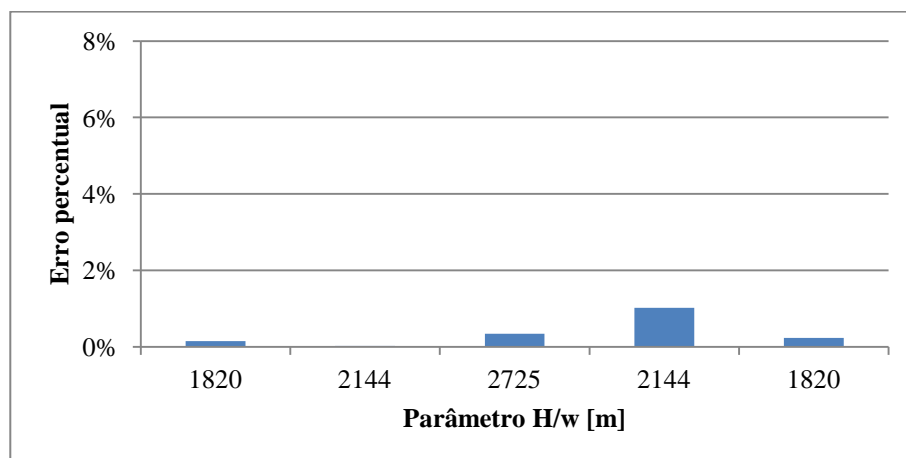


Figura 5.6 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo ORCHID em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento.

A leitura individualizada dos extensômetros utilizados no ensaio estático com o cabo ORCHID encontra-se em apêndice (Figura A.2). Pôde-se perceber que a maior parte dos valores experimentais permaneceu próximo à correlação ideal (em azul), evidenciando a adequação entre o modelo teórico e o procedimento experimental. Vale ressaltar que como o sentido de carregamento não exerceu influência significativa na leitura dos extensômetros, apenas os dados coletados de forma crescente foram apresentados na Figura A.2.

5.1.3 Cabo condutor: CAL 1055

A Figura 5.7 mostra a média de deformação dos fios da camada externa do cabo CAL 1055 em função do sentido de carregamento do ensaio. Apesar de apresentar uma boa correlação em ambos os sentidos, nota-se uma pequena variação na leitura dos extensômetros a medida que a amostra foi descarregada. Esta observação pode estar relacionada a fatores que fogem ao controle do ensaio durante sua execução, como por exemplo: alterações na resistência do extensômetro não relacionadas à deformação elástica da amostra durante a variação do carregamento.

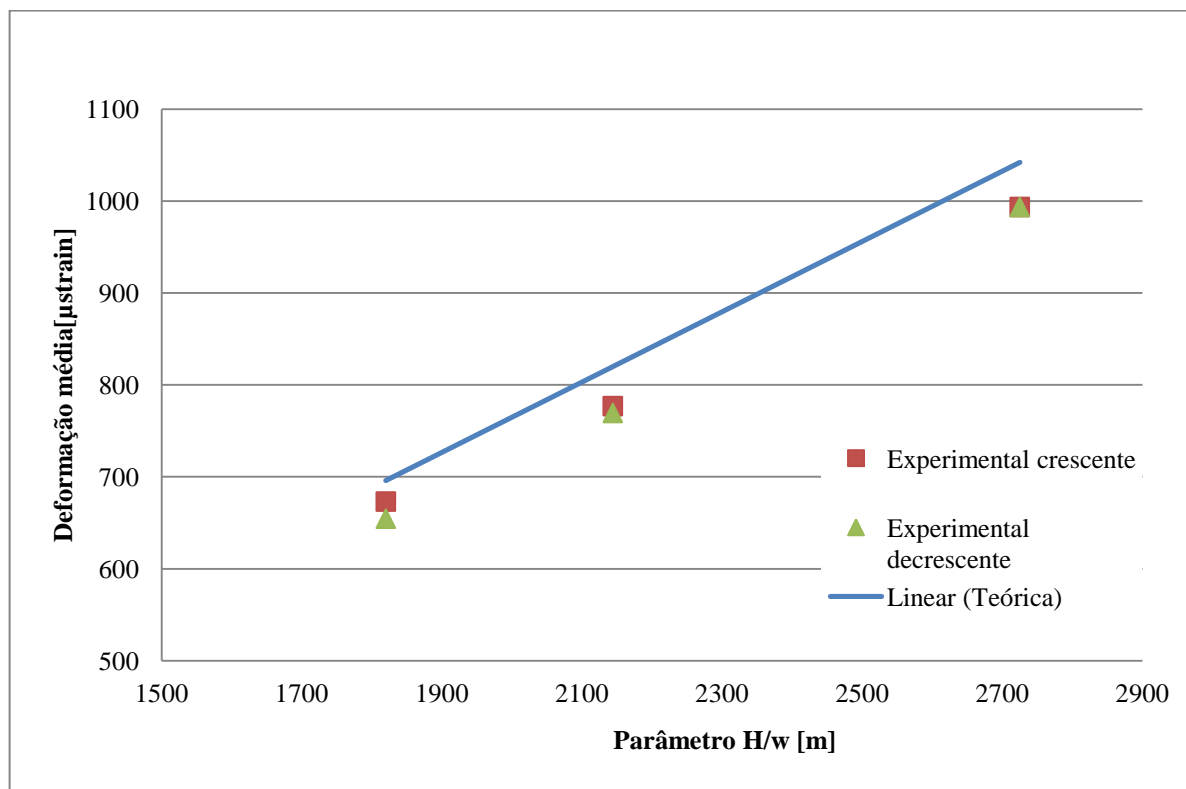


Figura 5.7 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor CAL 1055.

Assim como os cabos condutores analisados anteriormente, os níveis de tensão e deformação sofrida pelos fios da camada externa do CAL 1055 estão expostos de forma individualizada, em função do parâmetro H/w, pela Figura A.3 no apêndice deste trabalho. Vale ressaltar que apenas os dados coletados no sentido crescente de carregamento foram selecionados para exposição devido à alta similaridade entre os gráficos.

A partir dos dados individualizados, foi levantada a relação existente entre a tensão média atuante nos fios de alumínio do cabo condutor e o parâmetro H/w (Figura 5.8). Pode-se perceber que em ambas as curvas os resultados experimentais mantiveram-se bastante próximos ao modelo teórico. Para o $H/w=1820$ m por exemplo, o nível de tensão atuante no cabo foi de 46,44 MPa no sentido crescente de carregamento e de 45,16 MPa no sentido decrescente, enquanto o modelo teórico resultou num valor de 48,03 MPa (Tabela 5.1). Logo, pode-se dizer que o modelo teórico mostrou-se conservativo para o cabo CAL 1055, uma vez que os níveis de tensão experimentais mantiveram-se abaixo do esperado.

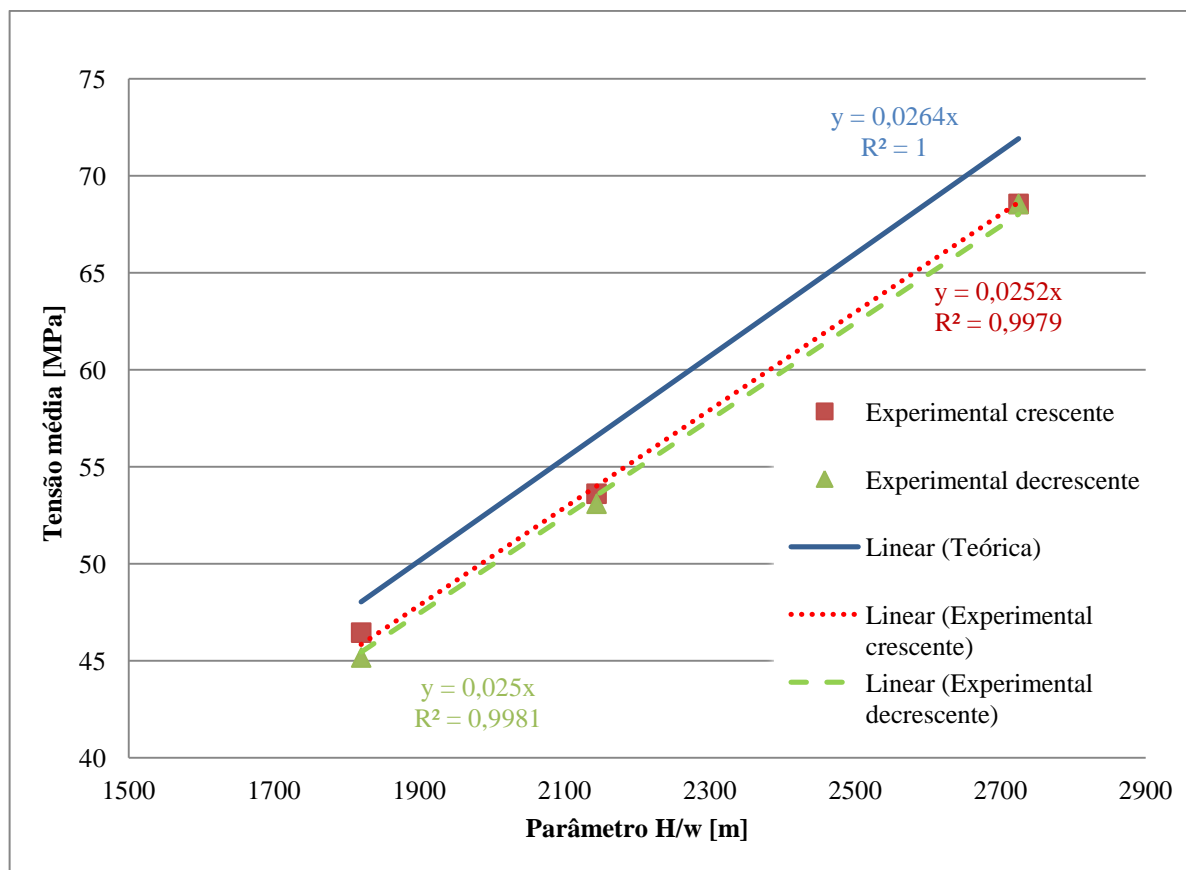


Figura 5.8 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo CAL 1055.

A Figura 5.9 foi construída para permitir a análise do erro existente entre os dados experimentais e o modelo teórico. Pode-se perceber que mais uma vez todos os pontos de análise mantiveram-se com erro percentual bastante reduzido. O erro percentual obtido para a tensão atuante na camada externa do cabo para o parâmetro $H/w=1820$ m, por exemplo, foi de 3,30% no sentido crescente e 5,97% no sentido decrescente, evidenciando a adequação do modelo teórico com os ensaios experimentais.

Ao comparar os cabos CAA TERN e CAL 1055 é possível notar uma maior aproximação dos resultados experimentais para o condutor de alumínio liga. Essa diferença pode estar associada à simplificação realizada na etapa de dedução dos níveis de tensão média atuante nos fios de alumínio do cabo condutor, já que a aproximação relacionada à presença da alma de aço do CAA TERN não ocorre com o cabo de alumínio liga.

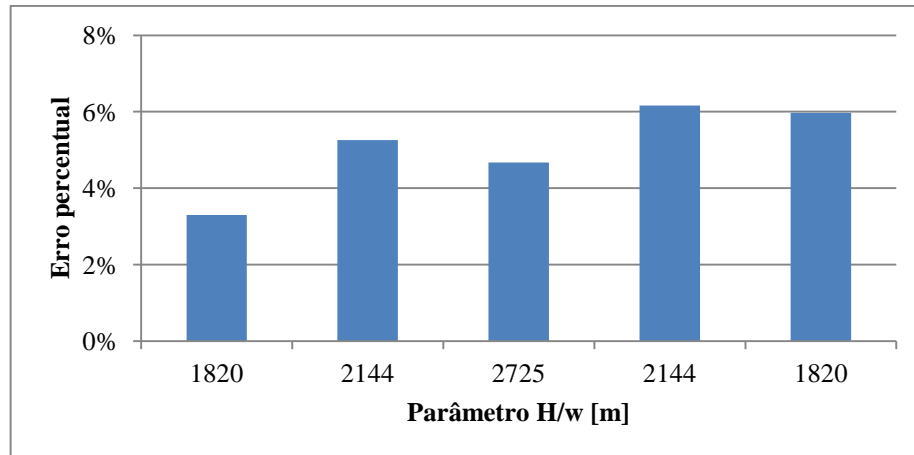


Figura 5.9 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo CAL 1055 em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento.

5.1.4 Cabo condutor: CAL 823

O ensaio estático realizado com o cabo condutor CAL 823 - cuja composição é de alumínio liga 1120 - encerrou a etapa de verificação da formulação que relaciona o parâmetro H/w ao nível de tensão média atuante em cabos condutores de energia (Equação 28). A Figura 5.10 mostra a deformação média sofrida pelos fios da camada externa do cabo em função do parâmetro H/w no sentido crescente e decrescente de variação da carga de esticamento.

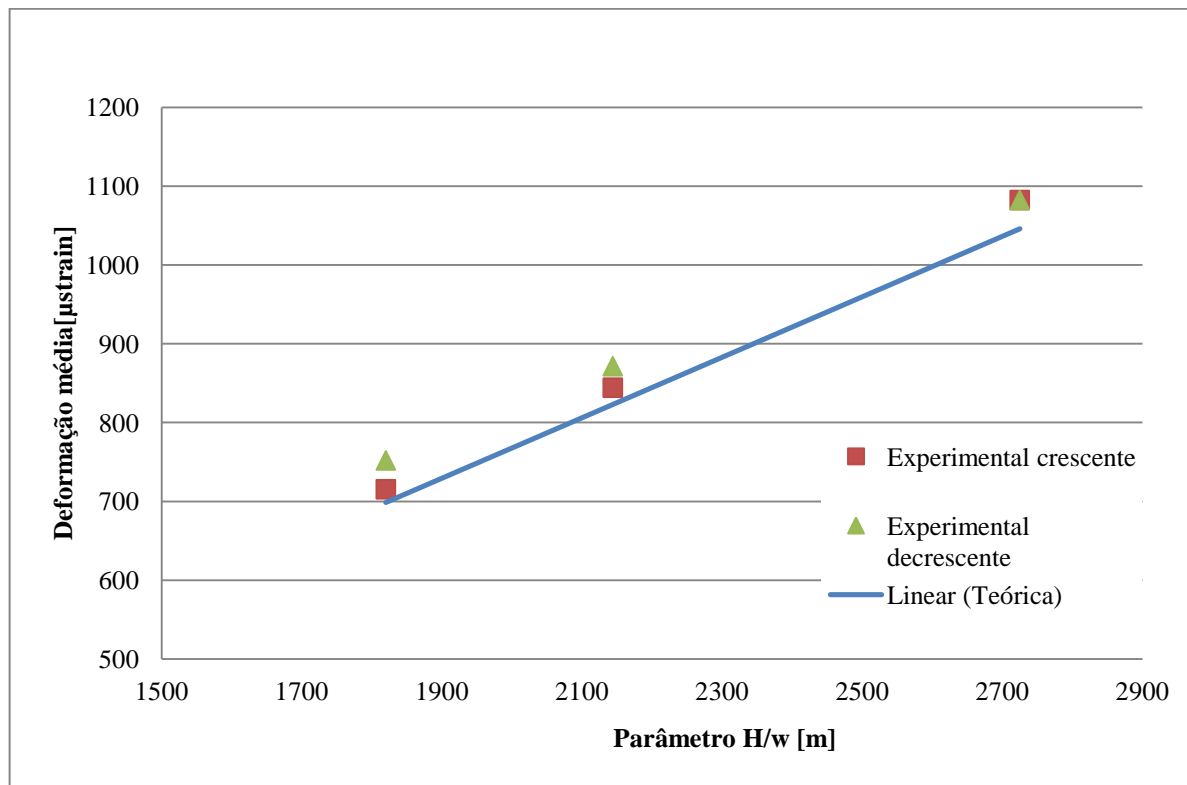


Figura 5.10 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor CAL 823.

Nota-se na Figura 5.10 que em ambos os sentidos de variação do carregamento a correlação entre os dados experimentais e a curva teórica mostrou-se bastante satisfatória. Vale ressaltar que, assim como ocorreu com a amostra do CAL 1055, no sentido decrescente houve um aumento no erro entre a leitura dos extensômetros e o modelo teórico. Este fato pode ter sido provocado por situações inerentes ao procedimento experimental que fogem ao controle do ensaio, uma vez que os extensômetros são balanceados e calibrados apenas no carregamento de referencia do ensaio (Tabela 4.2).

A deformação de cada fio que compõe a camada externa da amostra do cabo CAL 823 está ilustrada pelos gráficos da Figura A.4 em apêndices. Apenas os dados no sentido crescente de carregamento foram expostos devido à similaridade dos gráficos. A partir dos dados de deformação, a Figura 5.11 foi construída para análise do nível de tensão média atuante na amostra em função do parâmetro H/w. É importante destacar que para o cabo CAL 823 a tensão manteve-se acima dos valores obtidos analiticamente; ou seja, apesar de estarem bastante próximos, evidenciando a adequação do modelo teórico, neste ensaio os dados mostraram-se não conservativos. Para $H/w=1820 m$ por exemplo, a tensão atuante na amostra foi de $49,35 MPa$ no sentido crescente e de $51,87 MPa$ no sentido inverso, enquanto o modelo teórico previa uma tensão de $48,21 MPa$.

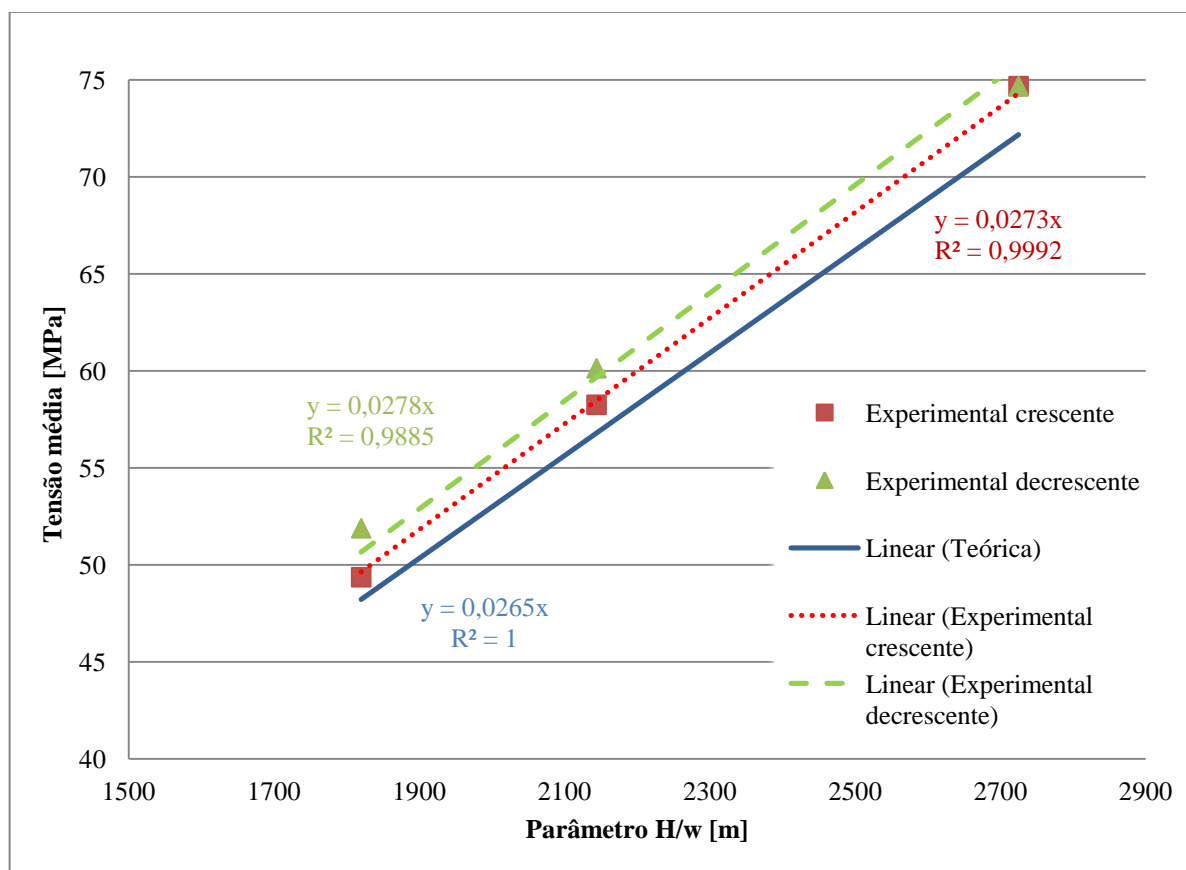


Figura 5.11 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo CAL 823.

O erro percentual entre os dados experimentais e o modelo teórico está ilustrado pela Figura 5.12 para o cabo CAL 823. Ao analisar apenas os dados no sentido crescente de carregamento, tem-se 2,38%, 2,57% e 3,46% para H/w igual a 1820, 2144 e 2725 m

respectivamente. É possível perceber que, conforme mencionado anteriormente, houve um aumento gradativo no erro a medida que o ensaio foi realizado; entretanto, nota-se que o modelo teórico é capaz de descrever adequadamente o nível de tensão atuante na amostra uma vez que o maior erro percentual observado manteve-se bastante reduzido - abaixo de 8%.

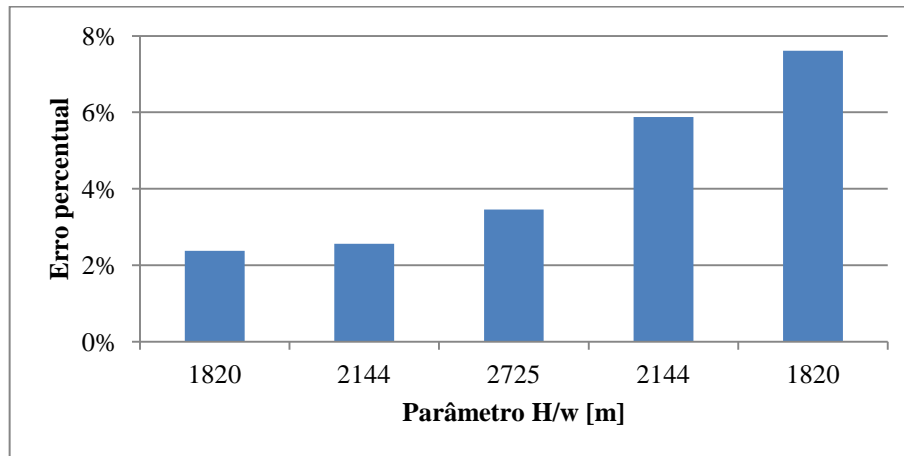


Figura 5.12 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo CAL 823 em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento.

Ao comparar os resultados obtidos nos ensaios estáticos é possível perceber que os cabos condutores ORCHID e CAL 823 apresentaram melhores resultados em relação ao TERN e CAL 1055. Este fato pode ser justificado por não ser necessário realizar as aproximações entre os fios de aço e de alumínio com relação ao CAA TERN, uma vez que não há a presença de alma de aço. Além disso, deve-se ressaltar que os fios que compõem o ORCHID e o CAL 823 são da série 1350 e 1120 respectivamente, cuja composição supera 99% de Alumínio. Já o cabo CAL 1055 é constituído por fios da série 6201, os quais são caracterizados pela presença de Magnésio e Silício em sua composição.

5.2 Resultados dos Ensaios Dinâmicos

Os resultados dos ensaios realizados com os quatro tipos de cabos condutores (TERN, ORCHID, CAL 1055 e CAL 823) sob condições de carregamento dinâmico serão apresentados nesta seção. O intuito dos ensaios é a verificação do uso da formulação de P-S (Equação 19) quanto à determinação da componente alternada de tensão atuante na zona de falha do condutor. O valor da constante "K" de P-S foi calculado previamente em função do tipo de cabo e do parâmetro H/w sob análise (Tabela 4.3). Já as amplitudes de deslocamento (Y_b) de interesse foram definidas na seção 4.5.2, permitindo a determinação dos valores teóricos da componente dinâmica da tensão atuante no cabo condutor durante a vibração.

Os ensaios foram realizados para três níveis do parâmetro H/w (1820, 2144 e 2725 m) a partir do controle da amplitude de vibração da amostra com o auxílio de um acelerômetro posicionado em um ponto 89 mm distante do UPC (Figura 4.20). O nível da componente alternada de tensão foi obtido através da leitura de deformação de três extensômetros colados

no ponto diametralmente oposto ao UPC (Figura 4.16b). Tendo em vista a construção do cabo por diferentes camadas de fios entrelaçados helicoidalmente, o ponto diametralmente oposto ao UPC pode estar localizado entre fios adjacentes no topo do cabo condutor. Sendo assim, a construção dos gráficos foi baseada no levantamento de duas curvas: *i*) através da média de deformação dos três extensômetros utilizados na amostra e, *ii*) por meio da leitura de deformação coletada pelo extensômetro central dentre aqueles que estão sob análise.

5.2.1 Cabo condutor: TERN

A Figura 5.13 mostra um comparativo entre os níveis de tensão teóricos e experimentais obtidos no ensaio dinâmico com o cabo condutor TERN para $H/w=1820\text{ m}$. A curva em azul representa a correlação ideal enquanto as curvas pontilhada em vermelho e tracejada em verde mostram, respectivamente, os níveis de tensão obtidos pela média de deformação dos extensômetros e a tensão atuante no fio central dentre os três sob análise.

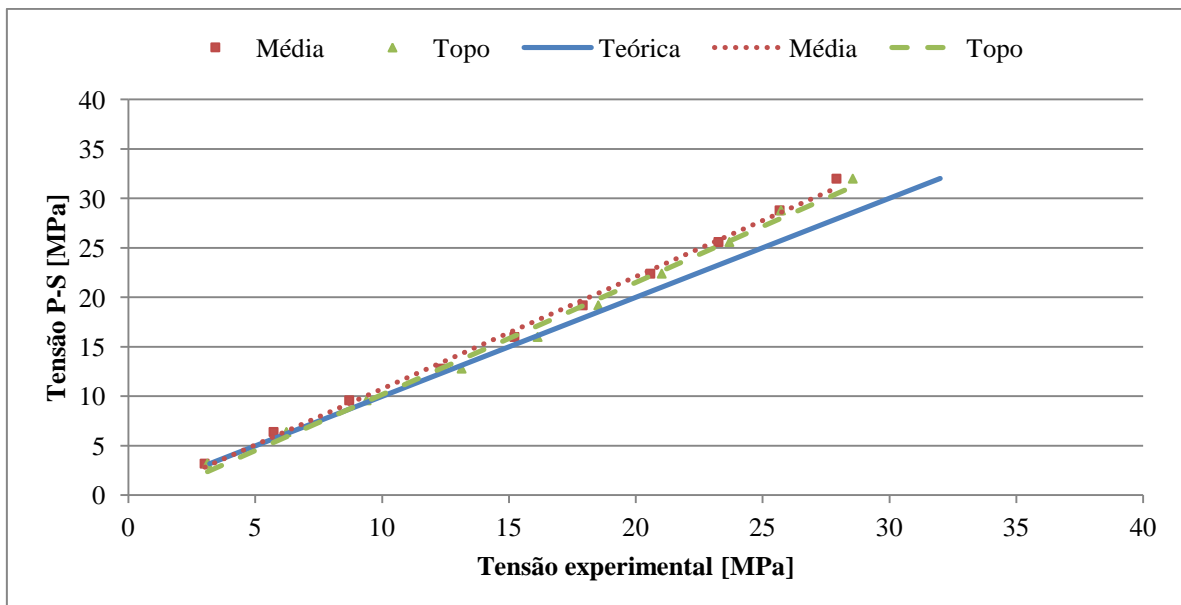


Figura 5.13 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor TERN em função da amplitude de deslocamento ($H/w=1820\text{ m}$).

O gráfico mostra a adequação do modelo teórico ao procedimento experimental e destaca um melhor ajuste para pequenas amplitudes de deslocamento, uma vez que a tendência das curvas é divergir da correlação ideal a medida que é elevado o nível de tensão dinâmica atuante na amostra. É possível notar ainda que, como a inclinação de ambas as curvas experimentais é maior que a curva teórica; então, a tensão dada por P-S neste ensaio mostrou-se mais elevada que a tensão experimental atuante na zona de falha do cabo.

A tensão dinâmica atuante na amostra em cada amplitude de deslocamento pode ser melhor visualizada na Figura B.1 em apêndices. Já o erro percentual obtido em cada Y_b durante a execução do ensaio está exposto pela Figura 5.14, onde pode-se observar que a discrepância entre a leitura dos extensômetros e o modelo experimental manteve-se bastante reduzida em todos os pontos de análise. Para uma amplitude de deslocamento $Y_b=1,00\text{ mm}$

por exemplo, observa-se um erro percentual de 12,8% tomando-se a média da leitura dos três extensômetros e de 10,7% ao analisar apenas o extensômetro do topo. Já para pequenas amplitudes de deslocamento ($Y_b=0,50 \text{ mm}$), nota-se um erro abaixo de 5,0% em ambas as análises, chegando a 0,9% de divergência para o fio mais alto da zona de análise do cabo.

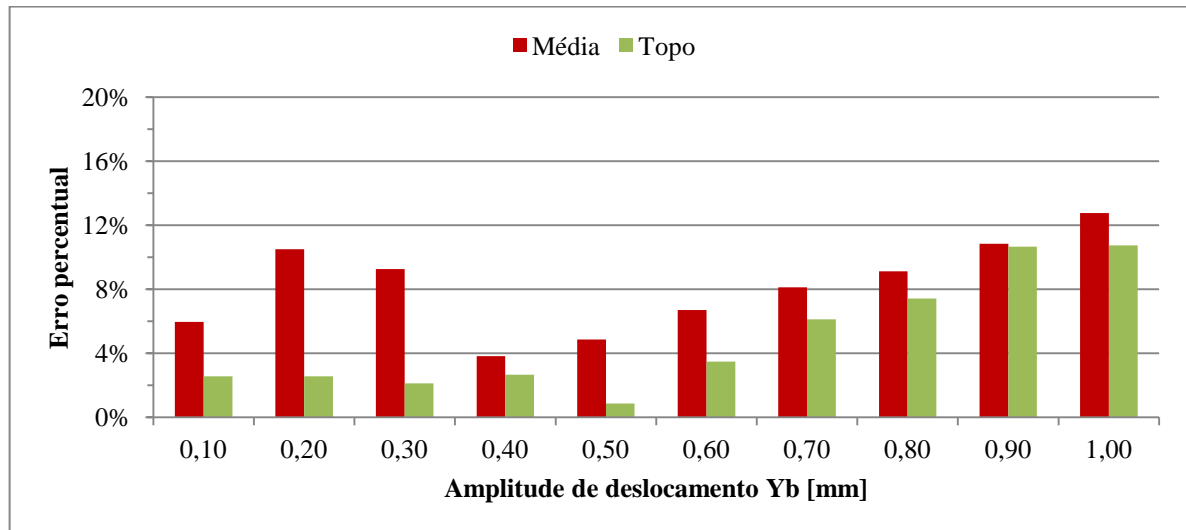


Figura 5.14 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo TERN ($H/w=1820 \text{ m}$).

Ao elevar a carga de esticamento para o H/w correspondente à 2144 m , a relação entre a tensão de P-S e a tensão experimental atuante na amostra modificou-se conforme ilustrado pela Figura 5.15. Nota-se neste ensaio que a média de leitura dos extensômetros mostrou-se conservativa, uma vez que a inclinação da curva pontilhada em vermelho foi superior à curva teórica. De forma análoga, considerando-se apenas o fio central, percebe-se que a tensão experimental manteve-se acima da tensão de P-S; ou seja, neste ensaio os fios adjacentes ao central foram menos solicitados que o fio mais alto diametralmente oposto ao UPC, consoante ao modelo teórico.

A fim de permitir uma melhor visualização do exposto acima, a Figura B.2 em apêndices mostra o nível de tensão dinâmica atuante na amostra em cada amplitude de deslocamento do ensaio. É possível notar que, assim como o experimento realizado com $H/w=1820 \text{ m}$, a tensão experimental manteve-se mais próxima do modelo teórico para pequenas amplitudes, aumentando a divergência em relação à tensão de P-S a medida que Y_b foi elevado.

Vale destacar que a curva relacionada ao extensômetro central possui uma inclinação mais próxima da correlação ideal, evidenciando que, neste ensaio, maiores valores de Y_b resultaram em uma elevação na diferença de solicitação dos fios adjacentes em relação ao fio central. Para $Y_b=1,00 \text{ mm}$ por exemplo, a tensão dinâmica resultante da média de leitura de deformação dos extensômetros foi de $28,27 \text{ MPa}$, enquanto o fio central sofreu uma solicitação de $34,52 \text{ MPa}$ durante o ensaio. Já o experimento realizado com $Y_b=0,2 \text{ mm}$ por exemplo, mostrou uma solicitação de $5,96 \text{ MPa}$ ao analisar a média dos dados e $7,01 \text{ MPa}$ quando apenas o extensômetro do topo é considerado.

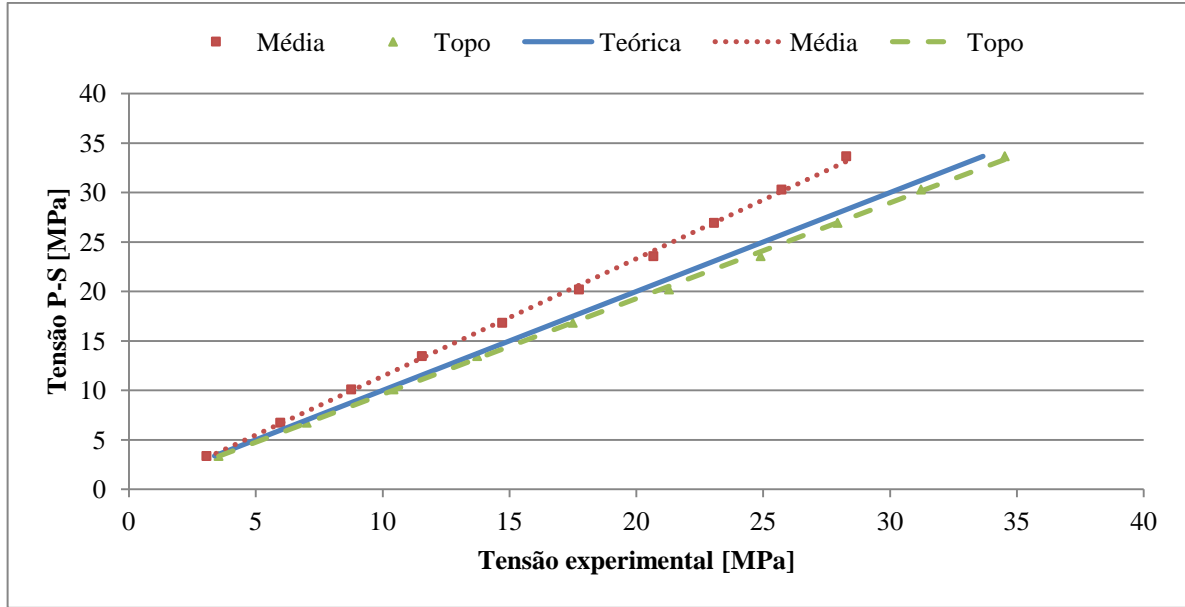


Figura 5.15 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor TERN em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2144\text{ m}$).

O erro percentual obtido em cada amplitude de deslocamento para $H/w=2144\text{ m}$ está exposto pela Figura 5.16. Pode-se perceber que houve uma ótima correlação entre o modelo teórico e a tensão dinâmica obtida experimentalmente quando observado o extensômetro do topo, uma vez que o maior erro percentual obtido foi de 5,67% para $Y_b=0,7\text{ mm}$.

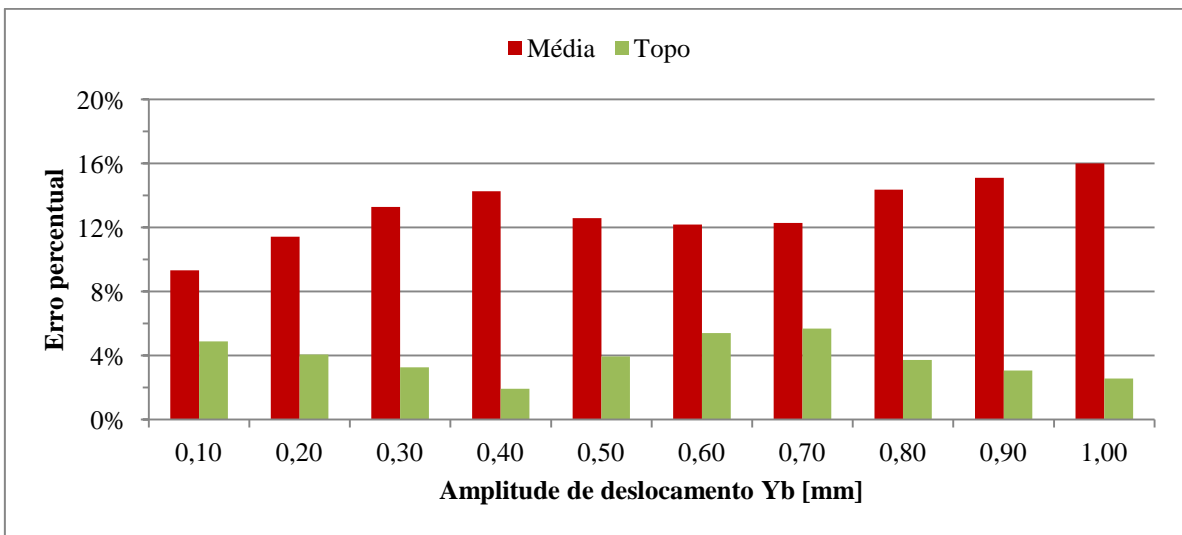


Figura 5.16 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo TERN ($H/w=2144\text{ m}$).

O comparativo entre a tensão de P-S e a tensão dinâmica atuante na amostra durante o ensaio no maior H/w de interesse está exposto pela Figura 5.17. Durante este experimento pode-se perceber que ambos os dados obtidos através da leitura do extensômetro do topo e por meio da média de deformação dos três extensômetros mantiveram-se próximos da correlação ideal e com valores abaixo do nível de tensão obtido pelo modelo teórico.

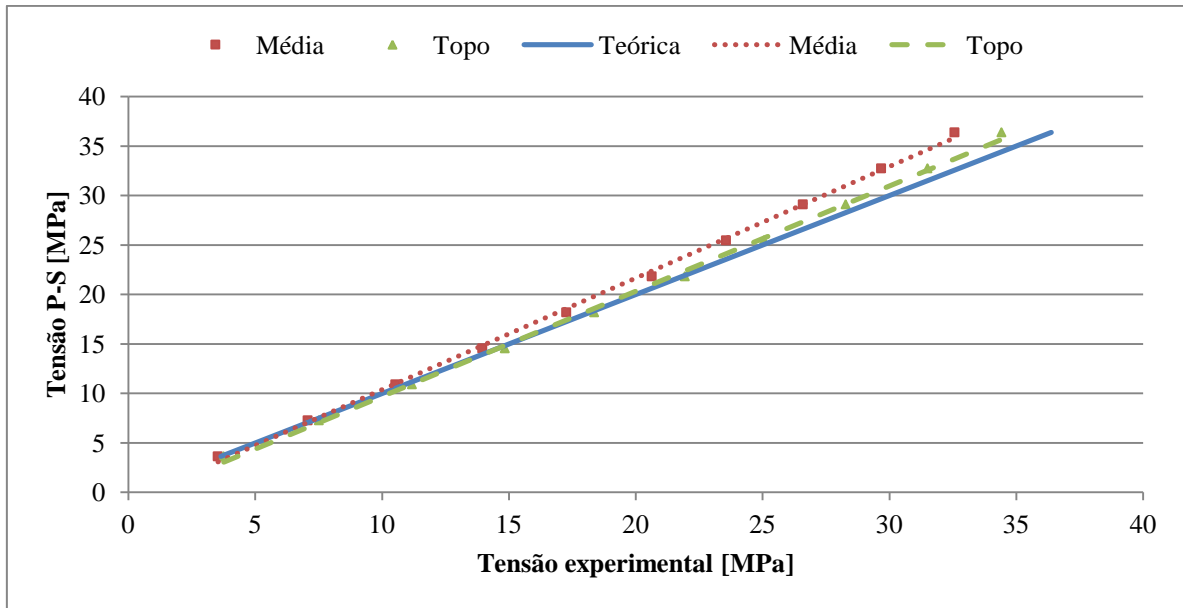


Figura 5.17 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor TERN em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2725\text{ m}$).

A Figura B.3 em apêndices mostra o nível de tensão dinâmica atuante na amostra em cada ensaio realizado neste H/w . Já a Figura 5.18 ilustra o erro percentual entre os níveis de tensão teórica e experimental atuante na amostra. A análise destes gráficos mostra que ambas as curvas (média e topo) resultaram em uma correlação bastante satisfatória com a tensão de P-S. A curva relacionada ao extensômetro do topo em particular, manteve uma relação quase ideal com o modelo teórico para o intervalo de amplitudes sob análise, mantendo um erro percentual abaixo de 4% para o intervalo de Y_b entre 0,1e 0,9 mm . Para a amplitude de deslocamento $Y_b=0,6\text{ mm}$ por exemplo, o erro obtido a partir da média de deformação dos extensômetros foi de 5,48% enquanto a leitura do extensômetro central resultou num erro de 0,51% - o menor erro percentual obtido com o cabo TERN durante os ensaios dinâmicos.

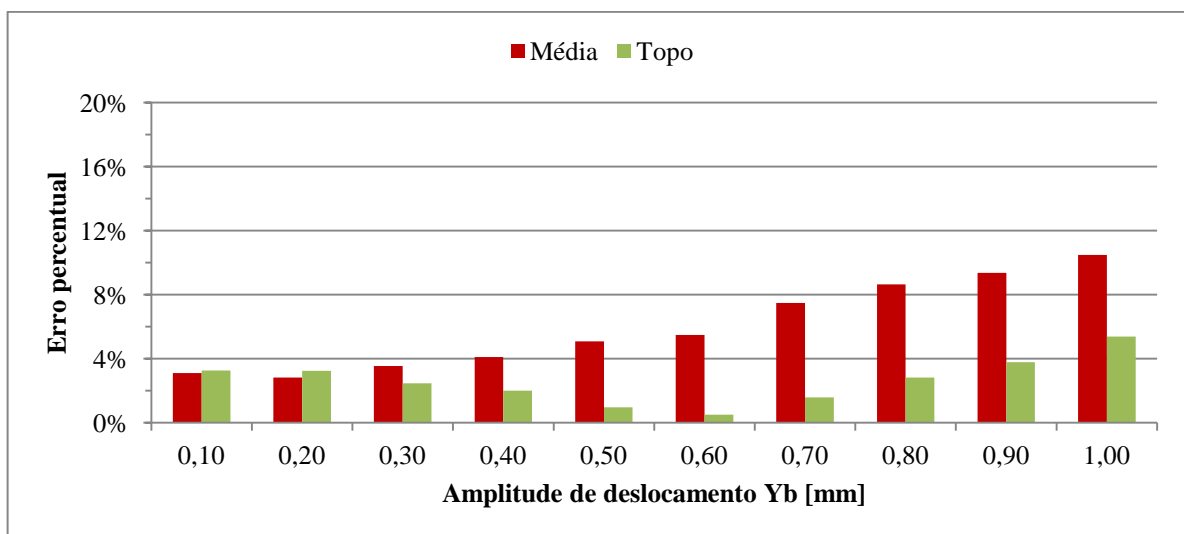


Figura 5.18 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo TERN ($H/w=2725\text{ m}$).

Com o intuito de analisar o comportamento da tensão média em função do parâmetro H/w , a Figura 5.19 foi construída para permitir uma comparação entre o erro percentual médio obtido em cada experimento. Ao analisar a tensão atuante no fio mais alto e oposto ao UPC na zona de falha do cabo percebe-se que houve uma pequena redução do erro em relação ao modelo teórico a medida que o H/w foi elevado. É importante destacar ainda que a divergência observada entre os dados manteve-se reduzida em todo o ensaio: 4,92% para $H/w=1820\text{ m}$, 3,85% para $H/w=2144\text{ m}$ e 2,60% para $H/w=2725\text{ m}$.

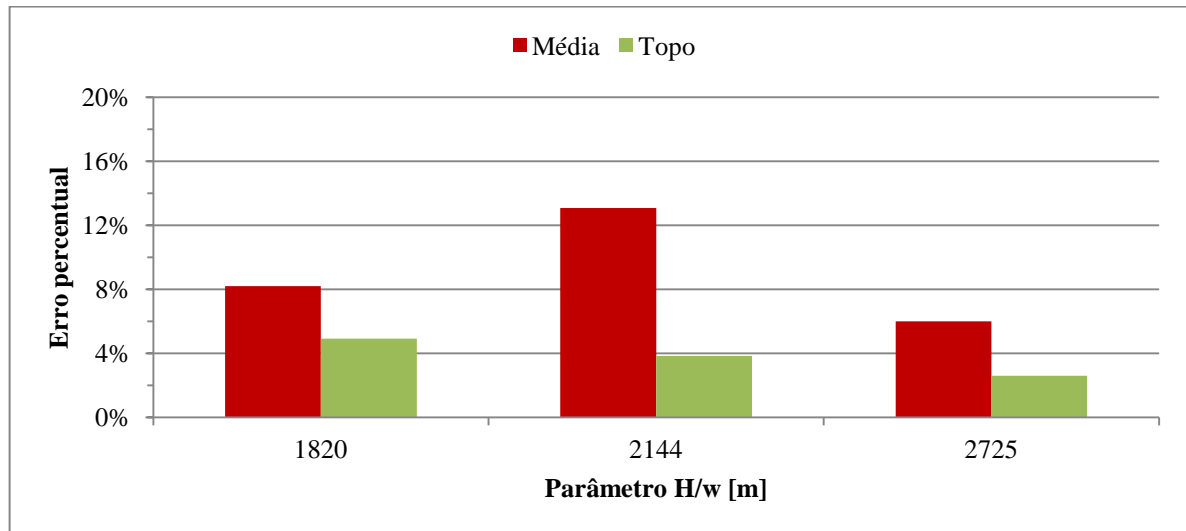


Figura 5.19 - Erro percentual médio entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo TERN em função do parâmetro H/w .

Ao comparar os dados obtidos para o cabo TERN com os ensaios dinâmicos em todos os níveis de H/w de interesse, nota-se que a tensão experimental manteve-se mais próxima da tensão de P-S em pequenas amplitudes de deslocamento, aumentando a divergência a partir de $Y_b=0,6\text{ mm}$. Além disso, houve uma redução no erro percentual a medida que a carga de esticamento foi elevada, sugerindo que o modelo teórico torna-se mais adequado em maiores níveis de H/w . Este fato pode estar associado ao comportamento dinâmico da amostra durante a vibração, uma vez que o cabo tende a apresentar um comportamento semelhante ao de um corpo rígido sob estas condições.

5.2.2 Cabo condutor: ORCHID

A Figura 5.20 mostra a comparação entre a tensão obtida por meio da formulação de Poffenberger-Swart e a sollicitação dinâmica nos três fios mais altos e opostos ao UPC. A aproximação entre as curvas, tanto considerando-se a média dos dados obtidos pelos três extensômetros (curva pontilhada em vermelho) quanto o resultado obtido apenas para o fio do topo (curva tracejada em verde), mostram que, neste ensaio, o nível de tensão atuante nos fios adjacentes permaneceu próxima à sollicitação exercida no fio central durante todas as amplitudes de deslocamento. Vale destacar ainda que, diferentemente do cabo TERN para o mesmo H/w , a correlação dos dados com o modelo teórico permaneceu bastante próximo ainda que Y_b fosse elevado.

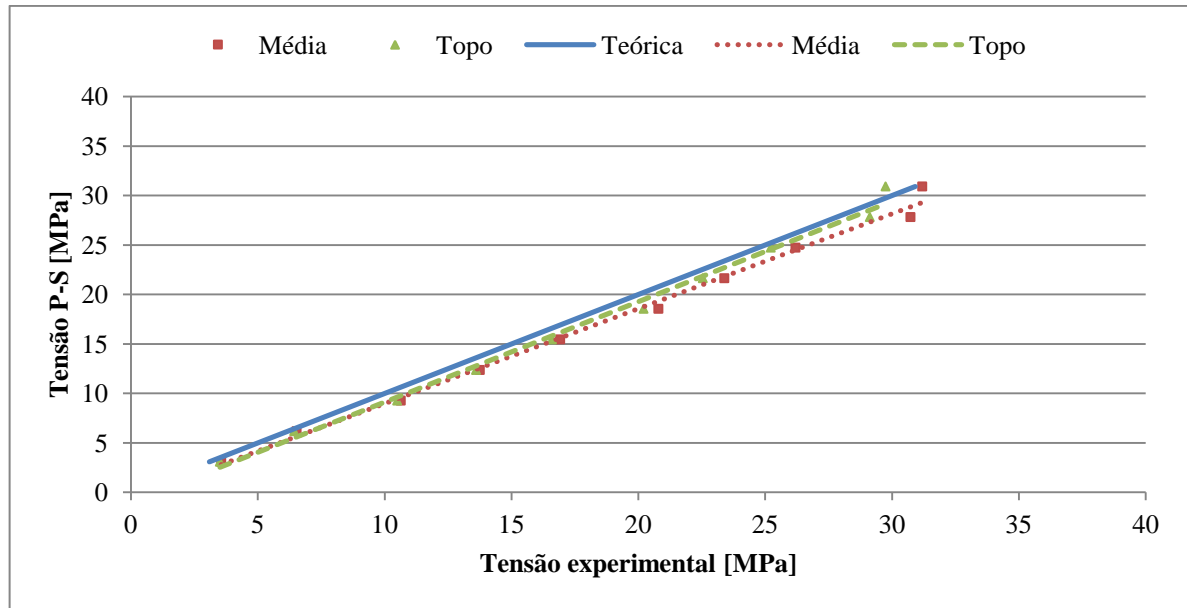


Figura 5.20 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor ORCHID em função da amplitude de deslocamento ($H/w=1820\text{ m}$).

A tensão dinâmica atuante no cabo em função da amplitude de deslocamento pode ser observada pela Figura B.4 em apêndices. É possível notar que a solicitação nos fios durante o ensaio permaneceu acima da tensão de P-S. Para $Y_b=0,6\text{ mm}$ por exemplo, o modelo de P-S resultou numa tensão dinâmica igual a $18,55\text{ MPa}$; entretanto, o nível de tensão obtido através da média de deformação dos extensômetros foi de $20,79\text{ MPa}$ enquanto a tensão atuante no fio central foi de $20,21\text{ MPa}$.

O erro percentual entre os valores teóricos e experimentais estão expostos pela Figura 5.21. Nota-se que houve uma correlação bastante satisfatória entre os níveis de tensão, com erro percentual próximo de 12% na maior parte do experimento. Para $Y_b=0,6\text{ mm}$ foi observado um erro de 12,1% considerando-se a média dos extensômetros e 9,0% quando analisado apenas o extensômetro do topo.

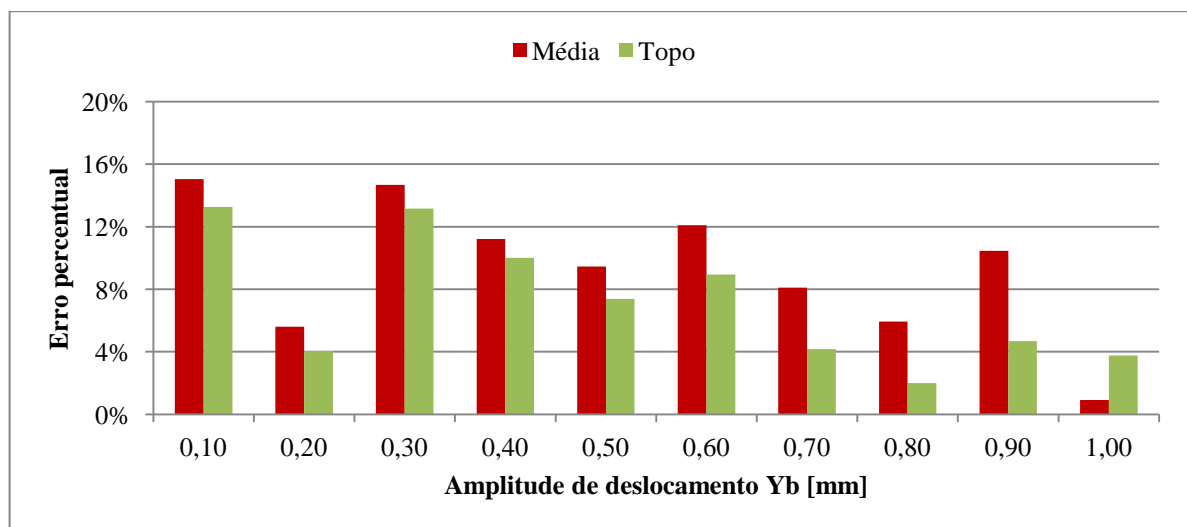


Figura 5.21 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo ORCHID ($H/w=1820\text{ m}$).

A Figura 5.22 mostra a tensão dinâmica atuante na amostra ao elevar a carga de esticamento para o H/w correspondente a 2144 m . A partir da inclinação das curvas pode-se inferir que a tensão experimental manteve-se acima do previsto pela equação de P-S. Nota-se ainda que houve uma melhor correlação com o modelo teórico em pequenas amplitudes de deslocamento, assim como observado para o cabo condutor TERN.

Para permitir uma melhor visualização do resultado dos ensaios, a relação entre a tensão dinâmica atuante na amostra e a amplitude de deslocamento do ensaio esta exposto pela Figura B.5 em apêndices. É possível observar no gráfico que houve um ponto na curva ($Y_b=1,0\text{ mm}$) que apresentou uma divergência acentuada em relação aos demais, o que pode estar associado a fatores inerentes ao ensaio experimental, como por exemplo: variações acentuadas de temperatura, leitura dos extensômetros não associadas à deformação elástica dos fios durante a vibração ou ainda, dificuldades no controle do ensaio pelo *shaker*.

Entretanto, vale ressaltar que a tensão dinâmica atuante na amostra para $H/w=2144\text{ m}$ e $Y_b=1,0\text{ mm}$ considerando-se o valor médio foi de 37,39 MPa . Já a tensão atuante no fio central foi de 35,13 MPa enquanto a tensão de P-S resultou numa sollicitação de 32,49 MPa . Logo, pode-se inferir que o modelo teórico foi capaz de descrever adequadamente o experimento, uma vez que a maior discrepância observada permaneceu próximo de 15%.

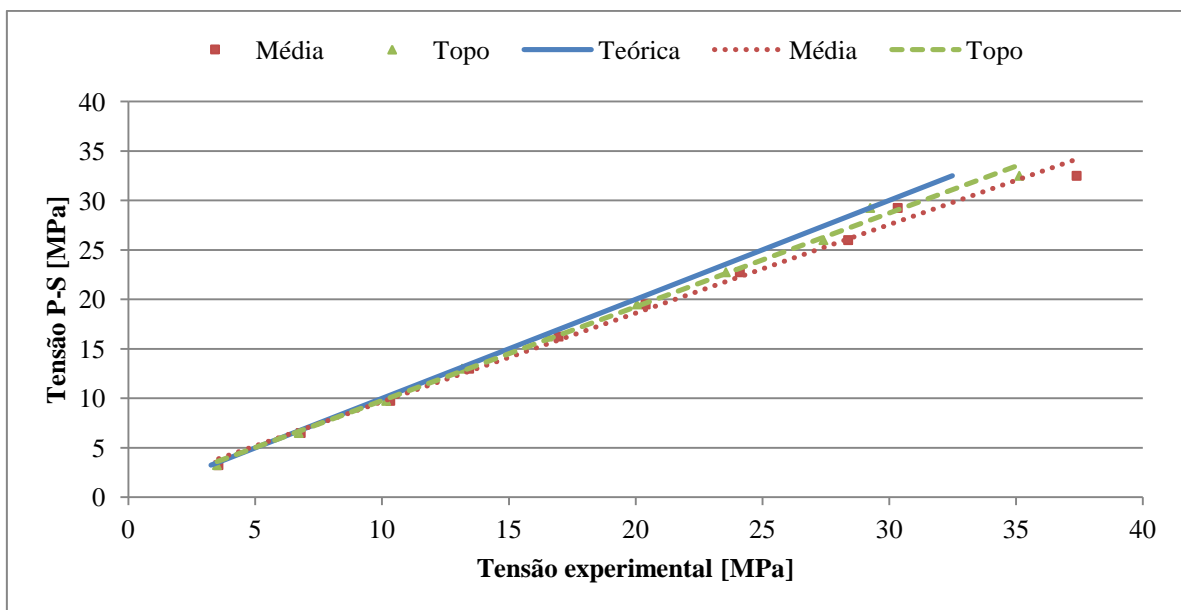


Figura 5.22 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor ORCHID em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2144\text{ m}$).

A Figura 5.23 foi construída para ilustrar o erro percentual obtido em cada ponto do ensaio experimental. Nota-se que houve uma ótima correlação entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante na amostra. Para $Y_b=0,6\text{ mm}$ por exemplo, o nível de sollicitação exercida no fio central resultou num erro de 2,9%, enquanto a média de deformação dos três fios analisados apresentou erro de 4,7%. Observa-se ainda que, ao analisar os dados relativos apenas ao extensômetro do topo, o erro percentual manteve-se abaixo de 9% em todos os pontos de interesse do experimento, evidenciando que o modelo teórico foi capaz de descrever a tensão dinâmica atuante no fio diametralmente oposto ao UPC neste ensaio.

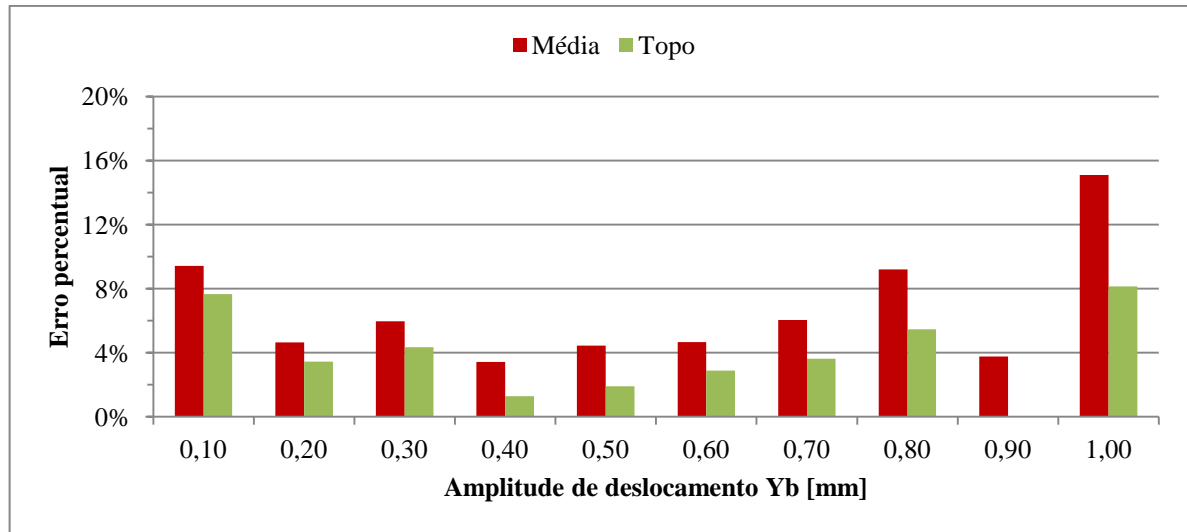


Figura 5.23 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo ORCHID ($H/w=2144 m$).

Para maior organização do trabalho, a tensão dinâmica atuante no cabo ORCHID em função da amplitude de deslocamento do ensaio está exposta pela Figura B.6 em apêndices. Já a Figura 5.24 mostra o comparativo entre a tensão de P-S e a tensão experimental atuante no cabo ORCHID para o parâmetro $H/w=2725 m$. Observa-se a partir dos gráficos que as curvas resultantes da leitura dos extensômetros permaneceram bastante próximas à correlação ideal, principalmente quando considerado apenas a solicitação exercida no fio diametralmente oposto ao UPC. Melhores resultados foram obtidos no intervalo de Y_b entre 0,4 e 1,0 mm. Para $Y_b=0,6 mm$ por exemplo, a equação de P-S resultou numa tensão igual a 21,04 MPa, sendo observado uma solicitação de 20,86 MPa e 20,37 MPa considerando-se, respectivamente, a tensão atuante no fio do topo e a tensão resultante da média de deformação dos extensômetros.

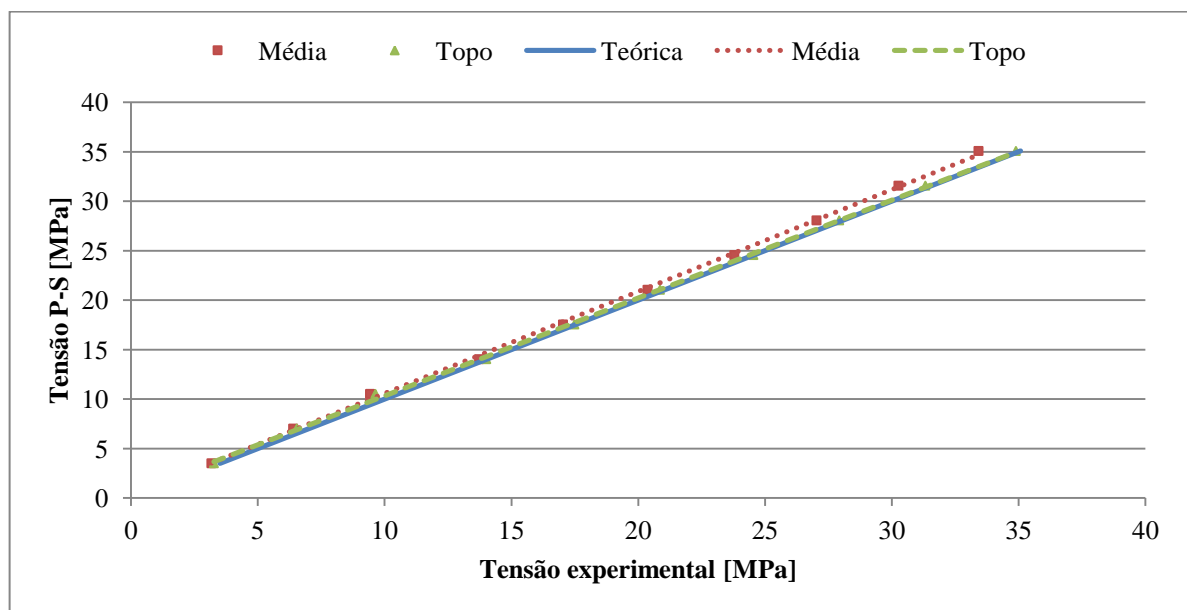


Figura 5.24 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor ORCHID em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2725 m$).

Conforme ilustrado pela Figura 5.25, o erro percentual obtido para a amostra em $H/w=2725 m$ manteve-se bastante reduzido em todos os pontos do ensaio, em particular para amplitudes de deslocamento acima de $0,4 mm$. A discrepância acentuada nos menores valores de Y_b podem estar associadas à erros inerentes ao procedimento experimental, como por exemplo: dificuldades no controle do ensaio por parte do excitador eletromecânico durante a execução do ensaio dinâmico, leitura de deformação não relacionada à deformação elástica dos fios do cabo condutor ou variações acentuadas de temperatura. Entretanto, nota-se que o maior erro observado ocorreu para $Y_b=0,3 mm$ com valores de 10,4% quando considerado a média de deformação dos extensômetro e de 8,4% para a tensão atuante no fio do topo, evidenciando a adequação do modelo teórico quanto à determinação da componente alternada de tensão atuante na zona de falha do cabo condutor.

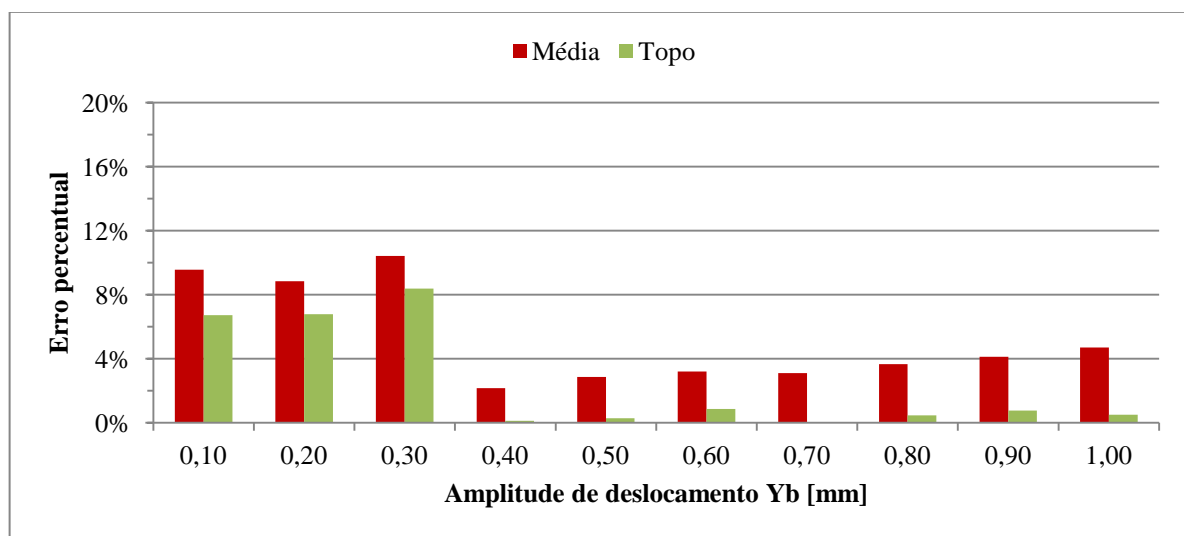


Figura 5.25 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo ORCHID ($H/w=2725 m$).

O gráfico da Figura 5.26 mostra uma redução gradativa na discrepância entre o valor teórico obtido pela equação de P-S e a tensão obtida experimentalmente a medida que H/w foi elevado. Ao considerar apenas a leitura do extensômetro do topo por exemplo, observa-se um erro de 7,1% para $H/w=1820 m$, 3,9% para $H/w=2144 m$ e 2,5% para $H/w=2725 m$. Ou seja, assim como ocorreu para o cabo TERN, a melhor correlação entre o modelo teórico e a tensão dinâmica atuante na amostra foi obtida com a maior carga de esticamento prevista no planejamento do experimento.

A manutenção do erro percentual em valores reduzidos durante a execução do experimento mostra que a equação de P-S foi capaz de descrever a solicitação exercida no fio diametralmente oposto ao UPC nos parâmetros de interesse dos ensaios. Além disso, a tensão dinâmica exercida nos fios durante a vibração tende a aproximar-se ao proposto por P-S a medida que o cabo é submetido à maiores cargas de esticamento. Um dos motivos que pode estar associado a este fato é a redução do ângulo de saída do cabo na boca do grampo, já que uma das simplificações necessárias ao modelo teórico é assumir que esta variável permanece em valores reduzidos durante a vibração.

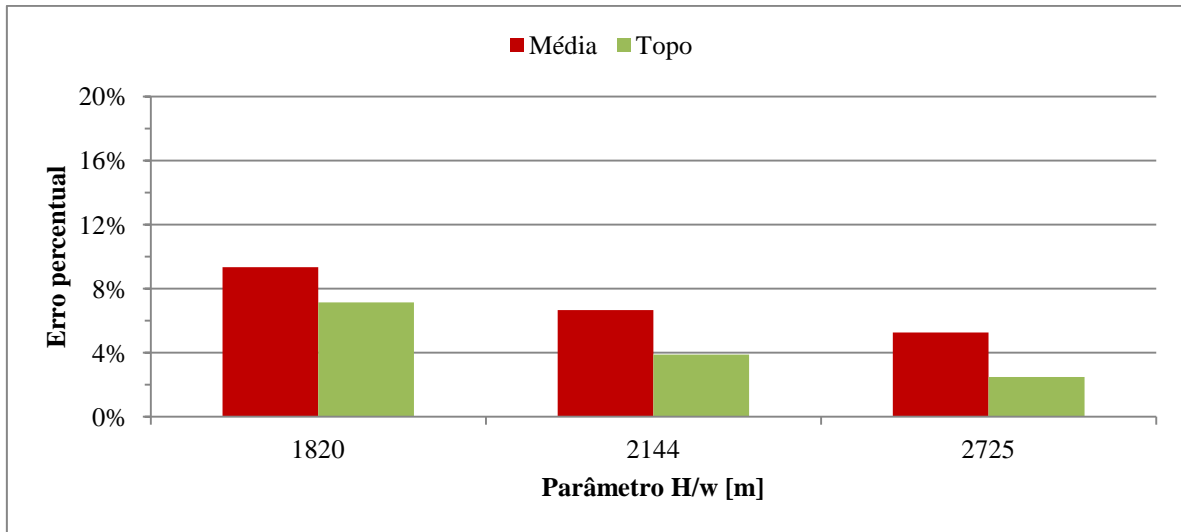


Figura 5.26 - Erro percentual médio entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo ORCHID em função do parâmetro H/w.

5.2.3 Cabo condutor: CAL 1055

O gráfico comparativo entre a componente alternada de tensão atuante na amostra durante a vibração e a solicitação resultante da equação de P-S, para $H/w=1820\text{ m}$ está representado abaixo pela Figura 5.27. Mantendo-se a padronização adotada neste trabalho, a curva pontilhada em vermelho representa a tensão obtida por meio da média de deformação sofrida pelos três fios mais altos e opostos ao UPC, enquanto a curva tracejada em verde mostra o nível de tensão atuante apenas no fio central.

A partir da inclinação das curvas pode-se dizer que a tensão dinâmica atuante na amostra manteve-se abaixo da tensão de P-S. Este fato pode ser melhor visualizado pela Figura B.7 em apêndices, construída para destacar a solicitação exercida nos fios em cada amplitude de deslocamento e auxiliar a análise dos dados. Nota-se que, assim como o cabo TERN, melhores resultados foram obtidos para o intervalo entre $0,1 \leq Y_b \leq 0,6\text{ mm}$, sendo observado um melhor ajuste ao considerar apenas o extensômetro do topo. Este fato sugere que o ponto diametralmente oposto ao UPC manteve-se próximo ao fio central durante o ensaio.

O erro percentual entre a solicitação dinâmica exercida nos fios e o modelo de P-S pode ser visualizado na Figura 5.28. Pode-se observar que houve uma correlação bastante satisfatória entre os dados, uma vez que a discrepância manteve-se reduzida em todos os pontos de interesse, principalmente para o fio mais alto da zona de análise.

É importante destacar que a equação de P-S foi capaz de descrever a solicitação dinâmica atuante na amostra para $H/w=1820\text{ m}$ dentro do intervalo de amplitudes de deslocamento previamente estabelecido para o experimento. Entretanto, assim como observado para o cabo TERN, um aumento gradativo foi observado no erro percentual com o cabo CAL 1055 para $H/w=1820\text{ m}$. Para $Y_b=0,3\text{ mm}$ por exemplo, a tensão de P-S resultou em $9,24\text{ MPa}$, enquanto a solicitação no fio do topo foi de $9,50\text{ MPa}$ provocando erro 2,8%. Já para $Y_b=0,6\text{ mm}$, obteve-se erro percentual de 5,1% uma vez que a tensão experimental e o modelo teórico resultaram, respectivamente, em $17,53\text{ MPa}$ e $18,48\text{ MPa}$. Ao analisar uma

amplitude de deslocamento mais elevada ($Y_b=0,9 \text{ mm}$), o erro entre os níveis de tensão aumentou para 9,6% com tensão de P-S e experimental iguais a $27,72 \text{ MPa}$ e $25,05 \text{ MPa}$, respectivamente.

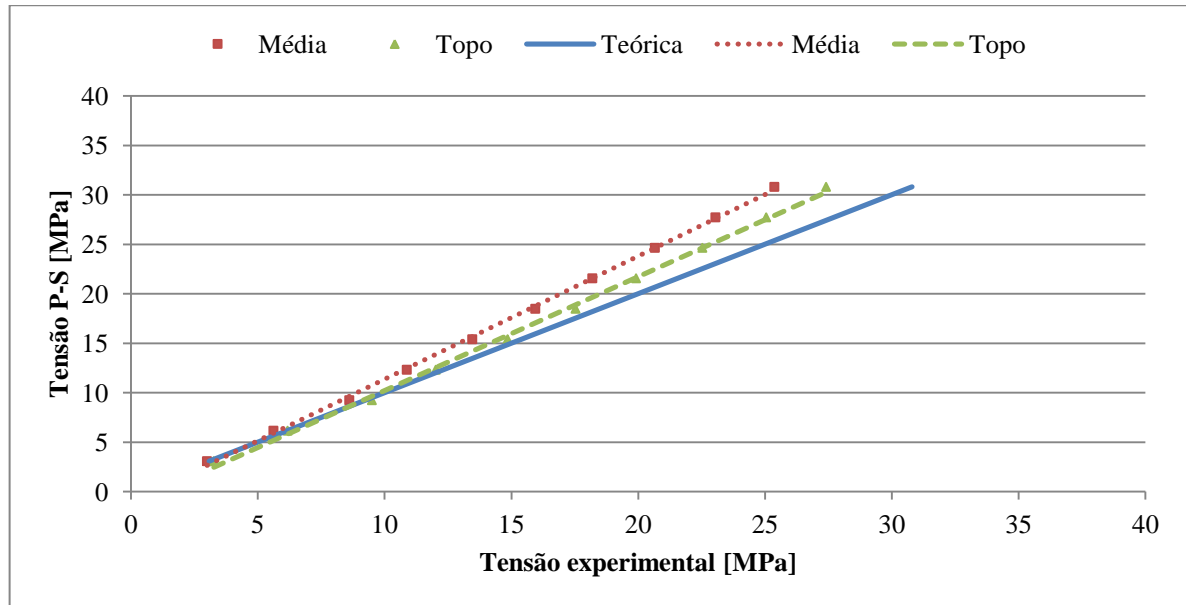


Figura 5.27 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor CAL 1055 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=1820 \text{ m}$).

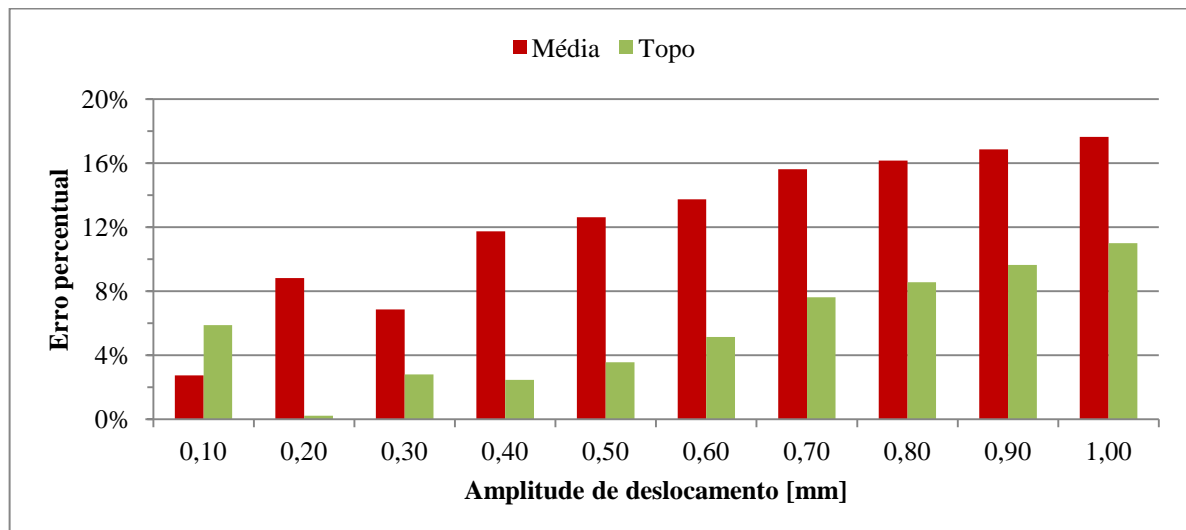


Figura 5.28 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 1055 ($H/w=1820 \text{ m}$).

O prosseguimento dos ensaios dinâmicos com o cabo CAL 1055 foi dado ao elevar a carga de esticamento para o equivalente a $H/w=2144 \text{ m}$. A Figura 5.29 mostra o comportamento da componente alternada de tensão em relação à tensão de P-S. Nota-se que ambas as curvas relacionada ao extensômetro do topo e à média de deformação dos fios apresentaram uma ótima correlação com o modelo teórico, principalmente em pequenas amplitudes de deslocamento.

Para $Y_b=0,6 \text{ mm}$, a tensão de P-S foi de $19,42 \text{ MPa}$, sendo observado um nível de tensão de $19,81 \text{ MPa}$ no fio central e $18,10 \text{ MPa}$ ao considerar a média de deformação dos três extensômetros. Ou seja, uma maior solicitação mecânica foi exercida no fio do topo provavelmente por estar mais próximo ao ponto diametralmente oposto ao UPC - consoante ao modelo teórico.

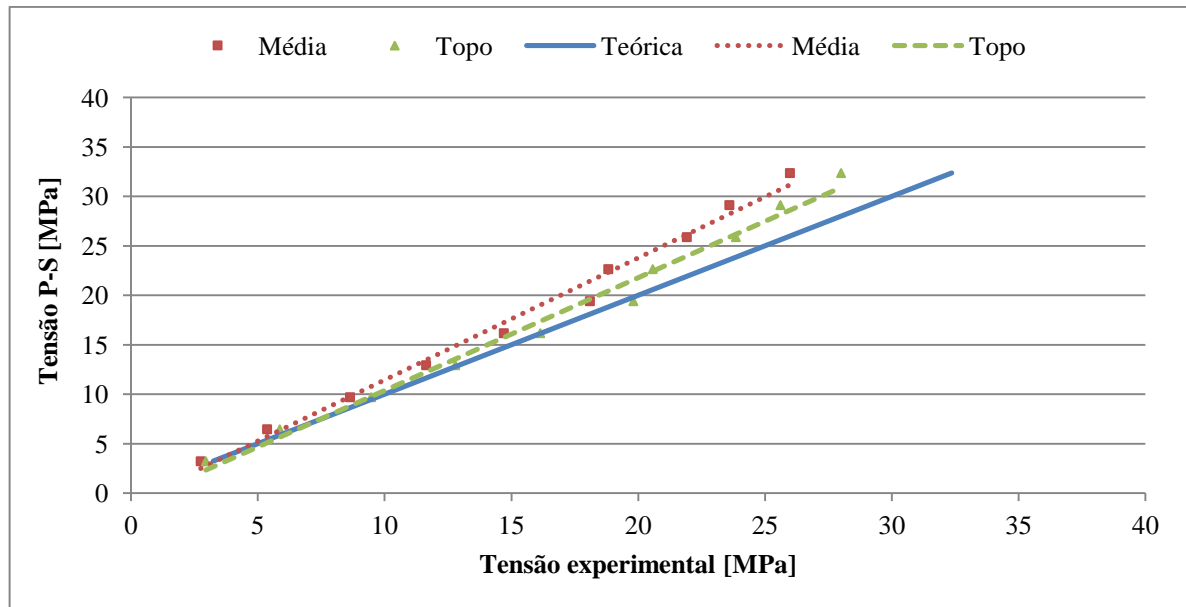


Figura 5.29 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor CAL 1055 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2144 \text{ m}$).

A tensão dinâmica exercida no cabo em função das amplitudes de deslocamento está exposta pela Figura B.8 em apêndices. Já o erro percentual resultante de cada ensaio pode ser visualizado na Figura 5.30. Nota-se que abaixo de $Y_b=0,9 \text{ mm}$ o erro percentual se manteve abaixo de 12%, evidenciando que o modelo teórico é adequado para representação do experimento principalmente em menores amplitudes de deslocamento.

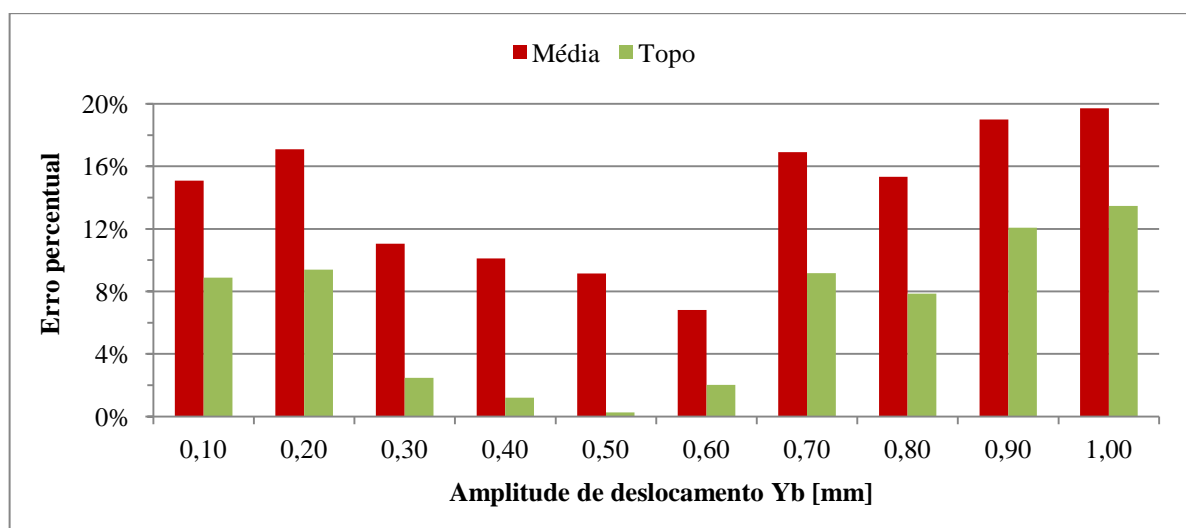


Figura 5.30 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 1055 ($H/w=2144 \text{ m}$).

Ao comparar os resultados obtidos a partir da média de deformação e do extensômetro do topo em particular, percebe-se que os fios adjacentes ao central foram menos solicitados que o do topo durante todo o experimento neste H/w . Deve-se ressaltar que para $Y_b=1,0\text{ mm}$ a equação de P-S resultou em $32,36\text{ MPa}$, enquanto a tensão atuante no fio do topo foi de $28,00\text{ MPa}$ e de $25,98\text{ MPa}$ quando considerada a média de deformação dos três extensômetros. O ensaio para esta amplitude de deslocamento resultou na maior discrepância observada durante os experimentos, com erros de 13,5% e 19,7% respectivamente.

Os ensaios dinâmicos realizados com o cabo CAL 1055 foram finalizados em $H/w=2725\text{ m}$. A Figura 5.31 mostra o comportamento da componente alternada de tensão em relação a tensão de P-S ao elevar a carga de esticamento. Já a Figura B.9 em apêndices foi construída para auxiliar a análise dos dados ao relacionar a tensão dinâmica atuante na amostra em função da amplitude de deslocamento do ensaio.

Ao comparar os resultados obtidos pode-se perceber que, assim como observado para o cabo TERN e ORCHID anteriormente, a correlação entre os dados experimentais e o modelo teórico tende a melhorar a medida que H/w é elevado. Ao analisar apenas a solicitação exercida no fio do topo na Figura 5.31, percebe-se uma aproximação quase ideal com a tensão de P-S, principalmente em pequenas amplitudes de deslocamento.

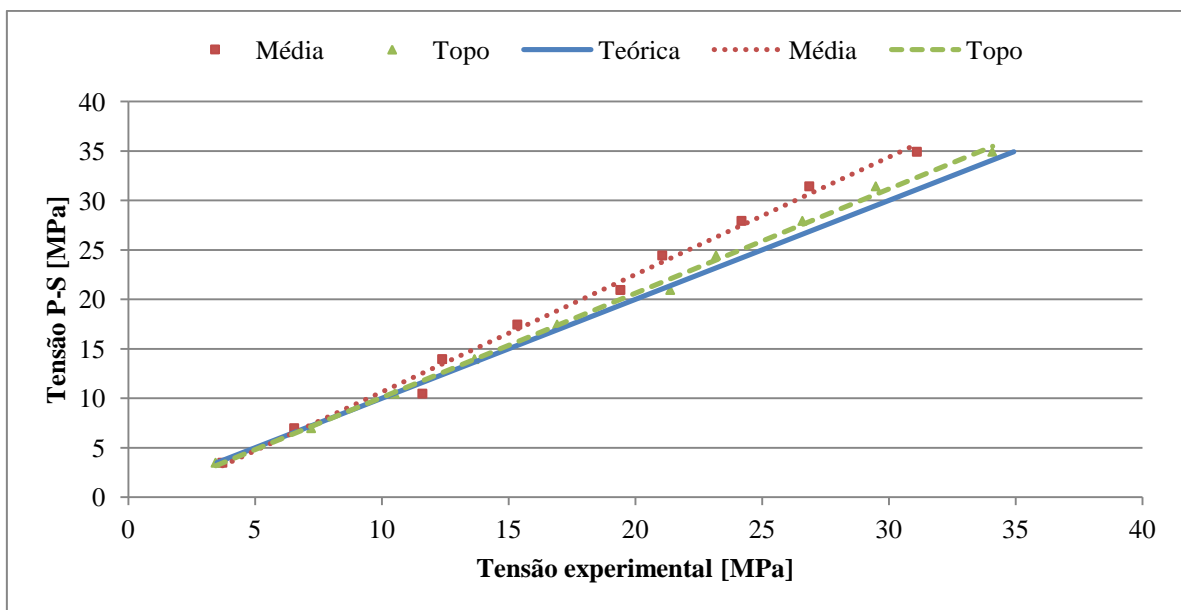


Figura 5.31 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor CAL 1055 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2725\text{ m}$).

O erro percentual resultante de cada ensaio está representado pela Figura 5.32. A discrepância entre os dados manteve-se bastante reduzida em todas as amplitudes de deslocamento em análise. Deve-se destacar que a maior divergência entre a tensão dinâmica e o modelo teórico para o cabo CAL 1055 e $H/w=2725\text{ m}$ ocorreu em $Y_b=0,9\text{ mm}$. A equação de P-S resultou num valor de $31,43\text{ MPa}$, a tensão obtida através da média de deformação dos extensômetros foi de $26,86\text{ MPa}$ (erro percentual de 14,5%), enquanto a solicitação no fio central foi de $29,49\text{ MPa}$, equivalente a um erro percentual de 6,2% em relação ao obtido analiticamente.

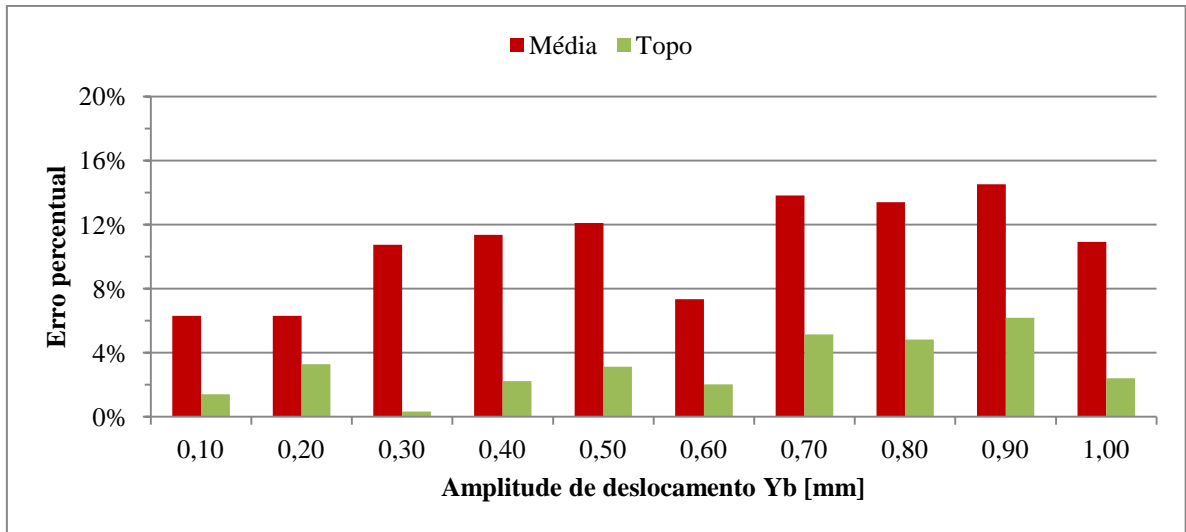


Figura 5.32 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 1055 ($H/w=2725 m$).

A Figura 5.33 mostra a média entre o erro percentual observado em cada nível de H/w do experimento com o cabo CAL 1055. Observa-se que, conforme esperado, houve uma redução do erro ao analisar apenas o fio do topo, uma vez que este é o que mais se aproxima do ponto diametralmente oposto ao UPC. A partir deste gráfico pode-se perceber a capacidade que a formulação de P-S possui para descrever a sollicitação dinâmica atuante na zona de falha do cabo CAL 1055 durante a vibração nas três cargas de esticamento analisadas. Ao considerar o fio central, nota-se um erro percentual de 5,7% para $H/w=1820 m$, 6,7% para $H/w=2144 m$, e 3,1% para $H/w=2725 m$.

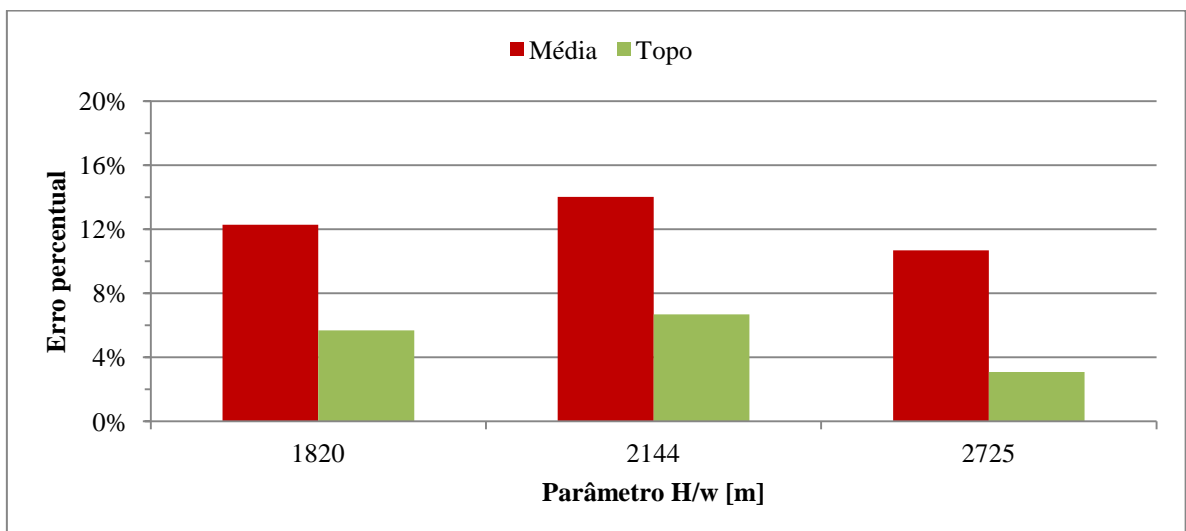


Figura 5.33 - Erro percentual médio entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 1055 em função do parâmetro H/w .

Assim como os cabos TERN e ORCHID, de maneira geral o cabo CAL 1055 apresentou melhores resultados em pequenas amplitudes de deslocamento e maior carga de esticamento. Ou seja, apesar de apresentar um erro percentual bastante reduzido dentro do

intervalo de variação dos ensaios ($0,1 \leq Y_b \leq 1,0 \text{ mm}$), um fato observado é que, para uma mesma amplitude, a variação da carga de esticamento do cabo pode provocar um aumento do erro inerente ao cálculo da tensão dinâmica atuante no cabo durante a vibração.

5.2.4 Cabo condutor: CAL 823

A Figura 5.34 mostra a comparação entre a tensão de P-S e a solicitação dinâmica exercida na zona de falha do cabo CAL 823 durante a vibração para $H/w=1820 \text{ m}$. A tensão resultante da média de deformação dos três extensômetros utilizados no ensaio está representada pela curva pontilhada em vermelho, já a tensão atuante apenas no fio do topo pode ser visualizada pela curva tracejada em verde. É possível visualizar no gráfico que houve uma correlação bastante satisfatória com o modelo teórico, principalmente em amplitudes de deslocamento abaixo de $0,7 \text{ mm}$. A inclinação das curvas mostra ainda que, neste ensaio, a tensão dinâmica se manteve acima da tensão de P-S no intervalo entre $0,1 \leq Y_b \leq 0,4 \text{ mm}$ e abaixo do previsto analiticamente para maiores amplitudes. Esta observação pode ser melhor visualizado por meio da Figura B.10 em apêndice, a qual destaca a solicitação exercida nos fios em cada Y_b utilizado durante o experimento.

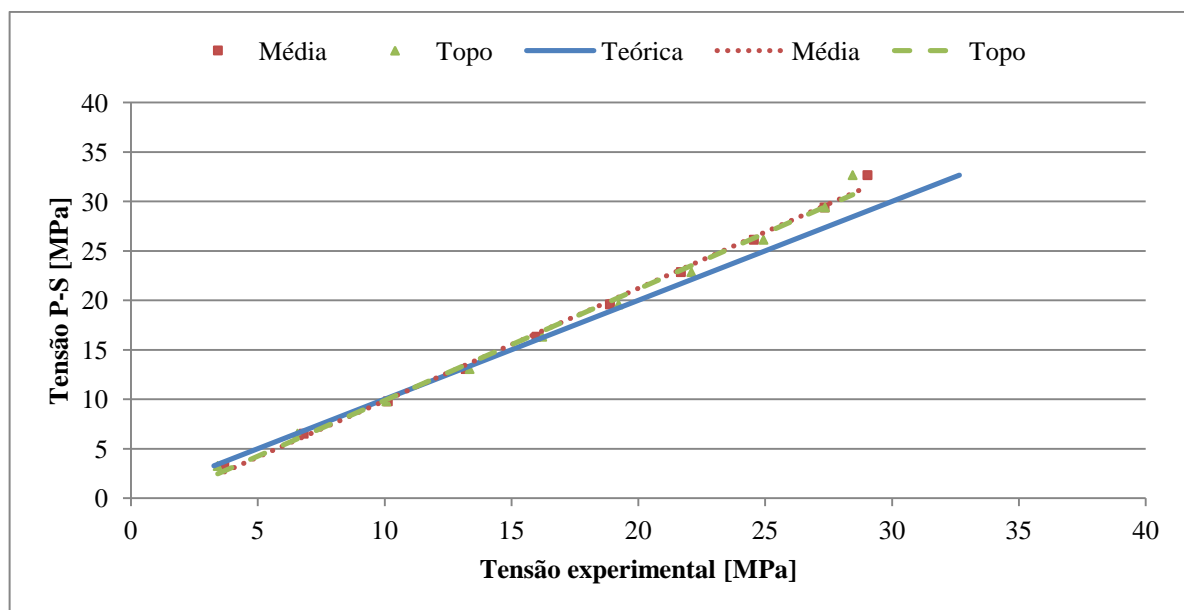


Figura 5.34- Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor CAL 823 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=1820 \text{ m}$).

O erro percentual entre os valores analíticos e a tensão dinâmica atuante na amostra está ilustrado pela Figura 5.35 para o cabo CAL 823 em $H/w=1820 \text{ m}$. Nota-se que houve um melhor ajuste em pequenas amplitudes de deslocamento, observando-se mais uma vez um aumento gradativo da diferença entre os níveis de solicitação a partir de $Y_b=0,6 \text{ mm}$. Ao analisar a tensão em $Y_b=0,3 \text{ mm}$ e $Y_b=0,9 \text{ mm}$ por exemplo, verifica-se um aumento do erro percentual de 2,7% para 6,9% quando analisado apenas o extensômetro aderido ao fio do topo, uma vez que a tensão dinâmica obtida em cada amplitude foi de $10,07 \text{ MPa}$ e $27,36 \text{ MPa}$ respectivamente.

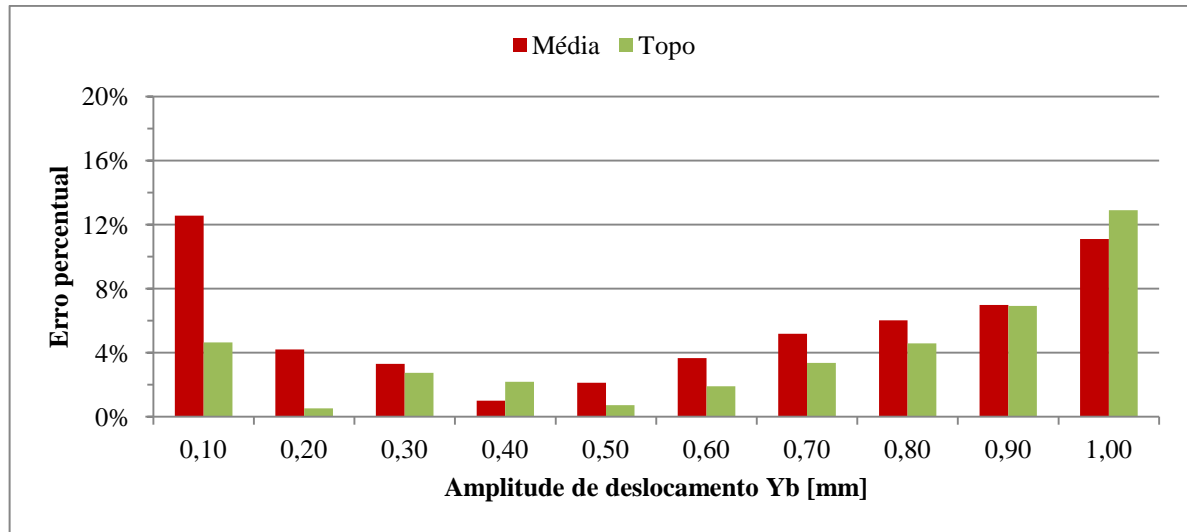


Figura 5.35 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 823 ($H/w=1820 m$).

A comparação entre a tensão de P-S e a tensão dinâmica atuante nos fios do cabo CAL 823 para $H/w=2144 m$ pode ser observada pela Figura 5.36. Nota-se que tanto a curva resultantes da leitura média de deformação dos extensômetros quando a curva relacionada a tensão atuante no fio do topo permaneceram bastante próximas à correlação ideal, mostrando que a formulação de P-S foi capaz de descrever o nível de sollicitação exercida no cabo durante a vibração. Além disso, a proximidade entre as curvas experimentais mostra que, durante o ensaio, a sollicitação média dos três fios analisados permaneceu próxima à tensão atuante no fio central, o que pode ter sido ocasionado pela localização do ponto diametralmente oposto ao UPC no espaço deixado entre dois fios adjacentes no topo do cabo condutor.

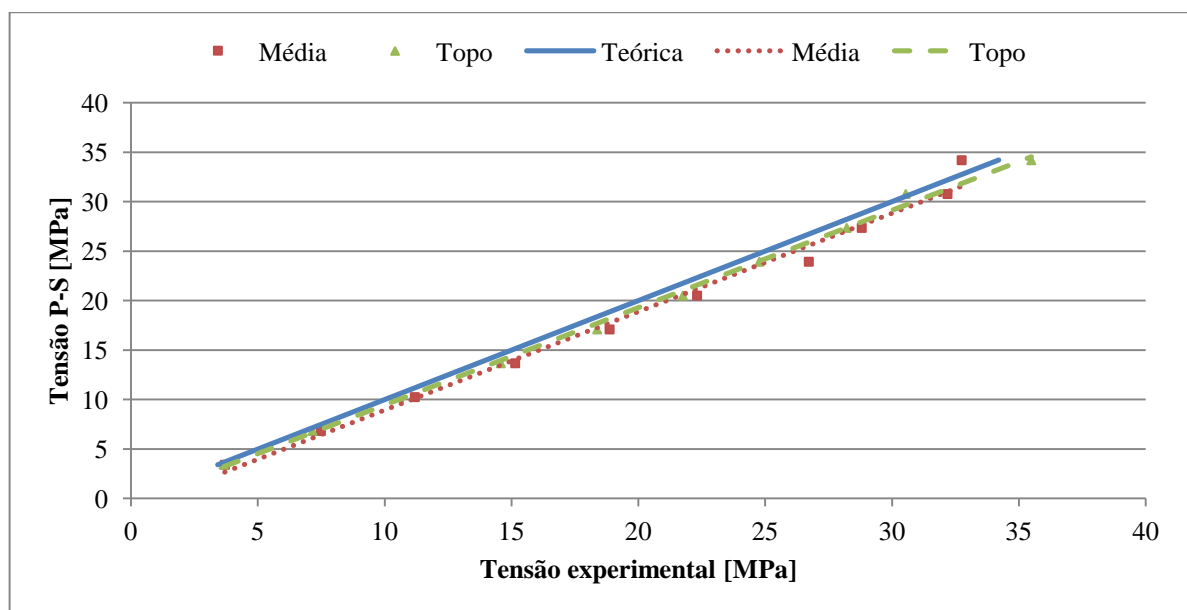


Figura 5.36 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor CAL 823 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2144 m$).

A Figura B.11 em apêndice foi construída para auxiliar a análise dos dados ao expor a tensão dinâmica atuante na amostra em função da amplitude de deslocamento. Já o erro percentual obtido em cada ensaio está exposto pela Figura 5.37. Percebe-se que a correlação entre os níveis de tensão experimental e teórico mantiveram-se bastante próximos durante o ensaio, evidenciando que bons resultados são obtidos ao utilizar a formulação de P-S para o cabo CAL 823 neste H/w.

É importante destacar que o erro percentual observado neste ensaio manteve-se reduzido mesmo em grandes amplitudes de deslocamento. Para $Y_b=1,0 \text{ mm}$ por exemplo, a solicitação esperada por meio da equação de P-S foi de $34,20 \text{ MPa}$. Ao analisar a tensão resultante da média de deformação dos extensômetros, tem-se uma tensão de $32,75 \text{ MPa}$ gerando um erro de 4,3%. Já a tensão atuante no fio mais próximo do ponto diametralmente oposto ao UPC foi de $35,49 \text{ MPa}$, equivalente a uma discrepância de 3,8%.

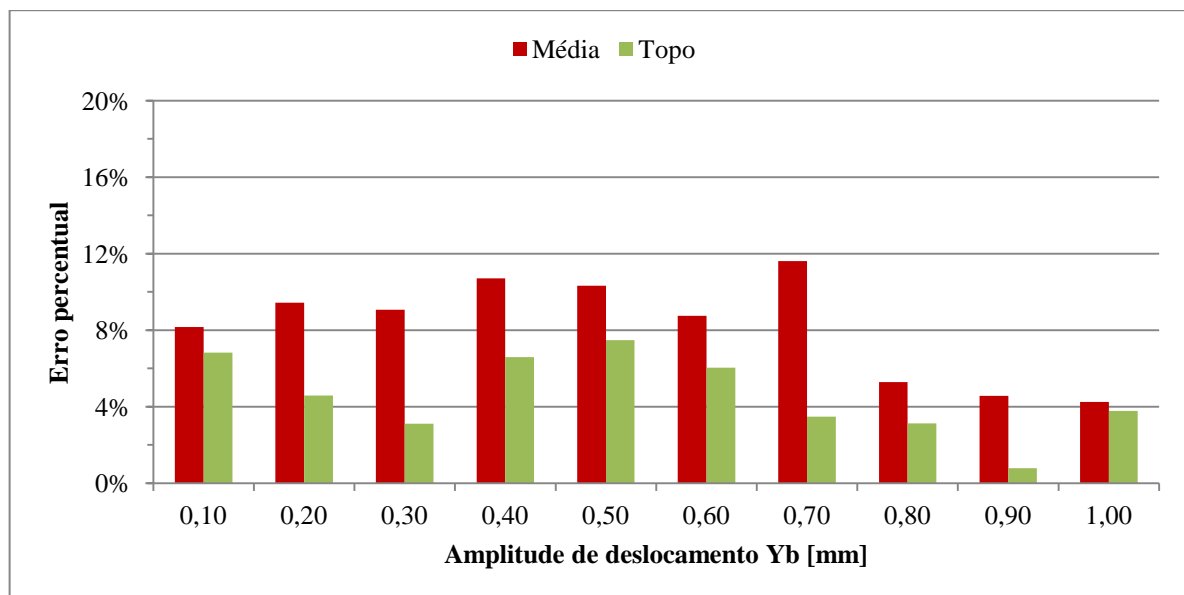


Figura 5.37 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 823 ($H/w=2144 \text{ m}$).

Os ensaios dinâmicos foram encerrados com cabo CAL 823 para $H/w=2725 \text{ m}$. Os resultados obtidos ao elevar a carga de esticamento estão expostos pela Figura 5.38 e pela Figura B.12 em apêndice. A primeira mostra um comparativo entre a solicitação esperada segundo a formulação de P-S e a tensão dinâmica obtida experimentalmente, já a segunda, construída com o intuito de auxiliar a análise, destaca o nível de tensão atuante na amostra em cada amplitude de deslocamento do ensaio.

Ao estudar os gráficos é possível notar que, conforme esperado, houve um melhor ajuste em relação ao modelo teórico por parte da curva de tensão do fio do topo. Isso pode estar associado à localização do ponto diametralmente oposto ao UPC, uma vez que a tensão no fio do topo manteve-se acima da tensão atuante nos fios adjacentes ao central. Entretanto, ressalta-se que a solicitação atuante da amostra manteve-se abaixo da tensão de P-S na maior parte do ensaio. Nota-se ainda que melhores resultados foram obtidos em pequenas amplitudes de deslocamento, com uma divergência crescente a partir de $Y_b=0,5 \text{ mm}$.

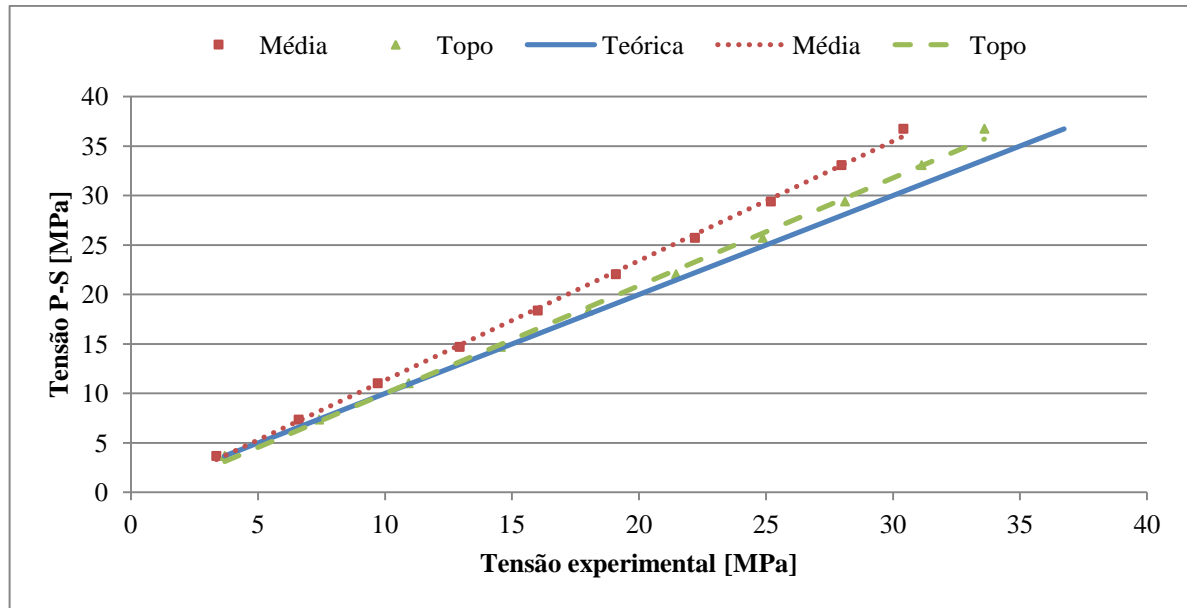


Figura 5.38 - Comparativo entre a tensão de P-S e o nível de tensão dinâmica atuante no cabo condutor CAL 823 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2725 m$).

A Figura 5.39 mostra o erro percentual entre os níveis de tensão teóricos e experimentais em cada amplitude de deslocamento. Analisando-se a tensão atuante no fio do topo em particular, uma correlação bastante satisfatória pode ser observada ao verificar erros percentuais abaixo de 10% em todo o ensaio. Para $Y_b=1,0 mm$ obteve-se a maior divergência entre os resultados para $H/w=2725 m$ com o cabo CAL 823, com nível de tensão de P-S igual a $36,74 MPa$ e tensão experimental de $33,60 MPa$, resultando num erro percentual de 8,5%. Ou seja, melhores resultados foram obtidos em pequenas amplitudes de deslocamento; entretanto, o modelo teórico mostrou-se capaz de descrever de maneira eficaz o nível de sollicitação mecânica atuante na amostra mesmo em grandes amplitudes de deslocamento.

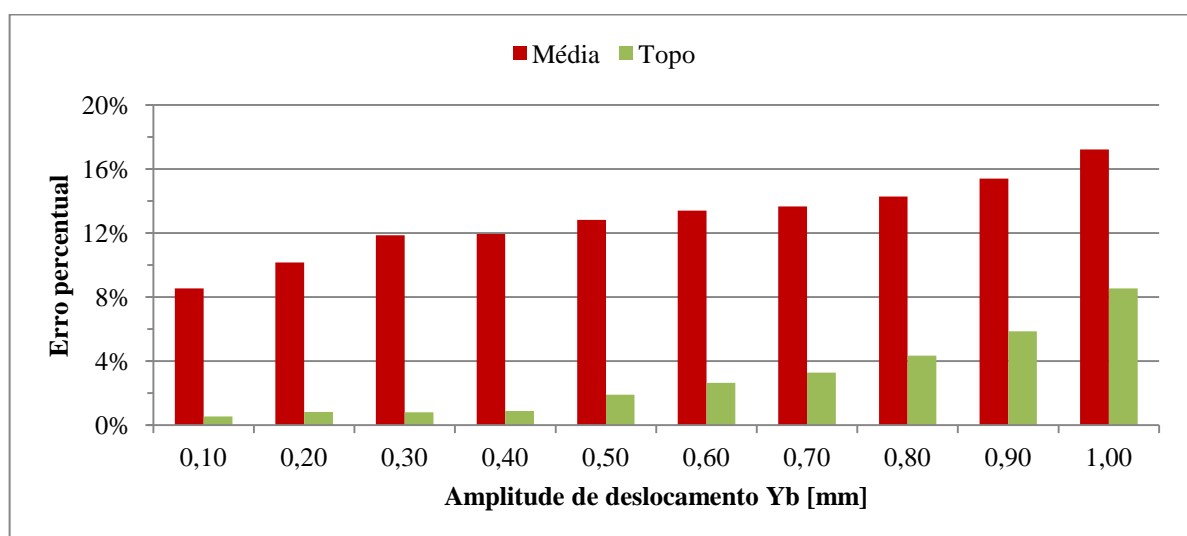


Figura 5.39 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 823 ($H/w=2725 m$).

A Figura 5.40 mostra a média entre o erro percentual obtido em cada nível de H/w com o cabo CAL 823. Percebe-se que o modelo teórico apresentou bons resultados em todas as cargas de esticamento sob análise, mantendo-se próximo a 4% quando considerado apenas o fio de maior interesse do ensaio. Para $H/w=1820$ m foi observado um erro médio de 4,0%, havendo um pequeno aumento para 4,6% em $H/w=2144$ m e uma redução para 3,0% ao realizar os ensaios na maior carga de esticamento.

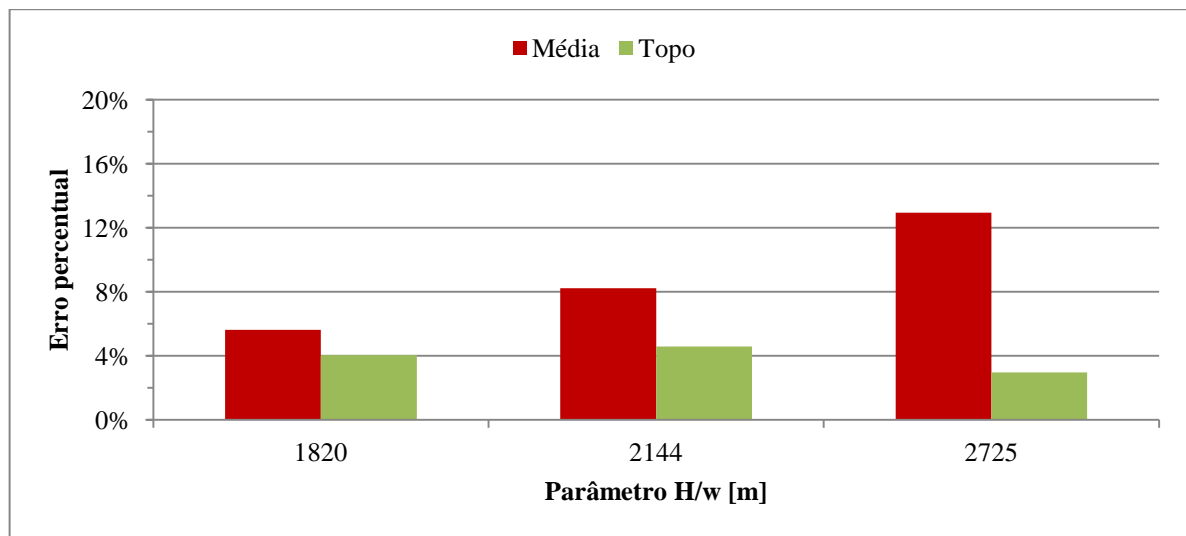


Figura 5.40 - Erro percentual médio entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 823 em função do parâmetro H/w.

A formulação de P-S mostrou-se adequada para mensurar o nível de tensão dinâmica atuante nos quatro tipos de cabos analisados. Ressalta-se que foram utilizados o cabo TERN, constituído por fios de Al 1350 e alma de aço; ORCHID, com fios de Al 1350 apenas; CAL 1055, composto por Al 6201 e CAL 823 com fios de Al 1120. Durante a realização da análise de dados foi constatado que, de maneira geral, uma redução do erro entre a tensão experimental e a solicitação mecânica obtida pela equação de P-S ocorria a medida que a carga de esticamento era elevada. Além disso, a correlação mostrou-se adequada em todo o intervalo de análise $0,1 \leq Y_b \leq 1,0$ mm, sendo obtido melhores resultados em pequenas amplitudes de deslocamento.

5.3 Microscopia

Sabe-se que mesmo em testes simples, onde o carregamento, a pressão de contato e o deslocamento são controlados separadamente, o comportamento do espécime com relação à fadiga por *fretting* pode tornar-se algo difícil de ser estudado. Dessa forma, a análise topográfica proposta por este trabalho visa auxiliar metodologias de estudo de fadiga por *fretting* em fios de cabos condutores de energia ao proporcionar um estudo do comportamento das marcas provenientes de carregamentos estáticos e dinâmicos entre os fios da camada interna do cabo durante um ensaio de fadiga. A zona crítica a ser analisada está compreendida entre a boca do grampo de suspensão e o parafuso tipo U responsável pela fixação da montagem cabo-grampo, conforme mencionado na seção 4.6.

Foi estabelecido como parâmetros de análise das elipses as grandezas expostas pela Figura 5.41, onde H refere-se ao semieixo maior (horizontal) de cada elipse e V ao semieixo menor (vertical), enquanto A representa a respectiva área de cada marca. Os índices 1 e 2 diferenciam as zonas de desgaste e adesão. A direção mais interior do grampo de suspensão encontra-se da esquerda para direita.

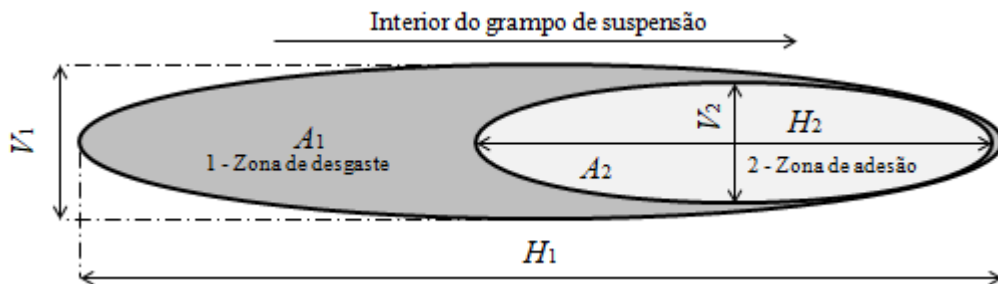


Figura 5.41 - Parâmetros de medida das marcas de contato entre os fios do cabo condutor CAA TERN.

Conforme a Tabela 4.4, o primeiro ensaio foi realizado com uma amplitude de deslocamento $Y_b=0,84 \text{ mm}$ para $H/w=1820 \text{ m}$, durante 8×10^5 ciclos. A primeira marca de contato visualizada no microscópio confocal está ilustrada pela Figura 5.42, a qual mostra a elipse resultante do contato entre os fios a uma distância $d_1=8,58 \text{ mm}$ do UPC, no interior do grampo de suspensão. Nota-se que a Figura 5.42 está caracterizada por duas marcas distintas: uma elipse brilhosa de menor tamanho, evidenciando a presença de uma zona de adesão no interior do contato entre as superfícies dos fios e uma elipse maior, que compreende também uma região de escorregamento com maior desgaste do fio devido ao *fretting*. Este tipo de regime misto de adesão e escorregamento foi observado na maior parte das marcas analisadas, sobretudo naquelas mais próximas do UPC, onde a diferença de tamanho entre as zonas aparece de forma mais acentuada. Por outro lado, na medida que se aproxima do parafuso U, entre 20 e 30 mm a partir do UPC, a zona de adesão tende a crescer de forma a representar a totalidade da marca de contato, não sendo possível a identificação da zona de escorregamento a partir desta distância em alguns ensaios.



Figura 5.42 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=1820 \text{ m}$ e $Y_b=0,84 \text{ mm}$ a uma distância $d_1=8,58 \text{ mm}$ do UPC.

A Figura 5.43 mostra o comportamento das marcas de contato entre os fios em função das distâncias em relação ao UPC. Nota-se que a elipse mais próxima do UPC, mostrada em detalhe pela Figura 5.42, apresentou maior área de desgaste em relação as demais. Além disso, a partir da segunda marca analisada - aproximadamente a 15 mm de distância - as elipses quase não apresentaram grandes modificações, mantendo uma zona de adesão bastante superior em relação à zona de escorregamento, o que provavelmente deve-se ao aumento da pressão exercida entre as camadas devido à aproximação do parafuso U. Este mesmo comportamento foi observado na maior parte da análise topográfica, de modo que um comportamento semelhante em relação ao tamanho das zonas de adesão e escorregamento foi observado a partir de uma distância entre 10 e 15 mm do UPC.

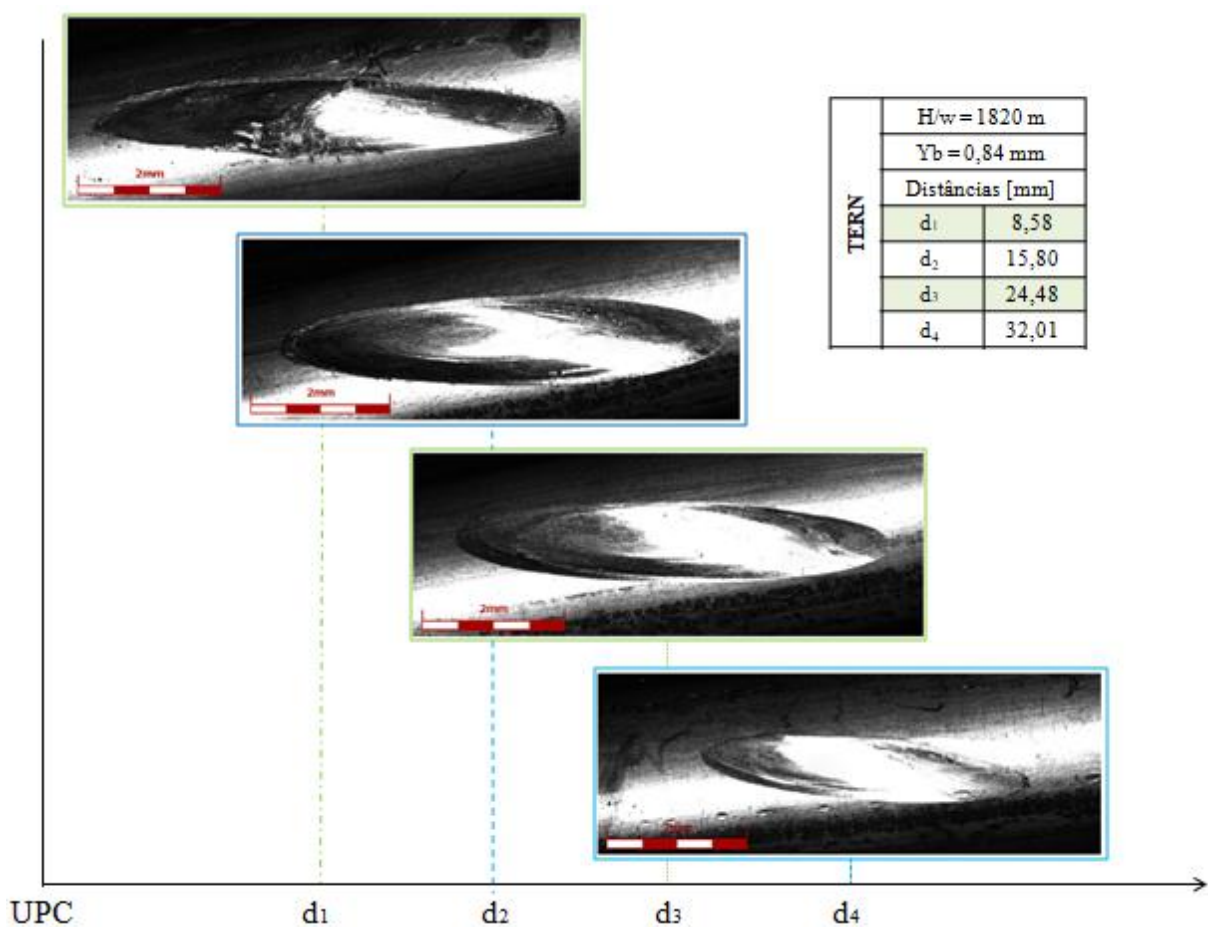


Figura 5.43 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=1820\text{ m}$ $Y_b=0,84\text{ mm}$).

De forma quantitativa, a Tabela 5.2 mostra a área ocupada por cada zona da marca de contato, evidenciando o crescimento da zona de adesão ao destacar a razão entre as áreas A_2 e A_1 . Pode-se perceber ainda que a marca gerada manteve um semieixo maior (H_1) próximo a 6 mm mesmo em distâncias superiores a 20 mm do UPC. Com relação ao ângulo formado entre a direção de laminação do fio e o semieixo maior da elipse (H_1), uma variação entre 10 e 12° foi observada durante a maior parte dos ensaios.

Tabela 5.2 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão ($H/w=1820 \text{ m}$ $Y_b=0,84 \text{ mm}$).

Marca de contato		1	2	3	4
Distância do UPC [mm]		8,58	15,80	24,48	32,01
Área [mm ²]	A_1	5,42	6,43	5,45	3,20
	A_2	2,51	5,26	4,63	-
	A_2/A_1	0,46	0,82	0,85	-
Distância [mm]	H_1	6,49	6,41	6,09	4,61
	V_1	1,11	1,30	1,09	0,92
	H_2	3,47	5,95	5,56	-
	V_2	0,87	1,11	0,96	-
Ângulo [°]		11,85	10,67	10,36	11,65

É importante destacar neste ponto que a tendência esperada durante a análise seria que as marcas de contato mais próximas ao parafuso U apresentassem área superior àquelas obtidas nas proximidades do UPC, uma vez que a maior carga de contato encontra-se no centro do parafuso. A pressão exercida pelo parafuso U comprime a telha utilizada na parte superior do cabo contra a base do grampo de suspensão. A alta rigidez do conjunto eleva a restrição de movimento resultando num comportamento semelhante ao engastamento de um corpo rígido; de modo que, apesar de existir uma grande sollicitação de flexão, nenhuma deflexão é esperada nesta região. Dessa forma, espera-se que nas vizinhanças do parafuso U o nível de esforço normal em relação à superfície dos fios seja mais elevado, resultando em marcas com maior área de contato e pouco desgaste devido ao escorregamento relativo dos fios já que existe uma alta pressão de contato.

Por outro lado, na medida que se desloca do centro do parafuso U no interior do grampo de suspensão em direção ao vão ativo, a rigidez do conjunto cabo-grampo vai sendo reduzida devido tanto a distância em relação ao ponto de aplicação da carga do parafuso quanto a curvatura da base do grampo de suspensão e ao formato da telha na parte superior do cabo. Essa redução de rigidez permite certa flexibilidade aos fios e, conseqüentemente, um aumento do deslocamento relativo, provocando maior desgaste por *fretting* e maior quantidade de óxido de alumínio (Al_2O_3). Dessa forma, é possível que ao aproximar-se do UPC, ocorra uma superposição de carregamentos, de forma que um momento de flexão dos fios se sobreponha à pressão de contato estimulando um movimento pendular que pode ser responsável pelo aumento da região de contato das marcas analisadas nas vizinhanças do UPC. Além disso, as partículas de óxido de alumínio geradas pelo *fretting* tendem a permanecer nas bordas das marcas de contato, acrescentando certa dificuldade durante a análise topográfica.

Ao elevar a amplitude de deslocamento para $Y_b=0,88 \text{ mm}$ foram analisadas as marcas ilustradas pela Figura C.1 em apêndice. Pode-se perceber que, assim como o ensaio anterior as duas marcas mais próximas ao parafuso U mostraram apenas zonas de adesão devido à alta pressão de contato, não sendo observado zonas de escorregamento. Com relação à elipse mais próxima do UPC, a 5 mm de distância, um desgaste bastante acentuado pôde ser observado, mostrando além das zonas de adesão e escorregamento, a presença das partículas de óxido de

alumínio principalmente na borda da marca de contato. A aproximadamente $d_2=12 \text{ mm}$ de distância, a marca de contato ilustrada pela Figura 5.44 foi observada. Nesta imagem pode ser visualizado nitidamente a presença das zonas de adesão e escorregamento, totalizando uma área de cerca de 4 e 6 mm^2 respectivamente. Vale ressaltar que, assim como no ensaio realizado para $Y_b=0,84 \text{ mm}$, o parâmetro H_1 manteve-se próximo de 6 mm , enquanto o ângulo formado com o eixo de laminação foi de $10,86^\circ$. Os dados relativos a cada marca para este ensaio encontra-se na Tabela C.1 em apêndice. A partir deste ensaio optou-se por expor as figuras com as marcas de contato em função da distância do UPC e as tabelas com os dados individuais nos apêndices do trabalho para maior organização e facilidade para análises.

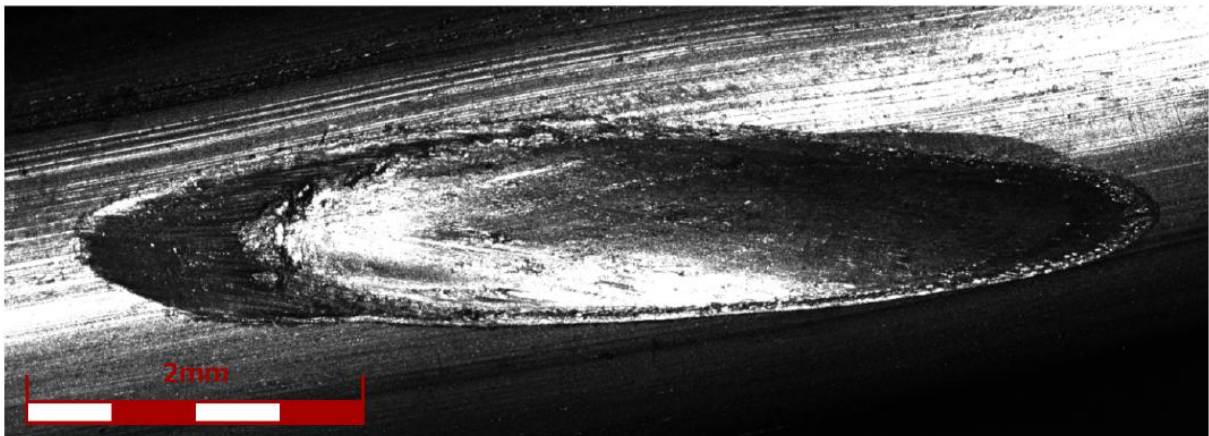


Figura 5.44 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=1820 \text{ m}$ e $Y_b=0,88 \text{ mm}$ a uma distância $d_2=12,14 \text{ mm}$ do UPC.

Mantendo-se a carga de esticamento em $H/w=1820 \text{ m}$ e ampliando o deslocamento para $Y_b=0,98 \text{ mm}$, foram obtidas as marcas de contato apresentadas pela Figura C.2 em apêndice. A elipse observada nas proximidades do UPC ($d_1=5,38 \text{ mm}$) apresentou grande desgaste devido ao escorregamento relativo entre os fios com a presença de grande quantidade de óxido de alumínio na superfície da região de contato. Ao aproximar-se do parafuso U, nota-se mais uma vez o crescimento da zona de adesão em relação à de escorregamento, apresentando uma área de aproximadamente 80% da marca para as elipses obtidas a cerca de 20 e 30 mm do UPC. Os dados de cada marca estão expostos de forma individualizada em apêndice por meio da Tabela C.2. A elipse observada a uma distância $d_2=11,23 \text{ mm}$ está ilustrada pela Figura 5.45, onde podem ser observadas de forma mais nítida as zonas de adesão e escorregamento, com área de aproximadamente 2,5 e 6 mm^2 respectivamente, semieixo maior $H_1=5,63 \text{ mm}$ e ângulo de $10,39^\circ$ em relação ao eixo de laminação do fio.

O segundo momento da análise topográfica foi realizado com $H/w=2144 \text{ m}$ para as amplitudes de deslocamento expostas na Tabela 4.4. As marcas resultantes do ensaio com $Y_b=0,80 \text{ mm}$ junto aos dados de cada elipse estão expostas pelas Figura C.3 e Tabela C.3 em apêndice. Apesar de ter sido realizado um aumento na carga de esticamento do ensaio, foi observado uma pequena redução da área ocupada pelas marcas de contato em relação aos ensaios para $H/w=1820 \text{ m}$, uma vez que as maiores áreas observadas permaneceram próximas a 4,5 mm^2 . Vale ressaltar que as amplitudes de deslocamento também foram modificadas, uma vez que estes parâmetros (Y_b e H/w) foram definidos para coincidir com a sollicitação

dinâmica atuante no cabo durante os ensaios de fadiga realizados no laboratório durante a construção de curvas S-N. A mesma tendência de crescimento da zona de adesão foi observada em função do aumento da distância do UPC, chegando a ocupar mais de 90% da área na marca obtida a uma distância $d_3=20,47 \text{ mm}$. Outra observação que deve ser destacada foi a manutenção do ângulo entre o semieixo maior da elipse e a direção de laminação dos fios entre 11 e 13° , mostrando um aumento discreto em relação aos ensaios anteriores.

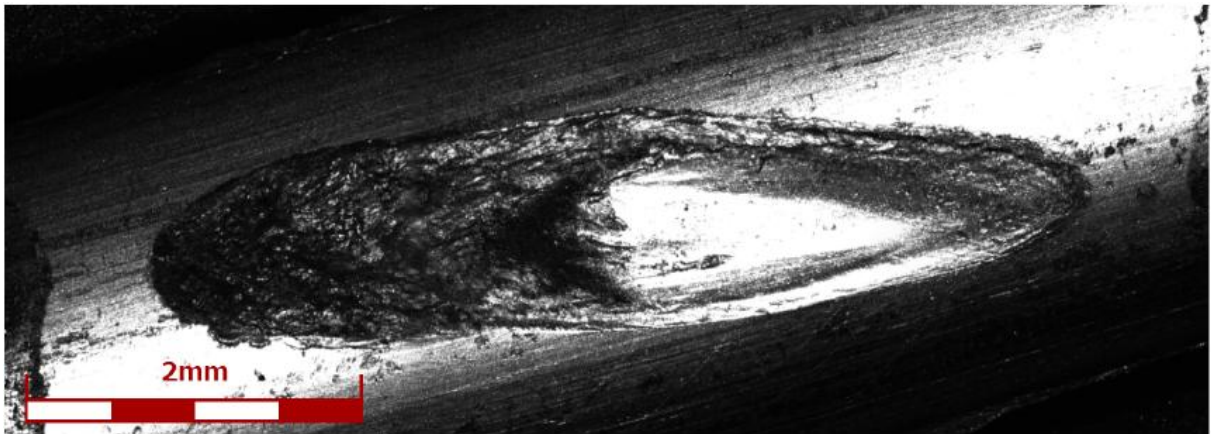


Figura 5.45 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=1820 \text{ m}$ e $Y_b=0,98 \text{ mm}$ a uma distância $d_2=11,23 \text{ mm}$ do UPC.

De forma análoga aos ensaios com $H/w=1820 \text{ m}$, as marcas de contato mais próximas do UPC apresentaram desgaste bastante acentuado devido ao escorregamento relativo entre os fios e a presença de partículas de Al_2O_3 , dificultando o dimensionamento das zonas de adesão e escorregamento. Na Figura 5.46 por exemplo, é possível notar a presença de uma zona de adesão com formato bastante irregular com maior brilho e uma zona mais escura onde ocorreu o escorregamento entre as superfícies dos fios. A área ocupada por cada zona foi mensurada em aproximadamente $2,05$ e $4,41 \text{ mm}^2$ com semieixos $H_1=3 \text{ mm}$ e $H_2=5 \text{ mm}$ respectivamente. Vale ressaltar ainda que mais uma vez as marcas de *fretting* que apareceram de forma mais nítida permaneceram próximas a 10 mm de distância a partir do UPC.

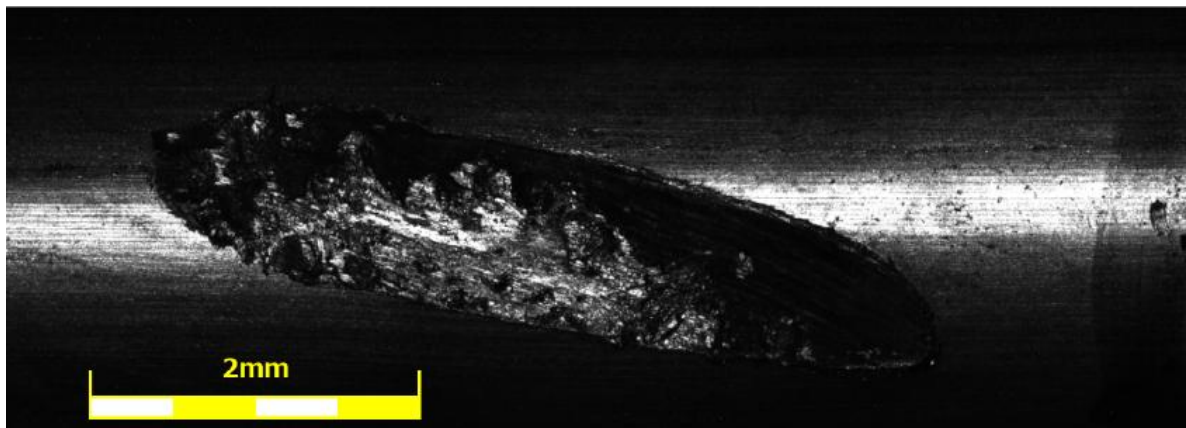


Figura 5.46 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2144 \text{ m}$ e $Y_b=0,80 \text{ mm}$ a uma distância $d_2=11,42 \text{ mm}$ do UPC.

O ensaio seguinte foi realizado com amplitude de deslocamento $Y_b=0,84 \text{ mm}$ para o mesmo H/w . Para maior organização do trabalho, o comportamento das marcas em função da distância do UPC podem ser visualizados em apêndice pela Figura C.4. Já os dados individualizados estão expostos por meio da Tabela C.4. Assim como o ensaio anterior, a área ocupada pelas marcas de contato permaneceram menores em relação aos testes com $H/w=1820 \text{ m}$, excetuando-se a elipse obtida a uma distância $d_2=9,46 \text{ mm}$ (Figura 5.47), cuja área permaneceu próxima de 6 mm^2 . Nota-se nesta elipse em particular, a presença de um concentrador de tensão que pode ter sido resultante da evolução do processo de desgaste devido ao contato fio-fio evidenciando a severidade do *fretting* na região mais próxima ao UPC, com distância de até 15 mm .

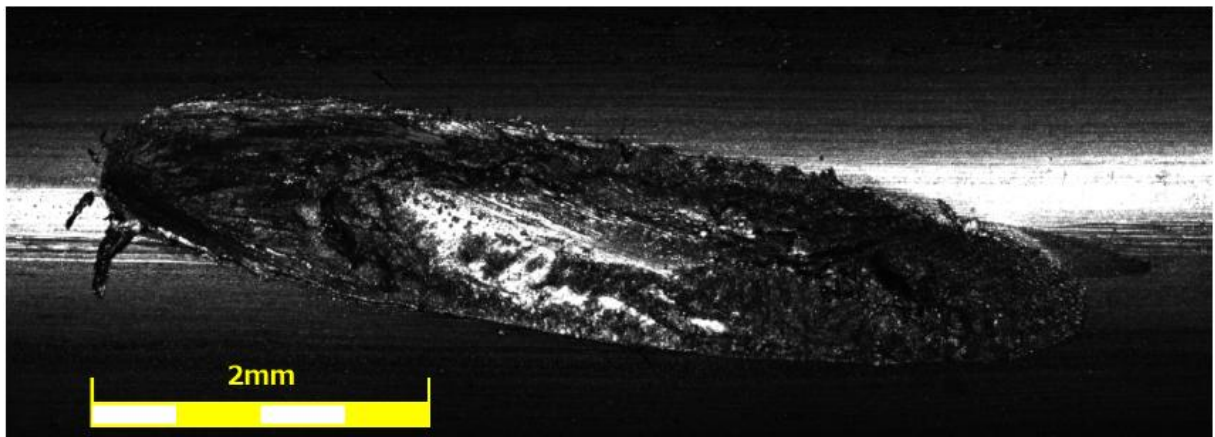


Figura 5.47 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2144 \text{ m}$ e $Y_b=0,84 \text{ mm}$ a uma distância $d_2=9,46 \text{ mm}$ do UPC.

Ao elevar a amplitude de deslocamento para $Y_b=0,93 \text{ mm}$ foram obtidas as marcas de contato apresentadas pela Figura C.5. É possível notar um crescimento considerável da zona de adesão já da primeira para a segunda elipse, com um aumento de 31% para 73% da área ocupada dentro de cada marca de contato. Esta observação pode estar relacionada com a distância da segunda elipse em relação ao UPC; uma vez que, conforme já mencionado, a região de maior severidade tende a permanecer abaixo de 15 mm . A Tabela C.5 mostra os dados obtidos para cada elipse de forma individualizada. Nota-se que, para este ensaio, houve uma dispersão um pouco maior do ângulo entre o semieixo maior da elipse e o eixo de laminação do fio, com $9,92^\circ$ para a elipse obtida mais próxima do UPC ($d_1=5,30 \text{ mm}$) e $13,49^\circ$ para a marca observada a uma distância $d_3=21,33 \text{ mm}$. A Figura 5.48 mostra a elipse obtida a uma distância $d_1=5,30 \text{ mm}$ do UPC. É possível notar a presença das zonas de adesão e escorregamento junto às partículas de óxido de alumínio geradas durante o ensaio. A área ocupada pela zona de adesão permaneceu próxima de $1,56 \text{ mm}^2$, enquanto a área total da elipse foi de $4,99 \text{ mm}^2$ com semieixo maior de $6,09 \text{ mm}$.

A última bateria de ensaios foi realizada para $H/w=2725 \text{ m}$. A primeira análise foi realizada com $Y_b=0,74 \text{ mm}$. A Figura C.6 em apêndice mostra as marcas de contato obtidas em função da distância até o UPC. Assim como as análises realizadas anteriormente, nota-se que a elipse mais próxima do último ponto de contato entre o cabo e o grampo - representada pela distância $d_1=1,43 \text{ mm}$ - mostra uma zona mista de adesão e escorregamento com maior

desgaste do fio quando comparada às demais, ocupando uma área de aproximadamente 1,64 e 4,06 mm^2 respectivamente. A Figura 5.49 mostra esta marca de contato com maior detalhe, sendo possível visualizar a severidade do desgaste devido ao contato fio-fio principalmente à esquerda da zona de adesão.

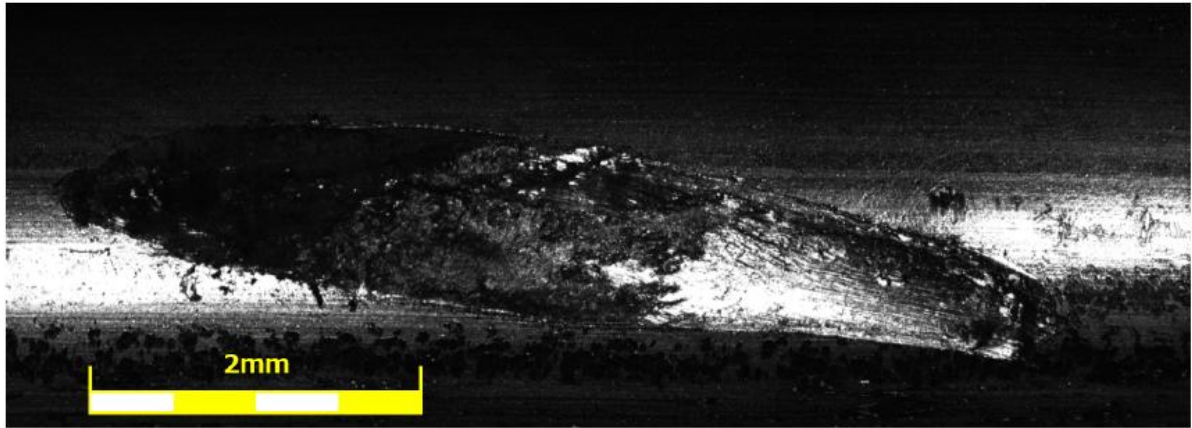


Figura 5.48 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2144 m$ e $Y_b=0,93 mm$ a uma distância $d_1=5,30 mm$ do UPC.

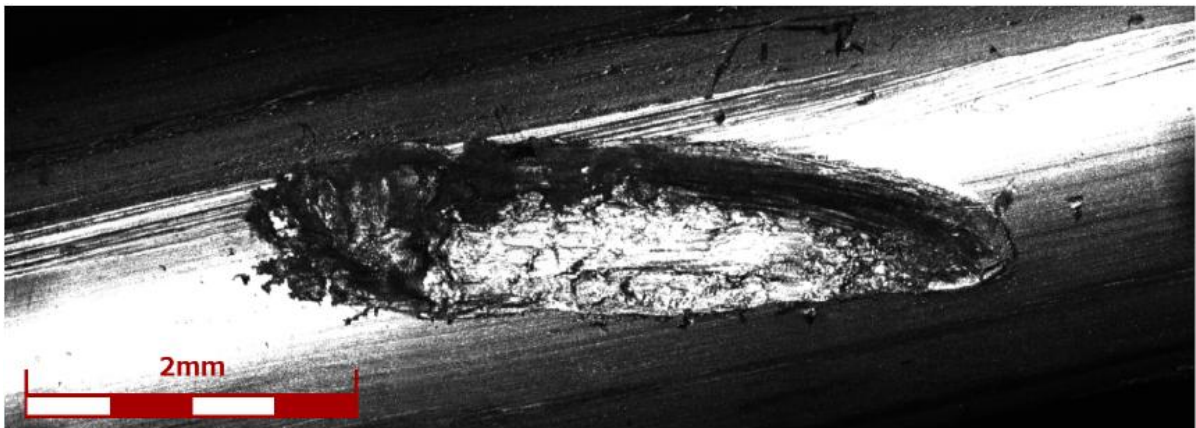


Figura 5.49 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2725 m$ e $Y_b=0,74 mm$ a uma distância $d_1=1,43 mm$ do UPC.

Ao seguir em direção ao interior do grampo neste mesmo ensaio, observa-se que a elipse seguinte (Figura 5.50) apresenta uma zona de adesão bastante nítida, ocupando cerca de 64% da área total da elipse com 3,82 mm^2 , dentro de uma zona de escorregamento mais escurecida totalizando a marca de contato com área de aproximadamente 6 mm^2 . Deve-se destacar que esta marca encontra-se a uma distância $d_2=10,91 mm$, seguindo a tendência notada em ensaios anteriores, onde foi possível observar outras marcas com formato semelhante em distâncias próximas de 10 mm do UPC. Os dados individualizados de cada elipse observada neste ensaio estão expostos pela Tabela C.6 em apêndice. Nota-se que as marcas de contato obtidas para as distâncias d_3 e d_4 não apresentaram zonas de escorregamento, sendo observado apenas zonas de adesão devido à pressão exercida entre os fios pelo parafuso U, já que a distância das elipses em relação ao UPC foram respectivamente de $d_3=20,01 mm$ e $d_4=27,41 mm$.

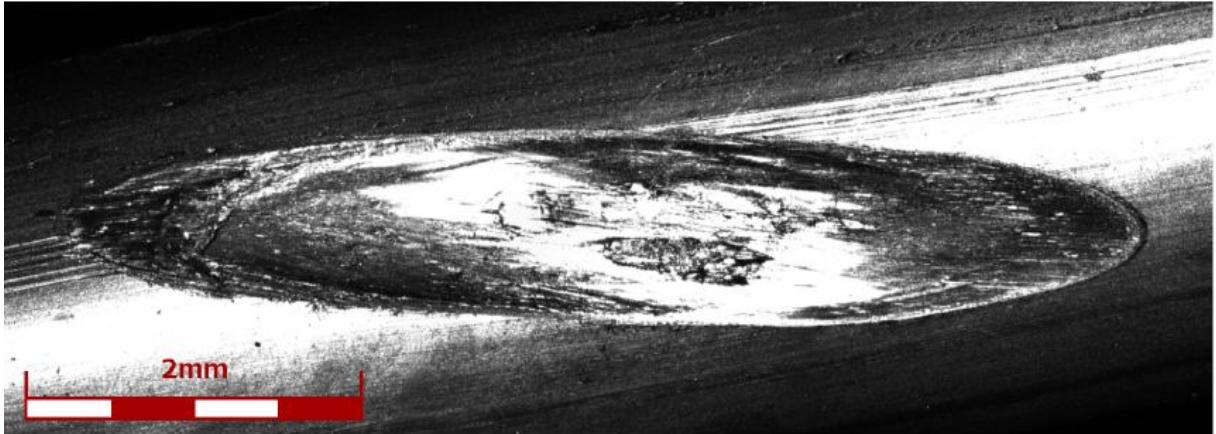


Figura 5.50 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2725 m$ e $Y_b=0,74 mm$ a uma distância $d_2=10,91 mm$ do UPC.

O ensaio seguinte foi realizado na mesma carga de esticamento mas com amplitude de deslocamento $Y_b=0,78 mm$. A marca de contato mais próxima do UPC que foi analisada neste ensaio estava a uma distância $d_1=8,13 mm$ e está ilustrada pela Figura 5.51. Observa-se a presença de uma zona de adesão cobrindo uma área de aproximadamente $2,95 mm^2$ dentro de uma elipse cuja área total é de $4,84 mm^2$. Em conformidade com os ensaios anteriores, percebe-se que as zonas de adesão e escorregamento aparecem de forma bastante nítida, uma vez que a distância entre a marca e o UPC aproximou-se de $10 mm$. O semieixo maior desta elipse em particular foi de $H_1=5,77 mm$, enquanto o ângulo entre H_1 e as marcas de laminação foi de cerca de $10,04^\circ$. Vale destacar ainda a presença de uma marca de amassamento devido ao contato fio-fio abaixo da elipse que contem as zonas de adesão e escorregamento, a qual pode ter sido gerada durante a acomodação do cabo para o ensaio. A marca gerada pelo amassamento pode colaborar com o desgaste provocado pelo *fretting* durante a vibração e acelerar o processo de desgaste, reduzindo a vida do cabo. Seguindo o padrão adotado neste trabalho, os demais dados referentes às marcas de contato estão expostos em apêndice por meio da Figura C.7, onde a disposição das elipses pode ser visualizada em função da distância do UPC e da Tabela C.7, a qual expõem os dados de cada marca individualmente.



Figura 5.51 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2725 m$ e $Y_b=0,78 mm$ a uma distância $d_1=8,13 mm$ do UPC.

O último ensaio foi realizado utilizando-se a carga de esticamento relativa ao parâmetro $H/w=2725 m$ e amplitude de deslocamento $Y_b=0,86 mm$. A marca mais próxima do UPC, exposta pela Figura 5.52 com distância $d_1=3,35 mm$, apresenta uma zona de adesão com formato bastante irregular dentro de uma zona de escorregamento com cor mais escura, ocupando cerca de 36% da área total da elipse. Por outro lado, a Figura 5.53 mostra a marca resultante do contato entre os fios a uma distância $d_2=12,37 mm$, onde é possível perceber mais nitidamente a área ocupada pela zona de adesão, cobrindo aproximadamente 78% da área total da elipse. Os dados estão expostos de forma detalhada pela Tabela C.8, onde é possível visualizar, além da área ocupada por cada elipse, o valor de cada semieixo e o ângulo formado com a direção de laminação do fio.

O resultado deste ensaio pode ser visualizado pela Figura C.8, a qual mostra o comportamento das zonas de adesão e escorregamento em função da distância da elipse até o UPC. Nota-se que a mesma tendência apresentada anteriormente foi observada, onde foi possível visualizar na marca de contato mais próxima do UPC um desgaste bastante acentuado em relação às demais devido ao deslizamento relativo entre as camadas de fios e a presença de partículas de óxido de alumínio geradas pelo *fretting*. Já a elipse seguinte, com distância próxima de 10 mm do UPC apresenta zonas mistas de adesão e escorregamento separadas de forma bastante nítida, com um crescimento considerável da área ocupada pela zona de adesão dentro da elipse, podendo ocupar mais de 80% da área total. Ao seguir para o interior do grampo, na direção do parafuso U, nota-se que a terceira marca de contato analisada apresenta um aspecto bastante semelhante à elipse caracterizada pela distância d_2 , sugerindo que há uma conformidade do comportamento em relação ao *fretting* nesta região. Por fim, as marcas identificadas pela distância d_4 ; ou seja, aquela que mais se aproxima do parafuso U durante o ensaio, de forma geral apresenta apenas uma marca de amassamento provocada pela pressão necessária a montagem do conjunto.

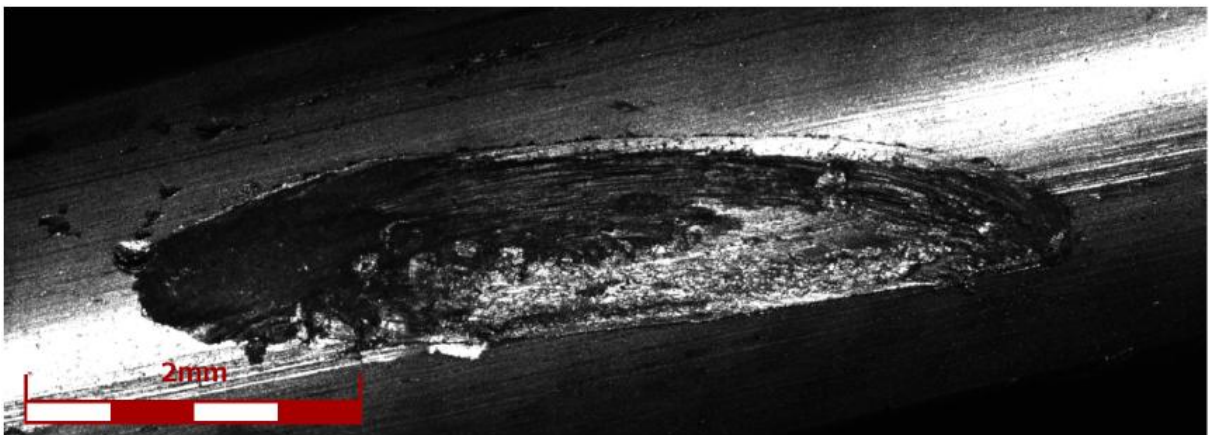


Figura 5.52 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2725 m$ e $Y_b=0,86 mm$ a uma distância $d_1=3,35 mm$ do UPC.

A partir dos ensaios realizados, pôde-se notar que as marcas mais próximas do UPC - cerca de 5 mm de distância - mostraram um desgaste acentuado devido ao contato fio-fio e a presença de grande quantidade de óxido de alumínio em relação às demais marcas de contato, o que pode estar associado a maior movimentação dos fios em relação a zona de maior

pressão exercida pelo parafuso U. Ao seguir no interior do grampo para distâncias mais próximas de 10 até 15 *mm*, observa-se que as marcas de contato apresentam zonas mistas de adesão e escorregamento mais nítidas, ocupando uma área de cerca de 6 *mm*² na maior parte dos ensaios. Por outro lado, na medida que se aproxima do parafuso U, com distâncias acima de 20 *mm* do UPC, nota-se um aumento da zona de adesão, chegando a ocupar a totalidade da marca em algumas amostras devido a alta pressão de contato.

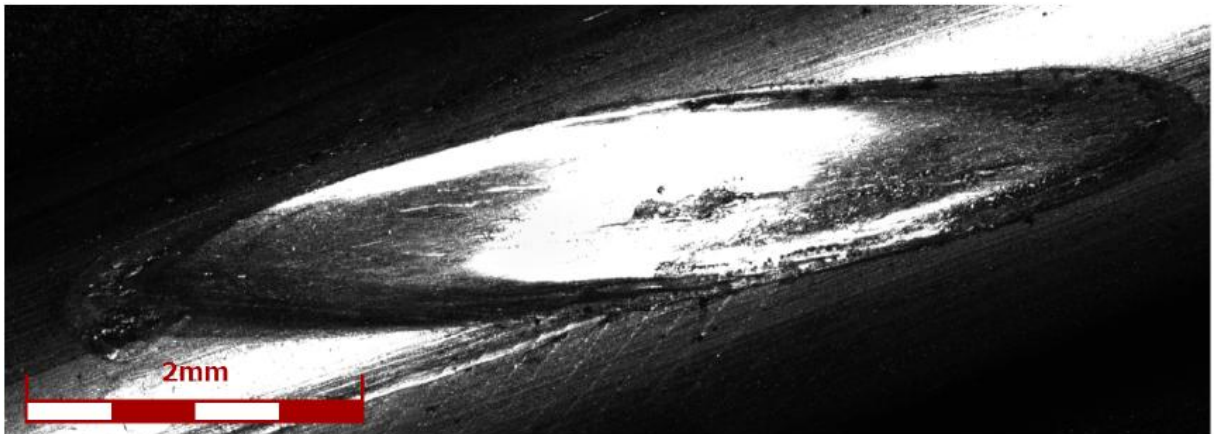


Figura 5.53 - Marca de contato entre fios do cabo condutor CAA TERN para $H/w=2725$ m e $Y_b=0,86$ mm a uma distância $d_1=12,37$ mm do UPC.

As marcas de contato analisadas foram identificadas na superfície que permaneceu em contato com a camada interior do cabo; ou seja, o estudo restringiu-se ao contato fio-fio. Entretanto, é importante destacar também que grande desgaste foi observado na superfície exterior dos fios que permaneceram em contato com o grampo de suspensão. A Figura 5.54 mostra que uma quantidade considerável de material foi perdida durante a movimentação do cabo, evidenciando que a redução do diâmetro dos fios que compõem a parte inferior da camada externa do cabo é um problema adicional que também deve ser estudado em relação à falha por fadiga do condutor.

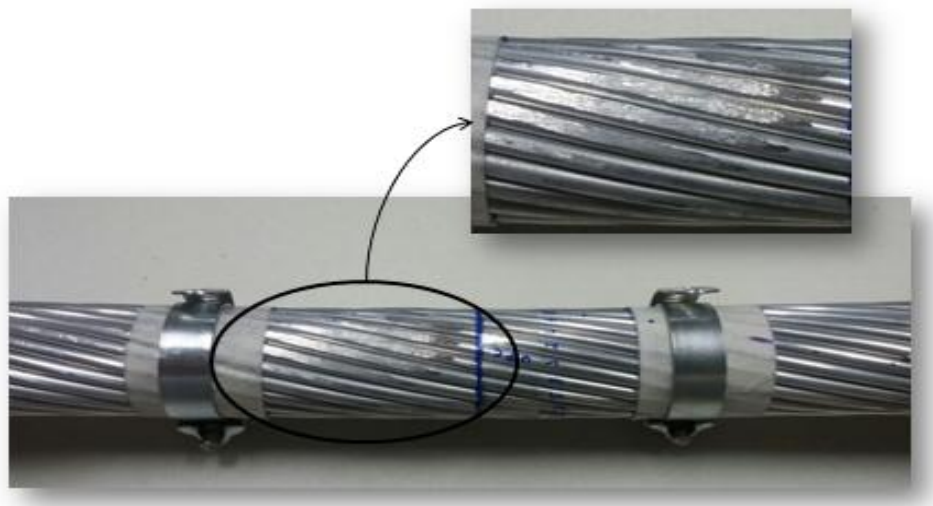


Figura 5.54 - Desgaste dos fios da camada externa do cabo devido ao contato com o grampo de suspensão.

6. CONCLUSÕES

6.1 Conclusão

O presente trabalho foi dividido em três etapas distintas. Primeiramente foram realizados ensaios estáticos para verificação da Equação (27) quanto à determinação do nível de tensão média atuante nos fios da camada externa do cabo condutor de energia em termos do tipo de cabo utilizado e do parâmetro H/w . Em seguida, a efetividade da formulação de P-S como ferramenta para obtenção do nível de tensão alternada atuante na zona de falha do cabo foi analisada a partir de ensaios dinâmicos. Por fim, a região crítica em relação à severidade das marcas de *fretting* entre os fios foi determinada a partir de análises topográficas após a vibração do cabo para certa quantidade de ciclos.

Os ensaios estáticos e dinâmicos foram realizados no laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia da Universidade de Brasília. Quatro tipos de cabos foram analisados (CAA TERN, CA ORCHID, CAL 1055 e CAL 823) em três diferentes níveis do parâmetro H/w (1820, 2144 e 2725 *m*). Já as análises topográficas foram realizadas no laboratório de microscopia da Universidade de Brasília utilizando-se as amostras obtidas com o cabo CA TERN para os mesmos H/w .

Com base nos resultados obtidos durante a realização dos procedimentos experimentais e análise de dados foi possível destacar as seguintes constatações:

- A formulação que relaciona o parâmetro H/w ao nível de tensão média atuante nos fios da camada externa do cabo condutor apresentou ótimos resultados para os quatro cabos utilizados na pesquisa, com erro percentual abaixo de 10% em todos os pontos do experimento. Essa observação mostra que as simplificações adotadas para os módulos de elasticidade e entre as massas específicas do aço e do alumínio não influenciaram de forma significativa a solicitação exercida nos fios do cabo CA TERN durante os ensaios. Ressalta-se que melhores resultados foram obtidos para os cabos CA ORCHID e CAL 823 cuja composição apresenta apenas fios de alumínio (série 1000), sendo observado um erro percentual abaixo de 4% nas três cargas de esticamento analisadas no experimento.
- Os ensaios dinâmicos mostraram que a formulação de Poffenberger-Swart é adequada para o cálculo da componente de tensão alternada na zona de falha do condutor. A composição das amostras não exerceram influência significativa na discrepância observada entre o modelo teórico e os dados experimentais. Foram obtidos ótimos resultados em todo o intervalo de amplitudes de deslocamento ($0,1 \leq Y_b \leq 1,0 \text{ mm}$), com erro percentual médio abaixo de 8% para as quatro amostras de cabo condutor. Constatou-se ainda que, de maneira geral, melhores resultados são obtidos em pequenas amplitudes ($Y_b \leq 0,6 \text{ mm}$). Além disso, espera-se que a equação torne-se mais efetiva a medida que a carga de esticamento do cabo é elevada; uma vez que, de maneira geral, o erro associado aos ensaios reduziu para maiores níveis de H/w .

- A análise topográfica revelou que nas proximidades do UPC, até cerca de 5 mm de distância no interior do grampo de suspensão, existe uma região de desgaste bastante acentuada devido à presença de grande quantidade de óxido de alumínio em superposição ao movimento relativo entre as superfícies dos fios em contato. Nota-se que nesta região as zonas de adesão e escorregamento tornam-se irregulares e de difícil dimensionamento, cobrindo uma área de desgaste de aproximadamente 6 mm² na superfície do fio. Ao seguir para distâncias próximas de 10 até 15 mm do UPC, as zonas decorrentes do *fretting* tornam-se mais nítidas, de modo que a zona de adesão cresce gradativamente em função da distância, podendo ocupar mais de 80% da área total da elipse. A partir de 15 mm, as marcas de contato mostraram que o aumento da pressão exercida pelo parafuso U de fixação do grampo de suspensão impede a formação de grandes zonas de escorregamento, reduzindo a probabilidade de falha dos fios nesta região, de modo a ser verificado apenas regiões de adesão na maior parte dos ensaios.

6.2 Proposta para Trabalhos Futuros

1. Realização de ensaios estáticos nas proximidades do grampo de suspensão para verificação do nível de solicitação mecânica a fim de constatar qual a influência da tensão média atuante no cabo nesta região.
2. Análise da quantidade de material perdida durante o ensaio na camada externa do condutor devido ao contato cabo-grampo de suspensão e o efeito que esta redução de diâmetro exerce na vida em fadiga dos fios.
3. Realização de análises topográficas da superfície dos fios, na região de maior desgaste e para diferentes tipos de cabos, mantendo-se constante a amplitude de deslocamento da amostra, a fim de estudar isoladamente o efeito da carga de esticamento sobre as marcas de contato.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALUBAR. **Condutores elétricos de alumínio**. Brasil: 2010. 64 p.

ASTM STP E1823 (1996), **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing Definitions of Terms Relating to Fatigue**, Annual Book of Standards, ASTM, Philadelphia, PA, 3.01: 740–49.

AZEVEDO, C. R. F., et al. **Fretting fatigue in overhead conductors: rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminium cable steel reinforced conductor**. ELSEVIER: Engineering failure analysis 2009; 9: 136-151.

BARBER, K. W.; CALLAGHAN, K. J. **Improved overhead line conductors using aluminium alloy 1120**. 1995, 528-534.

BARRETT, J. S.; MOTLIS, Y. **Allowable tension levels for overhead-line conductors**. IEE Proc. – Gener TransmDistrib, 2001; 148, 1: 54-59.

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

CIGRE TF 22.11.04, **Safe design tension with respect to aeolian vibrations: single unprotected conductors**, Electra No.186, Out. 1999.

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

CLAREN, R. **The response of overhead line conductors to vortex shedding under laminar and turbulent air flow**. presented to CIGRÉ, 1978.

DOWLING N. E. **Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue**. 4 ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2013. 977 p.

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

FADEL, A. A. **Avaliação do efeito de tracionamento em elevados níveis de EDS sobre a resistência em fadiga do condutor IBIS (CAA 397,5 MCM)**. 2010. 185 p. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

KALOMBO, R. B., et al. **Influence of the catenary parameter (H/w) on the fatigue of overhead conductors**. ELSEVIER: Tribology International 2016; 1 - 9.

KIESSLING, F., et al. **Overhead power lines: planning, design, construction**. 2002.

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

FUCHS, R. D., et al. **Projetos mecânicos de linhas aéreas de transmissão**. 2 ed. Edgard Blucher Ltda, 1992.

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

HILLS, D. A.; Nowell, D. **Mechanics of fretting fatigue: solid mechanics and its applications**. Kluwer Academic Publishers, 1994.

IEEE. **Guide for aeolian vibration field measurements of overhead conductors**. IEEE Std 1368; New York: Jun, 2007.

IEEE. **Standardization of conductor vibration measurements**. IEEE PAS, 1966; vol. 85 No. 1, Trans. 31 TP65-156.

LEE, Y., et al. **Fatigue testing and analysis**. Oxford: Elsevier, 2005. 417 p.

LIENHARD, J. H., **Synopsis of lift, drag and vortex frequency for rigid circular cylinders**. 1966. College of engineering research division bulletin 300, Techn extension service, Washington State University.

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

NEXANS. **Alumínio: Condutores Nus**. Brasil: 2013. 60 p.

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

PETTERSON, A. R.; BRONNVAL, W. **Al 59 - A Swedish standard for overhead aluminium alloy conductors with 59% conductivity (IACS)**. Swedish State Power Board, 1988, 75-78.

POFFENBERGER, J. C.; SWART, R. L. **Differential displacement and dynamic conductor strain.** IEEE Transactions Paper, 1965; PAS-84: 281-289.

PREFORMED LINE PRODUCTS. **Aeolian vibration basics.** Cleveland: Out, 2013.

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

VILELA, T. S. V. **Avaliação comparativa das tensões flexurais de diversos condutores de energia.** 2013. 133p. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

ROCHA, P., H., C. **Estudo comparativo de vida em fadiga de cabos condutores utilizando o critério H/w.** 2016. 98 p. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

ROCTEST. **Transmission line vibration recorder and analyser: model PAVICA.** Australia: 2005. 2 p.

WIRSCHING, P. H.; SHEHATA, A. M., **Fatigue Under Wide Band Radom Stresses Using the Rain-Flow Method.** Journal of Engineering Materials and Technology, 1997, 205- 211.

ZHOU, Z. R.; CARDOU, A.; FISET, M.; GOUDREAU, S., **Fretting fatigue in electrical transmission lines.** Wear, 1994, 179-188.

APÊNDICE A

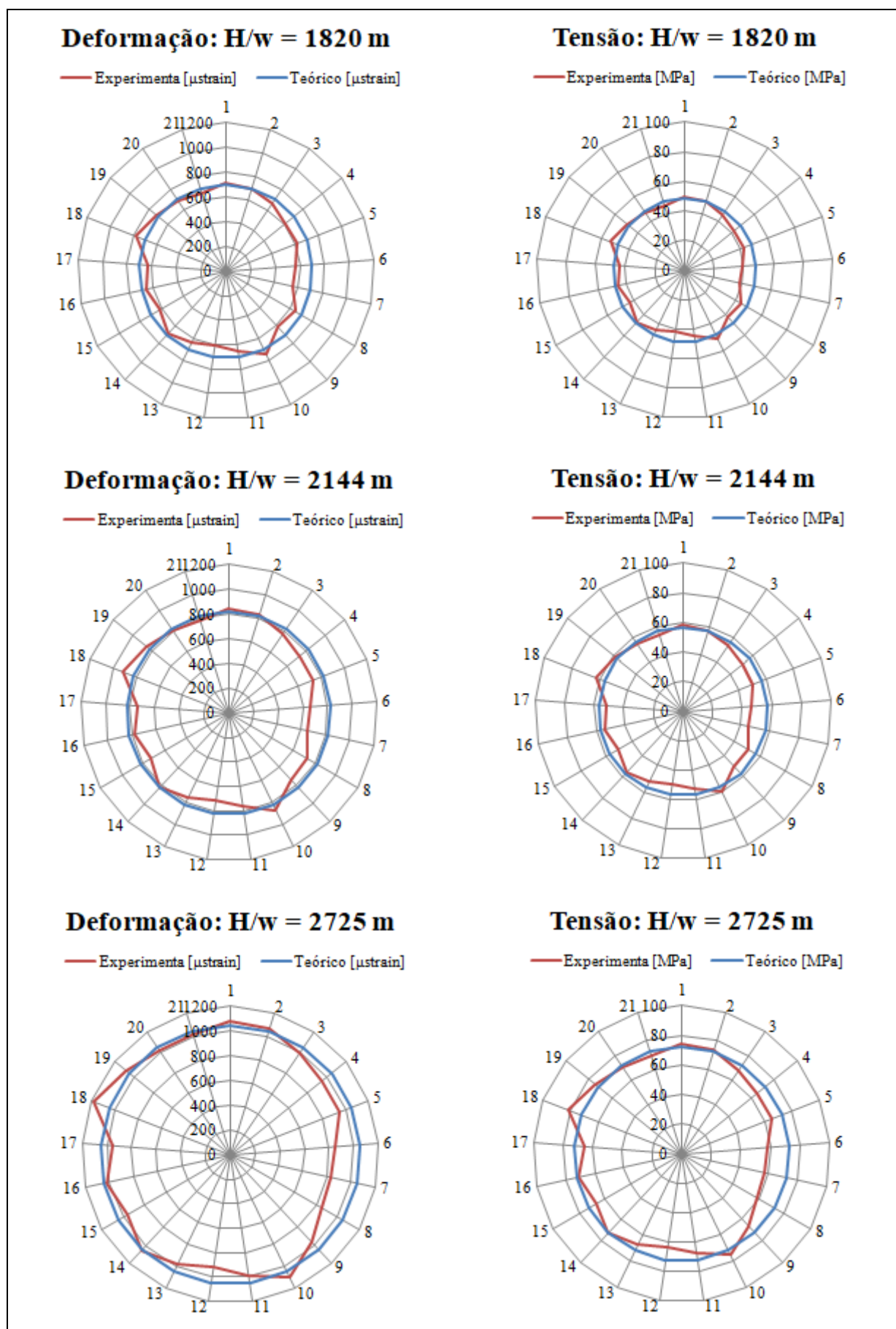


Figura A.1 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo TERN.

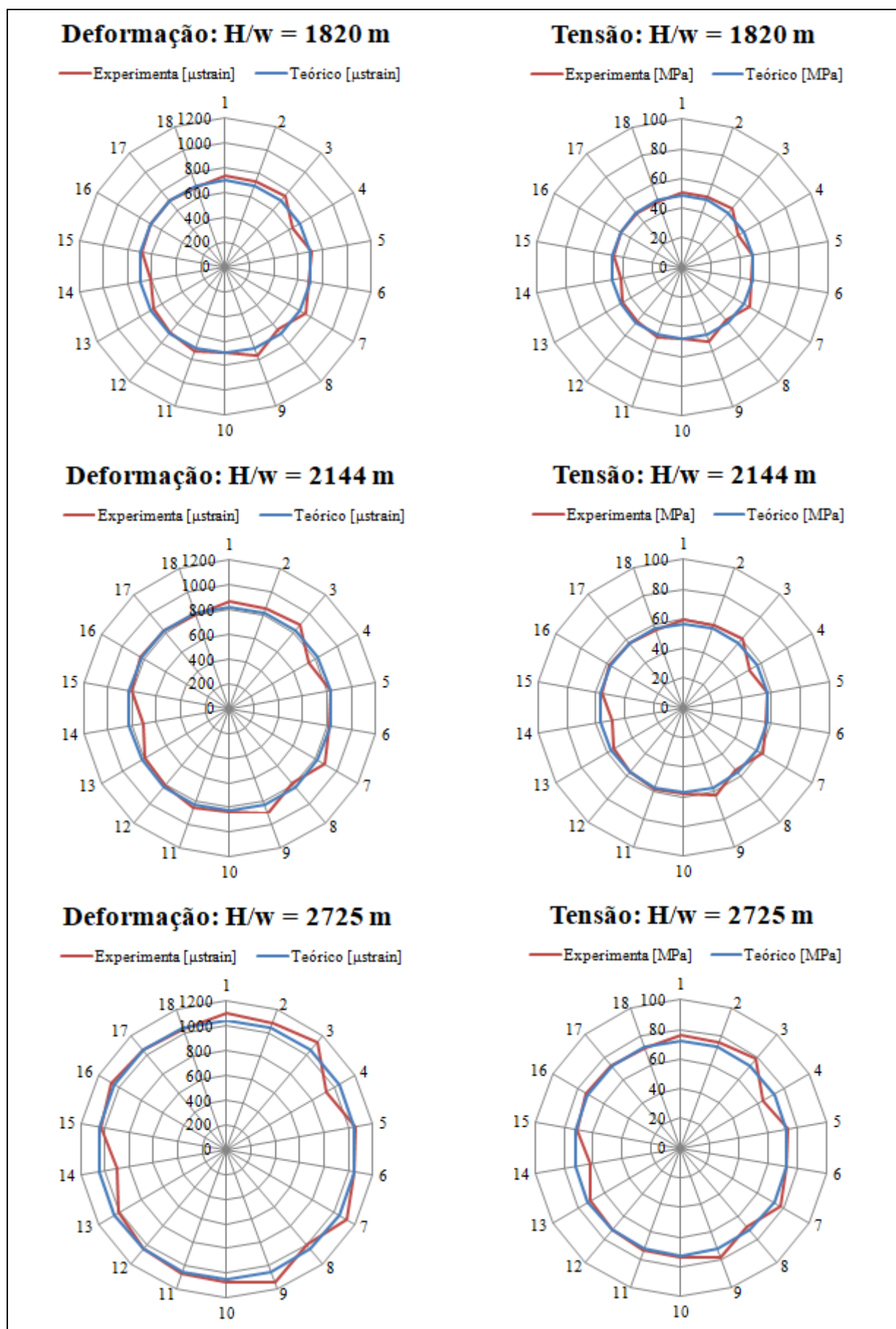


Figura A.2 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo ORCHID.

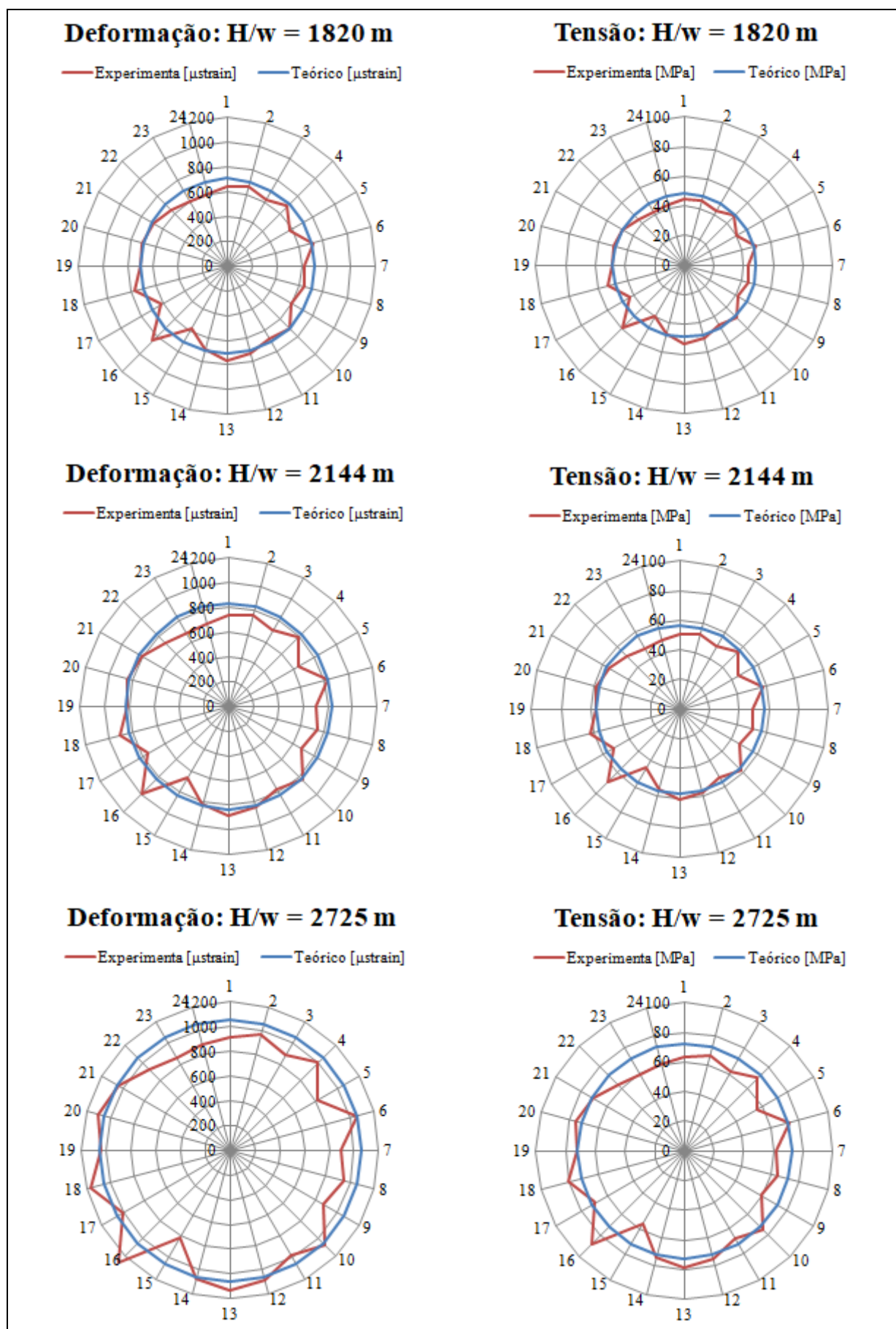


Figura A.3 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo CAL 1055.

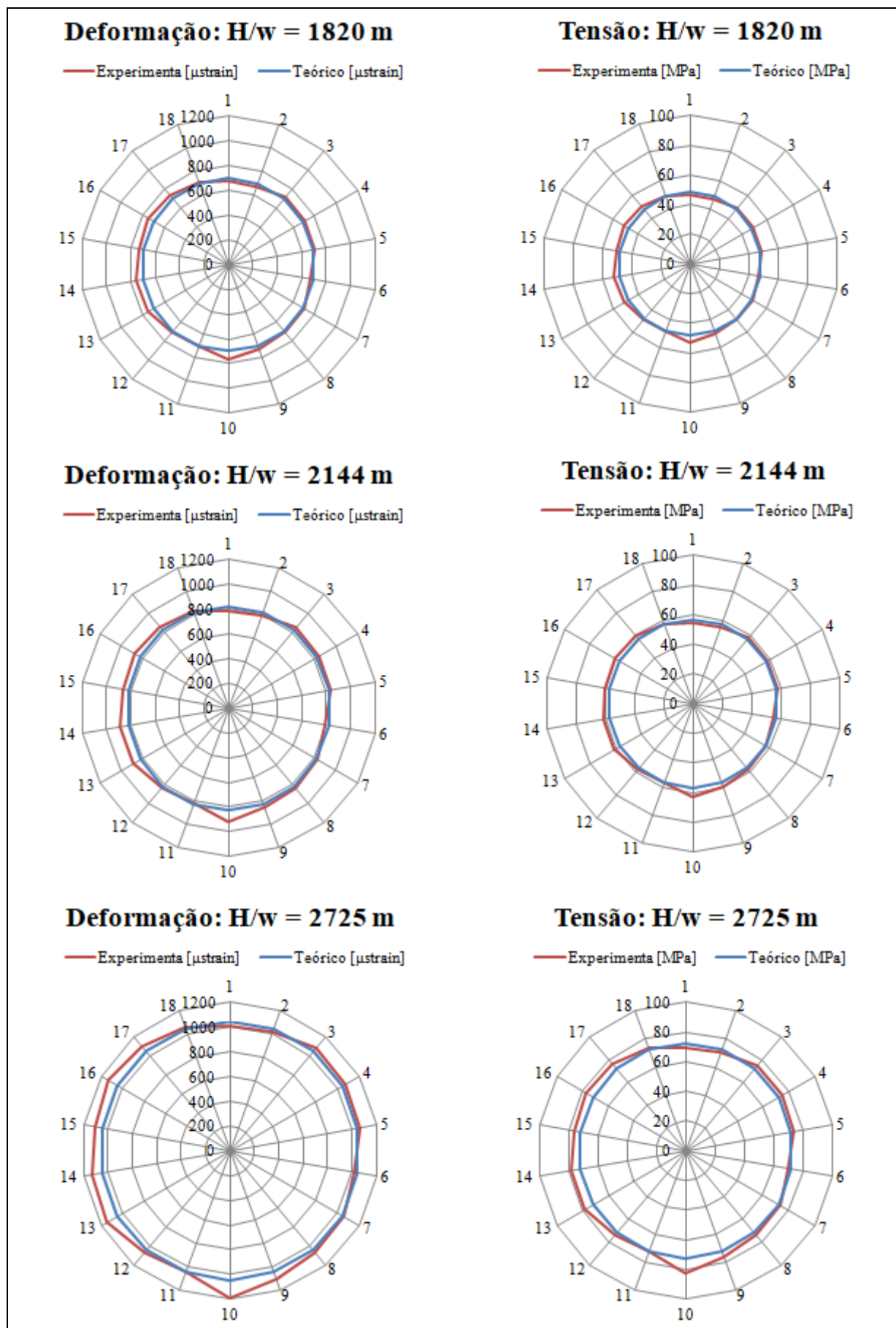


Figura A.4 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo CAL 823.

APÊNDICE B

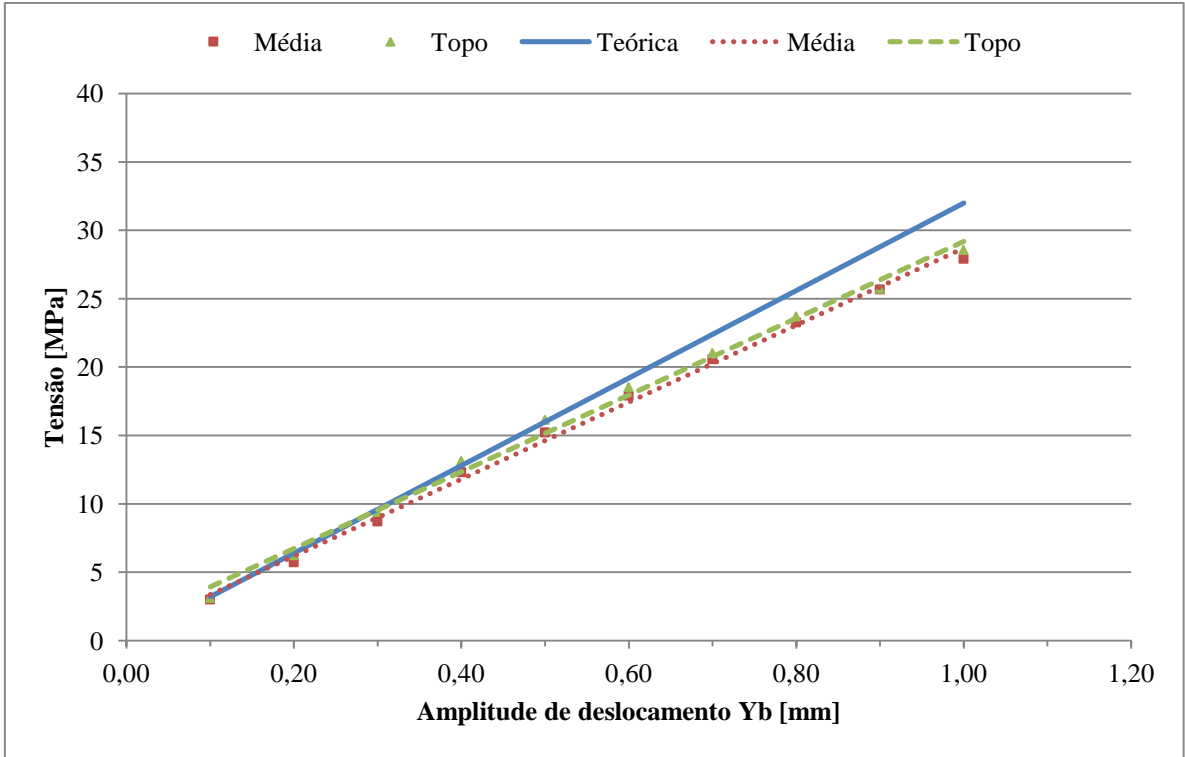


Figura B.1 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo TERN em função da amplitude de deslocamento ($H/w=1820 m$).

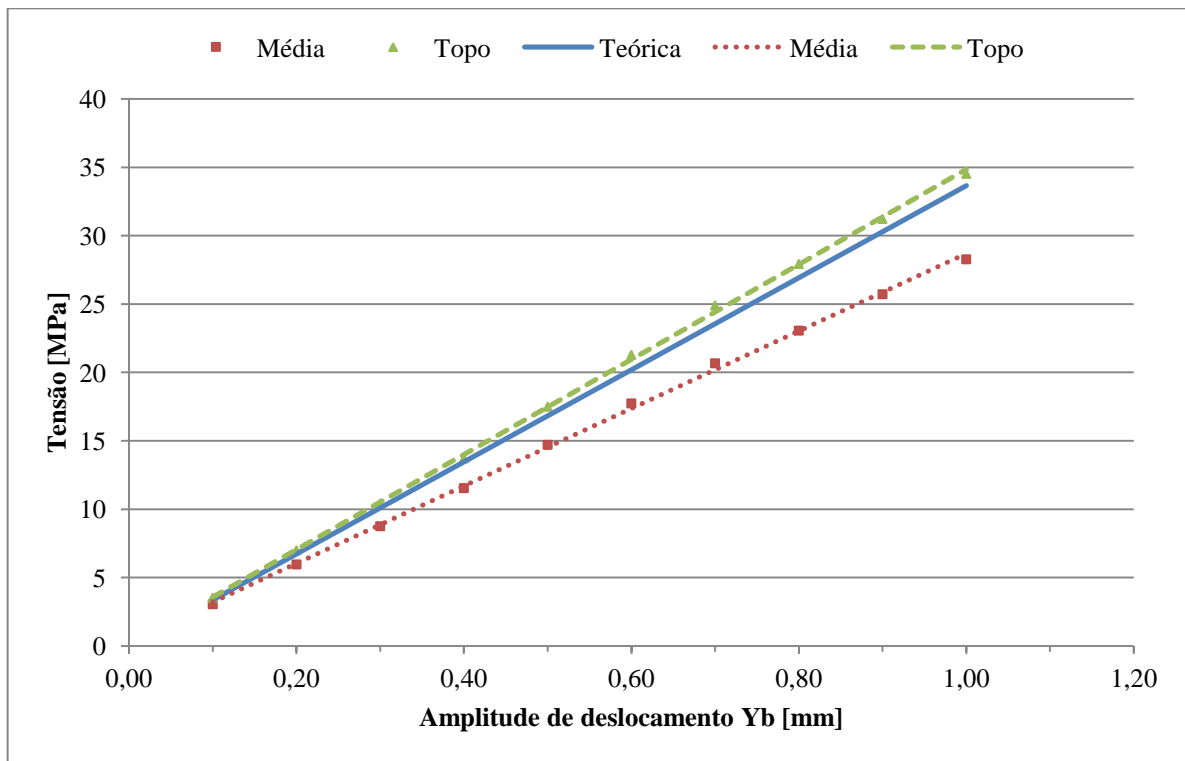


Figura B.2 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo TERN em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2144 m$).

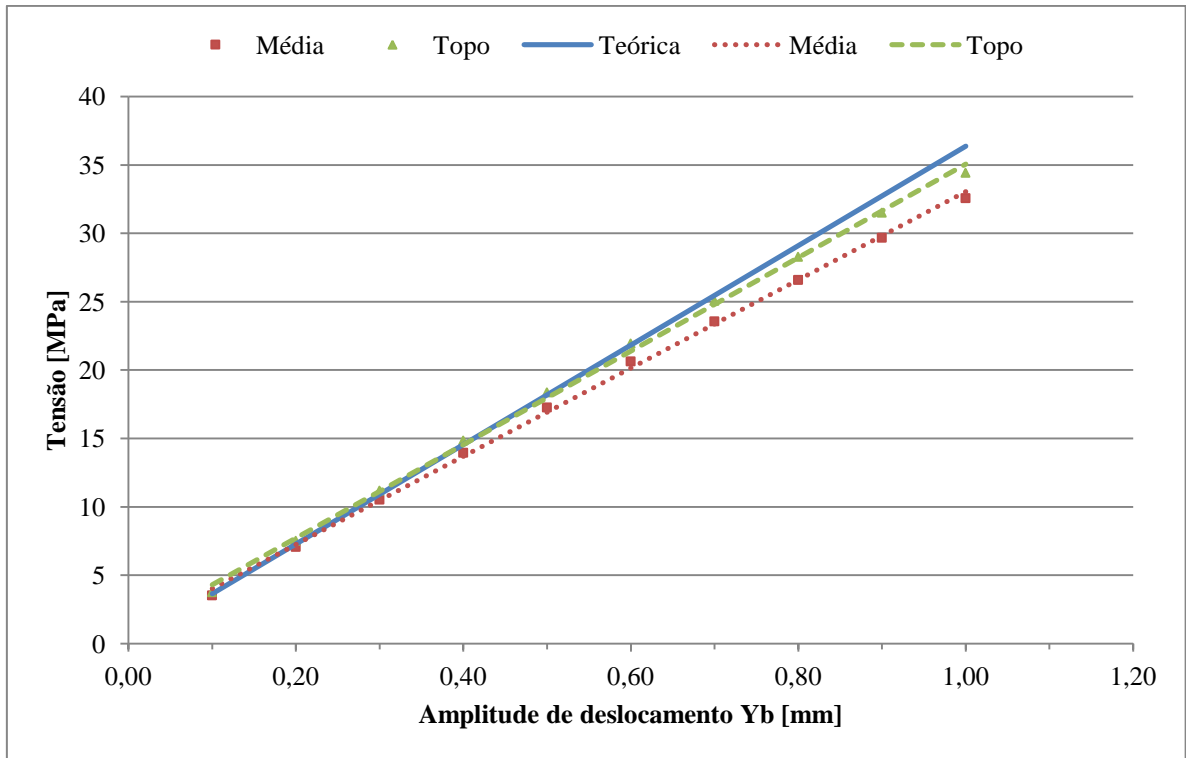


Figura B.3 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo TERN em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2725\text{ m}$).

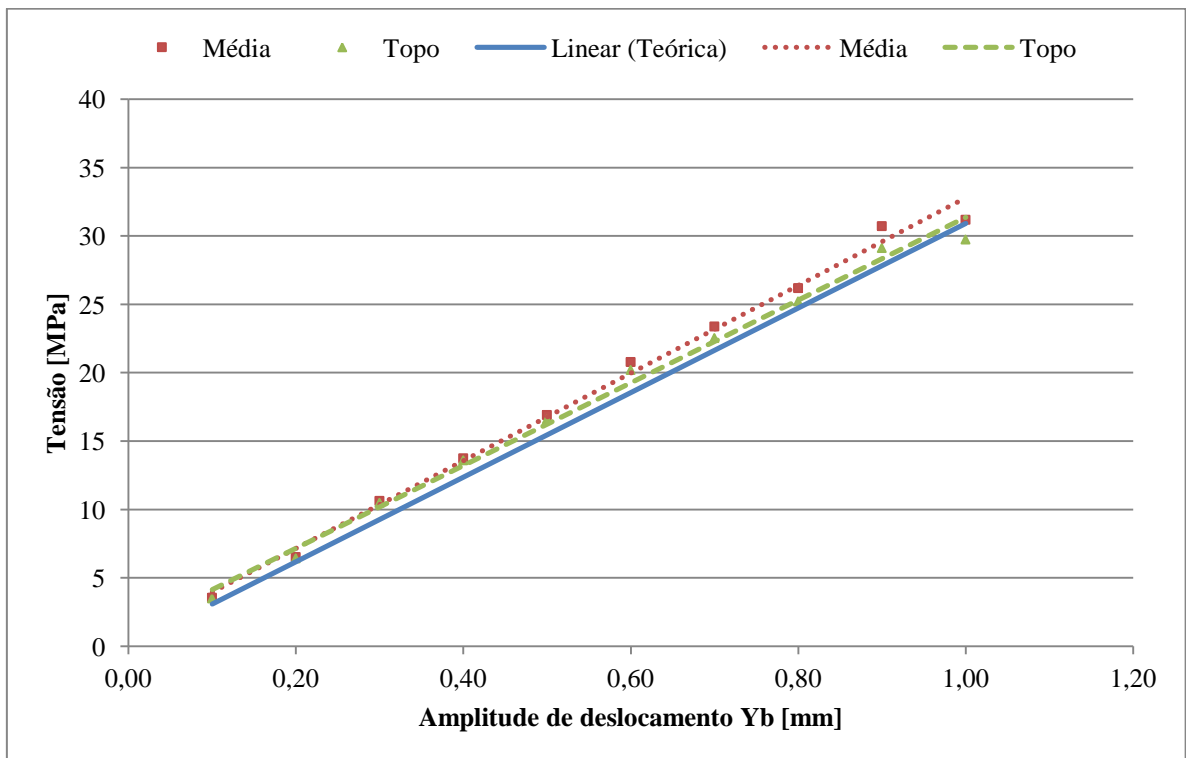


Figura B.4 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo ORCHID em função da amplitude de deslocamento ($H/w=1820\text{ m}$).

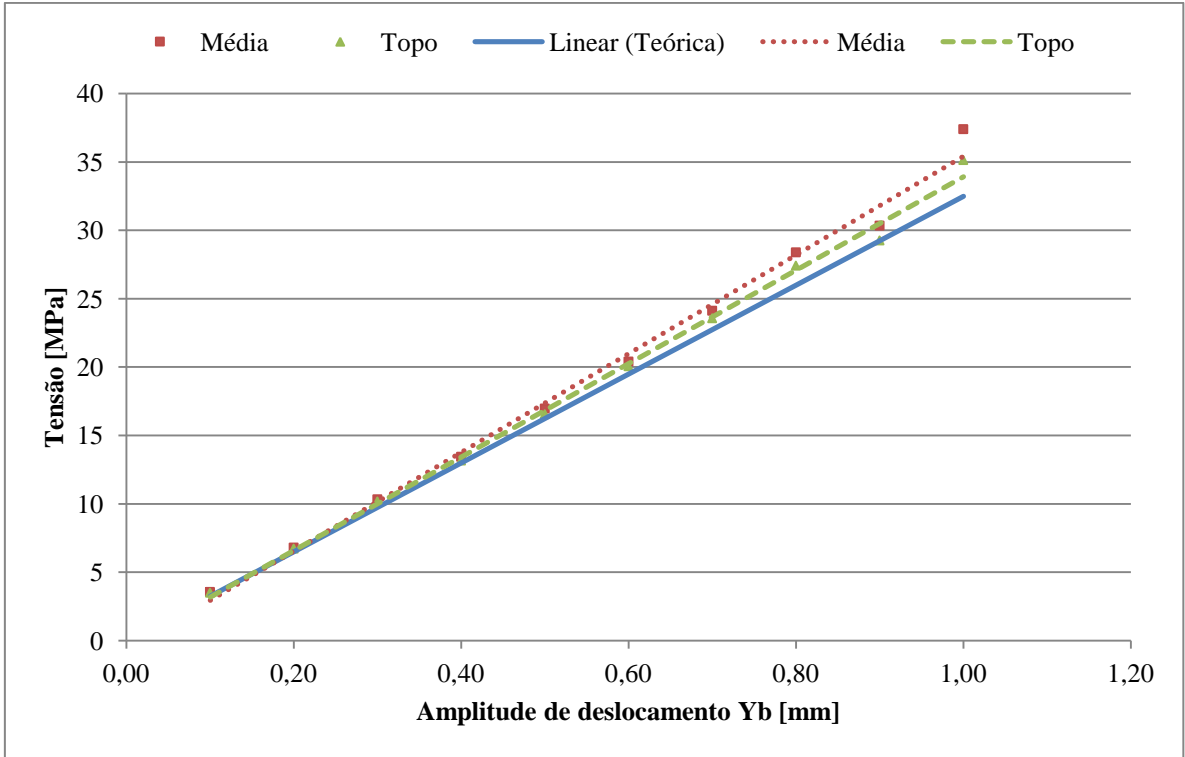


Figura B.5 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo ORCHID em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2144 m$).

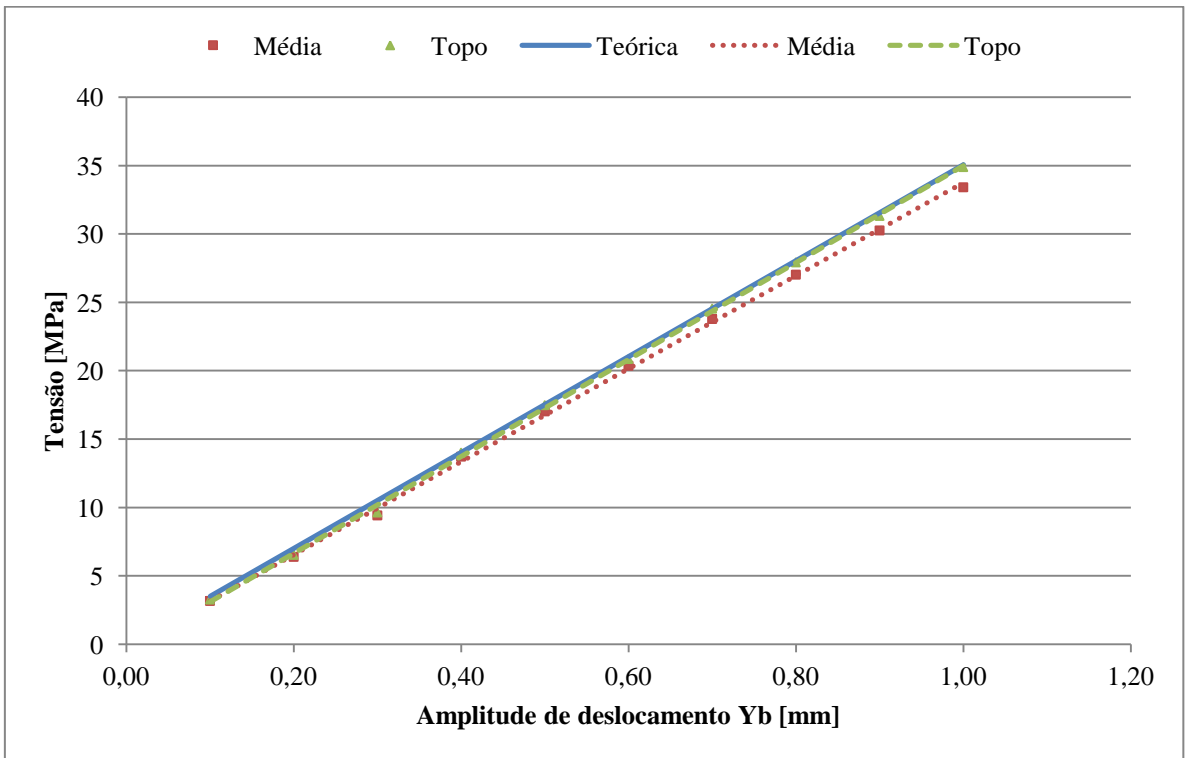


Figura B.6 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo ORCHID em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2725 m$).

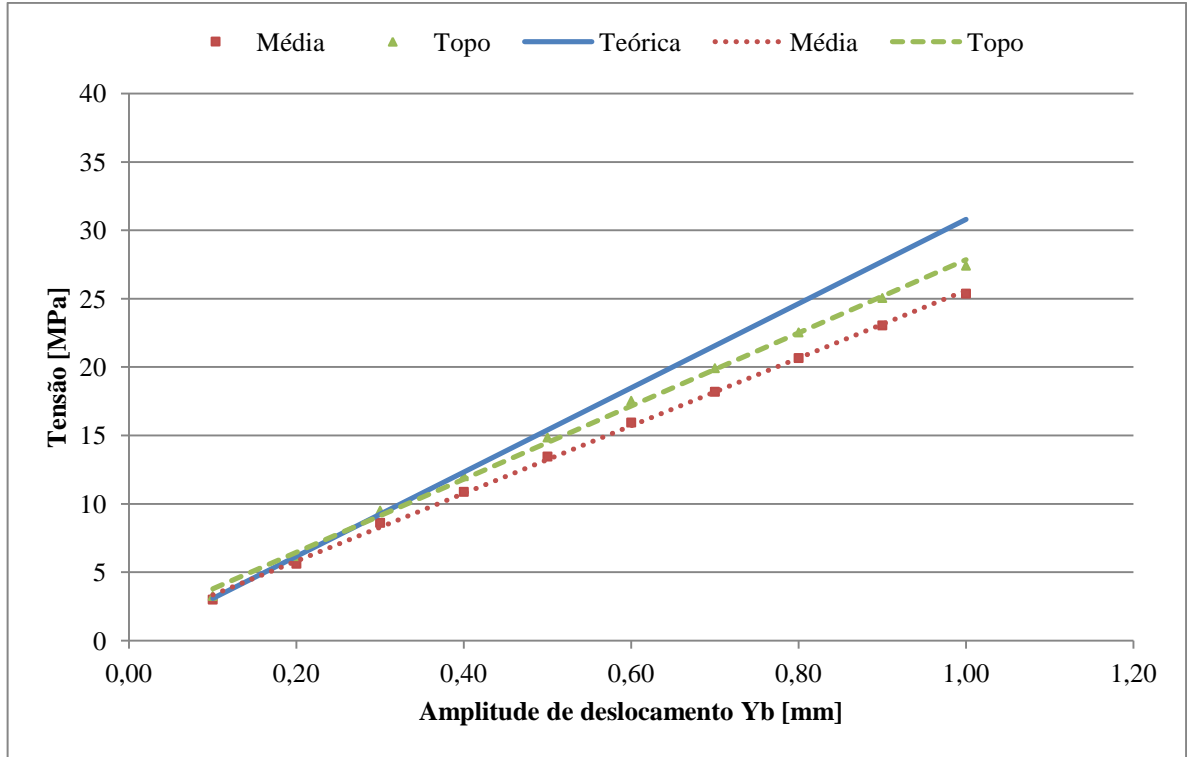


Figura B.7 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 1055 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=1820 m$).

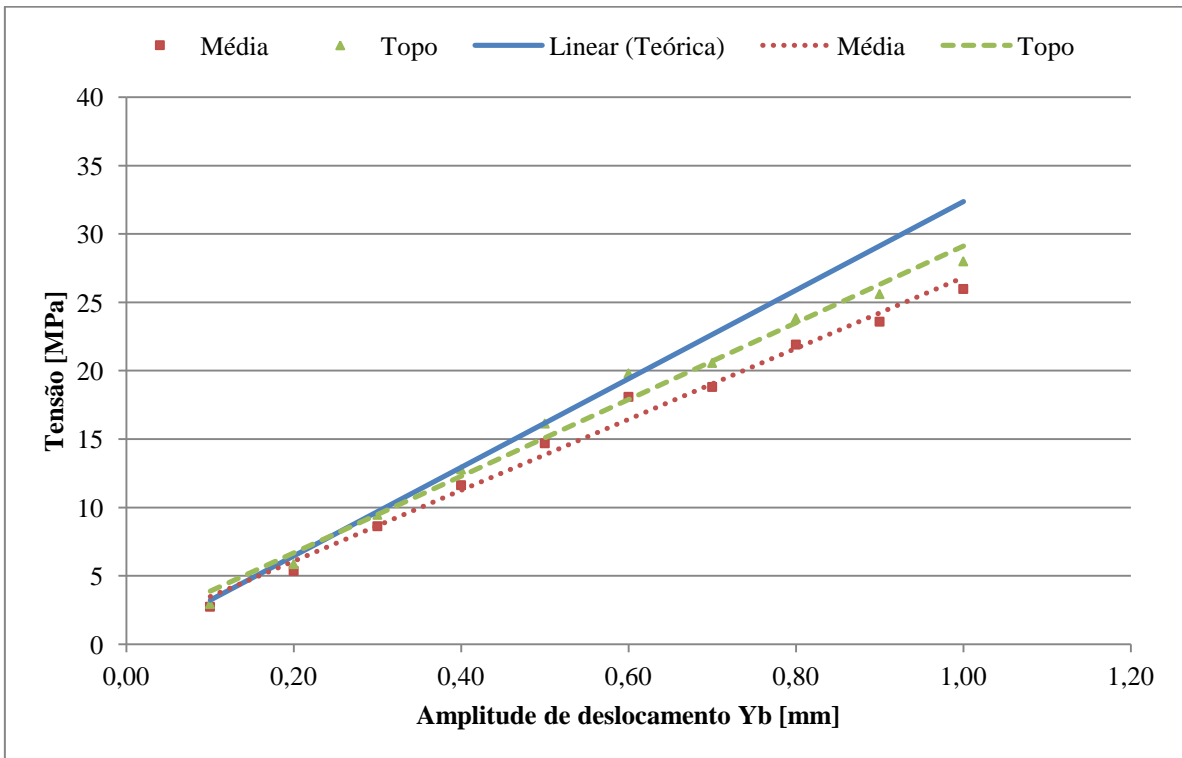


Figura B.8 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 1055 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2144 m$).

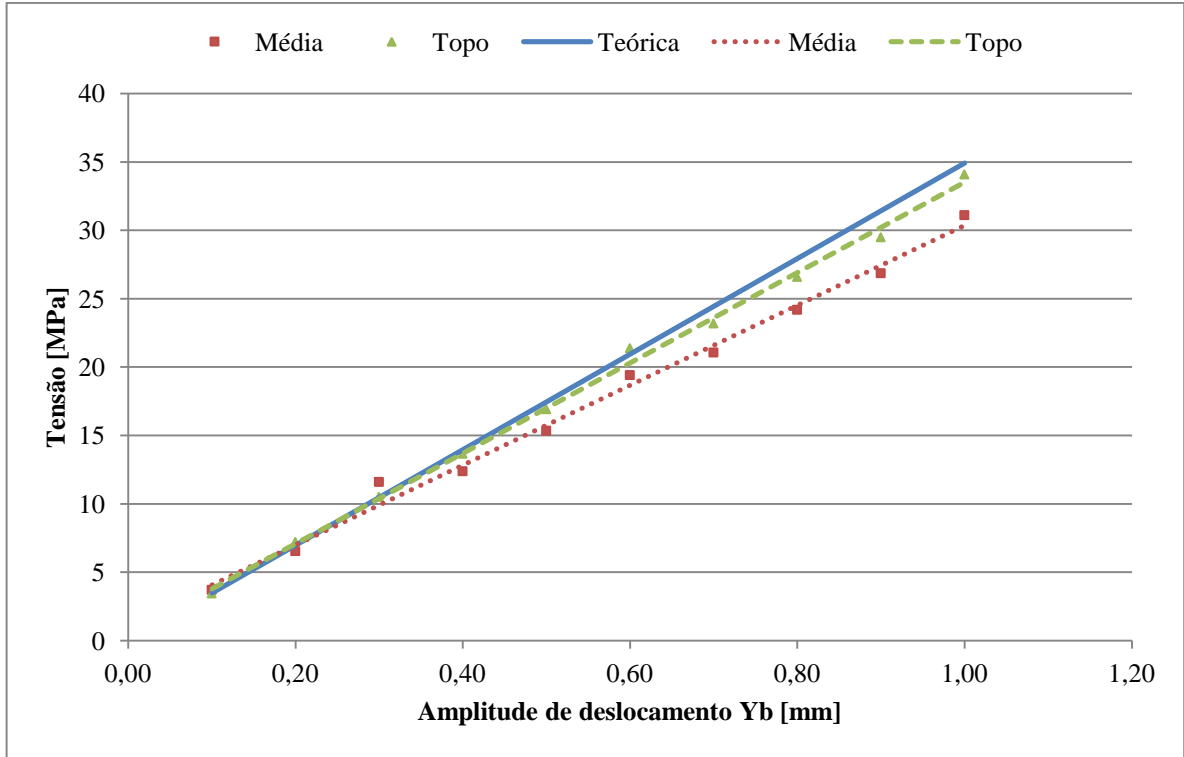


Figura B.9 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 1055 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2725 m$).

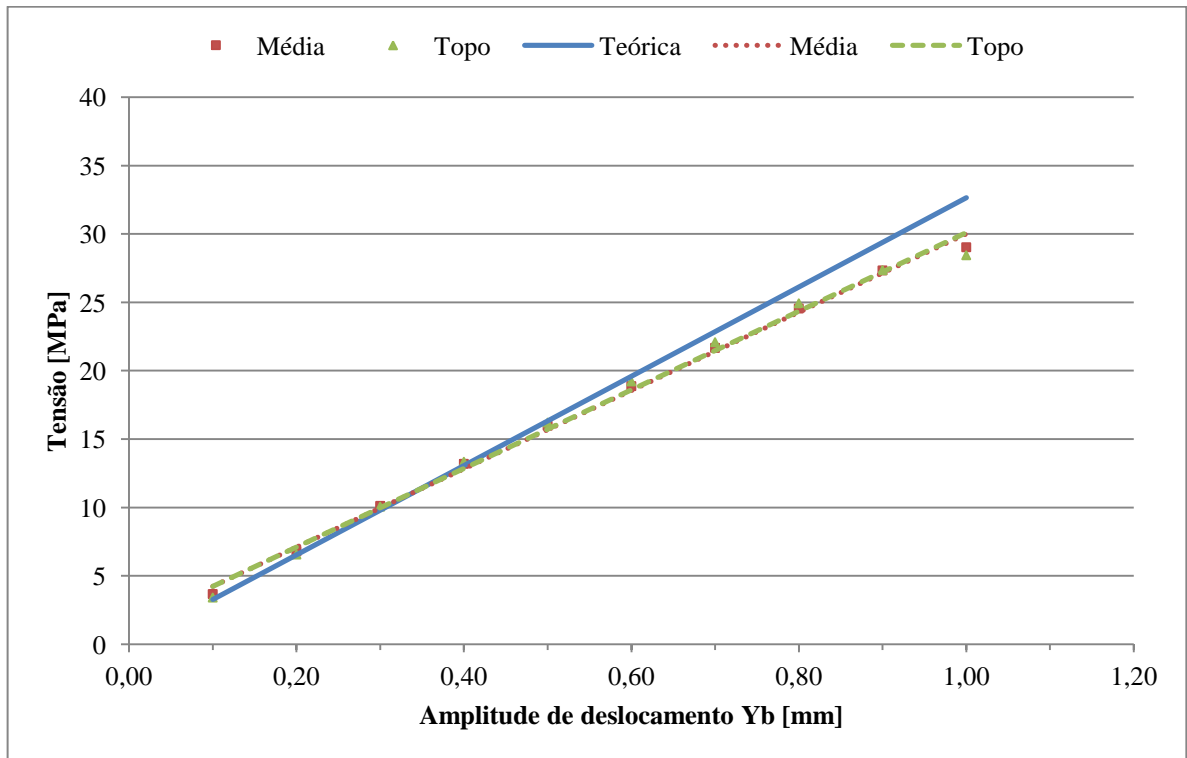


Figura B.10 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 823 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=1820 m$).

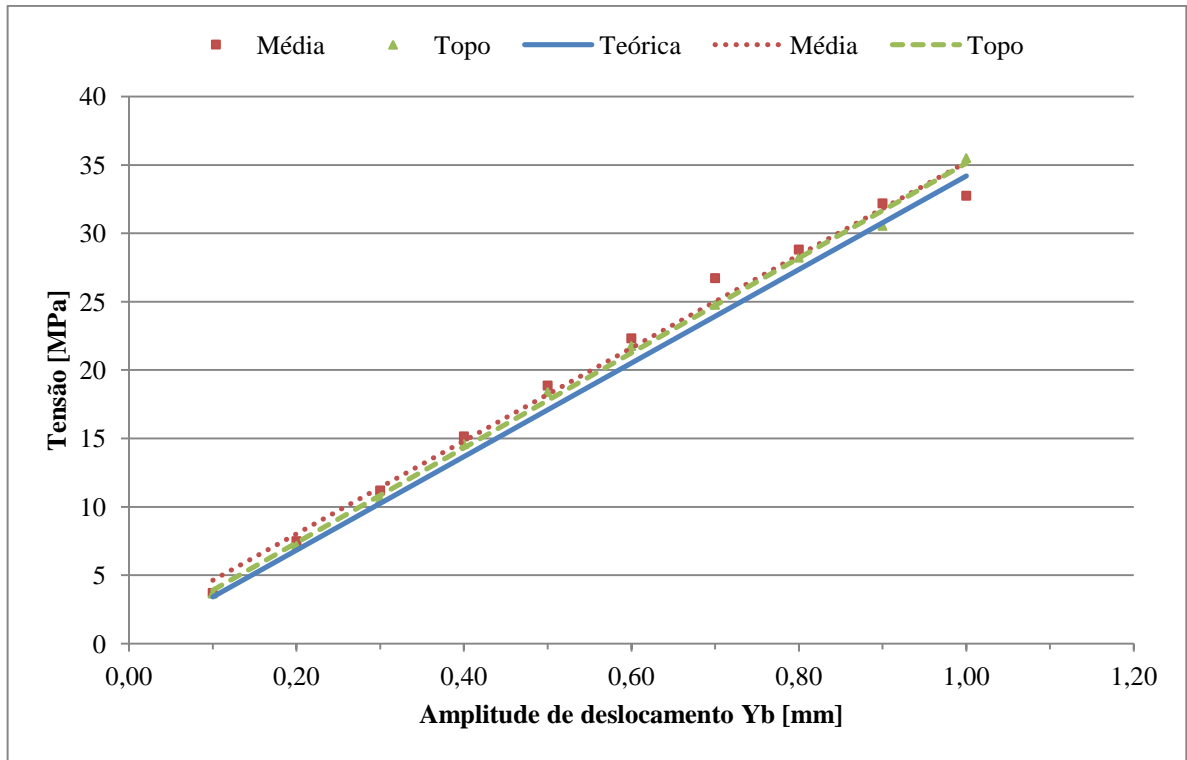


Figura B.11 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 823 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2144 m$).

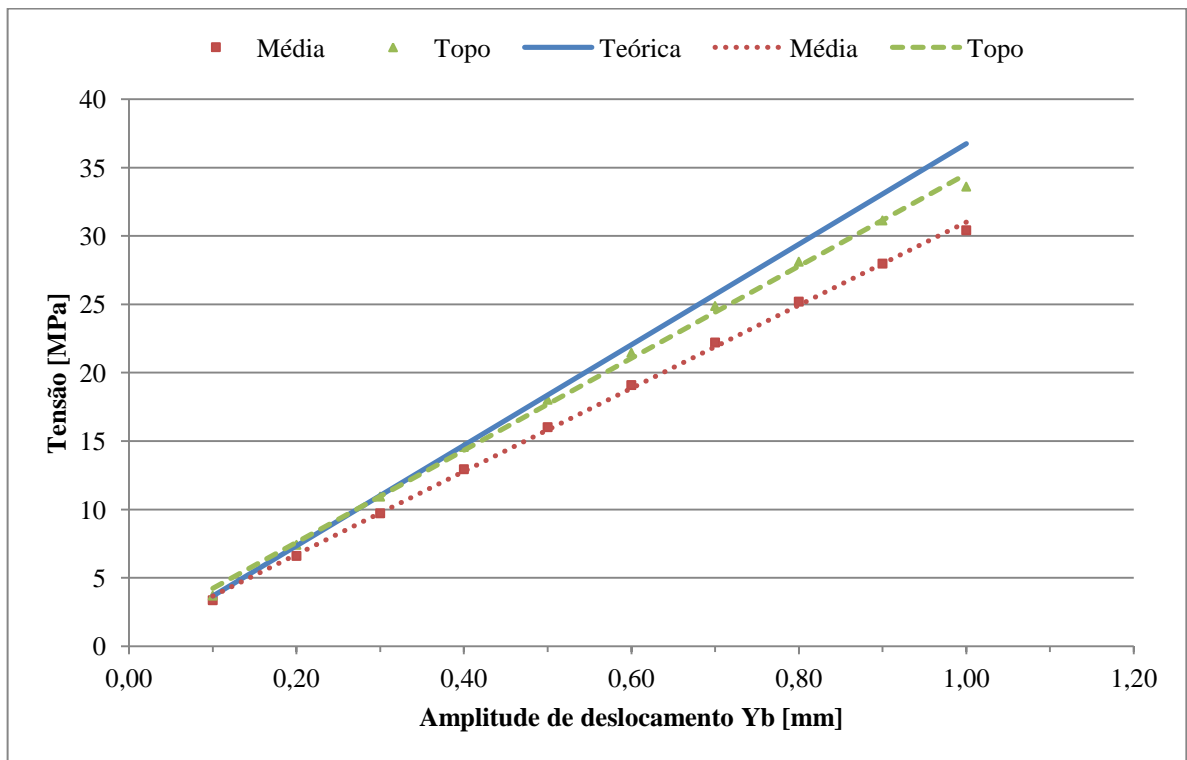


Figura B.12 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 823 em função da amplitude de deslocamento ($H/w=2725 m$).

APÊNDICE C

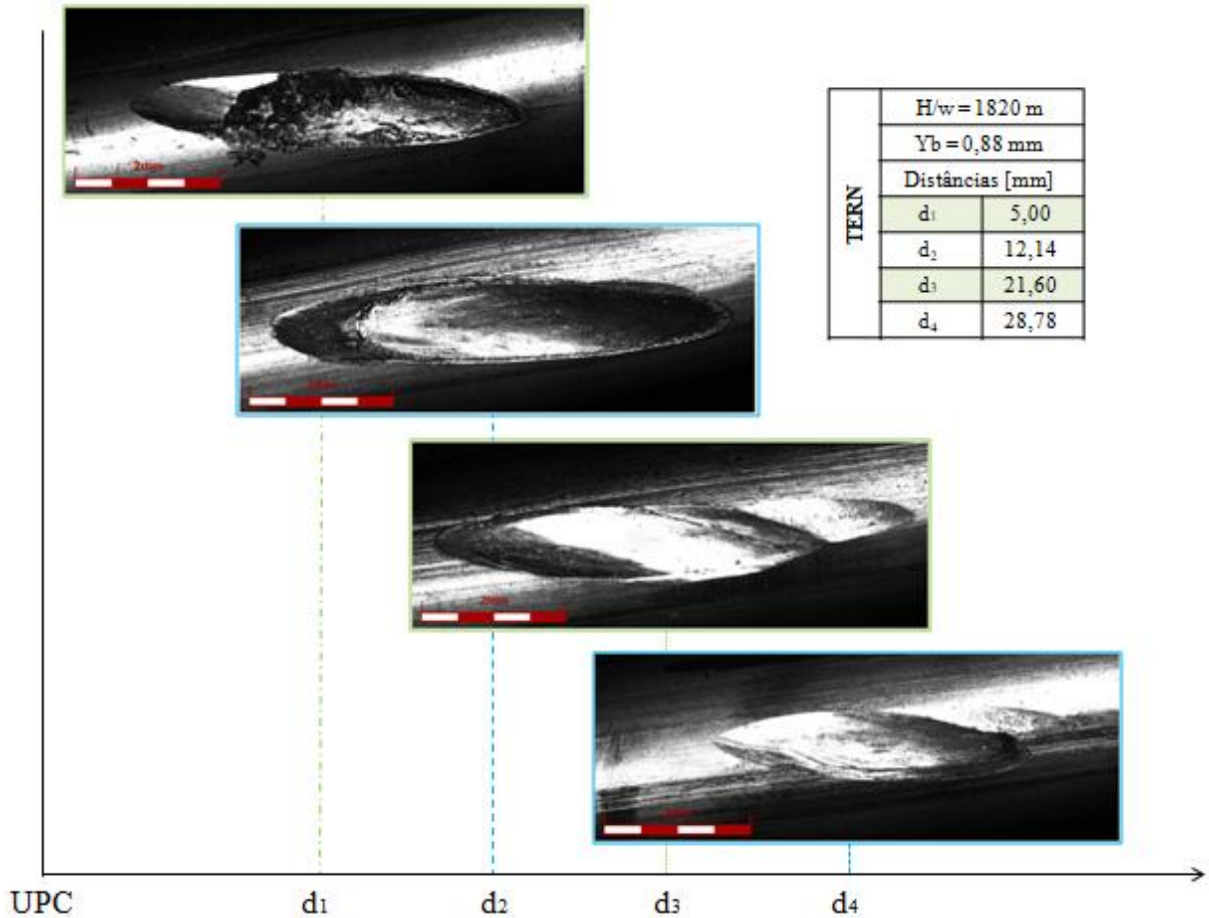


Figura C.1 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grupo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=1820\text{ m}$ $Y_b=0,88\text{ mm}$).

Tabela C.1 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grupo de suspensão ($H/w=1820\text{ m}$ $Y_b=0,88\text{ mm}$).

Marca de contato		1	2	3	4
Distância do UPC [mm]		5,00	12,14	21,60	28,78
Área [mm ²]	A_1	4,55	6,07	4,50	3,11
	A_2	1,84	3,99	-	-
	A_2/A_1	0,40	0,66	-	-
Distância [mm]	H_1	5,48	6,39	5,42	4,26
	V_1	1,12	1,25	1,14	0,97
	H_2	2,90	5,11	-	-
	V_2	0,76	1,04	-	-
Ângulo [°]		10,07	10,86	10,58	10,42

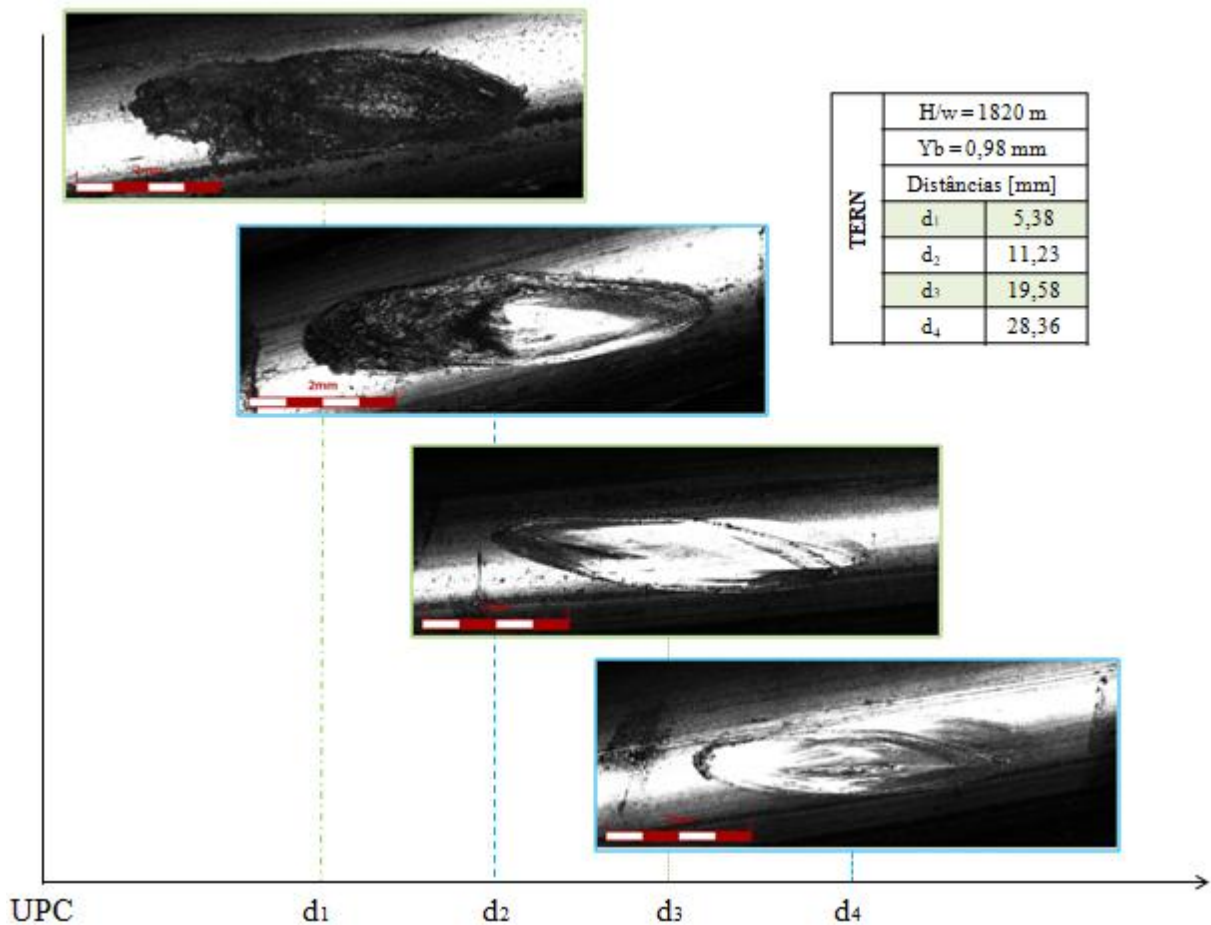


Figura C.2 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grupo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=1820\text{ m}$ $Y_b=0,98\text{ mm}$).

Tabela C.2 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grupo de suspensão ($H/w=1820\text{ m}$ $Y_b=0,98\text{ mm}$).

Marca de contato		1	2	3	4
Distância do UPC [mm]		5,38	11,23	19,58	28,36
Área [mm ²]	A_1	6,20	5,80	3,70	3,11
	A_2	0,93	2,58	2,90	2,52
	A_2/A_1	0,15	0,45	0,78	0,81
Distância [mm]	H_1	5,47	5,63	4,82	4,30
	V_1	1,51	1,29	1,09	0,97
	H_2	2,05	3,33	4,48	3,91
	V_2	0,61	1,00	0,88	0,89
Ângulo [°]		10,80	10,39	11,99	11,36

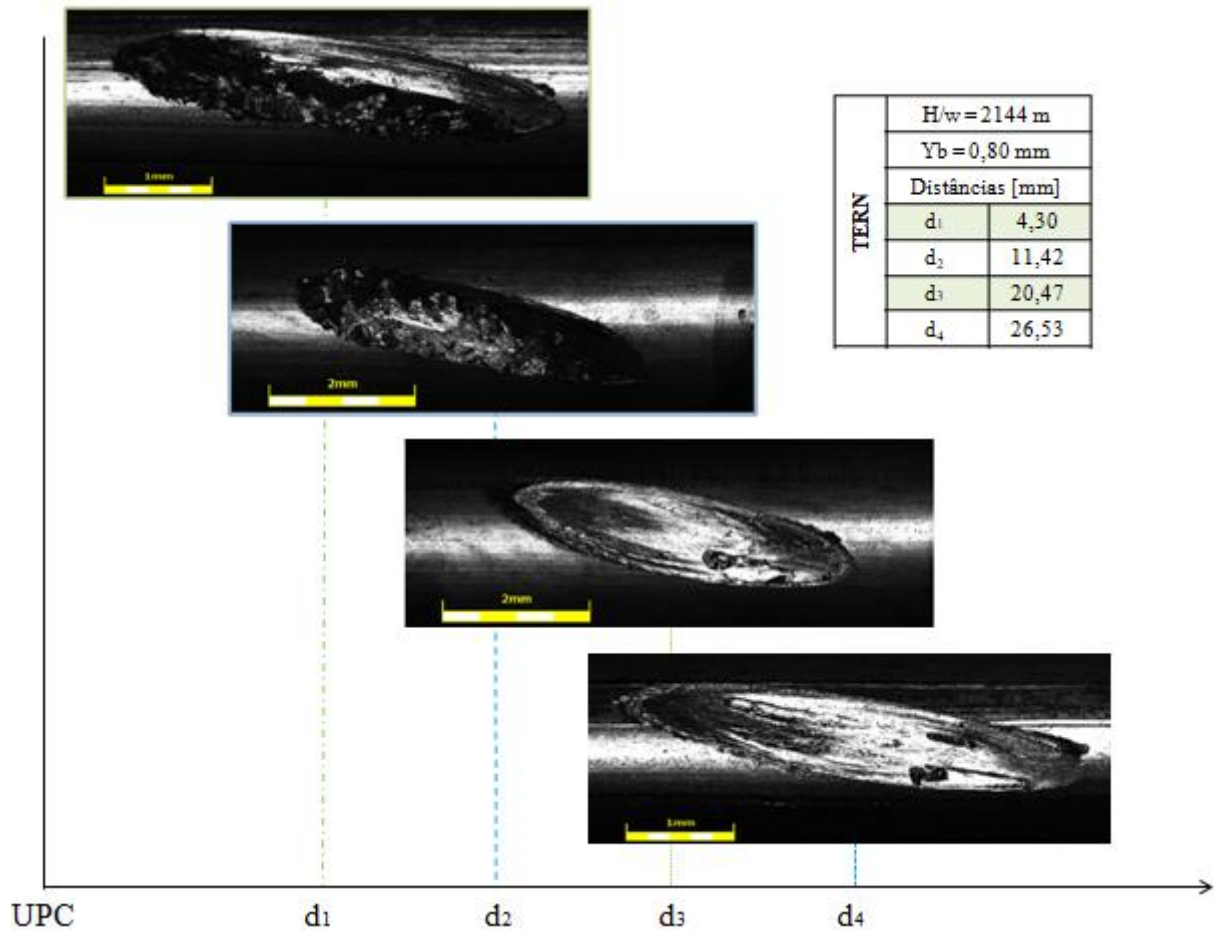


Figura C.3 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grupo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=2144\text{ m}$ $Y_b=0,80\text{ mm}$).

Tabela C.3 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grupo de suspensão ($H/w=2144\text{ m}$ $Y_b=0,80\text{ mm}$).

Marca de contato		1	2	3	4
Distância do UPC [mm]		4,30	11,42	20,47	26,53
Área [mm ²]	A_1	3,58	4,42	4,61	3,29
	A_2	1,00	2,05	4,20	2,93
	A_2/A_1	0,28	0,46	0,91	0,89
Distância [mm]	H_1	4,27	4,89	5,10	4,39
	V_1	1,08	1,09	1,18	0,94
	H_2	2,73	3,02	4,60	4,14
	V_2	0,40	0,86	1,10	0,85
Ângulo [°]		11,22	12,97	12,39	12,34

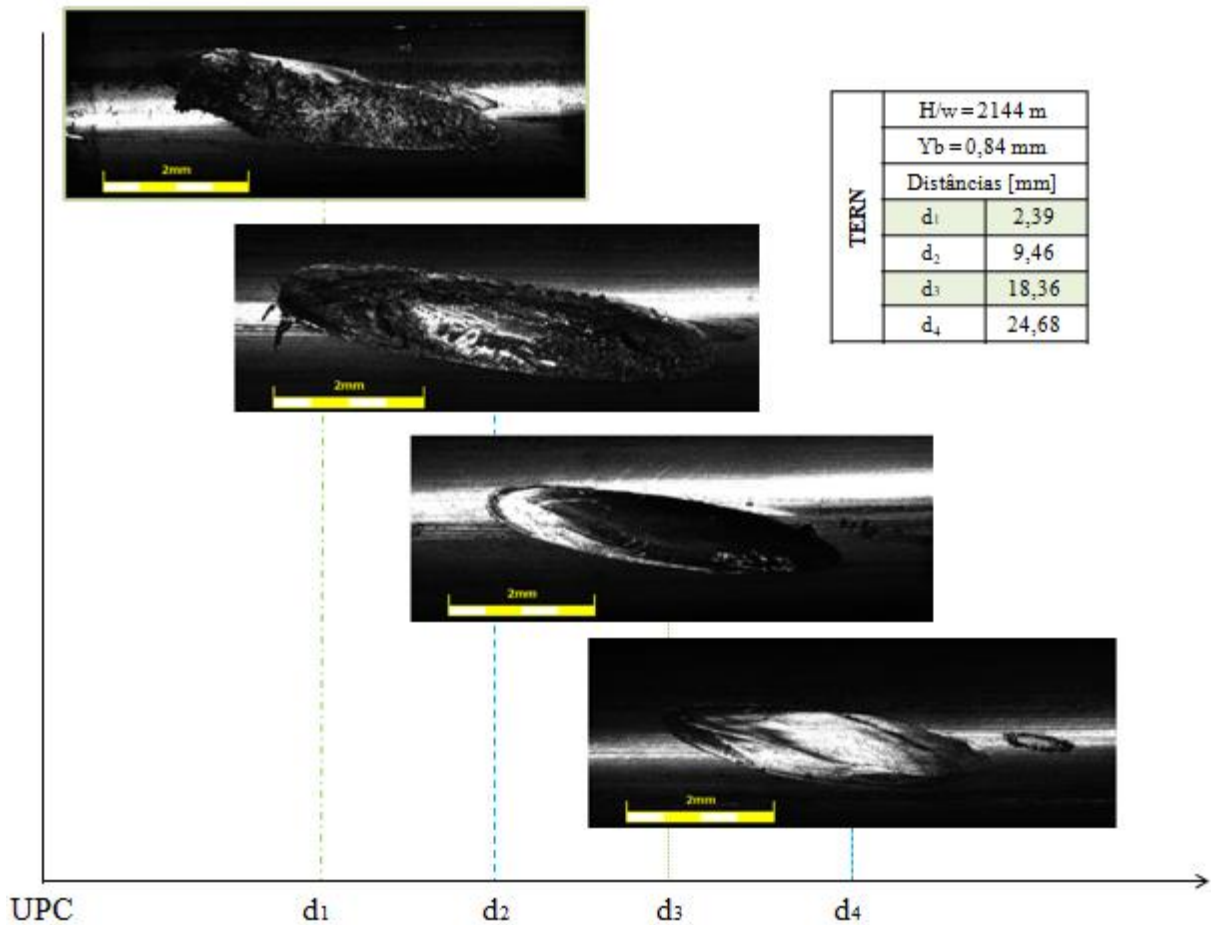


Figura C.4 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=2144\text{ m}$ $Y_b=0,84\text{ mm}$).

Tabela C.4 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão ($H/w=2144\text{ m}$ $Y_b=0,84\text{ mm}$).

Marca de contato		1	2	3	4
Distância do UPC [mm]		2,39	9,46	18,36	24,68
Área [mm ²]	A_1	4,03	6,10	3,85	3,36
	A_2	1,88	2,13	3,58	-
	A_2/A_1	0,47	0,35	0,93	-
Distância [mm]	H_1	4,79	5,87	4,94	4,38
	V_1	1,04	1,23	0,98	0,99
	H_2	2,64	2,81	4,72	-
	V_2	0,78	0,91	0,92	-
Ângulo [°]		12,29	10,04	10,61	10,60

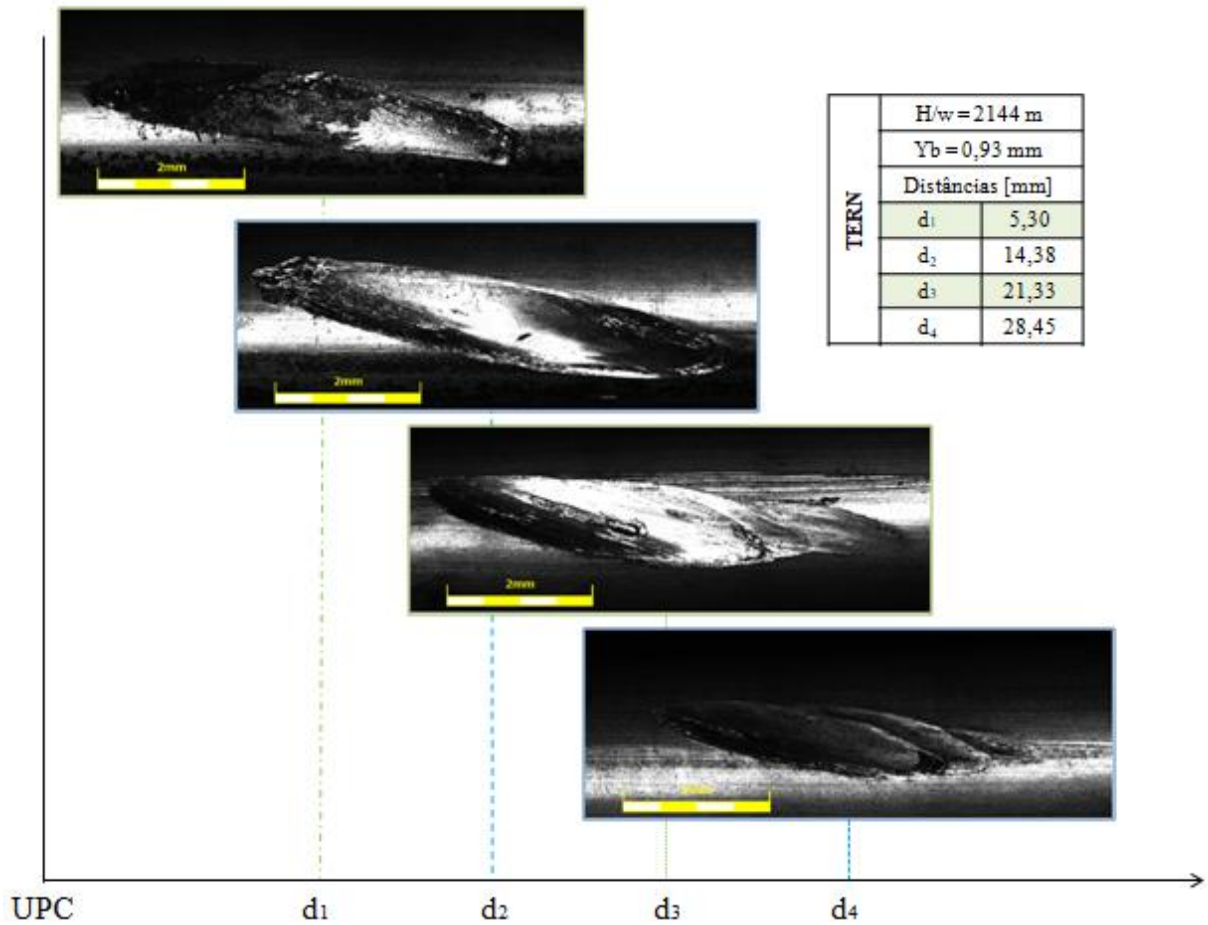


Figura C.5 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grupo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=2144\text{ m}$ $Y_b=0,93\text{ mm}$).

Tabela C.5 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grupo de suspensão ($H/w=2144\text{ m}$ $Y_b=0,93\text{ mm}$).

Marca de contato		1	2	3	4
Distância do UPC [mm]		5,30	14,38	21,33	28,45
Área [mm ²]	A_1	4,99	6,12	3,80	2,49
	A_2	1,56	4,49	3,19	2,08
	A_2/A_1	0,31	0,73	0,84	0,84
Distância [mm]	H_1	6,09	6,71	4,63	4,02
	V_1	1,08	1,17	1,13	0,82
	H_2	2,56	5,59	4,14	3,62
	V_2	0,68	0,98	1,01	0,71
Ângulo [°]		9,92	10,49	13,49	12,23

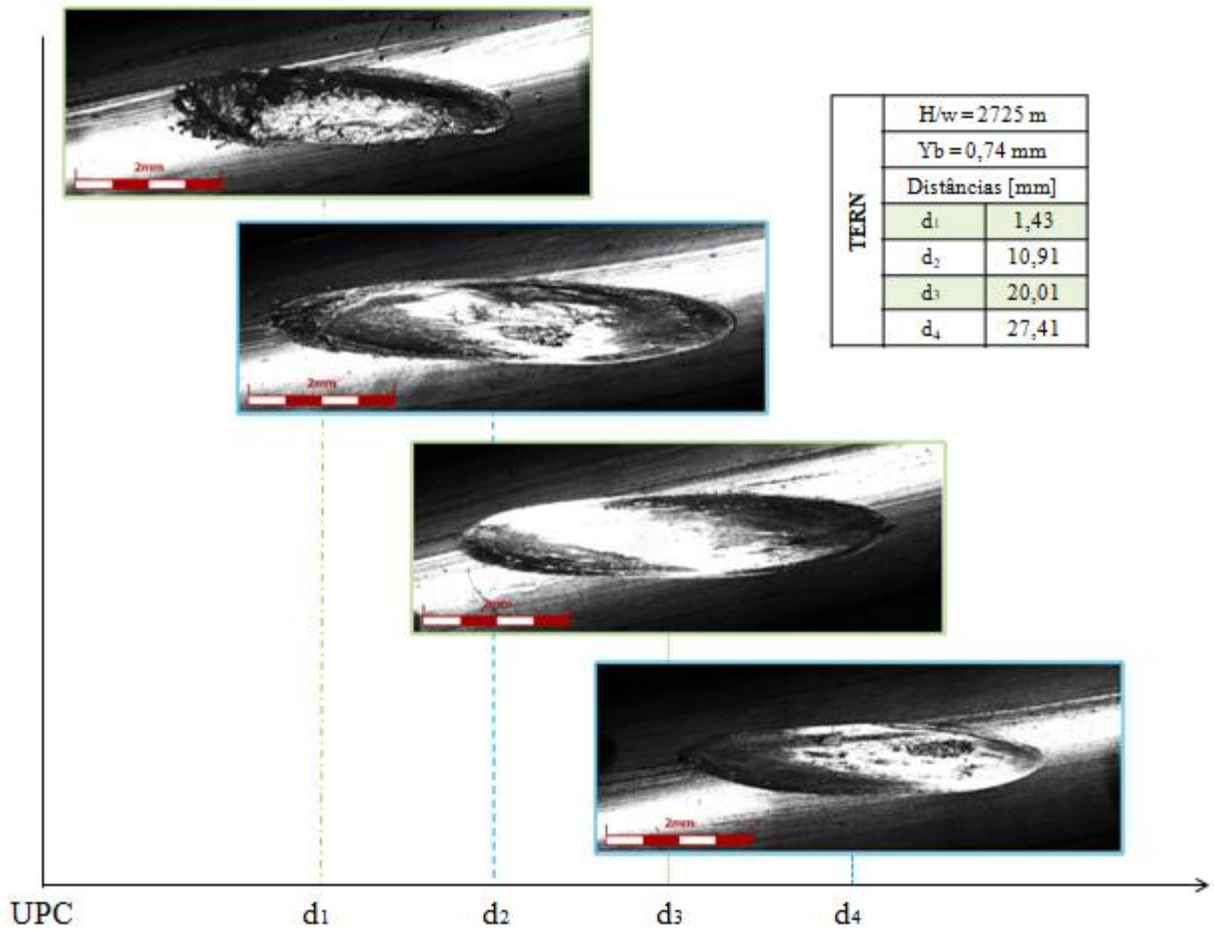


Figura C.6 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=2725\text{ m}$ $Y_b=0,74\text{ mm}$).

Tabela C.6 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão ($H/w=2725\text{ m}$ $Y_b=0,74\text{ mm}$).

Marca de contato		1	2	3	4
Distância do UPC [mm]		1,43	10,91	20,01	27,41
Área [mm ²]	A_1	4,06	5,94	5,36	3,86
	A_2	1,64	3,82	-	-
	A_2/A_1	0,40	0,64	-	-
Distância [mm]	H_1	4,65	6,44	5,86	4,98
	V_1	1,07	1,15	1,13	1,01
	H_2	2,85	4,87	-	-
	V_2	0,72	0,98	-	-
Ângulo [°]		12,86	11,07	11,19	10,13

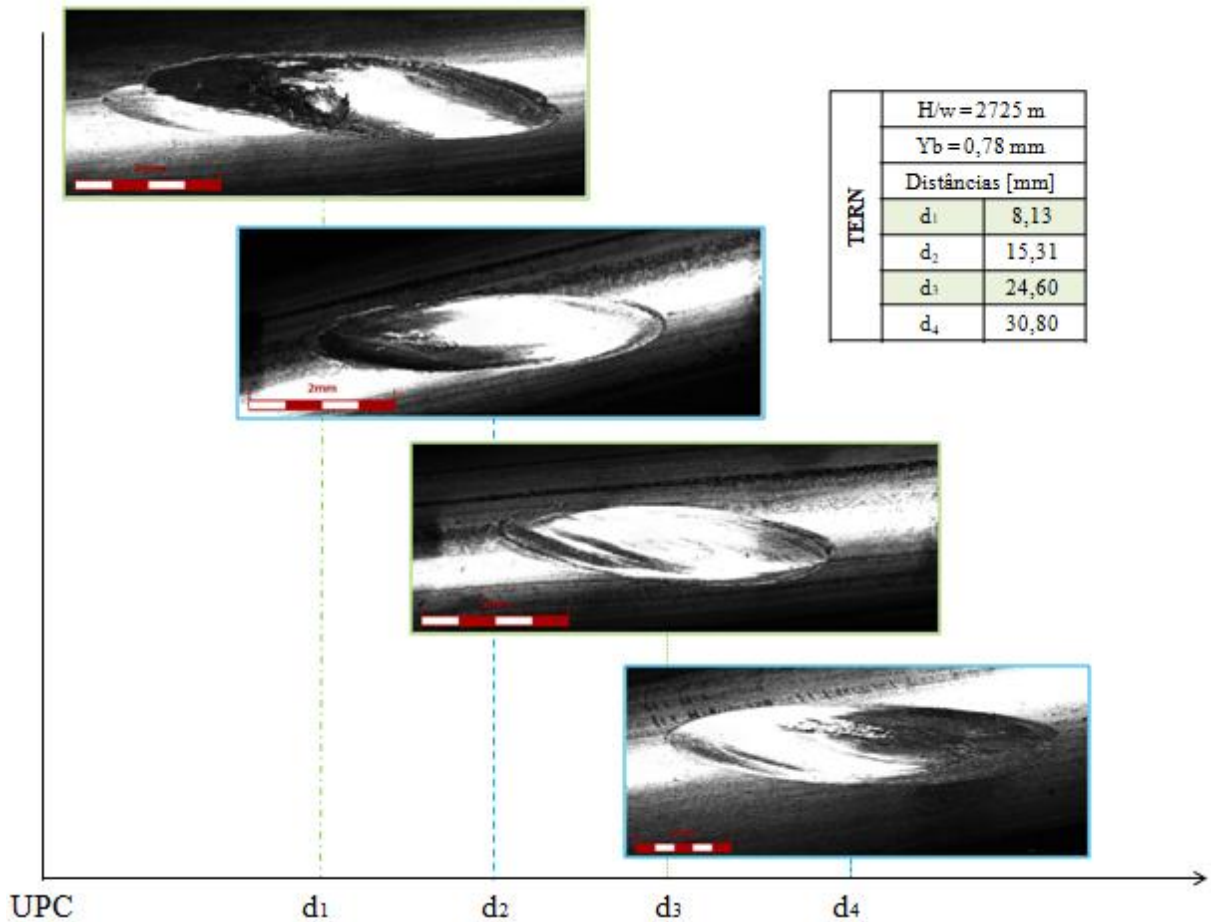


Figura C.7 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grupo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=2725\text{ m}$ $Y_b=0,78\text{ mm}$).

Tabela C.7 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grupo de suspensão ($H/w=2725\text{ m}$ $Y_b=0,78\text{ mm}$).

Marca de contato		1	2	3	4
Distância do UPC [mm]		8,13	15,31	24,60	30,80
Área [mm ²]	A_1	4,84	4,17	3,81	2,82
	A_2	2,95	3,42	3,25	-
	A_2/A_1	0,61	0,82	0,85	-
Distância [mm]	H_1	5,77	5,05	4,64	4,08
	V_1	1,13	1,04	1,07	0,88
	H_2	3,90	4,51	4,32	-
	V_2	0,98	0,94	0,97	-
Ângulo [°]		10,04	9,90	10,98	9,74

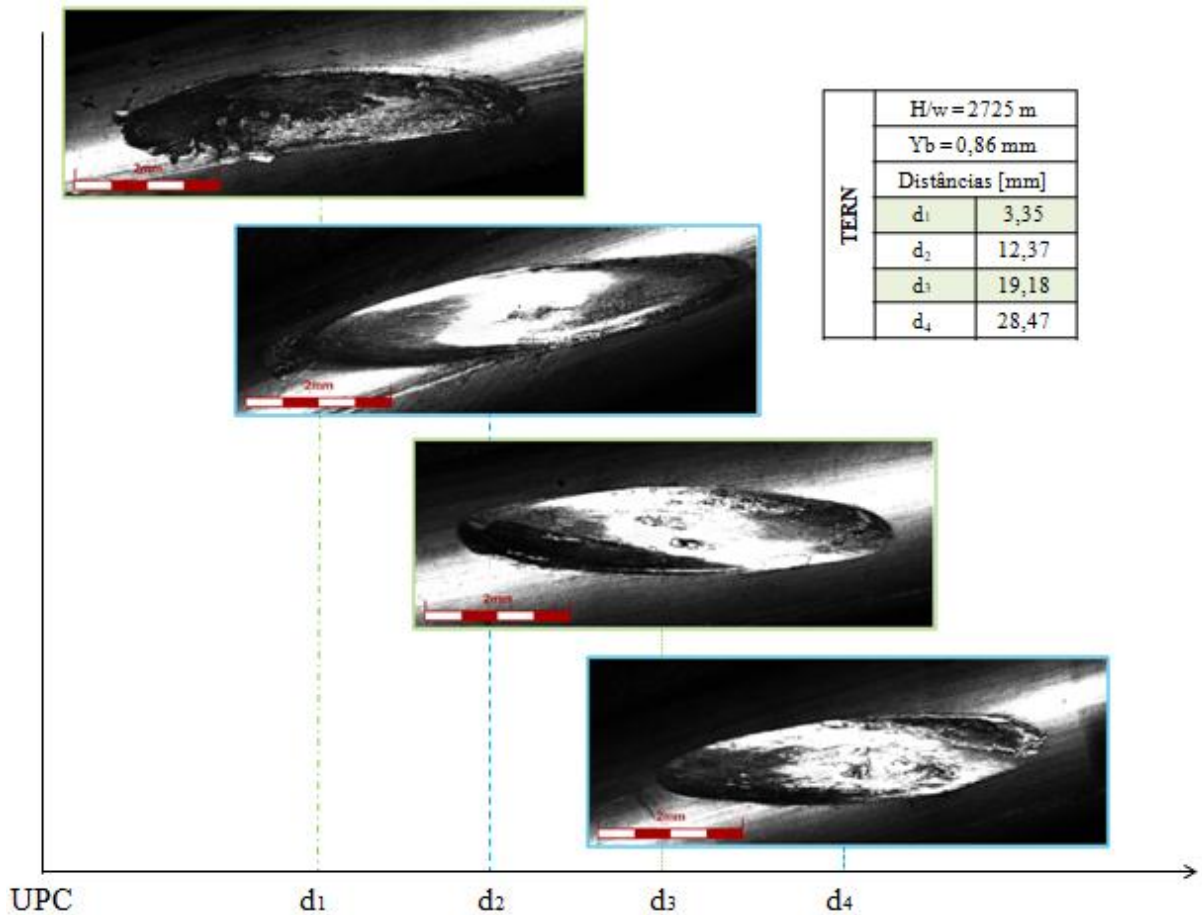


Figura C.8 - Marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão em função da distância a partir do UPC ($H/w=2725\text{ m}$ $Y_b=0,86\text{ mm}$).

Tabela C.8 - Análise topográfica das marcas de contato entre os fios do cabo CAA TERN no interior do grampo de suspensão ($H/w=2725\text{ m}$ $Y_b=0,86\text{ mm}$).

Marca de contato		1	2	3	4
Distância do UPC [mm]		3,35	12,37	19,18	28,47
Área [mm ²]	A_1	5,171	6,334	5,724	5,015
	A_2	1,840	4,953	4,454	-
	A_2/A_1	0,356	0,782	0,778	-
Distância [mm]	H_1	5,673	6,878	6,019	5,383
	V_1	1,214	1,220	1,245	1,193
	H_2	3,266	5,986	5,142	-
	V_2	0,631	1,160	1,132	-
Ângulo [°]		8,622	9,495	10,166	8,959