



**COMPORTAMENTO DA FADIGA DE UM  
CONDUTOR DE LINHA AÉREA**

**JOHN GIBBONS PRAHL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E  
CONSTRUÇÃO CIVIL**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**COMPORTAMENTO DA FADIGA DE UM CONDUTOR DE LINHA AÉREA**

**JOHN GIBBONS PRAHL**

**ORIENTADOR: PROF. DOUTOR JOSÉ LUIS VITAL DE BRITO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.DM-9A/18**  
**BRASÍLIA/DF: Abril-2018**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**COMPORTAMENTO DA FADIGA DE UM CONDUTOR DE LINHA AÉREA**

**JOHN GIBBONS PRAHL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

-----  
Prof. José Luis Vital de Brito, Dr. (UnB)  
(Orientador)

-----  
Anne Neiry de Mendonça Lopes, Dra. (Furnas)  
(Examinadora Externo)

-----  
Lineu José Pedroso, Dr. (UnB)  
(Examinador Interno)

BRASÍLIA/DF: 27 de abril de 2018.

## FICHA CATALOGRÁFICA

GIBBONS PRAHL, JOHN

Comportamento da Fadiga de um Condutor de Linha Aérea / John Gibbons Prah; orientador José Luis Vital de Brito. -- Brasília, 2018. 127 p.

Dissertação - Mestrado em Estruturas e Construção Civil -- Universidade de Brasília, 2018.

1. Vibrações eólicas. 2. Espaçador amortecedor quádruplo. 3. Amplitude de flexão. 4. Testes de vibração. 5. Instrumentos de medição de deformação. I. Vital de Brito, José Luis, orientador. II. Título.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PRAHL, J. G. (2018). Comportamento da Fadiga de um Condutor de Linha Aérea. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação PECFT E.DM-09A/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 127 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: John Gibbons Prah.

TÍTULO: Comportamento da Fadiga de um Condutor de Linha Aérea.

GRAU: Mestre ANO: 2018

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

---

John Gibbons Prah  
SHIS QI 25 conjunto 03 casa 09  
71660-230 - Brasília – DF – Brasil  
Correio Eletrônico: John.prah@eletronorte.gov.br

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor José Luis Vital de Brito, pela orientação e pela amizade de mais de duas décadas.

Ao Professor Lineu José Pedroso o meu sincero reconhecimento em aceitar julgar o meu trabalho e pela amizade de mais de duas décadas.

A Doutora Engenheira Anne Neiry de Mendonça Lopes, colega do setor elétrico e que me honra com a sua aceitação em julgar o meu trabalho.

À minha família, em especial as minhas filhas, Ingrid e Erika e a minha atual companheira Eulene, pelo incentivo para que eu conseguisse o meu objetivo.

Aos amigos, com os quais sempre posso contar, e que por limitações de espaço vou apenas citar Carlos Magno Camargo, Amaury Saliba e Isa Helena C. Carramaschi, todos da Eletronorte S.A. e Ivo Pinto Cavalcante da PLP Brasil.

## DEDICATÓRIA

Às minhas filhas, Ingrid e Erika.

“Suba o primeiro degrau com fé.  
Não é necessário que você veja toda a escada.  
Apenas dê o primeiro passo.”

Martin Luther King

# COMPORTAMENTO DA FADIGA DE UM CONDUTOR DE LINHA AÉREA

AUTOR: JOHN GIBBONS PRAHL

ORIENTADOR: PROF. DOUTOR JOSÉ LUIS VITAL DE BRITO

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília.

BRASÍLIA / DF: 27 de abril de 2018.

## RESUMO

As linhas de transmissão de eletricidade estão sujeitas a vibrações eólicas, que podem levar à fadiga dos condutores nas regiões próximas aos grampos de suspensão ou de ancoragem ou mesmo nas regiões próximas aos amortecedores de vibrações. Com o propósito de obter uma melhor compreensão dos mecanismos das falhas desses condutores pela fadiga, a empresa *Ontario Hydro* desenvolveu um método para a determinação dos limites das vibrações, realizado no campo para vários tipos de condutores e utilizado com sucesso por mais de sessenta anos. O presente trabalho consiste em apresentar a pesquisa realizada pela empresa Manaus Transmissora de Energia, que utilizou o método desenvolvido pela empresa *Ontario Hydro* para a determinação da vida útil do cabo condutor CAL em liga de alumínio de 1055 kcmil montado em um espaçador amortecedor para quatro feixes utilizado na linha de transmissão em 500 kV entre as cidades de Oriximiná (PA) e Lechuga (AM). Os procedimentos para o teste foram desenvolvidos pela empresa *Ontario Hydro* e normatizados por EPRI (2009), IEEE (1966) e CIGRÉ (1995).

### Palavras-chave:

Vibrações eólicas, espaçador amortecedor quádruplo, amplitude de flexão, deformação de flexão, testes de vibração, instrumentos de medição de deformação.

# FATIGUE BEHAVIOR OF AN OVERHEAD LINE CONDUCTOR

AUTHOR: JOHN GIBBONS PRAHL

ADVISOR: PROF. DOCTOR JOSÉ LUIS VITAL DE BRITO

Postgraduate Program in Structures and Civil Construction from the University of Brasília.

BRASÍLIA / DF - BRAZIL: April 27th – 2018.

## *Abstract*

Electrical transmission lines are always subject to aeolian vibrations that may lead to the failure of overhead conductors by fatigue in regions close to suspension or anchoring clamps or even in regions close to vibration dampers. In order to obtain a better understanding of the mechanism of fatigue failure of several conductors, the Company Ontario Hydro has developed a method for determining the vibration limits, performed in the field and used for more than sixty years. The present work consists in presenting the research carried out by the Company Manaus Transmissora de Energia, which used the method developed by Ontario Hydro for the determination of the useful life of the conductor CAL in aluminum alloy of 1055 kcmil. The conductor was mounted on a four-bundle spacer-damper used in the 500 kV transmission line between the cities of Oriximiná (PA) and Lechuga (AM). The test procedures were developed by Ontario Hydro and standardized by EPRI (2009), IEEE (1966) and CIGRÉ (1995).

## **Keywords:**

Aeolian vibration, four-bundle spacer-damper, bending amplitude, bending strain, vibrations testing, strain gauge measurements.



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....	1
1.2	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA MECÂNICO .....	4
1.3	OBJETIVO DO TRABALHO .....	4
1.4	JUSTIFICATIVA TÉCNICA .....	5
1.5	O ESTADO DA ARTE.....	5
1.6	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	7
<b>2.</b>	<b>VIBRAÇÕES EÓLICAS – REVISÃO TEÓRICA .....</b>	<b>9</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	9
2.2	MOVIMENTOS DOS CONDUTORES DEVIDO AS VIBRAÇÕES EÓLICAS.....	9
2.3	NÚMERO DE REYNOLDS.....	11
2.4	FREQUÊNCIA DE STROUHAL E FREQUÊNCIA NATURAL DO CONDUTOR	13
2.5	PRINCÍPIO DO EQUILÍBRIO DE ENERGIA.....	20
<b>2.5.1</b>	<b>Características do Princípio do Equilíbrio de Energia.....</b>	<b>21</b>
<b>3.</b>	<b>FADIGA EM CONDUTORES AÉREOS - REVISÃO TEÓRICA.....</b>	<b>31</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	31
3.2	MECANISMO DA FADIGA POR <i>FRETTING</i> .....	31
3.3	LIMITES DA FADIGA COMUMENTE UTILIZADOS .....	36
3.4	TESTES PARA A DETERMINAÇÃO DA FADIGA EM UM CONDUTOR AÉREO .....	40
<b>4.</b>	<b>TEORIA DE POFFENBERGER - SWART E EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO.....</b>	<b>44</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	44
4.2	TEORIA DE POFFENBERGER – SWART OU FÓRMULA P-S.....	46
4.3	MÓDULO DE ELASTICIDADE OU MÓDULO DE YOUNG.....	47
4.4	EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO .....	49
<b>5.</b>	<b>ENSAIOS REALIZADOS NO SISTEMA DE AMORTECIMENTO DA LINHA DE 500 kV ENTRE ORIXIMINÁ E SILVES.....</b>	<b>54</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	54
5.2	MÉTODO ANALÍTICO DE CÁLCULO DE AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DO SISTEMA DE AMORTECIMENTO UTILIZADO NA TRAVESSIA DO RIO TROMBETAS .....	54

5.2.1	Vibrações eólicas .....	56
5.2.2	Oscilações de subvão .....	58
5.2.3	Conclusão .....	59
5.3	ENSAIO EXECUTADO EM LABORATÓRIO NO ESPAÇADOR AMORTECEDOR UTILIZADO NA LINHA DE TRANSMISSÃO ORIXIMINÁ – SILVES .....	59
5.3.1	Ensaio mecânicos .....	60
5.3.2	Caracterização do elastômero .....	67
5.3.3	Ensaio elétricos .....	72
6.	<b>ENSAIO DE CAMPO REALIZADO NA LINHA DE 500 kV ENTRE ORIXIMINÁ E SILVES.....</b>	<b>76</b>
6.1	INTRODUÇÃO .....	76
6.2	CARACTERÍSTICAS DO ENSAIO.....	76
6.2.1	Sítio 1a –torres de Ancoragem e Suspensão- Itapiranga.....	77
6.2.2	Sítio 1b –torres de Suspensão e Suspensão- Itapiranga.....	78
6.2.3	Resultados dos testes em campo nos sítios 1a e 1b .....	80
6.2.4	Sítio 2 –torres de Suspensão e Suspensão– Terra Santa.....	83
6.2.5	Resultados dos testes em campo no sítio 2 .....	85
6.2.6	Sítio 3 –torres de Suspensão e Suspensão– Travessia do Rio Nhamunda.....	87
6.2.7	Resultados dos testes em campo no sítio 3 .....	88
7.	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>91</b>
7.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....	94
8.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>95</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>99</b>
A1	INFORMAÇÕES GERAIS.....	100
A2	DADOS DE ENTRADA: .....	101
A3	DADOS DE ENTRADA (CONTINUAÇÃO). .....	102
A4	MATRIX DE RIGIDEZ DO ESPAÇADOR .....	103
A5	FREQÜÊNCIA NATURAL E MODOS PRINCIPAIS DE VIBRAÇÃO DO FEIXE.....	104
A6	ENERGIA DISSIPADA PARA CADA MODO DE VIBRAÇÃO.....	107
A7	ENERGIA INTRODUZIDA PELO VENTO EM UM FEIXE DE CONDUTORES. ....	108
A8	SAÍDA DE DADOS DO PROGRAMA .....	109
A9	CONCLUSÃO .....	113
	<b>ANEXO B .....</b>	<b>114</b>
B1	INFORMAÇÕES GERAIS.....	115

B2	CÁLCULO DAS CONDIÇÕES DE INSTABILIDADE, ÂNGULO DE ATAQUE DO VENTO E ESCOLHA AUTOMÁTICA DOS TIPOS DE MODOS DE VIBRAÇÃO A SEREM ACOPLADOS.....	117
B3	FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS PRINCIPAIS DE VIBRAÇÃO .....	119
B4	ENERGIA DISSIPADA POR UM FEIXE DE CONDUTORES PARA UM PAR DE MODOS DE VIBRAÇÃO.....	121
B5	ENERGIA INTRODUZIDA PELO VENTO SOBRE OS DOIS MODOS DE VIBRAÇÃO.....	121
B6	CÁLCULO DE CICLOS LIMITADOS DA AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO .....	122
B7	DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NOS CONDUTORES E DAS FORÇAS NOS GRAMPOS DOS ESPAÇADORES.....	122
B8	SAÍDA DE DADOS DO PROGRAMA .....	123
B9	CONCLUSÃO .....	127

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Velocidade uniforme de vento incidindo perpendicular sobre um cabo condutor com amortecedor (Vecchiarelli <i>et al.</i> ,1999, modificado).....	1
Figura 1.2 - Tipos de movimentos cíclicos (EPRI, 2006, modificado). .....	3
Figura 1.3 - Componente da velocidade do vento e da força aerodinâmica devido ao desprendimento de vórtices (Diana <i>et al.</i> ,1996, modificado). .....	3
Figura 1.4 - Espaçadores amortecedores na linha Oriximiná – Silves (Eletronorte, 2012). .....	5
Figura 1.5 - Abertura da faixa de servidão (Eletronorte, 2010).....	5
Figura 2.1 - Esteira de vórtices de Von Karman criada pela incidência do fluxo de ar laminar sobre um cilindro (Irvine, 2006, modificado).....	9
Figura 2.2 - Amortecedores Stockbridge e Espaçadores Amortecedores (Burndy, 2016). .....	10
Figura 2.3 - Diferença entre o escoamento Laminar (A) e o escoamento Turbulento (B). .....	12
Figura 2.4 - Representação da frequência de Strouhal = 23,5 Hz em um cabo DRAKE sob a ação de um vento de 3,58 m/s (Irvine, 2006, modificado).....	14
Figura 2.5 - Representação da frequência de Strouhal = 72,4 Hz em um cabo blindado sob a ação de um vento de 3,58 m/s (Irvine, 2006, modificado). .....	14
Figura 2.6 - Ação da força senoidal sobre um cilindro (Diana, 2011, modificado). .....	14
Figura 2.7 - Representação do laço das vibrações de uma onda estacionária (Kasap, 2012, modificado).....	15
Figura 2.8 - Representação dos modos de vibração (Belloli <i>et al.</i> , 2006).....	16
Figura 2.9 - Esteiras de vórtices em relação a variação do número de Reynolds, da esquerda para a direita (1,1) $Re = 1,1$ ; (1,2) $Re = 9,6$ ; (2,1) $Re = 26$ ; (2,2) $Re = 140$ ; (3,1) $Re = 2000$ ; (3,2) $Re = 10000$ , (EPRI, 2009). .....	18
Figura 2.10 - Relação entre o número de Reynolds e o número de Strouhal (EPRI, 2009, modificado).....	19
Figura 2.11 - Representação gráfica do método do equilíbrio de energia (Diana, 2011, modificado).....	22
Figura 2.12 - Tipo de escoamento causado pelo relevo do solo (Diana, 2011, modificado). .....	23

Figura 2.13 - Função de redução de energia versus amplitude de vibração reduzida (Kasap, 2012, modificado).....	24
Figura 2.14 - Estação de teste para ensaios de auto amortecimento e abrasão ( <i>fretting</i> ) em um condutor (Vilela, <i>et al.</i> , 2013).....	25
Figura 2.15 - Peso do amortecedor B > Peso do amortecedor A (Diana, 2011, modificado). .....	28
Figura 2.16 - Amortecedor do tipo Stockbridge assimétrico (Irvine, 2006).....	29
Figura 2.17 - Amortecedores do tipo Espaçador Amortecedor (PLP, 2011).....	30
Figura 2.18 - Espaçador Amortecedor quádruplo (PLP, 2011). ....	30
Figura 3.1 - Fios externos de um condutor rompidos pela fadiga (CIGRÉ, 2005).....	35
Figura 3.2 - Área de contato entre os fios de camadas adjacentes (EPRI, 2009). ....	35
Figura 3.3 - Abrasão dos fios de um condutor pelo aperto da braçadeira (CIGRÉ, 2005). .....	36
Figura 3.4 - Braçadeira de aperto aparafusada (CIGRÉ, 2005).....	37
Figura 3.5 - Braçadeira de aperto com elastômero (CIGRÉ, 2005). ....	37
Figura 3.6 - Curvas S-N e Linha de fronteira segura (CIGRÉ,1995). ....	39
Figura 3.7 - Amplitude da flexão ( $Yb$ ) (pico a pico) (CIGRÉ, 1995, modificado). ....	41
Figura 3.8 - Amplitude da flexão ( $Yb$ ), amplitude de vibração ( $y_{max}$ ), ângulo de flexão ( $\beta$ ), Comprimento do laço ( $\ell$ ) e comprimento da onda ( $\lambda$ ) (Kasap, 2012, modificado). .....	42
Figura 3.9 – Posicionamento dos 3 Strain Gauges na boca do grampo ou da braçadeira (Vilela <i>et al.</i> , 2010). ....	43
Figura 4.1 - Montagem cabo/condutor e a posição padrão para a medida da amplitude de flexão, $Yb$ (Fadel <i>et al.</i> ,2010). ....	44
Figura 4.2 - Vibrec <sup>TM</sup> 400 (Pfisterer Sefag AG, 2015).....	50
Figura 4.3 - Sensor de vento –Vibrec <sup>TM</sup> 400 (Pfisterer, 2015). ....	51
Figura 4.4 – Vibrec 500PT (Pfisterer, 2015). ....	52
Figura 4.5 - Pavica (Pfisterer, 2015).....	53
Figura 5.1 - Fluxograma do Programa ESANAM (SALVI, 2012). ....	55
Figura 5.2 - Grampo de suspensão (SALVI, 2012, modificado).....	57

Figura 5.3 - Localização dos amortecedores de vibração (SALVI, 2012, modificado).	57
Figura 5.4 - Grampo de ancoragem (SALVI, 2012, modificado).....	57
Figura 5.5 - Localização dos amortecedores de vibração (SALVI, 2012, modificado).	58
Figura 5.6 - Ensaio de deslizamento longitudinal (PLP, 2011).....	60
Figura 5.7 - Ensaio de deslizamento torsional (PLP, 2011). ....	61
Figura 5.8 - Ensaio de corrente de curto circuito (PLP, 2011). ....	62
Figura 5.9 - Ensaio de corrente de curto circuito (PLP, 2011). ....	63
Figura 5.10 - Deslocamento longitudinal (PLP, 2011).....	64
Figura 5.11 - Deslocamento cônico (PLP, 2011).....	65
Figura 5.12 - Deslocamento transversal (PLP, 2011).....	65
Figura 5.13 - Ensaio de flexibilidade – deslocamento longitudinal (PLP, 2011).....	66
Figura 5.14 - Ensaio de flexibilidade – deslocamento longitudinal (PLP, 2011).....	66
Figura 5.15 - Ensaio de flexibilidade – deslocamento cônico (PLP, 2011).....	67
Figura 5.16 - Configuração do laço de histerese (PLP, 2011).....	67
Figura 5.17 - Resultados dos ciclos de histerese referentes aos resultados da tabela 5.14 (PLP, 2011, modificado).....	69
Figura 5.18 - Resultados dos ciclos de histerese referentes aos resultados da tabela 5.15 (PLP, 2011, modificado).....	70
Figura 5.19 - Resultados dos ciclos de histerese referentes aos resultados da tabela 5.16 (PLP, 2011, modificado).....	71
Figura 5.20 - Resultados dos ciclos de histerese referentes aos resultados da tabela 5.17 (PLP, 2011, modificado).....	72
Figura 5.21 - Medidor de corrente e tensão (PLP, 2011). ....	73
Figura 5.22 - Ensaio de resistência elétrica (PLP, 2011).....	73
Figura 5.23 - Diagrama do circuito de ensaio (CEPEL, 2011).....	75
Figura 5.24 – Arranjo para a medição da rigidez torsional e do amortecimento das articulações do espaçador (ESANAM, sem data, modificado). ....	75
Figura 6.1 Sítio 1a - vão 306/1 → 306/2 (PLP Brasil, 2011).....	77
Figura 6.2 - Sítio 1a (Eletronorte, 2011).....	78

Figura 6.3 - Sítio 1b - vão 307/2→ 308/1 (PLP Brasil, 2011). .....	78
Figura 6.4 - Sítio 1b (Eletronorte, 2011). .....	79
Figura 6.5 - Movimentos possíveis de condutores paralelos (Irvine, 2006, modificado). .....	80
Figura 6.6 - Dados coletados pelo Vibrógrafo Pavica 05P09 (PLP,2011). .....	80
Figura 6.7 - Dados coletados pelo Vibrógrafo Vibrec 642 (PLP, 2011). .....	81
Figura 6.8 - Dados coletados pelo Vibrógrafo Pavica 06P04 (PLP, 2011). .....	81
Figura 6.9 - Tensões acumuladas e curva S-N (PLP, 2011). .....	82
Figura 6.10 - Máximas amplitudes (PLP, 2011). .....	83
Figura 6.11 - Sítio 2 - vão 85/1 → 84/3 (PLP, 2011). .....	83
Figura 6.12 - Sítio 2 (Eletronorte, 2011). .....	84
Figura 6.13 - Dados coletados pelo Vibrógrafo Vibrec 642 (PLP, 2011). .....	85
Figura 6.14 - Dados coletados pelo Vibrógrafo Pavica 06P21 (PLP, 2011). .....	86
Figura 6.15 - Tensões acumuladas e curva S-N (Fonte: PLP Brasil). .....	86
Figura 6.16 - Máximas amplitudes (PLP, 2011). .....	87
Figura 6.17 - Sítio 3 - vão 132/2→133/1 (PLP, 2011). .....	87
Figura 6.18 - Sítio 3 .....	88
Figura 6.19 - Dados coletados pelo Vibrógrafo Vibrec 643 (PLP, 2011). .....	89
Figura 6.20 - Dados coletados pelo Vibrógrafo Pavica 06P21 (PLP, 2011). .....	89
Figura 6.21 - Tensões acumuladas e curva S-N (Fonte: PLP Brasil). .....	90
Figura 6.22 - Máximas amplitudes (PLP, 2011). .....	90
Figura 7.1 - Sítio 1b - estrutura 307/2 (PLP, 2011). .....	93
Figura 7.2 - Sítio 2 - estrutura 84/3 (PLP, 2011). .....	93
Figura 7.3 - Sítio 3 - estrutura 132/2 (PLP, 2011). .....	94
Figura A.1 - Fluxograma do programa (ESANAM, sem data, modificado). .....	100
Figura A.2 - Dados da entrada de dados do espaçador (ESANAM, sem data, modificado). .....	101

Figura A.3 – Autovalores e autovetores para um feixe quádruplo (ESANAM, sem data, modificado).....	103
Figura A.4– Detalhe da localização dos subvão (ESANAM, sem data). .....	104
Figura A.5– Modos de vibração típico de um feixe (ESANAM, sem data).....	107
Figura A.6 – Entrada de energia eólica do vento em um feixe de condutores (ESANAM, sem data).....	109
Figura A.7 – Entrada e saída de dados (SALVI, 2012). .....	111
Figura A.8 – Amplitude de vibração x frequência da vibração–Rio Trombetas (SALVI, 2012). .....	112
Figura A.9 – Deformação de flexão x frequência da vibração–Rio Trombetas (SALVI, 2012). .....	112
Figura B.1- Fluxograma do programa (CICFAS, sem data, modificado). .....	116
Figura B.2 – Força de sustentação e força de arrasto (CICFAS, sem data, modificado). .....	117
Figura B.3– Coeficientes de arrasto “ $CD$ ” e coeficientes de sustentação “ $CL$ ” (CICFAS, sem data). .....	118
Figura B.4 – Movimento de excitação de dois condutores (CICFAS, sem data, modificado).....	118
Figura B.5 – Modos de vibração de um feixe de condutores em um espaçador quádruplo (CICFAS, sem data).....	119
Figura B.6 – Autovetores e Autovalores – espaçador quádruplo (CICFAS, sem data). .....	120
Figura B.7 – $SAM_M$ e $SIM_M$ como uma função da velocidade do vento (CICFAS, sem data). .....	124
Figura B.8 – Força no espaçador, rotação da articulação e deformações no condutor em função da velocidade do vento (CICFAS, sem data).....	124
Figura B.9 – Entrada e saída de dados (SALVI, 2012). .....	125
Figura B.10 – Saída de dados (SALVI, 2012). .....	126
Figura B.11 – Saída de dados (SALVI, 2012). .....	127



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Tipos de Vibrações (Irvine, 2006 e Burndy, 2016, modificados).....	10
Tabela 2.2 - Regimes de escoamento de um fluido (Irvine, 2006, modificado).....	12
Tabela 2.3 - Expoentes da fórmula de dissipação de energia (Lilien, 2013, modificado). .....	26
Tabela 5.1 - Informações necessárias para a entrada de dados (SALVI, 2012, modificado). .....	56
Tabela 5.2 - Deformações do condutor (SALVI, 2012, modificado).....	57
Tabela 5.3 - Locação dos espaçadores amortecedores (SALVI, 2012, modificado).....	58
Tabela 5.4 - Velocidade do vento e oscilações de subvão (SALVI, 2012, modificado).	59
Tabela 5.5 - Resultado do ensaio do deslizamento longitudinal (PLP, 2011).....	60
Tabela 5.6 - Resultado do ensaio do deslizamento torsional (PLP, 2011). ....	61
Tabela 5.7 - Resultado do espaçador amortecedor na posição normal (PLP, 2011, modificado).....	62
Tabela 5.8 - Resultado com uma braçadeira do espaçador amortecedor deslocada de 15mm em relação as outras (PLP, 2011, modificado).....	63
Tabela 5.9 - Resultado do espaçador amortecedor na posição normal (PLP, 2011, modificado).....	64
Tabela 5.10 - Parâmetros de desempenho – deslocamento longitudinal (PLP, 2011)....	65
Tabela 5.11 - Parâmetros de desempenho – deslocamento longitudinal (PLP, 2011)....	66
Tabela 5.12 - Parâmetros de desempenho – deslocamento cônico (PLP, 2011). ....	66
Tabela 5.13 - Parâmetros de desempenho – deslocamento vertical ou transversal (PLP, 2011). ....	67
Tabela 5.14 - Resultados dos testes de oscilação de subvão (PLP, 2011, modificado)..	68
Tabela 5.15 - Resultados dos testes de Vibrações Eólicas (PLP, 2011, modificado)....	69
Tabela 5.16 - Resultados dos testes de Fadiga Horizontal (PLP, 2011, modificado)....	70
Tabela 5.17 - Resultados dos testes de Fadiga Cônica (PLP, 2011, modificado). ....	71
Tabela 5.18 - Parâmetros de desempenho (PLP.2011).....	72

Tabela 5.19 - Parâmetros de desempenho – resistência elétrica (PLP, 2011). .....	73
Tabela 5.20 - Resultados do ensaio de radiointerferência (CEPEL, 2011). .....	74
Tabela A.1 – Características da linha de transmissão – travessia do Rio Trombetas... ..	101
Tabela A.2 – Resultado da deformação de flexão com e sem amortecedor (SALVI, 2012). .....	113
Tabela B.1 – Valores de “SAM” e “SIM” máximos (SALVI, 2012). .....	127

## LISTA DE ABREVIACÕES

AAAC	All Aluminium Alloy Conductors
ACSR	Aluminium Conductor Steel Reinforced
AGSD	Espaador Amortecedor Preformado
ASC/CA	Condutor de Alumínio Nu
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAA	Condutor de Alumínio
CAL	Condutor de Liga de Alumínio
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica do sistema Eletrobrás
CICFAS	Programa de cáculo das oscilaes de subvão
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux lectriques
EDS	Every Day Stress
ELETRONORTE	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.
EPRI	Electrical Power Reserch Institute
ESANAM	Programa de cáculo de distribuio de amortecedores
IEC	International Electrotechnical Comission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISWR	Inverse Standing Wave Ratio Method
OPGW	Optical Ground Wires
PLP	Produtos para Linhas Preformados do Brasil Ltda.
PT	Power Method
P-S	Poffenberger - Swart
S-N	Stress-Number of cycles
TRI	Tensão de Radiointerferncia
UTS	Ultimate Tensile Strength

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolos</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$d_a$	Diâmetro do fio de alumínio	[mm]
$d_r$	Diâmetro da vareta	[mm]
$d_s$	Diâmetro do fio de aço	[mm]
$d_T$	Diâmetro interno do tubo	[mm]
$D_T$	Diâmetro externo do tubo	[mm]
$E_a$	Módulo de elasticidade do alumínio	[N/mm <sup>2</sup> ]
$E_r$	Módulo de elasticidade do material da vareta	[N/mm <sup>2</sup> ]
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço	[N/mm <sup>2</sup> ]
$E_T$	Módulo de elasticidade do material do tubo	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_b$	Frequência básica de vibração do condutor	[Hz]
$f_n$	Frequência natural do cabo condutor em relação ao modo de vibração	[Hz]
$F_n \left( \frac{Y}{d} \right)$	Função de redução de energia obtida através de experimentos em túnel de vento para um escoamento laminar	[Wm <sup>-1</sup> /Hz <sup>3</sup> m <sup>4</sup> ]
$f_s$	Frequência do derramamento de vórtices	[Hz]
$F_v$	Força de reação	[r.m.s]
$m_L$	Massa do cabo condutor por unidade de comprimento	[kg/m]
$n_a$	Número de fios de alumínio	
$n_r$	Número de varetas	
$n_s$	Número de fios de aço	
$P_c$	Energia dissipada pelo condutor por unidade de comprimento	[W/m]

$P_c$	Energia total dissipada pelo auto amortecimento do condutor	[W/m]
$P_d$	Energia dissipada pelo amortecedor	[W]
$P_w$	Energia mecânica do vento sobre todo o vão do condutor	[W]
$P_w \text{ tot}$	Energia total do vento	[W]
$(P_d)_n$	Energia dissipada por $n$ amortecedores	[W]
$R_e$	Número de Reynolds	
$Y_b$	Amplitude de flexão (pico a pico)	[mm]
$\epsilon_b$	Deformação de flexão	[m]
$\lambda_n$	Comprimento da onda	[m]
$\sigma_b$	Tensão alternada de flexão (zero a pico)	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_s$	Tensão alternada de flexão (zero a pico)	[N/mm <sup>2</sup> ]
$C$	Velocidade da propagação da onda ao longo do condutor	[m/s]
$d$	Comprimento do braço medido entre o centro da braçadeira e o ponto de articulação efetivo do quadro / braço	[m]
$d$	Diâmetro do fio	[mm]
$d$	Diâmetro do cabo condutor	[m]
$d$	Diâmetro do cilindro ou condutor	[m]
$d$	Diâmetro do condutor	[mm]
$d$	Diâmetro do fio da camada mais externa do condutor	[mm]
$E$	Módulo de elasticidade do material do condutor	[N/mm <sup>2</sup> ]
$EI_{\text{mín}}$	Rigidez a flexão mínima	[Nmm <sup>2</sup> ]
$EI$	Rigidez de flexão ou soma das rigidezes de flexão individual dos fios do condutor	[Nmm <sup>2</sup> ]
$f$	Flecha do condutor	[m]

$f$	Frequência	[Hz]
$f$	Frequência de vibração ou frequência de Strouhal	[Hz]
$F$	Força máxima	[N]
$g$	Constante gravitacional	9,81 m/s <sup>2</sup>
$k$	Fator de característica do condutor	
$K$	Rigidez a flexão do condutor	[Nmm <sup>2</sup> ]
$l$	Comprimento do laço	[m]
$l$	Expoente da amplitude	
$L$	Comprimento do vão	[m]
$m$	Expoente da frequência	
$m$	Massa por unidade de comprimento	[kg/m]
$M$	Massa do condutor por unidade de comprimento	[kg/m]
$n$	Sequência do modo de vibração	
$n$	Expoente da tensão	
$n$	Número de fios	
$N$	Número de ciclos	
$RS$	Força considerada	[kN]
$s$	Número de Strouhal	
$T$	Tensão no cabo condutor	[N]
$T$	Tensão ou carga de esticamento para uma temperatura média durante a medição	[N]
$v$	Velocidade	[r.m.s]
$V$	Velocidade do vento	[m/s]
$W$	Área do momento / laço da deflexão angular	[Joule]

$W$	Massa do condutor por unidade de comprimento	[kg/m]
$Y$	Amplitude de vibração, pico a pico na região dos anti-nós	[m]
$Y$	Amplitude máxima Pico a Pico	[m]
$\alpha$	Ângulo fase entre a deflexão do braço e a força	[rad.]
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido	[kg/ms]
$\nu$	Viscosidade cinemática	
$\varphi$	Deflexão do braço (pico)	[rad.]
$\varphi$	Ângulo fase entre a força de reação e a velocidade	[rad.]

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUÇÃO

#### 1.1 CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O aumento populacional e o desenvolvimento industrial, aliados às necessidades de retornos econômicos a curto-prazo e as medidas impostas pela regulação ambiental afetam os projetos de uma linha de transmissão de energia elétrica. No Brasil a maioria das usinas de geração de energia elétrica estão distantes dos centros consumidores, o que obriga com que as linhas de transmissão atravessem longas distâncias. Por estas razões, um dos maiores desafios dos projetistas de linhas é identificar e prevenir as situações, que possam causar falhas na interrupção do fornecimento de energia elétrica para os consumidores.

Entre as falhas mais comuns estão aquelas causadas pela ação das cargas dinâmicas do vento, que causam movimentos cíclicos nos cabos, sejam eles de transmissão de energia ou de transmissão de sinais de comunicação<sup>1</sup>, conforme se pode ver nas figuras 1.1 e 1.2.

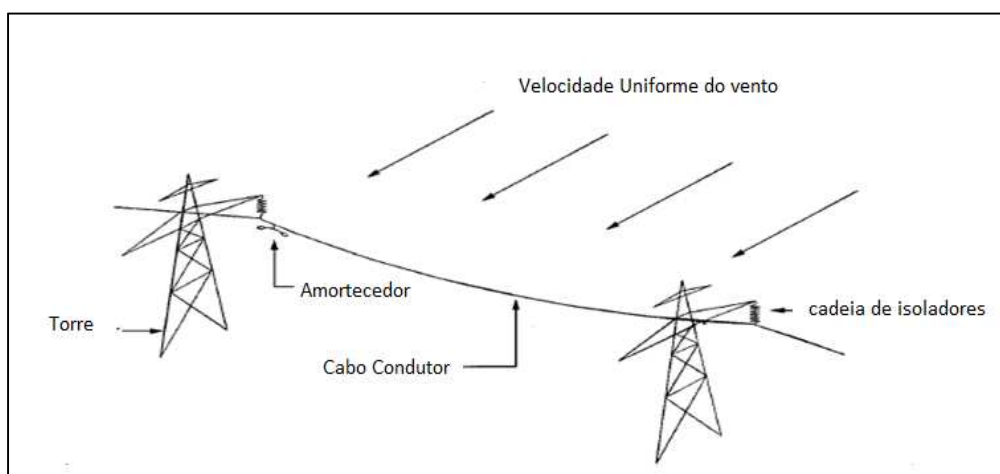


Figura 1.1 - Velocidade uniforme de vento incidindo perpendicular sobre um cabo condutor com amortecedor (Vecchiarelli *et al.*,1999, modificado).

Os movimentos cíclicos causados pelo vento, como na figura 1.2 podem ter a forma de vibrações eólicas, *galloping* e oscilações induzidas de subvão. Conforme EPRI (2009) os movimentos cíclicos mais comuns são:

---

<sup>1</sup> Atualmente as linhas de transmissão também são usadas para transportar sinais de comunicação e para isso os cabos convencionais de pára-raios são trocados por cabos OPGW (*Optical Ground Wires*), que mantêm a função de proteger os componentes da linha de transmissão, mais também transportam sinais de comunicação.



### **Vibrações Eólicas:**

As vibrações eólicas não são fáceis de se observar a olho nu e acontecem com vento suave e de baixa velocidade. Sob estas condições a amplitude da vibração, pico a pico é muito pequena e raramente excede a um diâmetro do condutor. Para maiores velocidades de vento a amplitude geralmente decresce. A taxa de frequência da oscilação varia em função da velocidade do vento, do diâmetro do condutor e da tensão de esticamento que ele está submetido. Frequências mais baixas são características de condutores de grandes diâmetros e vento de baixa velocidade, enquanto que frequências mais altas são características de condutores de pequenos diâmetros e velocidades de vento moderadas.

### ***Galloping:***

O *Galloping* ocorre quando a incidência do vento ou do fluxo de ar tem velocidades maiores que 7m/s e características de turbulência. Outra característica desse fenômeno é que ele só ocorre em região de clima frio e quando há acúmulo de neve sobre o condutor aéreo de eletricidade.

### **Oscilações de Subvão:**

Atualmente para atender ao aumento por demanda, uma fase de um circuito de uma linha de transmissão deve ser formada por mais de um condutor ou por subcondutores. Este modelo, com feixes de condutores origina problemas vibratórios diferentes dos encontrados quando a fase é constituída por apenas um condutor. Quando dois ou mais condutores compartilham de um mesmo espaçador eles acabam influenciando o movimento um dos outros, pois a incidência do vento de baixa velocidade sobre um condutor a barlavento cria uma esteira de vórtices a sotavento, que atua no condutor a sotavento causando movimentos oscilatórios complexos em todo o conjunto. Estes movimentos podem ser horizontais ou verticais ou alternados ou mesmo torcionais. Portanto as oscilações de subvão é característica do condutor a sotavento, que pode se deslocar independentemente dos outros condutores vizinhos, conforme mostrado na figura 1.2.

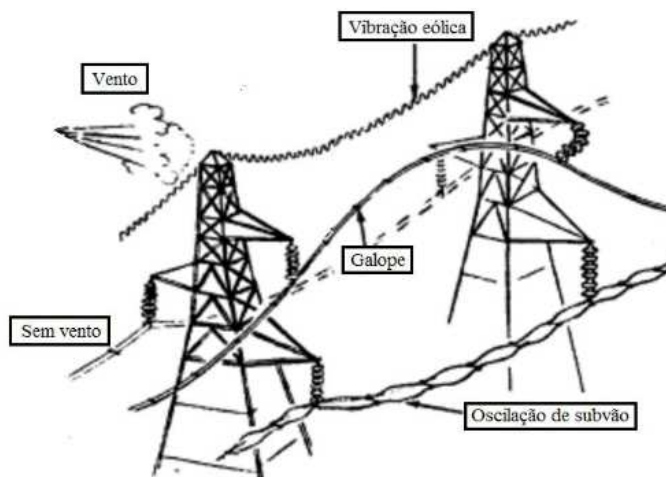


Figura 1.2 - Tipos de movimentos cíclicos (EPRI, 2006, modificado).

Segundo Diana *et al.* (1996) todo movimento cíclico provocado pela incidência do vento sobre uma linha de transmissão é repetidamente absorvido pelo condutor, como se ele fosse um sistema elástico muito grande suportado por subsistemas elásticos mecânicos, tais como os grampos de suspensão ou de ancoragem, que são fixados nas estruturas metálicas. Esta situação está representada no esquema da figura 1.3 e quando atinge determinados valores pode causar ruptura dos fios de um condutor e até mesmo o rompimento total do condutor.

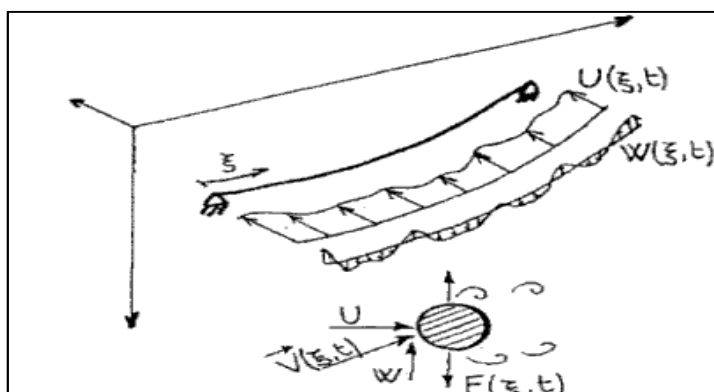


Figura 1.3 - Componente da velocidade do vento e da força aerodinâmica devido ao desprendimento de vórtices (Diana *et al.*,1996, modificado).

Prevenir o desgaste ou a ruptura de um condutor de eletricidade de uma linha de transmissão aérea obriga o conhecimento dos fenômenos, que levam e aceleram a fadiga, para que eles sejam considerados no projeto e na manutenção da linha, a fim de que ela atinja a plenitude da vida útil estimada.

## 1.2 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA MECÂNICO

Como exposto acima, a causa mais frequente das falhas em um condutor de eletricidade aéreo é a fadiga causada pelo movimento cíclico do condutor provocado pela incidência do vento. O vento com uma determinada faixa de frequência ou velocidade ao passar pelo condutor causa flexões alternadas gerando tensões complexas de tração, compressão e atrito, que somadas com as tensões de tração de esticamento necessárias para manter o condutor na posição de projeto desgasta inicialmente os fios da camada externa do condutor.

O desgaste dos fios se dá pela abrasão ou *fretting*, que aliado às trincas causadas pelas tensões complexas causam redução da seção original do condutor dificultando a passagem da corrente elétrica ao mesmo tempo em que reduz a resistência à tração do condutor levando-o a ruptura. Tal fato ocorre próximo às regiões de maior rigidez e atualmente a melhor técnica para a análise e prevenção deste fenômeno baseia-se na teoria de Poffenberger e Swart, que permite construir as curvas de Wöhler ou curvas S-N e, cuja análise permite prever se o condutor estará sujeito ou não a fadiga e estimar a vida útil do mesmo.

## 1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho é um estudo de caso de natureza descritiva, que visa contribuir para o estudo dos efeitos das cargas dinâmicas do vento sobre um condutor de corrente aéreo. Para isto, o trabalho apresenta, além de vários ensaios realizados em laboratórios, também um ensaio de monitoramento realizado no campo em uma linha de transmissão em funcionamento, que liga a usina hidroelétrica de Tucuruí localizada no estado do Pará com a cidade de Manaus no estado do Amazonas. O ensaio de monitoramento foi realizado com equipamentos do tipo gravadores registradores de vibração, que utilizam a teoria dos pesquisadores Poffenberger e Swart com o objetivo de verificar e ratificar a eficiência do condutor e dos espaçadores amortecedores analisados no laboratório e utilizados na linha de transmissão em relação a fadiga do condutor por *fretting*. Na figura 1.4 podem-se ver os dois circuitos de três fases em 500 kV, sendo que cada fase é composta por quatro feixes de condutores do tipo CAL 1055 kcmil com 61 fios de diâmetro igual a 3,34mm em liga de alumínio 6201-T81 separados por espaçadores amortecedores do tipo quádruplo de 70 cm. O trecho da linha escolhido para a realização dos ensaios foi entre as cidades de Oriximiná (PA) e Silves (AM). Além da apresentação dos resultados obtidos e da descrição do ensaio de monitoramento no campo, este trabalho, também apresenta o desenvolvimento teórico necessário para o entendimento do fenômeno da fadiga por *fretting* e do funcionamento dos equipamentos de medição e monitoramento utilizados.



Figura 1.4 - Espaçadores amortecedores na linha Oriximiná – Silves (Eletronorte, 2012).

#### **1.4 JUSTIFICATIVA TÉCNICA**

Na região Amazônica a largura da faixa de servidão, como pode ser visto na figura 1.5 varia em torno de 10m e a vegetação cresce e se fecha rapidamente, além disso não se pode esquecer da existência de áreas inundadas, pântanos e rios, o que faz com que a logística de reparo e manutenção de um condutor de eletricidade em suspensão seja muito dispendiosa e nem sempre viável. Diante de tais fatos, é necessário que se previna com todos os meios técnicos existentes qualquer tipo de falha na linha de transmissão e principalmente no condutor elétrico, que é o mais suscetível a problemas.



Figura 1.5 - Abertura da faixa de servidão (Eletronorte, 2010).

#### **1.5 O ESTADO DA ARTE**

Durante décadas inúmeros pesquisadores procuraram padronizar os procedimentos para avaliar a vibração dos condutores aéreos sujeito às cargas de vento e desta maneira permitir com que às indústrias pudessem trabalhar com informações mais detalhadas e precisas sobre os vários problemas causados e, assim, definir os procedimentos de controle mais efetivo destas

vibrações. No passado alguns métodos eram baseados em medições sobre o clima ou o relevo ou mesmo sobre as tensões de esticamento ou no desempenho dos dispositivos de amortecimento, porém estes métodos eram difíceis e não alcançavam resultados precisos.

Em 1965 no encontro de inverno do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) em Nova York, Estados Unidos foi apresentado o documento 31 TP 65-156 produzido pelo Comitê de Transmissão e Distribuição da instituição. O método para a determinação da amplitude de flexão apresentado pela instituição em 1965 foi desenvolvido pela empresa *Ontario Hydro* na década de quarenta através de vários ensaios de campo e por outras informações baseadas na experiência da empresa. Este método por ser simples e prático passou a ser padrão para avaliação da vibração de um condutor aéreo, tanto em laboratório como no campo para qualquer tipo de grampo ou braçadeira de suspensão convencional sem elastômero. O documento da instituição, que é utilizado ainda hoje contém a especificação com a teoria e os procedimentos para a execução dos ensaios bem como, são fornecidos os procedimentos para a análise dos dados obtidos e os passos para a execução da inspeção dos condutores e as informações sobre os equipamentos gravadores de vibração.

Em 1965 os pesquisadores Poffenberger e Swart mencionaram pela primeira vez a relação linear entre um deslocamento vertical de um condutor oscilando (pico a pico) medido a uma distância de 89 mm do último ponto de contato, com uma tensão. O deslocamento vertical passou a ser chamado de amplitude de flexão e a tensão em tensão de flexão. A aplicação da fórmula de Poffenberger e Swart ou fórmula P-S é relativamente fácil e direta e tem sido adotada pela maioria dos pesquisadores neste campo tornando-se um padrão para o cálculo da tensão nominal dos fios da camada externa de um condutor.

Em 1995 o instituto CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*) apresentou o relatório Electra nº 162, que passou a ser um guia para as medidas de vibração nas linhas aéreas. Além da teoria e os procedimentos para a realização dos ensaios este relatório apresenta os limites de fadiga utilizados por algumas instituições e as curvas S-N (*Stress-Number of cycles*). As curvas S-N ou curvas de Wöhler são aplicáveis em todos os tipos de condutores e grampos e representam o número de ciclos até a falha do condutor em diferentes níveis de tensão.

Rolim *et al.* (2007) apresentaram um estudo para a determinação da vida útil de um condutor do tipo ACSR modelo Grosbeak 636 em funcionamento em um vão de 670m sobre o rio Guamá no estado do Pará. Neste estudo foi utilizada a teoria de Poffenberger e Swart para a estimativa da vida útil do condutor e a construção das curvas S-N. Para a medida da frequência e da

amplitude de flexão foram instalados, conforme as prescrições da norma CIGRÉ (1995) equipamentos registradores de medição do tipo PAVICA, que convertem a amplitude de flexão invertida em amplitude de flexão. No final concluíram que o condutor tinha uma pequena possibilidade de falha durante a sua vida útil, que no Brasil gira entorno de 30 anos.

Fadel (2010) na sua tese de doutorado comenta de maneira bem clara a evolução das pesquisas do fenômeno da fadiga em condutores aéreos de eletricidade e a importância da tensão de tração ou de esticamento (*Every Day Stress – EDS*) definida no projeto de uma linha de transmissão como equivalente a 20% da carga de ruptura à tração do condutor. Além de outros fatores, tal como a amplitude de flexão que está vinculada à tensão de flexão, que é linearmente relacionada à deformação do condutor, a tensão de tração também influencia na fadiga no condutor.

Prahl *et al.* (2017) mencionam no seu trabalho que as curvas S-N definem a intensidade de indução de fadiga para diferentes níveis de vibração, bem como podem prever a vida útil do condutor. Atualmente quase todos os trabalhos de pesquisa, que relacionam a amplitude de flexão com a tensão ou deformação de flexão utilizam as recomendações elaboradas pelos institutos IEEE (1966) e CIGRÉ (1995) em conjunto com a teoria de Poffenberger e Swart (1965).

Portanto, verifica-se que mesmo com os avanços acima descritos, a aplicação prática e simples do ensaio no campo permite o levantamento dos dados de forma rápida e com menor custo de investimento do que os testes em laboratório. Além disso, o ensaio em uma linha de transmissão montada e em funcionamento torna os resultados alcançados mais próximos da realidade se comparados com os resultados obtidos por meio de simulações matemáticas feitas no escritório ou com os resultados obtidos por meio de ensaios em laboratório. Neste sentido, este trabalho visa contribuir para o avanço do conhecimento acerca das medições dos efeitos das vibrações eólicas sobre um condutor de eletricidade aéreo.

## **1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos. Neste primeiro capítulo estão descritos os objetivos e o cenário da proposta do trabalho, bem como a proposta da dissertação da tese e os aspectos técnicos envolvidos. No final do capítulo é apresentada uma revisão sucinta do estado da arte e das contribuições do trabalho proposto.

No segundo e terceiro capítulo são feitas, respectivamente uma revisão teórica sucinta sobre as cargas de vento, bem como as teorias utilizadas para a determinação dos efeitos das vibrações em um condutor e o fenômeno da fadiga por *fretting*.

O quarto capítulo se refere à teoria utilizada e a apresentação dos equipamentos de medições.

Os ensaios de laboratório do espaçador amortecedor utilizado no trecho da linha de transmissão em estudo e as características da linha são apresentados no quinto capítulo.

No sexto capítulo, são apresentados os ensaios de monitoramento realizados no campo e as considerações finais acerca dos resultados obtidos.

Finalmente, no sétimo capítulo, são apresentadas a conclusão e as propostas para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### 2. VIBRAÇÕES EÓLICAS – REVISÃO TEÓRICA

#### 2.1 INTRODUÇÃO

As vibrações eólicas acontecem quando o vento passa por uma seção circular em baixa velocidade e alta frequência resultando em pressões alternadas não balanceadas causadas pelas esteiras de vórtices.

Segundo EPRI (2009) a intensidade das vibrações eólicas pode ser amplificada quando a tensão que traciona o condutor ou tensão de esticamento e definida no projeto da linha de transmissão for alta, o terreno onde está situada a linha de transmissão for plano, os ventos constantes e o vão da linha ou a distância entre as torres de transmissão for grande.

#### 2.2 MOVIMENTOS DOS CONDUTORES DEVIDO AS VIBRAÇÕES EÓLICAS

A figura 2.1 representa a passagem de um fluxo laminar de vento por um cilindro estacionário criando uma esteira de vórtices a sotavento, que gera pequenas forças perpendiculares e normais à direção do vento ou em outras palavras a formação de vórtices causa uma variação de pressão nas proximidades do cilindro. Quando a frequência destes vórtices está próxima da frequência natural do cilindro ocorre um acúmulo de forças ressonantes, que causam o movimento do cilindro para cima e para baixo. Este movimento é chamado de vibração eólica e ocorre em frequências de vento compreendidas entre a faixa de 3 a 150 Hz a uma baixa amplitude, pico a pico de 0,01 a 1 (uma) vez o diâmetro do cilindro.

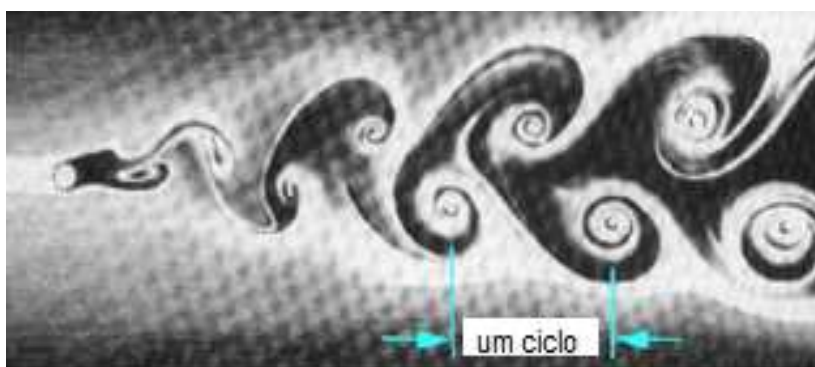


Figura 2.1 - Esteira de vórtices de Von Karman criada pela incidência do fluxo de ar laminar sobre um cilindro (Irvine, 2006, modificado).



Uma das maneiras de minimizar os efeitos destas vibrações em um condutor de energia elétrica de uma linha de transmissão é utilizar amortecedores do tipo *Stockbridge* ou espaçadores amortecedores, conforme mostra a figura 2.2.



Figura 2.2 - Amortecedores Stockbridge e Espaçadores Amortecedores (Burndy, 2016).

A tabela 2.1 apresenta a relação entre as frequências, as amplitudes e as velocidades para os diferentes tipos de oscilações causadas pela passagem do vento por um condutor.

Tabela 2.1 Tipos de Vibrações (Irvine, 2006 e Burndy, 2016, modificados).

<b>Parâmetros</b>	<b>Vibrações eólicas</b>	<b><i>Galloping</i></b>	<b>Oscilação de subvão</b>
Tipos de linhas de transmissão afetadas	Todas	Todas	Condutores em feixes (Linhas paralelas no plano horizontal)
Faixa de Frequência (Hz)	3 a 150	0.08 a 3	0.15 a 10
Amplitude Pico a Pico (Expressas em diâmetro do condutor)	0.01 a 1	5 a 300	0.5 a 80
Tipo de vento provocador do movimento	Suave	Suave	Suave
Velocidade do Vento (m/s)	1 a 7	7 a 18	4 a 18
Superfície do condutor	Nu ou Uniformemente Congelado (ex: geada)	Depósito de gelo assimétrico	Nu, seco
Tempo para ocorrer a falha	3 a 20 anos	1 a 48 horas	1 a 8 anos

Segundo Diana (1996) e pela análise da tabela 2.1, para velocidades menores que 1m/s não há a formação da esteira de vórtices e para velocidades maiores que 7m/s o fluxo de ar já tem uma considerável quantidade de turbulência, que não permite a criação das forças cíclicas verticais responsáveis pelos movimentos do condutor. Porém na faixa entre estas velocidades o movimento do condutor para cima e para baixo resulta em uma flexão no condutor e o aparecimento de tensões. O aumento da rigidez devido ao conjunto condutor e ferragens (grampos, sinalizadores ou amortecedores) faz com que as tensões resultantes causem o desgaste dos fios do condutor pela abrasão ou *fretting* ocasionando o aparecimento de fissuras ou mesmo causando o rompimento total do condutor por fadiga<sup>2</sup>. Este fenômeno, também ocorre em um condutor simples ou singelo.

### 2.3 NÚMERO DE REYNOLDS

De acordo com EPRI (2009) o número de Reynolds<sup>3</sup> pode ser determinado da seguinte maneira:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (2.1)$$

Onde,  $Re$  é o número de Reynolds,  $V$  é a velocidade do vento [m/s],  $d$  é o diâmetro do cilindro ou condutor [m] e  $\nu$  é a viscosidade cinemática igual a  $1,51 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$  para a temperatura do ar igual a 20°C (EPRI, 2009).

A viscosidade cinemática do fluido pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.2)$$

Onde,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido [kg/ms] e  $\rho$  é a massa específica do fluido [kg/m<sup>3</sup>].

A fórmula acima mostra que o número de Reynolds é obtido através da razão entre as forças de inércia e as forças de viscosidade e que a magnitude das forças aerodinâmicas causadas pelo movimento do vento sobre um objeto depende da forma do objeto, da velocidade do vento, da

---

2 Os condutores AAAC (*All Aluminium Alloy Conductors*) são mais utilizados nas linhas de transmissão por causa da sua alta capacidade de transportar eletricidade e também pela capacidade de resistir às altas tensões mecânicas, o que permite que sejam fixados em vãos maiores do que os tradicionais condutores ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*). Geralmente a ocorrência da fadiga em um cabo condutor pode ser observada após três anos da construção de uma linha de transmissão. O primeiro sinal é a quebra de algum fio da camada externa do cabo condutor próximo da sua fixação.

3 Osborne Reynolds foi um físico e engenheiro hidráulico irlandês (1912) e quem primeiro definiu a relação entre as forças de inércia e as forças de viscosidade. A partir daí passou a ser possível avaliar qual é o tipo do escoamento ou a estabilidade do fluxo de um fluido e assim indicar se o fluido tem um regime de escoamento laminar ou turbulento.

massa do ar, da viscosidade e da compressibilidade do ar. Em geral quando o número de Reynolds é  $< 2000$  ou em torno deste valor o escoamento é laminar e quando o número de Reynolds é  $> 3500$  ou em torno deste valor o escoamento é turbulento.

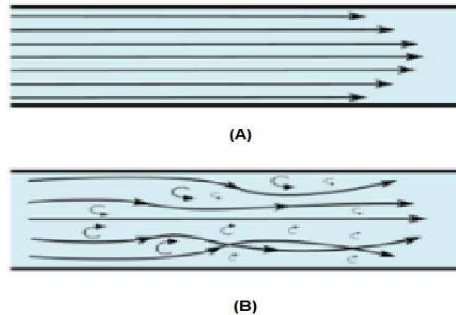


Figura 2.3 - Diferença entre o escoamento Laminar (A) e o escoamento Turbulento (B).

A tabela 2.2 mostra a relação entre o número de Reynolds e o regime ou o tipo do escoamento de um fluido quando o mesmo passa através de um cilindro estacionário.

Tabela 2.2 - Regimes de escoamento de um fluido (Irvine, 2006, modificado).

	$Re < 5$	Regime de fluxo sem separação
	$5 \leq Re < 40$	Esteira de um par de vórtices fixos
	$40 \leq Re < 90$	Esteira de vórtices laminar
	$90 \leq Re < 150$	Esteira de vórtices laminar
	$150 \leq Re < 300$	Faixa de transição de vórtices para turbulento
	$300 \leq Re < 3(10^5)$	Esteira de vórtices totalmente turbulento
	$3(10^5) \leq Re < 3.5(10^6)$	Transição entre a camada laminar para turbulenta de forma mais estreita e desorganizada
	$3(10^6) \leq Re$	Restabelecimento da Esteira de vórtices turbulento

## 2.4 FREQUÊNCIA DE STROUHAL E FREQUÊNCIA NATURAL DO CONDUTOR

Como já comentado anteriormente, o início do movimento de um condutor para baixo e para cima na direção transversal e perpendicular à incidência do vento acontece quando a velocidade do fluxo do vento tem uma intensidade tal que a frequência da esteira de vórtices de Von Karman ou a frequência de Strouhal está próxima da frequência natural de vibração do condutor. Quando a frequência de Strouhal se iguala à frequência natural do condutor ocorre a condição de ressonância e a resposta do sistema é a amplificação da amplitude de vibração. Em outras palavras pode-se dizer que o movimento do condutor pode aumentar a força dos vórtices mudando a frequência de Strouhal para igual ou quase igual à frequência natural do condutor. Esse efeito é considerado o primeiro efeito de amplificação das forças de elevação sobre um condutor induzidas pelos vórtices ao longo do condutor.

O segundo efeito ocorre quando as forças de elevação atuam em fase com a oscilação do condutor e dessa forma passam a ser maiores do que se o condutor estivesse estacionário. Já o terceiro efeito resulta na ressonância. Portanto um condutor aéreo pode experimentar vários níveis de vibrações. Segundo EPRI (2009) a frequência ou número de Strouhal<sup>4</sup> pode ser determinada da seguinte maneira:

$$f_S = S \frac{V}{d} = 0,18 \frac{V}{d} \quad (2.3)$$

Onde,  $f_S$  é a frequência do desprendimento de vórtices [Hz],  $S$  é número de Strouhal podendo ser igual de 0,18 a 0,22 (EPRI, 2009),  $V$  é a velocidade do vento na direção perpendicular do condutor [m/s] e  $d$  é o diâmetro do condutor [m].

A frequência de Strouhal tem sido mais usada do que o número de Reynolds para representar a alternância de vórtices e depende do diâmetro da seção transversal do condutor, da velocidade de escoamento do fluxo de ar ou vento e de uma constante empírica chamada de número de Strouhal, geralmente igual a 0,18 e que depende da forma do condutor. As Figuras 2.4 e 2.5

---

<sup>4</sup> Cenek Vincent Strouhal (1878) foi um físico checo que determinou uma constante empírica adimensional para uma frequência de som audível gerada por fios e hastes de diâmetro igual a “d” quando giradas pelo ar com velocidade “v”. Dentro do número de Reynolds, no qual as vibrações eólicas ocorrem de forma uniforme o número de Strouhal varia entre 0,18 a 0,22 (EPRI,2009).

comparam as frequências de Strouhal para um condutor do tipo “Drake”<sup>5</sup> com diâmetro nominal igual a 28,14mm e para um condutor blindado de 10mm de diâmetro sendo que ambos estão sob a ação da mesma velocidade de vento. Como se pode observar as figuras mostram que um condutor com menor diâmetro vibra com maiores frequências do que um condutor com maior diâmetro para uma mesma velocidade de vento.



Figura 2.4 - Representação da frequência de Strouhal = 23,5 Hz em um cabo DRAKE sob a ação de um vento de 3,58 m/s (Irvine, 2006, modificado).



Figura 2.5 - Representação da frequência de Strouhal = 72,4 Hz em um cabo blindado sob a ação de um vento de 3,58 m/s (Irvine, 2006, modificado).

Segundo Diana (2011) a esteira de vórtices de Von Karman pode ser considerada equivalente à ação de uma força senoidal sobre um cilindro ou condutor, conforme o modelo representado na figura 2.6.

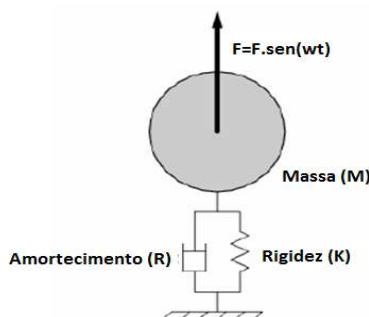


Figura 2.6 - Ação da força senoidal sobre um cilindro (Diana, 2011, modificado).

De acordo com (Diana, 2011) a frequência natural do condutor pode ser determinada por:

<sup>5</sup> O cabo DRAKE é um cabo do tipo ACSR – *Aluminum Conductor, Steel Reinforced* composto de 26 fios de alumínio com diâmetro igual a 4,44 mm e 7 fios de aço com diâmetro igual a 3,45 mm. O diâmetro nominal é igual a 28,14 mm.

$$f_n = \frac{1}{\lambda_n} \sqrt{\frac{T}{m_L}} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{m_L}} \quad (2.4)$$

Onde,  $f_n$  é a frequência natural do cabo condutor em relação ao modo de vibração [Hz],  $\lambda_n$  é o comprimento da onda [m],  $n$  é a sequência do modo de vibração,  $T$  é a tensão no cabo condutor [N],  $m_L$  é a massa do cabo condutor por unidade de comprimento [kg/m] e  $L$  é o comprimento do vão da linha [m].

$$C = \sqrt{\frac{T}{m_L}} \quad (2.5)$$

Onde,  $C$  é a velocidade da perturbação ou da propagação da onda ao longo do condutor [m/s].

Ao analisar a fórmula (2.4) pode-se observar que um condutor pode ter muitas frequências naturais e o valor de cada uma delas dependerá do valor da tensão de tração ou de esticamento, atuando sobre o condutor, da massa do condutor e do comprimento do vão da linha ou distância entre as torres de transmissão. A figura 2.7 mostra a configuração do movimento de um condutor e a formação dos laços das ondas.



Figura 2.7 - Representação do laço das vibrações de uma onda estacionária<sup>6</sup> (Kasap, 2012, modificado).

Seja, por exemplo, o condutor CAL em liga de alumínio e objeto do estudo deste trabalho com 1055 Kcmil ou 1055 MCM e 61 fios, cujas características são:

$$m_L = 1,467 \text{ kg/m}$$

$$T = 15445 \text{ kgf} = 152,97 \text{ kN} = 152970 \text{ N}$$

$$L = 444 \text{ m (vão do teste)}$$

$$d = 30,06 \text{ mm} = 0,030 \text{ m}$$

<sup>6</sup> As ondas estacionárias são ondas que se propagam em sentidos contrários com amplitude e comprimento iguais. Acontecem, por exemplo, quando um fio fixado nas extremidades é excitado em uma das extremidades e as ondas produzidas se superpõem-se com as ondas refletidas na extremidade oposta.

Supondo que este cabo esteja sob a ação de uma tensão de tração igual a 20% UTS (*Ultimate Tensile Strength*) ou resistência última a tração<sup>7</sup>. Então: 20% de 152970 N é igual a 30594 N. Substituindo na fórmula 2.5 acima, vem:

$$C = \sqrt{\frac{T}{m_L}} = \sqrt{\frac{30594}{1,467}} = 144,41 \text{ Hz}$$

A figura 2.8 representa os "n" modos de vibração referentes a cada frequência natural que um cabo condutor pode ter, ou seja:

Para o primeiro modo de vibração:

$$f_1 = \frac{1}{\lambda_1} \sqrt{\frac{T}{m_L}} = \frac{1}{888} \sqrt{\frac{30594}{1,467}} = 0,163 \text{ Hz}$$

Para o segundo, terceiro e trigésimo modo de vibração, vêm respectivamente:

$$f_2 = 0,325 \text{ Hz}, f_3 = 0,488 \text{ Hz} \text{ e } f_{30} = 4,878 \text{ Hz}$$

Considerando que as vibrações eólicas ocorrem quando o escoamento do vento é laminar, na faixa de velocidade entre 1 a 7 m/s, então para um vento com velocidade igual a 1m/s, vem:

$$f_5 = 6,00 \text{ Hz} \cong f_{37} = 6,02 \text{ Hz} \cong f = 6,00 \text{ Hz (adotado)}$$

Portanto, pode-se concluir que nas condições do exemplo dado e quando a frequência natural do condutor for próxima ou igual a frequência de Strouhal para um vento com velocidade de 1m/s ocorrerá o fenômeno da ressonância e o cabo condutor começará a se movimentar na direção vertical.

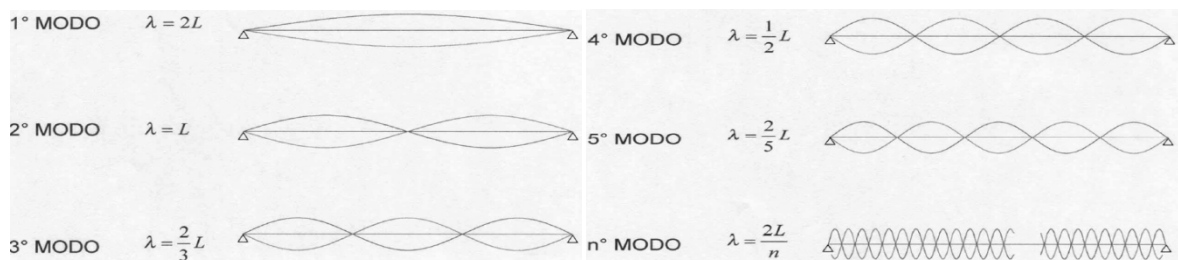


Figura 2.8 - Representação dos modos de vibração (Belloli *et al.*, 2006).

<sup>7</sup> Resistência última a tração é a maior solicitação mecânica que um condutor suportará quando um esforço é aumentado gradualmente até que aconteça a sua ruína ou ruptura. No caso de linhas de transmissão é comum dimensionar as tensões de tração atuantes nos condutores entre 18 a 20% da UTS.

Segundo IEEE (2015) o comprimento do laço da vibração de uma onda estacionária pode ser determinado da seguinte maneira:

$$l = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{Tg}{W}} \quad (2.6)$$

Onde,  $l$  é o comprimento do laço [m],  $f$  é a frequência [Hz],  $T$  é a tensão de esticamento no cabo condutor [N],  $g$  é a constante gravitacional e igual a  $9,81 \text{ m/s}^2$  e  $W$  é a massa do condutor por unidade de comprimento [kg/m].

Aplicando os resultados obtidos no exemplo acima referentes ao condutor CAL de 1055 kcmil na fórmula (2.6), vem:

$$l = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{Tg}{W}} = \frac{1}{12} \sqrt{\frac{300127,14}{1,467}} = 37,693 \text{ m}$$

De acordo com Diana (2011) a figura 2.6 representa um sistema elástico com apenas uma frequência natural forçada por uma força que é uma função senoidal em relação ao tempo. A frequência da força é ( $f$ ) e a frequência natural do sistema ( $f_n$ ). A frequência natural do sistema elástico também pode ser representada por:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2.7)$$

Onde,  $K$  é a rigidez a flexão do condutor [ $\text{Nmm}^2$ ] e  $M$  é a massa do condutor por unidade de comprimento [kg/m].

Lilien (2013) apresenta no seu trabalho um exemplo que utiliza uma fórmula para a determinação da frequência básica de vibração do condutor, que não depende das características do condutor. Esta frequência básica de vibração é representada por:

$$f_b = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (2.8)$$

Onde,  $f_b$  é a frequência básica de vibração do condutor [Hz],  $g$  é a aceleração da gravidade igual a  $9,807 \text{ [m/s]}$  e  $l$  é a flecha do condutor [m].



Segundo a empresa Marte Engenharia (2009) a flecha para o vão de 600m adotada na memória de cálculo do condutor CAL 1055 kcmil é igual a 23,81m, então:

$$f_b = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{9,807}{23,81}} = 0,10 \text{ Hz} \ll f = 6,00 \text{ Hz (adotada)}$$

O resultado acima mostra que o valor da frequência básica de vibração do condutor é muito menor que a frequência de ressonância para o condutor, o que pode ser a primeira informação de que o condutor estudado não sofrerá danos por fadiga causadas pelas forças de vento.

A figura 2.9 representa a evolução da esteira de vórtices em relação ao aumento do número de Reynolds.

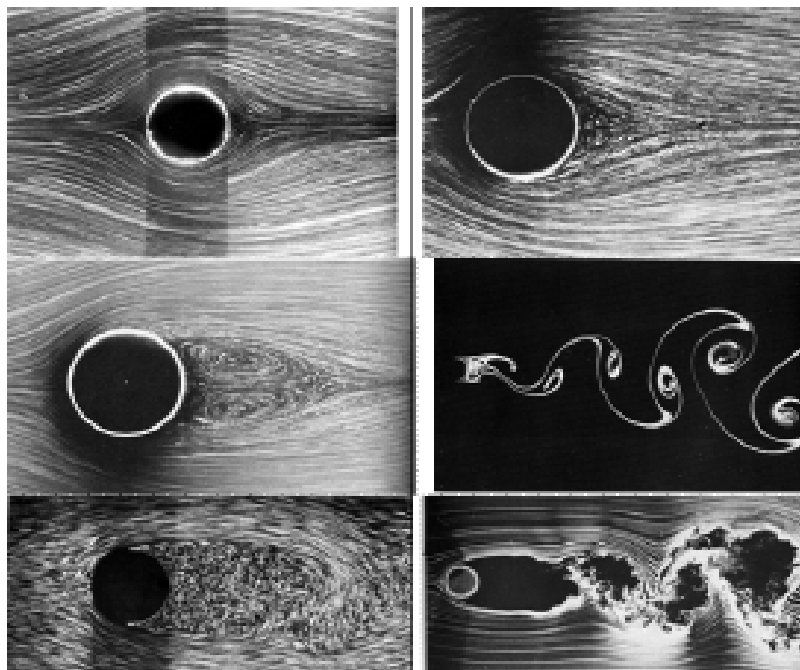


Figura 2.9 - Esteiras de vórtices em relação a variação do número de Reynolds, da esquerda para a direita (1,1)  $R_e = 1,1$ ; (1,2)  $R_e = 9,6$ ; (2,1)  $R_e = 26$ ; (2,2)  $R_e = 140$ ; (3,1)  $R_e = 2000$ ; (3,2)  $R_e = 10000$ , (EPRI, 2009).

A figura 2.9 mostra, da esquerda para a direita, que enquanto o número de Reynolds não ultrapassa a 5, o fluido que se move da esquerda para a direita apresenta tanto a barlavento como a sotavento do cilindro estacionário uma simetria no escoamento, que é gradualmente modificada quando o número de Reynolds aumenta. A partir do número de Reynolds maior que 5, o escoamento a sotavento começa a se tornar mais alongado e quando o número de Reynolds se aproxima de 26 começa a aparecer redemoinhos a sotavento do cilindro estacionário. A partir do número de Reynolds maior que 35 a trilha começa a oscilar de forma periódica, mais

permanece laminar até que o número de Reynolds esteja próximo de 170. A medida que o número de Reynolds for aumentando, o desprendimento de vórtices permanece regular, porém o estado será modificado por causa da transição do escoamento laminar para escoamento turbulento. Progressivamente a esteira se moverá para uma situação de cisalhamento e então para a situação de fronteira. As duas últimas fotos mostram o fluxo do fluido em torno de um cilindro estacionário quando o número de Reynolds é igual a 2000 onde a camada na fronteira é laminar e em seguida separa-se para formar uma camada de cisalhamento. Quando o número de Reynolds é igual a 10000 o padrão do fluxo é quase idêntico e pode-se deduzir que variáveis sem dimensões como o número de Strouhal e coeficientes de força irão variar muito pouco nesta faixa. De acordo com EPRI (2009) os casos particulares de um cilindro estacionário cujo diâmetro varia de 5mm a 50mm e a velocidade de vento variar de 1m/s a 10m/s, o número de Reynolds pode variar de valores de 350 a 3500 e nestes casos o número de Strouhal pode ser determinado através da figura 2.10.

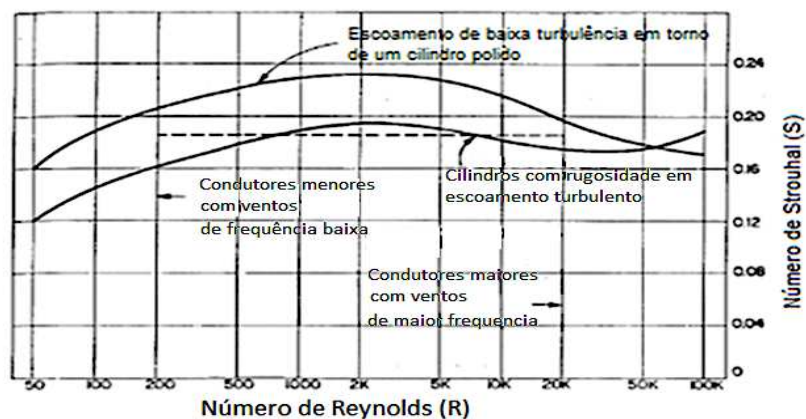


Figura 2.10 - Relação entre o número de Reynolds e o número de Strouhal (EPRI, 2009, modificado).

A vibração eólica uma vez iniciada é auto excitada pela ação contínua do vento, que introduz energia ao sistema até alcançar uma amplitude de saturação onde a taxa de energia dissipada pelo auto amortecimento do condutor resulta no acoplamento de modos próximos em frequência e a vibração geralmente apresenta variações na amplitude devido ao fenômeno de batimentos, que é atribuído a geração da vibração por duas ou mais fontes. Isto é explicado pelo fato de que a velocidade do vento varia no tempo e no espaço.

## 2.5 PRINCÍPIO DO EQUILÍBRIO DE ENERGIA

O princípio básico do método do equilíbrio de energia é determinar o valor da amplitude de flexão para cada frequência de vento. Este método é baseado no conhecimento de que a energia transmitida pelo vento sobre um condutor deve ser dissipada pela capacidade de auto amortecimento do próprio condutor e quando não for possível, também pelo uso de amortecedores.

De acordo com Wolf *et al.* (2008), o mecanismo da formação da esteira de vórtices de Von Karman é muito complexo e por isso os dados da influência da força do vento sobre um condutor difere significativamente de pesquisador para pesquisador. Além disso as características mecânicas do condutor, como por exemplo: a rigidez a flexão, as características do diâmetro na flexão e a capacidade de auto amortecimento, dependem de alguns parâmetros, como por exemplo, da maneira como foi fabricado o condutor, da tensão de tração ou de esticamento no condutor, da frequência da vibração natural do condutor e das amplitudes da vibração e da temperatura do ambiente.

Uma vez que alguns destes parâmetros são difíceis de estimar, o método do princípio do equilíbrio de energia baseado em uma equação algébrica não-linear, por ser prático e a favor da segurança passou a ser muito utilizado pelos pesquisadores e projetistas, porém depende dos seguintes pressupostos:

- a) O método do equilíbrio da energia não considera a rigidez a flexão do condutor e a tensão de tração ou esticamento que atua no condutor e considera a massa do condutor como uniforme em toda a extensão do vão;
- b) O método considera que o vão do condutor deve ser fixado nas extremidades na posição horizontal e que os grampos ou braçadeiras de suspensão deverão estar na mesma elevação;
- c) O método considera que o fluxo de vento é sempre constante, uniforme e na direção horizontal e que o condutor vibra como uma onda estacionária na direção vertical, como se fosse composto por cilindros rígidos infinitesimais, que absorvem a energia do vento de acordo com as suas amplitudes de deslocamento.

Segundo Wolf *et al.* (2008) o método do equilíbrio de energia tem algumas limitações relacionadas aos efeitos do movimento das ondas e as contribuições de outros modos de vibração, pois principalmente com referência a este último aspecto o método pressupõe apenas a existência de um único modo de vibração estacionário, que é aquele relacionado a frequência da esteira de vórtices de Von Karman.

Wolf et al. (2008) sugerem que quando forem determinadas as tensões de flexão perto das extremidades do vão através das medições das amplitudes de deslocamentos, devam ser levadas em conta a influência da rigidez a flexão do conjunto condutor e acessórios (grampos ou braçadeiras) nas medidas das amplitudes de deslocamentos. Outro fator importante comentado no trabalho diz respeito sobre a massa do amortecedor, que pode afetar os modos naturais de vibração e desta forma alterar a dissipação da energia total.

De acordo com IEEE (2015) o princípio de equilíbrio de energia pode ser expresso pela seguinte equação:

$$(P_w)_{tot} = P_c + \sum_n (P_d)_n \quad (2.9)$$

Onde,  $(P_w)_{tot}$  é a energia total do vento<sup>8</sup> [W],  $P_c$  é a energia total dissipada pelo auto amortecimento do condutor<sup>9</sup> [W/m] e  $(P_d)_n$  é a energia dissipada por  $n$  amortecedores [W].

### 2.5.1 Características do Princípio do Equilíbrio de Energia

Conforme Diana (2011) o método de equilíbrio de energia pode ser facilmente entendido através da figura 2.11. Nesta figura é possível observar que para entender o método do equilíbrio de energia é preciso levar em conta o comportamento mecânico do condutor e o aspecto aerodinâmico da esteira de vórtices.

A figura 2.11, também mostra que quanto maior a eficiência do sistema de amortecimento em dissipar a energia do vento, que atua sobre o condutor, menor será a amplitude de vibração e com ela menor será a tensão de flexão e a deformação de flexão e isto tem efeito direto na vida útil do condutor.

---

<sup>8</sup> Uma boa aproximação para se determinar a intensidade do vento que incide sobre um condutor singelo ou um condutor constituído de feixes de fios pode ser obtida por estudos feitos em ensaios em um túnel de vento. A energia total do vento corresponde a frequência da esteira de vórtices de Von Karman obtida por uma dada velocidade do vento.

<sup>9</sup> A energia dissipada pelo auto amortecimento do condutor e por amortecedores instalados podem ser determinadas, também, através de ensaios em laboratórios.

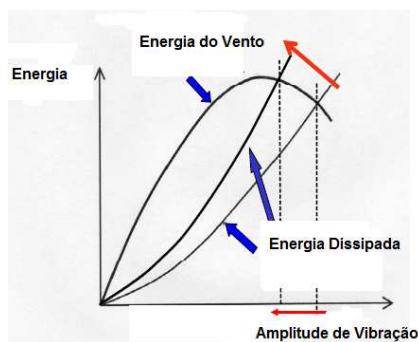


Figura 2.11 - Representação gráfica do método do equilíbrio de energia (Diana, 2011, modificado).

- **Energia do Vento**

A energia disponível no vento varia conforme a sua velocidade elevada ao cubo, de modo que a compreensão das suas características é fundamental para o estudo da viabilidade econômica da sua exploração, como também para prevenir os efeitos danosos, que podem causar em uma estrutura qualquer ou mesmo em um condutor de energia elétrica. Sob o ponto de vista da energia eólica, a característica mais marcante do vento é a sua variabilidade tanto geograficamente quanto em relação ao tempo. Em larga escala, a variabilidade geográfica existe pelo fato de haver muitas regiões com diferentes climas no mundo e por isto existem regiões com mais vento do que outras. Este fato ocorre pela diferença de latitudes, que afetam a quantidade de insolação. Localmente, conforme pode ser visto na figura 2.12 é o relevo, que tem um efeito importante no vento. No topo das colinas e montanhas a velocidade do vento é maior do que nos vales ou em terrenos elevados protegidos por árvores ou construções. Em um determinado local, a variabilidade em relação ao tempo pode ser explicada pela quantidade de vento, que pode variar de um ano para o outro ou mesmo em décadas. Estas variações não são bem conhecidas e dificultam previsões precisas.

Segundo IEEE (2015) existem, além do relevo outros fatores que influenciam a intensidade do vento que incide em um condutor, entre elas, o comprimento do vão da linha, a direção do vento, a velocidade do vento, o diâmetro do condutor, a amplitude de vibração e a frequência natural do condutor. Porém, as que mais influenciam na intensidade do vento são: o comprimento do vão, o diâmetro do condutor, a amplitude de vibração e a frequência natural do condutor.

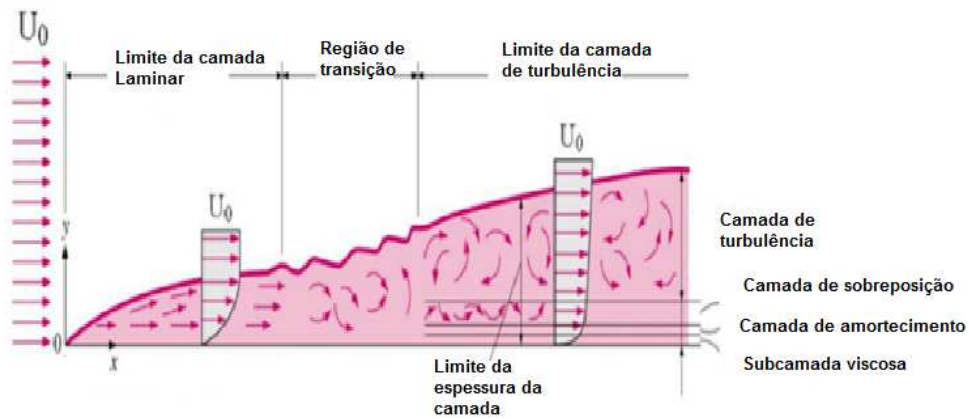


Figura 2.12 - Tipo de escoamento causado pelo relevo do solo (Diana, 2011, modificado).

De acordo com Lilien (2013) a intensidade do vento que atua sobre um cabo condutor pode ser determinada da seguinte maneira:

$$P_W = Ld^4 f^3 F_n \left( \frac{Y}{d} \right) \quad (2.10)$$

Onde,  $P_W$  é a energia mecânica do vento sobre todo o vão do condutor [W],  $L$  é o comprimento do vão [m],  $d$  é o diâmetro do cabo condutor [m],  $f$  é a frequência de vibração ou frequência de Strouhal [Hz],  $F_n \left( \frac{Y}{d} \right)$  é a função de redução de energia obtida através de experimentos em túnel de vento para um escoamento laminar [ $Wm^{-1}/Hz^3m^4$ ] e  $Y$  é a amplitude de vibração, pico a pico na região dos anti-nós [m].

Na fórmula acima, apenas as incógnitas,  $\left( F_n \left( \frac{Y}{d} \right) \right)$  e  $(Y)$  não são facilmente encontradas em tabelas de condutores.  $\left( F_n \left( \frac{Y}{d} \right) \right)$  é obtida por meio de testes em túnel de vento e  $(Y)$  pode ser obtida por diversas maneiras, inclusive por meio de uma abordagem simplificada feita no campo e na região próxima aos grampos ou braçadeiras de fixação.

Wolf *et al.* (2008) e Kasap (2012), por exemplo, adotam nos seus trabalhos o mesmo valor da função de redução de energia  $\left( F_n \left( \frac{Y}{d} \right) \right)$  que é estabelecido na norma do CIGRÉ (1998). Porém comentam que os valores determinados em ensaios no túnel de vento por pesquisadores, como os apresentados na figura 2.13 sofrem dispersões em escala logarítmica devido aos efeitos tridimensionais do escoamento do vento, da turbulência do vento no túnel de vento, da rigidez e da rugosidade do cilindro e do número de Reynolds.

No seu trabalho Kasap (2012) comenta sobre os cuidados que os pesquisadores devem tomar para tornar estes valores mais precisos e convergentes e também cita três métodos polinomiais para a determinação na prática e sem o uso de um ensaio de túnel de vento do valor da função de redução de energia  $\left(F_n \left(\frac{Y}{d}\right)\right)$ .

- Função polinomial Riegert & Currie (1991).

$$F_n \left(\frac{Y}{d}\right) = 807,4 \left(\frac{Y}{d}\right)^{1953} - 767,6 \left(\frac{Y}{d}\right)^2 - 3,2 \left(\frac{Y}{d}\right)^3 - 78,2 \left(\frac{Y}{d}\right)^4 \quad (2.11)$$

- Curva Diana & Falco (1971).

$$F_n \left(\frac{Y}{d}\right) = \sum_{n=0}^9 a_n X^n \quad \text{e} \quad X = \log_{10} \left(2y_0/D\right) \quad (2.12)$$

Onde,  $a_0 = 1,26575$ ,  $a_1 = 1,69387$ ,  $a_2 = -1,08622$ ,  $a_3 = -12,7859$ ,  $a_4 = -34,162$ ,  
 $a_5 = 43,7526$ ,  $a_6 = -31,5830$ ,  $a_7 = -13,1900$ ,  $a_8 = -2,96931$  e  $a_9 = -0,27980$ .

- Curva média entre Carroll (1936) e Diana & Falco (1971).

$$F_n \left(\frac{Y}{d}\right) = -99,73 \left(\frac{Y}{d}\right)^3 + 101,62 \left(\frac{Y}{d}\right)^2 + 0,1627 \left(\frac{Y}{d}\right) + 0,2256 \quad (2.13)$$

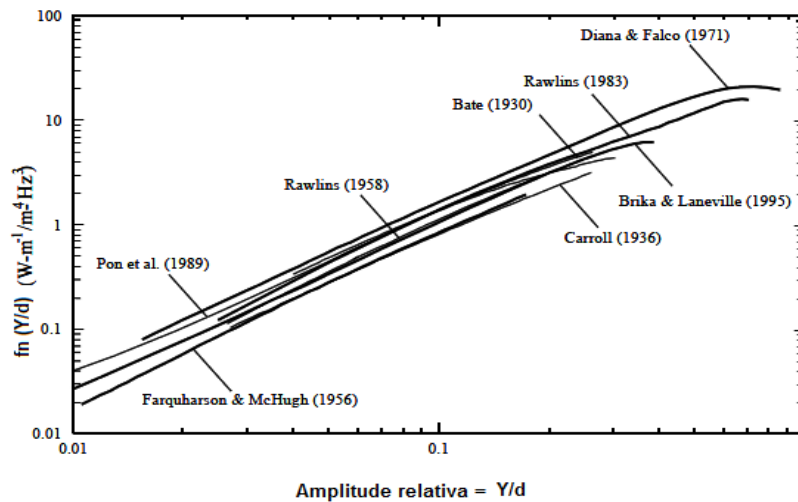


Figura 2.13 - Função de redução de energia versus amplitude de vibração reduzida (Kasap, 2012, modificado).

- **Auto amortecimento do cabo condutor**

A capacidade de auto amortecimento de um condutor em dissipar a energia do vento depende do seu diâmetro e da tensão de tração ou de esticamento atuante sobre ele. Quanto maior a tensão de tração ou esticamento menor será a sua capacidade em atenuar os efeitos da vibração.

Segundo Lilien (2013) quanto maior as tensões de tração sobre um condutor constituído por fios, mais apertados e bloqueados ficarão os fios nas camadas e, portanto, menor será o atrito entre eles e a capacidade de auto amortecimento do condutor. Sendo assim, os condutores constituídos por fios são mais eficientes em dissipar a energia do vento do que os condutores singelos.

Pestana *et al.* (2016) apresentaram um trabalho sobre um estudo experimental e teórico do efeito da tensão média<sup>10</sup> na resistência à fadiga do condutor CAL 1055 MCM, que é objeto de estudo deste trabalho e concluíram que o aumento da tensão sobre o condutor reduz a sua capacidade de resistência a fadiga e, por conseguinte a sua vida útil. São através de testes em laboratório usando uma estação semelhante à mostrada na figura 2.14, seguindo as especificações IEEE (1978) e CIGRÉ (1979), que se pode determinar as amplitudes de vibrações e as frequências de um condutor com uma certa precisão e, por conseguinte a sua capacidade de auto amortecimento.

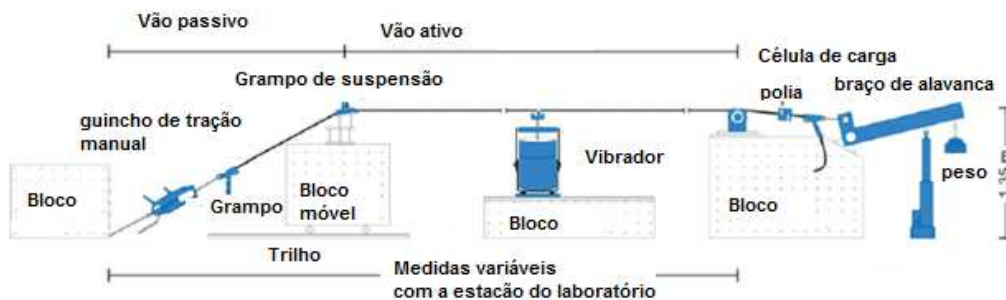


Figura 2.14 - Estação de teste para ensaios de auto amortecimento e abrasão (*fretting*) em um condutor (Vilela, *et al.*, 2013).

Segundo IEEE (2015) e Lilien (2013) a intensidade do vento dissipada pelo cabo condutor pode ser determinada da seguinte maneira:

$$P_C = K \frac{Y^l f^m}{T^n} \quad (2.14)$$

Onde,  $P_C$  é a energia dissipada pelo condutor por unidade de comprimento [W/m],  $Y$  é a amplitude máxima pico a pico [m],  $f$  é a frequência de vibração [Hz],  $T$  é a tensão no condutor [kN],  $l$  é o expoente da amplitude,  $m$  é o expoente da frequência,  $n$  é o expoente da tensão e  $k$  é o fator de característica do condutor.

10 A tensão média ou EDS (Every Day Stress) ou UTS (Ultimate Tensile Strength) significam uma porcentagem entre 18 a 20% da Resistência última a tração, que é a maior solicitação mecânica que um condutor suportará quando um esforço é aumentado gradualmente até que aconteça a sua ruína ou ruptura.



$$K = \frac{d}{\sqrt{RSm}} \quad (2.15)$$

Onde,  $d$  é o diâmetro do condutor [mm],  $RS$  é a força considerada [kN],  $m$  é a massa por unidade de comprimento [kg/m].

Os expoentes ( $l$ ), ( $m$ ) e ( $n$ ) na equação (2.14) são obtidos através de ensaios de laboratórios. A tabela 2.3 mostra que os valores destes expoentes variam de laboratório para laboratório, de condutor para condutor e de ensaio para ensaio. As diferenças mesmo que moderadas podem levar a valores bem diferentes do auto amortecimento. Por isto, para determinar valores mais precisos, sempre que possível o projetista de uma linha de transmissão deverá solicitar que sejam feitos ensaios de laboratório específicos para o condutor escolhido e comparar os resultados com ensaios no campo.

Lilien (2013) emprega, como exemplo no seu trabalho os valores dos expoentes ( $l$ ), ( $m$ ) e ( $n$ ) determinados por Noiseux (1991). Desta forma a equação (2.14) segundo Lilien passa a ser:

$$P_C = K \frac{Y^{2,44} f^{5,63}}{T^{2,76}} [\text{W/m}] \quad (2.16)$$

Igualando as equações (2.14) e (2.15) pode-se determinar o auto amortecimento reduzido de um condutor através da seguinte equação.

$$\frac{P_C}{d^4 f^3} = K \frac{1}{d^{1,56} T^{2,76}} f^{2,63} \left(\frac{Y}{d}\right)^{2,44} [\text{Ws}^3/\text{m}^5] \quad (2.17)$$

Tabela 2.3 - Expoentes da fórmula de dissipação de energia (Lilien, 2013, modificado).

Valores dos expoentes $l$ ; $m$ e $n$					
Ensaio/ laboratórios	$l$	$m$	$n$	Método	Comp. do vão (m)
Tompkins <i>et al.</i> (1956)	2,3 – 2,6	5,0 – 6,0	1,9	ISWR	36
Claren & Diana (1969)	2,0	4,0	2,5–3,0–1,5	PT	46
Seppa (1971)	2,5	5,75	2,8	ISWR	36
Noiseux (1991)	2,44	5,63	2,76	ISWR	63
Rawlins (1983)	2,2	5,4		ISWR	36

A Tabela 2.3, na coluna “Método”, informa dois tipos de ensaios de medição: ISWR (*Inverse Standing Wave Ratio Method*) ou método da razão inversa da onda estacionária e PT (*Power Method*) ou método da potência. No método “PT”, a energia criada pelo vibrador é medida para uma determinada faixa de frequência e amplitude do condutor e é igual a energia dissipada por todo o sistema (condutor e acessórios de fixação). No método “ISWR”, a energia dissipada pelo condutor é igual a um fluxo de energia na região próxima ao vibrador menos o fluxo de energia na região próxima à fixação do condutor e neste caso não são incluídas as energias nos terminais de fixação.

Segundo Kasap (2012) o método “PT” por fixar as extremidades do condutor não é muito preciso e por esta razão quando for usado deverá ser utilizadas articulações para as fixações das extremidades do condutor. De acordo com Kasap (2012) o fator de característica do condutor “ $k$ ” varia de 1,5 a 2 para condutores compostos de material convencional.

Embora os projetos e as tecnologias para a fabricação de condutores tenham evoluído significativamente com o passar dos anos, ainda são utilizadas metodologias clássicas para os ensaios de auto amortecimento de condutores. O método de ensaio mais executado em laboratório para a determinação das propriedades de auto amortecimento de um condutor é o especificado pelo instituto IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*): *IEEE Std 563-1978, “IEEE Guide on Conductor Self-Damping Measurements”*.

- **Amortecimento do cabo condutor por amortecedores**

Segundo IEEE (2015) a intensidade do vento dissipada pelo amortecedor pode ser determinada da seguinte maneira:

$$P_d = \frac{1}{2} F_v v \cos \varphi \quad (2.18)$$

Onde,  $P_d$  é a energia dissipada pelo amortecedor [W],  $F_v$  é a força de reação [r.m.s],  $v$  é a velocidade [r.m.s] e  $\varphi$  é o ângulo fase entre a força de reação e a velocidade.

De acordo com Diana (2011) o funcionamento da dissipação de energia pelo movimento de um amortecedor ocorre a partir do momento que o condutor começa a se mover verticalmente. A medida que a amplitude deste deslocamento aumenta, também aumenta a resposta do amortecedor em dissipar a energia resultante da energia do vento menos a energia dissipada

pelo auto amortecimento do condutor. Quanto maior a força proveniente do amortecedor menor será a amplitude de vibração do cabo condutor. A razão entre o nó e o anti-nó de uma onda proveniente da amplitude de vibração é determinada em laboratório pelo método “ISWR”, comentado anteriormente e é considerada a medida da eficiência do amortecimento.

Portanto, como mostra a figura 2.15 abaixo, a melhor eficiência de um amortecimento não é necessariamente usar um amortecedor, que aplica uma grande força ao condutor e sim um amortecedor adequado e bem posicionado.

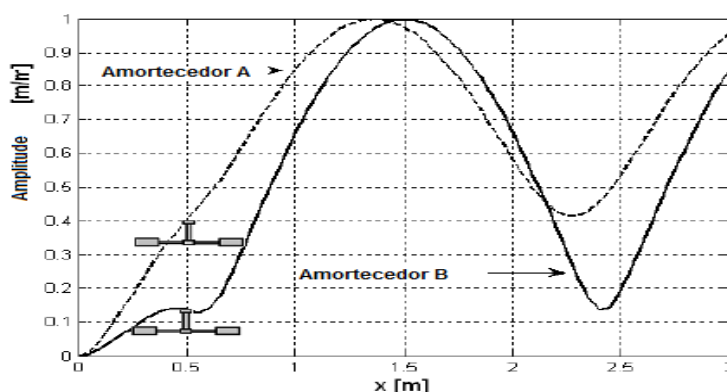


Figura 2.15 - Peso do amortecedor B > Peso do amortecedor A (Diana, 2011, modificado).

Conforme a figura 2.16 o emprego do amortecedor Stockbridge<sup>11</sup> é até o momento o melhor caminho para se reduzir as amplitudes de vibração. Este tipo de amortecedor não só dissipa a energia através do deslizamento do cabo mensageiro como também atua como um amortecedor de vibração dinâmica. Este amortecedor tem dois pesos ou sinos, que são fixados no final de um eixo flexível e deve ser sintonizado com a frequência natural do cabo condutor. Quando uma onda de vibração passa pelo local onde ele está fixado, a braçadeira de fixação do condutor oscila para cima e para baixo.

Este movimento causa uma flexão do cabo mensageiro e cria um movimento diferente entre a braçadeira do amortecedor e os pesos do amortecedor. A instalação assimétrica, como pode ser vista na figura 2.16 permite que se possa varrer diferentes frequências do vento ou em outras palavras este arranjo cria frequências naturais adicionais, que tendem a nivelar a curva da resposta da frequência. A energia de vibração é então, dissipada através do atrito entre os fios do próprio condutor (auto amortecimento) e também através do cabo mensageiro em torno das

11 George H. Stockbridge inventou o amortecedor em 1920 quando trabalhava como engenheiro na empresa de eletricidade americana *Southern California Edison*. A patente Americana foi conseguida em 1928. Inicialmente o amortecedor tinha os pesos em concreto e instalados de forma simétrica.

frequências de ressonância do amortecedor. A escolha do melhor peso do amortecedor em uma montagem simétrica ou assimétrica envolve o equilíbrio entre o desempenho do amortecedor tanto nas frequências que causam um movimento fraco do condutor como também nas frequências de ressonância onde o condutor tem movimentos com amplitudes maiores.



Figura 2.16 - Amortecedor do tipo Stockbridge assimétrico (Irvine, 2006).

De acordo com IEEE (2015) os dados atualmente mais comuns da dissipação de energia por meio do uso de amortecedores são tabelados e obtidos por meio de ensaios em laboratórios independentes contratados pelos fornecedores do equipamento. Estes laboratórios seguem as prescrições das normas da IEC (1998) e IEEE (1993), porém para obter dados mais precisos do impacto da absorção da energia pelo amortecedor os ensaios deverão sempre que possível serem realizados também no campo.

- **Espaçador Amortecedor Preformado – AGSD**

É o equipamento utilizado na linha de transmissão em 500 kV entre as cidades de Oriximiná e Lechuga e que faz parte do estudo deste trabalho. O espaçador amortecedor tem a função de manter separado e estável um feixe de condutores evitando as oscilações de subvão. O mecanismo de amortecimento é baseado na dissipação da energia de vibração dos subcondutores por meio das articulações flexíveis de amortecimento compostas por elastômeros.

Para que os efeitos destas vibrações sejam em parte ou no todo reduzidas é necessário que o quadro do amortecedor desenvolva forças inerciais capazes de estimular as rotações dos braços do espaçador amortecedor e assim permitir que o elastômero absorva esta energia por deformação. O espaçador amortecedor é geralmente utilizado em linhas de transmissão com tensão igual ou superior a 400 kV e em condutores de alumínio (CAA) ou (ACSR) e (CA) ou (ASC), como também nos condutores de liga de alumínio (CAL). As figuras 2.17 e 2.18 mostram os modelos mais utilizados. O espaçador amortecedor tem baixo peso relativo e é de fácil inspeção.



Figura 2.17 - Amortecedores do tipo Espaçador Amortecedor (PLP, 2011).



Figura 2.18 - Espaçador Amortecedor quádruplo (PLP, 2011).

Segundo Anderson *et al.* (1995) um modelo matemático para projetar um espaçador amortecedor não pode substituir completamente a necessidade de testes em laboratórios ou no campo, entretanto pode ser uma ferramenta valiosa, tanto no projeto quanto na determinação de um número mínimo de equipamento para cobrir todo o vão de uma linha de transmissão e otimizar o espaçamento entre eles.

De acordo com (Diana, 2011) o princípio do equilíbrio de energia tem algumas limitações, conforme a seguir:

1. A variação da velocidade do vento, que varia no espaço e no tempo pode excitar vários modos de vibração simultaneamente e desta forma a amplitude de vibração ao longo do vão exibe um padrão de pulsação não conhecida.
2. Uma vez iniciado o fenômeno da vibração eólica ele é autossustentado pelo efeito de bloqueio.
3. A presença de mais de um modo de vibração causa o desaparecimento dos nós de vibração e desta forma o fenômeno de vibração torna-se instável e complexo.

## CAPÍTULO 3

### 3. FADIGA EM CONDUTORES AÉREOS - REVISÃO TEÓRICA

#### 3.1 INTRODUÇÃO

De acordo com Waterhouse (1992) foi em 1911 a primeira vez que foi relatada a palavra *fretting* por Eden *et al.* (1911), cujo trabalho relatou a descoberta da presença de detritos de um óxido marrom originados pelos apertos de peças de aço de uma máquina.

Em 1927 Tomlinson realizou a primeira investigação deste processo e para isto projetou duas máquinas, que produziam movimentos de rotação de pequena amplitude entre dois anéis, cujo movimento era controlado por um sistema de alavancas. Neste ensaio os detritos reagiram quimicamente com o oxigênio e se tornaram óxido de ferro vermelho. Foi a partir do ensaio de Tomlinson, que se passou a falar em “*fretting corrosion*”. Tomlinson, também, estabeleceu que o processo poderia ser causado por movimentos com amplitudes muito pequenas na casa de alguns milionésimos de polegada (-125 nm) e que o processo ocorria devido o deslize entre as peças.

O efeito do *fretting* ou abrasão nas propriedades de fadiga foi pela primeira vez investigado por Warlow-Davies (1941), que mostrou a relação entre o *fretting* e a fadiga.

Fenner e Field (1958) demonstraram que o fenômeno do *fretting* acelerava o processo da iniciação das trincas.

Waterhouse (1961) publicou um trabalho sobre a recristalização da ferrite na região fretada de um aço temperado.

Nishioka e Hirakawa (1969 e 1972) publicaram uma série de trabalhos sobre o fenômeno da fadiga por *fretting* em locomotivas e vagões da estrada de ferro de alta velocidade de Shinkansen.

Liu *et al.* (1957) foram os primeiros a analisar a fadiga por *fretting*. Atualmente têm sido realizadas centenas de pesquisas sobre fadiga por *fretting* e por causa disso o conhecimento sobre o assunto tenha tido uma grande evolução nos últimos anos.

#### 3.2 MECANISMO DA FADIGA POR *FRETTING*

Uma das grandes dificuldades sobre o estudo do mecanismo da fadiga por *fretting* têm sido reproduzir as condições mecânicas reais do fenômeno em laboratório, particularmente no que diz respeito as tensões de contato e as amplitudes do movimento.

Conforme se pode observar na figura 3.1 a ruptura dos fios externos do condutor é uma parte do processo e acontece nas regiões próximas dos grampos de suspensão ou de ancoragens mais segundo (EPRI, 2009), também, podem acontecer nas regiões próximas dos espaçadores, dos amortecedores ou dos sinalizadores quando o conjunto condutor mais equipamento aumenta a rigidez à flexão e desta forma dificulta a vibração livre do condutor. Nas regiões próximas aos grampos de suspensão ou de ancoragens os condutores estão sujeitos além da curvatura máxima de flexão, também as forças de compressão ou contato.

De acordo com Azevedo *et al.* (2009) estas forças de contato podem ser estáticas ou cíclicas sendo que as tensões estáticas são aquelas que atuam axialmente no condutor, como as tensões causadas pelo peso próprio do vão do condutor e do aperto da braçadeira ou do grampo e também as tensões de flexão causadas pela mudança alternada da curvatura do condutor. As tensões cíclicas são aquelas causadas pelo vento quando aplica um torque interno no condutor tentando desenrolar os fios. Nesta situação uma variação da tensão excita o modo de vibração torsional, que dependendo da tensão de aperto da braçadeira pode causar danos ao condutor pela abrasão ou *fretting*.

O trabalho apresentado por Azevedo *et al.* (2009) descreve a pesquisa sobre a ocorrência de danos causados pelo *fretting* em um condutor de 460 kV de uma linha de transmissão sobre o Rio Paraná, no estado do Paraná e que rompeu em 2002. A pesquisa de Azevedo *et al.* (2009) inicialmente detectou que o condutor rompeu por *fretting* dos fios devido as oscilações de subvão e teve como proposta o estudo por meio de ensaios e teoria para otimizar a performance do conjunto condutor/braçadeira ou grampo. Os ensaios a fadiga do condutor de 460 kV do tipo ACSR Grosbeak foram executados em uma bancada semelhante a da figura 2.14, com um vão passivo igual a 5m e um vão ativo igual a 42m. No final, concluíram que o início da trinca por *fretting* seguida da sobrecarga de cisalhamento causaram a ruptura dos primeiros fios de alumínio do condutor. Tal fato ocorreu tanto para os valores de amplitudes de flexão igual a 0,9 mm quanto para 1,3 mm e para as braçadeiras as conclusões foram que a microestrutura não modificada da braçadeira superior constituída pela liga AL - 17% Si apresentou partículas ásperas de Si distribuídas de forma heterogênea enquanto que a braçadeira inferior com microestrutura modificada e fundida em liga de AL - 13% Si apresentou partículas refinadas de Si distribuídas de forma homogênea. Para ambas a partes da braçadeira ou do grampo ocorreram a formação de detritos abrasivos, que poderiam ser minimizados pela seleção de materiais.

Reinke *et al.* (2017) mostraram que o processo de fadiga por *fretting* ocorre na região de contato entre dois fios de camadas adjacentes de um condutor quando submetidos a ação de forças

oscilatórias tangenciais de pequenas amplitudes, que causam um micro deslizamento entre eles no ponto de contato com uma grande concentração de tensão e o aparecimento do óxido de alumínio  $AL(OH)_3$ . O óxido de alumínio é muito duro e junto com as tensões de contato podem provocar a partir daí o aparecimento de micro trincas nas superfícies dos fios. Como as trincas expandem em profundidade, a sua propagação é diretamente influenciada pelas flexões que ocorrem no condutor. O trabalho de Reinke *et al.* (2017) contém os procedimentos e o resultado dos ensaios feitos em dois condutores do tipo CAL (Condutor Alumínio Liga) com pequena diferença na composição química e na formação dos fios. As tensões de tração foram as mesmas e geralmente são definidas em projeto em torno de 20% UTS<sup>12</sup>. A estação ou bancada de testes foi semelhante à da figura 2.14 com vão ativo igual a 40 m. No estudo Reinke *et al.* (2017) concluem que tanto a diferença estrutural quanto a diferença na composição química de um condutor em relação ao outro reduzem o limite da resistência à tração e a dureza, como também o limite de escoamento, a resistência a fadiga e a vida útil.

Segundo Hoepfner (1992) as fases do mecanismo da fadiga por *fretting* são: 1ª Fase- Começa na superfície do condutor, 2ª Fase- Nucleação ou formação das trincas, 3ª Fase- Propagação das trincas e 4ª Fase- Instabilidade. Também, de acordo com Hoepfner (1992) os parâmetros, que afetam as falhas causadas pela fadiga são:

- 1- Tensão ou carga cíclica – Gera o deslizamento entre as superfícies dos condutores adjacentes e a amplitude depende da intensidade da tensão ou da carga. Proporciona a entrada da energia tanto para a nucleação ou formação das trincas quanto para a sua propagação. O aumento da tensão ou carga cíclica reduz a vida útil do condutor. As interações do processo de *fretting* podem causar a corrosão.
- 2- Tensão ou carga normal – Gera as tensões de contato entre as superfícies dos condutores adjacentes e desta forma produz a maioria dos mecanismos dos danos superficiais diminuindo a vida útil do condutor. A vida útil do condutor pode ser aumentada se for aplicada uma tensão ou carga suficiente para reduzir a amplitude do deslizamento ou mesmo eliminá-la.
- 3- Amplitude do deslizamento – É resultado da intensidade da tensão ou carga aplicada e a sua presença causa os mecanismos de danos nas superfícies dos condutores. Maiores

---

<sup>12</sup> Resistência última a tração é a maior solicitação mecânica que um condutor suportará quando um esforço é aumentado gradualmente até que aconteça a sua ruína ou ruptura. No caso de linhas de transmissão é comum dimensionar as tensões de tração atuantes nos condutores entre 18 a 20% da UTS (Ultimate Tensile Strength), que é equivalente a EDS (Every Day Strength) ou Resistência Última a Tração.



amplitudes de deslizamentos podem estar associadas a uma maior vida útil do condutor, pois causam os desgastes das trincas iniciais.

- 4- Número de ciclos de ocorrência do *fretting* – Quanto maior o número de ciclos de atrito, maior será os danos nas superfícies de contato dos condutores. A formação ou nucleação da trinca depende do tipo de dano causado.
- 5- Geometria dos condutores em contato – Controla, em parte o estado de tensões entre os condutores e conseqüentemente afeta os limites e as taxas de crescimento das trincas. É importante na retenção dos detritos entre as superfícies de contato, pois a presença de detritos afeta as forças de atrito.
- 6- Elasticidade – Afeta tanto o estado de tensões quanto as amplitudes de deslizamentos.
- 7- Dureza – Geralmente as superfícies mais duras têm maior capacidade de resistir aos danos causados por *fretting*, no entanto elas também reduzem a têmpera das camadas superficiais em contato, o que diminui o pré-requisito para a formação ou nucleação das trincas.
- 8- Microestrutura – O tamanho dos grãos e a dureza podem controlar a formação das trincas superficiais, bem como a sua propagação.
- 9- Combinações – Contatos com materiais metálicos iguais promovem a soldagem das asperezas, o que aumenta a produção de detritos e reduz a vida útil do conjunto. As considerações de células galvânicas são importantes. O atrito e as tensões superficiais tangenciais como componentes da fadiga podem ser dramaticamente afetados.
- 10- Rugosidade das superfícies – As superfícies ásperas podem propiciar rotas de fuga dos detritos e desta forma aumentar a vida útil do conjunto, como também incentivar os desgastes e os arranhões produzindo detritos, que causam a redução da vida útil do conjunto.
- 11- Meio Ambiente – Devem ser considerados a temperatura, a umidade e a atmosfera corrosiva. A vida útil de um condutor é normalmente maior no vácuo devido à ausência do oxigênio, que pode formar óxidos, que são mais duros que o material original.

Hoeppner (1992) concluiu que para cada um dos parâmetros acima, há fenômenos de compensação, que se opõe em magnitude ou em condições devido às interações ou das sinergias das variáveis e que por esta razão é importante observar o processo de fadiga por *fretting*. O processo de fadiga é preocupante, pois a ruptura dos fios de um condutor, além de levar a perda

da eficiência da transmissão de energia, também pode levar a ruptura total pela perda da sua resistência ao esforço de tração. Como os condutores consistem em camadas concêntricas de fios montados na forma helicoidal, os contatos entre os fios das camadas adjacentes se dá nos pontos de cruzamento entre eles, como mostra a figura 3.1.

Quando o condutor começa a se movimentar induzido pelas forças do vento, as variações das tensões nos fios de cada camada causam uma certa pressão entre as camadas adjacentes, ao mesmo tempo que o deslizamento entre os fios das camadas adjacentes resulta no atrito entre os mesmos. O atrito entre os fios das camadas adjacentes, por si só não é suficientemente alto para romper os fios, porém esse efeito é agravado pela pressão do aperto da braçadeira ou dos instrumentos de amortecimento, como mostra a figura 3.3.

O movimento do condutor devido à vibração eólica cria um deslizamento em alguns pontos de contatos adjacentes á braçadeira de um equipamento qualquer e a medida que a amplitude de vibração aumenta, também aumentam as tensões dinâmicas de flexão. Em uma determinada amplitude de flexão, os efeitos combinados das tensões de flexão e os danos superficiais devido ao atrito e ao desgaste entre os fios por *fretting* iniciam uma trinca provocada pela fadiga e que se propaga na profundidade do fio do condutor até ocorrer a sua quebra ou ruptura. A fadiga, portanto se inicia pelo processo conhecido por *fretting*, que geralmente é caracterizado pela presença de um pó preto ou óxido de alumínio  $AL(OH)_3$ .

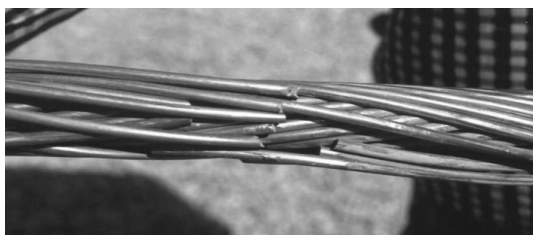


Figura 3.1 - Fios externos de um condutor rompidos pela fadiga (CIGRÉ, 2005).

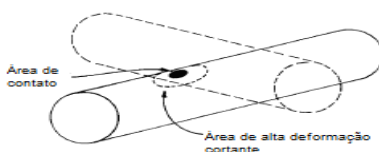


Figura 3.2 - Área de contato entre os fios de camadas adjacentes (EPRI, 2009).



Figura 3.3 - Abrasão dos fios de um condutor pelo aperto da braçadeira (CIGRÉ, 2005).

Vilela *et al.* (2013) citam no seu trabalho que o aparecimento de trincas nos fios de um condutor é mais rápido quando ocorre o fenômeno do *fretting* e desta forma a expectativa da vida útil do condutor passa a ser menor. Porém o deslizamento entre os fios de um condutor, que causa o fenômeno do *fretting*, também desgasta as trincas e desta forma podem impedir que avancem. Diante destes fatos o comportamento de um condutor em relação a abrasão ou *fretting* depende da amplitude de vibração, que influencia o deslizamento e o desgaste na área de contato pelo sistema de aperto das braçadeiras. Atualmente, na fabricação de um condutor tem-se utilizado a lubrificação dos fios para facilitar o deslizamento e diminuir as forças tangenciais e desta maneira reduzir a oxidação e aumentar a vida útil.

### 3.3 LIMITES DA FADIGA COMUMENTE UTILIZADOS

Segundo CIGRÉ (1995) todas as especificações convencionais trabalham com o pressuposto de que os limites de resistência a fadiga existem e são normalmente expressos em tensões e deformações. O primeiro passo para a determinação do limite de fadiga é converter a amplitude de flexão medida em tensão de flexão. Esta conversão pode ser feita pela teoria de Poffenberger e Swart, que têm dado bons resultados e será comentada no capítulo 4 deste trabalho, porém para grampos de suspensão com insertes em elastômeros deve-se fazer adaptações na teoria através de ensaios de testes de vibração em laboratórios. Atualmente são utilizadas as recomendações abaixo obtidas considerando que as medições foram feitas em braçadeiras convencionais aparafusadas, como a da figura 3.4. Existem indícios de que braçadeiras com insertes de elastômeros, como mostra a figura 3.5 podem exibir níveis aceitáveis de limites mais altos.



Figura 3.4 - Braçadeira de aperto aparafusada (CIGRÉ, 2005).



Figura 3.5 - Braçadeira de aperto com elastômero (CIGRÉ, 2005).

### **Curvas S-N** (curvas de Wöhler<sup>13</sup>)

Uma curva S-N (*Stress versus Number of cycles*) é obtida através da realização em laboratório de vários testes de fadiga a flexão. Em cada teste, o condutor é carregado até um certo nível de tensão (18 a 20% EDS ou mais) e vibrado até que os fios, na região de contato comecem a friccionar. Quando alguns dos fios do condutor começam a fraturar, o nível de tensão e o número de ciclos são anotados e os resultados são representados por um ponto na curva.

Os limites de fadiga estabelecidos pelas curvas S-N mostradas na figura 3.6 relacionam as tensões alternadas com o número de ciclos que levam a falha para um dado material. Tanto as tensões alternadas quanto o número de ciclos são exibidos em escala logarítmica.

De acordo com Sonsino (2007) muitos pesquisadores têm provado que mesmo em um regime de alto ciclo de vibrações ainda ocorre uma diminuição da resistência à fadiga quando o número de ciclos aumenta e por isso o projeto de qualquer componente de uma linha de transmissão submetido a um carregamento dinâmico deve considerar os pontos abaixo da curva S-N para evitar a ocorrência de falhas por fadiga.

---

<sup>13</sup> As curvas S-N foram desenvolvidas pelo alemão August Wöhler em 1842 durante uma investigação de um acidente de trem em Versalhes na França. No acidente o eixo da locomotiva rompeu por causa do stress cíclico repetido pelo uso diário.

Pestana *et al.* (2016) apresentam no seu trabalho um estudo experimental e teórico do efeito da tensão média de tração (20% da carga de ruptura) na resistência à fadiga do condutor CAL 1055 MCM, que é o objeto de estudo deste trabalho. Através de ensaios e com os dados coletados traçaram as curvas S-N referentes as tensões média se desta forma avaliaram o impacto destas tensões na vida útil do condutor.

Além de vários estudos que citam o uso da Curva S-N para a determinação da vida útil de um condutor<sup>14</sup> não se pode deixar de citar os estudos de Rolim *et al.* (2007), que utilizaram a teoria de Poffenberger-Swart, cujas equações convertiram as amplitudes de flexão medidas pelo equipamento PAVICA montado em um condutor de uma linha de transmissão de vão igual a 670m sobre o rio Guamá no estado do Pará, em tensões de flexão.

A determinação das tensões de flexão nos fios da camada mais externa do condutor e na região próxima do grampo de suspensão permitiram traçar a curva das tensões acumuladas ou curvas S-N e assim verificar se o condutor poderia ter uma probabilidade de falha por fadiga durante o seu tempo de operação. A norma do CIGRÉ (1995) define os procedimentos necessários para a realização de medições em uma linha de transmissão em serviço para obter dados mais precisos, que permitam conhecer as características do condutor sob a ação das vibrações eólicas e desta maneira tomar decisões precisas para minimizar ou extinguir os riscos de falhas por fadiga.

As decisões são tomadas após a montagem e a análise das curvas S-N. Na figura 3.6, ( $N$ ) representa o número de ciclos ou vida da fadiga antes da falha de um condutor sob diferentes níveis de tensões alternadas de flexão ( $\sigma_s$ ). O critério de falha utilizado na norma do CIGRÉ (1995) é muito utilizado pelos projetistas e leva em conta a quebra de três fios do condutor ou 10% do número de fios ou o que for menor. A Figura 3.6 mostra uma ampla dispersão de limites de fadiga para os seguintes tipos de condutores: 1 – Fio liga de alumínio, 2- Fio de alumínio, 3- Condutor com fios, e 4 – Linha de fronteira segura.

---

14 A regra de Miner leva em conta o tempo de vida mínimo, expresso em anos, durante o qual podem ocorrer os danos ou a deterioração no condutor e serve como um indicador da expectativa de vida útil do mesmo. M. A. Miner desenvolveu em 1945 um dos mais simples modelos de determinação dos danos acumulativos devido as falhas causadas pela fadiga. A regra estabelece que se existirem K níveis de tensão diferentes e o número de ciclos até a falha na i-ésima tensão  $S_i$  for igual a  $N_i$ , então a fração de tempo útil ou de vida consumido é  $C = \sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_i}$ , onde:  $n_i$  é o número de ciclos acumulados na tensão  $S_i$ . Então está equação determina o tempo útil ou de vida consumida em cada nível de tensão. Quase sempre um índice para quantificar os danos pode ser definido como o produto da tensão pelo número de ciclos ocorridos durante a aplicação da tensão, ou seja:  $W_i = n_i \times S_i$ . Como a regra de Miner assume que o dano crítico é igual para todos os níveis de tensão, então:  $W_{falha} = N_1 \times S_1$  e  $C = \sum_{i=1}^K \frac{n_i \times S_i}{N_1 \times S_1}$ , onde:  $C$  é a proporção dos danos acumulados para um valor crítico.

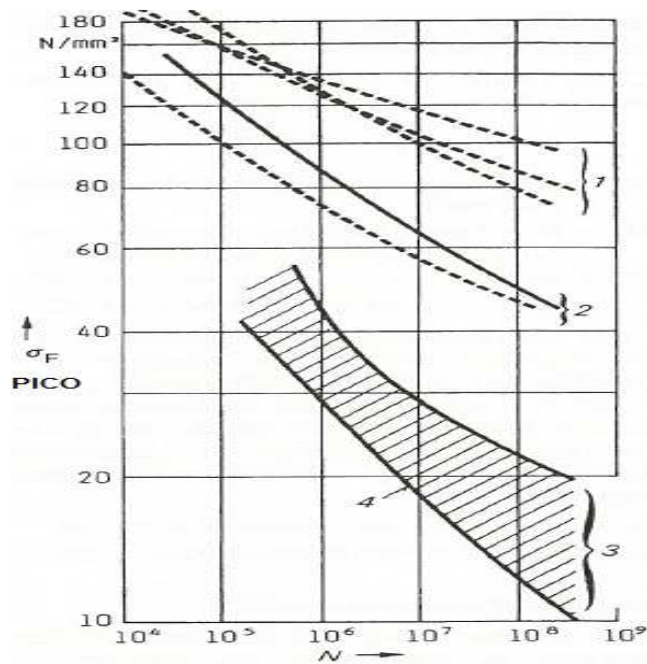


Figura 3.6 - Curvas S-N e Linha de fronteira segura (CIGRÉ,1995).

### Linha de fronteira segura – CIGRÉ (1995)

Segundo CIGRÉ (1995) a linha de fronteira segura é uma derivação da curva S-N obtida em vários testes realizados em laboratórios. Como se pode observar na figura 3.6 ela representa um limite mais baixo e pode-se dizer mais conservador do número de ciclos para vários níveis de tensões e é aplicável tanto em condutores de alumínio como em condutores com liga de alumínio ou em condutores do tipo ACSR e para qualquer tipo de grampo ou braçadeira. A linha de fronteira segura é representada pela seguinte equação:

$$\sigma_s = CN^Z \quad (3.1)$$

Onde,  $\sigma_s$  é a tensão alternada de flexão (zero a pico) [N/mm<sup>2</sup>],  $N$  é o número de ciclos completos até ocorrer a falha na tensão ( $\sigma_s$ ),  $C = 450$ ,  $Z = -0,2$  para  $N \leq 2 \times 10^7$ ,  $C = 263$ ,  $Z = -0,17$  para  $N \geq 2 \times 10^7$ .

Azevedo *et al.* (2009) nos ensaios que fizeram apresentam os testes e os resultados referentes a fadiga por *fretting* em dois condutores semelhantes do tipo ACSR Grosbeak. No teste foram aplicadas aos condutores uma tensão equivalente a 20% UTS. A única diferença foram os valores das amplitudes de flexão. No final dos testes foi plotada uma curva S-N com os dados

dos resultados obtidos e comparados com sucesso com os valores fornecidos pela literatura existente.

### **Limites de resistência - EPRI**

Os limites de resistência segundo EPRI (2009) são definidos pela amplitude de flexão ou pela tensão de flexão para uma combinação de condutores e grampos. Não existem um limite de fadiga bem definido para condutores em alumínio ou em liga de alumínio, mas para estes casos o limite de resistência pode ser definido como sendo igual a uma tensão que resulta na vida da fadiga de  $5 \times 10^8$  ciclos.

Com relação as tensões de flexão os valores definidos por EPRI (1979) para os limites de resistência de condutores do tipo ACSR são respectivamente iguais a 22,5 N/mm<sup>2</sup> para um condutor com uma camada de fios e igual a 8,5 N/mm<sup>2</sup> para um condutor com várias camadas de fios e respectivamente para as amplitudes de flexão (pico a pico) igual ao intervalo de 0,5 a 1,0 mm e igual ao intervalo de 0,2 a 0,3 mm.

### **Nível de deformação - IEEE**

A norma do IEEE (1966) estabelece que o nível máximo de deformação causado pela flexão para um condutor do tipo ACSR sem que ocorra danos por fadiga ainda não pode ser determinado com precisão. Especula-se que o valor de 150 minch/inch (pico a pico) dado para a deformação máxima de flexão como parâmetro é um pouco conservador e valores de 200 minchs/inch pico a pico são seguros. A medida que o método for usado, combinado com a experiência local e outros fatores, entre eles maiores exigências de segurança, serão determinados valores de deformações mais precisos

## **3.4 TESTES PARA A DETERMINAÇÃO DA FADIGA EM UM CONDUTOR AÉREO**

As grandes dificuldades dos testes ou dos ensaios de fadiga por *fretting* em um condutor de eletricidade e em parte já comentado anteriormente é reproduzir as condições reais das causas das falhas do material, sejam elas devido as tensões de contato ou da amplitude dos movimentos ou mesmo devido as condições ambientais onde o material a ser estudado se encontra.

Alterar o projeto de um condutor para que resista aos fenômenos, que causam a fadiga seria interessante, porém é muito dispendioso. Os testes atuais avaliam o material e a sua fabricação em relação a sua susceptibilidade para este tipo de falha, como também, em relação aos efeitos das variáveis mecânicas, como a tensão de contato, a amplitude do deslizamento, o efeito das

tensões residuais, a natureza do acabamento externo e as condições ambientais. Os testes de fadiga estão diretamente relacionados à determinação da vida útil de um condutor e são realizados através de ensaios em laboratório ou de medições no campo de duas variáveis:

- 1- A amplitude de flexão ( $Y_b$ ), que é o valor do deslocamento vertical de um condutor medido a uma distância de 89 mm do último ponto de contato do condutor com o dispositivo de fixação (grampo) ou de amortecimento, conforme mostra a figura 3.7.

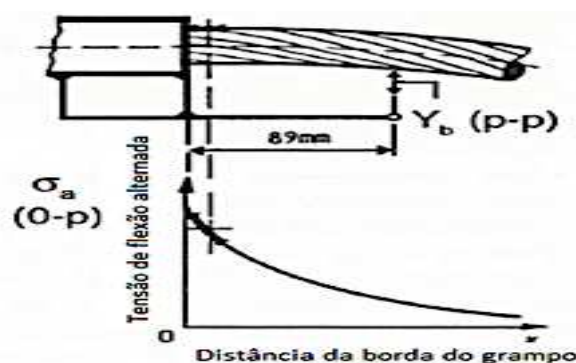


Figura 3.7 - Amplitude da flexão ( $Y_b$ ) (pico a pico) (CIGRÉ, 1995, modificado).

Este método de medição foi desenvolvido pela empresa *Ontario Hydro* há mais de 60 anos e é definido como sendo o deslocamento total (pico a pico) de um condutor medido a uma distância de 3,5 polegadas ou 89 mm do último ponto de contato do condutor. O resultado encontrado é a correlação linear existente entre a amplitude de flexão ( $Y_b$ ) e a tensão de flexão ( $\sigma_a$ ) medida na superfície do condutor. Em 1966 o IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) recomendou a utilização deste método, por ser prático e pelos resultados precisos.

A partir daí e com o uso de uma equação simples desenvolvida pelos pesquisadores Poffenberger e Swart em 1965, cuja teoria será comentada no capítulo 4 deste trabalho, foi possível converter a amplitude de flexão em tensão de flexão. Em 1979 a instituição CIGRÉ (*International Council on the Large Electric Systems*) através do comitê de estudos 22 recomendou um método para determinar a vida útil de um condutor sob as ações das vibrações eólicas. O método faz uso da medição da amplitude de flexão e é baseado nas regras de Miner.

- 2- A amplitude da vibração é o produto da frequência de vibração ( $f$ ) pela amplitude de flexão ( $Y_b$ ). Conforme se pode observar na figura 3.8 a amplitude da vibração é difícil de ser medida em laboratório, pois para que ocorra um mínimo de oscilações ou ondas é necessária uma estação de teste com um condutor de vão muito longo, pois o valor da amplitude de



vibração sofre uma grande influência nas primeiras oscilações ou ondas devidas as varetas de armadura.

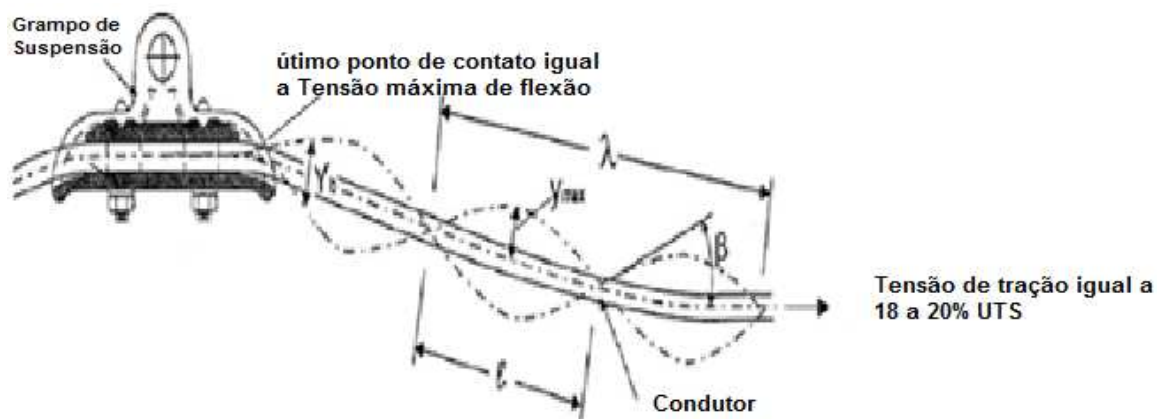


Figura 3.8 - Amplitude da flexão ( $Y_b$ ), amplitude de vibração ( $y_{max}$ ), ângulo de flexão ( $\beta$ ), Comprimento do laço ( $l$ ) e comprimento da onda ( $\lambda$ ) (Kasap, 2012, modificado).

Como já comentado anteriormente, a intensidade das vibrações de um condutor é causada pela incidência do vento e sofrem a influência das características do vento, do relevo do terreno, da altura do condutor em relação ao terreno e da temperatura ambiente, sendo assim a escolha do local onde será feita as medições deverá considerar a maior exposição que o condutor estará sujeito.

Levando em consideração estes fatores o melhor local será onde as temperaturas são mais baixas, o terreno for plano, na passagem de rios, lagos ou pântanos e onde a direção do vento seja predominantemente perpendicular à linha de transmissão. Atualmente existem vários tipos de equipamentos de medição, tanto analógicos como digitais e segundo a norma do CIGRÉ (1995) eles devem ser mais leves quanto possível, atuar numa faixa de amplitude de até 2 mm e medir frequências superiores a 200 Hz.

Tanto o CIGRÉ (1995) quanto o IEEE (1966) fazem recomendações e orientam os passos dos testes de medição no campo, para que as medidas das vibrações nos condutores aéreos feitas por equipamentos alcancem uma precisão aceitável. Os testes realizados em laboratórios também seguem as mesmas recomendações e são executados em bancadas iguais a da figura 2.14.

Vilela *et al.* (2013) apresentaram um estudo de técnicas experimentais para medir as tensões de fadiga em um condutor de uma linha de transmissão utilizando medidores de deformação do

tipo *Strain Gauge* montados como mostra a figura 3.9 e os dados coletados foram transformados pela lei de *Hooke* e comparados com sucesso com a teoria de Poffenberger e Swart.

No trabalho, Vilela *et al.* (2013) comentam que as fissuras no condutor ocorreram nos pontos de contato e foram causadas tanto pelo processo de *fretting* dos fios quanto pelo carregamento cíclico entre o grampo e o condutor ou entre os fios do condutor e que o fenômeno é mecânico e metalúrgico, pois na área de contato ocorre tanto o desgaste como a corrosão.

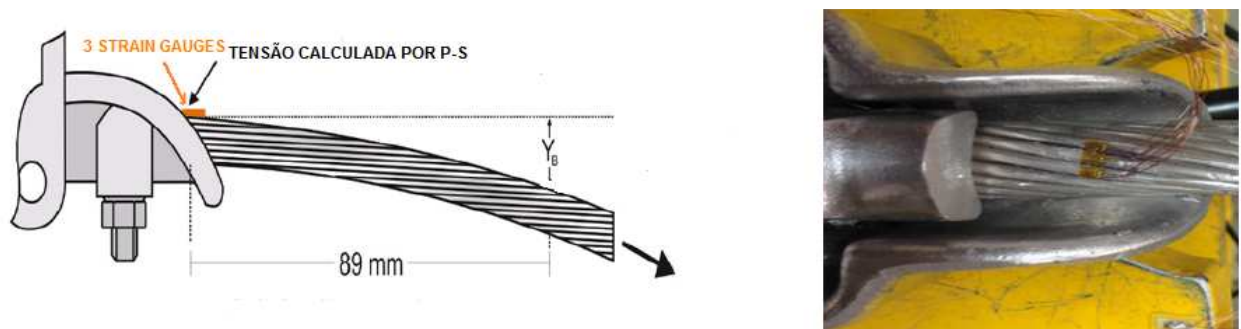


Figura 3.9 – Posicionamento dos 3 Strain Gauges na boca do grampo ou da braçadeira (Vilela *et al.*, 2010).

Fadel *et al.* (2010) apresentaram um artigo, que já foi comentado anteriormente sobre ensaios experimentais de avaliação da teoria de Poffenberger e Swart na construção das curvas S-N realizados em uma bancada de ensaios dinâmicos semelhante à da figura 2.14. A teoria de Poffenberger e Swart relaciona a amplitude de flexão medida no laboratório ou no campo com a tensão nominal e a curva S-N relaciona cada nível de tensão nominal com o número de ciclos para a ruptura do condutor.

## CAPÍTULO 4

### 4. TEORIA DE POFFENBERGER - SWART E EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO

#### 4.1 INTRODUÇÃO

A teoria de Poffenberger e Swart<sup>15</sup> ou fórmula P-S é baseada em uma analogia com a teoria da viga de Euler e estabelece a relação entre o deslocamento vertical e a amplitude da tensão de flexão de um fio localizado na camada mais externa de um condutor. A figura 4.1 mostra a fixação de um condutor em um grampo ou braçadeira de suspensão e a posição padrão para medir a amplitude de deslocamento ou de flexão ( $Y_b$ ). A mesma figura 4.1 mostra, também o local no fio da camada externa do condutor onde a tensão de flexão pode ser medida ou determinada pelo modelo matemático proposto por Poffenberger e Swart. A estimativa da vida útil de um condutor é atualmente determinada através da análise das curvas S-N, que relacionam os níveis de tensão nominal determinados através da teoria de Poffenberger e Swart com o número de ciclos para acontecer a ruptura do condutor.

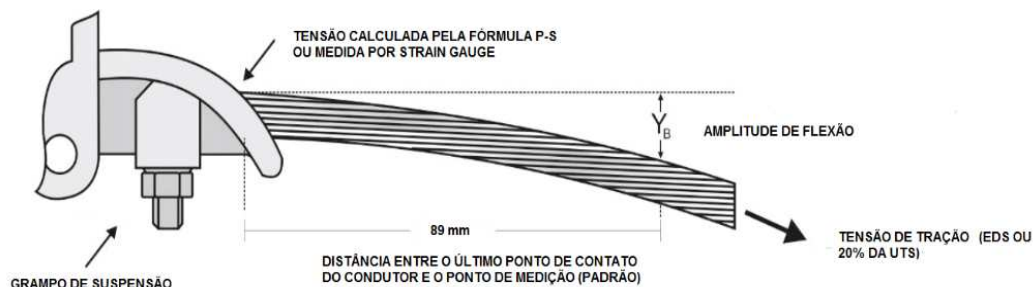


Figura 4.1 - Montagem cabo/condutor e a posição padrão para a medida da amplitude de flexão,  $Y_b$  (Fadel *et al.*,2010).

Existem muitas pesquisas e publicações com a finalidade de comparar os resultados obtidos pela teoria de Poffenberger e Swart com os dados provenientes de ensaios em laboratório.

---

15 Há mais de 40 anos os pesquisadores Poffenberger e Swart determinaram pela primeira vez a relação entre um deslocamento vertical chamado de amplitude de flexão ( $Y_b$ ) de um condutor oscilando (pico a pico) medido a uma distância de 89 mm do último ponto de contato do condutor, com a tensão de flexão, que pode proporcionar uma relação bem realista da medida do esforço de flexão no condutor, caso a tensão e a rigidez de flexão  $EI$  sejam consideradas. A fórmula de Poffenberger-Swart tem sido uma ferramenta extremamente valiosa para a avaliação da gravidade das vibrações dos condutores de linhas aéreas. A sua aplicação é relativamente fácil e direta e tem sido adotada pela maioria dos pesquisadores neste campo tornando-se um padrão para o cálculo da tensão nominal dos fios da camada externa de um condutor.

Fadel *et al.* (2010), por exemplo, apresentaram um trabalho experimental para avaliar a teoria de Poffenberger e Swart e a sua aplicação na construção das curvas S-N. O ensaio foi executado em um cabo do tipo ACSR 397,5 MCM ÍBIS utilizado em linhas de transmissão de 138 kV em uma bancada igual à da figura 2.14. Foram realizados ensaios estáticos e dinâmicos para diferentes níveis de amplitude e frequência de vibração e os dados obtidos foram comparados com sucesso com os dados obtidos pela fórmula P-S. A conclusão apresentada no trabalho foi de que os dados obtidos pela teoria de Poffenberger e Swart concordaram em cerca de 96% com os valores experimentais obtidos no ensaio. Fadel *et al.* (2010), porém, ressaltaram no trabalho uma limitação da teoria com relação a fratura do fio da camada mais externa do condutor, pois a teoria apenas considera a causa da fratura como sendo provocada pelo movimento alternado do condutor e não leva em consideração um estado de tensões oriundos do contato mecânico do condutor com o grampo e o deslizamento dos fios do condutor.

Rolim *et al.* (2007) em um trabalho experimental utilizaram a teoria de Poffenberger e Swart para determinar a vida útil de um condutor utilizando a amplitude de flexão medida por um pequeno equipamento, modelo PAVICA montado sobre um vão de linha de 670m em funcionamento sobre o Rio Guamá no estado de Belém. Como a fórmula P-S converte a amplitude de flexão medida em tensão de flexão no fio do condutor da camada mais externa é possível desta maneira construir a curva de tensão acumulada ou curva S-N. Após a análise da curva S-N os pesquisadores concluíram no trabalho que o condutor teria uma pequena probabilidade de falha por fadiga durante o tempo da sua operação.

Kubelwa *et al.* (2012) publicaram um artigo do resultado de um estudo experimental cujo objetivo foi determinar a relação entre a tensão de flexão e a amplitude de flexão e examinar se a relação era adequadamente expressa pela teoria de Poffenberger e Swart. O ensaio foi executado em um condutor do tipo Aero-Z 455-2z tracionado a 15, 20 e 25% de UTS (*Ultimate Tensile Strength*) e apoiados por grampos rígidos fixados em dois blocos de concreto com capacidade de absorver as vibrações, tal como a bancada da figura 2.14. Kubelwa *et al.* (2012) concluíram que os resultados alcançados no estudo foram compatíveis com os valores determinados pela teoria de Poffenberger e Swart para condutores compactos como o Aero-Z 455-2z, mas com a ressalva de que na ocorrência de baixas amplitudes de flexão, onde o deslizamento dos fios da camada externa do condutor não ocorre, as tensões medidas foram até 100 por cento (100%) maiores do que as tensões previstas pela teoria com ( $EI_{min.}$ ).

## 4.2 TEORIA DE POFFENBERGER – SWART OU FÓRMULA P-S

Existem diversos trabalhos, que relatam a teoria desenvolvida pelos pesquisadores Poffenberger e Swart, como por exemplo os trabalhos publicados por Prahl *et al.* (2017), Kubelwa *et al.* (2012), Fadel *et al.* (2010) e Rolim *et al.* (2007). Segundo CIGRÉ (1995) a teoria foi desenvolvida com o propósito de estimar a vida útil de um condutor sob a ação das cargas de vento e para isto relaciona os diferentes deslocamentos verticais ou amplitudes de flexão de um condutor medidos (pico a pico) a uma distância de 89mm do último ponto de contato com o grampo de fixação, conforme se pode ver na figura 4.1, com as respectivas tensões de flexão do fio da camada superior. A teoria pode ser representada pelas seguintes equações:

$$\sigma_b = k Y_b \quad (4.1)$$

$$\sigma_b = E_a \epsilon_b \quad (4.2)$$

$$k = \frac{E_a d p^2}{4(e^{(-px)} - 1 + px)} \quad (4.3)$$

$$p^2 = \frac{T}{(EI)} \quad (4.4)$$

Onde,  $\sigma_b$  é a tensão alternada de flexão (zero a pico) [N/mm<sup>2</sup>],  $k$  é o fator P-S, que depende das características do condutor [N/mm<sup>3</sup>],  $Y_b$  é a amplitude de flexão (pico a pico) [mm],  $E_a$  é o módulo de elasticidade (Módulo de Young) do material do fio da camada mais externa do condutor [N/mm<sup>2</sup>],  $\epsilon_b$  é a deformação de flexão [mm],  $d$  é o diâmetro do fio da camada mais externa do condutor [mm],  $x$  é igual a 89mm,  $T$  é a tensão ou carga de esticamento para uma temperatura média durante a medição [N] e  $EI$  é a rigidez de flexão ou soma das rigidezes de flexão individual dos fios do condutor [Nmm<sup>2</sup>].

Substituindo a equação (4.3) na equação (4.1), vem:

$$\sigma_b = \frac{E_a d p^2}{4(e^{(-px)} - 1 + px)} Y_b \quad (4.5)$$

A equação (4.5) mostra a relação entre a amplitude de flexão e a tensão de flexão de um condutor próximo ao grampo de fixação. Desta forma uma tensão ideal pode ser estimada de uma amplitude de vibração e correlacionada com testes de fadiga do condutor. Como resultado, pode-se utilizar, para estabelecer um limite de resistência para uma variedade de condutores. A equação (4.2) mostra que a deformação de flexão pode ser determinada pela amplitude de flexão medida por um gravador de vibração do tipo PAVICA em ensaios feitos no campo. Alguns autores já mencionados anteriormente relatam discrepâncias entre os resultados obtidos pelos ensaios e os determinados pela fórmula P-S. Isto ocorre porque a teoria de Poffenberger e Swart baseia-se em um modelo de viga (cantilever) e muitas hipóteses foram tomadas através de um modelo idealizado, como por exemplo: diâmetro do fio da camada mais externa do condutor, rigidez de flexão mínima e carga de tração no condutor em percentagem (%) da tensão de ruptura.

### 4.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE OU MÓDULO DE YOUNG

Para muitos metais de seção transversal uniforme a rigidez de flexão é o produto do módulo de elasticidade “E” com o momento de inércia da seção “I”. Quando o condutor for composto por fios existem duas possibilidades para o momento de inércia. Se for assumido que todos os fios de um condutor atuem de forma independentes, então deve-se considerar “ $EI_{min}$ ”. Caso os fios de um condutor atuem em conjunto como se o condutor fosse singelo, então deve-se considerar a rigidez de flexão igual a de uma viga “ $EI$ ”. Quando o problema for relacionado aos fios da camada mais externa do condutor o cálculo deverá usar o fator “K” da fórmula de Poffenberger e Swart e deverá ser utilizada a rigidez de flexão mínima “ $EI_{min}$ ”.

O cálculo da rigidez de flexão mínima para um condutor homogêneo composto de um único tipo de metal e por fios de igual seção transversal, pode ser representado pela seguinte fórmula:

$$EI_{min} = n \frac{\pi d^4}{64} E \quad (4.6)$$

Onde,  $EI_{min}$  é a rigidez de flexão mínima [Nmm<sup>2</sup>],  $n$  é o número de fios,  $d$  é o diâmetro do fio [mm] e  $E$  é o módulo de elasticidade do material do condutor [N/mm<sup>2</sup>].

O cálculo da rigidez de flexão mínima para um condutor homogêneo composto por dois tipos de metais e por fios de igual seção transversal, pode ser representado pela seguinte equação:

$$EI_{mín} = n_a \frac{\pi d_a^4}{64} E_a + n_s \frac{\pi d_s^4}{64} E_s \quad (4.7)$$

Onde,  $EI_{mín}$  é a rigidez a flexão mínima [Nmm<sup>2</sup>],  $n_a$  é o número de fios de alumínio,  $n_s$  é o número de fios de aço,  $d_a$  é o diâmetro do fio de alumínio [mm],  $d_s$  é o diâmetro do fio de aço [mm],  $E_a$  é o módulo de elasticidade do alumínio [N/mm<sup>2</sup>] e  $E_s$  é o módulo de elasticidade do aço [N/mm<sup>2</sup>].

O cálculo da rigidez de flexão mínima para as varetas de armadura deve ser calculado considerando a rigidez de flexão mínima das varetas de armadura mais a rigidez de flexão mínima do condutor, conforme a seguinte equação:

$$EI_{mín} = n_r \frac{\pi d_r^4}{64} E_r \quad (4.8)$$

Onde,  $EI_{mín}$  é a rigidez a flexão mínima [Nmm<sup>2</sup>],  $n_r$  é o número de varetas,  $d_r$  é o diâmetro da vareta [mm] e  $E_r$  é o módulo de elasticidade do material da vareta [N/mm<sup>2</sup>].

Para os condutores OPGW feitos com fios cilíndricos de aço ao redor de um tubo metálico contendo fibras óticas é necessário considerar o momento de inércia do tubo metálico. Com relação aos outros componentes não metálicos, como por exemplo as fibras óticas, o momento de inércia pode ser desconsiderado. Desta forma o cálculo pode ser representado pela seguinte equação:

$$EI_{mín} = \frac{\pi}{64} (D_T^4 - d_T^4) E_T + n_a \frac{\pi d_a^4}{64} E_a + n_s \frac{\pi d_s^4}{64} E_s \quad (4.9)$$

Onde,  $EI_{mín}$  é a rigidez a flexão mínima [Nmm<sup>2</sup>],  $D_T$  é o diâmetro externo do tubo [mm],  $d_T$  é o diâmetro interno do tubo [mm],  $E_T$  é o módulo de elasticidade do material do tubo [N/mm<sup>2</sup>],

$n_a$  é o número de fios de alumínio,  $n_s$  é o número de fios de aço,  $d_a$  é o diâmetro do fio de alumínio [mm],  $d_s$  é o diâmetro do fio de aço [mm],  $E_a$  é o módulo de elasticidade do alumínio [N/mm<sup>2</sup>] e  $E_s$  é o módulo de elasticidade do aço [N/mm<sup>2</sup>],

#### **4.4 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO**

Existem vários métodos aceitáveis para a medição da amplitude do deslocamento vertical de condutores aéreos, como por exemplo: medir o deslocamento do anti-nó de uma onda estacionária ou medir a tensão no fio do condutor da camada externa junto a boca da braçadeira do grampo ou mesmo medir o deslocamento do condutor em relação ao grampo. Devido as dificuldades práticas e problemas de interpretação, um comitê do IEEE em 1965 resolveu padronizar a maneira de medir o deslocamento vertical de um condutor sujeito as cargas de vento e desde então tem sido amplamente utilizado e chamado de método da amplitude de flexão. O comportamento dinâmico de um condutor sob o efeito da vibração eólica é semelhante ao de uma corda com vibração livre e tem a forma de uma curva senoíde quase perfeita , exceto na região perto das braçadeiras dos grampos de suspensão, que devido a rigidez a flexão do condutor impede que o primeiro nó apareça no grampo de suspensão e o desloca um pouco para longe do grampo e é nessa região que ocorre a maior flexão do condutor. Uma condição oposta pode acontecer quando for permitido que o grampo possa balançar, mas isso geralmente está associado a uma flexão reduzida do condutor.

Poffenberger e Swart fazendo uma analogia com a teoria de viga de Euler consideraram os grampos de suspensão de um vão de linha como apoios rígidos e o condutor como uma viga e relacionaram o deslocamento vertical máximo do condutor a uma distância de 89mm do grampo de suspensão com a curvatura dinâmica e com a tensão na camada externa superior do condutor e junto ao grampo de suspensão.

Atualmente a medida do deslocamento vertical tem sido feita por equipamentos ou gravadores sofisticados, que usam a teoria de Poffenberger e Swart e são fixados em um grampo de suspensão ou de ancoragem ou em um espaçador amortecedor com o medidor tocando no condutor a uma distância de 89mm do último ponto de contato. Estes equipamentos são muito pequenos e leves e por terem uma pequena rigidez e inércia não causam algum efeito no movimento do condutor.



## **Vibrec™ 400**

Conforme a figura 4.2 os gravadores Vibrec™ 400 são fabricados pela empresa Pfisterer Sefage AG da Suíça e foram desenvolvidos especificamente para medir a intensidade de vibração de um condutor de uma linha de transmissão de energia.



Figura 4.2 - Vibrec™ 400 (Pfisterer Sefage AG, 2015).

Estes aparelhos gravam, convertem e armazenam dados das medições de vibração feitas tanto nos grampos de suspensão ou de ancoragem, como nas esferas de advertência ou mesmo nos amortecedores ou nos espaçadores amortecedores.

### Características do gravador Vibrec™ 400:

- As medidas da velocidade do vento são correlacionadas com as medidas de vibração;
- O aparelho armazena as medidas das amplitudes de vibração, as frequências de vibração e a velocidade do vento perpendicular ao condutor em forma matricial;
- Permite o acesso aos dados históricos dos sinais de vibração medidos ao longo do tempo;
- O programa Life™ 400 processa utilizando a transformada de Fourier o sinal medido das frequências, que são úteis para a seleção adequada do tipo de amortecedor;
- O tempo do ciclo da medição, bem com as medidas quase contínuas podem ser configuráveis pelo usuário;
- O equipamento pode trabalhar sem acompanhamento durante 6 meses com a sua configuração padrão e recolher amostras a cada 10 segundos com pausas de 15 minutos;
- Os filtros para a eliminação de ruídos do hardware e do software para o condicionamento dos dados podem ser selecionáveis pelo usuário; e
- O aparelho pode medir as temperaturas ambiente no mesmo período que foram realizadas as medições.

O gravador Vibrec™ 400 pode ser conectado a qualquer tipo de computador e o programa Life™ 400 permite uma configuração flexível dos seguintes parâmetros de medição:

- Faixas de amplitude e frequência;
- Classes de vento e temperatura; e
- Amostras de classes de temperatura.

Bem como a leitura dos seguintes dados:

- Amplitude máxima de vibração x frequência;
- Curvas de tensão acumulada;
- Número de ciclos de cada intensidade de vento, frequência e nível de amplitude;
- Faixas perigosas de cada intensidade de vento, frequência e nível de amplitude;
- Distribuição do vento e da temperatura; e
- Reconstrução histórica do tempo das medidas gravadas mais significativas.

Conforme a figura 4.3, o sensor de vento do Vibrec<sup>TM</sup> 400 tem alta precisão anemométrica e foi especialmente desenhado para registrar a velocidade de vento que atua perpendicularmente ao condutor de maneira sincronizada com a amplitude de flexão correspondente e frequências possibilitando uma correlação entre estes parâmetros por meio de matrizes. Além de um sensor de vento o aparelho inclui um sensor de temperatura, que pode ser usado para estimar as variações das tensões no condutor.



Figura 4.3 - Sensor de vento –Vibrec<sup>TM</sup> 400 (Pfisterer, 2015).

### **Vibrec 500PT**

As oscilações de subvão, como já comentado no início deste trabalho ocorre pelo uso de espaçadores e pode ser mitigado por uma distribuição adequada de espaçadores amortecedores ao longo do vão de linha. No entanto, se não for adequadamente controlado pode induzir falhas por fadiga nas articulações dos espaçadores amortecedores e o afrouxamento das braçadeiras. O gravador Vibrec 500PT, conforme a figura 4.4 é o aparelho apropriado para medir as oscilações de subvão em uma linha de transmissão.



Figura 4.4 – Vibrec 500PT (Pfisterer, 2015).

O programa Life 500 que vem junto ao gravador Vibrec 500PT é fácil de manusear e considera as últimas prescrições das normas da IEEE (1966) e CIGRÉ (1995).

#### Características do gravador Vibrec 500PT:

- Com apenas um clique é possível obter uma visão geral das gravações das amplitudes de vibrações e frequências, como também as velocidades do vento e a temperatura;
- O aparelho mantém as gravações mais significativas das vibrações armazenadas, o que permite análises detalhadas dos movimentos do condutor;
- O programa do gravador faz a correlação entre os valores gravados de vibração com a temperatura e a velocidade do vento;
- O programa permite verificar se o deslocamento medido pelo sensor está correto e o consumo da bateria; e
- Um resumo dos cálculos pode ser gerado pelo programa durante a leitura de dados.

#### Pavica

Conforme se pode ver na figura 4.5 o PAVICA é um pequeno instrumento com aproximadamente 0,5 kg usado para monitorar e analisar as vibrações de um condutor de energia elétrica em uma linha de transmissão. O monitoramento e a análise das vibrações é feito pelo instrumento através da medição da frequência e da amplitude. O instrumento armazena os dados da frequência e da amplitude coletados em uma matriz (64 x 64) e processa os resultados para fornecer uma estimativa aproximada da expectativa de vida do condutor analisado. O método de medição da frequência e da amplitude feitos pelo instrumento são baseados no método do IEEE (1966) e CIGRÉ (1995).

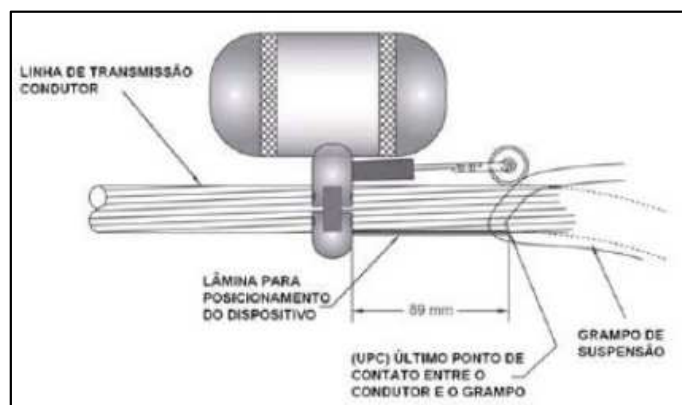


Figura 4.5 - Pavica (Pfisterer, 2015).

O PAVICA, como os aparelhos anteriores pode ser instalado e ajustado no condutor em funcionamento e próximo a um grampo de suspensão ou ancoragem e consiste em um sensor calibrado de feixe em balanço preso a um grampo que suporta uma caixa cilíndrica. Ele vem com um software específico de fácil configuração. Um medidor em contato com o condutor envia o movimento para um sensor. A caixa cilíndrica contém um microprocessador, um circuito eletrônico, uma fonte de alimentação, uma tela e um sensor de temperatura. Este instrumento é fabricado pela Rocktest e está em acordo com o método desenvolvido pela *Ontario Hydro*, que é descrito no relatório do IEEE 31 TP 65-156. A operação do PAVICA é fácil de se realizar e a cada ciclo de vibração os medidores de tensão geram um sinal de saída, que é proporcional a amplitude de flexão do condutor. No final de cada período de monitoramento, o microprocessador<sup>16</sup> integrado estima a expectativa atual da vida útil do condutor.

<sup>16</sup> O microprocessador do PAVICA pode ser acessado por qualquer ligação de comunicação e o software permite que o usuário insira facilmente qualquer parâmetro relevante e recupere os dados e resultados armazenados em qualquer computador portátil que use o Windows TM (95/98/2000, XP e NT).

## **CAPÍTULO 5**

### **5. ENSAIOS REALIZADOS NO SISTEMA DE AMORTECIMENTO DA LINHA DE 500 kV ENTRE ORIXIMINÁ E SILVES**

#### **5.1 INTRODUÇÃO**

Para verificar e monitorar a eficácia do conjunto condutor/sistema de amortecimento utilizados na Linha de Transmissão em 500 kV em circuito duplo, foram realizados pela empresa PLP do Brasil Ltda. os seguintes ensaios: 1-No campo de acordo com as normas CIGRÉ (1995) e IEEE (1966), 2- No laboratório de acordo com a norma IEC (1998), e 3- Por meio de programas de simulação, conforme exposto abaixo. Os dados de entrada utilizados nos programas de simulação para a determinação do sistema de amortecimento utilizado no projeto executivo foram referentes a travessia do Rio Trombetas no estado do Pará, que pelas condições ambientais são os mais rigorosos e danosos ao conjunto condutor/sistema de amortecimento.

#### **5.2 MÉTODO ANALÍTICO DE CÁLCULO DE AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DO SISTEMA DE AMORTECIMENTO UTILIZADO NA TRAVESSIA DO RIO TROMBETAS**

Para as análises da influência do vento foi utilizado o programa de simulação ESANAM, que há mais de três décadas tem sido utilizado no campo das vibrações de estrutura s e, em particular nas vibrações de condutores de energia. O programa ESANAM, conforme mostra a figura 5.1 utiliza o método do Equilíbrio da Energia, que foi apresentado no capítulo 2 deste trabalho. Para aplicar o método do equilíbrio de energia o valor da energia do vento foi determinado por meio de testes em túnel de vento enquanto que a energia dissipada pelo condutor foi obtida por meio de fórmulas cujos coeficientes são derivados de resultados de ensaios feitos em laboratórios e a energia dissipada pelos amortecedores foram derivadas da impedância mecânica do amortecedor e da rigidez das articulações do espaçador, bem como por ensaios para a determinação das propriedades de amortecimento obtidas de estações com equipamento com simuladores de vibração.

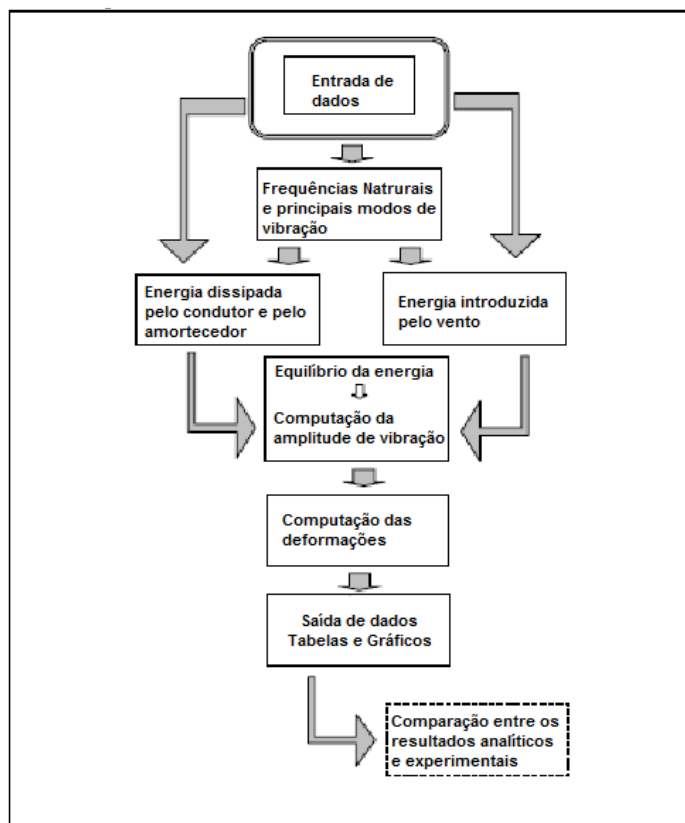


Figura 5.1 - Fluxograma do Programa ESANAM (SALVI, 2012).

A validação do programa ESANAM foi feita através da comparação dos resultados do programa com os resultados obtidos por vários pesquisadores em ensaios executados no campo e a partir daí passou a ser usado com frequência em muitos projetos de linhas de transmissão ao redor do mundo. O programa utilizado para a determinação das oscilações de subvão foi o CICFAS. As oscilações de subvão são causadas por uma excitação instável pelo acoplamento de modos de vibração essencialmente horizontais e verticais dos feixes de condutores, mas pode, também, ser torsional. Este fenômeno de instabilidade ocorre apenas se a diferença entre as frequências dos modos acoplados estejam compreendidas entre certos valores e dependem também do ângulo de ataque do vento e da velocidade do vento. A interação do feixe de subcondutores com o vento podem tornar as suas frequências iguais e originar o fenômeno da instabilidade. Geralmente os ensaios de campo são realizados para determinar a instabilidade, seja em relação aos tipos de modos de vibração que, se acoplados podem originar instabilidade ou dos limites de diferença de frequência correlacionados à velocidade do vento.

### **Entrada de Dados:**

Condutor: AACSR/HS (*Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced*) protegido em todas as camadas da corrosão.

Tabela 5.1 - Informações necessárias para a entrada de dados (SALVI, 2012, modificado).

Fios: (42 x 4,03mm) + (37 x 2,87mm)	Tipo de vento: sem turbulência
Diâmetro: 36,21mm	Varas de armadura no grampo de suspensão: sim
Carga de tração: 112010 N	Amortecedor de vibração para condutor: sim
Tipo de feixes de condutor: Quadruplo com 700mm de espaçamento	Espaçador amortecedor para condutor: quadruplo
Comprimento do vão: máximo igual a 1628m	Limite de deformação para condutor: 100 microdeformações (0 a pico)
Especificação do terreno: terreno aberto	

### **Saída de Dados:**

A entrada de dados foi elaborada para verificar o comportamento dos feixes de condutores em relação as vibrações eólicas e em relação as oscilações de subvãos, que são controladas respectivamente por amortecedores e espaçadores amortecedores.

#### **5.2.1 Vibrações eólicas**

O programa ESANAM, cuja a listagem e maiores detalhes estão no anexo “A”, simulou as vibrações eólicas e calculou as amplitudes de vibração e a deformação dos feixes de condutores causadas pela esteira de vórtices de Von Karman para o vão de 1628m da travessia do Rio Trombetas. A listagem do programa informa a entrada de dados necessária para que o programa funcione, bem como os resultados necessários para plotar as figuras referentes as relações entre a amplitude versus frequência e a deformação versus frequência. O resultado do programa, também, está informado na listagem no anexo ”A” e mostra a necessidade de ser instalado no subcondutor 02 (dois) amortecedores em cada extremidade do vão de 1628 m, bem como as distâncias para montagem iguais a 2,5 e 3,7m, que são referentes ao último ponto de contato (grampos de suspensão). As figuras 5.2 e 5.3 mostram a localização dos amortecedores com mais detalhes.



Figura 5.2 - Grampo de suspensão (SALVI, 2012, modificado).

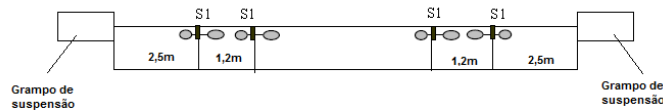


Figura 5.3 - Localização dos amortecedores de vibração (SALVI, 2012, modificado).

As figuras relacionadas entre as amplitudes e deformações com a frequência, que estão no anexo “A” informam as vibrações e as deformações referentes ao primeiro e segundo amortecedor, respectivamente a 2,5 e 3,7 m do grampo de suspensão. A Tabela 5.2 informa que o condutor em estudo sem equipamentos de amortecimentos sofre uma deformação próxima a 783  $\mu\text{s}$  (microdeformações) ao passo que com o sistema sugerido de amortecimento, a deformação cai para 96  $\mu\text{s}$  (microdeformações).

Tabela 5.2 - Deformações do condutor (SALVI, 2012, modificado).

Descrição	Deformação máxima calculada (0-pico) ( $\mu\text{s}$ )	Deformação máxima permitida (0-pico) ( $\mu\text{s}$ )
Condutor sem amortecimento	783	100
Condutor com espaçadores amortecedores e com amortecedores de vibração	96	100

O programa ESANAM, também calculou a localização de amortecedores próximo aos grampos de ancoragem, conforme mostram as figuras 5.4 e 5.5.

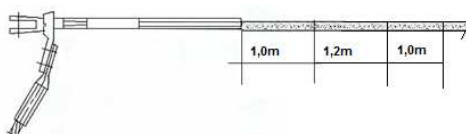


Figura 5.4 - Grampo de ancoragem (SALVI, 2012, modificado).



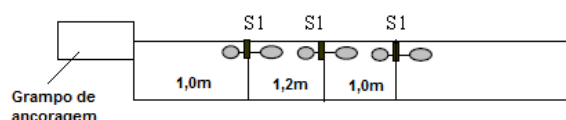


Figura 5.5 - Localização dos amortecedores de vibração (SALVI, 2012, modificado).

## 5.2.2 Oscilações de subvão

O programa usado habitualmente para a simulação das oscilações de subvão é o CICFAS, mostrado com maiores detalhes no anexo “B” e que analisa a amplitude de vibração nos 04 (quatro) subcondutores causada pela esteira de vórtices de Von Karman. Para o vão de 1628m da travessia do Rio Trombetas o programa determinou, conforme informado no anexo “B” a locação dos 25 espaçadores amortecedores e as dimensões dos 26 subvãos, bem como as oscilações horizontais e verticais em cada subvão.

Tabela 5.3 - Locação dos espaçadores amortecedores (SALVI, 2012, modificado).

Comprimento do vão (m)	961	1025	1572	1628
<b>Nº de espaçadores</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>24</b>	<b>25</b>
	40	40	40	40
	56	56	64	62
	64	70	72	72
	57	57	63	61
	68	69	71	71
	59	59	62	60
	67	68	70	70
	55	60	61	59
	66	67	69	69
	58	55	60	58
	65	66	68	68
	60	54	57,5	57
<b>Distância entre os espaçadores</b>	69	71	67	67
	62	61	58	55,5
	70	65	66,5	66,5
	45	62	58,5	57,5
		45	67,5	67,5
			61,5	62,5
			68,5	68,5
			59	61,5
			71,5	69,5
			59,5	59,5
			69,5	70,5
			62,5	58,5
			45	71,5
				45

Tabela 5.4 - Velocidade do vento e oscilações de subvão (SALVI, 2012, modificado).

Velocidade do vento (m/s)	Oscilação horizontal calculada (mm)	Oscilação vertical calculada (mm)	Número de subvãos e comprimento do subvão
15 - 20	0	0	-

### 5.2.3 Conclusão

Os resultados dos programas ESANAM e CICFAS apresentados de forma resumida na tabela 5.4 e com maiores detalhes nos anexos “A” e “B” respectivamente, se refere à proposta do sistema de amortecimento para a travessia do rio Trombetas de 1628m, que é composto de espaçadores amortecedores e de amortecedores de vibração, respectivamente para combater os problemas das oscilações de subvãos e vibrações eólicas. A análise da tabela mostra que as máximas deformações que podem ocorrer sob as piores condições são bem menores que os limites de segurança propostos pelas especificações internacionais.

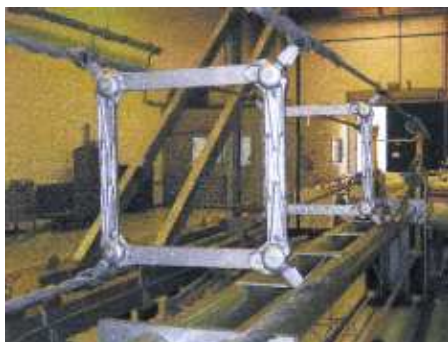
### 5.3 ENSAIO EXECUTADO EM LABORATÓRIO NO ESPAÇADOR AMORTECEDOR UTILIZADO NA LINHA DE TRANSMISSÃO ORIXIMINÁ – SILVES

O espaçador amortecedor quádruplo (AGSD – 4703050) antes de ser utilizado na linha de transmissão Oriximiná – Silves foi submetido a testes de laboratório seguindo as prescrições da norma IEC 61854 de 1998. A proposta do ensaio foi estabelecer parâmetros do equipamento para avaliar a performance em relação à proteção do condutor (CAL 1055 kcmil 61 fios AL 6201–T81 e  $\varnothing = 3,34$  mm) escolhido para ser utilizado na linha de transmissão. Como comentado anteriormente, um espaçador amortecedor tem a função de manter os subcondutores nas suas configurações de projeto, ou seja, sempre manter a distância entre eles igual à definida em projeto. Os espaçadores amortecedores, tal como os amortecedores fazem parte do sistema de controle das vibrações dos condutores e a sua utilização não incluem apenas os parâmetros do projeto, mais também o uso de comprimentos de subvãos definidos. Quando corretamente projetados e instalados o sistema de amortecimento do espaçador terá capacidade de controlar as vibrações eólicas induzidas pelo vento e as oscilações de subvão a níveis seguros especificados por normas nacionais e internacionais. O ensaio de um espaçador amortecedor geralmente é executado em três partes: a parte mecânica; a parte da caracterização do elastômero e a parte elétrica.

### 5.3.1 Ensaios mecânicos

#### 5.3.1.1 *Teste de deslizamento longitudinal*

Este teste foi realizado de acordo com a seção 7.5.1.1 “método A” da norma IEC (1988) e, conforme mostram as figuras 5.6a e 5.6b.



(a) Espaçador amortecedor



(b) Alça preformada ao redor do braço

Figura 5.6 - Ensaio de deslizamento longitudinal (PLP, 2011).

O ensaio foi descrito no relatório RE-036-2011 da PLP do Brasil (2011) e foi executado segundo a norma IEC (1988), que recomenda que a carga coaxial do condutor aplicada na braçadeira do espaçador amortecedor deva ser gradualmente aumentada até alcançar o valor mínimo de deslizamento especificado. A partir daí deverá ser mantida constante até completar o tempo de 60s, então, novamente ela deverá ser gradualmente aumentada até ocorrer um deslizamento de 2,5mm do condutor em relação ao grampo. Os critérios de aceitação, segundo a norma IEC (1988) são: 1- Nenhum deslizamento deve ocorrer abaixo ou igual ao valor especificado e se os valores de deslizamento mínimo e máximo forem estabelecidos, o deslizamento deverá ocorrer entre esses valores e 2- O achatamento dos fios externos do condutor é aceitável.

Tabela 5.5 - Resultado do ensaio do deslizamento longitudinal (PLP, 2011).

Braço	Carga constante (60s) (kgf)	Carga de deslizamento (kgf)
01	250	266,4
02	250	272,6
03	250	288,2
04	250	292,8

**Parâmetro de desempenho:** Carga de deslizamento garantida = 250 kgf (não ocorreu o deslizamento).

### 5.3.1.2 *Teste de deslizamento torsional*

Este teste foi realizado de acordo com a seção 7.5.1.2 “método A” da norma IEC (1988) e, conforme mostram as figuras 5.7a e 5.7b.



(a) Aplicando o torque



(b) Aplicando o torque

Figura 5.7 - Ensaio de deslizamento torsional (PLP, 2011).

O ensaio foi executado segundo a norma IEC (1988), que recomenda que uma força de torque seja aplicada nas braçadeiras do espaçador amortecedor girando em torno do eixo do condutor e gradualmente aumentando até atingir um deslizamento mínimo do condutor. A partir daí a força de torque deverá ser mantida constante até completar o tempo de 60s, então, novamente ela deverá ser gradualmente aumentada até ocorrer um deslizamento contínuo. O ensaio de torque deverá ser realizado na mesma direção da camada externa de fios do condutor e repetido na direção oposta.

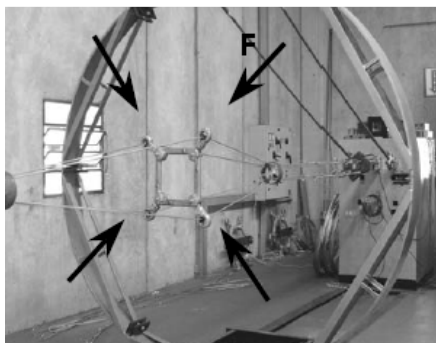
Tabela 5.6 - Resultado do ensaio do deslizamento torsional (PLP, 2011).

Braço	Sentido Horário	
	60s de carga constante (kgf x m)	Carga de deslizamento (kgf x m)
01	7	9
02	7	9
03	7	9
04	7	9

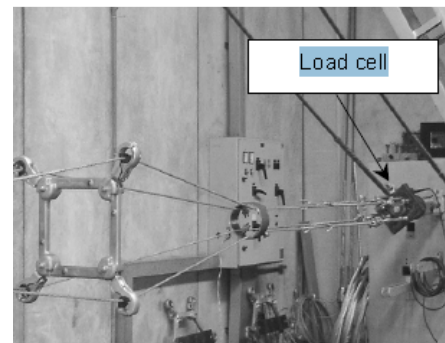
**Parâmetro de desempenho:** Torque garantido de deslizamento = 7 kgf x m (não ocorreu o deslizamento).

### 5.3.1.3 Teste de simulação de corrente de curto circuito - compressão

Este teste foi realizado de acordo com a seção 7.5.4.1 “método A” da norma IEC (1988) e, conforme mostram as figuras 5.8a e 5.8b.



(a) Simulação do curto circuito compressão



(b) Localização da célula de carga

Figura 5.8 - Ensaio de corrente de curto circuito (PLP, 2011).

O ensaio foi executado segundo a norma IEC (1988), que recomenda que as forças de compressão devem ser aumentadas gradualmente até atingir a carga mínima calculada. A partir daí as cargas são mantidas constantes durante 60s e depois removidas. O ensaio deve ser repetido duas vezes na mesma amostra. A primeira vez com o espaçador amortecedor em sua posição normal e na segunda vez com uma braçadeira do espaçador amortecedor deslocada longitudinalmente em 15mm com referência às outras braçadeiras. Então as forças são aumentadas até a ruptura da amostra.

Tabela 5.7 - Resultado do espaçador amortecedor na posição normal (PLP, 2011, modificado)

Amostra	60s de força de compressão constante (kgf) (por grampo)	Força de compressão de ruptura (kgf) (por grampo)
01	1000	1440
02	1000	1360
03	1000	1420

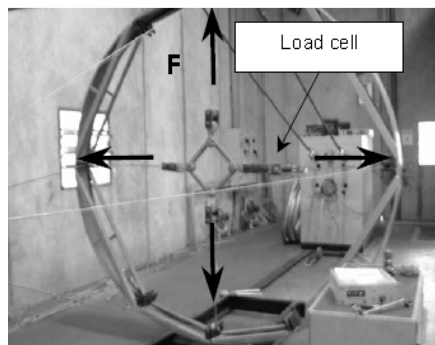
Tabela 5.8 - Resultado com uma braçadeira do espaçador amortecedor deslocada de 15mm em relação as outras (PLP, 2011, modificado).

Amostra	60s de força de compressão constante (kgf) (por grampo)	Força de compressão de ruptura (kgf) (por grampo)
01	1000	1390
02	1000	1270
03	1000	1380

**Parâmetro de desempenho:** Carga de compressão garantida = 1000 kgf.

#### 5.3.1.4 Teste de simulação de corrente de curto circuito - Tração

Este teste foi realizado de acordo com a seção 7.5.4.1 “método A” da norma IEC (1988) e, conforme mostra a figura 5.9.



Simulação do curto circuito - tração

Figura 5.9 - Ensaio de corrente de curto circuito (PLP, 2011).

O ensaio foi executado segundo a norma IEC (1988), que recomenda que as forças de tração devem ser aumentadas gradualmente até atingir a carga mínima calculada. A partir daí as cargas são mantidas constantes durante 60s e depois removidas. Então as forças são aumentadas até a ruptura da amostra.

Tabela 5.9 - Resultado do espaçador amortecedor na posição normal (PLP, 2011, modificado)

Amostra	60s de força de tração constante (kgf) (por grampo)	Máxima força de tração (kgf) (por grampo)
01	1000	1200
02	1000	1200
03	1000	1200

**Parâmetro de desempenho:** Carga de tração garantida = 1000 kgf.

### 5.3.1.5 Teste de flexibilidade

Este teste foi realizado de acordo com a seção 7.5.6 “método A” da norma IEC (1988) e, conforme mostram as figuras 5.10, 5.11 e 5.12 e analisa a capacidade de resposta por meio da flexibilidade do espaçador amortecedor em atender qualquer deslocamento esperado dos subcondutores durante a sua vida útil, sem que ocorra danos tanto no subcondutor quanto no espaçador amortecedor. Para este teste são aplicados os seguintes deslocamentos:

#### - Deslocamento longitudinal

Conforme mostram as figuras 5.10, 5.13a, 5.13b, 5.14a e 5.14b, este teste avalia a flexibilidade longitudinal do espaçador medindo o movimento vertical ao longo do eixo do espaçador de um subcondutor em movimento com referência à sua posição inicial, de duas maneiras: Com três subcondutores fixos e o outro podendo se deslocar longitudinalmente e com dois subcondutores fixos e dois subcondutores podendo se deslocar longitudinalmente.

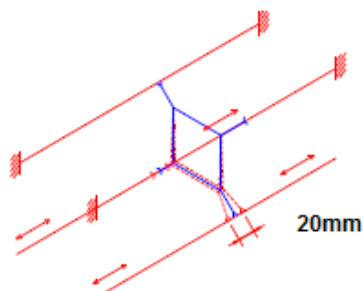


Figura 5.10 - Deslocamento longitudinal (PLP, 2011).

### - Deslocamento cônico

Conforme mostram as figuras 5.11, 5.15a e 5.15b, este teste avalia a flexibilidade do espaçador em um movimento cônico/circular de um subcondutor em relação ao seu eixo ou corpo central. Para este teste os quatro subcondutores sofrem deslocamentos planos e perpendiculares entre si, o que simula um movimento cônico.

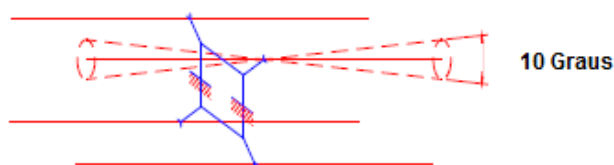


Figura 5.11 - Deslocamento cônico (PLP, 2011).

### - Deslocamento vertical ou transversal

Conforme mostra a figura 5.12 este teste avalia a flexibilidade transversal ou vertical do espaçador por meio do deslocamento de um braço do espaçador ou por meio do movimento de um subcondutor relativo a outro subcondutor e medindo o seu movimento transversal ou vertical do seu eixo horizontal em relação a posição inicial do subcondutor.

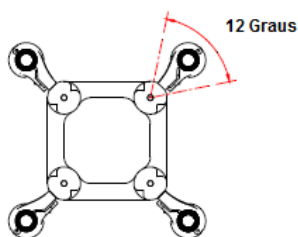


Figura 5.12 - Deslocamento transversal (PLP, 2011).

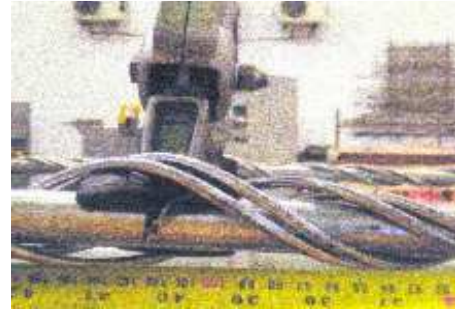
Tabela 5.10 - Parâmetros de desempenho – deslocamento longitudinal (PLP, 2011).

Braço	Deslocamento longitudinal máximo	Observação
1 e 2 (Móvel)	20mm para cada um dos lados	Não ocorreu danos visuais ao espaçador
3 e 4 (fixo)		





(a) Deslocamento longitudinal



(b) Deslocamento longitudinal

Figura 5.13 - Ensaio de flexibilidade – deslocamento longitudinal (PLP, 2011).

Tabela 5.11 - Parâmetros de desempenho – deslocamento longitudinal (PLP, 2011).

Braço	Deslocamento longitudinal máximo	Observação
1 (fixo)	20mm para cada um dos lados	Não ocorreu danos visuais ao espaçador
2 (móvel)		
3 (móvel)		
4 (móvel)		



(a) Deslocamento longitudinal



(b) Deslocamento longitudinal

Figura 5.14 - Ensaio de flexibilidade – deslocamento longitudinal (PLP, 2011).

Tabela 5.12 - Parâmetros de desempenho – deslocamento cônico (PLP, 2011).

Braços	Deslocamento cônico máximo	Observação
1,2,3 e 4	10°	Não ocorreu danos visuais ao espaçador



(a) Deslocamento Cônico



(b) Deslocamento Cônico

Figura 5.15 - Ensaio de flexibilidade – deslocamento cônico (PLP, 2011).

Tabela 5.13 - Parâmetros de desempenho – deslocamento vertical ou transversal (PLP, 2011).

Braços	Deslocamento máximo positivo	Deslocamento máximo negativo	Observação
1,2,3 e 4	12°	12°	Não ocorreu danos visuais ao espaçador

### 5.3.2 Caracterização do elastômero

#### 5.3.2.1 Caracterização das propriedades elásticas e amortecedoras

Este teste é realizado de acordo com a seção 7.5.5 “método A” da norma IEC (1988) e, conforme mostra a figura 5.16. O ensaio deve ser executado antes e depois do teste de fadiga com o quadro do espaçador amortecedor fixado rigidamente em um tubo, que é preso em uma das braçadeiras do amortecedor. A partir daí o tubo é oscilado de tal modo que o ângulo de deflexão do braço do espaçador na posição sem carga segue a forma de uma senoide.



Figura 5.16 - Configuração do laço de histerese (PLP, 2011).

O ângulo ( $\alpha$ ) entre a força e o ângulo de deflexão do braço do espaçador pode ser determinado indiretamente medindo a área do laço da histerese formada pela força e a deflexão do ângulo do braço do espaçador na forma X-Y. Então, o ângulo ( $\alpha$ ) pode ser calculado conforme a seguir:

$$\alpha = \arcsin[W / (Fd\pi\varphi)] \quad (5.1)$$

Onde,  $\alpha$  é o ângulo fase entre a deflexão do braço e a força [rad.],  $F$  é a força máxima [N],  $W$  é a área do momento / laço da deflexão angular [Joule],  $d$  é o Comprimento do braço medido entre o centro da braçadeira e o ponto de articulação efetivo do quadro / braço [m] e  $\varphi$  é a deflexão do braço (pico) [rad.], O ensaio foi realizado a uma frequência igual a 2 Hz com um deslocamento de 47mm (pico a pico).

A partir das medidas de ( $F$ ) e ( $\alpha$ ) a rigidez de torção ( $Kt$ ) e a constante de amortecimento ( $Ht$ ) são calculadas da seguinte forma:

$$Kt = (Fdcos\alpha)/\varphi \text{ [Nm/rad.]} \quad e \quad Ht = tg\alpha \text{ [Nm/rad.]} \quad (5.2)$$

Tabela 5.14 - Resultados dos testes de oscilação de subvão (PLP, 2011, modificado).

Teste de fadiga de oscilação de subvão															
Braça-deira	F [N]			W [Joule]			$\alpha$ [rad.]			Kt			Ht/kt		
	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$
1	315,07	291,55	92,5	4,74	4,21	88,8	0,20	0,20	100	243,04	225,27	92,7	0,21	0,20	95,2
2	311,54	288,12	92,5	4,76	4,12	86,5	0,21	0,20	95,3	240,14	222,73	92,7	0,21	0,20	95,2
3	292,63	284,20	97,2	4,59	4,19	91,3	0,22	0,20	91,0	225,27	219,40	97,4	0,22	0,21	95,4
4	313,31	288,88	92,5	4,75	4,17	87,8	0,21	0,20	95,2	241,59	224,04	104	0,21	0,20	95,2

Onde: BT = Antes do teste; AT = Depois do teste; e  $\Delta\%$  = Resíduo

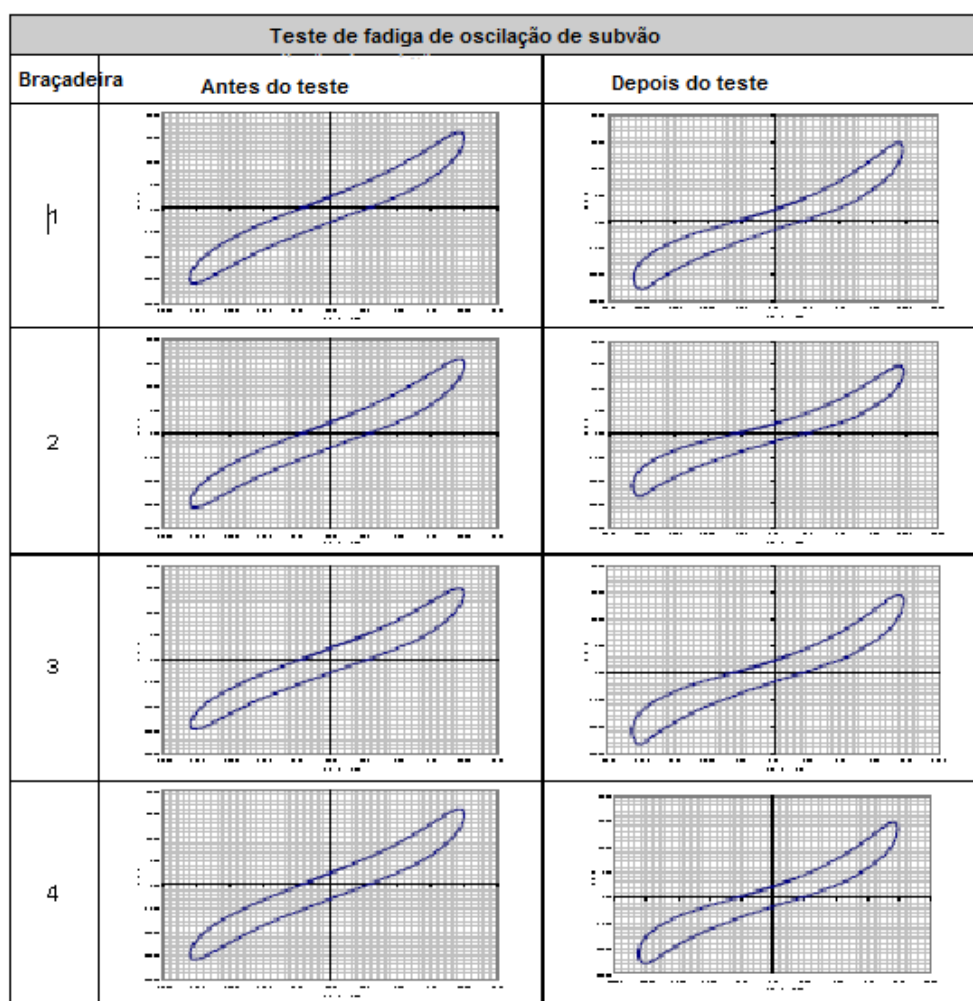


Figura 5.17 - Resultados dos ciclos de histerese referentes aos resultados da tabela 5.14 (PLP, 2011, modificado).

Tabela 5.15 - Resultados dos testes de Vibrações Eólicas (PLP, 2011, modificado).

Vibrações eólicas															
Braçadeira	$F$ [N]			$W$ [Joule]			$\alpha$ [rad.]			$Kt$			$Ht/kt$		
	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$
1	314,58	311,64	99,1	4,78	4,78	100	0,21	0,21	100	242,54	240,16	99	0,21	0,22	104,7
2	308,70	306,45	99,3	4,79	4,71	98,3	0,21	0,21	100	237,79	236,14	99,3	0,22	0,22	100
3	298,21	310,46	104	4,65	4,75	102,1	0,22	0,22	95,5	229,65	239,30	104,2	0,22	0,22	100
4	306,74	303,80	99	4,71	4,72	100,2	0,21	0,21	104,8	236,37	234,00	99	0,22	0,22	100

Onde: BT = Antes do teste; AT = Depois do teste; e  $\Delta\%$  = Resíduo

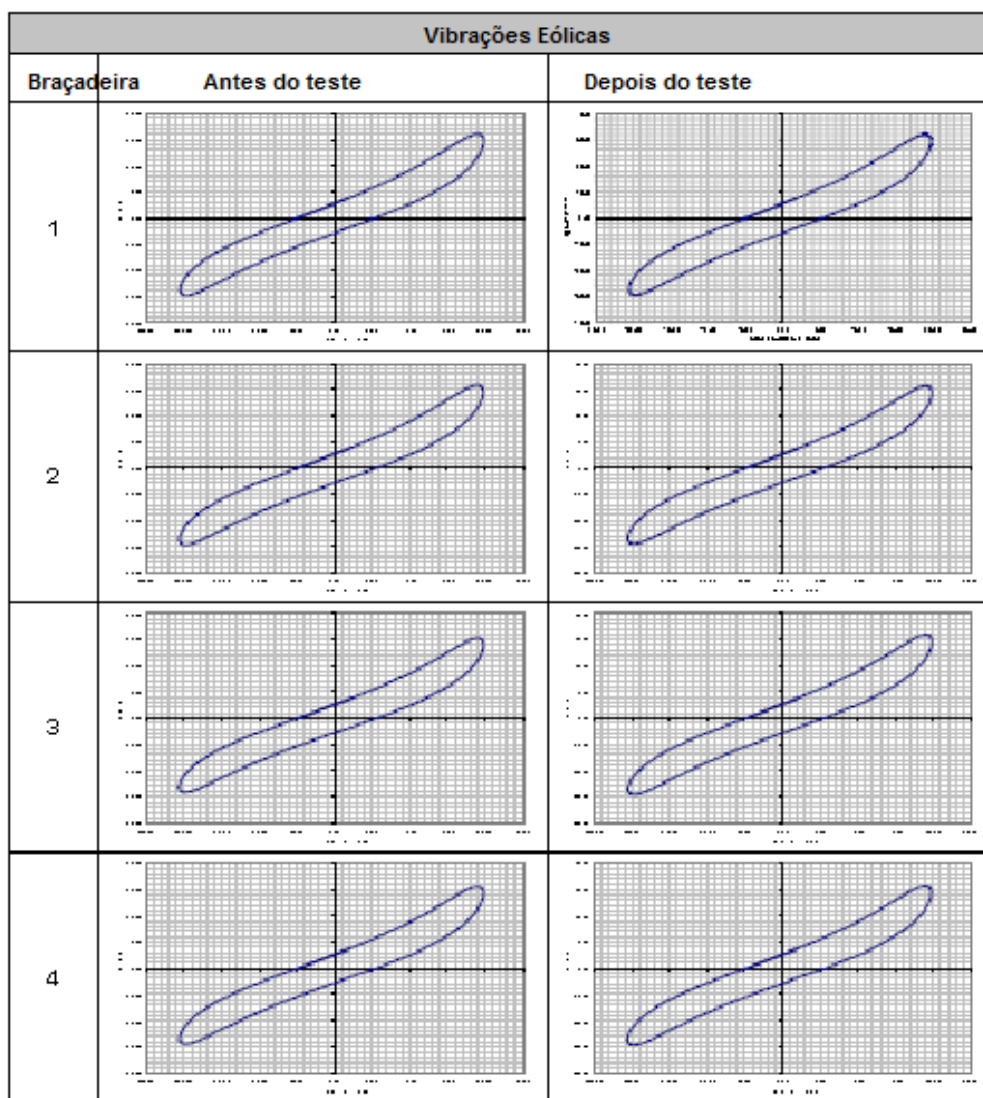


Figura 5.18 - Resultados dos ciclos de histerese referentes aos resultados da tabela 5.15 (PLP, 2011, modificado).

Tabela 5.16 - Resultados dos testes de Fadiga Horizontal (PLP, 2011, modificado).

Teste de fadiga longitudinal															
Braçadeira	F [N]			W [Joule]			$\alpha$ [rad.]			Kt			Ht/kt		
	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$
1	313,60	289,10	92,2	4,75	4,14	87,2	0,21	0,20	95,2	241,83	223,46	92,4	0,21	0,20	95,2
2	307,72	287,04	93,3	4,18	4,12	88,7	0,21	0,20	95,2	237,18	221,72	93,5	0,22	0,20	90,1
3	311,64	287,92	92,4	4,18	4,19	88,4	0,21	0,20	95,2	240,28	222,44	92,6	0,22	0,21	95,2
4	311,25	287,43	92,3	4,16	4,17	87,9	0,21	0,20	95,2	239,97	222,08	92,5	0,21	0,20	95,2

Onde: BT = Antes do teste; AT = Depois do teste; e  $\Delta\%$  = Resíduo

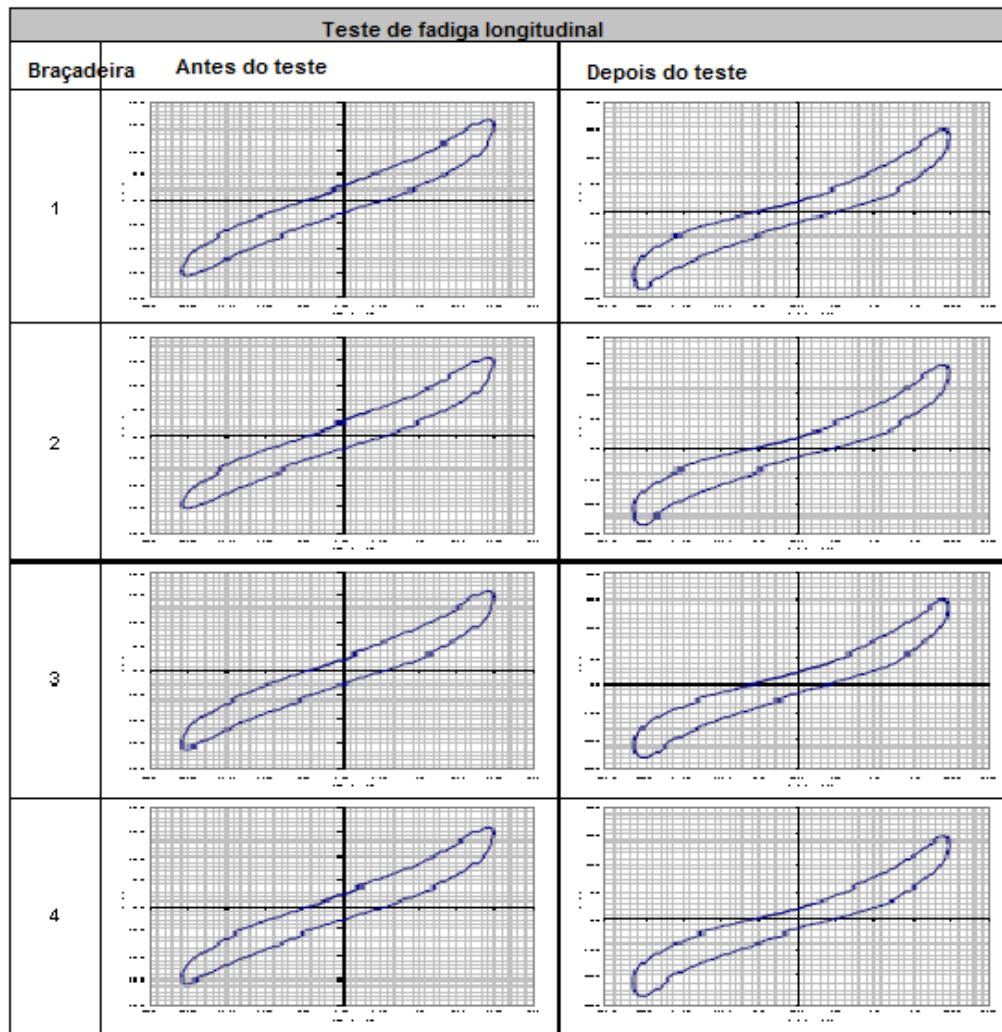


Figura 5.19 - Resultados dos ciclos de histerese referentes aos resultados da tabela 5.16 (PLP, 2011, modificado).

Tabela 5.17 - Resultados dos testes de Fadiga Cônica (PLP, 2011, modificado).

Teste de fadiga cônica															
Braçadeira	$F$ [N]			$W$ [Joule]			$\alpha$ [rad.]			$Kt$			$Ht/kt$		
	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$	BT	AT	$\Delta\%$
1	314,19	290,08	92,3	4,74	4,17	88	0,21	0,20	95,2	242,31	224,20	92,5	0,21	0,20	95,2
2	312,62	288,12	92,2	4,75	4,20	88,4	0,21	0,20	95,2	241,02	222,54	104	0,21	0,21	100
3	301,84	291,06	96,4	4,67	4,19	89,7	0,22	0,20	91	232,51	224,93	96,7	0,22	0,20	91
4	306,68	286,16	92,4	4,72	4,16	88,1	0,21	0,20	95,2	238,72	221,07	92,6	0,21	0,20	95,2

Onde: BT = Antes do teste; AT = Depois do teste; e  $\Delta\%$  = Resíduo



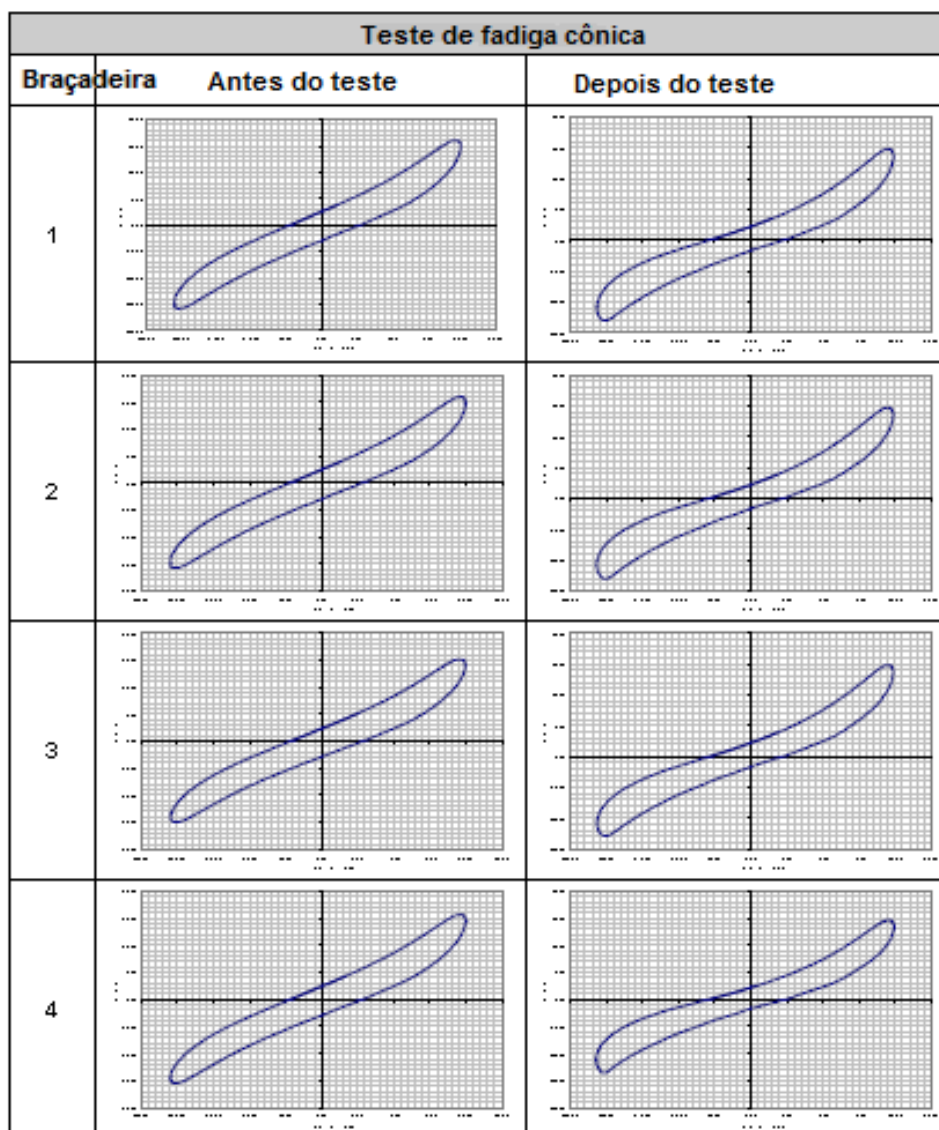


Figura 5.20 - Resultados dos ciclos de histerese referentes aos resultados da tabela 5.17 (PLP, 2011, modificado).

Tabela 5.18 - Parâmetros de desempenho (PLP.2011).

$\alpha$ [rad.]	$F$ [N]	$Kt$ [Nm/rad.]	$Ht/Kt$
0,21 ( $\pm 20\%$ )	309( $\pm 20\%$ )	238( $\pm 20\%$ )	0,21( $\pm 20\%$ )

### 5.3.3 Ensaios elétricos

#### 5.3.3.1 Teste de resistência elétrica

Este teste foi realizado de acordo com a seção 7.7.2 “método A” da norma IEC (1988) e, conforme mostram as figuras 5.21, 5.22a e 5.22b e verifica se a condutividade dos vários

componentes tem um valor, cujos fluxos de corrente eventuais não resultam em deterioração dos componentes do espaçador amortecedor e nem dos condutores. Para o ensaio os quatro subcondutores são montados no espaçador amortecedor, que os mantém isolados a uma distância de 700mm. A partir daí instala-se um megômetro com uma tensão estabelecida de 100 V e a resistência elétrica é medida entre pares de subcondutores denominados no ensaio de: AB, BC, CD e AD.

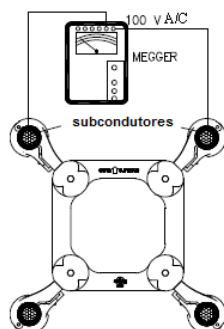


Figura 5.21 - Medidor de corrente e tensão (PLP, 2011).



(a) Bancada de teste



(b) Bancada de teste

Figura 5.22 - Ensaio de resistência elétrica (PLP, 2011).

Tabela 5.19 - Parâmetros de desempenho – resistência elétrica (PLP, 2011).

Condutores	Resistência elétrica máxima ( $\Omega$ )	Resistência elétrica encontrada ( $\Omega$ )
AB	1,5M $\Omega$	0,025M $\Omega$
BC		1,1M $\Omega$
CD		1,0M $\Omega$
AD		0,05M $\Omega$

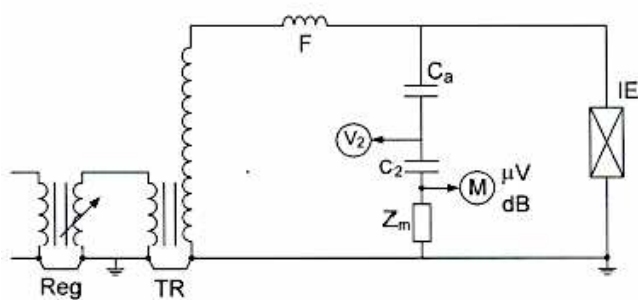


### 5.3.3.2 Teste de tensão de radiointerferência e corona

Este teste está comentado na seção 7.7.1 “método A” da norma IEC (1988) mais foi realizado de acordo com a prescrição da cláusula 14 da norma IEC 61284 (1997) e cujo objetivo foi determinar os níveis de interferência de rádio e ou os valores de extinção do efeito coronano espaçador amortecedor. Conforme especificado pelo comprador a corona pode ser positiva ou negativa. Deve-se observar que o nível de tensão de radiointerferência está intimamente correlacionado com a corona positiva. Ao contrário dos ensaios anteriores, que foram executados no laboratório da PLP do Brasil, este ensaio foi executado no laboratório da CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica do sistema Eletrobrás. A medição da tensão de radiointerferência (TRI) foi executada elevando-se a tensão nos quatro subcondutores do tipo CAL 1055 kcmil 61 fios AL 6201–T81 com diâmetro externo igual a 31,6mm e comprimento de 18m posicionado na altura de 12m até o valor de 352kV. A partir daí a tensão foi reduzida em degraus até chegar no valor de 96kV e novamente aumentada até 352kV. Finalmente foi reduzida até o valor de 0 Volt. O resultado do ensaio está na tabela 5.20 e o valor máximo especificado da TRI para a tensão de 320kV é 200 $\mu$ V.

Tabela 5.20 - Resultados do ensaio de radiointerferência (CEPEL, 2011).

Condição	Ciclo de medição n°	Tensão de ensaio	TRI	Condições atmosféricas
Tensão de ensaio	1ª (descida)	352, 320, 288, 256, 224	75,53, 45, 38, 30	P=760,8mmHg Ts=23,8°C Ur=66,3%
	2ª (subida)	256,288,320,352	30,38,45,75	
	3ª (descida)	320,288,256,224,0	53,45,38,30,11	
Joelho da curva	1ª (subida)	400,496,512	75,169, 2256	P=760,8mmHg Ts=23,8°C/ Ur=66,3%
	2ª (descida)	496,480	131,113	



Reg – Regulador de tensão	C <sub>2</sub> – Capacitor de unidade
Tr – Transformador de alta tensão	IE – Item sob ensaio
F – Filtro para altas frequências	Z <sub>m</sub> – Impedância de medição
C <sub>a</sub> – Capacitor de acoplamento	V <sub>2</sub> – Voltímetro digital
M – Medidor de TRI	

Figura 5.23 - Diagrama do circuito de ensaio (CEPEL, 2011).

### Conclusão:

O espaçador amortecedor projetado utilizado na linha de transmissão em 500 kV entre Oriximiná e Lechuga atendeu, com base nos ensaios realizados acima a todos os parâmetros das normas IEC 61284 (1997) e IEC 61854 (1998). Apenas como informação complementar, a rigidez torsional ( $Kt$ ) e o amortecimento torsional não-dimensional ( $Ht/Kt$ ) encontrados nas tabelas e figuras acima e referentes as propriedades elástica e amortecedora da articulação do espaçador, podem, também, serem determinados ligando o grampo ou a braçadeira do espaçador a um cilindro rígido com o mesmo diâmetro do condutor, conforme a figura 5.24.

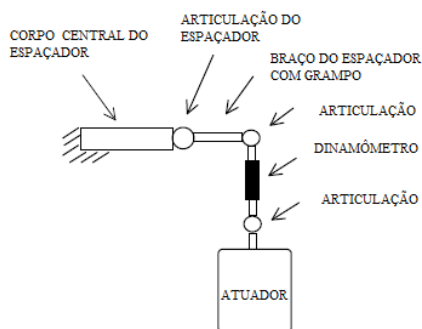


Figura 5.24 – Arranjo para a medição da rigidez torsional e do amortecimento das articulações do espaçador (ESANAM, sem data, modificado).

O cilindro é ligado a um atuador hidráulico (mecanismo que controla a entrada e a saída de ar comprimido) controlado por um oscilador harmônico. Desta maneira o braço do espaçador passa a vibrar com a velocidade constante de vibração do cilindro igual a  $\pm 0,1$  m/s. O dinamômetro, indicado na figura 5.24 mede a força ( $F$ ) entre o atuador e o braço do amortecedor e o resultado do teste é uma curva relacionando a força por unidade de deslocamento ( $F/x$ ) e a fase ( $\varphi$ ) entre a força e o deslocamento como função da frequência (ver anexo “A”).

## **CAPÍTULO 6**

### **6. ENSAIO DE CAMPO REALIZADO NA LINHA DE 500 kV ENTRE ORIXIMINÁ E SILVES**

#### **6.1 INTRODUÇÃO**

O ensaio de campo foi realizado em 2011 pela empresa PLP Produtos para Linhas Preformados do Brasil Ltda. e teve como objetivo avaliar o comportamento do condutor CAL 1055 kmil 61 fios AL 6201-T81 e  $\varnothing = 3,34\text{mm}$  e o sistema de amortecimento composto de espaçadores amortecedor AGSD – 4703050 instalados na linha de transmissão em 500 kV circuito duplo entre as cidades de Oriximiná (PA) e Silves (AM). O ensaio realizado seguiu as recomendações das normas IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) paper 31 TP 65-156 de 1966 e CIGRÉ (*International Council on the Large Electric Systems*) paper SC22 WG 11 – TF2 de 1995.

#### **6.2 CARACTERÍSTICAS DO ENSAIO**

Para determinar a vida útil ou de trabalho da linha de transmissão em 500 kV, sem ocorrência de falha por fadiga devido as ações das vibrações eólicas, a PLP do Brasil sob contrato com a Manaus Transmissora realizou os ensaios de campo por meio de equipamentos de monitoramento em três sítios. Os equipamentos utilizados no ensaio de campo foram fornecidos pela empresa PLP do Brasil e constaram de:

- 1- Um (01) Vibrógrafo Vibrec 400 com anemógrafo, para as medições das vibrações eólicas;
- 2- Um (01) Vibrógrafo Vibrec 500 PT com anemógrafo, para a medições das oscilações de subvão;
- 3- Um (01) Vibrógrafo Pavica; e
- 4- Um (01) Notebook.

Os funcionários envolvidos nas instalações dos equipamentos foram cedidos pela empresa Manaus Transmissora e constaram de:

- 1- Dois (02) instaladores;
- 2- Um (01) ajudante;
- 3- Um (01) motorista;
- 4- Um (01) fiscal de segurança; e
- 5- Transporte e equipamentos de segurança.

A escolha dos vãos ou sítios para os ensaios foi decidida em conjunto entre as empresas PLP do Brasil e Manaus Transmissora. Os ensaios foram realizados com a linha desligada e os equipamentos e instrumentos foram calibrados conforme as condições ambientais da região e a

tração de esticamento do condutor. A empresa PLP do Brasil instalou os equipamentos na fase externa do circuito a sotavento, conforme a seguir:

- Vibrógrafo Vibrec 400 no grampo de suspensão superior a sotavento;
- Vibrógrafo Vibrec 500 PT no maior subvão do vão escolhido; e
- Vibrógrafo Pavica na garra superior a sotavento do espaçador amortecedor posicionado no maior subvão do vão escolhido.

O período de monitoramento foi de 21 dias e depois de coletados os dados registrados foram analisados e interpretados por meio de gráficos apresentados ao longo do capítulo.

Os vibrógrafos foram instalados em três sítios<sup>17</sup>, conforme abaixo:

### 6.2.1 Sítio 1a –torres de Ancoragem e Suspensão- Itapiranga

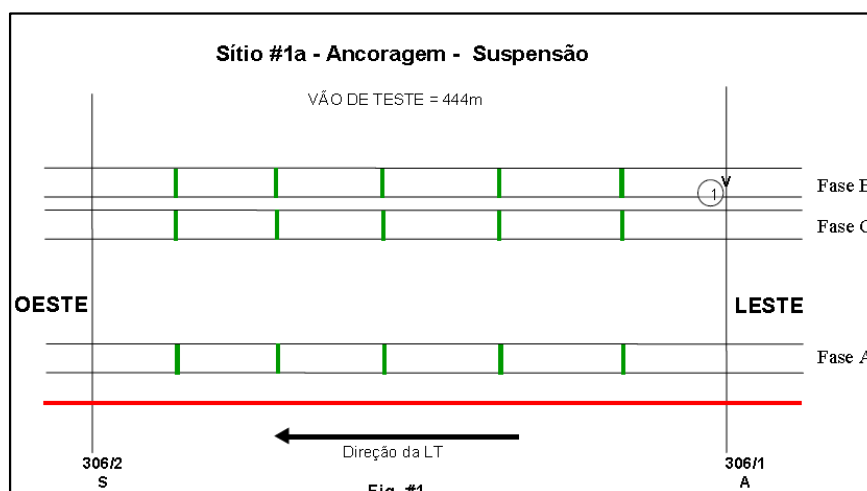


Figura 6.1 Sítio 1a - vão 306/1 → 306/2 (PLP Brasil, 2011).

Onde:

- Cabo para-raios OPGW sem amortecedores;
- Cabo condutor CAL 1055 kcmil 61 fios AL 6201-T81 e  $\varnothing = 3,34$  mm;

█ Espaçador amortecedor AGSD – 4703050; e

①<sup>v</sup> Vibrógrafo Pavica 05P09.

<sup>17</sup> O sítio 3 se refere a travessia do Rio Nhamunda, vãos 132/2 → 133/1 com 635m.

Conforme mostra a figura 6.1, que representa o esquema de montagem, foi instalado no vão 306/1 um vibrógrafo Pavica referência 05P09 para monitorar as vibrações no cabo condutor superior “4” da fase “B” do circuito 2 próximo a saída do grupo de ancoragem.

### Relatório fotográfico do arranjo do sítio 1a



(a) Terreno do sítio 1a

(b) Espaçador amortecedor

(c) Pavica instalado no grupo de ancoragem

Figura 6.2 - Sítio 1a (Eletronorte, 2011).

### 6.2.2 Sítio 1b –torres de Suspensão e Suspensão- Itapiranga

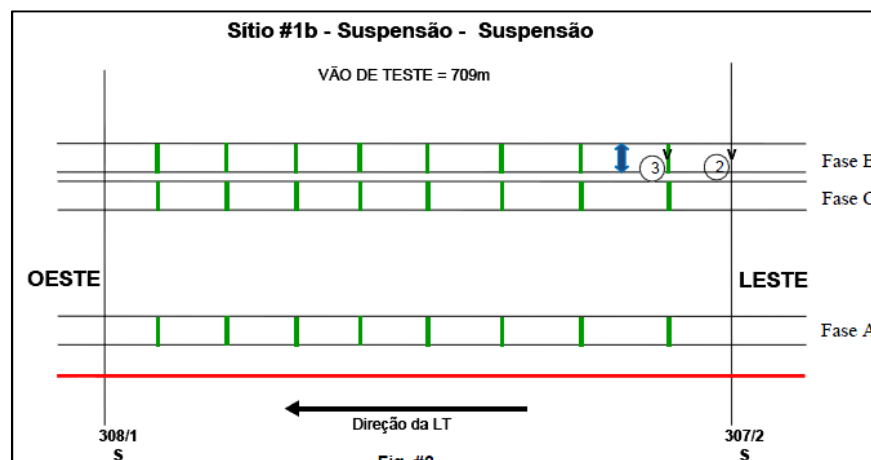



Figura 6.3 - Sítio 1b - vão 307/2→ 308/1 (PLP Brasil, 2011).



Onde:

 Vibrec 500;

 Cabo para-raios OPGW sem amortecedores;

 Cabo condutor CAL 1055 kcmil 61 fios AL 6201-T81 e  $\varnothing = 3,34$  mm;

 Espaçador amortecedor AGSD – 4703050;

 Vibrógrafo Vibrec 642; e  Vibrógrafo Pavica 06P04.

Conforme mostra a figura 6.3, que representa o esquema de montagem, foi instalado no vão 307/2 um vibrógrafo Vibrec de referência 642 para monitorar as vibrações no cabo condutor inferior “3” da fase “B” do circuito 2 próximo ao grampo de suspensão do tipo AGS da empresa PLP de referência 560AGS5513R. O vibrógrafo Vibrec referência 06P04 foi instalado para monitorar as vibrações no cabo condutor superior “4” da fase “B” do circuito 2 próximo a garra do espaçador amortecedor de referência AGSD-4703050. Já o instrumento Vibrec 500 foi instalado para monitorar as oscilações de subvão entre os cabos condutores “1 e 4” da fase “B” do circuito 2 no maior subvão a uma distância de 23 metros do espaçador amortecedor de referência AGSD-4703050.

### Relatório fotográfico do arranjo do sítio 1b



(a) Terreno a frente da torre 307/2



(b) Vibrec 642 instalado



(c) Pavica 06P04 e Vibrec 500 instalados

Figura 6.4 - Sítio 1b (Eletronorte, 2011).

A instalação dos instrumentos PAVICA e VIBREC próximos aos espaçadores amortecedores foi para verificar se a distribuição dos espaçadores amortecedores ao longo do vão da linha estava adequada, uma vez que eles também atuam como amortecedores e atenuam as oscilações de subvão. Caso a distribuição dos espaçadores amortecedores não fossem adequadas isso poderia causar acumulação de tensões nas articulações do espaçador amortecedor e o afrouxamento das braçadeiras de fixação. Como já mencionado anteriormente as oscilações de subvão é uma vibração por ondas induzidas pelo movimento do condutor que está a barlavento causando uma força de sustentação sobre o condutor que está a sotavento, então pode-se deduzir que os condutores que compartilham um espaçador amortecedor influenciam os movimentos uns dos outros por causa do acoplamento do espaçador. O movimento resultante pode ser no plano vertical ou no plano horizontal ou alternativamente como um movimento de torção. A figura 6.5 mostra os quatro modos de vibração de subcondutores ou feixes de condutores paralelos.

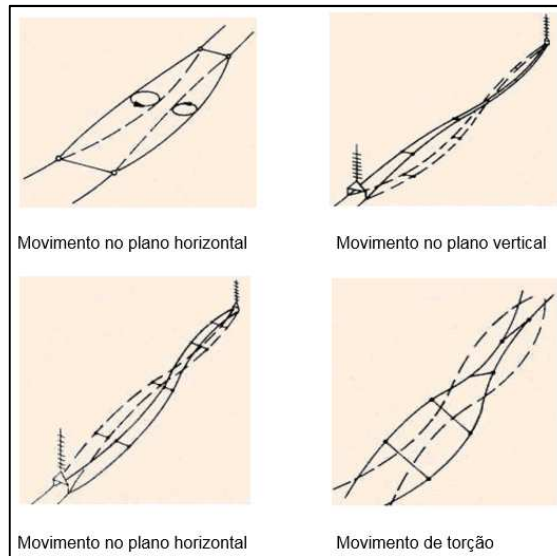


Figura 6.5 - Movimentos possíveis de condutores paralelos (Irvine, 2006, modificado).

### 6.2.3 Resultados dos testes em campo nos sítios 1a e 1b

As figuras 6.6, 6.7 e 6.8 informam as microdeformações máximas em azul e as microdeformações mínimas em rosa, que foram obtidas a partir das medições das amplitudes de flexão (pico-a-pico). Os instrumentos de medição foram montados respectivamente no grampo de ancoragem, no grampo de suspensão e no espaçador amortecedor, conforme os arranjos dos sítios 1a e 1b. Os dados das figuras 6.6, 6.7 e 6.8 foram plotados como megaciclos/dia acumulados por máximas e mínimas microdeformações.

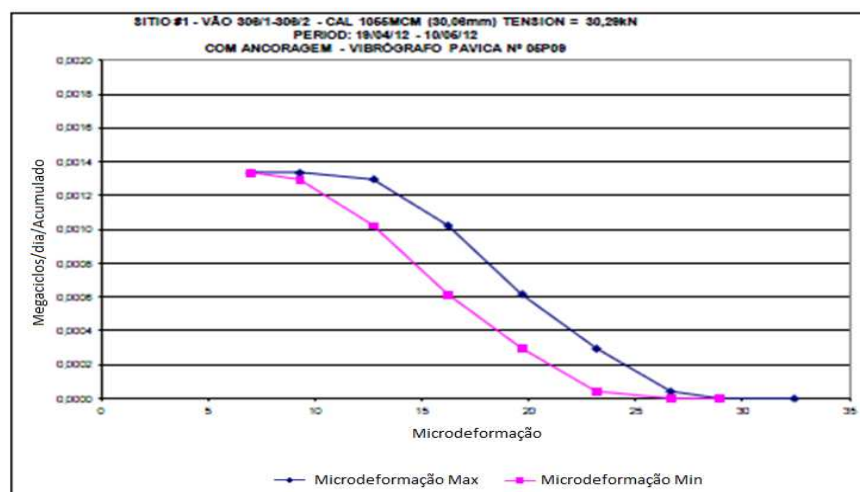


Figura 6.6 - Dados coletados pelo Vibrógrafo Pavica 05P09 (PLP,2011).

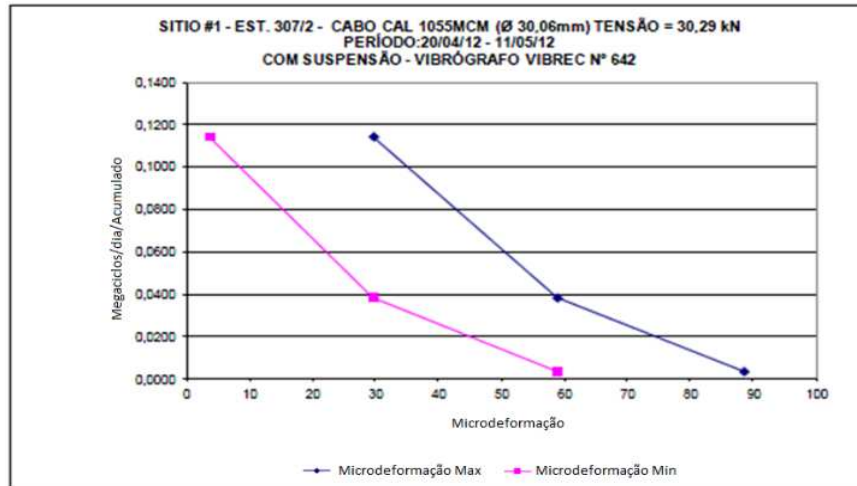


Figura 6.7 - Dados coletados pelo Vibrógrafo Vibrec 642 (PLP, 2011).

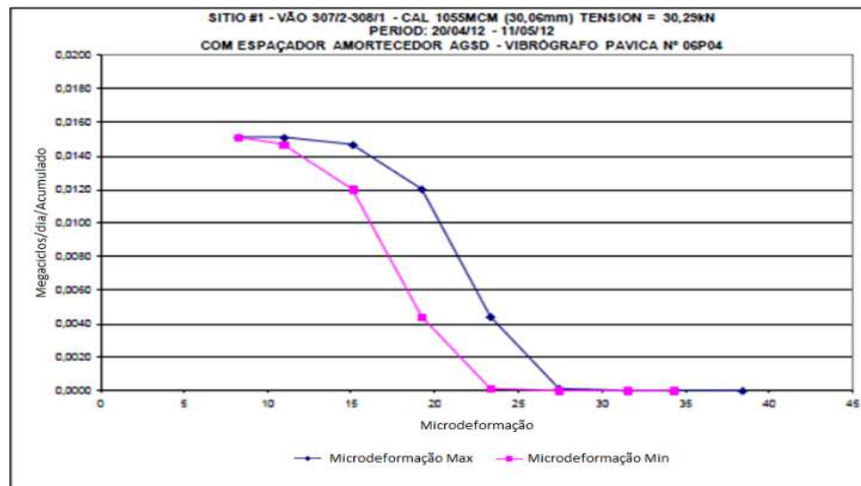


Figura 6.8 - Dados coletados pelo Vibrógrafo Pavica 06P04 (PLP, 2011).

A análise das figuras 6.6, 6.7 e 6.8 mostram que os níveis de alongamentos ou micro deformações máximas medidas pelos aparelhos nos grampos de ancoragem e de suspensão e no espaçador amortecedor foram respectivamente iguais a 32, 89 e 38 microdeformações (*microstrain*) e, portanto, inferiores ao valor de 150 microdeformações recomendada como máxima pelas normas do IEEE (1966) e CIGRÉ (1995) comentadas no capítulo 3 deste trabalho. Desta forma pode-se concluir que o espaçador amortecedor utilizado, bem como as dimensões da sua distribuição ao longo da linha atendem as características da vida útil do condutor especificado para a linha Oriximiná – Lechuga e as considerações de subvão determinadas no projeto. Um fato interessante, que se pode observar na análise das figuras é a diferença entre as medidas iniciais e finais das deformações máximas e mínimas representadas



na figura 6.7. Isto se deve ao fato do grampo ser de suspensão e suscetível a um deslocamento causado mesmo que a oscilação do condutor seja pequena. Durante o período de monitoramento, que foi de 23 de outubro a 12 de novembro de 2011, a velocidade do vento variou entre 1 a 15 m/s e a temperatura ambiente entre 20 a 36°C.

A figura 6.9 representa na sua esquerda as amplitudes de flexão medidas (pico a pico) versus o número de ciclos por ano e a sua direita a curva S-N ou curva de Wöhler para o condutor CAL 1055 kcmil 61 fios AL 6201-T81 e  $\varnothing = 3,34$  mm. O método desenvolvido pelo CIGRÉ (1995) para determinar a vida útil de um condutor foi comentado no capítulo 3 deste trabalho e é baseado em uma combinação entre a frequência em que ocorrem as várias amplitudes de flexão e o número total de ciclos de vibração. Esta relação pode ser utilizada para qualquer tipo de condutor e resulta na fronteira segura S-N, que representa a tensão de flexão ou tensão dinâmica determinada por uma frequência versus o número de ciclos para ocorrer a falha por fadiga. Os valores de uma curva S-N são influenciados pela característica do material do condutor analisado, como por exemplo: a microestrutura, os efeitos da dimensão, o acabamento da superfície e a frequência natural e pode representar 50% (por cento) de probabilidade de falha por fadiga. Quanto mais à esquerda estiver a curva, mais estará dentro de uma área segura ou sem risco de que o condutor falhe por fadiga. Desta forma pode-se concluir que as amplitudes de vibração do condutor, medidas pelos instrumentos, estão na região abaixo da curva S-N e, portanto, na região segura para não ocorrer a falha por fadiga do condutor.

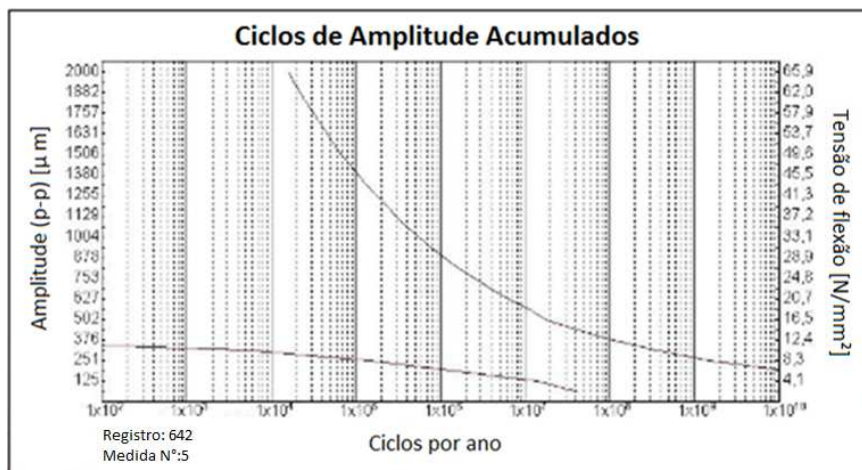


Figura 6.9 - Tensões acumuladas e curva S-N (PLP, 2011).

A figura 6.10 informa os valores das amplitudes de flexão obtidas das medições (pico-a-pico) pelos instrumentos instalados. Os dados foram plotados como máximas amplitudes

acumuladas. Como se pode observar a amplitude máxima registrada medida junto a um dos instrumentos de medição foi igual a 71 milímetros. Considerando que a amplitude máxima registrada foi inferior a máxima recomendada de 300 milímetros pelo IEEE (1966) e pelo CIGRÉ (1995) pode-se concluir que o nível de oscilação está bem abaixo do nível recomendado e por isto o espaçador amortecedor utilizado, bem como a sua distribuição ao longo da linha, atendem as características da vida útil do condutor.

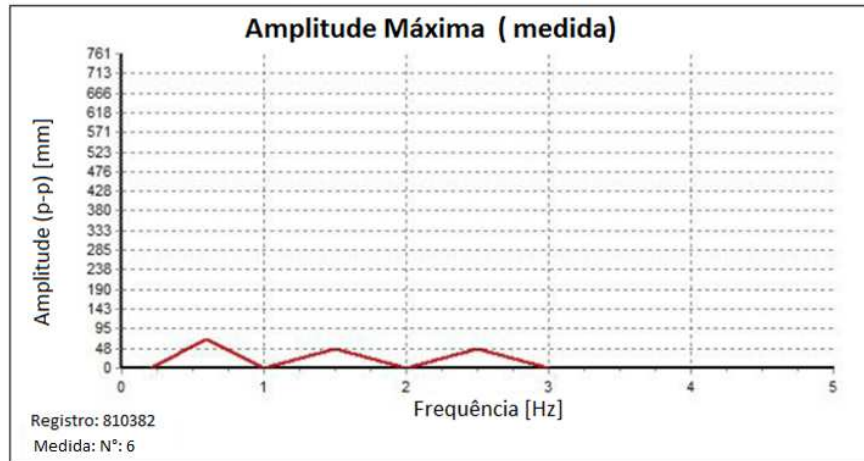


Figura 6.10 - Máximas amplitudes (PLP, 2011).

#### 6.2.4 Sítio 2 –torres de Suspensão e Suspensão– Terra Santa

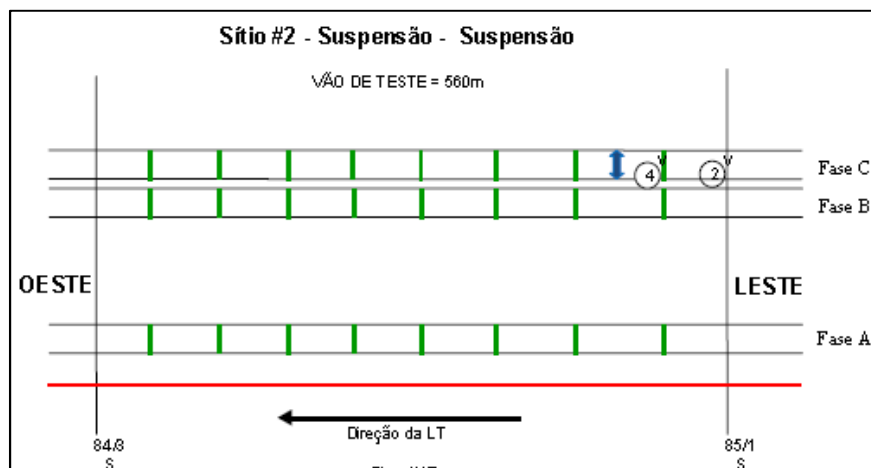


Figura 6.11 - Sítio 2 - vão 85/1 → 84/3 (PLP, 2011).

Onde:



Vibrec 500;



Cabo para-raios OPGW sem amortecedores;



Cabo condutor CAL 1055 kcmil 61 fios AL 6201-T81 e  $\varnothing = 3,34$  mm;

Espaçador amortecedor AGSD – 4703050;

②<sup>v</sup> Vibrógrafo Vibrec 642; e ④<sup>v</sup> Vibrógrafo Pavica 06P21.

Conforme mostra a figura 6.11, que representa o esquema de montagem, foi instalado no vão 85/1 um vibrógrafo Vibrec de referência 642 para monitorar as vibrações no cabo condutor inferior “2” da fase “C” do circuito 2 próximo ao grampo de suspensão do tipo AGS da empresa PLP de referência 560AGS5513R. O vibrógrafo Pavica referência 06P21 foi instalado para monitorar as vibrações no cabo condutor superior “1” da fase “C” do circuito 2 próximo a garra do espaçador amortecedor de referência AGSD-4703050. Já o instrumento Vibrec 500 foi instalado para monitorar as oscilações de subvão entre os cabos condutores “1 e 4” da fase “C” do circuito 2 no maior subvão a uma distância de 23 metros do espaçador amortecedor de referência AGSD-4703050.

#### Relatório fotográfico do arranjo do sítio 2



(a) Terreno do sítio 2



(b) Vibrec 642 instalado



(c) Vibrec 500 instalado



(d) Pavica 06P21 e Vibrec 500 instalados



(e) Vão adjacente a 84/2 sem espaçador amortecedor

Figura 6.12 - Sítio 2 (Eletronorte, 2011).

### 6.2.5 Resultados dos testes em campo no sítio 2

Tal qual os testes feitos nos sítios 1a e 1b, as figuras 6.13 e 6.14 informam as microdeformações máximas em azul e as microdeformações mínimas em rosa, que foram obtidas a partir das medições das amplitudes de flexão (pico-a-pico). Os instrumentos de medição foram montados respectivamente no grampo de suspensão e no espaçador amortecedor, conforme o arranjo do sítio 2. Os dados das figuras 6.13 e 6.14 foram plotados como megaciclos/dia acumulados por máximas e mínimas microdeformações. Durante o período de monitoramento a velocidade do vento variou entre 1 a 15 m/s e a temperatura entre 20 e 36°C. Com estas condições os alongamentos máximos foram: no grampo da suspensão igual a 148 microdeformações (microstrain) e na garra do espaçador igual a 27 microdeformações e, portanto, inferiores ao valor de 150 microdeformações recomendada como máxima pelas normas do IEEE (1966) e CIGRÉ (1995) comentadas no capítulo 3 deste trabalho. A análise da figura 6.13, mostra que valores de microdeformações são bem superiores aos valores da figura 6.7 referentes aos testes nos sítios 1a e 1b, o que demonstra que o efeito do vão adjacente sem o sistema de amortecimento instalado, conforme mostra a figura 6.12e aumentou o nível de vibração no trecho estudado do sítio 2.

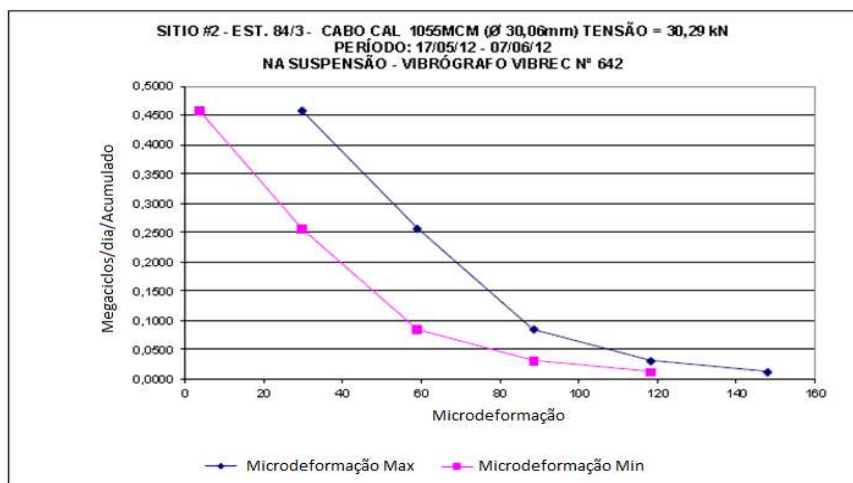


Figura 6.13 - Dados coletados pelo Vibrógrafo Vibrec 642 (PLP, 2011).

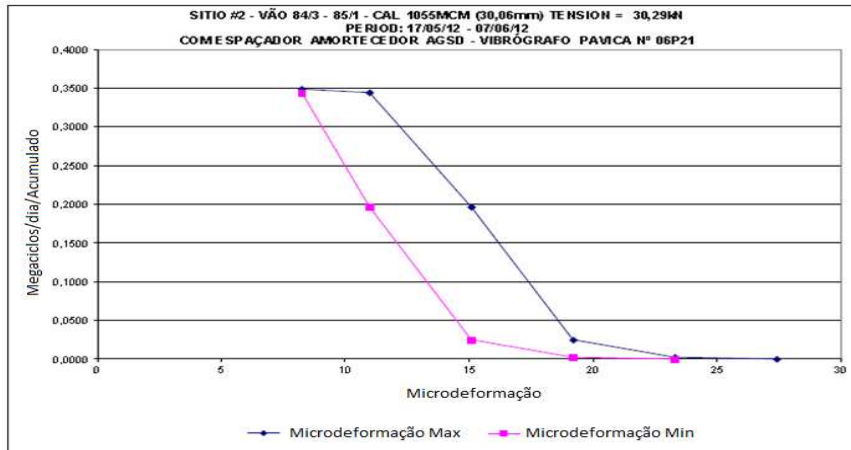


Figura 6.14 - Dados coletados pelo Vibrógrafo Pavica 06P21 (PLP, 2011).

A figura 6.15 representa a sua esquerda a curva das tensões acumuladas e a sua direita a curva S-N para o cabo condutor CAL 1055. Como pode ser observado, as vibrações encontradas estão em um nível de segurança satisfatório.

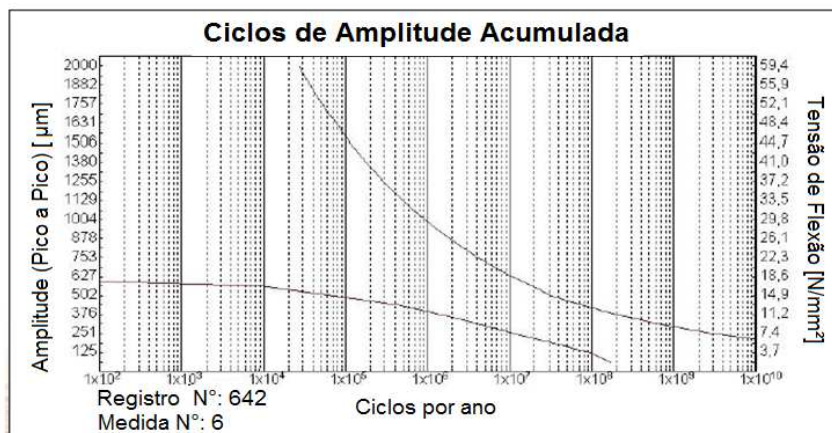


Figura 6.15 - Tensões acumuladas e curva S-N (Fonte: PLP Brasil).

A figura 6.16 informa os valores das amplitudes de flexão obtidas das medições (pico-a-pico) pelos instrumentos instalados. Os dados foram plotados como máximas amplitudes acumuladas. Como se pode observar a amplitude máxima registrada medida junto a um dos instrumentos de medição foi igual a 71 milímetros. Considerando que a amplitude máxima registrada foi inferior a máxima recomendada de 300 milímetros pelo IEEE (1966) e pelo CIGRÉ (1995) pode-se concluir que o nível de oscilação está bem abaixo do nível recomendado

e por isto o espaçador amortecedor utilizado, bem como a sua distribuição ao longo da linha, atendem as características da vida útil do condutor.

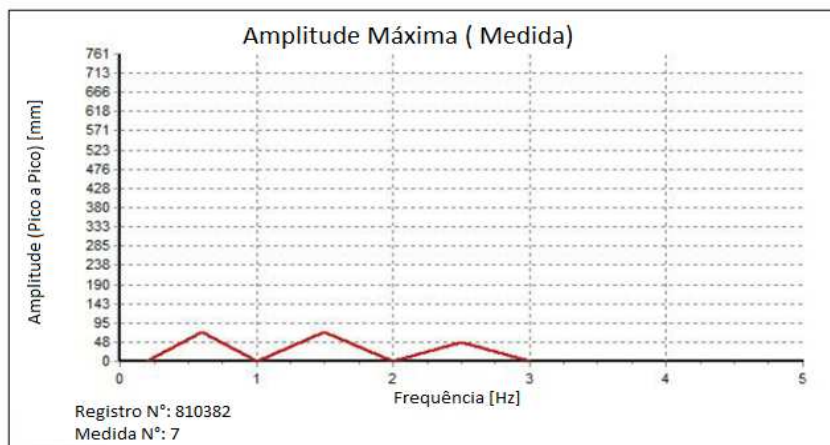


Figura 6.16 - Máximas amplitudes (PLP, 2011).

### 6.2.6 Sítio 3 –torres de Suspensão e Suspensão– Travessia do Rio Nhamunda

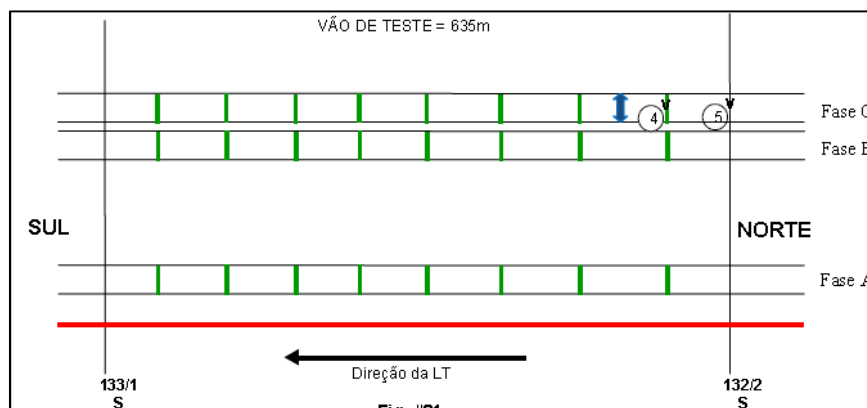


Figura 6.17 - Sítio 3 - vão 132/2→133/1 (PLP, 2011).

Onde:



Vibrec 500;



Cabo para-raios OPGW sem amortecedores;



Cabo condutor CAL 1055 kcmil 61 fios AL 6201-T81 e  $\varnothing = 3,34$  mm;



Espaçador amortecedor AGSD – 4703050;



Vibrógrafo Vibrec 643; e



Vibrógrafo Pavica 06P21.



Conforme mostra a figura 6.17, que representa o esquema de montagem, foi instalado no vão 132/2 um vibrógrafo Vibrec de referência 643 para monitorar as vibrações no cabo condutor superior “4” da fase “C” do circuito 2 próximo ao grampo de suspensão do tipo AGS da empresa PLP de referência 560AGS5513R. O vibrógrafo Pavica referência 06P21 foi instalado para monitorar as vibrações no cabo condutor superior “4” da fase “C” do circuito 2 próximo a garra do espaçador amortecedor de referência AGSD-4703050. Já o instrumento Vibrec 500 foi instalado para monitorar as oscilações de subvão entre os cabos condutores “1 e 4” da fase “C” do circuito 2 no maior subvão a uma distância de 23 metros do espaçador amortecedor de referência AGSD-4703050.

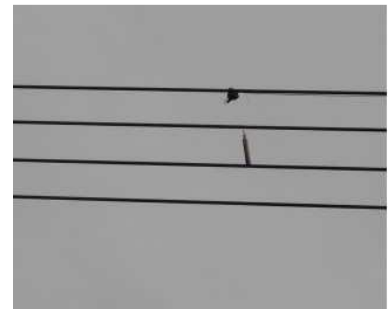
### Relatório fotográfico do arranjo do sítio 3



(a) Área do sítio 2



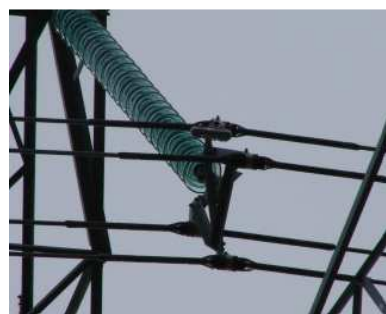
(b) Detalhe do vão a ré



(c) Vibrec 500 instalado



(d) Pavica 06P21 e Vibrec 500 instalados



(e) Vibrec 643 instalado

Figura 6.18 - Sítio 3

### 6.2.7 Resultados dos testes em campo no sítio 3

Tal como os testes feitos nos sítios 1a, 1b e 2, as figuras 6.19 e 6.20 informam as microdeformações máximas em azul e as microdeformações mínimas em rosa, que foram obtidas a partir das medições das amplitudes de flexão (pico-a-pico). Os instrumentos de medição foram montados respectivamente no grampo de suspensão e no espaçador

amortecedor, conforme o arranjo do sítio 3. Os dados das figuras 6.19 e 6.20 foram plotados como megaciclos/dia acumulados para máximas e mínimas microdeformações. Durante o período de monitoramento a velocidade do vento variou entre 1 a 15 m/s e a temperatura entre 20 e 32°C. Com estas condições os alongamentos máximos foram: no grampo da suspensão igual a 107 microdeformações (microstrain) e na garra do espaçador igual a 58 microdeformações e, portanto, inferiores ao valor de 150 microdeformações recomendada como máxima pelas normas do IEEE (1966) e CIGRÉ (1995).

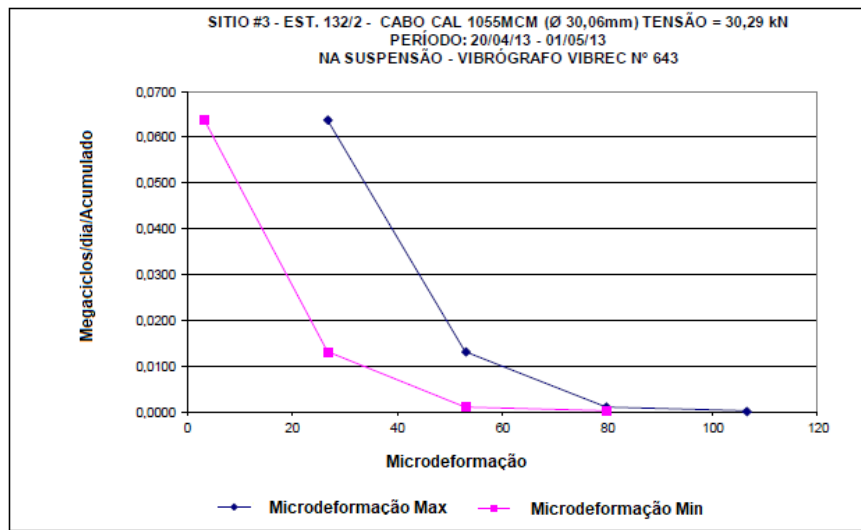


Figura 6.19 - Dados coletados pelo Vibrógrafo Vibrec 643 (PLP, 2011).

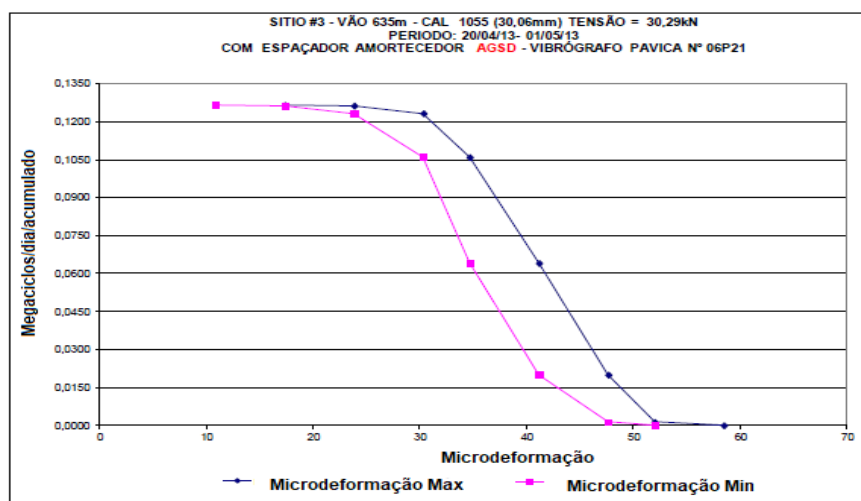


Figura 6.20 - Dados coletados pelo Vibrógrafo Pavica 06P21 (PLP, 2011).



A figura 6.21 representa a sua esquerda a curva das tensões acumuladas e a sua direita a curva S-N para o cabo condutor CAL 1055. Como pode ser observado, as vibrações encontradas estão em um nível de segurança satisfatório.

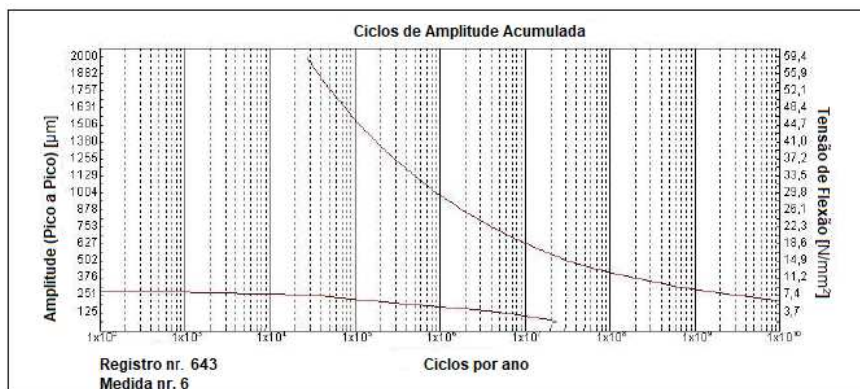


Figura 6.21 - Tensões acumuladas e curva S-N (Fonte: PLP Brasil).

A figura 6.22 informa os valores das amplitudes de flexão obtidas das medições (pico-a-pico) pelos instrumentos instalados. Os dados foram plotados como máximas amplitudes acumuladas. Como se pode observar a amplitude máxima registrada medida junto a um dos instrumentos de medição foi igual a 95 milímetros. Considerando que a amplitude máxima registrada foi inferior a máxima recomendada de 300 milímetros pelo IEEE (1966) e pelo CIGRÉ (1995) pode-se concluir que o nível de oscilação está bem abaixo do nível recomendado e por isto o espaçador amortecedor utilizado, bem como a sua distribuição ao longo da linha, atendem as características da vida útil do condutor.

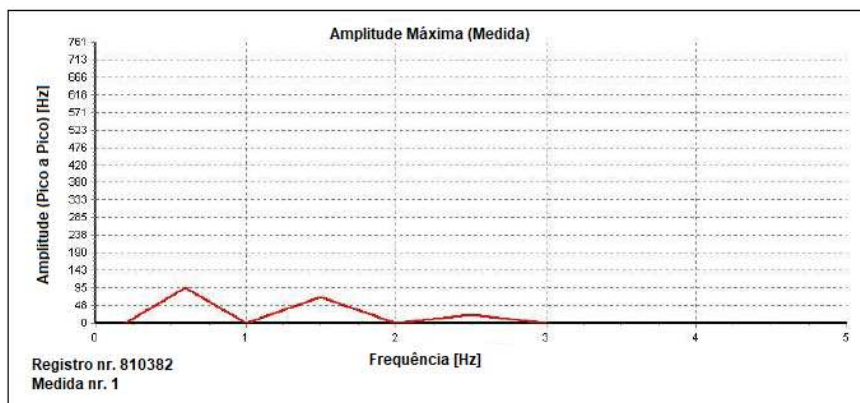


Figura 6.22 - Máximas amplitudes (PLP, 2011).

## CAPÍTULO 7

### 7. CONCLUSÃO

A amplitude de flexão ou o deslocamento vertical de um condutor aéreo de eletricidade devido a ação dos vórtices de Von Karman é linearmente relacionado à deformação do próprio condutor, que é estritamente relacionada com o fenômeno da fadiga por *fretting*. Os procedimentos para a determinação da amplitude de flexão foram desenvolvidos após vários ensaios de campo realizados em diferentes condutores e em diferentes situações de cargas de vento pela empresa Canadense *Ontario Hydro* e posteriormente com a teoria de Poffenberg e Swart (1965) foram normatizados pelo IEEE (1966) e pelo CIGRÉ (1995). Estes procedimentos normatizados juntos com os instrumentos registradores Vibrec e Pavica, que utilizam a teoria de Poffenberger e Swart, por serem práticos e confiáveis foram utilizados nos ensaios de campo da linha de transmissão de 500 kV em circuito duplo entre as cidades de Oriximiná no estado do Pará e Silves no estado do Amazonas. Segundo Guérard (2011) ainda não existem procedimentos completos ou sem incertezas e aproximações para a determinação da vida útil de um condutor de energia aéreo. Para Guérard (2011) as incertezas são:

- 1- Quando o histórico de medições de vibrações for realizado por instrumentos registradores de vibrações antigos, que realizam apenas alguns segundos de medições a cada 10 ou 15 minutos resulta na perda de muitas informações no histórico de vibrações e desta forma as gravações podem não representar as condições reais.

Os instrumentos registradores utilizados no teste da linha de transmissão entre as cidades de Oriximiná e Silves eram instrumentos com apenas 1 (um) ano de uso e com autonomia para realizarem medições contínuas por 6 (seis) meses, além de serem digitais e possuírem um microprocessador com uma memória na qual os dados foram armazenados em formato digital. A frequência e a amplitude dos ciclos de vibração foram medidas por algoritmos armazenados em uma matriz de memória de acordo com os procedimentos sugeridos pelo IEEE (1966) e pelo CIGRÉ (1995).

- 2- Quando o terreno local afeta a severidade da vibração.

Como comentado no capítulo 2 deste trabalho, o tipo de relevo afeta o escoamento do vento e para garantir que o vento tivesse a configuração de escoamento laminar e produzisse os efeitos mais danosos ao condutor, foram escolhidos para os sítios 1a, 1b e 2 terrenos planos sem obstáculos e para o sítio 3 a travessia do rio Nhamunda. Os ensaios de laboratórios do espaçador

amortecedor foram executados com os dados recolhidos da travessia do rio Trombetas no estado do Pará.

3- Quando a exposição a fadiga pode variar entre os vãos de linha.

Estendida para evitar que as ocorrências de diferentes cargas de vento entre os vãos não fossem consideradas na medição, foram escolhidos três sítios posicionados em vãos de linha diferentes, inclusive em um deles as medições sofreram o efeito da falta do sistema de amortecimento do vão adjacente.

4- Quando os comportamentos das fases em um mesmo vão de linha podem ser diferentes.

Na situação de subcondutores separados por espaçadores, como acontece na linha de transmissão entre as cidades de Oriximiná e Silves este fenômeno chamado de oscilação de subvão acontece. Para medir as oscilações de subvão foi usado o instrumento registrador Vibrec 500.

5- Quando a massa do instrumento registrador pode alterar as propriedades inerciais do suporte.

O instrumento registrador mais pesado utilizado no teste foi o Pavica, cujo peso é de apenas 0,5 kg.

6- Quando a gravidade da vibração varia com as condições meteorológicas numa base horária e diária.

Para evitar que as medidas registradas não representassem a realidade dos locais dos testes, durante o período de monitoramento a velocidade do vento variou entre 1 a 15 m/s e a temperatura entre 20 e 36°C.

7- Quando as curvas de fadiga são obtidas com testes executados com amplitude constante e não são levadas em consideração a sequência de ocorrências de amplitudes.

As figuras 6.10, 6.16 e 6.22 informam respectivamente os valores máximos da amplitude de flexão medidas nos sítios 1a, 1b, 2 e 3, que foram tomadas próximas aos grampos de suspensão e de ancoragem e, também no espaçador amortecedor. Estes gráficos, também informam as medidas tomadas em outros pontos do vão de linha.

A vida útil de um condutor depende da sua capacidade de transportar a corrente nominal com segurança na tensão nominal sem perda excessiva ou falhas e varia de acordo com o tipo de condutor, com a instalação e as condições sob as quais é operado. Portanto, a vida útil de um

condutor varia de instalação para instalação e pode ser estendida na maioria dos casos. Por todas estas razões, a estimativa da vida útil ou da duração de trabalho de um condutor é uma tarefa extremamente desafiante. Atualmente, fazer o monitoramento através de ensaios no campo com os aparelhos de medição comentados no capítulo 4 deste trabalho, que utilizam a regra de Miner e as curvas S-N comentados no capítulo 3 é o melhor caminho para estimar com precisão a vida útil de um condutor em relação a fadiga por *fretting*. Como os monitoramentos efetuados nos sítios 1a, 1b, 2 e 3 foram satisfatórios e os resultados das medições foram inferiores as prescrições das normas IEEE (1966) e CIGRÉ (1995), o que demonstra que o sistema de amortecimento composto pelo espaçador amortecedor AGSD-4703050 está adequadamente dimensionado e distribuído para proteger o condutor contra as vibrações eólicas ao longo da vida útil estimada para a Linha de Transmissão. O uso do grampo de suspensão do tipo AGS corrobora para maior suportabilidade das tensões dinâmicas do condutor e que o Sítio 2 terá as tensões de dobramento reduzidas assim que foram instalados os espaçadores amortecedores no vão adjacente a torre 84/3. Abaixo seguem os resultados dos aparelhos instalados respectivamente nos sítios 1b, 2 e 3.

CONDUCTOR DATA		
No. of strands	Strand diameter	Strand material
61	3,34	Alloy
Total conductor area [mm <sup>2</sup> ]: 534,46		
Minimum bending stiffness [N*mm <sup>2</sup> ]: 26457,2 * 10 <sup>3</sup>		
Conductor stress at T = 25 °C [N/mm <sup>2</sup> ]: 56,7		
Material of outer layer: Alloy		
Diameter of outer layer [mm]: 3,34		
Stress/Ampl. factor (Poff./Swart): 32,44		
Distance between sensor and clamp [mm]: 90,0		
<b>Estimated conductor lifetime expectancy is &gt; 100 years</b>		

Figura 7.1 - Sítio 1b - estrutura 307/2 (PLP, 2011).

CONDUCTOR DATA		
No. of strands	Strand diameter	Strand material
61	3,34	Alloy
Total conductor area [mm <sup>2</sup> ]: 534,46		
Minimum bending stiffness [N*mm <sup>2</sup> ]: 26457,2 * 10 <sup>3</sup>		
Conductor stress at T = 25 °C [N/mm <sup>2</sup> ]: 56,7		
Material of outer layer: Alloy		
Diameter of outer layer [mm]: 3,34		
Stress/Ampl. factor (Poff./Swart): 29,68		
Distance between sensor and clamp [mm]: 96,0		
<b>Estimated conductor lifetime expectancy is 50 years</b>		

Figura 7.2 - Sítio 2 - estrutura 84/3 (PLP, 2011).

CONDUCTOR DATA		
No. of strands	Strand diameter	Strand material
61	3,34	Alloy
Total conductor area [mm <sup>2</sup> ]:	534,46	
Minimum bending stiffness [N*mm <sup>2</sup> ]:	26457,2 * 10 <sup>3</sup>	
Conductor stress at T = 25 °C [N/mm <sup>2</sup> ]:	56,7	
Material of outer layer:	Alloy	
Diameter of outer layer [mm]:	3,34	
Stress/Ampl. factor (Poff./Swart):	29,68	
Distance between sensor and clamp [mm]:	96,0	
<b>Estimated conductor lifetime expectancy is &gt; 100 years</b>		

Figura 7.3 - Sítio 3 - estrutura 132/2 (PLP, 2011).

## 7.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como a dissertação aborda temas e metodologias sujeitas a atualização. Assim, os seguintes temas poderiam ser explorados com maior profundidade em pesquisas futuras:

- Desde a introdução da fórmula Poffenberger – Swart tem-se observado que ocorre certa incerteza ou imprecisão quando utilizada em pequenas amplitudes de vibração em que os ciclos se acumulam em maior número. Esta situação tem um efeito significativo na resistência do condutor, pois neste caso os fios do condutor se comportam com um sólido e desta forma responde à carga de flexão com a rigidez máxima, ao contrário quando as amplitudes de vibração são maiores em que a fórmula Poffenberger – Swart tem uma boa aproximação.
- A forma mais comum de apresentar a fadiga em um condutor é o resultado registrado na curva S-N, que indica os pontos de falhas nos fios do condutor. Alguns autores utilizam o valor de 150 microdeformações, pico a pico para o limite de deformação que o condutor pode sofrer sem que ocorra o fenômeno da fadiga. Mais de cinquenta por cento dos autores prescrevem valores iguais a 300 microdeformações, pico a pico como valores mais coerentes ou menos conservativos.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderson, K. and Hagedorn, P. (1995), “On the energy dissipation in spacer-dampers in bundled conductors of overhead transmission lines”.

ASTM (1992) - STP 1159 – Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment. Hoepfner, D.W., “Mechanisms of Fretting Fatigue and Their Impact on Test Methods Development”.

ASTM (1992) - STP 1159 – Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment. Waterhouse, R.B., “A Historical Introduction to Fretting Fatigue”.

Azevedo, C. R. F., Henriques, A. M. D., Pulino Filho, A. R., Ferreira J. L. A. and Araújo, J. A. (2009), “Fretting in overhead conductors: Rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminum cable steel reinforced conductor”, Universidade de Brasília.

Belloli, M., Collina, A. and Resta, F. (2006), “Cables Vibrations due to Wind Action”, O.I.T.A.F Seminar, Grenoble.

Burndy do Brasil (2016), “Apresentação Técnica: Sistema de Amortecimento de Vibrações”.

CEPEL (2011) - Relatório de Ensaio nº 14394, “Medição de Radiofrequência”.

CIGRÉ (1979) - ELECTRA nº 62, “Guide on Conductor Self-Damping Measurements”.

CIGRÉ (1079) - SC22 WG04 TF2, “Recommendations for the Evaluation of Lifetime of Transmission Line Conductors”.

CIGRÉ (1995) - SC22 WG11 TF2, “Guide to Vibrations Measurements on Overhead Lines”.

CIGRÉ (1998) - TF 22.11.1 – ELECTRA nº 181, “Modeling of Aeolian Vibration of Single Conductors: Assessment of the Technology”.

CIGRÉ (2005) - WG B2 WG11-TF5, “Overhead Lines, Tutorial Presentation on Spacers and Spacer Dampers”.

Diana, G., Cheli, F., Fossati, F. and Manenti, A. (1996), “Aeolian Vibrations of Overhead Transmission Lines: Computation in Turbulence Conditions”.

Diana, G. (2011), “Modeling of Aeolian Vibrations of Singles Conductors and Single Conductors plus Dampers”, Study Committee B2 Technical Advisory Group B2-AG-06 – CIGRÉ, Thailand.

Eden, E. M., Rose, W. N. and Cunningham, F. L. (1911), “Endurance of Metals”, proceedings on the Institute of Mechanical Engineers.

EPRI (2006), “Wind Induced Conductor Motion”, Transmission Line Reference Book, Second Edition – 1012317.

EPRI (2009), “Wind Induced Conductor Motion”, Transmission Line Reference Book.

Fadel, A. A., Araújo, J. A., Murça, L. B., Ferreira, J. L. A., Henriques, A. A. M. D. (2010), “Avaliação da fórmula de Poffenberger - Swart para levantamento de curvas S-N para montagens cabo/grampo operando com elevada EDS”, Universidade de Brasília.

Fenner, A. J. and Field, J. E. (1958), “La Fatigue Dans les Conditions de Frottement”, Vol. 55.

Guérard, S. (2011), “Power Line Conductors, a Contribution to the Analysis of their Dynamic Behaviour”, University of Liège.

IEC (1997) - Standard 61284, “Overhead Lines – Requirements and tests for Fittings”.

IEC (1998) - Standard 61897, “Overhead Lines – Requirements and tests for Stockbridge type aeolian vibration”.

IEC (1998) - Standard 61854, “Overhead Lines – Requirements and tests for Spacers”.

IEEE (1978) - Standard 563, “Guide on Conductor Self-Damping Measurements”.

IEEE (1993), “Guide for Laboratory Measurement of the Power Dissipation Characteristics of Aeolian Vibration Dampers for Single Conductors”.

IEEE (1996) - Committee Report PAS-85 vol. 85, “Standardization of Conductor Vibration Measurements”.

IEEE (2015) - Technical Report PES-TR17, “An Introductory Discussion on Aeolian Vibration of Single Conductors”, Aeolian Vibration Task Force.

Irvine, T. (2006), “Vibrationdata”, Newsletter.

Kasap, H. (2012), “Investigation of Stockbridge Dampers for Vibration Control of Overhead Transmission Lines”.

Kubelwa, Y. D., Papailiou, K. O., Loubser, R. and Moodley, P. (2012), “How Well Does the Poffenberger – Swart Formula Apply to Homogeneous Compact Overhead Line Conductors”, 18 th World Conference on Non-destructive Testing, South Africa.

Lilien, J.L. (2013) - Department of Electronics, Electricity and Computer Sciences Transmission and Distribution of Electrical Energy, Université de Liège.

Liu, H. W., Corten, H. T. and Sinclair, G. M. (1957), “Fretting Fatigue Strength of Titanium Alloy “, Proceedings of ASTM, Vol.57.

Marte Engenharia e Manaus Transmissora de Energia (2009), “Memória de cálculo das cargas do vento de projeto da linha Oriximiná – Silves – Lechuga”.

Nishioka, K. and Hirakawa, K. (1969), “Fundamental Investigations of Fretting Fatigue”, Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 12.

Pestana, M. S., Miranda, T. B., Kalombo, R. B., de Araujo, J. A., Ferreira, J. L. A., da Silva, C. R. M., Vieira, R. E. R. e Rocha, P. H. C. (2016), “Análise do efeito da tensão média sobre a resistência a fadiga do cabo condutor CAL 1055 MCM”, Universidade de Brasília.

PLP, Preformed Line Products (2005), “Testing of the Spacer Damper Clamp Line-Quad”.

PLP, Preformed Line Products (2011) - Relatório de Ensaio nº 36, “Relatório de Ensaio de Escorregamento do Grampo”.

PLP, Preformed Line Products (2011) - Relatório de Ensaio nº 37, “Relatório de Ensaio de Resistência Elétrica”.

PLP, Preformed Line Products (2011) - Relatório de Ensaio nº 38, “Relatório de Ensaio de Flexibilidade”.

PLP, Preformed Line Products (2011) - Documento nº 704, “Monitoramento de Campo do Sistema de Amortecimento para Manaus Transmissora”.

Prahl, J. G., de Brito, J. L. V. (2017), “Fatigue Behavior of an Overhead Line Conductor”, MACMS.



Reinke, G., da Silva, C. R. M., Ferreira, J. L. A., de Araujo, J. A., de Araujo, M. C. e Kalombo, R. B. (2017), “Influência da microestrutura dos fios de alumínio na vida em fadiga de cabos condutores de energia elétrica”, Universidade de Brasília.

Rolim, A. L., Veloso, L. A. C. M., de Souza, R. M. and Neto, J. P. da R. (2007), “Experimental analyses for the determination of lifetime expectancy of transmission line conductors”, Universidade de Brasília.

Sangalli, G. (2012) - Salvi Eletro Fittings, “Damper Effectiveness Evaluation Analytical Method – Rio Trombetas Crossing”.

Sonsino, C. M. (2007), “Course of SN-Curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety”.

Tomlinson, G.A. (1927), “Proceedings on the Royal Society, vol. 115”, University of Nottingham.

Vecchiarelli, J., Currie, I.G. and Havards, D.G. (1999), “Computational Analysis of Aeolian Conductor Vibration with a Stockbridge Type Damper”, University of Toronto.

Vilela, T., Fadel, A., Ferreira, J. and Araújo, J. (2013), “Study of Experimental Techniques for Fatigue Stress Measurements in Overhead Cables for Power Lines”, COBEM.

Warlow-Davies, E. J. (1941), “Fretting Corrosion and Fatigue Strength”, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Vol. 146.

Waterhouse, R. B. (1961), “Influence of Local Temperature Increases on the Fretting Corrosion of Mild Steel”, Steel Institute, Vol.197.

Wolf, H., Semenski, D. and Pustaic, D. (2008), “Using the Energy Balance Method in Estimation of Overhead Transmission Line Aeolian Vibrations”.

**- ANEXO A -**

**FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA ESANAM**

## A1 INFORMAÇÕES GERAIS

O cálculo do nível de vibração eólica de um feixe condutor é realizado para cada modo principal de vibração do feixe, alcançando um equilíbrio entre a energia introduzida no sistema pelo vento através do fenômeno da esteira de vórtices de Von Karman e a energia dissipada pelos condutores e/ou pelos espaçadores e amortecedores. Para cada modo principal de vibração do feixe, os cálculos fornecerão a frequência natural e a deformação relativa do feixe ao longo do intervalo. A deformação relativa, significa que depois de ter assumido uma amplitude de referência em uma seção transversal específica no vão, as amplitudes em todas as outras seções transversais serão expressas em relação a amplitude de referência. A energia introduzida pelo vento e a energia dissipada pelo feixe são calculadas a partir da “deformação relativa”, dando assim duas funções, dependendo da amplitude da vibração da seção transversal de referência. Essa amplitude é então alterada até que o equilíbrio de energias seja alcançado. Quando essa condição for atingida, os valores absolutos das amplitudes de vibração ao longo do vão, ou seja, a deformações reais do vão poderão ser obtidas. Em particular, a partir dos valores absolutos das amplitudes de vibração nos grampos espaçadores, os cálculos determinarão as forças aplicadas ao espaçador e os ângulos de rotação das dobradiças/braços dos espaçadores. A deformação do vão permitirá, além disso, o cálculo das deformações de flexão dinâmica nos grampos do espaçador ou do ponto de suspensão.

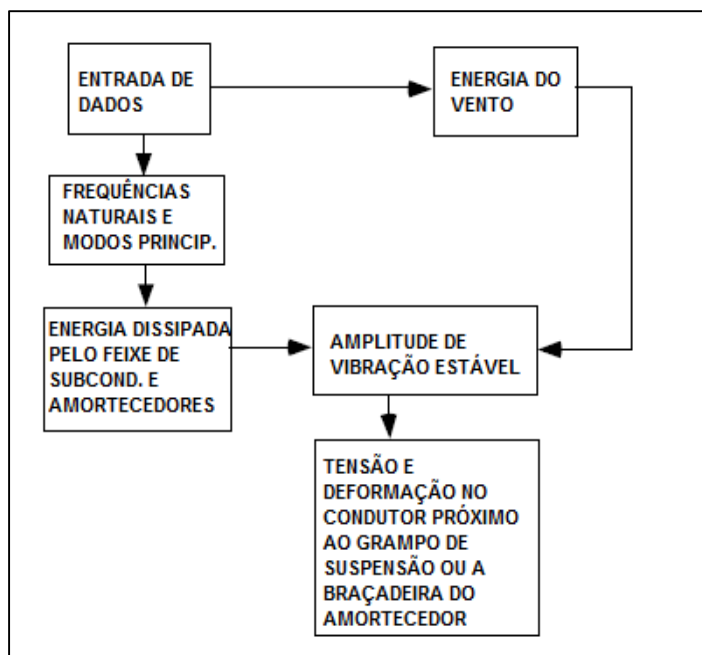


Figura A.1 - Fluxograma do programa (ESANAM, sem data, modificado).

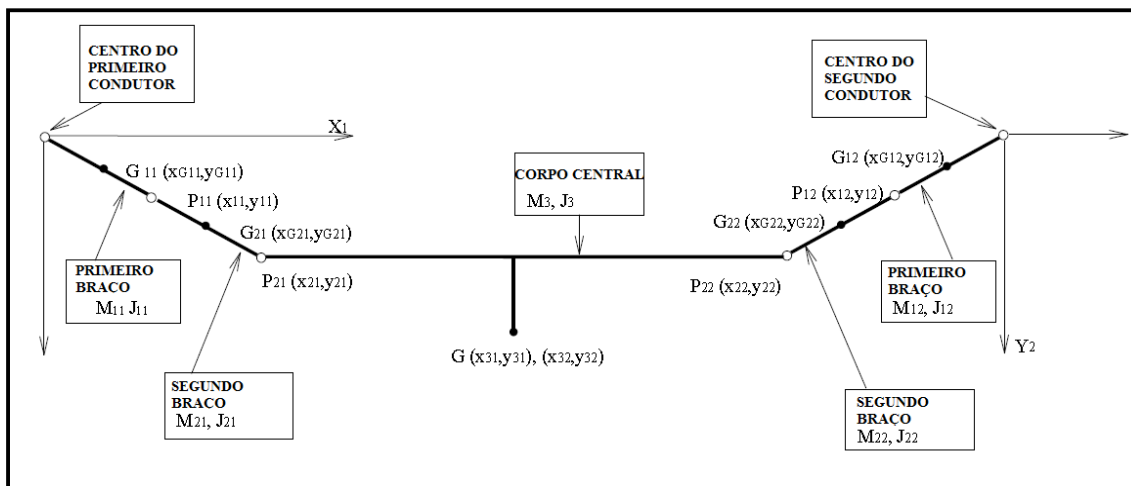


Figura A.2 - Dados da entrada de dados do espaçador (ESANAM, sem data, modificado).

## A2 DADOS DE ENTRADA:

- 1- Dados do condutor;
- 2- Dador do amortecedor; e
- 3- Dados do espaçador.

O condutor utilizado na travessia do Rio Trombetas tem as seguintes características:

Condutor: AACSR/HS (*Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced*) protegido em todas as camadas da corrosão.

Tabela A.1 – Características da linha de transmissão – travessia do Rio Trombetas.

Fios: (42 x 4,03mm) + (37 x 2,87mm)	Tipo de vento: sem turbulência
Diâmetro: 36,21mm	Varas de armadura no grampo de suspensão: sim
Carga de tração: 112010 N	Amortecedor de vibração para condutor: sim
Tipo de feixes de condutor: Quadruplo com 700mm de espaçamento	Espaçador amortecedor para condutor: quadruplo
Comprimento do vão: máximo igual a 1628m	Limite de deformação para condutor: 100 microdeformações (0 a pico)
Especificação do terreno: terreno aberto	

O tipo de espaçador é definido com as seguintes informações:

- Dados Geométricos: Posições relativas dos grampos, espaçadores, articulações e centro de gravidade;
- Dados Inerciais: Massas e Momentos de Inércia das partes do espaçador; e
- Características das articulações: Rigidez Axial e Torsional.

A rigidez torsional ( $Kt$ ) e o amortecimento torsional não-dimensional ( $Ht/Kt$ ) são comentados no texto principal do capítulo 5 deste trabalho e se referem as propriedades elástica e amortecedora da articulação do espaçador. Dando continuidade ao texto, pode-se afirmar que a força de inércia devido às massas entre o dinamômetro e o grampo do espaçador, se não for desconsiderada, deverá ser subtraída da força medida e após corrigida a força por unidade de deslocamento ( $F_d/x$ ) do cilindro poderá ser determinada. A rigidez torsional e o amortecimento da articulação em função da frequência ( $\Omega$ ) em [rad/seg] poderá ser determinada pelas seguintes equações:

$$\frac{F_d}{x} \cos \varphi = -\Omega^2 \frac{J_0}{l^2} + \frac{Kt}{l^2} \quad (A1)$$

$$\frac{Ht}{Kt} = \frac{\frac{F_d}{x} \sin \varphi}{\frac{F_d}{x} \cos \varphi + \Omega^2 \frac{J_0}{l^2}} \quad (A2)$$

Onde,  $Kt$  e  $Ht$  são respectivamente a rigidez torsional e a constante de amortecimento obtidas da parte real e da parte imaginária da força corrigida  $F_d$ , ou seja, de  $\frac{F_d}{x} \cos \varphi$  e  $\frac{F_d}{x} \sin \varphi$ ,  $J_0$  é o momento de inércia do braço do espaçador com relação ao centro da articulação,  $\Omega$  é a frequência e  $l$  é o comprimento do centro do braço ao centro da articulação.

### A3 DADOS DE ENTRADA (CONTINUAÇÃO).

- 4- Tipo de terreno; e

5- Características geométricas do vão. Aqui são definidos em quantos subvãos são divididos o vão da linha.

Os dados dos itens “4” e “5” referentes a travessia do Rio Trombetas podem ser vistos na tabela A.1 deste anexo.

#### A4 MATRIX DE RIGIDEZ DO ESPAÇADOR

A matriz de rigidez de um espaçador pode ser representada da seguinte maneira:

$$F = [K]u \quad (A3)$$

Onde,  $F$  é o vetor da força elástica do grampo do espaçador e  $u$  é o vetor deslocamento do grampo do espaçador.

O autovetor da matriz de rigidez  $[k]$  define o tipo de modos de vibração do feixe se a inércia do espaçador for ignorada. Como exemplo, o tipo de modos de vibração de um feixe com quatro subcondutores está representado na figura A.3.

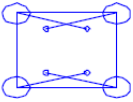
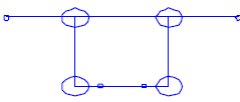
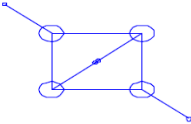
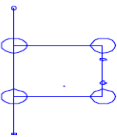
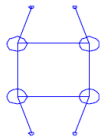
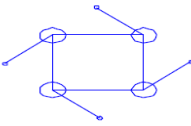
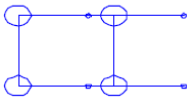
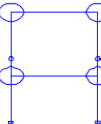
		
Modo 1/Autovalor = 264870.00	Modo 2/Autovalor = 124681.87	Modo 3/Autovalor = 57937.60
		
Modo 4/Autovalor = 17734.04	Modo 5/Autovalor = 16492,48	Modo 6/Autovalor = 0.005
		
Modo 7/Autovalor = 0.001	Modo 8/Autovalor = -0.012	

Figura A.3 – Autovalores e autovetores para um feixe quádruplo (ESANAM, sem data, modificado).

## A5 FREQUÊNCIA NATURAL E MODOS PRINCIPAIS DE VIBRAÇÃO DO FEIXE

As frequências naturais são determinadas pelo método matricial com referência a figura A.4.

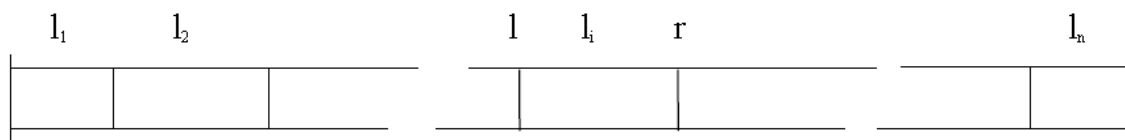


Figura A.4– Detalhe da localização dos subvão (ESANAM, sem data).

A matriz [B] pode ser determinada pela seguinte relação (A):

$$\begin{bmatrix} Y_r \\ F_r \end{bmatrix} = [B]_i \begin{bmatrix} Y_l \\ F_l \end{bmatrix} \quad (A4)$$

Subvão i

Subvão i

Onde,  $Y$  e  $F$  são respectivamente o deslocamento e a força do condutor nas extremidades do subvão (i).

$$[B] = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma l_i & 0 \\ 0 & \cos \gamma l_i \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\sin \gamma l_i}{S\gamma} & 0 \\ 0 & \frac{\sin \gamma l_i}{S\gamma} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -S\gamma \sin \gamma l_i & 0 \\ 0 & -S\gamma \sin \gamma l_i \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \cos \gamma l_i & 0 \\ 0 & \cos \gamma l_i \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (A5)$$

Onde,  $S$  é a tensão e  $l_i$  é o comprimento do vão.

A matriz [P] é definida da seguinte relação:

$$\begin{bmatrix} Y_r \\ F_r \end{bmatrix} = [P]_i \begin{bmatrix} Y_s \\ F_s \end{bmatrix} \quad (A6)$$

espaçador i      espaçador i

Onde,  $Y$  e  $F$  são respectivamente o deslocamento e a força à direita e à esquerda do espaçador e  $[P]$  é determinada, conforme a seguir:

$$[P]_i = \begin{bmatrix} I & 0 \\ D & I \end{bmatrix} \quad (A7)$$

$$[D] = [K - Mw^2] \quad (A8)$$

Onde,  $[K]$  e  $[M]$  são respectivamente a matriz flexibilidade e massa do espaçador.

A relação entre o deslocamento e a força na extremidade do vão pode ser representada da seguinte forma.

$$\begin{bmatrix} Y_l \\ F_l \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} Y_r \\ F_r \end{bmatrix} \quad (A9)$$

$$[A] = [B]_n [P]_{n-1} [B]_{n-1} \dots \dots \dots [P_1] [B_1] \quad (A10)$$

Definindo  $[A]$  através de submatrizes  $[A_{ij}]$ , vem:

$$\begin{bmatrix} Y_l \\ F_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (A11)$$

Como o deslocamento nas extremidades do vão é igual a zero, então:

$$[A_{12}]F_s = 0 \quad (A12)$$



$$\det [A_{12}] = 0 \quad (\text{A13})$$

O determinante de  $[A_{12}]$  será zero para valores de  $(w)$  correspondente a frequência natural do feixe ou dos subcondutores. Para cada valor de  $(w)$  um vetor  $(F_s)$  pode ser definido e o vetor que define a condição na extremidade a esquerda é:

$$\begin{bmatrix} Y_l \\ F_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ F_{1l} \\ F_{2l} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (\text{A14})$$

Desta forma o deslocamento e a força em qualquer seção do feixe podem ser determinados. Por exemplo, para o primeiro subvão:

$$\begin{bmatrix} Y_x \\ F_x \end{bmatrix}_1 = [B(x)]_1 \begin{bmatrix} Y_l \\ F_l \end{bmatrix}_1 \quad (\text{A15})$$

Sendo que  $B_1(x)$  definido pela equação (A5) colocando  $x$  no lugar de  $l_i$ . A forma da deformação para cada modo de vibração é a mesma em cada seção do vão. Esta forma de deformação pode ser expressa com uma combinação linear de autovalores da matriz elástica  $[K]$  do espaçador já definido. Para baixas frequências de vibração o efeito da inércia do espaçador é insignificante e, portanto, a forma a deformação é igual a um dos autovetores, ou seja, os coeficientes de combinação são todos iguais a zero, exceto o que corresponde a este modo de vibração. Aumentando as frequências isso não é mais verdadeiro e os coeficientes da combinação são uma medida de quais modos de vibração são combinados. A forma de deformação ao longo de um vão é do tipo mostrado na figura (A.5), onde se pode distinguir modos de vibração típicos característicos do feixe correspondendo a autovalores da matriz rigidez diferente de zero, e modos de vibração típicos do condutor correspondentes a autovalores iguais a zero.

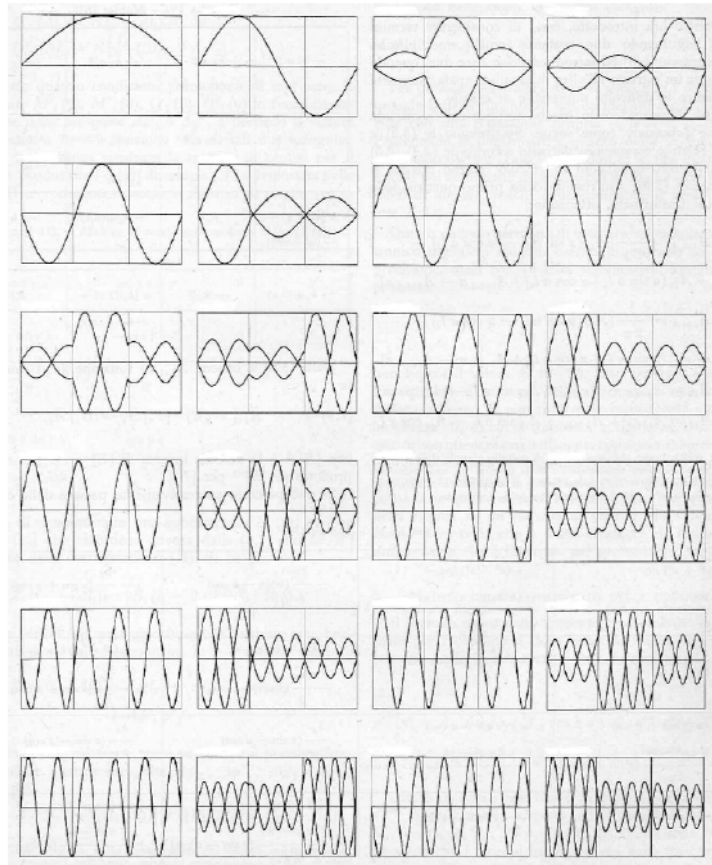


Figura A.5– Modos de vibração típico de um feixe (ESANAM, sem data).

## A6 ENERGIA DISSIPADA PARA CADA MODO DE VIBRAÇÃO

Para cada modo de vibração conhecido a forma da deflexão ao longo do feixe e fácil de determinar a energia dissipada pelo condutor através da seguinte relação:

$$E_c = \pi \frac{1}{2} H u^2 \lambda^{-3} \quad (\text{A16})$$

Para a determinação da energia dissipada pelo condutor deve ser considerada a amplitude de vibração no anti-nó para cada subvão de cada condutor e a constante de amortecimento ( $H$ ) do condutor é obtida através de testes em laboratório. A energia dissipada pelo espaçador pode ser determinada pela seguinte relação:

$$E_s = \frac{1}{2} \vec{y}^T [h] \vec{y} \quad (\text{A17})$$

Onde,  $\vec{y}$  é um vetor que define o deslocamento dos grampos do espaçador e  $[h]$  é proporcional a matriz de rigidez do espaçador dada pela seguinte relação:

$$[h] = \beta [k] \quad (\text{A18})$$

Onde,  $\beta$  é a constante de amortecimento dos elementos elásticos do espaçador. Se os amortecedores são instalados no vão, a energia dissipada por eles pode ser calculada pela seguinte maneira:

$$E_d = F u \pi \sin \varphi \quad (\text{A19})$$

Onde,  $F$  é a intensidade da força transmitida pelo amortecedor,  $\varphi$  é a fase entre a força e o deslocamento  $u$  do grampo do amortecedor e  $u$  é a amplitude do deslocamento calculado para o modo de vibração considerado no grampo do amortecedor.

Adicionando a energia dissipada por cada condutor a energia dissipada por cada espaçador e por cada amortecedor, se houver, a energia total poderá ser computada para cada modo de vibração.

## **A7 ENERGIA INTRODUZIDA PELO VENTO EM UM FEIXE DE CONDUTORES**

Quando um condutor sofre os efeitos da esteira de vórtices de outro condutor, a força excitante no condutor é um somatório do efeito do vórtice no próprio condutor mais o efeito do fluxo da esteira de vórtices do condutor a montante. Para definir a força da esteira de vórtices sobre um condutor são feitos testes experimentais em um túnel de vento. A partir desses testes é possível definir de maneira similar à de um único condutor, a entrada de energia do vento com velocidade constante em um par de condutores, um na esteira de vórtices do outro. A energia introduzida pelo vento pode ser analisada na curva (b) da figura (A.6). Usando um modelo de

oscilador equivalente a um par de condutores é possível definir a entrada de energia do vento para diferentes condições de turbulência, conforme pode ser observado nas curvas (c) e (d) da mesma figura.

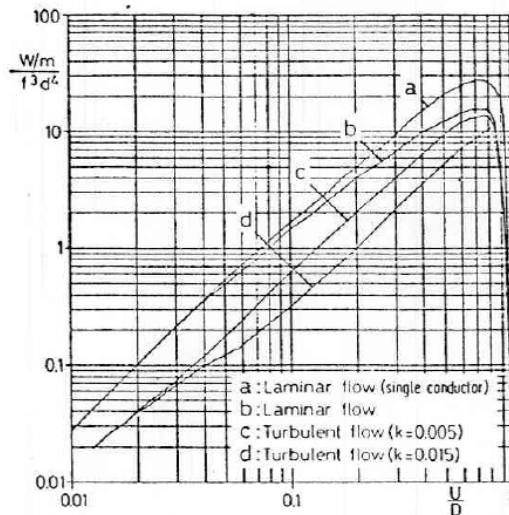


Figura A.6 – Entrada de energia eólica do vento em um feixe de condutores (ESANAM, sem data).

## A8 SAÍDA DE DADOS DO PROGRAMA

O programa fornece para cada modo de vibração natural as seguintes informações:

- 1- Numeração sequencial do modo calculado;
- 2- Frequência do modo natural de vibração em [Hz];
- 3- Comprimento da onda do modo de vibração calculado em [m];
- 4- Amplitude máxima de vibração no anti-nó em [mm] encontrada no vão;
- 5- Amplitude mínima de vibração no anti-nó em [mm] encontrada no vão;
- 6- Máxima deformação dinâmica de flexão encontrada  $[\frac{\Delta l}{l} 10^{-6}]$  encontrada no grampo de suspensão;
- 7- Máxima amplitude de flexão dinâmica [mils] encontrada no grampo de suspensão;
- 8- Máxima amplitude de vibração [mm] encontrada no grampo do espaçador;
- 9- Máxima deformação de flexão dinâmica no condutor  $[\frac{\Delta l}{l} 10^{-6}]$ ;

- 10- Máxima rotação dinâmica (rad.) encontrada nas dobradiças do espaçador;
- 11- Razão entre a energia total dissipada por todos os espaçadores amortecedores e o total de energia dissipada pelo feixe de condutores;
- 12- Máxima amplitude de vibração (mm) encontrada nas braçadeiras dos amortecedores;
- 13- Máxima deformação de flexão dinâmica no condutor  $[\frac{\Delta l}{l} 10^{-6}]$  encontrada no ponto de fixação do amortecedor;
- 14- Razão entre a energia total dissipada por todos os amortecedores e o total da energia dissipada pelo feixe de condutores;
- 15- Razão  $\frac{r}{r_c}$  para o feixe. Esta razão representa uma forma adimensional do sistema de amortecimento determinado pela expressão  $\frac{r}{r_c} = \frac{E_{diss}}{4\pi E_{cmax}}$ , onde,  $E_{diss}$  é a energia total dissipada pelo feixe (condutor + espaçadores + amortecedores) e  $E_{cmax}$  é a energia cinética máxima do feixe; e
- 16- O coeficiente dos modos de vibração com uma série de 2n posições, onde (n) é o número de subcondutores. Cada posição se refere a um modo típico. O valor de cada posição é dado por um número compreendido entre 0 a 9. Esta série de números são os coeficientes de combinações linear dos vários tipos de modos de vibração, que dá a verdadeira forma modal do sistema para uma específica frequência analisada.

A seguir pode ser observado na listagem do programa a entrada de dados referentes ao feixe de condutores e espaçadores amortecedores utilizados na travessia do Rio Trombetas e informado no texto principal no capítulo 5.

- 1- Diâmetro do condutor [mm], tensão de esticamento [N] e massa por unidade de comprimento [ $\text{kgm}^{-1}$ ];
- 2- Comprimento do vão [m], rigidez flexão do condutor [ $\text{Nm}^2$ ] e coeficiente de amortecimento do condutor;
- 3- Tipo de vento;
- 4- Tipo de feixe e espaçador utilizado, localização do espaçador no vão, tipo e a localização do amortecedor e o coeficiente usado para os amortecedores; e
- 5- A máxima amplitude de vibração de todos os anti-nós do condutor no vão, no grampo do espaçador, bem como o ponto de localização do amortecedor e todas as frequências e a deformação de flexão dinâmica máxima. O programa fornece estas informações em

forma de gráficos, conforme se pode ver nas figuras (A.8) e (A.9) em especial as amplitudes de vibração em várias seções de interesse em função da frequência.

A saída de dados da análise da travessia do Rio Trombetas referente ao estudo das vibrações eólicas feitas pelo programa ESANAM, que calculou as amplitudes de vibração e a deformação do feixe de condutores devido a esteira de vórtices de Von Karman e dimensionou a quantidade de amortecedores e de espaçadores amortecedores, bem como as posições dos mesmos, teve os seguintes resultados:

- 1- Vão igual a 1628 m com espaçadores amortecedores e amortecedores (Tabela A.2);
- 2- Comprimento dos sub-vãos (Figura A.7);
- 3- 25 espaçadores amortecedores (Figura A.7);
- 4- 02 amortecedores (Figura A.7);
- 5- Posição do primeiro amortecedor = 2,5m do último ponto de contato;
- 6- Posição do segundo amortecedor = 1,2m do primeiro amortecedor; e
- 7- Figuras “A.8” e “A.9”.

```

CONDUCTOR ( 0 X 0.00 + 0 X 0.00 )
DIAMETER      36.210 [MM]          TENSION      112010.00 [N]
MASS          3.383 [KG/M]        STIFFNESS    2558.00 [N*M^2]
DAMPING CONST.AKAPPA 0.106E+04  TYPE OF WIND: BUNDLE NO TURBULENCE
--- CONDUCTOR WITH ARMOUR RODS ---

FIRST LAYER:  13 ARMOUR RODS
               HALF LENGTH      0.950 [M]    DIAMETER      9.27 [MM]
               MASS             5.707 [KG/M]  STIFFNESS    10509.00 [N*M^2]

--- D A M P E R S ---

2 DAMPER(S) PER SPAN AT BOTH SIDES, SICAMM = 1.25

XXA = DISTANCE FROM THE CLAMP [M]
XA  = DISTANCE FROM PREVIOUS DAMPER [M]
AMP = MAXIMUM DAMPER'S AMPLITUDE [MM]

#      XXA      XA      AMP      FORCE      TYPE
1      2.50     0.00     0.77     STD      media5.amm
2      3.70     1.20     0.77     STD      media5.amm

4 COND. BUNDLE WITH *\dis\3930Q70a.dis * SPACERS

5 hz: TORS.STIFFNESS 268.00 [N*m/rad]  TORS.DAMPING 0.362
30 hz: TORS.STIFFNESS 570.00 [N*m/rad]  TORS.DAMPING 0.330
AXL.STIFFNESS 264870.00 [N/m]  AXL.DAMPING 0.320
TORS.STIF.COND 0.000 [N*m/rad]

SPAN 1628 m LONG DIVIDED IN 26 SUBSPANS : 40 62 72 61 71 60 70 59 69 58 68
57 67 55.5 66.5 57.5 67.5 62.5 68.5 61.5 69.5 59.5 70.5 58.5 71.5 45

```

Figura A.7 – Entrada e saída de dados (SALVI, 2012).

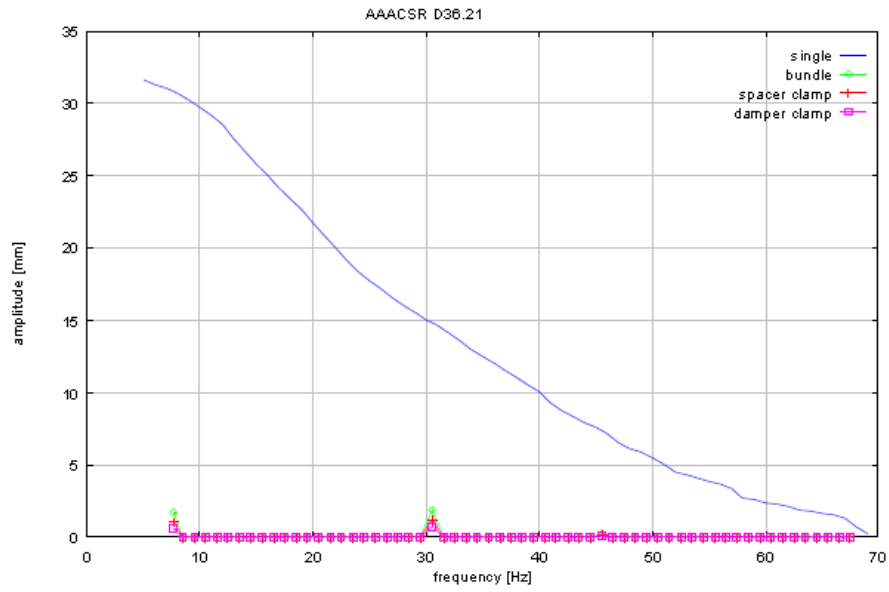


Figura A.8 – Amplitude de vibração x frequência da vibração–Rio Trombetas (SALVI, 2012).

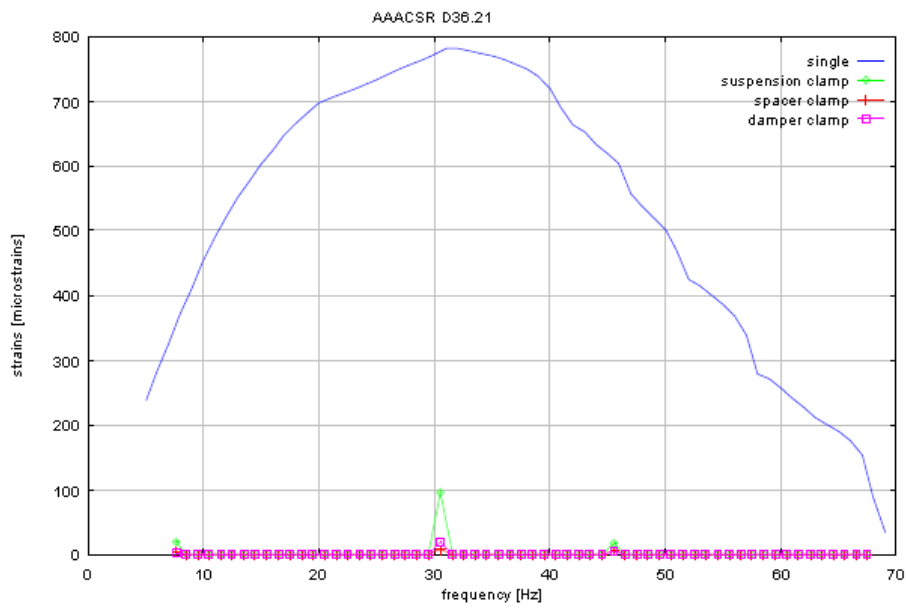


Figura A.9 – Deformação de flexão x frequência da vibração–Rio Trombetas (SALVI, 2012).

## A9 CONCLUSÃO

Conforme o texto acima, o programa ESANAM utiliza o método do equilíbrio da energia para analisar a capacidade de auto amortecimento do condutor sob o efeito de um tipo de vento em um determinado tipo de terreno. No caso do condutor utilizado na travessia do rio Trombetas a capacidade de auto amortecimento do condutor não foi suficiente para sozinho dissipar a energia do vento e assim, o próprio programa dimensiona a quantidade e a posição dos amortecedores. Este fato é facilmente analisado nas figuras “A.8” e “A.9”, cujos valores estão resumidos na tabela “A.2”.

Tabela A.2 – Resultado da deformação de flexão com e sem amortecedor (SALVI, 2012).

Descrição	Máxima deformação ( $\mu s$ ) calculada (0 - pico)	Máxima deformação ( $\mu s$ ) permitida (0 - pico)
Condutor sem amortecedor	783	100
Condutor com espaçadores amortecedores e amortecedores	96	



**- ANEXO B -**

**FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA CCFAS**

## **B1 INFORMAÇÕES GERAIS**

O cálculo das oscilações de subvão induzido pela esteira de vórtices de Von Karman atuando sobre um feixe de condutores é realizada através do equilíbrio entre a energia introduzida pelo vento e atuando sobre o feixe de condutores e a energia dissipada pelo sistema (condutor + amortecedor), mais basicamente pelos espaçadores amortecedores. Pesquisas experimentais realizadas em túnel de vento têm mostrado que as oscilações induzidas por uma esteira de vórtices são devidas a uma instabilidade do tipo flutuação causada pelo acoplamento dos modos de vibração dos feixes, que são essencialmente horizontais com os modos de vibração da esteira de Von Karman, que é essencialmente vertical. As frequências dos modos acoplados, para causarem uma instabilidade deverão estar abaixo de um certo nível e as suas proporções compreendidas entre limites particulares, que dependem do ângulo de ataque e da velocidade do vento. Um programa computacional no seu estágio inicial deve calcular as frequências naturais relativas ao feixe de condutores e a sua deformação ao longo do vão para cada modo principal de vibração e com base nas informações recebidas o programa deverá escolher os pares de formas modais que, se acopladas, causariam instabilidade. A escolha da velocidade do vento e do ângulo de ataque corresponde das razões de frequência dos vários pares de formas modais e da verdadeira possibilidade de ocorrer um movimento elíptico correto. Para cada par de modos de vibração (horizontal e vertical) acoplados, o programa informa a deformação relativa em forma modal como uma função de uma amplitude assumida como referência a uma seção transversal do vão e que geralmente é tomada no centro do subvão. Neste texto quando aparecer a sigla “SAM” ela se referirá ao modo de vibração essencialmente horizontal e a sigla “SIM” se referirá ao modo de vibração essencialmente vertical. A forma relativa dos modos de vibração acoplados, juntamente com os valores relativos das forças do espaçador e das rotações das articulações, permitirá o cálculo da energia dissipada simultaneamente pelos espaçadores em ambos os modos, em função de “SAM” e do “SIM”. Se os modos de vibração forem acoplados com um ângulo de fase igual a  $90^\circ$  de tal forma que o subcondutor a sotavento se mova contra a direção do vento quando estiver fora da esteira de vórtices será possível, então, calcular a energia introduzida a sotavento do subcondutor. Da mesma forma será possível determinar a energia dissipada pelo subcondutor a barlavento. A introdução ou entrada de energia é calculada para todo o comprimento do vão para várias faixas de “SAM” e “SIM”, a fim

de encontrar o caminho elíptico da entrada máxima de energia do vento. Se para tal situação o equilíbrio da energia (energia introduzida = energia dissipada) for alcançada, então as amplitudes reais de oscilação de todo o vão poderão ser obtidas e consequentemente, o cálculo feito pelo programa fornecerá as deformações dinâmicas, a força nos espaçadores e as rotações das dobradiças dos espaçadores.

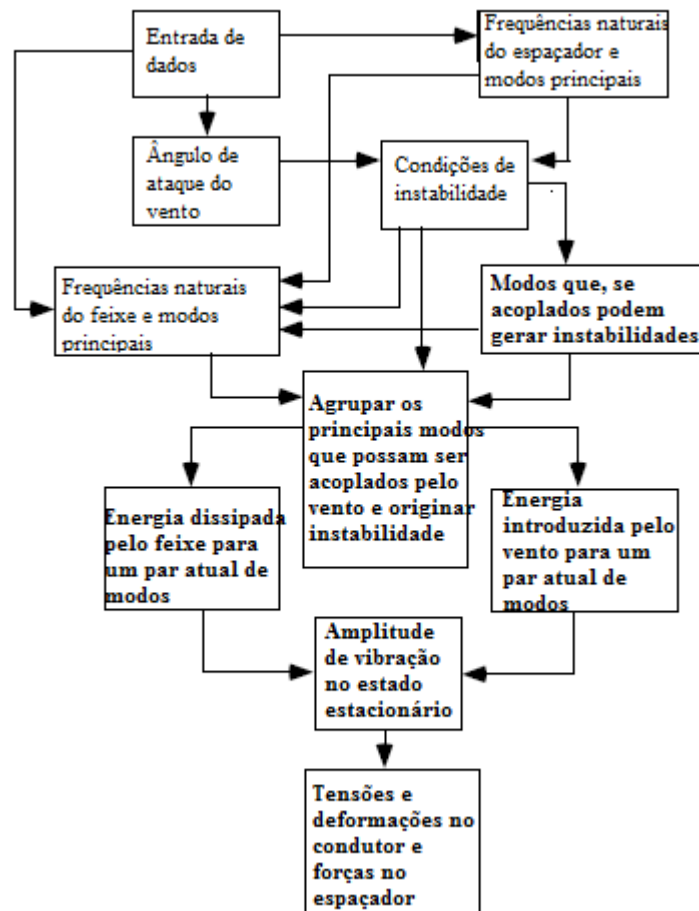


Figura B.1- Fluxograma do programa (CICFAS, sem data, modificado).

Para os dados de entrada, a rigidez do espaçador, os autovalores e os autovetores, como também os tipos de modos de vibração, ver o que foi comentado no “anexo A” para o programa ESANAM.

## B2 CÁLCULO DAS CONDIÇÕES DE INSTABILIDADE, ÂNGULO DE ATAQUE DO VENTO E ESCOLHA AUTOMÁTICA DOS TIPOS DE MODOS DE VIBRAÇÃO A SEREM ACOPLADOS

Quando um cilindro, como o representado na figura (B.2) estiver na esteira de vórtices formada por outro cilindro ele estará submetido a um campo de forças não conservativas. Estas forças podem ser reduzidas a uma força de sustentação “ $F_L$ ” e a uma força de arrasto “ $F_D$ ”.

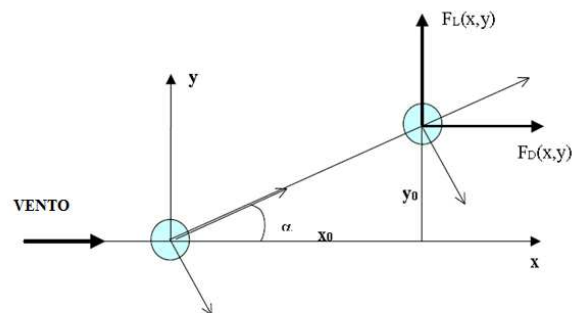


Figura B.2 – Força de sustentação e força de arrasto (CICFAS, sem data, modificado).

As forças de arrasto “ $F_D$ ” e de sustentação “ $F_L$ ” podem ser representadas pelas seguintes relações:

$$F_D(x_1y) = \frac{C_D(x_{01}y_0)\rho lDV^2}{2} \quad (\text{B.1})$$

$$F_L(x_1y) = \frac{C_L(x_{01}y_0)\rho lDV^2}{2} \quad (\text{B.2})$$

Onde,  $C_D$  é o coeficiente de arrasto,  $C_L$  é o coeficiente de sustentação,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $l$  é o comprimento do cilindro,  $\alpha$  é o ângulo de ataque do vento,  $D$  é o diâmetro do cilindro e  $V$  é a velocidade do vento.

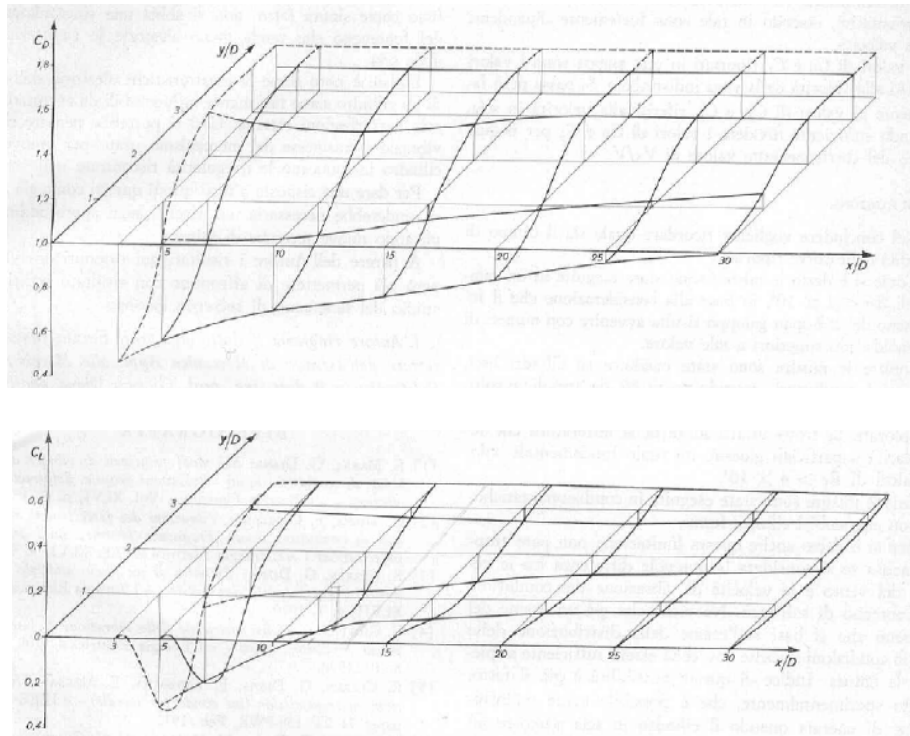


Figura B.3– Coeficientes de arrasto “ $C_D$ ” e coeficientes de sustentação “ $C_L$ ” (CICFAS, sem data).

Os valores de “ $C_D$ ” e de “ $C_L$ ” como uma função de  $x_0$ ,  $y_0$  são apresentados na figura (B.3) e são determinados por meio de ensaios em túnel de vento. As condições de instabilidades são definidas pelas derivadas dos coeficientes “ $C_L$ ” e “ $C_D$ ” como função de uma posição relativa de dois cilindros ou condutores e o tipo de movimento descrito por eles. O tipo de movimento de excitação de dois cilindros ou condutores está representado na figura (B.4) e quando excitados os modos de vibração têm apenas um anti-nó entre os dois espaçadores.

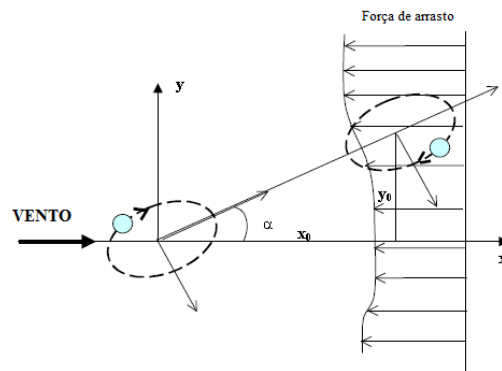


Figura B.4 – Movimento de excitação de dois condutores (CICFAS, sem data, modificado).

O tipo de movimento é uma combinação de dois modos típicos de vibração do feixe, como mostra a figura (B.5).

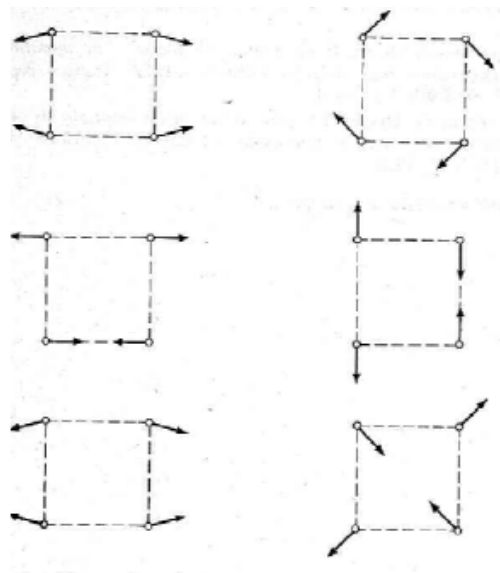


Figura B.5 – Modos de vibração de um feixe de condutores em um espaçador quádruplo (CICFAS, sem data).

Destes dois modos de vibração, um tem uma componente predominante vertical e o outro tem um componente predominante horizontal e a condição para que esses modos de vibração combinados possam dar origem a instabilidade depende das frequências de vibração, do ângulo de ataque do vento em relação ao par de condutores e da velocidade do vento, conforme mostrado na figura (B.2). Para um determinado feixe de condutores, o ângulo de ataque ( $\alpha$ ) é uma função da velocidade do vento e pode ser determinado levando em consideração os efeitos combinados das forças de vento e das forças gravitacionais. Também é possível definir um parâmetro de instabilidade ( $\alpha/\omega$ ) proporcional a taxa de aumento da amplitude de vibração em condições de instabilidade.

### **B3 FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS PRINCIPAIS DE VIBRAÇÃO**

As frequências naturais e os principais modos de vibração são calculados da mesma maneira descrita nas notas do programa ESANAM, no anexo “A”. A única diferença é

que, devido as baixas frequências de vibração nas oscilações de subvão, geralmente em torno de no máximo igual a 2 Hz, as forças de inércia dos espaçadores são insignificantes quando comparadas com as forças elásticas e amortecedoras dos mesmos. Por esta razão, a forma de deflexão dos principais modos de vibração de uma seção do feixe é definida pelo autovetor correspondente da matriz elástica do espaçador. Os autovetores são o dobro do número de condutores no feixe e definem os modos de vibração, conforme pode ser observado na figura B.6, da mesma forma que o programa ESANAM, no anexo A.

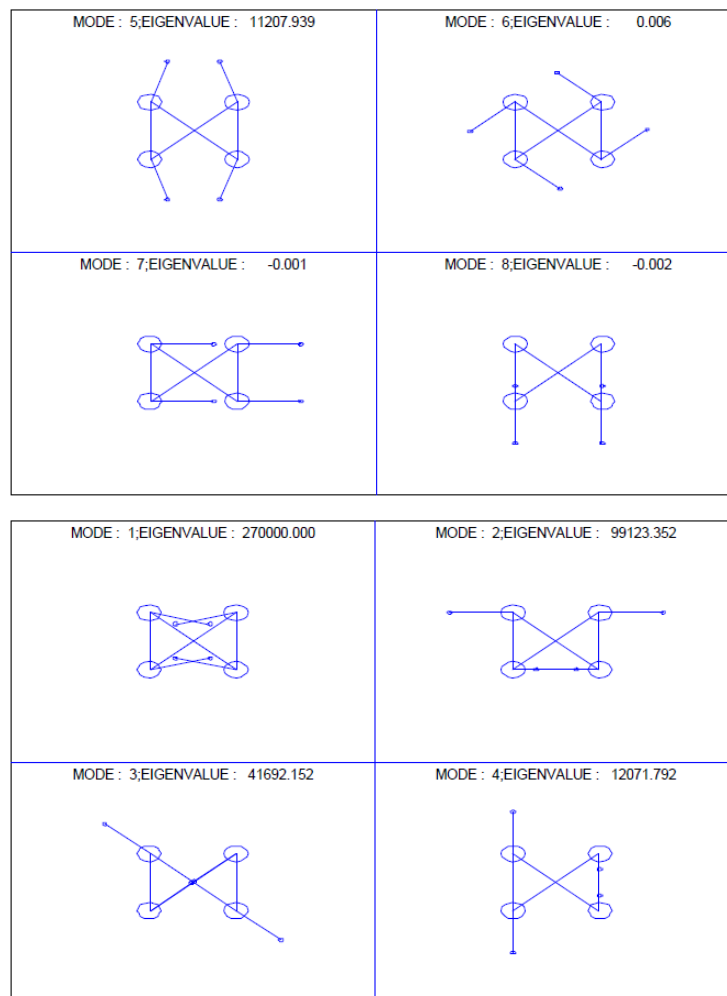


Figura B.6 – Autovetores e Autovalores – espaçador quádruplo (CICFAS, sem data).

## **B4 ENERGIA DISSIPADA POR UM FEIXE DE CONDUTORES PARA UM PAR DE MODOS DE VIBRAÇÃO**

Esta energia dissipada por um feixe de condutores é determinada da mesma maneira descrita no programa ESANAM. Porém, neste caso deve ser lembrado que a energia dissipada pelos espaçadores amortecedores é bem maior do que a energia dissipada pelo condutor. A energia total dissipada pelo sistema quando estiver vibrando em uma combinação de dois modos é calculada desconsiderando os termos de acoplamento devido as forças de amortecimento dos espaçadores, ou em outras palavras a energia total dissipada é determinada somando as duas energias dissipadas pelos dois modos principais de vibração.

## **B5 ENERGIA INTRODUZIDA PELO VENTO SOBRE OS DOIS MODOS DE VIBRAÇÃO**

As oscilações de subvãos são um problema de instabilidade do tipo flutuação. O fenômeno é devido à combinação de dois modos de vibração. Sem vento, esses dois modos de vibração têm frequências diferente, que se tornam iguais quando existem as forças de vento. A combinação destes modos de vibração com frequências iguais dá origem a um movimento elíptico do par de condutores já mencionado na figura (B.4).

Uma vez que a instabilidade ocorre e a amplitude de vibração aumenta no tempo, as amplitudes do estado estacionário são aquelas para os quais a energia introduzida pelo vento é igual a energia dissipada pelo sistema. Conhecer as forças de sustentação e de arrasto definidas em função da posição relativa de dois condutores levando em conta a velocidade associada ao movimento elíptico dos dois condutores permite que as forças do vento possam ser determinadas. Integrando o trabalho feito por essas forças ao longo de todo o caminho, a energia introduzida em um ciclo pode ser determinada. Em resumo, esta rotina do programa resulta na energia introduzida pelo vento em um ciclo em função das amplitudes relativas “SAM” e “SIM” dos dois modos de vibração.



## **B6 CÁLCULO DE CICLOS LIMITADOS DA AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO**

Anteriormente foi mostrado que é possível calcular a energia dissipada pelo feixe de condutores em função das amplitudes de vibração dos dois modos acoplados “SAM” e “SIM”. Em função dos mesmos valores de “SAM” e “SIM”, também é possível determinar a energia introduzida no sistema pelo vento. Para determinar as amplitudes de vibração em um estado estacionário para uma dada amplitude do modo horizontal “SAM”, a amplitude de vibração do modo vertical “SIM” deverá ser alterada para definir a valor do modo vertical “SIM”, que fornece a entrada da energia máxima do vento. Este valor alterado pode ser chamado de “SIM<sub>M</sub>”. Em outras palavras, para ser determinados valores da amplitude de vibração do movimento horizontal, o tipo de caminho deverá ser alterado até que a entrada máxima de energia seja obtida. Se para os valores dados de “SAM”, a energia máxima introduzida pelo vento corresponder a “SIM<sub>M</sub>” e não for maior do que a energia dissipada pelo feixe de condutores para um par de valores de “SAM” e “SIM<sub>M</sub>”, então o valor de “SAM” deverá ser aumentado de um “DSAM” e o cálculo repetido. Em outras palavras o valor de “SAM” deverá ser aumentado até o valor das duas energias se tornarem iguais definindo desta forma as amplitudes do estado estacionário ou do ciclo limite “SAM<sub>M</sub>” e “SIM<sub>M</sub>”. Em qualquer caso, o valor de “SAM” não aumenta acima do valor para o qual a amplitude do anti-nó no subvão cause colisão entre os pares de condutores. Deve-se observar que, se a energia introduzida pelo vento for, para qualquer valor de “SAM”, menor que a dissipada pelo feixe, nenhuma oscilação no sistema ocorrerá.

## **B7 DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NOS CONDUTORES E DAS FORÇAS NOS GRAMPOS DOS ESPAÇADORES**

Uma vez que os limites dos ciclos definidos por “SAM<sub>M</sub>” e “SIM<sub>M</sub>” são determinados, a forma da deflexão dos condutores ao longo do vão e o nível de deformação no espaçador e no grampo de suspensão podem ser determinados da mesma maneira como informado para o programa ESANAM no anexo A. Conhecendo o deslocamento ( $\bar{u}$ ) dos condutores nos grampos do espaçador, a força ( $\bar{F}$ ) nos grampos pode ser determinada pela seguinte relação:

$$\bar{F} = [K]\bar{u} + i\beta[K]\bar{u} \quad (\text{B.3})$$

Onde,  $[K]$  é a matriz de elasticidade do espaçador,  $\bar{u}$  é o deslocamento dos condutores nos grampos do espaçador e  $\beta$  é a constante de amortecimento histerético do espaçador.

## B8 SAÍDA DE DADOS DO PROGRAMA

O programa CICFAS fornece para cada modo acoplado, que poderia originar uma instabilidade, as seguintes informações de saída de dados:

- 1- Numeração sequencial de modos acoplados;
- 2- Velocidade do vento [m/s];
- 3- Ângulo de ataque [rad.];
- 4- Modos de acoplamento mostrados por uma numeração dos autovetores;
- 5- Frequência do modo de vibração essencialmente horizontal [Hz];
- 6- Frequência do modo de vibração essencialmente vertical [Hz];
- 7- Amplitude de vibração horizontal máxima “SAM<sub>M</sub>” (0.5 – pico) encontrada no vão entre os subcondutores;
- 8- Amplitude de vibração vertical máxima “SIM<sub>M</sub>” (0.5 – pico) encontrada no vão entre os subcondutores;
- 9- O subvão onde a máxima oscilação ocorre, mostrada por uma numeração progressiva a partir do lado esquerdo do vão;
- 10- A força máxima nos grampos do espaçador, que conectam o par de subcondutores oscilantes (0.N – pico);
- 11- A rotação máxima da dobradiça encontrada nos espaçadores [Graus] (0.5 – pico);
- 12- A máxima deformação de flexão dinâmica sobre o condutor  $(\frac{\Delta l}{l} \times 10^{-6})$  (0.5 – pico) no grampo do espaçador; e
- 13- A máxima deformação de flexão dinâmica no condutor  $(\frac{\Delta l}{l} \times 10^{-6})$  (0.5 – pico).

O programa fornece as seguintes saídas gráficas, conforme as figuras (B.7) e (B.8).

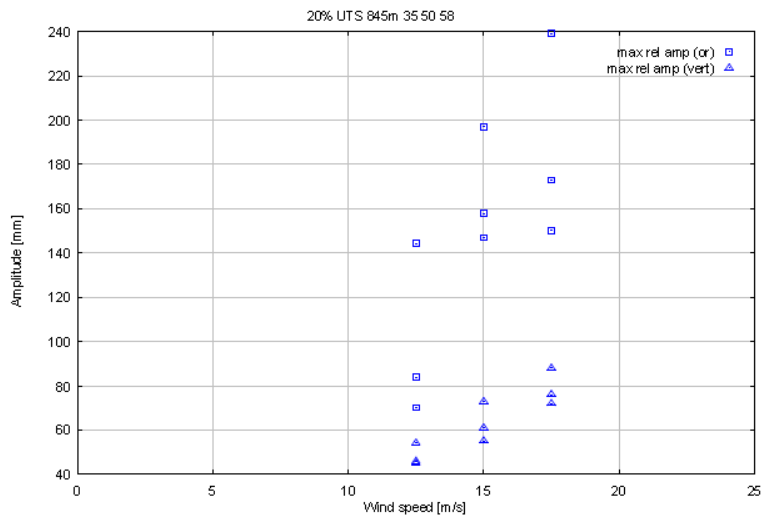


Figura B.7 –  $SAM_M$  e  $SIM_M$  como uma função da velocidade do vento (CICFAS, sem data).

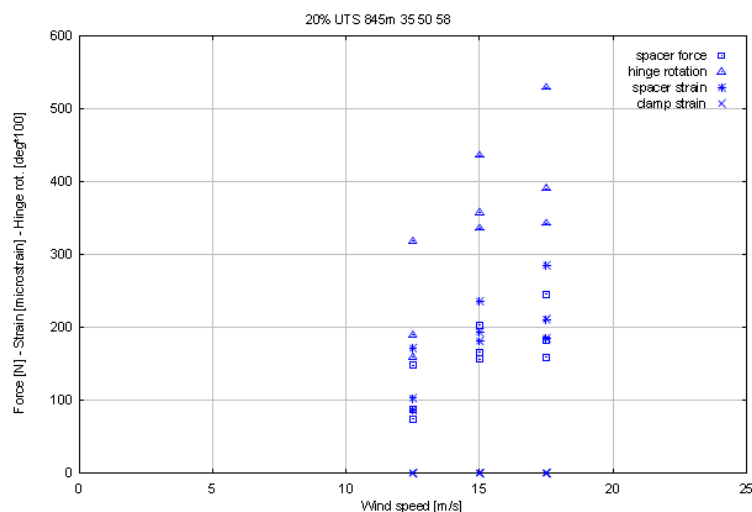


Figura B.8 – Força no espaçador, rotação da articulação e deformações no condutor em função da velocidade do vento (CICFAS, sem data).

A seguir pode ser observado na listagem do programa, figura (B.9), a entrada de dados referentes ao feixe de condutores e espaçadores amortecedores utilizados na travessia do Rio Trombetas e informado no texto principal no capítulo 5, conforme a seguir:

- 1-Diâmetro do condutor [mm], tensão de esticamento [N] e massa por unidade de comprimento [ $kgm^{-1}$ ];
- 2- Comprimento do vão [m], rigidez flexão do condutor [ $Nm^2$ ];

- 3- Comprimento dos subvãos (Figura A.7 no anexo A e figura B.9);
- 4- 25 espaçadores amortecedores (Figura A.7 no anexo A e figura B.9); e
- 5- Tamanho dos subvãos.

```

AAACSR D36.21

CONDUCTOR: DIAMETER = 36.21 [MM]      TENSION =112010. [N]
            MASS = 3.383 [KG/M]      STIFFNESS= 2558.0 [N*M^2]

Equilibrium points between
vertical orbit amplitudes 0.012 E 0.290
There are 25 spacers

SPAN 1628 m LONG DIVIDED IN 26 SUBSPANS : 40 62 72 61 71 60 70 59 69 58 68 57
67 55.5 66.5 57.5 67.5 62.5 68.5 61.5 69.5 59.5 70.5 58.5 71.5 45

```

Figura B.9 – Entrada e saída de dados (SALVI, 2012).

A saída de dados da análise da travessia do Rio Trombetas referente ao estudo das oscilações dos subvãos feitas pelo programa CICFAS, que calculou as amplitudes de vibração e a deformação do feixe de condutores devido a esteira de vórtices de Von Karman e dimensionou a quantidade de espaçadores amortecedores, bem como as posições dos mesmos (subvãos) pode ser observada nas figuras (B.10) e (B.11).

N	W [M/S]	SPAN ROT [RAD]	COMB	F.ORIZ [hz]	F.VERT [hz]	SAM	SIM	MAX AMP SUBSPAN
1	15.0	0.07	1 + 6	1.27	1.27			
2	15.0	0.07	1 + 6	1.27	1.27			
3	15.0	0.07	1 + 6	1.28	1.27			
4	15.0	0.07	1 + 6	1.44	1.38			
5	15.0	0.07	1 + 6	1.44	1.38			
6	15.0	0.07	1 + 6	1.54	1.50			
7	15.0	0.07	1 + 6	1.54	1.50			
8	15.0	0.07	1 + 6	1.97	1.96			
9	17.5	0.10	1 + 6	1.25	1.15			
10	17.5	0.10	1 + 6	1.26	1.15			
11	17.5	0.10	1 + 6	1.27	1.15			
12	17.5	0.10	1 + 6	1.27	1.27			
13	17.5	0.10	1 + 6	1.27	1.15			
14	17.5	0.10	1 + 6	1.27	1.27			
15	17.5	0.10	1 + 6	1.28	1.15			
16	17.5	0.10	1 + 6	1.28	1.27			
17	17.5	0.10	1 + 6	1.44	1.38			
18	17.5	0.10	1 + 6	1.44	1.38			
19	17.5	0.10	1 + 4	1.45	1.33			
20	17.5	0.10	1 + 6	1.45	1.38			
21	17.5	0.10	1 + 6	1.45	1.38			
22	17.5	0.10	1 + 6	1.54	1.50			
23	17.5	0.10	1 + 4	1.54	1.44			
24	17.5	0.10	1 + 6	1.54	1.50			

25	17.5	0.10	1 + 6	1.97	1.96
26	20.0	0.13	1 + 6	1.25	1.04
27	20.0	0.13	1 + 6	1.25	1.15
28	20.0	0.13	1 + 6	1.26	1.04
29	20.0	0.13	1 + 6	1.26	1.15
30	20.0	0.13	1 + 6	1.27	1.04
31	20.0	0.13	1 + 6	1.27	1.15
32	20.0	0.13	1 + 6	1.27	1.27
33	20.0	0.13	1 + 6	1.27	1.04
34	20.0	0.13	1 + 6	1.27	1.15
35	20.0	0.13	1 + 6	1.27	1.27
36	20.0	0.13	1 + 6	1.28	1.04
37	20.0	0.13	1 + 6	1.28	1.15
38	20.0	0.13	1 + 6	1.28	1.27

39	20.0	0.13	1 + 6	1.44	1.27
40	20.0	0.13	1 + 6	1.44	1.38
41	20.0	0.13	1 + 6	1.44	1.27
42	20.0	0.13	1 + 6	1.44	1.38
43	20.0	0.13	1 + 6	1.45	1.27
44	20.0	0.13	1 + 6	1.45	1.38
45	20.0	0.13	1 + 6	1.45	1.27
46	20.0	0.13	1 + 6	1.45	1.38
47	20.0	0.13	1 + 6	1.54	1.38
48	20.0	0.13	1 + 6	1.54	1.50
49	20.0	0.13	1 + 6	1.54	1.38
50	20.0	0.13	1 + 6	1.54	1.50
51	20.0	0.13	1 + 6	1.97	1.84
52	20.0	0.13	1 + 6	1.97	1.96

Figura B.10 – Saída de dados (SALVI, 2012).

N	W [M/S]	SPAN ROT [RAD]	COMB	F.ORIZ [hz]	F.VERT [hz]	SPACER FORCE	HINGE ROT [RAD]	SPACER STRAIN	CLAMP STRAIN
1	15.0	0.07	1 + 6	1.27	1.27				
2	15.0	0.07	1 + 6	1.27	1.27				
3	15.0	0.07	1 + 6	1.28	1.27				
4	15.0	0.07	1 + 6	1.44	1.38				
5	15.0	0.07	1 + 6	1.44	1.38				
6	15.0	0.07	1 + 6	1.54	1.50				
7	15.0	0.07	1 + 6	1.54	1.50				
8	15.0	0.07	1 + 6	1.97	1.96				
9	17.5	0.10	1 + 6	1.25	1.15				
10	17.5	0.10	1 + 6	1.26	1.15				
11	17.5	0.10	1 + 6	1.27	1.15				
12	17.5	0.10	1 + 6	1.27	1.27				
13	17.5	0.10	1 + 6	1.27	1.15				
14	17.5	0.10	1 + 6	1.27	1.27				
15	17.5	0.10	1 + 6	1.28	1.15				
16	17.5	0.10	1 + 6	1.28	1.27				
17	17.5	0.10	1 + 6	1.44	1.38				
18	17.5	0.10	1 + 6	1.44	1.38				
19	17.5	0.10	1 + 4	1.45	1.33				
20	17.5	0.10	1 + 6	1.45	1.38				
21	17.5	0.10	1 + 6	1.45	1.38				
22	17.5	0.10	1 + 6	1.54	1.50				
23	17.5	0.10	1 + 4	1.54	1.44				
24	17.5	0.10	1 + 6	1.54	1.50				
25	17.5	0.10	1 + 6	1.97	1.96				

25	17.5	0.10	1 + 6	1.97	1.96
26	20.0	0.13	1 + 6	1.25	1.04
27	20.0	0.13	1 + 6	1.25	1.15
28	20.0	0.13	1 + 6	1.26	1.04
29	20.0	0.13	1 + 6	1.26	1.15
30	20.0	0.13	1 + 6	1.27	1.04
31	20.0	0.13	1 + 6	1.27	1.15
32	20.0	0.13	1 + 6	1.27	1.27
33	20.0	0.13	1 + 6	1.27	1.04
34	20.0	0.13	1 + 6	1.27	1.15
35	20.0	0.13	1 + 6	1.27	1.27
36	20.0	0.13	1 + 6	1.28	1.04
37	20.0	0.13	1 + 6	1.28	1.15
38	20.0	0.13	1 + 6	1.28	1.27
39	20.0	0.13	1 + 6	1.44	1.27
40	20.0	0.13	1 + 6	1.44	1.38
41	20.0	0.13	1 + 6	1.44	1.27
42	20.0	0.13	1 + 6	1.44	1.38
43	20.0	0.13	1 + 6	1.45	1.27
44	20.0	0.13	1 + 6	1.45	1.38
45	20.0	0.13	1 + 6	1.45	1.27
46	20.0	0.13	1 + 6	1.45	1.38
47	20.0	0.13	1 + 6	1.54	1.38
48	20.0	0.13	1 + 6	1.54	1.50
49	20.0	0.13	1 + 6	1.54	1.38
50	20.0	0.13	1 + 6	1.54	1.50
51	20.0	0.13	1 + 6	1.97	1.84
52	20.0	0.13	1 + 6	1.97	1.96

Figura B.11 – Saída de dados (SALVI, 2012).

## B9 CONCLUSÃO

Conforme o texto acima, o programa CICFAS utiliza o método do equilíbrio da energia para analisar a capacidade de auto amortecimento do condutor sob o efeito de um tipo de vento em um determinado tipo de terreno. No caso do condutor utilizado na travessia do rio Trombetas a capacidade de auto amortecimento do condutor não foi suficiente para sozinho dissipar a energia do vento e assim, como o programa faz uma análise das oscilações de subvão ele dimensiona a quantidade e a posição dos espaçadores amortecedores, bem como a deformação nos condutores e as forças atuantes nos espaçadores amortecedores. A tabela (B.1) mostra a velocidade do vento e os valores máximos equivalentes das oscilações horizontal “SAM” e vertical “SIM” calculados pelo programa.

Tabela B.1 – Valores de “SAM” e “SIM” máximos (SALVI, 2012).

Veloc. Vento (m/s)	Oscil. Horiz. (mm)	Oscil. Vert. (mm)	Nº e comp. do subvão
15 - 20	0	0	-