

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ  
ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL AUTOMATIZADA PARA  
TESTES VIBRACIONAIS EM CABOS E ACESSÓRIOS**

**CURITIBA**

**2018**

**MARCOS JOSÉ MANNALA**

**LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL AUTOMATIZADA PARA  
TESTES VIBRACIONAIS EM CABOS E ACESSÓRIOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia mecânica, área de concentração: mecânica dos sólidos, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Nilson Barbieri

**CURITIBA**

**2018**

Dados da Catalogação na Publicação  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná  
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR  
Biblioteca Central  
Luci Eduarda Wielganczuk – CRB 9/1118

Mannala, Marcos José  
M282L 2018 Linha de transmissão experimental automatizada para testes vibracionais em cabos e acessórios / Marcos José Mannala ; orientador: Nilson Barbieri. – 2018.  
259 f. f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2018  
Bibliografia: f. 136-142

1. Energia elétrica – transmissão. 2. Condutores elétricos. 3. Vibração.  
4. Metais – Fadiga. 5. Aparelhos e materiais elétricos. I. Barbieri, Nilson.  
II. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação  
III. Título.

CDD 22. ed. 621.31

## TERMO DE APROVAÇÃO

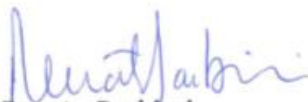
**Marcos José Mannalã**

### **Linha de Transmissão Experimental Automatizada para Testes Vibracionais em Cabos e Acessórios**

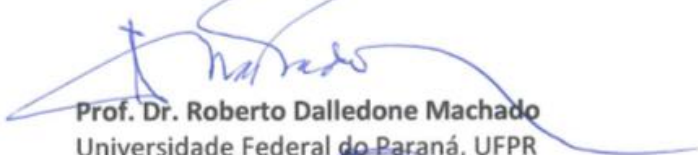
Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de doutor no Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



**Prof. Dr. Marcus Antonio Vianna Duarte**  
Universidade Federal de Uberlândia, UFU



**Prof. Dr. Renato Barbieri**  
Universidade Estadual de Santa Catarina, UDESC



**Prof. Dr. Roberto Dalledone Machado**  
Universidade Federal do Paraná, UFPR



**Prof. Dr. Key Fonseca de Lima**  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUCPR



Presidente: **Prof. Dr. Nilson Barbieri**  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUCPR, Orientador



Curitiba, 29 de agosto de 2018



## DEDICATÓRIA

Primeiramente sou grato ao poderoso Deus do universo, aos meus pais queridos Crispino e Rosi, a minha querida esposa Cacilda e também aos meus filhos Gabriel e Cauê.

## AGRADECIMENTOS

Ao Deus todo poderoso por mais esta etapa vencida em minha vida.

A minha querida esposa Cacilda e aos meus filhos Gabriel e Cauê Mannala, pela paciência durante a minha ausência, apoio e carinho durante mais esta jornada.

Aos meus pais Crispino e Rosi, que cuidaram de mim dando a base necessária para esta e outras conquistas em minha vida.

Aos Doutores Nilson Barbieri e Key Fonseca de lima, pelo apoio nas horas mais difíceis e pela confiança em mim depositada.

Aos meus colegas do Lactec: Alessandro, Claudio, Carlo, Fabio, Felipe, Filippin, Gabriel, Lauro, Luis Gustavo, Manzolli, Paulo, Rodrigo, Shenon, Thiago entre tantos outros pelo apoio incontestado e pela troca de experiências que foram fundamentais para realização deste trabalho.

Existiram pessoas singulares que foram exemplo, incentivo e inspiração para mim, são elas: Julia (minha avó), Walter Kapp, Oswaldo Honorato e Ilmar Moreira, pessoas que fizeram a diferença nos rumos da minha vida.

As empresas IG Transmissão e Distribuição, Furukawa Eletric, Grantel Engenharia, Selettra Automação e Engenharia, Engemovi, General Cable S.A, Enercity e Onix. Esse trabalho só foi possível especialmente pela parceria com a Copel Geração e Transmissão S.A, Lactec e pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

“A maior necessidade do mundo é a de homens - homens que não se comprem nem se vendam; homens que no íntimo da alma sejam verdadeiros e honestos; homens que não temam chamar o erro pelo seu nome; homens, cuja consciência seja tão fiel ao dever como a bússola o é ao polo; homens que permaneçam firmes pelo que é reto, ainda que aconteça tudo errado.”

Ellen G. White.

## RESUMO

O trabalho descreve em detalhes uma Linha de Transmissão Experimental (LTE), destinada a ensaios mecânicos vibracionais, construída no município de Curitiba/Pr. O objetivo da LTE é a determinação dos parâmetros mecânicos em cabos condutores de energia nus e acessórios. Ela foi projetada e construída de forma a permitir a condução de ensaios localmente e remotamente. As funcionalidades são descritas amiúde para demonstrar o potencial da planta. Para demonstração da funcionalidade da LTE foram realizados dois tipos de ensaios na planta: monitoramento da vibração eólica em três condutores distintos, mas de mesma ampacidade, e varredura em frequência dos cabos e acessórios através de três vibradores suspensos instalados sob as mísulas de uma das torres, com a finalidade de determinar o comportamento modal do conjunto. Como apoio aos testes realizados nesta linha no intuito de se obter dados foram realizados quatro ensaios em dois bancos de testes situados no Lactec – laboratório de ensaios em cabos e acessórios (LECA). Os ensaios realizados no LECA foram os seguintes: medição de parâmetros elétricos em condutores de linhas de transmissão, tensão *versus* deformação, ensaio de fadiga (ciclo de Wöhler - SN) e ensaios modais nos três condutores utilizados na LTE com e sem amortecedores. A LTE superou as expectativas iniciais, por se tratar de um protótipo, demonstrando capacidade para a realização de ensaios em condições próximas as reais. Os resultados apontam que o cabo condutor Phosphorus é o que possui menor resistência à fadiga em relação aos outros dois cabos condutores instalados na linha experimental. O cabo Tern é o que possui maior autoamortecimento, vibrou menos nos testes eólicos e se equiparou ao cabo Phosphorus nos testes com excitação pelos vibradores eletrodinâmicos, tracionados em valores próximos de  $H/w$ , com reduzido nível de vibração antes e depois da instalação dos amortecedores tipo *Stockbridge*.

**Palavras-chave:** laboratório de ensaios em cabos condutores, vibração eólica, cabos nus de alumínio, linha de transmissão de energia, fadiga de condutores.

## ABSTRACT

This thesis describes in detail an Experimental Transmission Line (ETL), built in Curitiba/Pr. The purpose of the ETL is the determination of mechanical parameters in aluminum power cables and accessories. It has been designed and built to allow conductor cable tests locally and remotely. Its characteristics are described in details to demonstrate the potential of the bench. In order to show ETL's functionalities, two types of tests are described: aeolian vibration of the cables with accessories and frequency sweeping monitoring through three suspended vibrators installed under the first tower's arms. The purpose is determining the modal behavior of the set. Complementing the tests made in the transmission line are described four tests performed in two test benches located at Lactec - Laboratory of Tests on Cables and Accessories (LECA). The tests performed in the LECA laboratory were the following: transmission line conductors electrical parameters measurement, stress strain, fatigue test (Wöhler cycle - SN) and modal tests on the three conductors used in the ETL with and without dampers accessories. The ETL overcame the initial expectations, since it is a prototype, demonstrating the capacity to carry out tests in conditions close to the ones found in the field. The results indicate that the conductor cable Phosphorus has the lowest fatigue resistance compared to the other two conductor cables installed in the experimental line. The Tern conductor cable has the highest self-damper, the amplitude vibration level is the lowest in the wind tests and very close in relation to the cable Phosphorus in the tests with excitation by the electrodynamic vibrators, using traction values close to H/w criterion in relation of other samples installed, with low level of vibration before and after the installation of the damper Stockbridge type.

**Keywords:** conductor cables test laboratory, aeolian vibration, aluminum cables, overhead lines, conductor fatigue

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira De Normas Técnicas
AC	- <i>Alternating Current</i>
ACCC	- <i>Aluminium Conductor Composite Core</i>
ACCR	- <i>Aluminum Conductor Composite Reinforced</i>
AMO	- Análise Modal Operacional
ASTM	- <i>American Standard for Testing and Materials</i>
CA	- Cabo de Alumínio
CAA	- Cabo de Alumínio com Alma De Aço
CAD	- <i>Computer-Aided Design</i>
CAL	- Cabo de Alumínio Liga
CALA	- Cabo de Alumínio Com Alma De Alumínio Liga
CC	- Corrente Contínua
CIGRÈ	- <i>International Council on Large Electric Systems</i>
CMOS	- <i>Complementary Metal-Oxyde Semiconductor</i>
COPEL	- Companhia Paranaense de Energia
CPS	- <i>Cross Power Spectrum</i>
CR	- Carga de Ruptura
CRIO	- <i>Compact Reconfigurable Input Output</i>
DC	- <i>Direct Current</i>
DEP	- Densidade Espectral de Potência
DIO	- Distribuidor Interno óptico
EDS	- <i>Every Day Stress</i>
EI	- Rigidez à flexão do cabo
EMA	- Experimental Modal Analysis
EPRI	- <i>Electric Power Research Institute</i>
FRG	- <i>Frequence Response</i>
FPGA	- <i>Field Programmable Gate Array</i>
FTP	- <i>File Transport Protocol</i>
FVI	- Força de Vento de Alta Intensidade
FVM	- Força de Vento Máxima
GTACSR	- <i>Gap Type Aluminium Cable Steel Reinforced</i>
GET	- Geração e Transmissão
HACIN	- <i>High Strength Aluminum Clad Invar Reinforced</i>
HD	- <i>Hard Disk</i>
HIP	- Hipótese
HTLS	- <i>High Temperature Low Sag</i>
ICP	- <i>Integrated Circuit Piezoelectric</i>
IEC	- <i>International electrotechnical Commission</i>
IEEE	- <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>

IHM	- <i>Interface Homem Máquina</i>
ISWR	- <i>Inverse Standing Wave Ratio</i>
LACTEC	- Instituto de tecnologia para o desenvolvimento
LD	- Linha de distribuição
LECA	- Laboratório de ensaios em cabos e acessórios
LED	- <i>Light Emitting Diode</i>
LPH	- Largura Profundidade e Altura
LPNE	- Linha de Potência Naturalmente Elevada
LT	- Linha de transmissão
LTE	- Linha de transmissão experimental
LVDT	- <i>Linear Variable Differential Transformer</i>
NBR	- Norma Brasileira Regulamentar
Nd2Fe14B	- Neodímio-Ferro-Boro
NI	- <i>National Instruments</i>
NR	- Norma Reguladora
OPGW	- <i>Optical Ground Wire</i>
P&D	- Pesquisa e Desenvolvimento
PC	- <i>Personal Computer</i>
PI	- Proporcional Integral
PID	- Proporcional Integral Derivativo
PLP	- <i>Preformed Line Products</i>
PPx	- Peso Próprio das Ferragens
PRLB	- Potência do Ruído na Largura de Banda
PSD	- <i>Power Spectrum Density</i>
RMC	- Resistência Mecânica Calculada
RPM	- Rotação Por Minuto
RT	- <i>Real Time</i>
SBL	- <i>Safe Border Line</i>
SIMEPAR	- Sistema Meteorológico do Paraná
TC	- Transformador de Corrente
TDMS	- <i>Test Data Exchange Stream</i>
UFPA	- Universidade Federal do Pará
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UV	- Ultravioleta
VCA	- <i>Voice Coil Actuator</i>
VIV	- Vibrações Induzidas pelo Vento
VSD	- <i>Variable Speed</i>
WFM	- <i>Waveform</i>
WG	- <i>Working Group</i>
ZTAL	- <i>Zirconium Ultra Thermal Resistant Aluminium Alloy</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Alfabeto Latino

A	Constante utilizada para o cálculo da tensão vibracional. dinâmica
$A_A$	Área exposta ao vento da cadeia de ancoragem
$A_c$	Área de seção transversal do cabo condutor
$A_S$	Área exposta ao vento da cadeia de suspensão
b	Constante utilizada para o cálculo da tensão vibracional dinâmica
C	Deslocamento do fuso por rotação na rosca sem fim
$C_{xc}$	Coeficiente de arrasto
d	Diâmetro do cabo completo
$d_a$	Diâmetro do fio de alumínio
$D_{ec}$	Deformação elástica do cabo
$D_{et}$	Deformação torre
$D_{miner}$	Dano por vibração através da regra de Miner
$D_{pc}$	Deformação plástica do cabo
$D_{prog}$	Dano por vibração através da regra do dano progressivo
$d_s$	Diâmetro do fio de aço
$D_{tc}$	Deformação térmica do cabo
$D_{total}$	Deformação total
$E_{af}$	Módulo de elasticidade final do alumínio
$E_{ain}$	Módulo de elasticidade inicial do alumínio
$E_f$	Módulo de elasticidade final do condutor
$E_i$	Módulo de elasticidade inicial do condutor
$E_{lmin}$	Rigidez mínima à flexão do cabo
$E_{sf}$	Módulo de elasticidade final do aço
$E_{sin}$	Módulo de elasticidade inicial do aço
f	Frequência
$F_{barra}$	Força suportada pela cantoneira de aço do sistema de tração
$F_{crit}$	Força crítica calculada
$F_{r1}$	Força de reação 1
$F_{r2}$	Força de reação 2
$F_{r2a}$	Força de compressão nas barras chatas laterais
$F_{r2b}$	Componente vertical da força de compressão nas barras chatas
$F_s$	Frequência da amostragem de dados
$F_v$	-Força devido ao vento
g	Unidade de aceleração equivalente a 9,80665 m/s <sup>2</sup>
h	Altura do retângulo
H	Valor da tração do condutor
I	Vetor corrente elétrica

$I_{min}$	Momento de inércia mínimo de área da seção transversal
$I_{xx}$	Momento de inércia em torno do eixo x
$I_{yy}$	Momento de inércia em torno do eixo y
$K$	Constante definida por fórmula
$L_t$	Comprimento total do cabo
$m$	Massa
$N_c$	Número de ciclos de fadiga
$N$	Número de leituras realizadas (adquiridas)
$n_a$	Número de fios de alumínio
$n_i$	Número de ciclos de fadiga a determinada frequência registrado em
$N_i$	Número de ciclos de fadiga a determinada frequência determinado
$N_m$	Número de médias
$n_s$	Número de fios de aço
$p$	Parâmetro determinado por $(H/EI)^{0,5}$
$w$	Peso específico do condutor
$P_A$	Peso da cadeia de ancoragem
$P_{ca}$	Peso devido ao peso do cabo e acessórios
$P_e$	Potência necessária no eixo de acionamento
$P_f$	Passo do fuso
$P_{os}$	Posição do amortecedor no cabo condutor
$P_s$	Peso da cadeia de suspensão
$R$	Vetor resistência elétrica
$R_1, R_2$	Resistência elétrica na temperatura $T_1$ e $T_2$
$S$	Tensão dinâmica
<b>S</b>	Vetor de sinal lidos do arquivo
$S_0$	Sinal de referência
$S_{cc}$	Dado adquirido da célula de carga analisado
<b>S<sub>cc</sub></b>	Vetor de sinais da célula de carga do <i>vibrador</i>
$S_p$	Sobreposição de dois vetores de dados para fins de análise
$S_t$	Número de Strouhal
$S_{vib}$	Dado adquirido do vibrógrafo analisado
<b>S<sub>vib</sub></b>	Vetor de sinais do vibrógrafo
$S_{xy}$	Densidade espectral cruzada entre dois sinais
$S_{yy}$	Densidade espectral de potência do sinal
$T_1, T_2$	Temperatura inicial e final respectivamente
$T_a$	Tempo de aquisição
$T_b$	Tamanho do bloco do número de amostras de dados analisados
$T_e$	Torque no eixo de acionamento
<b>V</b>	Vetor tensão elétrica
$V_g$	Comprimento do vão gravante
$V_l$	Velocidade linear do fuso



$V_p$	Velocidade do vento de projeto
$V_v$	Velocidade do vento para o cálculo do tamanho do <i>loop</i> de vibração
$W_{pico}$	Potência pico
$W_{rms}$	Potência eficaz
$x$	Distância de pontos no eixo x
$y$	Distância de pontos no eixo y
$Y_{p-p}$	Amplitude pico a pico da vibração do cabo condutor
$\bar{X}_i^*(f)$	Complexo conjugado da transformada de Fourier de $\bar{X}(f)$ do sinal $x(t)$
$\bar{H}_i$	Estimador
$\bar{Y}^*(f)$	Complexo conjugado da transformada de Fourier de $\bar{Y}(f)$ do sinal
$\bar{Y}(f)$	Transformada de Fourier do sinal de resposta
$\bar{X}(f)$	Transformada de Fourier do sinal $x(t)$
$\Delta f$	Resolução de frequência
$\alpha_1$	Coefficiente de variação da resistência
$\Omega$	Unidade de resistência elétrica Ohm
$\sigma_{am}$	Tensão média do alumínio
$\sigma_{sm}$	Tensão média do aço
$\alpha_s$	Coefficientes de dilatação térmica lineares do aço
$\alpha_a$	Coefficientes de dilatação térmica lineares do alumínio
$\sigma_{ad}$	Cálculo do valor da tensão dinâmica
$\theta$	Temperatura de interesse

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Disposição dos acelerômetros .....	39
Figura 2 - Termopar inserido na amostra de condutor .....	41
Figura 3 – Chassis PXI com os módulos utilizados .....	44
Figura 4 – cDAQ 9188 com destaque do módulo NI 9234 à direita .....	45
Figura 5 - Disposição do Proximito <sup>®</sup> e da amostra de cabo .....	45
Figura 6 – Detalhe do vibrógrafo (à esquerda) e instalação (à direita).....	47
Figura 7 – Partes que compõe o sistema de vibração – visualização isométrica.....	48
Figura 8 – Partes do sistema de excitação eletromecânica .....	49
Figura 9 – Partes móveis do sistema de excitação eletromecânica .....	50
Figura 10 – Voice Coil Actuator da BEI Kimco magnetics .....	51
Figura 11 - Atuador eletrodinâmico preso a mesa de testes. À direita detalhe do acelerômetro instalado na mesa de vibração .....	53
Figura 12 – Testes realizados em bancada com o vibrador contendo todos os seus componentes.....	55
Figura 13 - Instalação dos vibradores nas três fases da LTE.....	55
Figura 14. Dois tipos de excentricidades geradas nos pontos de fixação .....	56
Figura 15 - Transdutor de posição linear utilizado no projeto.....	58
Figura 16 - Célula de carga utilizado para medir à tração nos cabos da LTE .....	58
Figura 17 - montagem do primeiro sistema de tração .....	59
Figura 18 - Fixação do sistema de tração na bancada.....	59
Figura 19 –Fixação do sistema de tração nas mísulas (braços da torre) .....	60
Figura 20. Instalação dos sistemas desenvolvidos para a LTE.....	61
Figura 21. Fluxograma do controle do sistema de tração .....	62
Figura 22. Montagem da calibração das células de carga .....	63
Figura 23. Instalação dos acelerômetros nos cabos condutores.....	67
Figura 24. Desenhos esquemáticos da instalação dos anemômetros instalados na torre 1 e 2.....	68
Figura 25. Peça de cabo condutor instrumentado com termopar tipo T .....	69
Figura 26. Nós computacionais do sistema.....	73
Figura 27. Curvas de tensão-deformação no cabo Tern – cabo completo.....	81
Figura 28. Curvas de tensão-deformação no cabo Tern – alma de aço.....	81
Figura 29. Curvas virtuais e finais do cabo <i>Tern</i> .....	82

Figura 30. Curvas de tensão-deformação no cabo Greeley .....	84
Figura 31. Curvas de tensão-deformação no cabo <i>Phosphorus</i> .....	84
Figura 32. Configuração da bancada de ensaios para o ensaio de fadiga.....	91
Figura 33. Bancada ensaio de vibrações no vão de 54 m com excitação a 0,50 m do engaste .....	97
Figura 34. Posicionamento do amortecedor no vão de teste .....	99
Figura 35. Amortecedor tipo Stockbridge assimétrico instalado na amostra .....	101
Figura 36. Módulo da receptância nos ensaios a 20,1% da RMC.....	102
Figura 37. Gráfico da curva resultante da subtração das curvas sem e com o amortecedor, nos ensaios a 20,1% da RMC .....	103
Figura 38. Redução de vibração pela introdução do amortecedor nos três cabos, em função da tração.....	104
Figura 39. – Partes do painel com os controles e indicadores para operação do programa.....	107
Figura 40. – Curvas de tensão acumulada e S/N.....	110
Figura 41 – Painel de controle do programa de processamento final dos dados “VibraLTE” .....	113
Figura 42.- Gráfico da tração nos três cabos condutores adotando o critério H/w na LTE.....	118
Figura 43. Painel e funcionalidades do programa para tratamento de dados .....	121
Figura 44. Eficiência dos amortecedores dinâmicos tipo Stockbridge em função da tração no cabo, para os três cabos analisados na LTE.....	125
Figura 45. Comparação entre o nível de vibração entre os condutores sem amortecedor .....	126
Figura 46. Comparação entre o nível de vibração entre os condutores com amortecedor .....	126

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características mecânicas e eletromagnéticas do Voice Coil Actuator. Fonte: BEI Kimco magnetics. ....	51
Tabela 2 - Especificação do transdutor de posição linear .....	58
Tabela 3 - Especificação da célula de carga .....	58
Tabela 4 - Etapas do ensaio de tensão-deformação no Tern (cabo completo) .....	80
Tabela 5. Etapas do ensaio de tensão-deformação no Phosphorus .....	80
Tabela 6. Etapas do ensaio de tensão-deformação no Greeley.....	80
Tabela 7. módulos de elasticidade registrados nos três ensaios no cabo Tern .....	83
Tabela 8. Resultados finais dos ensaios de tensão-deformação no cabo Tern .....	83
Tabela 9. módulos de elasticidade (GPa) dos cabos de seção homogênea .....	84
Tabela 10 - Características construtivas do cabo Tern .....	87
Tabela 11 Características construtivas do cabo Phosphorus.....	87
Tabela 12. Valores dos módulos de elasticidade do cabo Tern .....	87
Tabela 13. Valores dos módulos de elasticidade do cabo Phosphorus .....	88
Tabela 14. Parâmetros de lançamento do cabo Tern .....	88
Tabela 15. Parâmetros de lançamento do cabo Phosphorus.....	88
Tabela 16. Parâmetros de ensaio de fadiga do cabo Tern.....	88
Tabela 17. Parâmetros de ensaio de fadiga do cabo CAL/1120 823,8 kcmil. ....	88
Tabela 18. Parâmetro $LD/m$ para cada valor de $H/w$ do cabo Tern .....	89
Tabela 19. Parâmetro $LD/m$ para cada valor de $H/w$ do cabo Phosphorus.....	89
Tabela 20. Resultados do ensaio no cabo Tern, com tração baixa .....	93
Tabela 21. Resultados do ensaio no cabo Tern, com tração média.....	93
Tabela 22. Resultados do ensaio no cabo Tern, com tração elevada.....	93
Tabela 23. Resultados do ensaio no cabo Phosphorus, com tração baixa .....	93
Tabela 24. Resultados do ensaio no cabo Phosphorus, com tração elevada .....	94
Tabela 25. Coeficientes das curvas de Wöhler ajustadas .....	94
Tabela 26. trações aplicadas nos três condutores para ensaio modal com martelo e peso .....	97
Tabela 27 - Posicionamento do amortecedor tipo Stockbridge no cabo Greeley no vão de 54 m.....	99
Tabela 28. Redução nos níveis de vibração pela introdução do amortecedor no cabo Tern.....	103

Tabela 29. Redução nos níveis de vibração pela introdução do amortecedor no cabo Phosphorus .....	103
Tabela 30. Redução nos níveis de vibração pela introdução do amortecedor no cabo Greeley.....	104
Tabela 31 - Trações utilizadas para o ensaio de vibração eólica .....	108
Tabela 32 - Exemplo de tabela com dimensão 16 x 18.....	110
Tabela 33 - Resumo dos resultados obtidos através dos 655 arquivos adquiridos.	114
Tabela 34 - Trações utilizadas nos três condutores para os ensaios de varredura em frequência.....	117
Tabela 35 - Posicionamento do amortecedor tipo Stockbridge nas três fases da LTE .....	119

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	21
1.2	JUSTIFICATIVA .....	22
1.3	OBJETIVO .....	22
1.4	METODOLOGIA .....	23
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
1.6	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
1.6.1	Descrição dos laboratórios para ensaios em cabos.....	25
1.6.2	Descrição dos laboratórios para ensaios em amortecedores .....	30
1.6.3	Descrição das linhas de transmissão existentes usadas para ensaios em cabos e acessórios .....	32
1.6.4	Utilização de linhas de transmissão experimentais para testes em cabos e acessórios .....	37
<b>2.</b>	<b>SENSOREAMENTO E EQUIPAMENTOS DA LTE .....</b>	<b>39</b>
2.1	INSTALAÇÃO DOS ACELERÔMETROS .....	39
2.2	INSTALAÇÃO DOS ANEMÔMETROS .....	40
2.3	CÉLULAS DE CARGA NA LTE.....	40
2.4	APLICAÇÃO DOS TERMOPARES.....	40
2.5	VIBRÓGRAFO .....	41
2.5.1	Projeto do vibrógrafo.....	41
2.5.2	Sensor de medição da amplitude de vibração do cabo .....	42
2.5.3	Suporte adotado no projeto do vibrógrafo.....	42
2.5.4	Calibração dos transdutores indutivos .....	43
2.5.5	Projeto dos chassis do vibrógrafo.....	46
2.5.6	Conclusão .....	47
2.6	SISTEMA DE EXCITAÇÃO ELETRODINÂMICO.....	47
2.6.1	Descrição das partes que compõe o sistema de excitação eletrodinâmico .....	48
2.6.2	Partes internas que compõe o sistema de excitação mecânica .....	49
2.6.3	Elementos que compõe o sistema de excitação eletrodinâmico.....	50
2.6.4	Testes preliminares do sistema de excitação em bancada de testes .....	52
2.6.5	Instalação do sistema de vibração na torre 1 .....	54

2.7	SISTEMA DE TRAÇÃO DOS CONDUTORES DA LTE .....	55
2.7.1	Projeto do sistema de tração .....	56
2.7.2	Guia linear .....	57
2.7.3	Transdutor de posição linear .....	57
2.7.4	Célula de carga para medição da tração nos condutores.....	58
2.7.5	Montagem e testes .....	58
2.7.6	Instalação dos sistemas na torre .....	60
<b>3.</b>	<b>MONTAGEM E AJUSTES DOS SISTEMAS NA LTE.....</b>	<b>61</b>
3.1	SISTEMA DE EXCITAÇÃO ELETRODINÂMICO.....	61
3.2	SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TRAÇÃO E VIBRAÇÃO .....	62
3.3	VIBRÓGRAFOS.....	63
3.4	MONTAGENS E TESTES DOS SISTEMAS NA LTE.....	64
3.4.1	Condicionamento dos cabos entre o painel 1 e o alto da torre 1 .....	64
3.4.2	Sistema de tração dos condutores.....	64
3.4.3	Sistema de excitação eletrodinâmico.....	65
3.4.4	Vibrógrafos .....	66
3.4.5	Acelerômetros.....	66
3.4.6	Anemômetros.....	67
3.4.7	Termopares .....	68
<b>4.</b>	<b>PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA A LTE.....</b>	<b>70</b>
4.1	PROCESSOS DA LTE .....	70
4.1.1	Monitoramento dos esforços nos pés da torre .....	70
4.1.2	Regulador de tração dos cabos condutores .....	71
4.1.3	Monitoramento e controle da vibração nos cabos condutores.....	71
4.1.4	Monitoramento da temperatura dos cabos condutores e vento .....	72
4.1.5	Sistema de controle de imagem das câmeras .....	72
4.1.6	Transmissão de dados.....	73
4.2	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA.....	73
4.2.1	Funções desempenhadas pelo programa de controle LTE .....	74
4.3	FUNCIONALIDADE DOS SISTEMAS DA LTE .....	74
4.3.1	Modos de operação .....	74
4.3.2	Medição da tensão vibracional dos cabos condutores.....	75
4.4	MODALIDADES DE ENSAIOS DA LTE.....	75

4.4.1 Registro contínuo da vibração gerada pelos ventos com controle de tração .....	76
4.4.2 Registros de vibração periódico.....	76
4.4.3 Registro por nível de tensão dinâmica.....	77
4.4.4 Gatilho por rajadas de vento.....	77
<b>5. TESTES REALIZADOS EM LABORATORIOS PREDIAIS PARA</b>	
<b>SUBSIDIO DE DADOS AOS ENSAIOS REALIZADOS NA LTE .....</b>	<b>79</b>
5.1 ENSAIOS DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO.....	79
5.1.1 PROCEDIMENTO DE ENSAIO .....	79
5.1.2 Ensaio no cabo Tern.....	79
5.1.3 Ensaio na alma de aço .....	80
5.1.4 Resultados dos ensaios no cabo Tern.....	81
5.1.5 Resultados dos ensaios nos cabos Phosphorus e Greeley .....	83
5.2 ENSAIOS DE FADIGA (CICLO DE WÖHLER) .....	84
5.2.1 Metodologia para a definição das trações de ensaio .....	85
5.2.2 Estimativa das tensões alternadas para avaliação da fadiga .....	86
5.2.3 Definição das trações de projeto e das tensões alternadas.....	87
5.2.4 Procedimento de ensaio .....	89
5.2.5 Resultados dos ensaios.....	92
5.3 ENSAIO MODAL NOS CABOS CONDUTORES UTILIZADOS E	
ACESSÓRIOS.....	95
5.3.1 Procedimento realizados para realização do ensaio modal.....	95
5.3.2 Equações utilizadas para a análise dos dados dos ensaios modais.....	99
5.3.3 Resultados obtidos .....	101
<b>6. EXPERIMENTOS ATRAVÉS DA VIBRAÇÃO EOLICA REALIZADA NA</b>	
<b>LTE .....</b>	<b>105</b>
6.1 EXCITAÇÃO POR VIBRAÇÃO EÓLICA DOS CABOS CONDUTORES DA	
LTE .....	105
6.2 PREPARATIVOS PARA O ENSAIO DE VIBRAÇÃO EÓLICA.....	106
6.3 PROCEDIMENTOS PARA A REALIZAÇÃO DO ENSAIO .....	108
6.4 TRATAMENTO DOS DADOS .....	109
6.4.1 Critérios adotados para o cálculo do acúmulo de danos nos cabos .....	109
6.5 CÁLCULO DA FREQUÊNCIA MÉDIA ATRAVÉS DA PONDERAÇÃO NO	
ACÚMULO DE DANOS NOS CONDUTORES.....	111



6.6	PROGRAMAS UTILIZADOS PARA O TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS COM OS TESTES DE VIBRAÇÃO EÓLICA .....	111
6.7	RESULTADOS.....	114
<b>7.</b>	<b>ENSAIO DE VARREDURA EM FREQUÊNCIA EM CABOS</b>	
	<b>CONDUTORES NA LTE.....</b>	<b>115</b>
7.1	PREPARATIVOS PARA O ENSAIO DE VARREDURA EM FREQUÊNCIA ....	
	115	
7.2	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	
	116	
7.3	TRATAMENTO DOS DADOS.....	119
7.3.1	Tratamento de dados para realizar o pós-processamento para análise e determinação das frequências naturais dos cabos condutores.....	120
7.4	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE VARREDURA EM CADA UM DOS CONDUTORES COM E SEM AMORTECEDOR .....	124
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>127</b>
8.1	ENSAIO COM EXCITAÇÃO POR VIBRAÇÃO EÓLICA DOS CONDUTORES SEM AMORTECEDORES.....	127
8.2	ENSAIO DE VARREDURA EM FREQUÊNCIA COM EXCITADOR ELETRODINÂMICO .....	128
8.3	COMPORTAMENTOS DOS SISTEMAS DA LTE .....	129
8.3.1	Vibrógrafos .....	129
8.3.2	Sistema de excitação eletrodinâmico.....	130
8.3.3	Sistema de tração dos condutores da LTE .....	131
8.3.4	Programa desenvolvido para a LTE.....	131
<b>9.</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>133</b>
9.1	PROJETOS DE P&D EM ANDAMENTO .....	133
9.2	CONTINUIDADE DA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS DA LTE BASEADO NOS DADOS ADQUIRIDOS DURANTE O PROJETO.....	134
9.3	TRABALHOS NA ÁREA ACADÊMICA EM ANDAMENTO QUE SE BENEFICIARÃO DO TRABALHO REALIZADO.....	135

## APÊNDICES

A.	ANÁLISE ESTRUTURAL PARA A ANCORAGEM DOS SISTEMAS DE TRACÇÃO .....	144
B.	CONSTRUÇÃO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL .....	149
C.	CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS VIBRÓGRAFOS .....	160
D.	PROJETO DO SISTEMA DE TRACÇÃO .....	164
E.	BASE DE CÁLCULO PARA O PROJETO DO SISTEMA DE TRACÇÃO .....	171
F.	MONITORAMENTO DOS ESFORÇOS DOS PÉS DA TORRE 1 .....	175
G.	PARTES DO PROGRAMA DE CONTROLE LTE.....	183
H.	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS NOS CABOS CONDUTORES.....	192
I.	WÖHLER.....	202
J.	RESULTADOS COMPARATIVO DOS ENSAIOS DINÂMICOS EM CABOS DE TRANSMISSÃO COM E SEM AMORTECEDOR .....	206
K.	CURVAS LEVANTADAS PELO ENSAIO EÓLICO NA LTE – DANOS ACUMULADOS .....	238

## ANEXOS

A.	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CABO CAA TERN 795 KCMIL .	244
B.	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CABO CAL 6201 GREENLEY 927,2 KCMIL .....	245
C.	ESPECIFICAÇÕES DO CABO CAL 1120 PHOSPHORUS 823 KCMIL .....	246
D.	ESPECIFICAÇÕES DO CABO CAA DOTTEREL NO CATÁLOGO DA GENERAL CABLE .....	247
E.	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CABO OPGW DUAL 1.030.133.S36 .....	249
F.	CÁLCULO ESTRUTURAL DA TORRE PDS2 .....	250
G.	CÁLCULO ESTRUTURAL DA TORRE PDF60 .....	261

## **1 INTRODUÇÃO**

Na atualidade, no Brasil tem-se dificuldade de se encontrar linhas ou banco de testes para cabos e acessórios disponíveis, que possuam vãos próximos aos utilizados em projetos de linhas existentes para testes em cabos e acessórios. Como ferramenta para esta pesquisa, uma Linha de Transmissão Experimental (LTE) foi projetada e construída para auxiliar na identificação dos efeitos da tração em cabos de transmissão. Assim foi possível obter subsídios para elaborar soluções para novos projetos e na recapacitação de linhas existentes para o aumento da transmissão de energia com confiabilidade.

### **1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Os ensaios e testes mecânicos realizados em cabos e amortecedores destinados para linhas de distribuição e transmissão são em sua maioria realizados em bancos de testes e equipamentos situados em laboratórios prediais. A finalidade desses ensaios é a obtenção de informações a respeito do desempenho do conjunto cabo-amortecedor quando submetidos a condições próximas a aplicação de projeto. Com a realização de testes em uma linha de transmissão real, os resultados obtidos em testes de laboratório poderão ser comparados e até complementados, trazendo assim uma maior confiança para a equipe de projeto, principalmente quando se trata de cabos e acessórios não usuais para a concessionária ou empresa.

A dificuldade de obter uma linha de distribuição ou transmissão disponível para testes não é trivial pelos seguintes motivos: a dificuldade em desenergizar a linha para a instalação dos elementos necessários, problemas de furtos (segurança) em linhas desenergizadas, dificuldade em se obter qualidade nas medições almejadas, local adequado para a obtenção dos comportamentos climáticos de interesse (ventos por exemplo), as montagens necessárias dependem das condições climáticas e etc.

Os motivos mencionados foram alguns dos desafios enfrentados para o desenvolvimento do projeto e construção da linha de transmissão experimental mencionada neste trabalho (Apêndice A).

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Para otimização dos projetos de capacitação de linhas de distribuição e transmissão, é necessário conhecer o comportamento dos parâmetros mecânicos dos elementos que a compõe, como dos cabos e amortecedores. Na atualidade para se conseguir novas concessões de linhas de transmissão é necessário o uso de novas tecnologias em cabos condutores e acessórios. Esse conjunto é submetido a novos limites para permitir um fluxo maior de potência nos cabos de energia a fim de que seja possível atingir custos competitivos, sem colocar em risco a confiabilidade do sistema. Os condutores recentemente desenvolvidos permitem um valor de transmissão de corrente próximo aos cabos similares, porém com peso específico menor. O uso de um tensionamento maximizado, juntamente com condutores melhores, permitem garantir distâncias de segurança previstas em projeto, contribuindo para a confiabilidade de operação no tempo de vida útil da linha. Outro benefício é a redução nas alturas necessárias das estruturas, otimizando o custo de um projeto novo.

Outro aspecto a ser considerado é de cunho vibracional, devido à excitação dos cabos pelo vento, principalmente nas trações maiores, quando se tem um menor auto amortecimento, alterando assim os níveis de vibrações nos cabos e acessórios. Portanto, são citados neste trabalho bancos de ensaios em laboratórios confinados e um novo banco a céu aberto (LTE) com a finalidade da análise desses comportamentos vibracionais dos condutores de energia, bem como dos acessórios (amortecedores).

## **1.3 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de uma Linha de Transmissão Experimental (LTE) automatizada e os sistemas que a compõe, mostrando detalhes da concepção, desenvolvimento e funcionalidades. Ao final, através da realização de dois tipos de ensaios nos três cabos condutores, é mostrada a potencialidade da linha através dos resultados obtidos. Para atingir o objetivo, quatro

testes complementares são realizados em dois bancos de ensaios no laboratório do Lactec.

#### **1.4 METODOLOGIA**

O comportamento vibracional está associado ao comprimento dos condutores analisados. Por isso foi projetada e construída uma linha de transmissão experimental automatizada, com vão adequado para testes dos cabos e acessórios. Eles foram instrumentados para tornar possível as medições com ventos reais e vibração forçada induzida por vibradores eletrodinâmicos instalados nas mísulas de uma das torres de ancoragem. Assim os experimentos realizados em laboratório confinado podem ser comparados aos realizados em condições mais próximas às reais.

Para checar a funcionalidade da LTE, foram realizados dois tipos de ensaios: varredura em frequência, com vibração gerada através do excitador eletrodinâmico nos cabos das três fases com e sem amortecedores e observação do comportamento vibracional das amostras excitadas por ventos, sem amortecedores. Para tornar possível a análise dos dados levantados na LTE, foi necessário o aporte dos parâmetros mecânicos dos condutores e acessórios utilizados na LTE através de quatro testes realizados no laboratório de ensaios em cabos e acessórios (LECA), situado no Lactec.

#### **1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Para uma melhor compreensão e organização, o presente trabalho foi dividido em 9 capítulos, cujo conteúdo será explicitado a seguir:

No capítulo 1, na seção 1.6, é apresentado um levantamento bibliográfico, contendo a suma de dissertações, artigos e afins que descrevem laboratórios de ensaios *indoor* e *outdoor*, com foco em testes e ensaios com o objetivo no aporte de informações para o desenvolvimento do projeto da LTE e testes possíveis de serem realizados na linha experimental.

No capítulo 2 é realizada uma descrição funcional e conceitual dos equipamentos que foram instalados na LTE. Nessa descrição são abordados detalhes

da concepção e da execução do projeto dos equipamentos que compõe a linha, os mecanismos e sensores utilizados.

O capítulo 3 descreve a pré-montagem, calibração e testes dos diversos sistemas recém construídos, em bancada reduzida e também na LTE.

O capítulo 4 faz um apanhado do programa desenvolvido para operar a LTE local e remotamente. Essa operação engloba a realização de ensaios com e sem acompanhamento (operações automatizadas de controle de tração, amplitude e frequência de vibração) conforme demandas dos testes realizados.

No capítulo 5 ensaios são realizados em laboratório *indoor* para dar aporte de dados para tornar possível a realização dos testes realizados na LTE. São descritos os ensaios com resultados para as amostras Tern, Phosphorus e Greeley com finalidade de determinar os parâmetros mecânicos e elétricos dos condutores.

Nos capítulos 6 e 7 são demonstradas algumas das funcionalidades da LTE através de dois tipos de ensaios realizados: comportamento dos três cabos condutores por excitação eólica e varredura em frequência por excitadores instalados nas mísulas da torre 1,

No capítulo 8 as conclusões obtidas através dos dois ensaios realizados na LTE são elencadas assim como também o desempenho dos sistemas desenvolvidos para a linha experimental.

No capítulo 9 são mencionados trabalhos futuros ou que já estão em andamento na área acadêmica (artigos, dissertações), projetos de P&D e ensaios em cabos e acessórios.

Este trabalho apresenta parte dos resultados obtidos, fruto da execução do projeto P&D de número PD-6491-0243/2011, intitulado “Aumento da Capacidade de Transmissão de Linhas Aéreas: Novas Técnicas de Projeto com Trações Elevadas” da COPEL Geração e Transmissão S.A., executado pelos Lactec e integrante do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor Elétrico Brasileiro regulamentado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

## 1.6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é apresentado um levantamento bibliográfico, contendo a soma de dissertações, artigos e afins que descrevem laboratórios de ensaios *indoor* e *outdoor*, com foco em testes e ensaios com o objetivo no comportamento vibracional de cabos condutores e amortecedores. Portanto, a revisão cobriu laboratórios contendo bancos de ensaios assim como linhas de transmissão para testes, tanto as que são dedicadas exclusivamente para ensaios eletromecânicos e termomecânicos em cabos e acessórios como linhas utilizadas por concessionárias, que foram monitoradas por alguma particularidade (vãos longos, travessias, novos materiais, trações elevadas, climas severos, etc.).

### 1.6.1 Descrição dos laboratórios para ensaios em cabos

Nesta seção são citados materiais bibliográficos encontrados na literatura, mencionando algumas particularidades de laboratórios utilizados para ensaios em cabos e amortecedores e os tipos de testes realizados em cabos acessórios, contendo a soma dos estudos realizados.

(MUNASWAMY e HALDAR, 2000) realizaram ensaios de autoamortecimento de três tipos de condutores com sete tamanhos diferentes em cabos condutores. O laboratório onde foi realizado os testes está localizado no Laboratório de Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia na Memorial University da cidade de Newfoundland, Canadá. O banco utilizado para esse fim possui temperatura controlada, vão com comprimento de 31,23 m (maior que três vezes o comprimento da onda de menor frequência em ressonância a ser aplicada nos testes IEEE (1978). Foram estudadas as características utilizando o método de potência (IEEE 664 – ISWR), com três níveis de tensão (10, 25 e 40% da resistência à tração nominal do condutor) para frequências que variam de 5 a 55 Hz e amplitudes de pico a pico normalizadas. Como resultado dos ensaios foram observados que o autoamortecimento nos cabos de alumínio com alma de aço de mesmo diâmetro com fios trapezoidais é maior do que os compostos de fios de seção circular, no entanto,

esta tendência não foi necessariamente observada em baixas frequências. Observou-se também que a dissipação aumenta com o aumento do comprimento do condutor.

(DIANA, BOCCIOLONE, *et al.*, 2005) comentam a respeito de problemas com vibrações induzidas por grandes ventos em cadeias tipo “I” com cabos condutores quádruplos e as falhas oriundas do fenômeno. A modelagem numérica do comportamento do sistema é apresentada com base nos testes experimentais realizados, a fim de validar o mecanismo de excitação e falha. A montagem da parte experimental foi baseada na simulação numérica, com comprimento do vão de 60 m dividido ao meio pelo conjunto de suspensão. Vários transdutores foram colocados na cadeia de isoladores e no feixe de cabos, com carga de tração no feixe de até 61,0 kN. A excitação do feixe de cabo foi dada por meio de um vibrador hidráulico.

(HENRIQUES, 2006) descreve uma bancada para realização de ensaios de fadiga em cabos de alumínio nus. À concepção adotada possibilita a realização de testes em cabos condutores, com até 50 mm de diâmetro e com vão ativo variando na faixa de 38 a 50 m de comprimento, com total controle e monitoramento em tempo real das condições pré-estabelecidas para o ensaio. O sistema desenvolvido permite controlar ou monitorar, entre outros parâmetros, a pré-tensão no cabo, a força de aperto nos parafusos de fixação do grampo de suspensão, o deslocamento em qualquer ponto da amostra em teste, a frequência e a força de excitação, a temperatura e a deformação nos fios da camada externa do cabo.

No intuito de levantar os comportamentos vibracionais dos cabos de linhas de transmissão, (AGUILERA, 2005) usou como subsidio um equipamento para realizar a análise e avaliação do nível de vibração de linhas de transmissão através de uma bancada de teste. Para tanto foi realizada análise modal experimental nos cabos condutores com a finalidade de determinar os respectivos parâmetros modais, tais como as frequências naturais, formas modais e os fatores de amortecimento. Com isso conseguiu-se uma aproximação razoável entre os testes experimentais e os resultados obtidos por simulações numéricas e analíticas, para o mesmo problema.

(SANTOS, 2008) estudou o comportamento dinâmico de feixe de cabos de linhas aéreas de transmissão, através de elementos finitos e de forma experimental em laboratório em bancada construída no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (UFPA). O modelo reproduz o acoplamento dos cabos



aos espaçadores-amortecedores da linha de transmissão e às estruturas de ancoragem, considerando o efeito de não-linearidade geométrica, decorrente dos grandes deslocamentos dos cabos, bem como a continuidade da linha. O carregamento de vento foi modelado através de um processo não-determinístico, sendo uma parte média, analisada de forma estática; uma parte variável, analisada de forma dinâmica, revelando que o carregamento do vento como uma excitação estática é incompleto.

(AZEVEDO, HENRIQUES, *et al.*, 2008) mostrou que a otimização do desempenho vibracional de condutores aéreos, o que depende da investigação sistemática da fadiga de *fretting* no sistema condutor e o sistema de fixação dos cabos condutores. Com esse objetivo, foi projetado um equipamento de fadiga de fricção e para a realização de testes de fadiga, adotando-se regime de fadiga de ciclo médio alto para um cabo condutor CAA Grosbeak, que foi montado em um grampo monoarticulado. Nos testes foi observado que, a seleção correta dos materiais que constituem o parafuso e da porca e o processamento do acabamento podem evitar a perda da pressão de aperto por *fretting* durante os testes de fadiga.

(HORTÊNCIO, 2009) apresentou um trabalho de natureza experimental realizado em um vão de 46,8 m, em cabo de energia de alumínio com alma de aço de bitola 397,5 kcmil – Ibis e grampo de suspensão monoarticulado. O objetivo é analisar o rompimento dos fios junto ao grampo de suspensão quando submetidos a um mesmo nível de vibração e traçar o gráfico tensão dinâmica *versus* ciclos e assim levantar a chamada curva de Wöhler. O experimento é realizado em um banco de ensaio totalmente automatizado, onde a temperatura, nível de vibração e ruptura dos fios são monitorados. O equipamento utilizado é o mesmo utilizado em (HENRIQUES, 2006), porém com alguns aprimoramentos.

(RAWLINS, 2009) analisou o amortecimento próprio vibracional de cabos condutores de alumínio, tomando como base a dissipação de energia devido ao atrito interno dos fios tensionados durante a flexão do condutor. Uma análise do fenômeno é apresentada, na qual se associa o movimento do condutor com as forças internas de intertravamento entre os elementos que compõem o condutor e os respectivos valores de dissipação que ocorrem durante o autoamortecimento. No artigo são feitas

comparações das estimativas com a análise dos dados medidos do autoamortecimento de uma amostra de cabo condutor.

(HORTÊNCIO, 2009) apresentou uma contribuição sobre o estudo da estimativa de vida útil de cabos condutores de energia elétrica, tendo como referência a análise da resistência à fadiga por *fretting* de forma experimental através de testes realizados de acordo com as recomendações da CIGRE (1985), EPRI (1979) e IEEE (1978), em uma bancada de 46,8 m de comprimento, com sistema de controle dos equipamentos informatizado. Foram utilizadas diferentes amplitudes de deslocamento, assim pode-se traçar uma curva da amplitude de tensão contra o número de ciclos, a qual é denominada de Curva S-N ou de Wöhler para estabelecer a tensão gerada na região de falha, utilizou-se a fórmula de Poffenberger-Swart (1965).

(SOUZA\_JUNIOR, 2010) apresentou análises numéricas por meio de modelos lineares e não lineares para simulação do comportamento dinâmico de cabos de linhas de transmissão, visando determinar as frequências de ressonância, os modos de vibração, o regime permanente e as vibrações verticais no plano para um condutor em linhas de transmissão. Os resultados simulados são comparados com dados experimentais obtidos em bancadas com 13, 30 e 65 m automatizadas para ensaio em cabos de linha aéreas.

(CAVALCANTE, 2012) apresentou um estudo que visa à definição de uma metodologia sistemática para implementação de um sistema de gestão da qualidade no laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia do departamento de engenharia mecânica da universidade de Brasília. É dada continuidade na elaboração dos procedimentos e demais documentos da qualidade tendo em vista os requisitos gerais de gestão e de competência técnica para que futuramente o laboratório em questão obtenha sua acreditação junto ao Instituto Nacional de metrologia, Normalização e Qualidade Industrial seguindo a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025.

O efeito da tração é analisado no artigo de (FADEL, ROSA, *et al.*, 2012). Os testes realizados utilizaram o mesmo equipamento utilizado por (HENRIQUES, 2006), porém, com alguns aprimoramentos. Neste estudo foi avaliado o efeito de uma tração de tensão média alta em ensaios de fadiga, utilizando-se uma amostra de um cabo

condutor Ibis (397,5 kcmil). Com base nas curvas S-N (ciclo de Wöhler), obtidas nos testes realizados, foi comprovado que um aumento da tração (EDS – *everyday stress*) na faixa de 20 a 30% da resistência mecânica calculada (RMC) do cabo causou uma redução de 50% na vida da amostra testada.

(ROLIM, MOREIRA, *et al.*, 2013) fizeram a análise de deformação em cabos de linhas de transmissão causada por vibrações mecânicas induzida, principalmente pela ação do vento que pode fadigar o cabo. Os testes foram realizados em bancada de ensaio que consiste em dois vãos de 9 e 12 m. A bancada construída utilizando acessórios e ferragens de linhas de transmissão (grampos de suspensão, isoladores, torres de ancoragem, etc.) para o cabo de alumínio com alma de aço – Grosbeak. A comparação entre a tensão medida com os extensômetros e a equação mostrou valores entre 31 e 48% RMS para os níveis de carga axial para valores de tração da amostra entre 20 e 30% da RMC (resistência mecânica calculada).

(ARAÚJO, ARAÚJO, *et al.*, 2013) apresentam um estudo teórico e experimental sobre o desempenho a fadiga de cabos de alumínio liga (CAL) em relação aos cabos de alumínio com alma de aços (CAA) teóricos sobre o comportamento a fadiga dessas ligas. Foi demonstrada a fabricação dos cabos CAL (liga AA 6201 T81), que apesar de mais resistente em relação a liga 1120, pode-se ter a sua resistência a fadiga reduzida em condições de operação e fortes gradientes de tensão. Além disso, foram levantadas três curvas S-N, na qual foi possível demonstrar os níveis de tensão alternada a que as amostras foram submetidas.

As consequências das vibrações eólicas de condutores de linhas de transmissão em torno do grampo de suspensão e em grampos de ancoragem são tratadas no artigo de (LÉVESQUE, GOUDREAU, *et al.*, 2015). Os testes foram realizados em um banco de ensaios de comprimento de 5,83 m para várias tensões, amplitudes de deslocamento e frequências. O objetivo deste trabalho foi apresentar dados para a flexão do cabo quando submetido a vibração eólica em dois tipos de cabos condutores de alumínio com alma de aço testados. A amplitude de deslocamento foi medida no antinó e em outros cinco locais perto da terminação rígida de fixação do cabo condutor.

(KALOMBO, PESTANA, *et al.*, 2017) geraram dados experimentais para permitir um estudo comparativo quando adotado o critério H/w na vida de fadiga de

fricção de condutores aéreos. Uma bateria de trinta e seis testes de fadiga foi realizada em um banco de ensaios em uma amostra de condutor de liga de alumínio de CAL 900 kcmil (condutor de alumínio liga) e outro condutor CAA 795 kcmil – Tern (CAA cabo de alumínio com alma de aço). Dois valores diferentes para o critério H/w foram considerados neste estudo, 1.820 e 2.144 m. As comparações demonstraram que o condutor Tern pode suportar um número significativamente maior de ciclos antes da falha de fadiga em relação ao CAL 900 kcmil para ambos os valores de H/w mencionados.

A brochura (WG B2.48, 2017) abrange a análise de cinco tipos de condutores, todos com o uso de tecnologias recentes. Foram realizados testes de características de carga e vibração de vento/gelo que foram realizados em locais no Brasil, Canadá, França, Reino Unido, EUA e com dados também fornecidos pela EPRI.

Muitos dados foram adquiridos em laboratórios, linhas reais e experimentais sobre o efeito de condutores HTLS (*High Temperature Low Sag*) em acessórios e, em particular, em isoladores compostos e de porcelana. Indica que esses itens não devem atingir temperaturas inadequadas, mesmo se os condutores operarem a 200° C.

#### 1.6.2 Descrição dos laboratórios para ensaios em amortecedores

A seguir são citados materiais encontrados na literatura, mencionando algumas particularidades de laboratórios utilizados para ensaios em amortecedores e os tipos de testes realizados com a suma dos estudos realizados:

As pesquisas experimentais, realizadas no artigo (SCHMIDT, BIEDENBACH e KRISPIN, 1996), foram realizadas com amortecedor de vibração do tipo Stockbridge em um vão de teste de 29,15 m de comprimento. O cabo condutor foi um CAA a uma tração de 35 kN (25% da carga de ruptura nominal). O sistema de tração utilizados foram com mancais rolamentados e alavanca para tracionamento da amostra. O vibrador magnético excita o vão na extremidade oposta ao tracionamento do cabo. Para determinar o ângulo de fase entre força e aceleração foi utilizado um equipamento medidor de fase de dois canais após a filtragem analógica de cada um dos dois canais. O deslocamento em nós e antinós foi detectado com transdutores electro-ópticos.

(DYKE, HARDY e ST-LOUIS, 1997) tratam de uma avaliação experimental do desempenho de diferentes sistemas de amortecimento no controle de movimentos de condutores induzidos pelo vento. Os sistemas de amortecimento compreendem diferentes tipos de amortecedores Stockbridge utilizados em condutores únicos do tipo CAA e CAL, bem como amortecedores espaçadores ou espaçadores semirrígidos combinados ou não com amortecedores usados em condutores triplos ou quádruplos. Os testes de anúncios foram realizados sob condições de vento natural na linha de testes da Hydro-Quebec, em Varennes, Quebec.

(WHAPHAM, 2012) descreve a teoria e simulação da vibração eólica em laboratório com a finalidade de testar o desempenho de condutores e acessórios, com foco em como o desempenho do amortecedor de vibração é determinado e, finalmente, os métodos usados para monitorar a vibração eólica no campo em linhas de transmissão operacionais e experimentais.

(BARRY, ZU e OGUAMANAM, 2015) fizeram a modelagem vibracional de um condutor com um amortecedor Stockbridge para uma linha de transmissão, utilizando o conceito de dupla viga. As equações de movimento são derivadas usando o princípio de Hamilton, e as expressões são apresentadas para a equação de frequência, formas de modos e condições de ortogonalidade. Foram realizados dois conjuntos de experimentos para modelo. O condutor utilizado foi o 795 kcmil (Drake) em vão de 27,25 m. As excitações vibracionais geradas foram medidas por uma célula de carga e um acelerômetro. O condutor foi excitado na faixa das frequências entre 10 e 45 Hz para determinar as frequências de ressonância do sistema condutor-amortecedor.

Neste artigo (SCHMIDT, 2016), foram realizados testes experimentais com amortecedor de vibração do tipo Stockbridge em um vão de teste de 29,15 m de comprimento. O cabo condutor foi um CAA a uma tração de 35 kN (25% da carga de ruptura nominal). Os sistemas de tração utilizados foram com mancais rolamentados e alavanca para tracionamento da amostra. O vibrador magnético excita o vão na extremidade oposta ao tracionamento do cabo. Para determinar o ângulo de fase entre força e aceleração foi utilizado um equipamento medidor de fase de dois canais após a filtragem analógica de cada um dos dois canais. Os deslocamentos dos nós e antinós foram detectados com transdutores electro-ópticos, portanto, sem contato.

(AMARAL e LOPES, 2016) mostraram, as principais metodologias de ensaio em amortecedores dinâmicos de vibração para cabos aéreos singelos e são apresentadas e analisadas criticamente. Apresenta-se ainda a proposta de uma nova metodologia de ensaio, com o suporte de dados obtidos experimentalmente, em banco de ensaios com vão superior a 30 m, situado no Lactec. Os resultados sugerem que amortecedores de baixo amortecimento reduzem significativamente os níveis de vibração no sistema primário nas frequências de ressonância do dispositivo, mas ocasionam o surgimento de ressonâncias adjacentes, nas quais o condutor é levado a vibrar em níveis elevados.

### 1.6.3 Descrição das linhas de transmissão existentes usadas para ensaios em cabos e acessórios

A seguir são citados materiais encontrados na literatura, mencionando algumas particularidades de linhas existentes utilizadas para ensaios e testes em cabos e acessórios:

TEBO, (1941) apresentou um método para determinar a eficácia dos dispositivos utilizados para a prevenção da fadiga nos condutores de linhas de transmissão por vibração. Pela primeira vez se utilizou distância a distância de 88,9 mm (3,5") do grampo da suspensão para a obtenção de registros de vibração obtidos em construções típicas, onde elas foram analisadas e correlacionadas com testes de fadiga e experiência em vãos de linhas existentes para determinar a vida provável do condutor. Os dados são sobre o desempenho de ensaios de ensaio em cabos CAA especial, para vários comprimentos de vãos, tensões e equipados com vários acessórios.

Em (BUCKNER, KERNER e PHILIPPS, 1968), foi utilizado um dos circuitos livre em uma linha aérea de circuito duplo de 220 kV, em Erlangen, Alemanha, por alguns meses, obtendo dados sobre o estresse dinâmico reais em cabos condutores. Isso se tornou possível principalmente pelo emprego de dispositivo de medição (vibrógrafo) e, particularmente, pela avaliação automática e impressão de registros por um computador. Os resultados de todos os testes à época, incluindo testes estáticos, já mostraram que as visões até então mantidas sobre as causas das falhas dos condutores mecânicos deveriam ser aprofundadas e revisadas. Os testes

dinâmicos foram realizados nos condutores CAA 230/30, 380/50 e 560/50 com seus respectivos amortecedores.

(DIANA, GASPARETTO, *et al.*, 1982) mostraram medições vibracionais de dois tipos de cabos (condutor e para-raios) realizadas em dois vãos de uma linha existente (Porto Tolle. Forli, 420 kV), paralela à costa marítima e sem obstáculos, permitindo que a brisa vibre os cabos. Uma descrição é dada às metodologias empregadas na medição e ao processamento subsequente de dados, em particular em um sistema para aquisição e gravação de dados usando um computador compacto, permitindo que a maioria de dados registrados sejam processados em tempo real. Por fim, os resultados experimentais obtidos são comparados com os modelos desenvolvidos pela equipe de pesquisa.

(DIANA, BRUNI, *et al.*, 1998) tratam da análise dinâmica de uma linha de transmissão aérea de 400 kV, denominada "Cruce Lago de maracaibo "(Venezuela) contendo sete torres de 130 m de altura e o tramo possui oito torres de suspensão, com comprimento de vãos na faixa de 1100-1500 m de comprimento. São apresentadas ferramentas analíticas utilizadas para simular esses problemas (excitação vibracional e eventos como falha de fase) que são também contemplados, juntamente com alguns resultados relevantes para este projeto.

Em (SMITH e MAILEY, 2003), a corporação Manitoba Hydro financiou a pesquisa de falhas em espaçadores amortecedores em duas linhas de transmissão de 500 kV, para as quais foi incumbida de realizar a substituição dos amortecedores existentes e instalar amortecedores adicionais. O trabalho foi realizado em um clima variável, sobre um terreno com uma extensão de mais de 400 km de floresta e mangue, acessível apenas por via aérea, enquanto as linhas de transmissão permaneciam energizadas para satisfazer aos requisitos de sistema. O projeto incluiu o reposicionamento dos amortecedores para melhorar a capacidade de amortecimento, completando a manutenção da linha adicional, bem como o desenvolvimento de um modelo matemático para verificar a veracidade dos registros de localização do amortecedor.

O relatório de ROBERTO DA SILVA LEME (2005) determina o nível de vibração com o atual sistema de amortecimento, e verificar se o sistema está adequado para manter a vibração em um nível seguro. Para isso foram separados para medições dois

sítios da LT – 500 kV. RIBEIRÃOZINHO. CUIABÁ, seguindo o método do “IEEE Standardization of conductor vibration measurements, Paper 31 TP 65-156”. Essa LT utiliza o sistema de amortecimento, composto pelo espaçador amortecedor para o cabo condutor CAA Rail. Neste vão foram instalados um vibrógrafo Vibrec, referência 642. Níveis de alongamentos menores que 150 microstrain são assumidos como sendo seguros para esta análise.

TEMINOVA, HINRICHSEN, *et al.*, (2006) apresentam uma solução para a monitorização de linhas de transmissão de energia para otimizar a capacidade de transmissão, elegendo o monitoramento em tempo real da temperatura do cabo condutor. Antes da instalação no campo dos sensores desenvolvidos para a medição de temperatura, um programa completo de testes laboratoriais para verificar as características operacionais e o desempenho sob várias tensões de serviço. As informações adquiridas de temperatura foram correlacionadas com dados meteorológicos e de corrente de operação.

O objetivo do relatório (CEMIG, 2007) é mostrar a comparação de várias medições e dados levantados em laboratório (CEPEL) e em campo (linhas existentes) sobre vibração eólica e fadiga de cabos, comparados com as medições e critérios de esticamento dos cabos das linhas de transmissão. Os dados eólicos também são comparados ao período de 1968 a 1979 de LT's com cabo singelo e também em feixes. O trabalho é restrito a comparação de critérios de esticamento e vibração eólica e não faz nenhuma consideração sobre hipóteses e cargas nas estruturas.

(BELLORIO, 2010) tem como objetivo conduzir uma revisão crítica sobre as diferentes metodologias existentes para o projeto e manutenção de linhas de transmissão de energia quanto à fadiga sob condições de fretting, elegendo o método da Cigré para cálculo da vida remanescente. Após análise crítica, foram adotadas as metodologias para um cabo da Eletronorte em uma linha de transmissão de 230 kV instalada na região Norte do Brasil, com o objetivo de estimar a durabilidade do cabo e ferramenta de análise para o setor de manutenção de empresas da área e também uma metodologia de cálculo para prever a resistência do cabo à fadiga.

Em (SCHIMITH, 2012) é mencionado o desenvolvimento e implementação de um equipamento vibrógrafo para monitorar vibrações em linhas de transmissão elétrica suspensas sobre a degradação do tempo de vida útil de um cabo. O



equipamento consiste em um detector de vibrações, conforme a norma “Standardization of Conductor Vibration measurements” (IEEE,1966), utilizando extensômetro como sensor de vibrações para coleta da amplitude máxima de pico a pico das oscilações. Os dados coletados são transmitidos diariamente através de modem GPRS para uma central de processamento remoto.

Em (ALENCAR, 2014) foi realizada uma avaliação crítica sobre a ocorrência de falhas por fadiga dos cabos condutores de alumínio liga 6201, dispostos em feixe duplo vertical, instalados em uma linha de transmissão de 230 kV localizada no Centro-Oeste brasileiro. Os cabos dessa linha de transmissão são protegidos contra vibração eólica com amortecedores de vibração do tipo Stockbridge (Modelo VSD) e espaçadores (Modelo AGSP).

(GEARY, CONDON, *et al.*, 2012) descrevem como o condutor de alta temperatura e baixa catenária (High Temperature Low Sag - HTLS) foi instalado em uma linha aérea de 220 kV com 80 km comprimento. Foi investigado o uso de condutores HTLS a fim de que em uma segunda etapa fosse realizada uma ampliação da capacidade de transmissão em 50 % em mais de 1.000 km em linhas de transmissão de 110 e 220 kV já existentes. Especificações detalhadas foram desenvolvidas para cobrir todos os elementos do comportamento do condutor, acessórios e testes de tipo. Foi necessário um exame completo da interrelação entre as propriedades mecânicas e elétricas do condutor para tornar viável a instalação do novo condutor. Após a instalação, foram realizadas medições da vibração na amostra, o tamanho da catenária em vãos críticos e o nível de ruído, confirmando assim as especificações do projeto.

(DULHUNTY, 2013) analisou a metodologia de como é realizado o dimensionamento feito por concessionárias de distribuição e transmissão de energia, na qual amortecedores de vibração helicoidal plástico deve ser aplicados em linhas de distribuição e do tipo Stockbridge destinados para linhas de transmissão. Segundo os autores, o autoamortecimento do condutor desempenha um papel importante na decisão quanto a implementação do uso de amortecedores helicoidal plástico ou espiral ou do tipo Stockbridge. A linha de distribuição observada foi de 22 kV, que utiliza o condutor de alumínio de 19 fios de diâmetro de 3,25 mm.

Em (HUNG, YAMAGUCHI, *et al.*, 2014) são estudadas as amplitudes vibracionais induzidas pelo vento em condutores envolvidos por uma camada de gelo em linhas de transmissão aéreas em campo. Neste estudo, procurou-se identificar as características de ventos que geram tais amplitudes e distingui-las dos fenômenos instáveis de galope. Para tanto foi adotado um método onde são combinados a análise de dados medidos em campo e a análise de autovalor em resposta aos ventos observados. Através deste estudo, conclui-se que a maioria das respostas medidas no campo são vibrações tipo rajada e que elas podem ser suficientemente para causar danos em qualquer tipo de linhas aéreas de transmissão. Foram utilizadas três linhas de transmissão com diferentes configurações para as observações experimentais, utilizando vãos com comprimentos de 615, 624 e 407 m.

(TIMASHOVA, NIKIFOROV, *et al.*, 2014) apresentam a experiência desenvolvimento e aplicação prática e de uma nova geração de condutores do tipo ACCR, GTACSR e ACCC. As características elétricas e mecânicas desses condutores possibilitam a obtenção do aumento da confiabilidade e da capacidade de transmissão de uma linha de transmissão, garantindo a distância de segurança entre condutores e partes aterradas. Uma série de testes foram realizados para determinar os parâmetros mecânicos e elétricos dos novos condutores. Os dados sobre as características mecânicas e elétricas dos novos condutores, obtidos durante a pesquisa, permitem executar vários projetos promissores de repotencialização de linhas existentes. Neste relatório, é descrita a experiência prática em linhas de transmissão existentes na Rússia (TIMASHOVA, NIKIFOROV, *et al.*, 2014) dos condutores dos tipos de condutores mencionados.

(KALOMBO, ARAÚJO, *et al.*, 2015) apresentam uma avaliação das causas da falha prematura por fadiga de um condutor CAL 900 kcmil utilizado em uma linha de transmissão de 230 kV localizada no Centro-Oeste do Brasil. Para realizar a análise, os gravadores de vibração foram instalados nas braçadeiras do espaçador em duas posições diferentes no vão e os testes de fadiga no cabo foram conduzidos. A regra de Miner (MINER, 1945) foi aplicada e a vida útil remanescente do cabo foi estimada em torno de 33 ao invés dos 100 anos previstos. Foram realizados também ensaios de ciclo de Wöhler para levantar a curva S/N do condutor analisado.

#### 1.6.4 Utilização de linhas de transmissão experimentais para testes em cabos e acessórios

Nesta seção é apresentado o levantamento de fontes bibliográficas, mencionando algumas particularidades de linhas experimentais utilizadas para ensaios e testes de vibração em cabos e acessórios.

(BROWN E BOVERI, 1956) menciona a utilização de uma linha experimental de três vãos (275, 290 e 300 m) na parte norte da floresta de Blai, Alemanha. O objetivo foi testar o comportamento de condutores singelos e em feixe sob cargas de vento e gelo. O trabalho abrange uma descrição da estação de teste e publica as primeiras observações e medições feitas sob ação do vento. Essas observações e medidas destinam-se a complementar os resultados obtidos a partir de testes realizados na linha de Eschbach.

(LABEGALINI, LABEGALINI, *et al.*, 1992) iniciam seu livro com uma introdução à transmissão de energia elétrica por linhas aéreas de transmissão e abordam com bastante clareza a maneira de se estimarem as forças atuantes sobre as linhas, além de aplicar um tratamento mais atual e objetivo ao cálculo das deformações elásticas e plásticas dos condutores. O trabalho apresenta o estudo do comportamento mecânico dos condutores, o roteiro para a realização de um projeto de cabos de uma linha de transmissão, o estudo das estruturas de sustentação, vibrações e tensões dinâmicas dos cabos. Além de um estudo detalhado das fundações de estruturas.

(HEICS e HAVARD, 1994) descrevem a investigação da influência de quatro tipos de gravadores de vibração em cabos condutores em uma linha de transmissão destinada a ensaios experimentais ao ar livre. Medições foram realizadas nesta linha, quando vibrada por ventos e também por um vibrador mecânico suspenso no vão analisado. Em ambas as situações, mostrou-se que existe uma grande inércia devido a instalação do gravador no condutor, alterando assim o valor da amplitude pico a pico adquirida próximo ao grampo de suspensão. As medições de campo foram realizadas na linha de teste de Kleinburg, localizada a 30 km ao norte de Toronto, Ontário, Canadá em três vãos experimentais de 244 m de comprimento.

(DYKE, HARDY e ST-LOUIS, 1997) trata de uma avaliação experimental do desempenho de diferentes sistemas de amortecimento para o controle da vibração

induzida pelo vento nos condutores de linha aérea de alta tensão. Os sistemas de amortecimento compreendiam diferentes tipos de amortecedores do tipo Stockbridge utilizados em condutores CAA (Cabo de Alumínio com Alma de Aço) e CAL (Cabo de Alumínio Liga) singelo, bem como amortecedores espaçadores ou espaçadores semirrígidos usados em condutores triplos ou quádruplos. Os testes foram conduzidos sob condições de vento natural na linha de teste Hydro-Quebec em Varennes, Quebec. A linha consiste em três vãos distintos, sendo o comprimento respectivamente de 400, 450 e 425 m.

O objetivo de (GUERY, WAREIN, *et al.*, 2008) tem como objetivo mostrar medições vibracionais de dois tipos de cabos realizadas em um vão experimental de 190 m localizado em Dead Water Feel, UK. Os dados foram obtidos através de um dispositivo experimental, que é capaz de realizar a medição de forma contínua em toda a gama de frequências e amplitudes. Neste trabalho é detalhada a análise dos dados realizados no período de vinte dias de gravação da vibração nestes condutores, dispostos em condições semelhantes. Os projetos dos condutores contemplam diferentes tipos de seções dos fios componentes: circular e trapezoidal. O novo sistema registrou 550 h de vibrações contínuas no local em menos de um mês. Esses dados gravados são equivalentes a medições de 5 anos no modo convencional (IEEE PES, 2007).

(PUFFER, FREHN, *et al.*, 2014) tratam de testes realizados em uma linha existente, equipado com condutores do tipo HTLS (*High Temperatura Low Sag*), bem como os passos para o desenvolvimento e validação de modelos de cálculo comprovados para determinar a catenária dos condutores analisados. A empresa TenneT TSO GmbH substituiu os antigos condutores CAA de uma linha de 220 kV no norte da Alemanha por condutores HTLS de tipos ACCR, ACCC e ZTAL/HACIN. Para medir os dados necessários para a validação dos modelos de temperatura e catenária, a linha é equipada com sensores para a tração, temperaturas dos condutores e das conexões dos terminais, os dados do clima ambiente e a corrente de carga, na qual foram realizadas continuamente.

## 2 SENSOREAMENTO E EQUIPAMENTOS DA LTE

Para que fosse possível realizar os ensaios nos cabos e acessórios instalados na LTE, foi necessário o uso de vários tipos de sensores distribuídos na planta. Foram utilizados acelerômetros, anemômetros, células de carga, termopares e vibrógrafos. Para este último, existe um tópico separado (seção 2.5), dada a sua complexidade. Nas seções de 2.1 a 2.4 os restantes dos sensores são descritos em detalhes.

### 2.1 INSTALAÇÃO DOS ACELERÔMETROS

Foram instalados seis acelerômetros monoaxiais de 50 g, diretamente nos três cabos condutores. Para isso foi necessário o desenvolvimento de um suporte que proporcionasse essa fixação, visto que a geometria do sensor não é apropriada para fixação. O suporte foi feito de poliacetal, por ser isolante, e a fixação do acelerômetro no suporte foi feita de maneira que este não tenha contato direto com o condutor. A disposição dos acelerômetros está demonstrada na Figura 1.

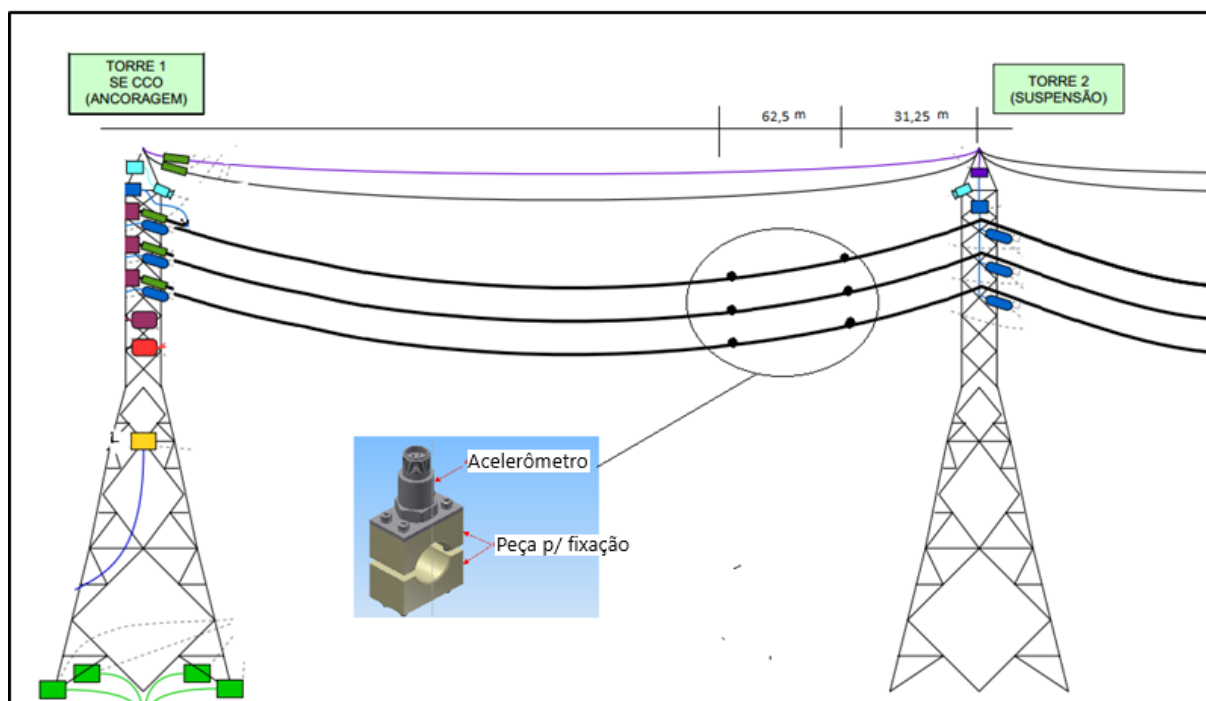


Figura 1 - Disposição dos acelerômetros  
Fonte: O autor.

## **2.2 INSTALAÇÃO DOS ANEMÔMETROS**

Para medir a velocidade e direção do vento, foram instalados anemômetros nas torres 1 e 2 em altura próxima as dos cabos fase. Assim é possível estudar como esse fator influencia na linha como um todo, e detalhar melhor os ensaios com mais esse parâmetro.

O sensor escolhido foi o WindSonic® SDI-12 da marca GILL Instruments. Este possui um baixo consumo de energia, e consegue realizar a medição da velocidade do vento entre 0 e 60 m/s, com resolução de 0,01 m/s. A direção é medida de 0 a 360° com resolução de 1°.

## **2.3 CÉLULAS DE CARGA NA LTE**

No projeto, as células de carga têm maior aplicação na medição da tração atuante nos condutores. Porém, também são utilizadas em outros sistemas, como no sistema de excitação eletrodinâmico. As trações nos condutores têm suas medições na tela do supervisor, em tempo real. São utilizadas três células de carga com sensibilidade de 1 mV/V, sendo três unidades de 5000 kgf para os cabos condutores e duas células de 2000 kgf para monitorar as trações nos para-raios.

## **2.4 APLICAÇÃO DOS TERMOPARES**

De maneira simplificada, a medição de temperatura realizada pelo termopar se dá através da variação de temperatura dos dois condutores metálicos do termopar. Estes estão unidos em uma de suas extremidades, e quando expostos a essa variação de temperatura, geram uma força eletromotriz em função das temperaturas de cada condutor, e também de suas extremidades. Para a medição, existe uma tabela de correlação para essa força eletromotriz gerada.

Para que também fosse realizada a medição da temperatura de cada um dos três condutores, foi construído um suporte para uma amostra de condutor, onde foi colocado o termopar. Esta foi fixada paralelamente e próximo à localização do cabo condutor. Foi necessário o uso de um pedaço de amostra de cada condutor, pois não

seria possível inserir um termopar no condutor sem modificar as suas características mecânicas. O suporte e a amostra junto ao termopar podem ser vistos na Figura 2.



Figura 2 - Termopar inserido na amostra de condutor  
Fonte: O autor.

## 2.5 VIBRÓGRAFO

Para a predição da vida remanescente de um cabo, é preciso de seu histórico que caracterize a vibração sofrida pela amostra. Esta é a função do vibrógrafo desenvolvido para este trabalho, registrar a amplitude da vibração, assim como o número de ciclos e a frequência. Nesta seção é descrito o desenvolvimento de três vibrógrafos para a LTE, um para cada uma das três fases da LTE.

### 2.5.1 Projeto do vibrógrafo

O vibrógrafo é composto por três partes, descritas a seguir:

- a) suporte indutivo: tem a função de aproximar o sensor do cabo, instalado na extremidade da cadeia de isoladores da torre de suspensão (torre 2) de linha de transmissão;
- b) sensor indutivo (Proximitor<sup>®</sup>): possui a função de transformar o deslocamento de vibração do cabo em tensão ou corrente elétrica, sem que haja contato com o cabo;
- c) condicionador de sinal: possui a função de tratar a tensão ou corrente elétrica, amplificando, atenuando, isolando, filtrando, prover excitação (alimentação) ao sensor e etc. A cablagem que conduz o sinal do sensor até a leitura do sinal é parte do condicionador do sinal, importante para que o sinal ruído e distorções sejam as menores possíveis.

Na sequência essas partes do sistema são descritas minuciosamente.

### 2.5.2 Sensor de medição da amplitude de vibração do cabo

Para o desenvolvimento de um sensor com o intuito de obter a amplitude de flexão para ser integrado na LTE, foram discutidas diversas opções de dispositivos que permitissem a detecção da posição do cabo condutor em relação ao grampo da linha de transmissão. Dentre os sensores pesquisados estão os lasers, apalpadores, sensores indutivos (Proximitor<sup>®</sup>), extensômetros elétricos entre outras possíveis soluções com o objetivo de adquirir os dados de medição.

A primeira solução analisada foi adotar uma viga em balanço com extensômetros resistivos presos na cadeia de suspensão. Essa solução foi estudada minuciosamente. Devido ao contato com o cabo (sujeito a repiques), a baixa faixa útil de medição e a necessidade de uma eletrônica mais elaborada, foi preterida por outra solução de melhor custo benefício, menor interferência ao conjunto de suspensão e baixa manutenção.

Para o teste de calibração em bancada, foi utilizado um sensor indutivo de distância (Proximitor<sup>®</sup>) - BAW004L (BALLUFF, 2016) - com sinal analógico e faixa de operação adequada que foi temporariamente disponibilizado. Este sensor foi instalado em um vibrador e posteriormente foram comparadas as leituras de saída do sensor em relação aos deslocamentos de um laser de alta precisão. A partir deste teste preliminar foi confirmada a possibilidade de adotar esse tipo de transdutor para medições de deformação dos cabos condutores na LTE com precisão adequada aos ditames das normas adotadas, como a IEEE Std 1368<sup>TM</sup>-2006 (IEEE PES, 2007).

### 2.5.3 Suporte adotado no projeto do vibrógrafo

O Proximitor<sup>®</sup> selecionado é o componente responsável por registrar a amplitude de flexão do condutor. Contudo, para o sistema completo foi necessário desenvolver uma estrutura para a fixação no condutor. Assim, após selecionar o tipo de sensor de deslocamento vertical foi desenvolvido um suporte para comportá-lo.

Para respeitar as recomendações da norma (IEEE PES, 2007), em que se deve instalar o vibrógrafo à 88,9 mm do último ponto de contato com o grampo de



suspensão. Logo, foi preciso projetar um suporte que permite o ajuste horizontal do posicionamento do Proximitor<sup>®</sup>. Como esse sensor fixado através de uma rosca externa própria, não foi necessário adicionar um ajuste vertical para garantir que o cabo oscile dentro da faixa de medição.

Os ajustes no posicionamento correto do Proximitor<sup>®</sup> em relação ao grampo e cabo garantem uma instalação adequada na LTE. Contudo, outra característica importante é a rigidez do suporte, caso contrário a medição lida pelo sensor será comprometida.

A princípio as bases ou suportes foram projetados a partir chapas, perfis estruturais U simples. Foram realizadas simulações com o Software Ansys<sup>®</sup> para analisar o comportamento do suporte quanto ao seu primeiro modo de vibração, que deve ser próximo de 200 Hz (atende vibração para cabo de aço utilizados no para-raios).

Após análises dos resultados das simulações, o perfil estrutural U foi selecionado como base do Proximitor<sup>®</sup> para ser fixada na LTE.

#### 2.5.4 Calibração dos transdutores indutivos

Com o modelo do sensor indutivo de distância definido e o protótipo do suporte confeccionado, o próximo passo foi determinar a curva de calibração do sensor, conforme descrito nas próximas seções.

##### 2.5.4.1 Sensor de deslocamento à laser

O dispositivo laser pode ser utilizado para medir deslocamentos através da distância de onde o equipamento é posicionado até a superfície na qual o feixe de luz intercepta. Na calibração o sensor empregado foi o da marca Polytec<sup>®</sup> cujo controlador era o modelo OFV-5000 e a lente OFV-534. Este laser possui uma acurácia ou exatidão de 5 nm na configuração aplicada ou 40 000 vezes melhor em relação aos 25 µm almejados. Para o ensaio de calibração foi utilizado o equipamento da marca Data Physics, modelo V350.

#### 2.5.4.2 Sistema de condicionamento de sinais e módulos

Foi utilizado um condicionador da National Instruments, que é baseada em uma arquitetura similar a utilizada em PCs, porém, dedicado aquisição e controle. Para a calibração, este sistema estava dedicado em gerar os sinais senoidais para o amplificador do vibrador. O software de controle foi produzido em ambiente LabVIEW®.



Figura 3 – Chassis PXI com os módulos utilizados  
Fonte: O autor.

#### 2.5.4.3 Módulo de aquisição de dados a ser calibrado

Foram calibrados três sensores indutivos BAW004L (BALLUFF, 2016), um para cada fase das torres na LTE. Cada sensor foi calibrado com a fiação definitiva e seus respectivos comprimento. A aquisição dos dados medidos pelos sensores a laser e indutivo de distância foi obtida com o módulo NI 9234 através do condicionador de sinais modelo cDAQ-9188, ambos produzidos pela National Instruments. O módulo escolhido possui quatro canais,  $\pm 5$  V e uma resolução de 24 bit (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016). Desta maneira a calibração foi feita com o mesmo módulo que seria posteriormente instalado na LTE, emulando o ensaio nas condições reais de operação em campo.



Figura 4 – cDAQ 9188 com destaque do módulo NI 9234 à direita  
Fonte: O autor.

#### 2.5.4.4 Descrição da calibração do sensor do vibrógrafo

A partir do teste de calibração realizado, decidiu-se manter a abraçadeira de aço inoxidável na amostra no cabo durante a calibração para viabilizar a captação do sensor indutivo, conforme Figura 5. Também foi determinado que a análise seria concentrada na posição (*offset*) do sensor para uma obter uma matriz de calibração precisa e exata.

A disposição para a calibração é similar ao teste anterior, porém, foi usado o vibrador V 350 que permitiu um controle dinâmico automático de posição (altura da mesa), permitindo assim passos de calibração bem menores.

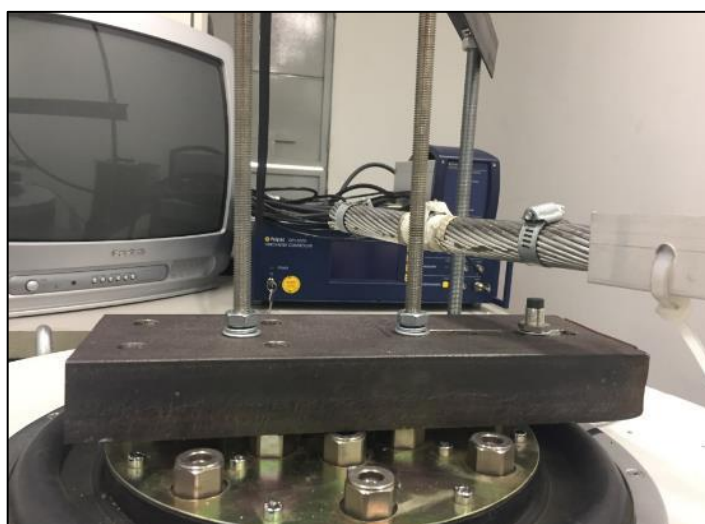


Figura 5 - Disposição do Proximitor® e da amostra de cabo  
Fonte: O autor.

O procedimento da segunda etapa, a calibração, foi semelhante ao da primeira. Contudo, os valores de frequência a serem calibrados foram divididos em onze partes, para uma faixa maior de 10 a 60 Hz. Já a varredura da faixa de medição (posição), na

unidade de tensão dada em Volts, representa a distância média do cabo em relação ao sensor indutivo, sendo o foco da calibração, foi dividida em 100 partes, de 0,2 a 4,8 V. Logo, foram testadas 1100 condições de operação do sensor, contra 90 realizada nos testes.

Diferentemente da primeira etapa, na calibração não foi necessário um operador. Para cada frequência, o programa buscava todas as distâncias médias do Proximitor® em relação ao cabo através do sinal de tensão obtido. Após atingida cada distância desejada, era iniciada a oscilação do vibrador, sendo que a amplitude de vibração continuou sendo controlada por um segundo laço de controle.

#### 2.5.4.5 Resultado

As sensibilidades de cada combinação de posição e frequência são calculadas e plotadas como explicado na fase de testes da calibração. As curvas que compuseram os gráficos são mostradas apêndice C. Como determinado no teste, há uma dependência da sensibilidade em relação a posição (*offset*). Assim se faz necessário usar os dados representados pelos gráficos para compor os polinômios para a obtenção dos valores lidos pelos vibrógrafos no programa utilizado pela LTE.

#### 2.5.5 Projeto dos chassis do vibrógrafo

O projeto do chassis possui o primeiro modo de vibrar em torno de 195 Hz, portanto, acima do que os ensaios de varredura e vibração eólica demandaram (máximo de 55 Hz).

Por fim, em mãos do protótipo construído e calibrado, os três vibrógrafos desenvolvidos foram instalados na LTE, de acordo com recomendado pelo IEEE (TRANSMISSION AND DISTRIBUTION COMMITTEE, 2007) – vide Figura 6.

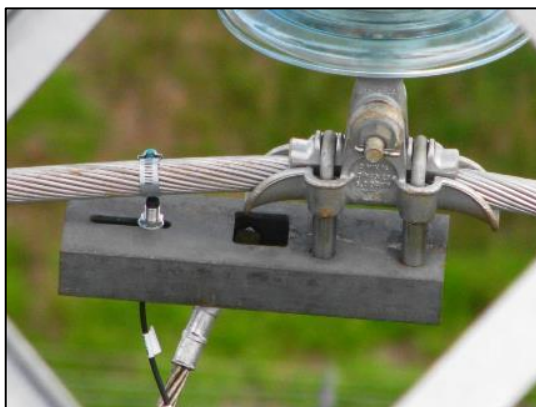


Figura 6 – Detalhe do vibrômetro (à esquerda) e instalação (à direita)  
Fonte: Lactec.

### 2.5.6 Conclusão

Com base nos testes realizados foi possível comprovar que o sensor indutivo de distância pode ser utilizado para as diversas combinações de frequência de oscilação do vibrador e da distância média (posição ou *offset*) do cabo em relação ao Proximitor<sup>®</sup>. O sensor mostrou pequena variação em relação a frequência e uma sensível dependência em relação à distância do Proximitor<sup>®</sup> ao cabo (*offset*). Portanto, o programa desenvolvido contém um polinômio para cada distância em relação à abraçadeira instalada no condutor. Essa seleção é realizada dinamicamente, isto é, para cada vetor adquirido de dados, são calculados os polinômios em tempo real para cada faixa relativa à posição do cabo em relação ao sensor.

A solução encontrada para o vibrômetro se mostrou simples e eficiente, permitindo comunicação em tempo real das três fases da LTE. A capacidade de memória é limitada ao do computador instalado no container, portanto, excede em muito aos oferecidos pelo mercado. Como a LTE pode ser acessada remotamente, os arquivos podem ser transportados via rede de dados, permitindo otimizar ao máximo o aproveitamento dos equipamentos instalados.

## 2.6 SISTEMA DE EXCITAÇÃO ELETRODINÂMICO

O desenvolvimento de um sistema de excitação mecânica para os condutores da LTE, assim como a utilização de vibradores eletrodinâmicos em bancadas de

testes de cabos, tem como função de vibrar os cabos condutores e seus respectivos acessórios.

Esse sistema é composto por três equipamentos, instalados diretamente na mísula da torre 1 da LTE. Tais dispositivos permitem ensaios vibracionais de cada uma das três fases, individualmente. A seguir são apresentados detalhes das partes componentes dos equipamentos.

### 2.6.1 Descrição das partes que compõe o sistema de excitação eletrodinâmico

Cada um dos três sistemas de excitação mecânica instalados nos braços (mísulas) LTE possuem as seguintes partes, conforme mostram as Figura 7.

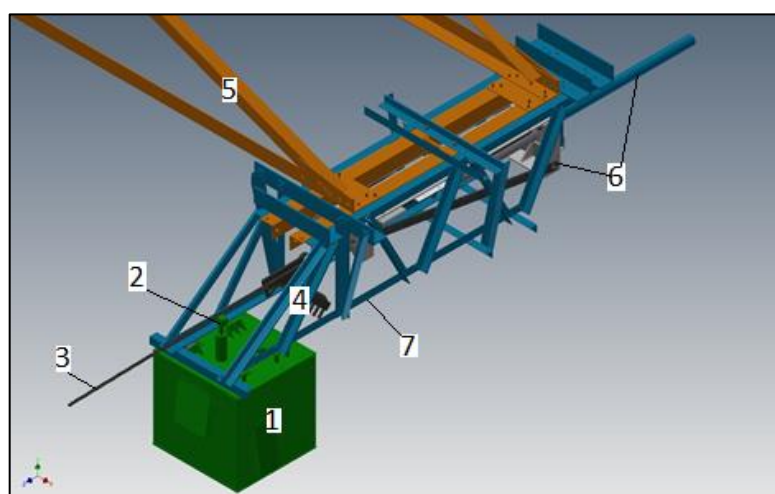


Figura 7 – Partes que compõe o sistema de vibração – visualização isométrica  
Fonte: Lactec.

A seguir a descrição das partes macro do conjunto:

1) - sistema de excitação mecânico (vibrador): possui a função de gerar a vibração mecânica no cabo condutor com frequência variando entre 0,5 e 100 Hz, e amplitude máxima pico a pico de 12,7 mm;

2) – conector êmbolo cabo: conexão mecânica entre o êmbolo do vibrador e o cabo condutor;

3) – cabo condutor: amostra a ser ensaiada na LTE, possui comprimento de 410 m;

4) – chassi do vibrador: permite que o sistema seja preso na mísula da torre;

5) – mísula (braço da torre): sustentação do cabo condutor e acessório. Na LTE possui também a função de sustentação do sistema de tração e vibração;

6) – sistema de tração: possui a função de variar a tração do cabo em um comprimento de até 700 mm de curso. Tem a capacidade de tração de até 4000 kgf (4 tf), com fator de segurança de 2,6 (vide seção 2.7);

7) – guias para o deslocamento radial do vibrador: permite que o sistema de vibração se desloque junto com a amostra de cabo, oferecendo pouca resistência ao deslocamento da massa do equipamento.

### 2.6.2 Partes internas que compõe o sistema de excitação mecânica

A Figura 8 mostra as partes que compõe o vibrador com as suas respectivas funções:

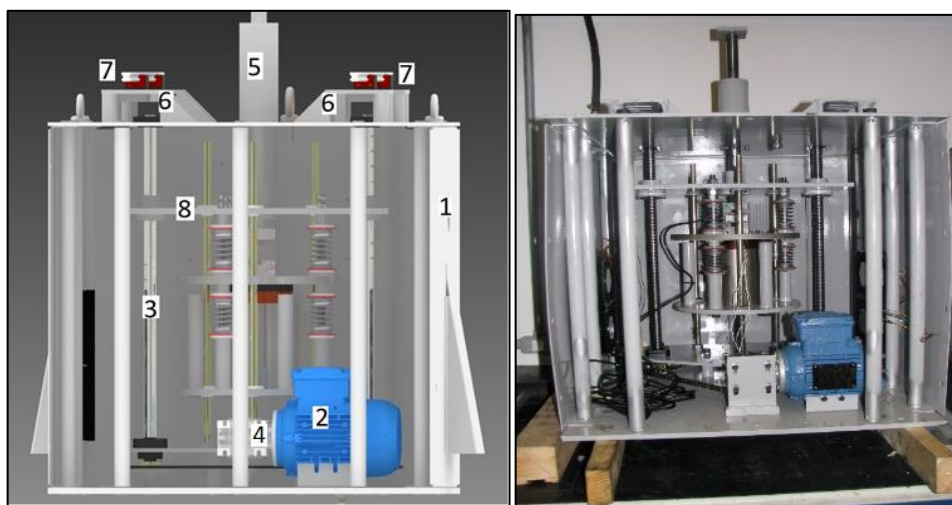


Figura 8 – Partes do sistema de excitação eletromecânica  
Fonte: Lactec.

- 1) caixa de proteção;
- 2) motor elétrico;
- 3) eixo – parafuso de potência;
- 4) redutor rosca sem fim;
- 5) guia linear rolamentada;
- 6) suporte do sistema de vibração;
- 7) carros com rolamentos recirculantes;
- 8) chapa intermediária.

A Figura 9 apresenta as partes principais do vibrador:

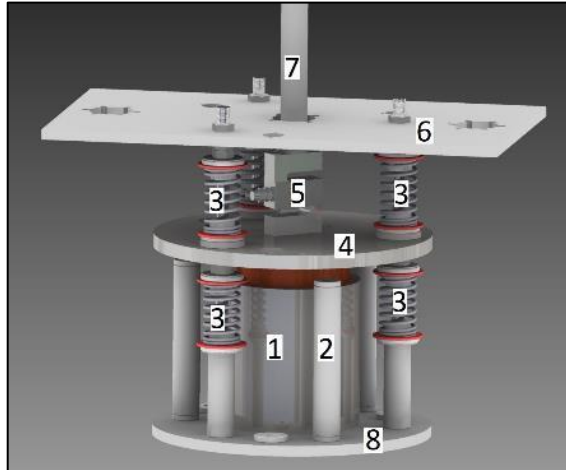


Figura 9 – Partes móveis do sistema de excitação eletromecânica  
Fonte: Lactec.

- 1) atuador eletromagnético (*voice coil*);
- 2) batente;
- 3) mola equalizadora;
- 4) mesa vibradora;
- 5) célula de carga modelo z;
- 6) chapa intermediária;
- 7) êmbolo;
- 8) chapa inferior.

### 2.6.3 Elementos que compõem o sistema de excitação eletrodinâmico

Dentre os componentes do equipamento, aquele que possui papel fundamental em seu funcionamento é o *Voice Coil*, um atuador eletrodinâmico, classificado como *Cylindrical Frameless Linear Voice Coil Actuator (CFLVCA)*. Tal componente é constituído de espiras de cobre imersas em um campo magnético formado por ímã de neodímio-ferro-boro ( $Nd_2Fe_{14}B$ ) ou simplesmente ímã de neodímio ou ímã de terras raras. O componente é apresentado na Figura 10, cujas características mecânicas e eletromagnéticas são apresentadas na Tabela 1.





Figura 10 – Voice Coil Actuator da BEI Kimco magnetics  
Fonte: O autor.

Tabela 1 – Características mecânicas e eletromagnéticas do Voice Coil Actuator. Fonte: BEI Kimco magnetics.

DADOS ATUADOR ELETROMAGNÉTICO	
Força pico	1.823,8 N
Força contínua	505,5 N
Potência ( $I^2R$ )	994 W
Amplitude p-p	12,7 mm
Massa do núcleo	1,45 kg

Fonte: BEI Kimco magnetics

O comportamento dinâmico do atuador apresenta maior sensibilidade quando o mesmo se encontra na metade do curso total de deslocamento, ou seja, à 12,7 mm ( $\frac{1}{2}$ " ) a partir das extremidades, posição a qual o dispositivo estará em repouso com o excitador completamente montado, devido ao sistema de molas que mantem a parte móvel suspensa.

Devido a variação da tração dos cabos condutores durante os ensaios, o eixo ou êmbolo do vibrador está sujeito à deslocamentos axial e radial, pois é solidário ao carro do sistema de tracionamento, que se desloca para obter-se a tração desejada. Para ser possível o movimento longitudinal ao cabo, o vibrador é fixado à estrutura da mísula através de quatro carros e guias lineares.

Além do sistema de guias lineares para a movimentação longitudinal, em relação ao cabo, também existe o sistema de ajuste de altura do conjunto. Tal sistema foi construído para permitir a regulação em função da flecha ou catenária do cabo, no ponto de ancoragem. Esse sistema eletromecânico é composto por um conjunto motorreductor e um par de fusos de esferas. Tal conjunto de motorreductor será

acionado através de um inversor de frequência para possibilitar o controle da velocidade de rotação do mesmo, permitindo um ajuste fino quanto ao posicionamento vertical.

O atuador é alimentado por um amplificador de áudio. A potência máxima fornecida ao atuador é de até  $1300 W_{rms}$ , valor acima do consumo máximo do atuador, que é cerca de  $1.000 W$  pico.

Para o correto funcionamento e alinhamento do conjunto, foram projetadas guias lineares internas ao conjunto para evitar o desalinhamento e o contato entre as espiras de cobre do atuador (parte móvel) e a pista interna (parte fixa). Esses sistemas são compostos por buchas de esferas e mancais de rolamentos, evitando desgaste excessivo das partes móveis e reduzindo o atrito e consequente força de acionamento.

Para o fechamento do conjunto mecânico, foi projetada uma proteção externa de chapas de aço com tratamento superficial para suportar as intempéries do ambiente externa. Tais chapas de proteção possuem alguns recortes para permitir a ventilação com conjunto eletrodinâmico de vibração.

#### 2.6.4 Testes preliminares do sistema de excitação em bancada de testes

A presente seção tem por objetivo apresentar os testes realizados com os três vibradores desenvolvidos. Nestes testes foi montada apenas a estrutura básica do conjunto excitador, já que o objetivo foi testar apenas o comportamento dinâmico do conjunto. No capítulo 3 são apresentados novos testes com os equipamentos, porém, com todos os sistemas da LTE pré-montados juntamente com os vibradores em um estágio mais avançado onde contempla o sistema de controle e aquisição em estágio final de desenvolvimento.

##### 2.6.4.1 Testes do atuador eletrodinâmico

A parte do vibrador que gera a excitação foi montado e fixado em uma bancada para a realização dos testes. Neste sistema estão as guias para assegurar o movimento vertical do atuador, mantendo assim a integridade da peça. Foi instalado um acelerômetro na mesa do equipamento, com o objetivo de medir o deslocamento

deste, sendo que esta informação foi utilizada para desenvolver uma malha fechada de controle, que é apresentada mais adiante. O acelerômetro utilizado é com sensor piezoelétrico, com capacidade de  $\pm 50$  g e faixa de operação de frequência de 0,27 a 10 000 Hz  $\pm 3$  dB (PCB PIEZOTRONICS, 2016).- vide Figura 11.



Figura 11 - Atuador eletrodinâmico preso a mesa de testes. À direita detalhe do acelerômetro instalado na mesa de vibração  
Fonte: Lactec.

#### 2.6.4.2 Testes do atuador eletrodinâmico em malha fechada

Foi desenvolvido um programa para avaliar o comportamento do vibrador desenvolvido. Para este intuito, foi desenvolvido um programa em LabVIEW® para excitação vibracional em malha aberta e fechada.

No primeiro teste foi desenvolvido um programa para a geração de sinais para o atuador e também medição dos sinais de tensão e aceleração. Neste programa é definida a amplitude, em Volts, e frequência do sinal gerado em malha aberta.

No segundo teste, um outro programa foi desenvolvido para realizar o controle da amplitude (em mm) do atuador em malha fechada. Neste programa foi utilizado um controlador do tipo PI (proporcional + integral). Nos testes realizados foi determinado ganhos para o controlador PI que o fizessem funcionar em uma faixa de frequências de 10 a 50 Hz.

Foi utilizado o chassi NI cDAQ 9178, da National Instruments, para o condicionamento dos módulos de aquisição e geração dos sinais para a realização dos testes nos três vibradores. Para a geração dos sinais harmônicos foi utilizado o módulo NI 9263 ( $\pm 10$  V – 16 bits). A leitura do sinal do acelerômetro foi usada o

módulo NI 9234 ( $\pm 5$  V – 24 bits). As medidas de tensões do sinal de entrada e saída do amplificador foi adquirido pelo módulo NI 9215 ( $\pm 10$  V – 16 bits).

#### 2.6.5 Instalação do sistema de vibração na torre 1

Após os testes preliminares, foram realizadas as ligações elétricas definitivas do conjunto do excitador eletrodinâmico, assim como a vedação do conjunto. Em conjunto com a instalação mecânica e elétrica definitiva dos componentes, fechamento e isolamento da carcaça externa, instalação do suporte, foram realizados testes em amostras de cabos de mesma bitola aos instalados na LTE. O objetivo é a verificar as respostas dos transdutores, como: células de carga, acelerômetros e testes de excitação vibracional em malha fechada. Foram instalados o cabeamento para sinal de controle do atuador eletrodinâmico, leitura da célula de carga, controle do motor para ajuste de altura, leitura do acelerômetro e fins de curso.

Os testes dos vibradores foram iniciados com a verificação da movimentação das hastes, atuando diretamente pelo inversor de frequência e, ao mesmo tempo, verificando os acionamentos dos fins de curso. Após essa análise, foram realizados os testes de movimentação com acionamento remoto, ou seja, através do monitor do programa destinado à LTE.

Após os testes de movimentação, as hastes que transmitem o movimento oscilatório do sistema ao cabo foram efetivamente conectadas, e todos os sistemas foram testados para averiguar seu funcionamento (Figura 12). Dessa forma, os três conjuntos de excitação foram submetidos à testes de funcionalidade completos, sendo analisadas cada não conformidade.



Figura 12 – Testes realizados em bancada com o vibrador contendo todos os seus componentes  
Fonte: O autor.

Após a conclusão de todos os testes, os excitadores foram transportados para o local da LTE e instalados na torre 1, conforme mostra a Figura 13



Figura 13 - Instalação dos vibradores nas três fases da LTE  
Fonte: O autor.

## 2.7 SISTEMA DE TRAÇÃO DOS CONDUTORES DA LTE

O sistema de tração foi construído para permitir a variação da tração nos três cabos condutores, proporcionando a análise do comportamento vibracional dos cabos para diferentes trações. Ele foi projetado para ser instalado em cada um dos pontos de ancoragem dos cabos na torre 1 (apêndices A e D – Projeto do Sistema de Tração).

Todos os três sistemas de tração foram instalados nas mísulas da torre 1. Eles são iguais em relação aos componentes e a capacidade de carregamento, porém um

deles foi adaptado para a fase superior, pois esta pede uma forma de fixação diferenciada diretamente no corpo da torre.

Para que o projeto do equipamento fosse iniciado, foi realizada uma análise detalhada no projeto da torre de ancoragem, assim foi possível pensar na melhor forma de aplicar tração nos três cabos de alta tensão, e também de como acoplá-los à torre. A análise estrutural para a ancoragem dos sistemas de tração se encontra também no apêndice D.

### 2.7.1 Projeto do sistema de tração

Através do software Tower® foram analisadas as hipóteses de carregamento devido as excentricidades dos sistemas de tração adicionados na torre 1 (PDF 60), conforme mostra a Figura 14:

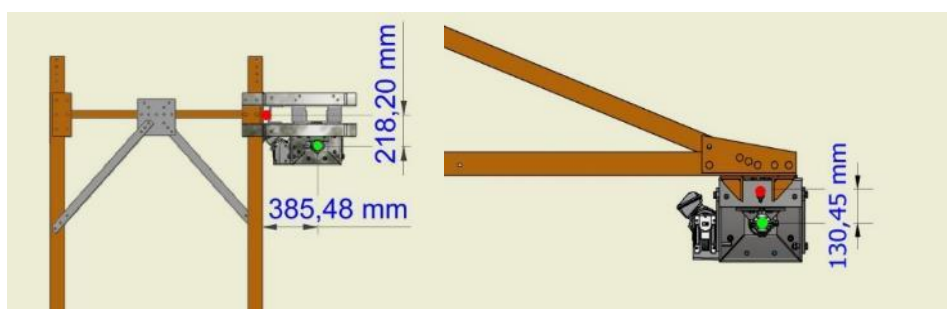


Figura 14. Dois tipos de excentricidades geradas nos pontos de fixação  
Fonte: Lactec.

Para dar início à concepção do projeto do sistema de tração, foi realizado um levantamento de requisitos, como segue:

- tracionar os cabos de alta tensão para um carregamento entre 1500 a 4000 kgf (4 tf);
- velocidade baixa para o deslocamento do sistema, em torno de 2,5 mm/s;
- comando para movimentação do sistema deve ser executado remotamente;
- instalação elétrica trifásica de 220 V;
- proteção do sistema para desligá-lo, quando alcançar um determinado limite de deslocamento;
- posicionamento do ponto de ancoragem do cabo no sistema de tração;
- proteção do sistema contra chuva e poeira;

h) medição da carga aplicada ao cabo condutor.

Para tracionar o cabo, foi utilizado um macaco mecânico de fuso e rosca sem fim. O comando remoto, para o acionamento do macaco mecânico, será realizado com a utilização de motorreductor e inversores de frequência, os quais foram especificados com a capacidade de carregamento e velocidade de deslocamento requeridos (apêndice D). O limite crítico de deslocamento foi obtido a partir da utilização de chaves de fim de curso, e o posicionamento do ponto de ancoragem através de um transdutor de posição linear.

### 2.7.2 Guia linear

Como o macaco mecânico suporta carregamento radial muito pequeno, foi necessário utilizar uma ferramenta que suporte a força devido ao peso do cabo e do vento. Para isso, a solução encontrada foi utilizar uma guia linear de esferas, pois este equipamento permite o deslocamento do carro do sistema de tração, suportando as forças nas direções perpendiculares ao deslocamento.

### 2.7.3 Transdutor de posição linear

Um transdutor de posição linear (Figura 15) é utilizado para determinar a posição do carro do sistema de tração. Para o projeto, foi selecionado um transdutor do tipo por fio e que utiliza com elemento ativo um potenciômetro. A escolha deste transdutor foi realizada pois apresenta precisão suficiente para a aplicação no sistema de tração.

A Tabela 2, apresenta a especificação do transdutor de posição linear.



Tabela 2 - Especificação do transdutor de posição linear

FABRICANTE	UNIMEASURE
Modelo	JX-PA-40-N12-14S-32N
Tipo do sensor	Potenciômetro
Faixa de medição	40" ou 1000 mm
Grau de proteção	IP65
Máxima excitação de voltagem	10 000 mV

Fonte: UniMeasure



Figura 15 - Transdutor de posição linear utilizado no projeto.

Fonte: O autor.

#### 2.7.4 Célula de carga para medição da tração nos condutores

Uma célula de carga é utilizada para fornecer o valor do carregamento na qual o cabo condutor é submetido. Como durante a aplicação da carga no cabo tem-se uma componente de torção, a célula de carga foi especificada para suportá-la, sem a inserção de erros durante o processo. O modelo encontrado foi a célula de carga axial, conforme a Figura 16 a seguir.

Tabela 3 - Especificação da célula de carga

Capacidade máxima	5 tf
Limite de carga de segurança	150% da cap. nominal
Sobrecarga de ruptura	300% da cap. nominal

Fonte: Berman load cell

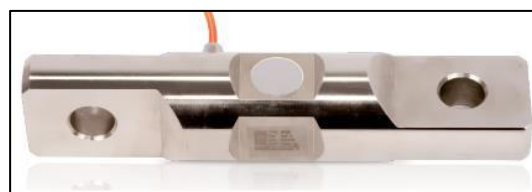


Figura 16 - Célula de carga utilizado para medir à tração nos cabos da LTE

Fonte: Bermam Load Cells.

Devido à indisponibilidade do produto e considerável tempo para fabricação deste modelo, foram adquiridas três unidades com a capacidade para 5 tf. Na Tabela 3 é apresentada a especificação para as células de carga.

#### 2.7.5 Montagem e testes

Após a etapa do projeto da parte mecânica do sistema de tração, iniciou-se a etapa de montagem do primeiro sistema para a realização de testes. As Figura 17 mostram os detalhes da montagem do equipamento com a posição dos seus componentes.



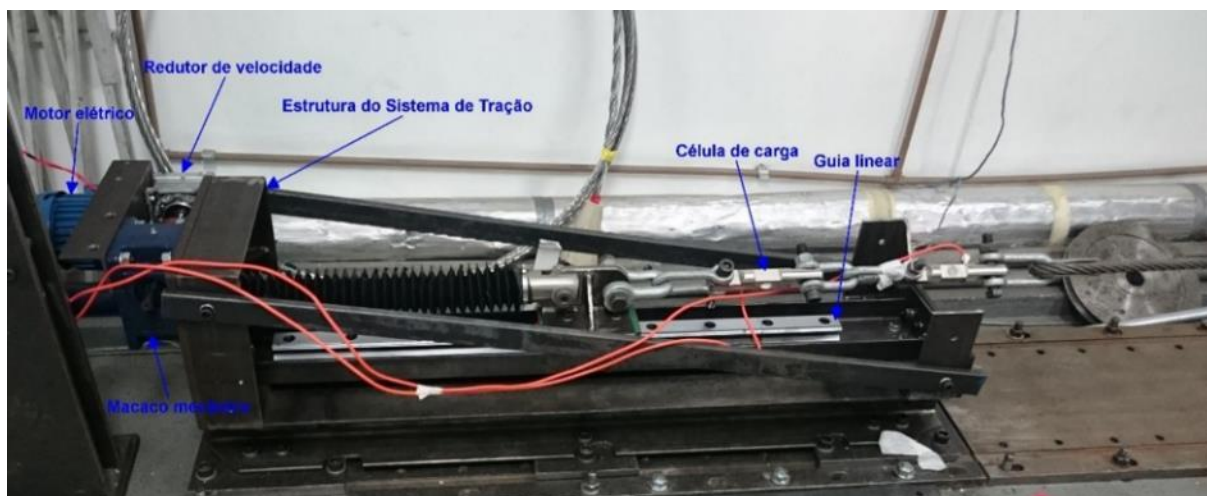


Figura 17 - montagem do primeiro sistema de tração  
Fonte: O autor.

Como os testes foram realizados na bancada de cabos dos Lactec, essa montagem inicial foi realizada sem os itens de proteção (chave fim de curso e transdutor de posição linear) porque os testes eram apenas para avaliar a parte estrutural do projeto.

Para a fixação do sistema de tração na bancada, foi construído um dispositivo que tivesse a mesma forma de fixação da mísula, Figura 18, composta por chapas de aço e cantoneiras. Para o teste, foi utilizado um cabo de aço com 22 mm de diâmetro e este ancorado em uma base de concreto da bancada de cabos.

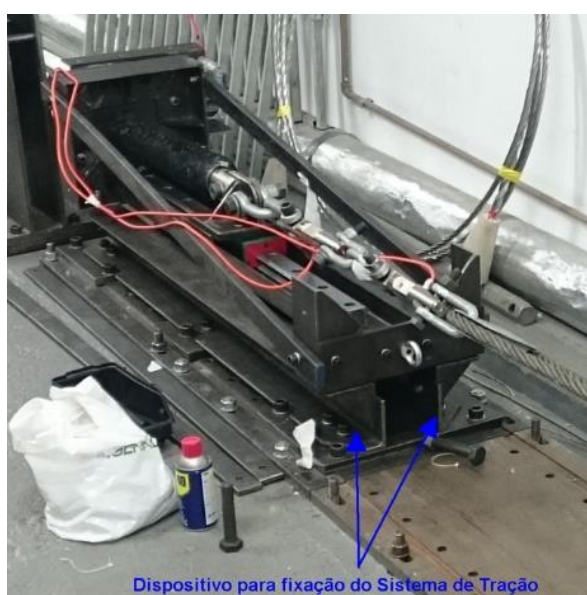


Figura 18 - Fixação do sistema de tração na bancada  
Fonte: O autor.

Inicialmente, o sistema de tração foi testado com as células de carga com capacidade para 5 tf. O teste consistiu em aplicar cargas variando de 1 em 1 tf até completar 5 tf, mantendo-se por um período de aproximadamente 5 min cada patamar de carregamento e ao mesmo tempo avaliando a integridade da estrutura do sistema.

Após este teste, o sistema foi tracionado com 4 tf e mantida a carga por aproximadamente 14 h. No final deste período, ele apresentava uma carga de 3,6 tf e estável nesse valor. Analisando toda a montagem da bancada, pode se verificar que houve apenas acomodação do conjunto do cabo de aço e grampos de fixação do laço, na ancoragem da base de concreto. Com o resultado dos testes, permitiu-se a pré-montagem dos outros dois sistemas de tração.

#### 2.7.6 Instalação dos sistemas na torre

Os outros dois sistemas de tração foram montados e testados com trações de 5 tf. Aprovados, os três sistemas de tração foram enviados para a LTE e fixados nas mísulas (braços da torre) em terra, Figura 19. A checagem da montagem e dos parafusos foi realizada antes da fixação.



Figura 19 –Fixação do sistema de tração nas mísulas (braços da torre)

Fonte: O autor.

### 3 MONTAGEM E AJUSTES DOS SISTEMAS NA LTE

Para realização dos testes de todos os sistemas e do programa LTE, com exceção da tração e posição, antes da instalação definitiva na LTE, foi construída uma bancada móvel de testes a partir de um par de cavaletes produzidos com perfis estruturais, para suportar uma RMC de 2500 kgf (2,5 tf).

Foi utilizado um pedaço de 6 m de cabo condutor (CAA 795 kcmil – Tern) para que os testes fossem realizados. As extremidades do cabo foram presas em terminais passantes e estes eram presos através de tensionadores com capacidade de tração de até 3 tf. Nele foram instalados: termopares, acelerômetros, célula de carga (medir a tração do cabo), os excitadores mecânicos e o Proximito<sup>®</sup> (sensor do vibrógrafo), conforme Figura 20.



Figura 20. Instalação dos sistemas desenvolvidos para a LTE  
Fonte: O autor.

#### 3.1 SISTEMA DE EXCITAÇÃO ELETRODINÂMICO

Na seção 2.6.4 foram descritos os testes realizados nas partes dos excitadores como o atuador eletrodinâmico, amplificador de potência chaveado e o programa. Agora com os vibradores montados, além das funcionalidades testadas no laboratório LECA, foi testado o ajuste de altura do atuador, variando verticalmente a posição do cabo condutor testado, permitindo aliviar a compressão ou tração na célula de carga ligada a conexão do êmbolo dos excitadores.

### 3.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TRAÇÃO E VIBRAÇÃO

As células de carga e o acelerômetro foram instalados e testados juntamente com o software e hardware do sistema de acionamento. Foi realizada uma varredura em diversas frequências e amplitudes de forma a verificar a vibração das partes internas do sistema de excitação. Foi realizado um teste de “*burn-in*”, no intuito de se verificar a resistência da integridade do conjunto testado.

Quanto ao desenvolvimento do programa para os três sistemas de tração, inicialmente, como auxiliar no desenvolvimento e testes do controle de tração dos cabos, foi criado e implementado, em LabVIEW®, um modelo lógico-matemático. A Figura 21, apresenta o diagrama da montagem dos módulos para o teste do programa de controle do sistema de tração no banco de testes temporário, a interação entre eles e as variáveis que entram e saem de cada módulo.

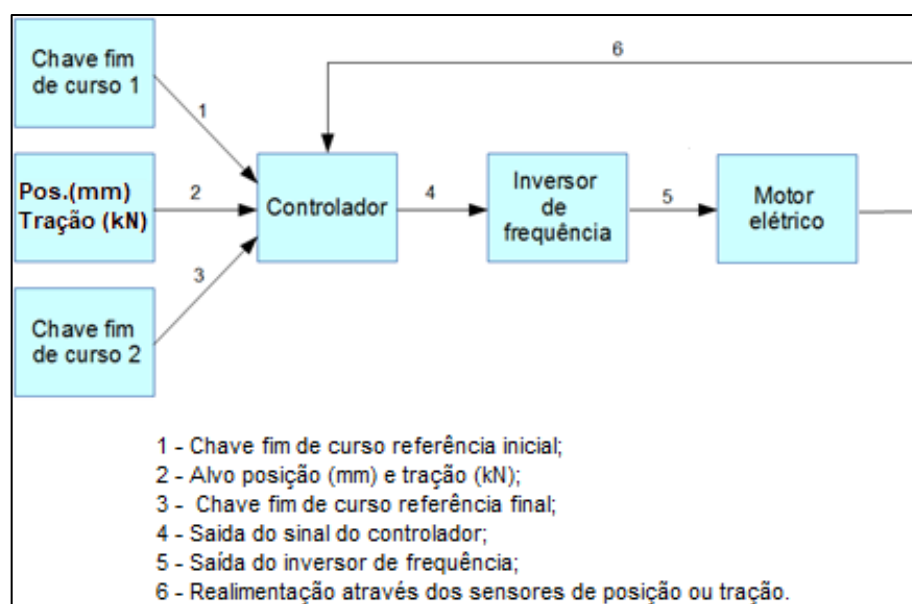


Figura 21. Fluxograma do controle do sistema de tração  
 Fonte: O autor.

Para os testes práticos do sistema, foi utilizado um banco de teste, contendo inversor de frequência, um motor elétrico de indução, chaves do tipo fim de curso, célula de carga para aplicação.

Com a cablagem pronta e conectada nas caixas de proteção, as três células de carga foram calibradas em uma bancada de teste hidráulica. Foi utilizado uma célula de carga padrão com 0,03% de erro de fundo de escala, da marca HBM, modelo

U10M, com capacidade de 30 kN. As três células de carga foram testadas com trações de 0 a 30 kN, em passo de 5 em 5 kN, perfazendo três ciclos de carregamento cada. Para os dois transdutores de força do para-raios, as trações utilizadas foram de 0 a 20 kN, com passo de 4 em 4 kN, também com três ciclos de carga e descarga. A Figura 22, mostra o equipamento utilizado para a calibração das cinco células de carga.

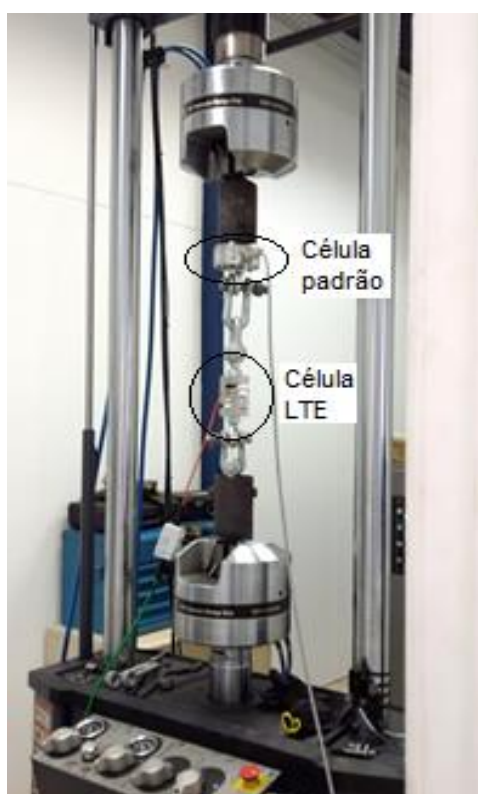


Figura 22. Montagem da calibração das células de carga  
Fonte: O autor.

### 3.3 VIBRÓGRAFOS

Os Proximitors<sup>®</sup>, sensores que compõe os vibrógrafos, como já haviam sidos testados e calibrados de forma individual anteriormente em outro laboratório (vide seção 2.5.4), foram reunidos com o restante dos sensores de outros sistemas (termopares, acelerômetros e etc.) a fim de testar todo o conjunto.

Quanto a calibração dos transdutores de fio, cada sistema de tração possui um medidor para o deslocamento de translação do carro de tracionamento. Esses transdutores vieram calibrados de fábrica e foram aferidos com uma trena calibrada, para checagem do funcionamento do conjunto transdutor, sistema de aquisição e

programa. A capacidade do transdutor é de até um metro, atendendo com folga de 250 mm o curso máximo do sistema, que é de 750 mm.

### **3.4 MONTAGENS E TESTES DOS SISTEMAS NA LTE**

Neste capítulo é abordado o procedimento de montagem, teste e aferição dos principais sistemas que compõe a LTE. Na sequência é descrito suscintamente o procedimento adotado para os sistemas de tração, vibração, vibrógrafo e sensores como termopares e acelerômetros.

#### **3.4.1 Condicionamento dos cabos entre o painel 1 e o alto da torre 1**

Na torre 1 se encontra o contêiner e o painel 1, onde ficam a maioria dos equipamentos de acionamento (amplificadores), condicionadores de sinais, a controladora mestre (cRIO 9035), proteções e etc.

#### **3.4.2 Sistema de tração dos condutores**

No sistema de tração foram aferidos os seguintes itens:

- a) teste de deslocamento do carro de tração: o deslocamento dos carros foi testado inicialmente de forma manual e diretamente no painel do inversor;
- b) fins de curso físico: com os carros se movimentando, foi possível acertar os fins de curso físico, na qual possuem a finalidade de evitar que os carros extrapolem os limites superiores e inferiores.;
- c) transdutores de fio: o deslocamento dos carros dos tracionadores são medidos com o uso de transdutores de fio (vide seção 2.7.3). Além de medir a posição dos carros, eles impedem que os fins de cursos físicos sejam acionados;
- d) fins de curso lógicos: de forma programática, os carros ficam impedidos de se deslocarem quando ficam fora de uma faixa predeterminada. Portanto, o movimento é testado, dentro da faixa de deslocamento entre 10 a 700 mm;
- e) teste com o programa LTE: existem duas formas para o deslocamento do carro de tração. manual e automática. Na modalidade manual, os cabos

condutores têm as suas trações alteradas através dos botões tracionar e soltar. Quando os botões mencionados deixam de ser acionados na tela do supervisor, o carro tem que ficar imóvel em um período de 1 s, no máximo, seja tracionando ou soltando o condutor;

- f) modo automático, neste modo existem duas formas de se controlar os carros de tração: por valor de posição ou tração. Na posição, o alvo é um valor entre 10 e 700 ( $\pm 1$  mm). Quando o valor é por tração (em kN), o valor de ficar  $\pm 0,05$  kN (50 N) da meta preestabelecida. A faixa de tração vai de 10 até 40 kN.

### 3.4.3 Sistema de excitação eletrodinâmico

Quanto aos excitadores, foram checados os seguintes itens:

- a) chaves de fim de cursos dos vibradores: para limitar o curso da regulagem da altura dos êmbolos, internamente o vibrador possui dois fins de cursos: inferior e superior. Na sequência eles são acionados através do corpo do mecanismo onde o atuador é preso. Assim que as chaves são acionadas, o deslocamento deve cessar imediatamente, avisando o operador com um indicar visual;
- b) deslocamento do vibrador nas guias: sob a torre, o vibrador deve correr todo o curso, quando empurrado com as mãos, com baixa resistência, em torno de 30 N. Tudo certo, o carro é acoplado ao sistema de tração. com o vibrador acoplado no sistema de tração, o sistema de tração é deslocado do início ao fim da faixa a fim de verificar se existem problemas de interferência mecânica entre as ferragens, cablagem, resistência ao deslocamento ou outro qualquer que venha causar algum dano;
- c) programa LTE: assim como no sistema de tração, existem duas formas para o deslocamento do êmbolo de vibração. manual e automática. Na modalidade manual, o êmbolo tem a sua posição alterada através dos botões tracionar e soltar. A posição ideal é aquela em que a célula de carga ligada ao êmbolo marca próximo de zero ( $\pm 5$  N). No modo automático, se estabelece o valor alvo é próximo de zero. Quando o valor do êmbolo supera



o valor de  $\pm 40$  N (negativo compressão e o contrário tração), o sistema é acionado automaticamente, e irá zerar a célula de carga e assim desligar o sistema.

#### 3.4.4 Vibrógrafos

Para os vibrógrafos, as ações para colocá-los em funcionamento foram as seguintes:

- a) instalação da cablagem no sistema de vibração: Os cabos foram passados para dentro da caixa onde se encontra o módulo condicionador de sinal alojado no chassi;
- b) ajuste horizontal do sensor Proximito<sup>®</sup>: a distância longitudinal dos sensores não contato deve ser de 88,9 mm a partir do último contato do cabo com o terminal de suspensão, conforme a norma IEEE 1368/2006 (IEEE PES, 2007);
- c) ajuste vertical do sensor: esse ajuste é possível pois parte do corpo do sensor possui roscas que permitem a regulação de aproximação adequada em relação ao primeiro contato do cabo condutor no grampo de suspensão. Como o curso de funcionamento do Proximito<sup>®</sup> é na faixa de 200 a 7000  $\mu\text{m}$ , foi escolhido regulação em torno do meio do curso do sensor. Tanto o ajuste longitudinal como o vertical foram realizados com o auxílio de um gabarito;
- d) programa LTE: o programa contém o indicador gráfico da leitura dos três sensores Proximitors<sup>®</sup>, onde pode-se verificar a qualidade dos sinais adquiridos. Os sinais devem, entre outros indicadores de qualidade, estar livres de ruídos, interrupções na aquisição e saturação no nível de leitura.

#### 3.4.5 Acelerômetros

Foram instalados seis acelerômetros nos condutores da LTE, sendo dois sensores para cada um dos cabos condutores, conforme descrito a seguir:



- a) montagem dos acelerômetros nos três cabos condutores: esses suportes possuem a função de fixar os acelerômetros nos cabos condutores. Para a instalação da cablagem, foram utilizados os cabos para-raios como suporte da cablagem e assim eles descem direto nos cabos condutores;
- b) instalação dos acelerômetros nos cabos condutores: antes de subir toda a cablagem foi montado um chicote, em solo, para facilitar a fixação do cabeamento no para-raios. (vide Figura 23);



Figura 23. Instalação dos acelerômetros nos cabos condutores  
Fonte: O autor.

- c) programa LTE: o programa contém o indicador gráfico da leitura dos seis acelerômetros, onde pode-se verificar a qualidade dos sinais adquiridos.

#### 3.4.6 Anemômetros

Foram instalados dois anemômetros, um para cada estrutura que compõe o vão experimental de 270 m (torres 1 e 2). Nestes equipamentos foram conferidos os seguintes itens:

- a) montagem do suporte dos anemômetros: esses suportes possuem a função de fixar os anemômetros na torre. Para isso eles foram montados a uma distância de 1,5 m longitudinalmente a LTE (vide Figura 24), minimizando a turbulência gerada pela interferência da ferragem das torres;

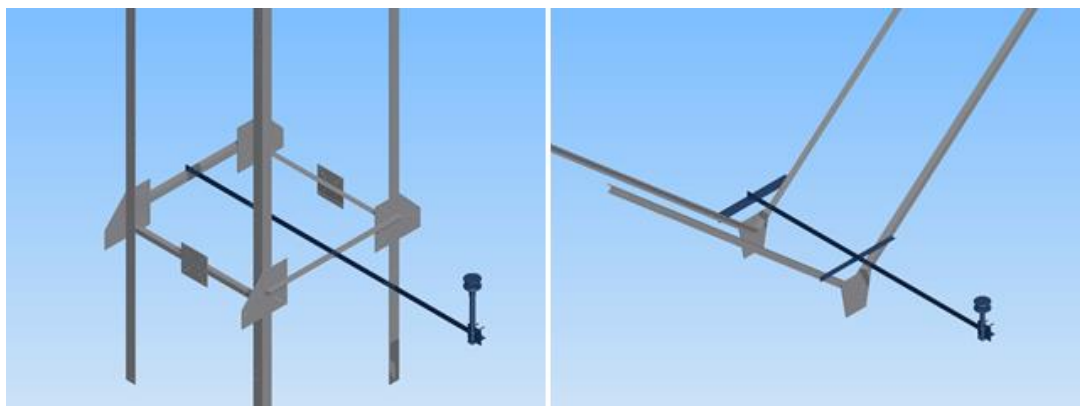


Figura 24. Desenhos esquemáticos da instalação dos anemômetros instalados na torre 1 e 2  
Fonte: O autor.

- a) instalação da cablagem dos anemômetros: o alcance máximo do cabo serial RS-232 dos anemômetros é de no máximo 6,5 m. Na torre 2, como o painel fica próximo do sensor, o comprimento da cablagem é inferior ao comprimento mencionado. No caso da torre 1, foi utilizado um conversor RS-232 para RS-485;
- b) leitura dos dados no supervisório: após toda a instalação pronta, os indicadores de direção e intensidade dos ventos são conferidos na tela do programa.

#### 3.4.7 Termopares

Foram instalados cinco termopares tipo T na linha experimental, três deles utilizados para o monitoramento da temperatura dos três cabos condutores. A seguir o procedimento utilizado para a instalação e calibração desses transdutores;

- a) montagem da extensão e com termopares: os três termopares que equiparam os pedaços de condutores, possuem comprimento de 32 m. Esses cabos são envolvidos são blindados e trançados par a par para atenuação do ruído;
- b) calibração dos termopares: antes de serem levados para o alto da torre, os termopares foram calibrados, conforme certificado CCL 025/17 (VARGAS, 2016). A incerteza após a calibração é de  $\pm 0,13^{\circ} \text{C}$ ;
- c) montagem de três suportes com pedaço de cabos: esses suportes possuem a função de fixar segmentos de cada tipo de cabo condutor e são posicionados paralelamente e próximos a eles. (vide Figura 25).



Figura 25. Peça de cabo condutor instrumentado com termopar tipo T  
Fonte: O autor.

## **4 PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA A LTE**

A LTE compreende um sistema computacional, cujo objetivo é realizar o monitoramento e controle da linha e também de fornecer uma interface com o usuário a partir da qual seja possível realizar os diferentes tipos de ensaio previstos no projeto. Para dar base para o entendimento do funcionamento da aquisição e controle do programa construído para a LTE, neste capítulo são descritos os processos, modalidade de ensaios, características e funcionalidades do sistema como um todo.

### **4.1 PROCESSOS DA LTE**

Nesta seção são abordados os detalhes do funcionamento de cada um dos sistemas de forma resumida. Parte das informações abordadas são compilações das informações contidas nos capítulos anteriores, com a finalidade de se obter uma melhor compreensão do todo.

#### **4.1.1 Monitoramento dos esforços nos pés da torre**

O objetivo desta medição é de determinar os esforços nas fundações através de solicitações impostas devido aos esforços a que a torre é submetida, quando se alteram os valores de carga nos cabos condutores, incidência de vento e vibrações. Cada cabo condutor e cabo para-raios tem uma célula de carga, sendo que os três condutores têm células de carga com capacidade de 5 tf, e os dois cabos de cobertura com capacidade de 2 tf cada.

O processo consiste na aquisição dos sinais das cinco células de carga ligadas nos cabos condutores e cabos de cobertura simultaneamente aos extensômetros colados aos montantes dos pés da estrutura. Os dados fornecidos pelos extensômetros permitem o cálculo dos valores de tração, compressão e flexão transmitidas para as fundações de cada um dos quatro pés da torre. A taxa de aquisição para a medição da tração utilizada é de 2 Hz, enquanto que a aquisição dos extensômetros é de até 50 Hz, ambos com tratamento dos dados em tempo real. Para este trabalho não são realizados testes para a aplicação deste sistema.

As taxas de aquisições adotadas para a tração foi para que se tenha bom controle de posição e tração. No caso dos extensômetros que equipam o monitoramento dos pés levou em consideração a vibração da torre até 20 Hz.

#### 4.1.2 Regulador de tração dos cabos condutores

O objetivo deste equipamento é controlar a tração dos condutores. Para chegar a esse intento, o sistema é constituído por três sistemas de tração, uma para cada cabo condutor da LTE, presos na parte inferior dos braços da torre 1. Esse sistema contempla células de carga e transdutores de posição que permitem o controle em malha fechada da tração ou posição dos cabos condutores. Como o deslocamento se dá de forma lenta, a taxa de aquisição é de 2 Hz e suficiente para um controlador do tipo PI.

Como medida de segurança, cada sistema de carregamento conta com dois tipos de fim de curso que impedem o avanço do carro de tração além dos limites de operação desejados, um lógico e outro físico. O fim de curso lógico baseia-se na medição da posição do carro do sistema de tração. Caso passe de um valor de posição predeterminado, o deslocamento do carro de tração é parado por comando de software. Caso haja algum problema nesse fim de curso lógico, um segundo fim de curso físico, baseado em chaves eletromecânicas, interrompe a alimentação do motor através do inversor, requerendo intervenção localizada no painel 1 do respectivo inversor para voltar a funcionar.

#### 4.1.3 Monitoramento e controle da vibração nos cabos condutores

O objetivo é, de forma controlada, gerar as tensões dinâmicas de vibração, que tem como fontes os excitadores eletrodinâmicos e os ventos que atingem os cabos condutores. Os equipamentos estão situados sob as mísulas da torre 1. Para atingir a frequência e amplitude geradas pelos três excitadores, os valores são selecionados remotamente no painel do programa LTE.

O mecanismo de acionamento dos excitadores utilizado foi baseado em atuador indutivo (*voice-coil*). Cada sistema de excitação dos cabos condutores funciona independentemente dos outros dois, sendo possível operar um de cada vez,

pois caso contrário, haveria influência mútua entre os vibradores. O sistema de controle é realimentado por uma célula de carga e um acelerômetro, permitindo que o conjunto cabo condutor seja excitado na frequência e amplitude, podendo ser velocidade e aceleração também desejados.

Os dados da amplitude de vibração são adquiridos pelos três Proximitors® instalados em cada um dos cabos condutores a uma distância do grampo de suspensão de 89 mm. A transmissão dos dados adquiridos é feita através de fibra óptica do tipo monomodo, inseridas nos cabos para-raios do tipo OPGW, instalado na pontina da torre 1.

#### 4.1.4 Monitoramento da temperatura dos cabos condutores e vento

O objetivo desses dois tipos de sensores é obter o registro das condições ambientais relevantes para a vibração eólica dos condutores, como a intensidade e direção do vento e a temperatura. Para isso foram instalados cinco termopares tipo T para o monitoramento da temperatura, sendo três nos condutores da LTE e dois no painel 1. Foram instalados dois anemômetros ultrassônicos, um em cada uma das duas torres que compõe o vão experimental, com capacidade de medição de intensidade de ventos a partir de 0 m/s, com resolução de 0,01 m/s, até 60 m/s. A direção dos ventos é medida com resolução de um grau.

#### 4.1.5 Sistema de controle de imagem das câmeras

O propósito é de monitorar visualmente, em tempo real, o comportamento da LTE durante a operação de carregamento dos cabos e vibração. Como o acesso é remoto, as imagens permitem uma operação segura da linha automatizada. Para tanto, as câmeras são capazes de captar as imagens dos principais subsistemas da LTE: tração, excitadores eletrodinâmicos, vibrógrafos e contêiner.

Os arquivos dos vídeos ficam arquivados no mínimo por uma semana. As imagens podem ser resgatadas, quando se tem interesse em algum evento especial ocorrido na LTE.

#### 4.1.6 Transmissão de dados

O intuito é transmitir os dados de medição para o Lactec ou outro local de acesso de interesse, assim como enviar comandos para os atuadores (tração e vibração, por exemplo) e visualização das câmeras. A modalidade utilizada para a comunicação dos dados, foi a contratação de um *Link* de 3 MB bidirecional (*upload* e *download*). A conexão se mostrou ser o suficiente para a transmissão de dados (vibrógrafo, células de carga da torre, células de carga dos cabos condutores, câmeras de vigilância, temperatura dos cabos condutores e condições ambientais) e controle remoto (excitador mecânico, tracionador dos cabos condutores, posicionamento e seleção das câmeras).

## 4.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

O sistema é definido como um sistema de tempo real, embarcado, desassistido e distribuído. Sistemas de tempo real possuem restrições quanto ao tempo de execução dos seus processos, devendo responder adequadamente em intervalos de tempo pré-estabelecidos. No caso, o sistema deve adquirir as informações dos diversos sensores da LTE e tomar as ações de controle apropriadas em intervalos determinados. Sistemas embarcados podem ser definidos como sistemas computacionais acoplados a um sistema mais amplo, que o controla, dedicando-se primariamente a realizar tarefas determinísticas. Sistemas embarcados comumente são desassistidos, isto é, sistemas que não estão continuamente sob a observação de um humano ou de outro sistema enquanto estiver operacional. Finalmente, sistemas distribuídos caracterizam-se por sistemas com mais de um núcleo computacional interligados. No caso, o sistema contém quatro núcleos computacionais, conforme ilustrado na Figura 26.



Figura 26. Nós computacionais do sistema  
Fonte: O autor.

#### 4.2.1 Funções desempenhadas pelo programa de controle LTE

O ambiente de programação LabVIEW prima por fornecer recursos que favorece a diversidade de equipamentos aplicados neste projeto, agilizando a implantação, testes e ampliações. As características são as seguintes: código orientado a fluxo de dados, linguagem gráfica que abstrai complexidade, fácil conversa com o *hardware* tanto da NI quanto de terceiros, possuindo bibliotecas (inclusas e Internet) que minimizaram a necessidade desenvolvimento, componentes de interface voltados à instrumentação. Permite programar em três tipos de ambientes com *hardware* diferentes (Windows, RT e FPGA) usando uma única linguagem em um único ambiente (MANNALA, MANZOLLI, *et al.*, 2017).

O sistema computacional de controle, o que inclui o programa LTE, realiza principalmente as seguintes funções:

- a) aquisição e tratamento dos dados dos diversos sensores instalados;
- b) controle do sistema de tração e sistema de vibração, tanto de forma manual quanto automática;
- c) armazenamento dos dados de ensaios para processamento e análise posterior;
- d) disponibilizar uma interface para o usuário a partir da qual se possa controlar o sistema e realizar os ensaios desejados.

### 4.3 FUNCIONALIDADE DOS SISTEMAS DA LTE

Nesta seção são apresentadas as funcionalidades da LTE, quanto ao modo de operação e a medição da tensão vibracional dos cabos condutores.

#### 4.3.1 Modos de operação

São descritos quatro modos de operação possíveis dos sistemas da LTE: automático, manual, hibernação e funcionalidades específicas.

- a) Automático: aguarda, em determinada tração especificada pelo operador, até que a intensidade do vento (rajada), tensão dinâmica em um dos três



vibrógrafos e/ou um determinado período seja superado. Ao final, calcula, empacota, grava os dados e envia ao servidor local;

- b) Manual: inicia uma aquisição contínua e abre um painel com controles que permitem modificar parâmetros tais como tração nos cabos condutores, amplitude e frequência de vibração;
- c) Hibernação: não realiza ensaios, apenas adquire sinais (temperatura, vento, tração nos cabos, etc.) e os envia constantemente numa frequência baixa (até 10 Hz), para visualização das condições ambientais e do sistema a qualquer momento;
- d) Funcionalidades específicas: configuração técnica para operação, de parâmetros de monitoramento e de ensaio, registro de ocorrências (*login*, alteração de configuração, comandos do usuário, alertas, erros, etc.).

#### 4.3.2 Medição da tensão vibracional dos cabos condutores

A tensão dinâmica vibracional é medida a 88,9 mm (3,5") a partir do contato do grampo de suspensão. A excitação do condutor, obtendo-se a tensão vibracional e o deslocamento vertical, ocorrendo em dois modos distintos de ensaio: excitação pelo vento (natural ou eólica) e induzida (excitador eletrodinâmico – forçada ou induzida). Segue a descrição dos modos mencionados:

- a) excitação natural ou eólica: o sistema é capaz de fazer registros das tensões e deslocamentos vibracionais geradas por ventos, quando a componente da velocidade do vento perpendicular ao cabo for superior a um valor definido pelo usuário por um certo período definido pelo operador;
- b) excitação forçada ou induzida: vibrar os cabos condutores com excitação senoidal ou pulsada através do excitador eletrodinâmico, adquirindo seus dados de esforços gerados na excitação (força, fase e frequência).

#### 4.4 MODALIDADES DE ENSAIOS DA LTE

As formas de ensaios automatizados possíveis de serem desempenhados pelos programas da LTE são descritos a seguir.

#### 4.4.1 Registro contínuo da vibração gerada pelos ventos com controle de tração

Esse ensaio tem como fim levantar o número de ciclos de dano próximo ao grampo monoarticulado das três fases, com controle contínuo da tração. Na sequência a descrição de como é realizado o procedimento de ensaio:

- a) os sinais dos sensores são gravados continuamente, sendo que de três em três horas os dados são transferidos da memória de massa da controladora cRIO 9035 para o sistema supervisório;
- b) os sensores registrados e a taxa de aquisição foram: os três vibrógrafos (taxa de 2560 amostras por segundo), os seis acelerômetros (taxa de 2560 amostras por segundo), todas as células de carga dos cabos (condutores e para-raios, taxa de 1 amostra por segundo), os três termopares dos cabos condutores (taxa de 1 amostra por segundo), vento e direção dos dois anemômetros (taxa de 1 amostra por segundo) e os doze sensores para o registro dos esforços nos pés da torre 1 (taxa de 2 amostras por segundo);
- c) alguns dados foram coletados para outras análises além do objeto desta tese. Essas informações poderão ser verificadas futuramente, pois transcendem o escopo deste trabalho.

#### 4.4.2 Registros de vibração periódico

Esses ensaios têm como meta determinar os modos de vibração dos cabos condutores e analisar periodicamente a tensão dinâmica junto ao grampo de suspensão na torre 2, com intervalo definido pelo operador. As funcionalidades do programa são mencionadas na sequência:

- a) a forma de aquisição dos dados realizados por equipamentos vibrógrafos é a cada intervalo de tempo definido pelo operador. Por exemplo, se o tempo definido for de cinco minutos, o tempo útil de espera é calculado da seguinte forma:  $300\text{ s} - 10\text{ s} = 290\text{ s}$ . Portanto, a cada 290 s o ensaio é disparado para gravação em um período com duração de 10 s;
- b) os dados gravados são referentes a amplitude de vibração pico a pico à 88,9 mm do último contato do cabo em relação ao grampo monoarticulado

de suspensão nas três fases. Os seis sinais dos dados tratados dos acelerômetros (instalados nos três cabos), as cinco células de carga dos cabos condutores e para-raios e os dois anemômetros;

- c) ao final de cada período é realizado a gravação do sinal com duração de até 10 s.

#### 4.4.3 Registro por nível de tensão dinâmica

Esse ensaio tem o objetivo de captar todo o vento que leva os cabos condutores ao nível de vibração de interesse e assim realizar uma comparação com os outros cabos condutores submetido a mesma excitação. As funcionalidades deste programa são relacionadas a seguir:

- a) disparar a aquisição de dados quando as medições de qualquer um dos vibrógrafos suplantam determinado nível de tensão dinâmica selecionado no painel do programa (em  $\mu\text{m}$ ), registrada por qualquer um dos vibrógrafos;
- b) quando o evento é iniciado, são gravados os dados dos dois anemômetros, cinco termopares (nos cabos e dentro dos painéis), cinco células de carga (condutores e para-raios), seis acelerômetros dos cabos e três vibrógrafos;
- c) o tempo de aquisição fica a escolha do operador, podendo variar de 10 a 60 s.

#### 4.4.4 Gatilho por rajadas de vento

O objetivo é avaliar o comportamento dinâmico quanto aos esforços nos quatro pés da torre 1, mediante a solicitação por rajadas de ventos, conforme descrito a seguir:

- a) disparar a aquisição de dados quando as medições do anemômetro da torre 1 superar níveis pré-estipulado pelo operador de ventos oriundas de rajadas de ventos;
- b) Quando o valor for igual ou superior ao valor da tensão dinâmica escolhida, os dados de todos os sensores instalados nos quatro pés da torre 1, dois anemômetros, cinco termopares (nos cabos e dentro dos painéis), cinco

células de carga (condutores e para-raios) são gravados em arquivo eletrônico;

- c) O tempo de aquisição estipulado padrão é de 10 s, podendo variar conforme a necessidade do operador para até um minuto.

## **5 TESTES REALIZADOS EM LABORATORIOS PREDIAIS PARA SUBSIDIO DE DADOS AOS ENSAIOS REALIZADOS NA LTE**

Neste capítulo são descritos os ensaios realizados em laboratório predial, com a finalidade de dar aporte de informações para a análise dos testes realizados na LTE. São descritos os testes com resultados para as amostras Tern, Phosphorus e Greeley para levantamento dos parâmetros mecânicos e elétricos. Os ensaios descritos são os seguintes: levantamento dos módulos de elasticidade, ciclo de Wöhler (curva S-N), determinação das vibrações modais dos condutores e determinação dos parâmetros elétricos (encontrado no apêndice H).

### **5.1 ENSAIOS DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO**

A fim de determinar os módulos de elasticidade dos cabos, com o objetivo de serem utilizados nos cálculos das trações de lançamento e para cálculo da determinação das trações dos ensaios de fadiga. Foram realizados ensaios de tensão-deformação nos cabos condutores. Foram executados nos mesmos cabos Tern, Phosphorus e Greeley, que compõe os condutores instalados na LTE.

#### **5.1.1 PROCEDIMENTO DE ENSAIO**

O ensaio é realizado conforme procedimento descrito na norma ABNT NBR 7302 (Condutores elétricos de alumínio – tensão-deformação em condutores de alumínio). A medição da força de tração aplicada ao corpo-de-prova é realizada por uma célula de carga instalada na máquina de tração, enquanto a medição do alongamento durante o ensaio é feita por meio de dois transdutores indutivos de deslocamento linear (LVDT).

#### **5.1.2 Ensaio no cabo Tern**

O ensaio consiste em tracionar o cabo da pré-carga até os patamares de 30, 50, 70 e 75% de sua tração de ruptura, registrando a força de tração aplicada e a correspondente deformação medida do condutor. O corpo-de-prova é tracionado até

o patamar e a carga é mantida constante durante certo período de tempo, conforme esquema apresentado nas Tabela 4 a Tabela 6, para cada cabo.

A taxa de carregamento e de descarregamento aplicada durante o ensaio é tal que se obtém variação de tração equivalente a uma variação de 30% do valor da resistência mecânica calculada (RMC) do cabo em 1 min e 50 s.

Tabela 4 - Etapas do ensaio de tensão-deformação no Tern (cabo completo)

Etapa	Pré-carga	1	2	3	4	5	6	7	8
Carga (%RMC)	--	30	---	50	---	70	---	75	---
Carga (kN)	5,0	29,4	5,0	49,0	5,0	68,6	5,0	73,5	5,0
Duração (min)	---	30	---	60	---	60	---	60	---

Fonte: O autor

Tabela 5. Etapas do ensaio de tensão-deformação no Phosphorus

Etapa	Pré-carga	1	2	3	4	5	6	7	8
Carga (%RMC)	--	30	--	50	--	70	--	75	--
Carga (kN)	5,0	27,4	5,0	45,6	5,0	63,8	5,0	68,4	5,0
Duração (min)	--	30	--	60	--	60	--	60	--

Fonte: O autor

Tabela 6. Etapas do ensaio de tensão-deformação no Greeley

Etapa	Pré-carga	1	2	3	4	5	6	7	8
Carga (%RMC)	---	30	---	50	---	70	---	75	---
Carga (kN)	5,0	40,5	5,0	67,5	5,0	94,5	5,0	101	5,0
Duração (min)	---	30	---	60	---	60	---	60	---

Fonte: O autor

No caso de ensaios no cabo Tern, após o término da etapa 8, o cabo é removido da bancada de ensaios, a qual é preparada para o ensaio na alma de aço.

### 5.1.3 Ensaio na alma de aço

O ensaio na alma do condutor é realizado seguindo mesmo procedimento e esquema de carregamento e descarregamento adotados no ensaio no cabo completo, exceto pelo fato de que agora os patamares de tração das etapas 1, 3, 5 e 7 são determinados pelo alongamento medido no início dos patamares de 30, 50, 70 e 75% da RMC do condutor no ensaio no cabo completo. Ou seja, em cada patamar de

tração, a carga é aumentada até que o alongamento medido da alma seja igual ao medido no início do patamar de tração correspondente do ensaio no cabo completo.

A taxa de carregamento e descarregamento no ensaio na alma é a mesma que a adotada no ensaio no cabo completo.

#### 5.1.4 Resultados dos ensaios no cabo Tern

A Figura 27 apresenta, para o cabo completo, as curvas de tensão-deformação nos carregamentos a 30, 50, 70 e 75% da RMC, além das curvas virtuais, inicial e final, obtidas no ensaio no primeiro corpo-de-prova do cabo Tern. A Figura 28 apresenta as mesmas curvas, no caso da alma de aço.

**Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figura 27. Curvas de tensão-deformação no cabo Tern – cabo completo.  
Fonte: O autor.

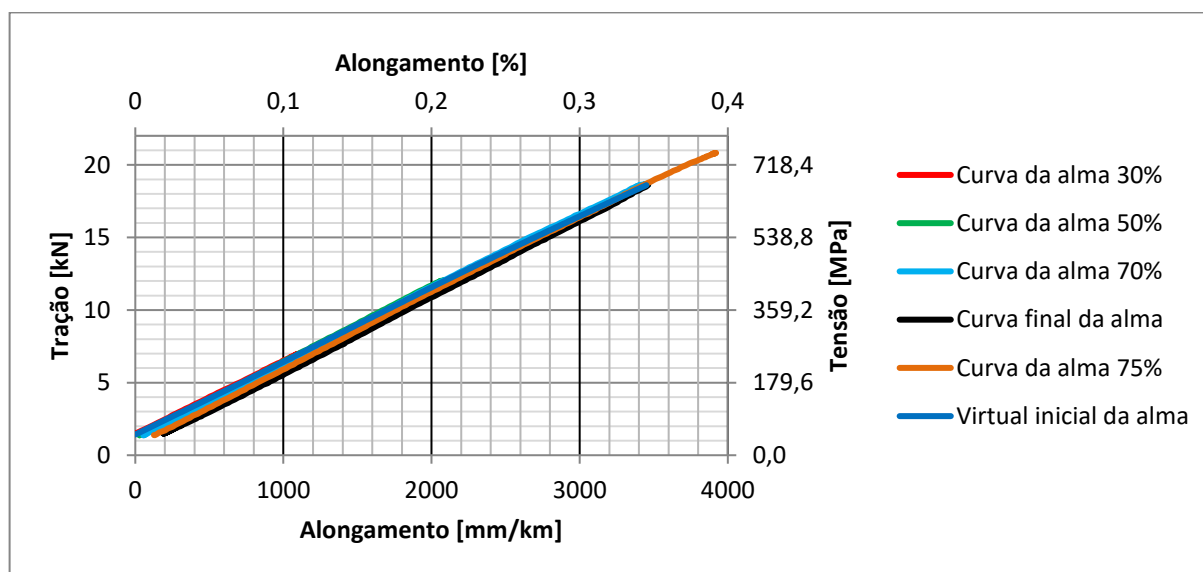


Figura 28. Curvas de tensão-deformação no cabo Tern – alma de aço  
Fonte: O autor.

A Figura 29, por sua vez, apresenta a curva virtual inicial e a curva final, para a alma, para a coroa e para o cabo completo. A curva virtual inicial do cabo completo e da alma é obtida pela união em concordância do último ponto de cada patamar em que a carga é mantida constante, no gráfico de tensão-deformação correspondente

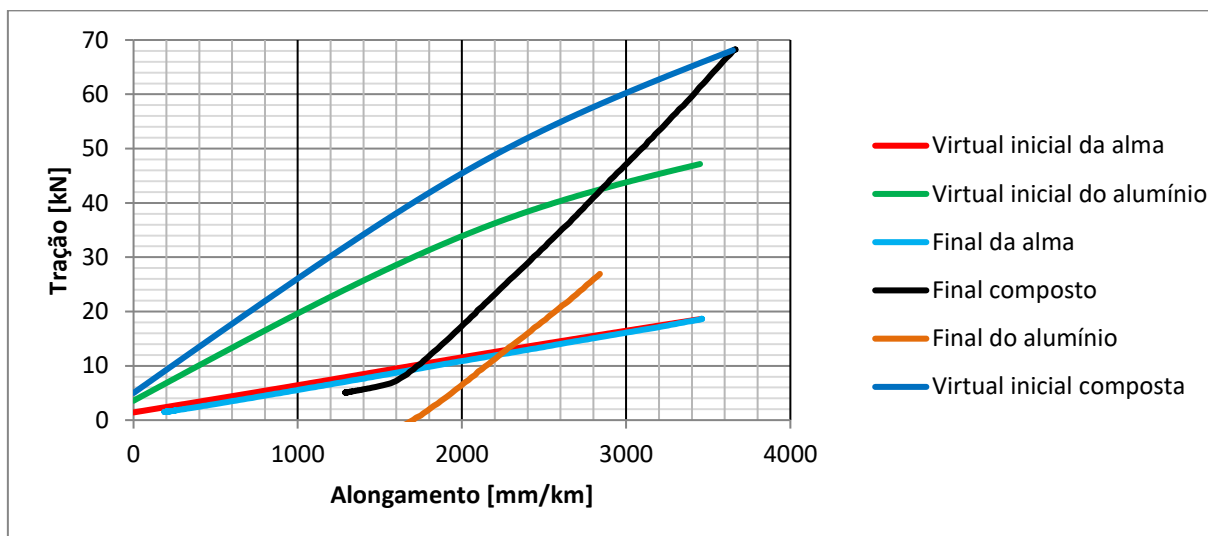


Figura 29. Curvas virtuais e finais do cabo *Tern*  
Fonte: O autor.

A curva final correspondente é obtida a partir do descarregamento de 70% da RMC à pré-carga. As referidas curvas (virtual inicial e final) da coroa são levantadas pela subtração das respectivas curvas adquiridas no ensaio no cabo completo das curvas conseguidas no ensaio na alma.

Os valores encontrados para os módulos de elasticidade de interesse para este estudo são fornecidos na Tabela 7. Os módulos finais, do alumínio e do aço ( $E_{af}$  e  $E_{sf}$ ), são obtidos da inclinação das curvas finais do alumínio e do aço, respectivamente. Os módulos iniciais ( $E_{ain}$  e  $E_{sin}$ ), por sua vez, são obtidos da inclinação, entre os patamares de 15 e 40% da RMC do cabo, das curvas virtuais iniciais, do alumínio e do aço.



Tabela 7. módulos de elasticidade registrados nos três ensaios no cabo Tern

MÓDULO	CORPO-DE-PROVA				DESVIO PADRÃO AMOSTRAL	
	1	2	3	Média	GPa	%
Virtual inicial do alumínio (15% a 40% da RMC, GPa)	33,90	33,34	34,06	33,77	0,378	1,12
Virtual inicial do aço (15% a 40% da RMC, GPa)	184,0	186,9	187,4	186,1	1,87	1,00
Final do alumínio (GPa)	59,99	60,78	60,91	60,56	0,498	0,82
Final do aço (GPa)	187,7	186,8	187,2	187,2	0,455	0,24

Fonte: O autor.

Tabela 8. Resultados finais dos ensaios de tensão-deformação no cabo Tern

MÓDULO	CORPO DE PROVA			DESVIO PADRÃO AMOSTRAL	
	2	3	Média	GPa	%
Virtual inicial do al. (15-40% da RMC, GPa) – $E_{ain}$	33,34	34,06	33,70	0,509	1,51
Virtual inicial do aço (15-40% da RMC, GPa) – $E_{sin}$	186,9	187,4	187,2	0,346	0,185
Final do alumínio (GPa) – $E_{af}$	60,78	60,91	60,85	0,092	0,151
Final do aço (GPa) – $E_{sf}$	186,8	187,2	187,0	0,297	0,159

Fonte: O autor

### 5.1.5 Resultados dos ensaios nos cabos Phosphorus e Greeley

A Figura 30 e a Figura 31, respectivamente, mostram as curvas de tensão-deformação dos cabos Greeley e Phosphorus, respectivamente. Os valores encontrados para os módulos de elasticidade de interesse (no caso de cabos de seção homogênea, eles são o módulo virtual inicial e o módulo final do cabo completo) são fornecidos na Tabela 9. módulos de elasticidade (GPa) dos cabos de seção homogênea. O módulo final é obtido da inclinação da reta no descarregamento do cabo completo de 70% da RMC até a pré-carga (acima, do “cotovelo” da curva). O módulo inicial, por sua vez, é obtido através da inclinação, entre os patamares de 15% e 40% da RMC do cabo, da curva virtual inicial do cabo.

Tabela 9. módulos de elasticidade (GPa) dos cabos de seção homogênea

MÓDULO	Greeley	Phosphorus
Virtual inicial (15% a 40% da RMC, GPa) – $E_{ain}$	47,49	46,76
Final (GPa) – $E_{af}$	58,24	61,80

Fonte: O autor.

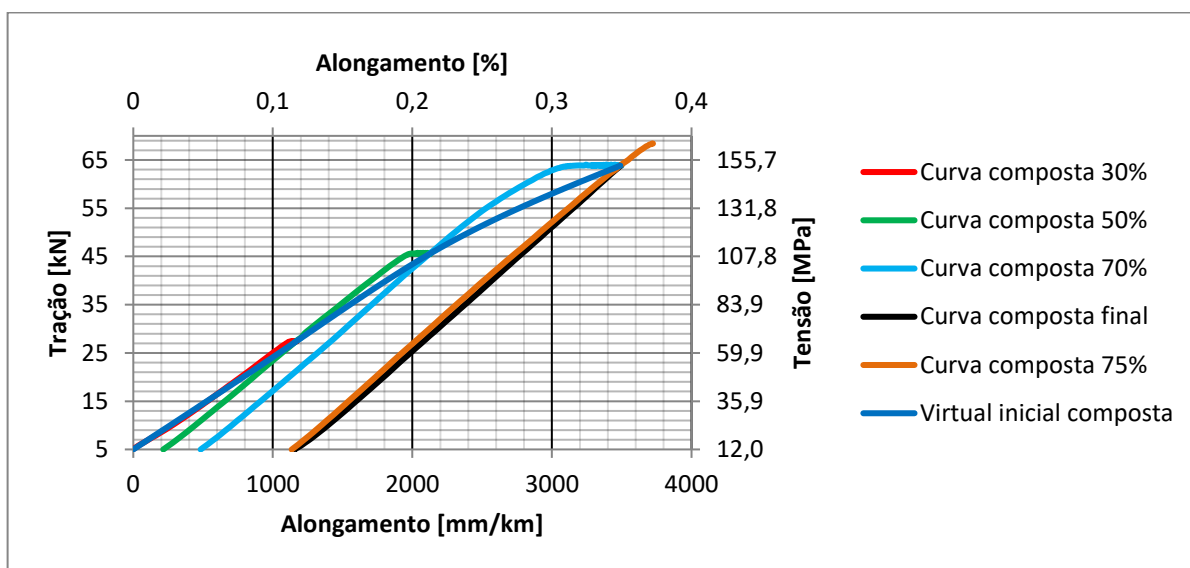
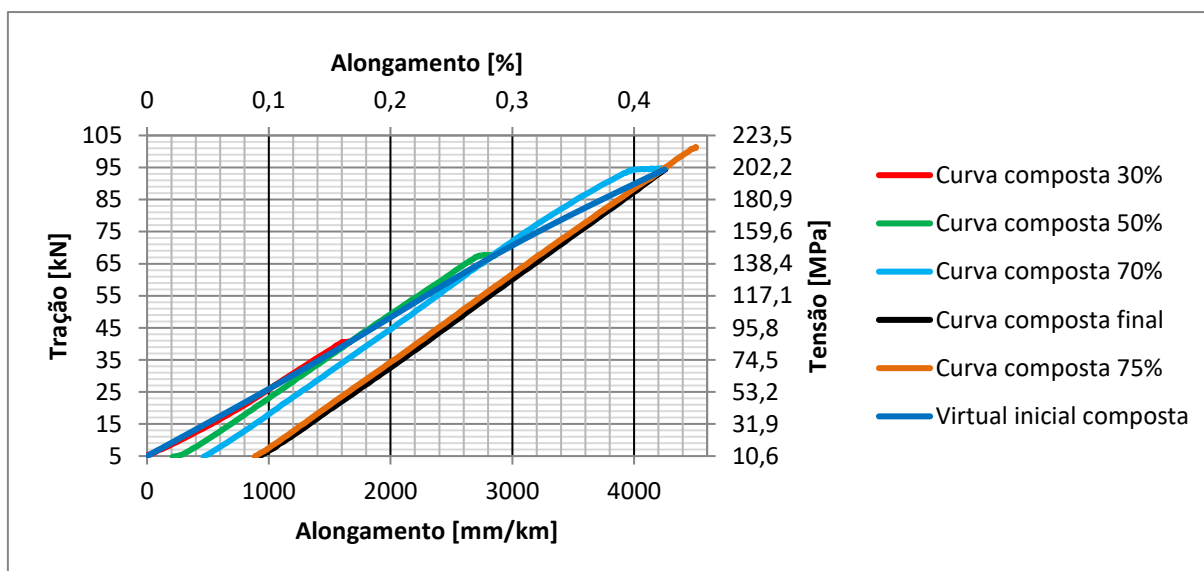


Figura 30. Curvas de tensão-deformação no cabo Greeley

Fonte: O autor.

Figura 31. Curvas de tensão-deformação no cabo *Phosphorus*

Fonte: O autor.

## 5.2 ENSAIOS DE FADIGA (CICLO DE WÖHLER)

Para avaliar os resultados obtidos pelos testes realizados na LTE, tem-se a necessidade de levantar a resistência a fadiga dos cabos instalados na linha

experimental. Dois dos três cabos instalados foram testados em laboratório, são eles: Tern (fase 1) e Phosphorus (fase 3). O cabo Greeley (fase 2) foi baseado em valores levantados na literatura (EPRI, 2008). Nas seções a seguir, maiores detalhes quanto a realização do ensaio de fadiga (curva S-N).

### 5.2.1 Metodologia para a definição das trações de ensaio

A metodologia para definição das trações de ensaio é desenvolvida a partir do trabalho de (BARRETT e MOTLIS, 2001). O cômputo da restrição da tração inicial devida às vibrações se dá a partir da definição de valores limite para a componente média da tensão nos fios de alumínio. A partir daí, no caso do cabo CAA Tern, são calculadas a tensão no aço, o H/w (equações (4) e (5)) e a componente alternada da tensão nos fios de alumínio para diferentes níveis de excitação harmônica.

Definida a componente média da tensão nos fios de alumínio, calcula-se a tensão nos fios de aço a partir da equalização das deformações iniciais nos fios de alumínio e de aço:

$$\frac{\sigma_{sm}}{E_{sin}} + \alpha_s(\theta - 20) = \frac{\sigma_{am}}{E_{ain}} + \alpha_a(\theta - 20) \quad (1)$$

onde  $E_{sin}$  e  $E_{ain}$  são os módulos de elasticidade iniciais do aço e do alumínio, respectivamente (Pa);  $\alpha_s$  e  $\alpha_a$  são os coeficientes de dilatação térmica lineares do aço e do alumínio, respectivamente ( $^{\circ} C^{-1}$ );  $\sigma_{sm}$  e  $\sigma_{am}$  são as tensões do aço e alumínio e  $\theta$  é a temperatura média do mês mais frio do ano ( $^{\circ} C$ ), tomada como a média dos últimos dez anos no período de 2005 a 2014 (dados fornecidos pelo SIMEPAR).

Rearranjando a equação (1), obtém-se:

$$\sigma_{sm} = \left[ \frac{\sigma_{am}}{E_{ain}} + (\alpha_a - \alpha_s)(\theta - 20) \right] E_{sin} \quad (2)$$

O valor do módulo de elasticidade inicial do alumínio é corrigido em função da temperatura pela equação (3) (BARRETT e MOTLIS, 2001):

$$E_{ain}(\theta) = E_{ain}(20) - 0,007(\theta - 20) \quad (3)$$

sendo  $E_{ain}(\theta)$  e  $E_{ain}(20)$  expressos em GPa, onde  $E_{ain}(20)$  é o valor do módulo de elasticidade a  $20^{\circ} C$  e  $\theta$  a temperatura ( $^{\circ} C$ ) média durante o mês mais frio do ano.

O coeficiente da catenária é então calculado pela equação (4).

$$H/w = \frac{A_s \sigma_{sm} + A_a \sigma_{am}}{g(A_s \rho_s + A_a \rho_a)} \quad (4)$$

sendo  $A_s$ ,  $A_a$ ,  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{am}$ ,  $\rho_s$  e  $\rho_a$ , respectivamente, área do aço ( $m^2$ ), área do alumínio ( $m^2$ ), tensão do aço média ( $m^2/N$ ), tensão do alumínio média ( $m^2/N$ ), peso específico do aço e do alumínio ( $kg/m^3$ ).

Para o caso dos cabos de alumínio liga CAL Greeley e Phosphorus, como o condutor é composto por um único material, a equação (5) simplifica para:

$$H/w = \frac{A_a \sigma_{am}}{g(A_a \rho_a)} \quad (5)$$

### 5.2.2 Estimativa das tensões alternadas para avaliação da fadiga

O cálculo do valor da tensão dinâmica para cada amplitude de deslocamento pico a pico,  $Y_{p-p}$  (POFFENBERG e SWART, 1965):

$$\sigma_{ad} = KY_{p-p} \quad (6)$$

sendo  $K$  definido por:

$$K = \frac{E_{af} d_a p^2}{4(e^{-px} - 1 + px)} \quad (7)$$

onde  $E_{af}$  e  $d_a$  são respectivamente o módulo de elasticidade final (MPa), e o diâmetro (mm), dos fios de alumínio;  $x$  é a distância (mm), ao longo do cabo entre o último ponto de contato entre o cabo e o grampo passante e o ponto de medição; o parâmetro  $p$  ( $mm^{-1}$ ) é dado pela seguinte relação:

$$p = \sqrt{H/EI} \quad (8)$$

sendo  $EI$  é a rigidez à flexão do cabo, pela equação (9):

$$EI_{min} = (n_a E_{af} d_a^4 + n_s E_{sf} d_s^4) \frac{\pi}{64} \quad (9)$$

onde  $n_a$ ,  $n_s$ ,  $E_{sf}$  e  $d_s$  são respectivamente o número de fios de alumínio e aço, o módulo de elasticidade final (MPa) e o diâmetro (mm) dos fios de aço.

### 5.2.3 Definição das trações de projeto e das tensões alternadas

De posse dos módulos de elasticidade dos cabos obtidos nos ensaios de tensão-deformação, é possível definir os valores das trações de projeto e das tensões alternadas para cada condutor.

Note-se que, no caso de um cabo de seção homogênea, como os cabos CAL Phosphorus e Greeley, o parâmetro  $H/w$  é dado diretamente pela equação (10).

Ademais, o valor mínimo da rigidez à flexão do cabo é dado pela simplificação da equação (9):

$$EI_{\min} = (n_a E_{af} d_a^4) \frac{\pi}{64} \quad (10)$$

As características construtivas dos cabos Tern e Phosphorus de interesse para os cálculos, fornecidas pelo fabricante, são listadas na Tabela 10 e Tabela 11. Maiores detalhes podem ser encontrados nos anexos de A a C.

Tabela 10 - Características construtivas do cabo Tern

Material	Nº de fios	Dia. dos fios (mm)	Seção (mm <sup>2</sup> )	Massa (kg/m)	Dia. Ext. (mm)	RMC (kN)
Aço	7	2,25	27,84	0,217 4	27	8,05
Al 1350	45	3,38	402,74	1,116		

Fonte: O autor.

Tabela 11 Características construtivas do cabo Phosphorus

Material	Nº de fios	Dia. dos fios (mm)	Seção (mm <sup>2</sup> )	Massa (kg/m)	Dia. externo (mm)	RMC (kN)
Al 1120	37	3,79	417,42	1,149 6	26,53	1,20

Fonte: O autor.

Os valores dos módulos de elasticidade dos cabos Tern e Phosphorus são fornecidos, respectivamente, da Tabela 12 a Tabela 15, temos os parâmetros de lançamento, sendo  $\sigma_{am}$  e  $\sigma_{sm}$  as tensões médias no alumínio e no aço, respectivamente, baseado na temperatura média do mês mais frio em Curitiba de 13,5° C (SIMEPAR).

Tabela 12. Valores dos módulos de elasticidade do cabo Tern

	$E_{in}$ (GPa) (a 22,5 ° C)	$E_f$ (GPa)
Alumínio	33,700	60,850
Aço	187,19	187,00

Fonte: O autor.

Tabela 13. Valores dos módulos de elasticidade do cabo Phosphorus

	$E_{in}$ (GPa) (a 20° C)	$E_r$ (GPa)
Alumínio	46,763	61,800
Aço	---	---

Fonte: Autor.

Tabela 14. Parâmetros de lançamento do cabo Tern

$\sigma_{am}$ (MPa)	$\sigma_{sm}$ (MPa)	H (kN)	H/w (m)
32	163	17,4	1334
48,5	255	26,6	2036
65	346	35,8	2739

Fonte: Autor.

Tabela 15. Parâmetros de lançamento do cabo Phosphorus

$\sigma_{am}$ (MPa)	$\sigma_{sm}$ (MPa)	H (kN)	H/w (m)
32	---	13,4	1185
48,5	---	20,2	1796
65	---	27,1	2407

Fonte: Autor.

A correção para a temperatura de ensaio, de aproximadamente 22,5° C, não altera a tração em um cabo de seção homogênea, pois não há, neste caso, transferência de carga da coroa para a alma por diferença de dilatação térmica. A tração aplicada ao cabo durante o ensaio de fadiga é, então, corrigida, apenas no caso do cabo com alma de aço, e é apresentada na .

Tabela 16 e Tabela 17.

Tabela 16. Parâmetros de ensaio de fadiga do cabo Tern

$\sigma_{am}$ (MPa)	$\sigma_{sm}$ (MPa)	H (kN)	H/w (m)	$p$ (mm <sup>-1</sup> )	K (MPa/mm)
32	178	17,84	1364	0,030 49	26,85
48,5	269	27,03	2067	0,037 53	30,49
65	361	36,23	2771	0,043 45	33,61

Fonte: Autor.

Tabela 17. Parâmetros de ensaio de fadiga do cabo CAL/1120 823,8 kcmil.

	$\sigma_{sm}$ (MPa)	H (kN)	H/w (m)	$p$ (mm <sup>-1</sup> )	K (MPa/mm)
32	---	13,36	1185	0,024 02	26,90
48,5	---	20,24	1796	0,029 57	30,05
65	---	27,13	2407	0,034 23	32,76

Fonte: O autor.

O valor mínimo da rigidez à flexão  $EI_{\min}$  para o cabo Tern é de 19,190 N m<sup>2</sup> e para o cabo Phosphorus, é de 23,159 N m<sup>2</sup>.

Finalmente a Tabela 18 mostra em que regiões do diagrama do critério H/w localizam-se os pontos escolhidos para os dois cabos. O parâmetro LD/m, considerando um comprimento de vão S de 270 m, resulta nos valores apresentados na Tabela 18 e Tabela 19. A letra L (m) representa o comprimento real de cabo no vão, S (m), m é a massa por unidade de comprimento (kg/m) e D é o diâmetro do cabo (m).

Tabela 18. Parâmetro LD/m para cada valor de H/w do cabo Tern

$\sigma_{am}$ (MPa)	H/w (m)	L (m)	LD/m (m <sup>3</sup> /kg)
32	1334	270,461	5,477
48,5	2036	270,198	5,471
65	2739	270,109	5,469

Fonte: O autor.

Tabela 19. Parâmetro LD/m para cada valor de H/w do cabo Phosphorus

$\sigma_{am}$ (MPa)	H/w (m)	L (m)	LD/m (m <sup>3</sup> /kg)
32	1185	270,585	6,244
48,5	1796	270,254	6,237
65	2407	270,142	6,234

Fonte: O autor.

#### 5.2.4 Procedimento de ensaio

O procedimento adotado para os ensaios de fadiga busca seguir as recomendações de documentos internacionais, tais como o artigo *Recommendations for the evaluation of the lifetime of transmission line conductors* (WG 22.04, 1979).

Em uma das extremidades da amostra a ser ensaiada é preparada uma terminação de resina epóxi, a qual é fixada à parte móvel da máquina de tração. A outra extremidade é presa à parte fixa da bancada de ensaios por meio de um grampo passante. Próximo à parte fixa da bancada, o cabo passa por um grampo de suspensão metálico, instalado sobre uma coluna de concreto. Os parafusos do grampo passante são apertados com o torque recomendado pelo fabricante, com valor de 60 Nm.

O comprimento do vão ativo da bancada, medido entre a terminação de resina epóxi e o grampo de suspensão, é de aproximadamente 30 m. O trecho de cabo no

vão passivo da bancada (entre o grampo de suspensão e a terminação fixa em solo), faz um ângulo igual a 10 graus em relação a horizontal (vide Figura 32).

Depois de instalada no vão de ensaio, a amostra é mantida com tração igual à tração de ensaio por, no mínimo, doze horas. A temperatura da bancada de ensaios é mantida em  $22,5 \pm 2^\circ \text{C}$ , desde o momento em que o cabo é tracionado até o fim do ensaio. A leitura da tração aplicada ao cabo é feita por meio de uma célula de carga instalada na máquina de tração, ao passo que o monitoramento da temperatura na sala da bancada de ensaios se faz por meio de um termo higrômetro e seu controle se faz por meio de cinco aparelhos de ar condicionado instalados na sala da bancada de ensaios.

Um excitador eletrodinâmico é posicionado próximo à terminação da parte móvel da máquina de tração. A conexão entre o excitador e o cabo é feito por meio de um engate ajustável por parafusos, no qual é instalada uma célula de carga para medição da força transmitida pelo excitador ao cabo. A medição da aceleração na mesa do vibrador se faz por meio de um acelerômetro nela afixado com cera sintética.

Uma chapa delgada com uma extremidade pontiaguda recebe uma marcação a 89 mm de distância dessa extremidade. Ela é então inserida no espaço entre o cabo e o grampo de suspensão. O último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão é encontrado quando a extremidade pontiaguda da chapa entra em contato simultâneo com a parte superior da superfície do grampo e com a parte inferior do cabo. A marcação previamente feita na chapa é usada para transferir a medição da distância de 89 mm da chapa para o cabo, por meio de uma marca a caneta na lateral e na parte superior do condutor. Sobre essa marcação é fixada, na parte superior do cabo, um acelerômetro, que é usado para medir a amplitude pico a pico do deslocamento a 89 mm de distância do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, assim como os vibrógrafos instalados na LTE.

A Figura 32 apresenta um esquema da configuração física da bancada para os ensaios.



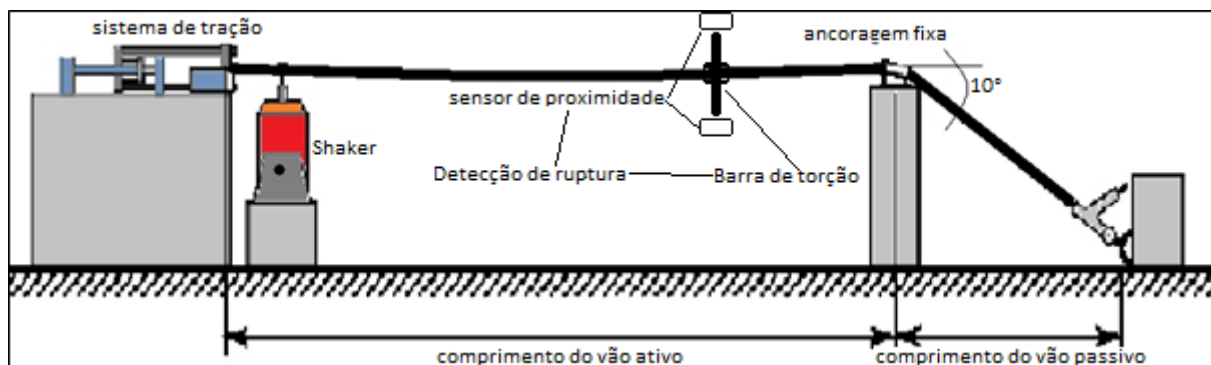


Figura 32. Configuração da bancada de ensaios para o ensaio de fadiga  
Fonte: O autor.

Com tração e temperatura estabilizadas, a amostra passa a ser vibrada em uma de suas ressonâncias, em torno de 30 Hz (a condição de ressonância é verificada quando a diferença de fase entre os sinais de força e aceleração medidos na excitação é próxima de  $90^\circ$ ). Determina-se, então, a localização de um dos nós do cabo (pontos cuja amplitude é mínima), local em que é instalada uma haste metálica na vertical.

De frente à haste são posicionados dois medidores indutivos, sensor não contato, de distância na horizontal, perpendicularmente ao cabo, um acima e outro abaixo do nível do condutor. Esse dispositivo é utilizado para determinar a ruptura dos fios durante os ensaios de fadiga. Quando ocorre a ruptura de qualquer um desses fios que constituem o condutor, ocorre um desequilíbrio torcional entre as camadas da amostra, fazendo com que a haste se aproxime mais de um sensor e se afaste de outro. Essa movimentação é registrada graficamente, caracterizando o exato momento em que houve a ruptura de um ou mais fios da amostra testada.

Os sinais dos dois acelerômetros e dos dois sensores de distância são alimentados diretamente na placa de aquisição. O sinal da célula de carga para controle de tração e o sinal da célula de carga do acoplamento entre o excitador e o cabo passam por um condicionador de sinais digital antes de procederem para a placa de aquisição. Uma vez adquiridos, todos os sinais são tratados digitalmente no programa de controle de ensaio. Esse tratamento envolve, no caso dos acelerômetros e das células de carga, a conversão para a unidade de engenharia usada, a partir da sensibilidade dos instrumentos. O sinal do acelerômetro para monitoramento do deslocamento a 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo é digitalmente integrado duas vezes (para converter aceleração em deslocamento).

Durante o ensaio, o software de controle de ensaio faz o controle da tração aplicada ao cabo, da amplitude de deslocamento a 89 mm do último ponto de contato entre cabo e grampo e da frequência de excitação por meio de controladores PID programados digitalmente. São registrados os valores da amplitude pico a pico de deslocamento a 89 mm de distância do grampo de suspensão,  $Y_{p-p}$ , e do número,  $N$ , de ciclos de vibração do ensaio, calculado a partir da frequência de excitação e do tempo de duração do ensaio. Este procedimento é repetido com três diferentes valores de amplitude para a obtenção da curva de Wöhler (curva  $\sigma_{ad} - N$ , ou curva S-N).

O cálculo do valor da tensão dinâmica,  $\sigma_{ad}$ , para cada amplitude de vibração,  $Y_{p-p}$ , é feito pela equação (11), sendo  $N$  definido pela equação (12),  $p$  dado pela equação (8) e  $EI$  obtido com o uso da equação (9) ou (10).

A curva de Wöhler obtida pode então ser comparada à *safe border line* (curva limite de segurança) da CIGRÉ, que supõe ser válida a relação da equação (11):

$$\sigma_{ad} = AN^b \quad N \leq 1,56 \cdot 10^7 \quad (11)$$

onde  $A$  e  $b$  são constantes fornecidas pela CIGRÉ (WG 22.04, 1979).

Igualando as equações (6) e (11) e isolando  $N$ , obtém-se a equação para a SBL (*safe border line*):

$$N = \left[ \frac{E_{af} d_a H}{4AEI_{\min}(e^{-px} - 1 + px)} Y_{p-p} \right]^{1/b} \quad (12)$$

### 5.2.5 Resultados dos ensaios

Os ensaios foram realizados com os seguintes parâmetros:

- vão ativo da bancada: aproximadamente 30 m;
- distância  $x$  ao longo do cabo entre o último ponto de contato entre o cabo e o grampo passante e o ponto de medição da amplitude de vibração do cabo: 89 mm;
- constante  $A$  para o cálculo da SBL (fornecida pela CIGRE): 450;
- constante  $b$  para o cálculo da SBL (fornecida pela CIGRE): -0,2.

Da Tabela 20 à 24 são apresentados os resultados experimentais, válidos para  $N$  menor ou igual a  $2E7$  ciclos. No caso do Tern, é registrado o número de ciclos

necessário para o rompimento de quatro dos fios das amostras em função da tensão dinâmica (visto que este cabo tem 45 fios de alumínio), enquanto que, no caso do cabo Phosphorus, é registrado o número de ciclos necessário para o rompimento de três fios das amostras (visto que este cabo é composto de 37 fios de alumínio).

Tabela 20. Resultados do ensaio no cabo Tern, com tração baixa

	Alta tensão			Média tensão			Baixa tensão		
$Y_{p-p}$ (mm)	1,247	1,247	1,247	1,080	1,078	1,078	0,950	0,963	0,912
$\sigma_{ad}$ (MPa)	33,5	33,5	33,5	29,0	29,0	28,9	25,5	25,9	24,5
$N$ ( $10^6$ ciclos)	2,436	2,590	2,793	4,082	5,217	9,105	8,208	9,639	10,622

Fonte: Autor.

Tabela 21. Resultados do ensaio no cabo Tern, com tração média

	Alta tensão			Média tensão			Baixa tensão		
$Y_{p-p}$ (mm)	1,149	1,149	1,097	0,986	1,001	0,951	0,903	0,903	0,886
$\sigma_{ad}$ (MPa)	35,0	35,0	33,5	30,0	30,5	29,0	27,5	27,5	27,0
$N$ ( $10^6$ ciclos)	0,818	0,859	1,252	1,338	1,369	1,893	2,179	2,342	5,427

Fonte: Autor.

Tabela 22. Resultados do ensaio no cabo Tern, com tração elevada

	Alta tensão			Média tensão			Baixa tensão		
$Y_{p-p}$ (mm)	0,998	0,998	0,998	0,894	0,894	0,907	0,819	0,788	0,788
$\sigma_{ad}$ (MPa)	33,5	33,5	33,5	30,0	30,0	30,5	27,5	26,5	26,5
$N$ ( $10^6$ ciclos)	0,691	0,719	0,729	0,864	1,004	1,402	1,676	2,294	2,401

Fonte: Autor.

Tabela 23. Resultados do ensaio no cabo Phosphorus, com tração baixa

	Alta tensão			Média tensão			Baixa tensão		
$Y_{p-p}$ (mm)	1,451	1,451	1,452	1,302	1,302	1,302	1,153	1,152	1,152
$\sigma_{ad}$ (MPa)	39,0	39,0	39,1	35,0	35,0	35,0	31,0	31,0	31,0
$N$ ( $10^6$ ciclos)	0,906	1,019	1,229	1,529	1,995	2,192	1,616	2,179	2,237

Fonte: Autor.

Tabela 24. Resultados do ensaio no cabo Phosphorus, com tração elevada

	Alta tensão			Média tensão			Baixa tensão		
$Y_{p-p}$ (mm)	1,383	1,374	1,373	1,190	1,191	1,190	1,039	0,977	0,977
$\sigma_{ad}$ (MPa)	45,3	45,0	45,0	39,0	39,0	39,0	34,0	32,0	32,0
( $10^6$ ciclos)	0,580	0,704	0,725	1,120	1,274	1,286	1,066	1,614	1,846

Fonte: Autor.

O apêndice I apresenta as comparações das curvas  $\sigma_{ad} - N$  ajustadas a partir dos dados experimentais de cada ensaio com a SBL, obtida a partir da equação (12). Esse ajuste de curva aos pontos experimentais se faz selecionando os valores dos coeficientes A e b da curva  $\sigma_{ad} - N$  de modo que a curva ajustada tangencie os pontos experimentais inferiores, diferentemente do feito nos relatórios parciais, em que se usava o método dos mínimos quadrados.

Os coeficientes A e b da curva  $\sigma_{ad} - N$  para cada cabo e cada tração de ensaio são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25. Coeficientes das curvas de Wöhler ajustadas

Nível de Tração	CAA 795 kcmil Tern			CAL/1120 823,8 kcmil		
	Baixo	Médio	Elevado	Baixo	Médio	Elevado
Tensão média ( $\sigma_{am}$ ) (MPa)	32,0	48,5	65,0	32,0	48,5	65,0
Tração (H) (kN)	17,84	27,03	36,23	13,36	20,24	27,13
K ( $\text{mm}^{-1}$ )	26,85	30,49	32,76	26,90	30,05	32,76
A	537,38	288,69	391,91	935,91	391,91	3338
b	-0,187	-0,157	-0,184	-0,231	-0,184	-0,321

Fonte: O autor

A maioria das curvas ajustadas teve inclinação maior que a da SBL, excetuando-se o cabo Tern com baixa tensão estática. É notável a diferença entre a resistência a fadiga do Tern, cuja coroa é constituída de fios do tradicional alumínio 1350, e a do Phosphorus, formado por tentos de alumínio liga 1120. Fica claro que a liga 1350 é muito menos propensa à nucleação e propagação de trincas do que a 1120, resultando numa resistência a fadiga muito maior. Além disso, é visível que, para os dois cabos, há uma significativa redução da vida a fadiga ao se elevar a tração.

### 5.3 ENSAIO MODAL NOS CABOS CONDUTORES UTILIZADOS E ACESSÓRIOS

A fim de se obter dados para comparação com os ensaios experimentais de varredura em frequência em campo, foram realizados testes em laboratório, conforme é descrito nesta seção. Foram realizados testes vibracionais dinâmicos modais com e sem amortecedor. O procedimento para o levantamento dos parâmetros elétricos dos três cabos condutores é encontrado no apêndice H.

#### 5.3.1 Procedimento realizados para realização do ensaio modal

Os procedimentos adotados para o levantamento do comportamento modal foram baseados em Barbieri *et al.*, 2003 (BARBIERI, BARBIERI e JÚNIOR, 2003). A sequência das ações que compõe o procedimento de ensaio realizado no vão com 54 m, na qual foram utilizadas as amostras dos cabos Tern, Greeley e Phosphorus utilizado é descrita nas próximas linhas:

- a) montar da amostra de cabo no banco de ensaios;
- b) zerar a célula de carga do equipamento;
- c) tracionar o condutor no primeiro nível de tração almejada;
- d) preparar a instrumentação
- e) instalar os sensores (acelerômetros) na amostra, distribuídos nos pontos  $L/2$ ,  $3L/8$ ,  $L/4$ ,  $L/8$  e  $L/16$ , devidamente identificados;
- f) ligar a cablagem aos sensores;
- g) conectar os terminais dos cabos as placas de aquisições (PXI 4461 e 4462);
- h) conectar o cabo do martelo de excitação na placa correspondente;
- i) ligar o programa de aquisição (tração, acelerômetros e deslocamento) e de controle (tração do cabo condutor);
- j) fazer as marcações para excitação por martelo e por peso (0,5 m da ancoragem e 0,7 m do centro da amostra respectivamente);
- k) montar o sistema de aquisição e controle, energização e iniciar o programa;

- l) iniciar o ensaio, a princípio com excitação através do martelo de impacto e depois com peso:
- i acertar a tração do condutor testado automaticamente através do programa;
  - ii realizar a excitação no condutor;
  - iii analisar a coerência do sinal;
  - iv manter a aquisição do sinal do martelo e acelerômetros por 3 min (180 s);
  - v conferir a curva dos dados fornecidos pela aquisição. Retorne para “i” para repetir ou para passar para a próxima tração do condutor;
  - vi caso tenha terminado a lista de trações com o martelo, voltar para o item “i” e reiniciar os ensaios, agora com a excitação realizando com martelo de impacto;
  - vii caso tenha terminado a lista de trações com peso, retornar ao item “a”.

As trações adotadas para cada configuração de testes são apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26. trações aplicadas nos três condutores para ensaio modal com martelo e peso

CAA Tern				CAL 1120				CAL 6201			
Martelo		Peso		Martelo		Peso		Martelo		Peso	
Tração %	kN	Tração %	kN	Tração %	kN	Tração %	kN	Tração %	kN	Tração %	kN
14	13,73	10	9,80	14	12,77	9	8,21	10	13,50	7	9,45
16	15,69	13	12,75	16	14,59	10	9,12	12	16,20	8	10,80
18	17,65	14	13,73	18	16,42	11	10,03	14	18,90	9	12,15
20	19,61	16	15,69	20	18,24	12	10,94	16	21,60	10	13,50
22	21,57	18	17,65	22	20,06	13	11,86	18	24,30	11	14,85
24	23,53	20	19,61	24	21,89	14	12,77	20	27,00	12	16,20
26	25,49	22	21,57	25	22,80	16	14,59	22	29,70	13	17,55
28	27,45	24	23,53	26	23,71	18	16,42	24	32,40	14	18,90
30	29,41	26	25,49	27	24,62	20	18,24	26	35,10	16	21,60
32	31,38	28	27,45	28	25,54	22	20,06	28	37,80	18	24,30
34	33,34	30	29,41	30	27,36	24	21,89	30	40,50	20	27,00
36	35,30	32	31,38	32	29,18	29	26,45	32	43,20	22	29,70
		34	33,34	34	31,01	31	28,27	34	45,90	24	32,40
		36	35,30	36	32,83	33	30,10			26	35,10
										28	37,80
										30	40,50

Fonte: O autor.

Os ensaios foram realizados para a o vão de 54 m, mantendo sempre a mesma disposição dos acelerômetros para os três cabos. Para o uso de excitação com martelo, a posição utilizada foi de 0,5 m a partir da ancoragem do sistema de tração (Figura 33).

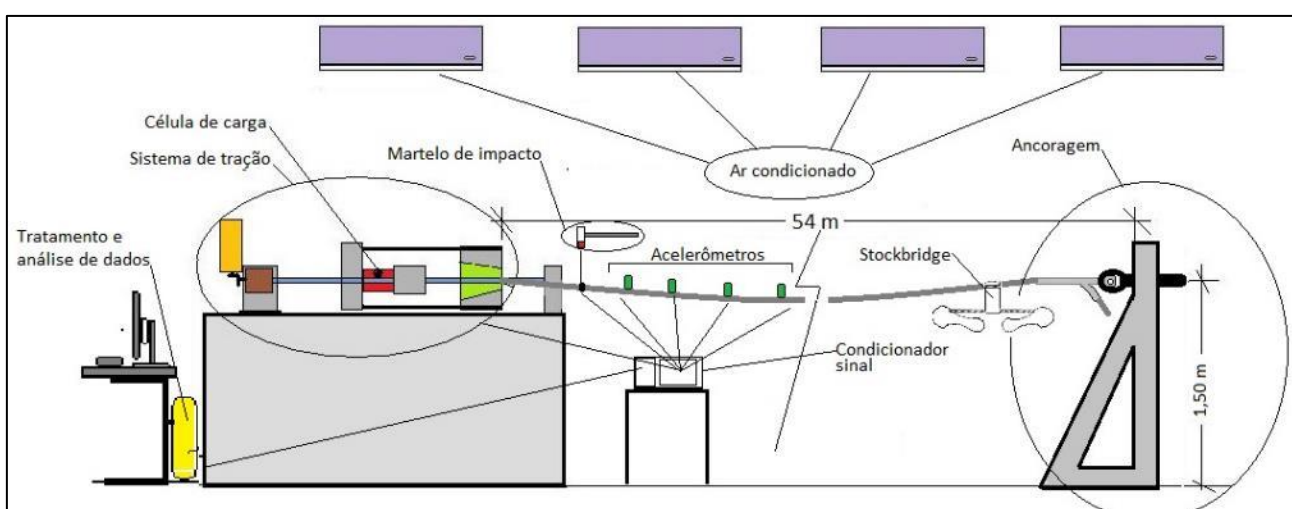


Figura 33. Bancada ensaio de vibrações no vão de 54 m com excitação a 0,50 m do engaste  
Fonte: O autor.

Para a excitação dos modos mais baixos, foi realizada a excitação impulsiva próximo ao centro do vão utilizando um peso de massa 2,5 kg, pendurado por um fio.

O procedimento consiste em romper o fio após tracionamento para a excitação da amostra do condutor. Os testes com amortecedor do tipo Stockbridge foi realizado com o condutor Greeley, e a excitação foi efetuada com martelo a 0,50 m do engaste. O posicionamento do amortecedor tipo Stockbridge assimétrico foi definido conforme recomendações de (NIGOL e HOUSTON, 1985), e conclusões de (BARRY, 2010), onde  $pos$  é o posicionamento do amortecedor, e compreende uma porcentagem (%) do valor do comprimento do laço  $loop$ , conforme as equações (13) e (157).

$$loop = \frac{2,703}{V_v} \cdot d \sqrt{\frac{H}{w}} \quad (13)$$

$$pos = loop * \% \quad (14)$$

Onde  $loop$  é o comprimento do laço ( $m$ ),  $V_w$  é a velocidade do vento ( $m/s$ ),  $d$  é o diâmetro do cabo ( $m$ ),  $H$  é a tração do cabo ( $N$ ) e  $w$  é a massa por comprimento de cabo ( $kg/m$ ).

Considerando a velocidade do vento  $V_v = 7 m/s$  (média da velocidade do vento no Brasil, velocidades baixas), e recomendações para baixa e média frequência, foram utilizados os posicionamentos do amortecedor tipo Stockbridge assimétrico conforme Tabela 27, e conforme Figura 34. A tração é uma fração (%) em relação a RMC do cabo completo utilizado no experimento.



Tabela 27 - Posicionamento do amortecedor tipo Stockbridge no cabo Greeley no vão de 54 m

Tração (% da RMC)	Laço (m)	Pos. (m)
10	1,1094	1,0207
12	1,2153	1,1181
14	1,3127	1,2077
16	1,4033	1,2911
18	1,4885	1,3694
20	1,5690	1,4435
22	1,6456	1,5139
24	1,7187	1,5812
26	1,7889	1,6458
28	1,8564	1,7079
30	1,9216	1,7679
32	1,9846	1,8259

Fonte: O autor

Seguindo também as recomendações de (NIGOL e HOUSTON, 1985), o amortecedor não deve ser posicionado em pontos de simetria ao longo do cabo (como por exemplo 1/4, 1/3, 1/2, etc.) para evitar a não detecção nos modos harmônicos (respectivos 4º, 3º e 2º). , em vãos longos e/ou para altas trações devem ser usados dois amortecedores a distância  $x_1$ , para mais que um amortecedor a razão  $x_2/x_1$  deverá ser igual a 0,4 ou 0,6. A Figura 34 mostra o vão com o amortecedor instalado.



Figura 34. Posicionamento do amortecedor no vão de teste

Fonte: O autor.

### 5.3.2 Equações utilizadas para a análise dos dados dos ensaios modais

O método de ensaio utilizado nesta seção busca a determinação da eficácia de amortecedores para cabos aéreos, através da adoção de um ensaio modal simples. Com o uso de martelo de impacto e instalação de acelerômetros em cinco posições

( $1/16$ ,  $1/8$ ,  $1/4$ ,  $3/8$ ,  $1/2$  do vão) procura-se fazer a captação do maior número de modos de vibração possível.

A partir dos sinais de força na excitação (via martelo de impacto) e deslocamento na resposta (via acelerômetros, com dupla integração), pode-se estimar funções resposta em frequência, como a receptância, em determinados pontos do sistema. A partir das receptâncias obtidas em ensaios com e sem o amortecedor, é possível estimar, de maneira direta, a redução nos níveis de vibração proporcionados pela introdução do amortecedor, bem como avaliar os efeitos do amortecedor no cabo condutor em toda a banda de frequências de interesse.

### 5.3.2.1 Estimativas de receptâncias via densidades espectrais de potência (DEP)

A estimativa da densidade espectral de potência (DEP) dos sinais adquiridos durante os testes  $y(t)$  é definida pela equação (15):

$$S_{yy}(f) = \lim_{T_a \rightarrow \infty} \frac{1}{T_a} E[|\bar{Y}(f)|^2] = \lim_{T_a \rightarrow \infty} \frac{1}{T_a} E[\bar{Y}^*(f)\bar{Y}(f)], \quad (15)$$

onde  $E$  denota o valor esperado do termo entre colchetes,  $T_a$  é o tempo de aquisição e  $\bar{Y}^*(f)$  é o complexo conjugado da transformada de Fourier  $\bar{Y}(f)$  do sinal  $y(t)$ .

Adicionalmente, a densidade espectral cruzada entre dois sinais  $x(t)$  e  $y(t)$  é descrita pela equação (16):

$$S_{xy}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E[\bar{X}^*(f)\bar{Y}(f)], \quad (16)$$

onde  $\bar{X}^*(f)$  é o complexo conjugado da transformada de Fourier  $\bar{X}(f)$  do sinal  $x(t)$ .

Define-se então o estimador  $\bar{H}_1$  como:

$$\bar{H}_1 = \left[ \frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} \bar{X}_i^*(f)\bar{Y}_i(f) \right] / \left[ \frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} \bar{X}_i^*(f)\bar{X}_i(f) \right], \quad (17)$$

sendo  $N_a$  o número de amostras tomadas.

### 5.3.2.2 Estimativa da redução nos níveis de vibração pela introdução de um amortecedor

O objetivo de um amortecedor, é a redução dos níveis de vibração no sistema primário (cabo condutor). Assim, é conveniente descrever o desempenho do acessório

em termos da magnitude da redução nos níveis de amplitude que este proporciona ao ser instalado.

Como a potência é proporcional ao quadrado da amplitude, uma medida da referida redução, em dB, pode ser feita por

$$Red[dB] = 20 \log_{10} \left[ \frac{\sqrt{\sum_{k=i}^s |\bar{H}(\omega_k)_s|^2}}{\sqrt{\sum_{k=i}^s |\bar{H}(\omega_k)_c|^2}} \right], \quad (18)$$

onde as funções "H" são estimadas pela Equação (17) e os índices *s* e *c* se referem a “sistema” e “cabo”, ou seja, a grandezas medidas em ensaios com e sem amortecedor, respectivamente. Os índices *i* e *s* nos somatórios, por sua vez, se referem às frequências de corte inferior e superior, respectivamente, e  $\omega_k$  é o *k*-ésimo ponto em frequência.

A equação (18) permite comparar diretamente o desempenho de diferentes amortecedores instalados em um mesmo cabo, ou de um mesmo acessório instalado em diferentes cabos, em qualquer banda de interesse.

Os objetos de análise são os cabos condutores Tern, Greeley e Phosphorus, nos quais foi instalado um amortecedor do tipo Stockbridge assimétrico indicado para aplicação em cabos de diâmetro externo nominal na faixa entre 22 e 33 mm (SADEL, 2018). O comprimento do fio mensageiro de cada lado do grampo é de 190 e 139 mm. A Figura 35 mostra uma foto do amortecedor tipo Stockbridge utilizado.



Figura 35. Amortecedor tipo Stockbridge assimétrico instalado na amostra  
Fonte: O autor.

### 5.3.3 Resultados obtidos

A banda de frequências coberta nas análises se estende de 6 a 50 Hz para todos os cabos em todas as condições previstas de tração. Já os tensionamentos

aplicados aos condutores foram selecionados de forma a cobrir a faixa aplicada para os ensaios de fadiga e autoamortecimento.

Em toda a banda analisada, a redução geral no nível de vibração pela introdução do amortecedor, tal como dada pela Equação (18), é de -16,7 dB (ou 85,4%), valor significativo. Entretanto, nota-se que, acima de aproximadamente 30 Hz, a redução é praticamente nula, ou seja, o amortecedor praticamente não atua acima dessa frequência.

Esses comentários se estendem aos resultados dos ensaios nos três cabos, em todos os níveis de tração. Ou seja, quaisquer que sejam as condições (cabo e tração), o amortecedor atua somente até 30 Hz. Além disso, na banda de 6 a 30 Hz, região em que o dispositivo é bastante atuante, ocorre o deslocamento de algumas ressonâncias e também o surgimento de ressonâncias intermediárias, regiões nas quais o cabo passa a vibrar com amplitudes superiores após a introdução do amortecedor. Isto pode ser mais bem observado em gráficos da curva formada pela subtração direta das curvas de receptância sem e com o amortecedor (curvas em azul e vermelho na Figura 36). Esse gráfico, para o exemplo em tela, é fornecido na Figura 36 (valores negativos significam redução e positivos, amplificação, nos níveis de vibração). A Figura 37 apresenta o resultado da subtração das curvas mencionadas.

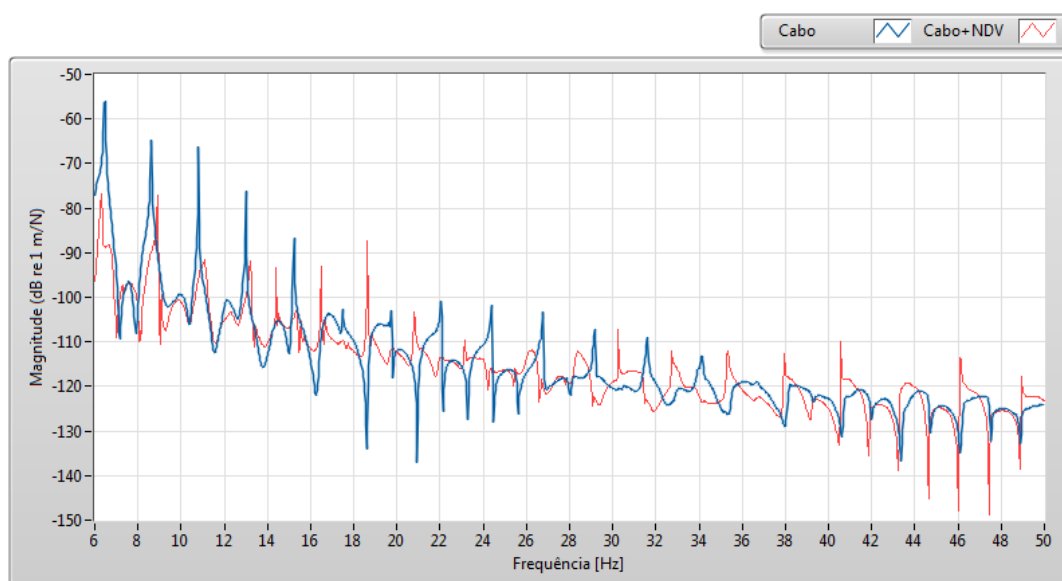


Figura 36. Módulo da receptância nos ensaios a 20,1% da RMC

Fonte: O autor.

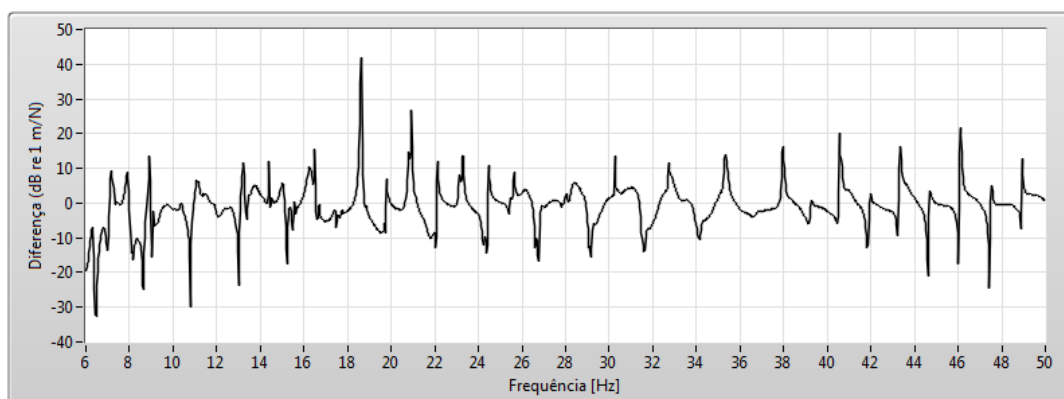


Figura 37. Gráfico da curva resultante da subtração das curvas sem e com o amortecedor, nos ensaios a 20,1% da RMC

Fonte: O autor.

Os gráficos correspondentes a todos os ensaios são apresentados no apêndice J.

Sintetizando os resultados, das Tabela 28 à Tabela 30 é apresentada a redução nos níveis de vibração em toda a banda de interesse (ou seja, de 6 a 50 Hz), nos três cabos e em todas as trações. Fica claro que, a despeito dos comentários acerca do deslocamento de algumas ressonâncias e do surgimento de ressonâncias intermediárias, a introdução do amortecedor ocasiona acentuada redução nos níveis gerais de vibração, em toda a banda de interesse, de 6 a 50 Hz.

Tabela 28. Redução nos níveis de vibração pela introdução do amortecedor no cabo Tern

<b>CAA 795 kcmil Tern</b>											
<b>H [%RMC]</b>	15,6	17,8	20,1	22,3	24,5	26,7	29,0	31,2	33,4	35,7	37,9
<b>Red [dB]</b>	-15,5	-18,5	-16,7	-13,3	-16,3	-17,8	-14,9	-16,3	-16,7	-13,0	-15,4
<b>Red [%]</b>	83,3	88,2	85,4	78,3	84,7	87,1	82,0	84,7	85,3	77,6	82,9

Fonte: O autor.

Tabela 29. Redução nos níveis de vibração pela introdução do amortecedor no cabo Phosphorus

<b>CAL/1120 823,8 kcmil</b>										
<b>H [%RMC]</b>	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
<b>Red [dB]</b>	-17,9	-13,6	-15,7	-22,6	-13,2	-17,8	-17,2	-15,3	-12,9	
<b>Red [%]</b>	87,2	79,1	83,5	92,6	78,2	87,1	86,2	82,7	77,4	

Fonte: O autor.

Tabela 30. Redução nos níveis de vibração pela introdução do amortecedor no cabo Greeley

<i>CAL/6201 927,2 kcmil Greeley</i>									
<b>H [%RMC]</b>	14	16	18	20	22	24	26	28	30
<b>Red [dB]</b>	-20,9	-12,1	-14,8	-21,9	-12,6	-29,1	-9,03	-13,2	-10,9
<b>Red [%]</b>	91,0	75,2	81,9	92,0	76,7	96,5	64,6	78,0	71,5

Fonte: O autor.

A Figura 38 apresenta as mesmas informações disponibilizadas nas tabelas 47 a 49.

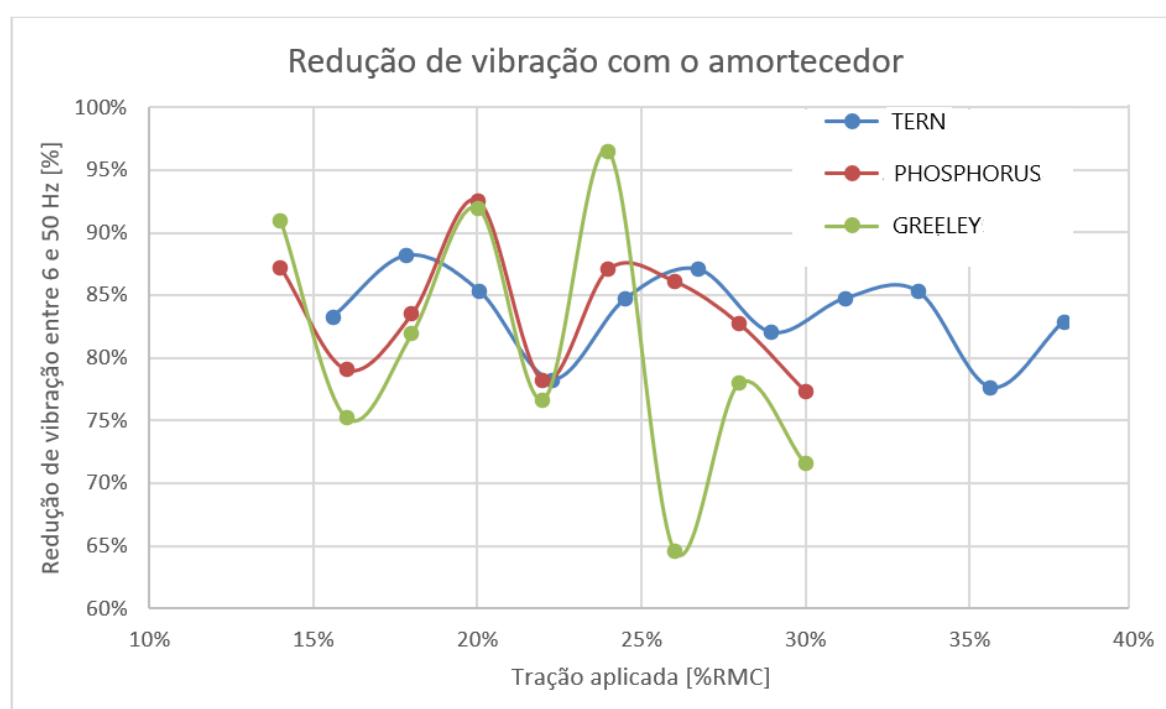


Figura 38. Redução de vibração pela introdução do amortecedor nos três cabos, em função da tração  
Fonte: O autor.

## 6 EXPERIMENTOS ATRAVÉS DA VIBRAÇÃO EÓLICA REALIZADA NA LTE

Neste capítulo são demonstradas algumas das funcionalidades da LTE através do ensaio do comportamento vibracional dos cabos condutores por excitação eólica. As conclusões dos ensaios são complementadas através do aporte de informações obtidas nos testes de fadiga (ciclo de Wöhler – curva S-N), conforme descrito na seção 5.2.

### 6.1 EXCITAÇÃO POR VIBRAÇÃO EÓLICA DOS CABOS CONDUTORES DA LTE

O objetivo do ensaio por vibração eólica dos cabos condutores é de realizar as seguintes análises:

- a) determinar o acúmulo de dano devido a tensão dinâmica vibracional dos cabos condutores à distância de 88,9 mm do terminal de suspensão através dos vibrógrafos desenvolvidos no projeto (seção 2.5);
- b) posição otimizada para instalação dos amortecedores com base no acúmulo de danos devido as vibrações eólicas.

Para atingir o objetivo, os dados foram adquiridos pelos três vibrógrafos, levando em conta a resistência à fadiga obtidas nos ensaios de ciclo de Wöhler em laboratório (Lactec/LECA), baseado nas frequências das tensões dinâmicas registradas durante o ensaio, usando a regra de Palmgren-Miner (MINER, 1945).

Para determinar o comportamento dos cabos condutores, torre e acessórios, foi desenvolvido um ensaio baseado na norma IEEE 1368 (IEEE PES, 2007). A taxa de aquisição utilizada nos três vibrógrafos foi de 640 Hz, o que permite um tempo de gravação sem interrupção de 2:55 h, com intervalo de 5 min para transferência dos dados para a memória *flash* da controladora do cRIO para o computador do supervisor, completando assim o ciclo de 3:00 h para a formação de cada um dos arquivos. Para conhecer o funcionamento do programa LTE, é descrito um passo a passo, na qual foi baseado no artigo (GUERY, WAREIN, *et al.*, 2008). Os detalhes da descrição dos ensaios realizados são minuciados nas próximas seções.

## 6.2 PREPARATIVOS PARA O ENSAIO DE VIBRAÇÃO EÓLICA

Para tornar possível a realização dos ensaios, é necessário manter os condutores livres da conexão êmbolos dos vibradores. A partir do contêiner ou remotamente, comanda-se o tracionamento de cada um dos condutores entre os limites mínimos e máximos, sendo limitados pelos fins de cursos lógicos.

Quanto ao programa, os dados informados aos controles no painel do supervisório foram os seguintes itens:

- a) os valores de tração dos condutores desejados;
- b) tempo total que o ensaio ficará adquirindo os dados;
- c) definir que sensores devem ser gravados;
- d) nome do arquivo;
- e) conferir os indicadores da tela do supervisório, certificando-se que não existem erros;
- f) acompanhar no supervisório a manutenção automática da tração em cada condutor, dentro de uma faixa de  $\pm 2\%$  do alvo estipulado;
- c) a qualquer momento pode-se aplicar a pausa evitando que dados desnecessários sejam gravados. É comum aplicar a pausa logo no início do ensaio aguardando-se que as trações definidas sejam atingidas pelo sistema.

A Figura 39 apresenta o painel do programa da LTE com a parte do controle do ensaio de vibração através dos ventos.



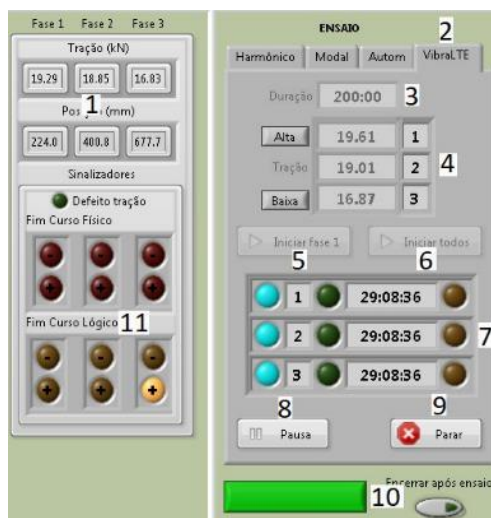


Figura 39. – Partes do painel com os controles e indicadores para operação do programa  
Fonte: O autor.

As áreas numeradas na Figura 39 são explanadas a seguir:

1. indicadores do valor de tração, em kN, e posição, em mm, dos carros de tração;
2. aba “VibraLTE” contém os controles e indicadores para a realização de ensaios eólicos;
3. tempo de duração da seção. O tempo total é dividido em períodos de 3 h (2 h:55 min + 0:05 min). Esse particionamento facilita o tratamento dos dados em pacotes menores, perfazendo o tamanho de 445 MB por arquivo;
4. determina os valores de tração a serem mantidas em cada um dos três cabos condutores. Os botões “Alta” e “Baixa” colocam valores pré-definidos. Outros valores diversos daqueles dos pré-definidos, devem ser diretamente digitados nas respectivas janelas;
5. as três fases foram ensaiadas simultaneamente, para fins de comparações em condições iguais;
6. a tecla “Iniciar todos” aciona o controle e a gravação dos dados das três fases;
7. para cada uma das fases, Indicadores de tempo decorrido em h:m:s e indicadores luminosos de carga atingida para a fase 1. Os números 8 e 9 aplicam para as fases 2 e 3:
  - a) LED azul: ensaio em andamento na fase;
  - b) número: indicador da fase;
  - c) LED verde: indica tração sendo corrigida;

- d) relógio: tempo de ensaio decorrido para a fase;
  - e) LED amarelo: indica pausa acionada.
8. tem a finalidade de pausar a aquisição de dados;
  9. para o ensaio (controle de tração e aquisição de dados).

Foram adquiridos dados durante quatro meses, sendo que as trações determinadas para cada condutor, em kN, e baseado no critério H/w, pode ser conferido na Tabela 31.

Tabela 31 - Trações utilizadas para o ensaio de vibração eólica

TRAÇÕES CABOS CONDUTORES		
% RMC	20%	26%
H/w	1496,71	1945,72
Tern (kN)	19,61	25,49
Greeley (kN)	19,01	24,71
Phosphorus (kN)	16,87	21,94

Fonte: O autor.

### 6.3 PROCEDIMENTOS PARA A REALIZAÇÃO DO ENSAIO

Os dados a serem gravados durante o ensaio são selecionados no supervisório antes do início do ensaio. Em particular, para este trabalho, foram utilizados os sensores com as suas respectivas taxas de aquisição os seguintes itens:

- a) aquisição dos três vibrógrafos instalados na torre 2 (640 Hz);
- b) as três células de carga instaladas em cada um dos condutores (2 Hz);
- c) as temperaturas de cada condutor (1 Hz);
- d) intensidade do vento e direção (1 Hz).

Para o início do ensaio, aciona-se a tecla “Gravar Todos” e assim todas as fases passam a ter suas trações controladas com base no valor alvo estipulado para cada condutor. Feito isto, as seguintes tarefas passam a ser realizadas automaticamente pelo sistema:

- a) o primeiro arquivo de dados foi gravado em formato TDMS, primeiramente na controladora e depois de 175 min ou 2 h:55 min, o arquivo é copiado para

- o disco rígido do supervisor. Quando diminui o espaço livre para gravação na controladora os arquivos mais antigos são apagados automaticamente;
- b) terminado o tempo determinado no início do ensaio pelo operador, o programa encerra o controle de tração, envia o último arquivo para o disco rígido do supervisor e encerra o programa, caso esta opção seja selecionada.

Os dados gravados dos sensores acelerômetros e vibrógrafos gravam a forma de onda do sinal adquirido, isto é, são dados espaçados por um tempo de 1,5625 ms (640 Hz).

## **6.4 TRATAMENTO DOS DADOS**

Nesta seção é detalhada a forma de como foram trabalhados os dados adquiridos dos vibrógrafos instalados na LTE mediante a excitação dos cabos condutores pelos ventos incidentes na linha.

### **6.4.1 Critérios adotados para o cálculo do acúmulo de danos nos cabos**

Os valores extraídos dos vibrógrafos é a amplitude pico a pico da vibração excitada de modo eólico. Para expressar a intensidade da vibração, são utilizadas as equações (6) a (10) apresentadas na seção 5.2.2, na qual é possível determinar a tensão dinâmica (POFFENBERG e SWART, 1965).

De posse dos valores das tensões dinâmicas vibracionais a 88,9 mm, são levantados também as frequências onde elas ocorrem, com o objetivo de comparar com os gráficos S-N (tensão dinâmica-ciclos de fadiga), montados a partir dos dados obtidos pelos ensaios realizados em laboratório (ciclo de Wöhler), conforme a Figura 40.

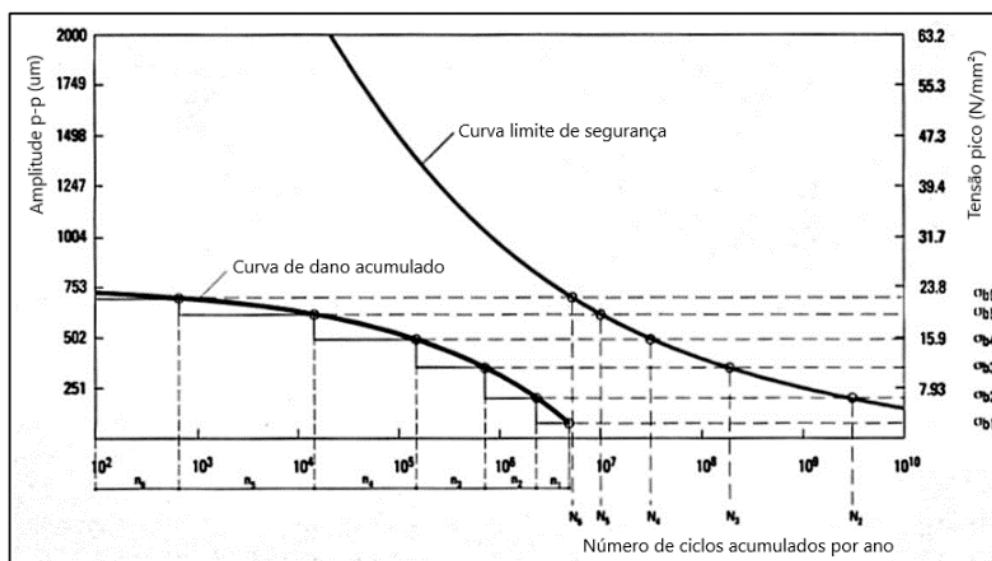


Figura 40. – Curvas de tensão acumulada e S/N

Fonte: EPRI Transmission Line Reference – Wind-induced conductor motion, editada pelo autor.

Com o gráfico da Figura 40 é possível ter uma ideia do comportamento a fadiga dos cabos condutores envolvidos, criando uma ligação entre os testes realizados em laboratório e campo (LTE). Para a obtenção do gráfico foi necessário o armazenamento de resultados em tabela, sendo que as linhas representam a frequência de vibração dos condutores na linha e as colunas amplitude, em  $\mu\text{m}$ , (vide Tabela 32);

Tabela 32 - Exemplo de tabela com dimensão 16 x 18

Freq (Hz)	Amplitude ( $\mu\text{m}$ p-p)						Soma
	125	251	376	502	627	753	
2	113	7	0	0	0	0	120
5	634	31	2	0	0	0	667
10	1889	735	209	44	5	0	2882
15	3086	2211	871	184	20	0	6371
20	3381	2308	1029	294	45	3	7060
25	2698	1076	189	14	0	0	3977
30	828	183	9	0	0	0	1020
34	140	8	0	0	0	0	148
40	8	0	0	0	0	0	8
45	1	0	0	0	0	0	1
Soma							Total
amplitude ciclos	12778	6559	2309	536	70	3	22255

Fonte: EPRI Transmission Line Reference – Wind-induced conductor motion.

Para o cálculo do dano nos cabos condutores foi utilizada a regra de Miner (MINER, 1945). Cada parcela do dano é obtida pela relação entre o número de ciclos  $n_i$  quando o condutor é submetido a uma tensão  $\sigma_i$  e a vida esperada  $N_i$ , obtida através da curva S-N determinada em laboratório. O  $V$  da equação 20 representa a vida estimada em anos, caso o único dano que o condutor sofra seja por fadiga. Em geral é desejável que este valor seja pelo menos três vezes o valor da duração da linha.

$$D_{miner} = \sum_1^i \frac{n_i}{N_i} \quad (19)$$

$$V = \frac{1}{\sum_1^i \frac{n_i}{N_i}} \quad (20)$$

## 6.5 CÁLCULO DA FREQUÊNCIA MÉDIA ATRAVÉS DA PONDERAÇÃO NO ACÚMULO DE DANOS NOS CONDUTORES

A determinação da melhor posição do amortecedor foi baseada no acúmulo de dano ponderado, levantado através dos dados adquiridos na LTE, durante os ensaios de vibração eólica dos condutores sem amortecedor, conforme a equação (21):

$$F_{barra} = \frac{N_1 \cdot \sigma_1 \cdot f_1 + N_2 \cdot \sigma_2 \cdot f_2 + \dots + f_n \cdot \sigma_n \cdot f_n}{N_1 \cdot \sigma_1 + N_2 \cdot \sigma_2 + \dots + N_n \cdot \sigma_n} \quad (21)$$

Sendo  $F_{barra}$ ,  $f_n$ ,  $N_n$ , e  $\sigma_n$  são respectivamente frequência ponderada (Hz), frequência analisada (Hz), número de ciclos na frequência analisada e tensão dinâmica na frequência analisada.

A equação (21) foi obtida para a determinação da melhor posição do amortecedor na linha, com base nos dados obtidos na aquisição através dos três vibrógrafos na torre 2.

## 6.6 PROGRAMAS UTILIZADOS PARA O TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS COM OS TESTES DE VIBRAÇÃO EÓLICA

O tratamento dos dados obtidos nos ensaios de vibração eólica nos três condutores foi obtido através de dois programas desenvolvidos no projeto. O primeiro

varre todos arquivos de um diretório, extraíndo os ciclos com as respectivas frequências e amplitudes.

Após a seleção do diretório com os arquivos de dados adquiridos, são executados os seguintes passos, pelo programa desenvolvido, para o tratamento e análise dos dados, conforme é listado a seguir:

- a) divide o arquivo em trechos de cinco segundos de dados, referente ao vibrógrafo da fase analisada, perfazendo um total de 2100 análises por arquivo (10 500 s de arquivos gravados);
- b) determina a frequência fundamental do trecho destacado;
- c) o valor da frequência determinado é usado para atribuir valor ao filtro passa baixo do tipo Butterworth, quatro polos, ordem três, com a finalidade de limpar o sinal do ruído para fins de análise;
- d) com o trecho de sinal de 5 s de duração filtrado, cada ciclo de vibração tem a sua amplitude pico a pico e período registrados;
- e) terminado a primeira análise, passa o próximo trecho de 5 s até completar os 10 500 s (tempo de duração de gravação) do primeiro arquivo do vibrógrafo 1;
- f) analisa o próximo arquivo do vibrógrafo 1 até o término do diretório;
- g) terminada a análise dos arquivos do diretório do vibrógrafo 1, retorna ao item “a” para análise do vibrógrafo 2;
- h) terminou a análise de todos os diretórios dos três vibrógrafos? Se sim fica disponível o arquivo com a gravação dos dados pré-processados contendo número de ciclos e amplitudes para cada faixa de frequência a ser utilizado para o próximo programa.

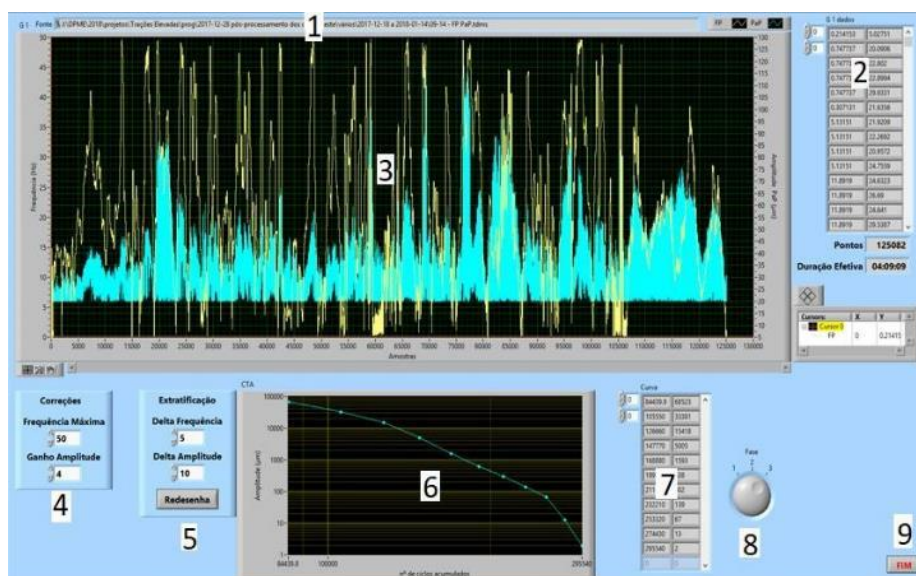


Figura 41 – Painel de controle do programa de processamento final dos dados “VibraLTE”  
Fonte: Autor.

O segundo programa gera, a partir de um arquivo criado no primeiro, uma matriz de estratificação para o dano acumulado, gerando uma curva. Esse programa é dividido nas seguintes partes, conforme numerado na Figura 41 apresentada:

1. seleção do arquivo dos dados pré-processados;
2. indicador com os pares de dados lidos, frequência predominante e amplitude pico-a-pico;
3. gráfico formado pelos dados do item 2;
4. critério dos filtros e correção dos dados: frequência máxima e ganho da amplitude;
5. estratificação de dados para classificação: passos de amplitude e frequência para compor a tabela de danos de cada cabo condutor;
6. gráfico representando os dados estratificados dos diretórios selecionados, referentes a “curva de dano acumulado”;
7. matriz com os dados representados no item 6;
8. seletor de fases para análise de cada um dos três cabos condutores da LTE;
9. tecla “FIM” para término da execução do programa.

Após a seleção do arquivo de dados pré processados, são executados os seguintes passos para a extratificação e geração dos gráficos das curvas de acúmulo de dano para cada cabo condutor:

- a) levantar o histograma a partir dos dados pré processados, estratificando as amplitudes pico a pico registradas durante a análise de cada um dos ciclos de todos os arquivos dos três vibrógrafos. O passo dado para traçar o gráfico com o histograma deve ser informado pelo usuário na tela de operação do programa descrito anteriormente;
- b) de posse da melhor distribuição das amplitudes pico a pico, obtém-se três gráficos compostos pelo número de ciclos *versus* amplitude pico a pico. Assim pode-se comparar o comportamento vibracional com a vida à fadiga dos cabos testados no laboratório fechado do Lactec (LECA).

## 6.7 RESULTADOS

Nesta seção são apurados os resultados obtidos nos ensaios de vibração eólica nos três cabos condutores em dois níveis de trações para cada um dos três condutores traduzido em um mesmo H/w para cada patamar de tração: 1496,71 e 2170,22 m.

As curvas contidas no apêndice K são apresentadas nesta seção mostram os gráficos com os danos acumulados para os dois níveis de tração para cada um dos três cabos condutores instalados na LTE. Ao final desta seção é apresentada a tabela 33, resultado do tratamento de 655 arquivos adquiridos pelos programas mencionados anteriormente para este fim.

Tabela 33 - Resumo dos resultados obtidos através dos 655 arquivos adquiridos

655 arquivos	Baixa			Alta			
	Fase	Tern	Phosp.	Greeley	Tern	Phosp.	Greeley
Tração (kN)		19,61	19,01	16,87	25,49	24,71	21,94
H/w (m)		1496,71	1496,71	1496,71	1945,72	1945,72	1945,72
Ciclos ano (10 <sup>6</sup> )		23,31	19,67	97,15	94,50	87,33	117,07
Duração ef. (h:m:s)		50:13:12	148:55:01	154:00:27	31:43:08	113:06:45	107:39:40
F barra (Hz)		8,69	13,39	20,15	18,78	20,14	19,02
Vida Miner (ano)		222063	15668	2006	27921	4012	668

Fonte: O autor.



## **7 ENSAIO DE VARREDURA EM FREQUÊNCIA EM CABOS CONDUTORES NA LTE**

Para determinar o comportamento mecânico vibracional dos cabos condutores quando instalado em condições reais em torre e equipado com amortecedor, foi desenvolvido um ensaio baseado na norma IEEE Std 664 -1993 – “*Guide for laboratory measurement of the power dissipation characteristics of aeolian vibration dampers for single conductors*” (IEEE TD, 1993).

O objetivo do ensaio de varredura em frequência é de obter dados para tornar possível a realização das seguintes análises:

- a) nível de tensão dinâmica dos cabos condutores, com e sem amortecedor, através da medição da tensão dinâmica pelos vibrógrafos, relacionando-os com o nível de excitação fornecidos pelos excitadores;
- b) comparação da excitação vibracional entre os três cabos condutores, quando em mesmo nível de tração, obedecendo o critério H/w.

### **7.1 PREPARATIVOS PARA O ENSAIO DE VARREDURA EM FREQUÊNCIA**

Para tornar possível a realização dos ensaios, é necessário o acoplamento dos êmbolos dos vibradores e os cabos condutores. No contêiner, comandou-se o tracionamento de cada um dos condutores entre os limites mínimo e máximo, demarcado pelos fins de cursos lógicos, uma camada de proteção antes de atingir os fins de cursos físicos.

Quanto ao programa, devem ser definidos os seguintes comandos no supervisor:

- a) os valores de tração dos condutores (vide Tabela 34);
- b) o tempo de varredura em frequência (minutos e segundos) e faixa de varredura, definindo-se o valor mínimo e máximo, em Hz;
- c) escolher a fase, lembrando-se que só é possível de se ensaiar um condutor por vez (1, 2 ou 3);
- d) selecionar quais sensores serão gravados durante o ensaio;

- e) definir a velocidade de excitação medido na mesa do excitador eletrodinâmico durante a varredura a 50 mm/s;
- f) preencher o nome do arquivo;
- g) conferir todos os indicadores da tela do supervisor para evitar erros de preenchimento;
- h) habilitar o sistema de tração no modo automático da fase de interesse e assim permitir que o sistema tracione e corrija a tração na amostra escolhida;
- i) iniciar o ensaio.

## 7.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Nessa seção é demonstrado como os parâmetros para a execução dos testes de varredura em frequência foram determinados, são eles: tempo de duração, velocidade de varredura, tração do condutor e a posição dos amortecedores em cada uma das fases.

A duração de cada ensaio de varredura é de 50 min (3000 s). Quanto maior o tempo, maior a resolução de frequência para a determinação dos modos vibracionais dos cabos condutores (vide seção 7.3.1.3, equação (24)). Para determinação da faixa de varredura em frequência, foi utilizada a equação (22), na qual apresenta a relação de Strouhal (STROUHAL, 1878) para determinação da faixa de frequência.

$$f = \frac{S_t V}{d} \quad (22)$$

Onde  $S_t$  é o número de Strouhal adotado usualmente (IEEE PES, 2007) é de 0,185,  $V$  é a velocidade do vento m/s e  $d$  é o diâmetro médio dos três cabos condutores em m.

Os diâmetros dos cabos instalados na LTE são os seguintes:

- a) Cabo Tern: 0,02700 m;
- b) Cabo Greeley: 0,02814 m;
- c) Cabo Phosphorus: 0,02653 m.

Baseando-se nos diâmetros citados e aplicando na fórmula da equação (22) (STROUHAL, 1878) para ventos de 1 a 7 m/s sugeridos pela norma IEEE 664:1993 (IEEE TD, 1993), temos a faixa de frequências de 7 a 49 Hz. Com a finalidade de cobrir as frequências mencionadas com reservas, foi adotada a faixa para varredura de 6 a 55 Hz. A faixa de frequências abrangeu a intensidade menor que 0,85 m/s e ventos maiores que 8,2 m/s, portanto, superando a faixa de ventos de 1 a 7 m/s sugerida na literatura (IEEE PES, 2007). O período de tempo adotado para o ensaio foi de 3000 s para a variação de 49 Hz (6 a 55 Hz), obtendo-se assim a razão de 16,333 mHz/s. A intensidade de vibração foi realizada a velocidade constante de 50 mm/s.

A Tabela 34 mostra as trações adotadas (kN) com os respectivos valores do critério H/w.

Tabela 34 - Trações utilizadas nos três condutores para os ensaios de varredura em frequência

ENSAIO DE VARREDURA EM FREQUÊNCIA TERN GREELEY E PHOSPHORUS										
T E R N - CAA 795 kcmil – Fase 1										
Ensaio	17%	19%	21%	23%	25%	27%	29%	31%	33%	
H/w	1272,2	1421,9	1571,5	1721,2	1870,9	2020,5	2170,2	2319,9	2469,6	
Tração (kN)	16,67	18,63	20,59	22,55	24,51	26,47	28,43	30,39	32,35	
G R E E L E Y - CAL 6201 – Fase 2										
Ensaio	11,5%	13,0%	14,5%	16,0%	17,5%	19,0%	20,5%	22,0%		
H/w	1222,5	1381,9	1541,4	1700,8	1860,3	2019,7	2179,2	2338,6		
Tração (kN)	15,525	17,55	19,575	21,6	23,625	25,65	27,675	29,7		
P H O S P H O R U S - CAL 1120 – Fase 3										
Ensaio	13%	15%	17%	19%	21%	23%	25%	27%	29%	31%
H/w	933,57	1077,2	1375,2	1537,0	1698,8	1860,6	2022,4	2184,2	2346,0	2507,8
Tração (kN)	11,86	13,68	15,50	17,33	19,15	20,98	22,80	24,62	26,45	28,27

Fonte: O autor.

A seguir o gráfico da Figura 42 apresenta os valores das trações utilizadas, distribuídas em cada cabo, adotando o critério H/w, levando-se em conta os quatro tipos de terreno (IEEE TD, 2006), são eles:

- Terrenos planos e abertos, com poucas obstruções, especialmente próximo de lagos, represas e rios;
- Colinas com vegetação baixa;
- Vales profundos entre grandes colinas ou montanhas;
- Terreno montanhoso com vegetação pesada.

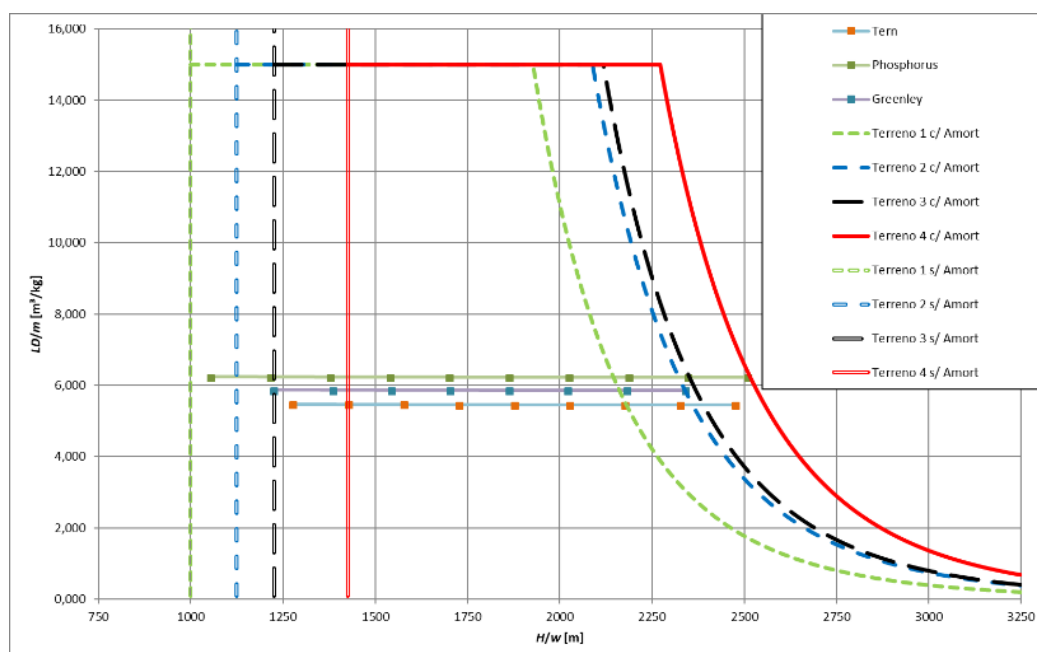


Figura 42.- Gráfico da tração nos três cabos condutores adotando o critério H/w na LTE  
Fonte: O autor.

Após o início do ensaio, o programa executa as seguintes tarefas automaticamente:

- o primeiro arquivo de dados é gravado automaticamente, no formato TDMS;
- os dados são gravados primeiro na memória de massa da controladora. Ao fim de cada ensaio, os dados são transferidos para o disco rígido do computador do supervisor, liberando espaço na memória de massa da controladora para os próximos ensaios;
- terminado o tempo total determinado pelo operador (3000 s), o programa encerra o controle de tração, envia o último arquivo para a memória do supervisor e encerra o programa;
- o programa fica no modo de espera até que o próximo ensaio seja iniciado.

Os dados efetivamente utilizados (sensores selecionados no painel do supervisor para terem os dados salvos) durante o ensaio, com as suas respectivas taxas de aquisição, foram os seguintes:

- a) aquisição dos três vibrógrafos instalados na torre 2 (640 Hz);
- b) as cinco células de carga instaladas nos cinco condutores (1 Hz);
- c) as temperaturas de cada condutor, portanto, três sensores (2 Hz);
- d) intensidade do vento e direção (2 Hz);
- e) célula de carga e acelerômetro do vibrador (1250 e 640 Hz respectivamente).

Cada ensaio de varredura em frequência gera um arquivo em torno de 100 MB. Os dados adquiridos dos sensores acelerômetros dos cabos e vibrador, célula de carga do vibrador e vibrógrafos são gravados de tal forma que possa se reproduzir os sinais obtidos no domínio do tempo.

O posicionamento do amortecedor Stockbridge assimétrico na torre 2 (suspensão) foi definido conforme critério adotado para a posição dos amortecedores para os ensaios modais em laboratório (LECA), conforme seção 5.3.1. Foi adotado o percentual de 92% do comprimento do *loop*, equação (13), para o valor médio das trações de ensaios para cada um dos três condutores testados na LTE, conforme Tabela 35.

Tabela 35 - Posicionamento do amortecedor tipo Stockbridge nas três fases da LTE

Condutor	CAA Tern	CAL Greeley	CAL Phosphorus
Posição (m)	1,38	1,49	1,34
Faixa de tração (% da RMC)	17 a 33%	11,5 a 22%	13 a 31%

Fonte: O autor

### 7.3 TRATAMENTO DOS DADOS

O tratamento dos dados adquiridos nos ensaios de varredura para a análise dos resultados foi realizado da seguinte forma descrita nas seções a seguir.

7.3.1 Tratamento de dados para realizar o pós-processamento para análise e determinação das frequências naturais dos cabos condutores.

Para realizar os passos citados foram desenvolvidos programas em Labview® a fim de realizar a análise modal dos cabos condutores com e sem amortecedores e também entre os condutores sem acessórios.

#### 7.3.1.1 Reamostragem dos dados

Para possibilitar os cálculos, como *Power Cross Spectrum* dos sinais, por exemplo, entre outros dados obtidos dos sensores célula de carga do vibrador e os vibrógrafos, eles tiveram que ser reamostrados. A taxa foi alterada para 160 amostra por segundo, 3,2 vezes da frequência máxima de teste, 55 Hz, portanto, valor maior que o mínimo sugerido pelo teorema de Nyquist, que é de no mínimo duas vezes a frequência desejada. O método utilizado para reamostragem foi o analógico, sem filtro anti-aliasing e janelamento retangular.

#### 7.3.1.2 Painel do programa utilizado para tratar os dados do ensaio de varredura

Na Figura 43 é apresentado o painel do programa, que realiza a análise dos dados do ensaio de varredura em frequência, mostrando o comportamento vibracional dos condutores instalados na LTE após o ensaio de varredura em frequência.

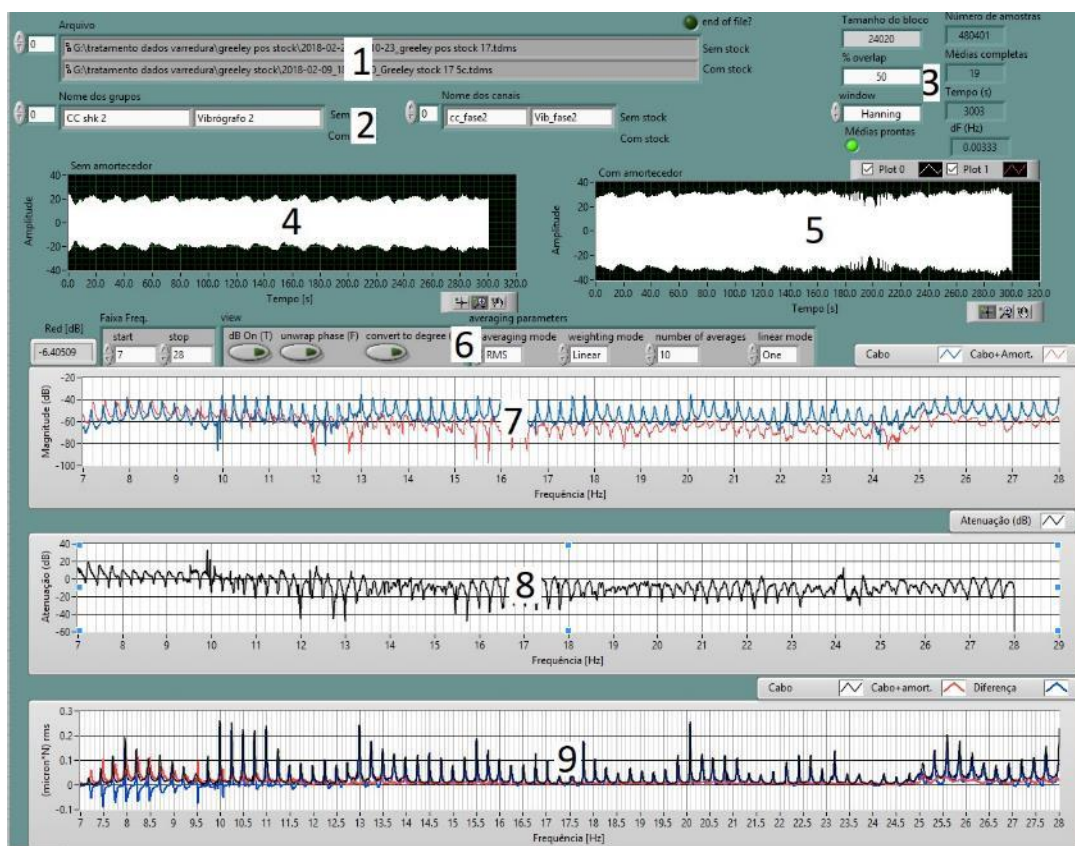


Figura 43. Painel e funcionalidades do programa para tratamento de dados  
Fonte: O autor.

As áreas numeradas do painel têm suas funcionalidades descritas a seguir, com o objetivo de comparação com e sem amortecedor ou entre dois condutores:

1. preenchimento do nome dos dois arquivos, sendo o superior e o inferior respectivamente com e sem amortecedor ou os dois condutores sem acessórios de interesse para análise;
2. nome dos grupos e canais dos arquivos de dados de interesse;
3. controle e indicadores do andamento da leitura dos dados, pois o processamento ocorre em até um minuto;
4. gráfico para a verificação da integridade dos dados lidos dos arquivos;
5. controles para a configuração dos dados de interesse a serem plotados nos gráficos;
6. gráfico com a curva da magnitude em dB dos arquivos selecionados;
7. gráfico que apresenta a curva de atenuação do comparativo almejado;

8. gráfico com a curva com espectro da potência dos arquivos selecionados.

### 7.3.1.3 Código do programa em Labview®

Para entender como foi realizado o tratamento de dados do programa de varredura, o código do programa foi dividido em 15 partes, conforme descrito a seguir:

- i. entrada dos nomes dos arquivos dos dados obtidos nos ensaios de varredura;
- ii. estrutura chamada *for loop* (similar ao *for next* na linguagem C), na qual se executa o algoritmo conforme o número de arquivos que se deseja (de duas a três análises);
- iii. procura os arquivos escolhidos pelo operador no item “a”;
- iv. abre e extrai os dados dos arquivos analisados no formato WFM (*Waveform*). Este tipo de arquivo contém basicamente informações como a diferença de tempo entre os dados (dt), e os vetores de dados dos sinais adquiridos;
- v. este subprograma define as unidades no padrão SI para os dados lidos do arquivo selecionado. No caso da célula de carga do excitador eletrodinâmico, a unidade é e N. Para o vibrógrafo, a unidade é em  $\mu\text{m}_{p-p}$  e convertido em MPa;
- vi. informa ao operador dos seguintes indicadores: número de amostras analisadas – tamanho do bloco (Tb) e a resolução da frequência ( $\Delta f$ ) em Hz, onde Fs é a frequência dado em amostras por segundo, t em s e N número de amostras adquiridas;

$$Tb = \frac{Fs * t}{N} \quad (23)$$

$$\Delta f = \frac{Fs}{N} \quad (24)$$

- vii. altera a visualização dos dados, em dB, sendo **S** o vetor do sinal lido, S<sub>0</sub> sinal de referência;



$$S(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad (25)$$

- viii. o *for loop* executa o número de vezes ( $N_m$  – número de médias), conforme o tamanho dos blocos ( $T_b$ ) definidos pelo usuário e a percentagem de sobreposição ( $S_p$  %) de dados entre um bloco de dados ( $N-1$ ) e outro ( $N$ );

$$N_e = -(S_p(\%) + 1) T_b \quad (26)$$

$$N_m = \frac{N_s - T_b}{N_e} \quad (27)$$

- ix. divide o total de dados lido no arquivo e sobrepô-los conforme a iteração a ser realizada dentro do *For Loop*;

$$N_m = \frac{N_s - T_b}{N_e} \quad (28)$$

- x. calcula a função *Cross Power Spectrum* (CPS) para cada bloco de dados que compõe o sinal no domínio do tempo da célula de carga do vibrador eletrodinâmico (**Scc**). A cada iteração é realizada a média dos sinais de saída representados no domínio da frequência no formato retangular (real e imaginária);

$$\text{CPS } \mathbf{Scc} \mathbf{Svib} = \frac{\text{FFT}(\mathbf{Svib}) \cdot \text{FFT}(\mathbf{Scc})}{N^2} \quad (29)$$

- xi. calcula a função *Cross Power Spectrum* (CPS) do vetor sinal no domínio do tempo da célula de carga do vibrador eletrodinâmico (**Scc**) – equação (29). A cada iteração é realizada a média dos sinais de saída representados no domínio da frequência no formato real e a fase ( $^\circ$ );
- xii. realiza a função *Power Spectrum Density* (PSD) dos dados do domínio do tempo para frequência da célula de carga do vibrador, na qual  $\Delta f$  é a resolução da frequência em Hz, PRLB tem o significado de Potência do Ruído na Largura de Banda e **Scc** é o vetor do sinal adquirido da célula de carga do vibrador. A cada iteração é realizada a média dos sinais de saída representados no domínio da frequência;

$$\text{PSD } \mathbf{Scc} (\mu\text{N rms}) = \frac{\mathbf{Scc}}{\Delta f \times \text{PRLB}} \quad (30)$$

- xiii. saída dos dados lidos do arquivo no domínio do tempo, de forma gráfica (amplitude *versus* tempo), da célula de carga do excitador e do vibrógrafo;
- xiv. a partir dos dados de entrada da parte real, imaginaria e do PSD, obtém-se as saídas de atenuação em cada comparação, com (c) e sem (s) amortecedor – equação (31), entre os condutores (forma escalar), magnitude e a diferença entre os cabos em dB (forma gráfica);

$$\text{Red(dB)} = 20 \log_{10} \left[ \frac{\sqrt{\sum_{k=0}^{Tb} \text{FRF}^2(\omega_k)_s}}{\sqrt{\sum_{k=0}^{Tb} \text{FRF}^2(\omega_k)_c}} \right], \quad (31)$$

- xv. apresentação dos dados das células de carga, resultados da equação (30) (PSD) de cada um dos três cabos em forma gráfica em amplitude da potência ( $\mu\text{N rms}$ ) *versus* frequência (Hz).

Observação: O uso de médias dos dados utilizado nos itens de **x** a **xii** utiliza a premissa da média é que os erros de ruído e medição são aleatórios e, portanto, pelo Teorema do Limite Central, o erro terá uma distribuição normal (Gaussiana). Ao calcular a média de vários pontos, chega-se a uma distribuição gaussiana, calculando-se uma média estatisticamente próxima do valor real. Além disso, o desvio padrão que são derivadas a partir das medições, que descreve a densidade de probabilidade para a localização do valor real (ALBERTAZZI e SOUZA, 2012).

O desvio padrão é proporcional a 1/raiz quadrada (N), onde N é o número de amostras na média. Portanto, quanto mais pontos estiver em média, maior é a probabilidade de se saber o valor real. Para a análise dos dados adquiridos nos testes de varredura na LTE, foram realizadas 250 médias. A resolução de frequência (dF) com essa o número de média utilizada foi de 83 mHz.

#### **7.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE VARREDURA EM CADA UM DOS CONDUTORES COM E SEM AMORTECEDOR**

Os resultados obtidos através dos ensaios de varredura em frequência, quando submetido os três cabos condutores a várias trações com e sem amortecedores, foram divididos em dois tipos de análises: nível de atenuação vibracional com a instalação de amortecedores e comparação vibracional entre os cabos condutores instalados na

LTE com e sem amortecedores do tipo Stockbridge. Os gráficos obtidos como resultados das análises do comportamento vibracional das linhas se encontram no Apêndices J e K.

Com base na equação (31), foram calculadas as curvas da redução de vibração (em %) para cada conjunto cabo-amortecedor, conforme mostrado na Figura 44. Esta figura compara a atenuação dos ensaios vibracionais dos cabos condutores com e sem amortecedores.

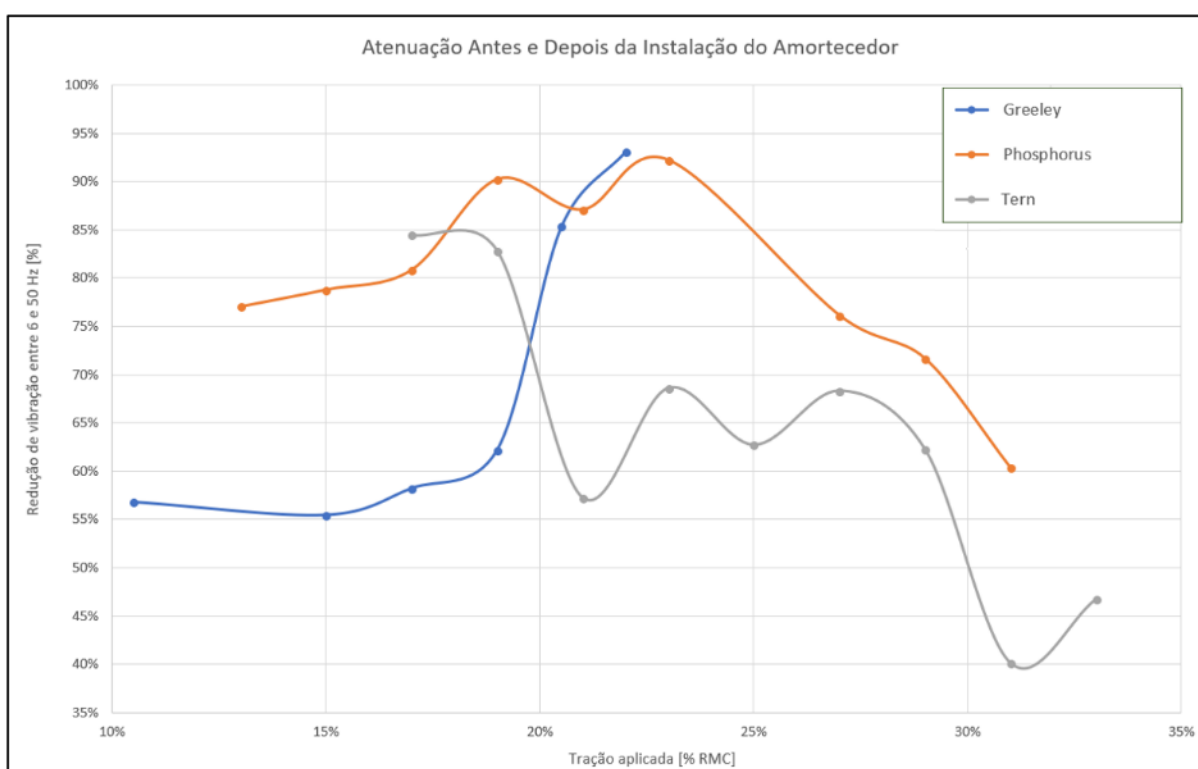


Figura 44. Eficiência dos amortecedores dinâmicos tipo Stockbridge em função da tração no cabo, para os três cabos analisados na LTE  
Fonte: O autor.

Na Figura 45 tem-se a comparação entre pares de condutores, levando em consideração a amplitude vibracional sem acessório de amortecimento, em %. Para melhor entendimento, o primeiro cabo mencionado é tido como referência. Por exemplo, quando se compara dois condutores, A x B, e o resultado encontrado é 50%, significa que o cabo A vibra 50 % a mais que o cabo B.

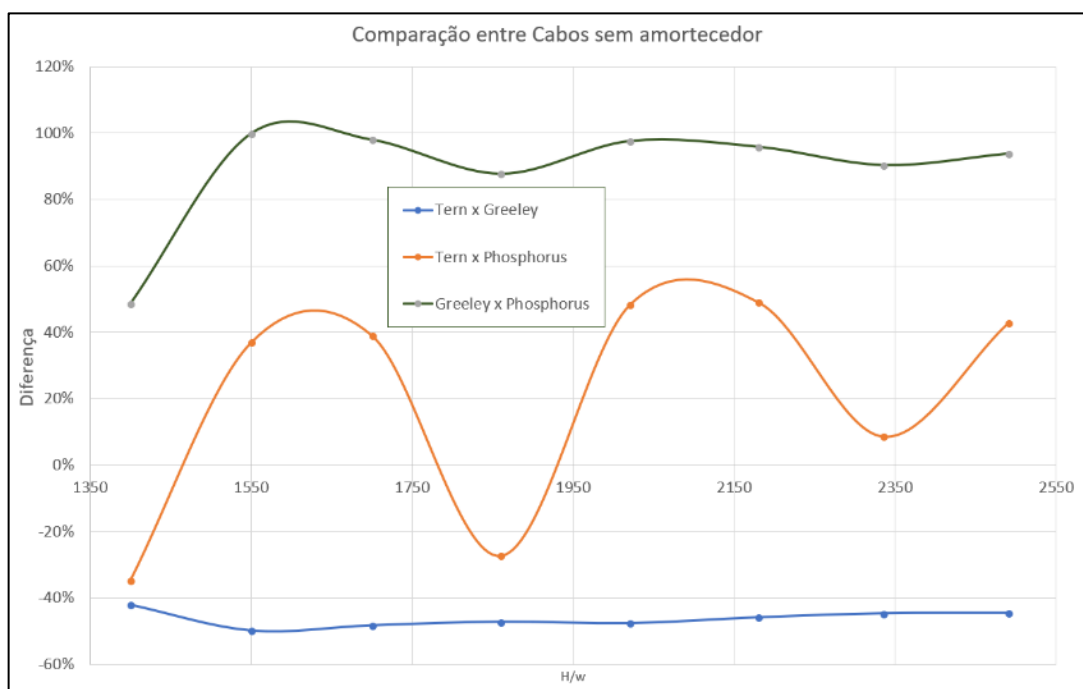


Figura 45. Comparação entre o nível de vibração entre os condutores sem amortecedor  
Fonte: O autor.

Na Figura 46 tem-se a comparação da amplitude vibracional com amortecedor entre pares de cabos que compõe as três fases da LTE, em %. O critério de comparação é o mesmo descrito para a Figura 45.

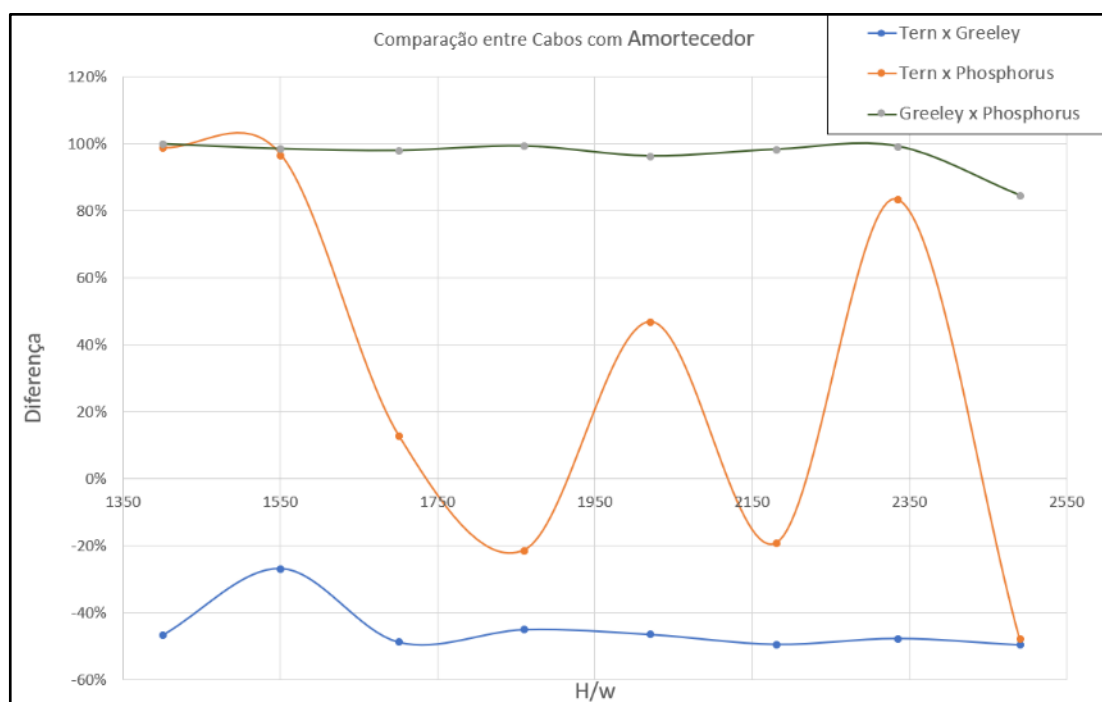


Figura 46. Comparação entre o nível de vibração entre os condutores com amortecedor  
Fonte: O autor.

## **8 CONCLUSÕES**

A LTE mostrou atributos para a realização de experimentos em cabos e acessórios, em condições muito próximo aos reais, e ao mesmo tempo com capacidade de realizar testes próximos aos laboratórios prediais. Tudo isso foi possível devido aos sistemas desenvolvidos para a linha de transmissão de 230 kV, conforme apontaram os resultados dos testes realizados. Do potencial aproveitado dos dados extraídos, fruto dos testes realizados na LTE, estima-se que apenas um décimo foi efetivamente analisado, sendo que outros trabalhos poderão ser desenvolvidos no futuro.

Nas seções seguintes são mencionadas as conclusões dos ensaios realizados na LTE e dos equipamentos desenvolvidos para a linha.

### **8.1 ENSAIO COM EXCITAÇÃO POR VIBRAÇÃO EÓLICA DOS CONDUTORES SEM AMORTECEDORES**

Ao aplicar o filtro de dados dos sinais adquiridos pelos três vibrógrafos e tratados pelo programa, com o objetivo de validação dos ciclos de vibração adquiridos, foi revelado que as fases 2 e 3 obtiveram um maior número de dados uteis por consequência, um maior número de ciclos. O número menor de ciclos da fase 1 em relação as outras fases, foi devido ao predomínio da baixa amplitude (menor que 4  $\mu\text{m}$ ). O número de dados adquiridos pelas fases 2 e 3 foram em torno de 3 vezes o número de dados em relação a fase 1.

Os resultados obtidos nos ensaios com dados dos vibrógrafos, já filtrados, foram equivalentes a 142 (pior caso) a 364 dias equivalentes de dados (melhor caso), comparando-se com a norma (IEEE PES, 2007), 15 em 15 min, 10 s de aquisição de dados contínua. O resultado da resistência à fadiga por vibração eólica, em anos, do condutor Tern se mostrou muito superior em relação aos outros dois cabos. Para baixa tração o cabo Tern mostrou uma resistência superior a 36,5 vezes em relação ao Greeley e a 185 vezes mais durável comparativamente ao Phosphorus, quando submetidos a mesma intensidade de ventos. Para a tração mais elevada, o cabo Tern mostrou ter uma resistência a fadiga 10 vezes maior em relação ao Greeley e pouco

menos que 23 vezes aos Phosphorus. Essa conclusão foi balizada nos dados de campo (trações alta e média) e laboratório LECA (ciclo de Wöhler).

As frequências para o posicionamento dos amortecedores ( $F_{\text{barra}}$ ), com base nos dados dos ensaios eólicos realizados na LTE nas três fases da LTE. Foram levantados através da ponderação dos danos acumulados, através dos cálculos usando as variáveis de frequência e amplitude registradas pelos três vibrógrafos. O mais sensível à alteração da tração foi o cabo Tern (8,78 Hz na baixa e 18,78 Hz na alta), seguido pelo Greenley (13,39 Hz na baixa e 20,14 Hz na alta) e o Phosphorus (20,15 Hz na baixa e 19,02 Hz na alta). Este último cabo praticamente não acusou variação significativa da frequência  $F_{\text{barra}}$ .

O número de ciclos, com amplitude acima de  $4 \mu\text{m}_{\text{p-p}}$ , aumentou em 2,5 vezes com a variação de tração na fase 1 (Tern) e na fase 2 (Greeley) em 4,4 vezes, já na fase 3 (Phosphorus) apenas 1,2 vezes. Isso mostra o comportamento vibracional de uma forma experimental do autoamortecimento em cada uma das amostras instaladas na linha.

A análise de vida do cabo foi baseada pela regra de Miner e o Dano Progressivo forneceu resultados muito próximos nos seis casos analisados (dois níveis de tração para três condutores).

## **8.2 ENSAIO DE VARREDURA EM FREQUÊNCIA COM EXCITADOR ELETRODINÂMICO**

As conclusões atingidas após as análises dos dados obtidos através dos ensaios de varredura em frequência são os seguintes:

Pelo critério  $H/w$ , os ensaios de varredura realizados na LTE cobriram uma faixa de tração representativa, conforme apresentado no gráfico  $LD \times H/w$  (Figura 42), permitindo ainda a extrapolação da tendência do comportamento vibracional para trações menores ou maiores para os três condutores analisados.

A efetividade dos testes realizados nos amortecedores em laboratório, se mostraram muito próximos dos resultados obtidos na LTE, atenuando as vibrações nas frequências na qual o amortecedor selecionado apresentou eficácia. Com base nos dados experimentais da LTE, realizou-se a análise da eficiência dos

amortecedores Stockbridge para cada tipo de cabo analisado, para diferentes trações. Observou-se que a atenuação média variou entre os tipos de cabos e para diferentes trações, as médias das atenuações foram as seguintes:

- a) Phosphorus – laboratório 79%, LTE 83,78%;
- b) Greeley – laboratório 68%, LTE 80,82%;
- c) Tern – laboratório 62%, LTE 83,59%.

Adotando o critério H/w para o tracionamento dos condutores adotados na LTE, o cabo Greeley vibrou significativamente mais que os outros dois condutores, com e sem amortecedores. O cabo Tern possui níveis de vibração muito próximos do cabo Phosphorus, o que explica os gráficos sinuosos com e sem amortecedor nas Figura 45 e Figura 46.

### **8.3 COMPORTAMENTOS DOS SISTEMAS DA LTE**

Com a realização dos testes nos cabos e acessórios mencionados nas seções 8.1 e 8.2, pode-se avaliar o comportamento dos sistema que compõe a LTE, seguem as conclusões a respeito do funcionamento dos sistemas desenvolvidos.

#### **8.3.1 Vibrógrafos**

Os vibrógrafos foram fundamentais para as análises obtidas até o momento. Seguem as conclusões a respeito do desempenho dos equipamentos durante os testes:

- a) integração ao sistema de controle da LTE: a aquisição de dados dos vibrógrafos foi sincronizada com o restante dos outros sensores. Não foram percebidas perdas de dados por nenhuma das três unidades durante os ensaios, salvo na ausência de energia elétrica por períodos maiores que meia hora;
- b) envio de dados: foram adquiridos dados por centenas de horas, sendo percebidos problemas apenas devido à falta de energia por períodos maiores do que meia hora;

- c) capacidade de memória: no total foram gravados 0,5 TB de dados, atendendo plenamente os requisitos inicialmente propostos;
- d) acesso remoto aos dados: os dados podem ser acessados de qualquer parte onde exista uma rede de internet;
- e) manutenção: no período de um ano não precisou de nenhuma intervenção quanto a manutenção das unidades. Os sensores são IP68 e resistentes as intempéries do tempo.

### 8.3.2 Sistema de excitação eletrodinâmico

O excitador eletrodinâmico superou as expectativas diante do desafio de se desenvolver três vibradores suspensos que transladassem junto com os cabos condutores quando este fosse tracionado. As conclusões foram os seguintes:

- a) resistência à operação junto ao cabo: os excitadores vibraram mais de 20 milhões de ciclos durante oito meses, sem apresentar defeitos ou falhas. Antes da instalação dos equipamentos no alto das torres 1, eles foram testados em laboratório, no entanto, não se tinha ideia de que iriam suportar os testes ligado nos condutores da LTE sob ação das intempéries;
- b) controle da amplitude da vibração harmônica: os ensaios foram realizados com controle de velocidade na mesa dos excitadores, com malha fechada pelos acelerômetros. Como os condutores vibravam também por influência dos ventos e também por sobreposição de ondas, refletiam nas torres 2 e 3, a sintonia dos controladores acabou prolongando os testes. O resultado foi que para manter os 50 mm/s, obteve-se um erro na faixa de  $\pm 10$  mm/s. Para possibilitar a comparação entre os testes realizados na LTE, foi utilizado um algoritmo de resposta em frequência (*Frequency Response*), que viabilizou a análise vibracional dos cabos condutores;
- c) curso da mesa dos excitadores: o curso projetado para o excitador atendeu satisfatoriamente as demandas quando o condutor estivesse na mínima e máxima trações. O sistema traslada verticalmente para evitar forçar o êmbolo do equipamento e por consequência a bobina atuadora (*voice coil actuator*), limitando a sua atuação, podendo inclusive danificá-la;



d) força senoidal e pulso: os testes realizados com aquisição de dados foram realizados somente com excitação senoidal (harmônica), com teste realizados com velocidades de até 700 mm/s, muito acima dos 50 mm/s, necessários para os testes. Os testes com pulso foram realizados, no entanto sem aquisição de dados, com resultados aparentemente satisfatórios, baseando-se na percepção audiovisual.

O projeto deverá ter continuidade e o potencial dos excitadores eletrodinâmicos, como, por exemplo, estendendo o seu uso para ensaios modais.

### 8.3.3 Sistema de tração dos condutores da LTE

Através de um sistema de controle do tipo PID desenvolvido em ambiente LabVIEW®, foi possível manter o carregamento desejado em uma faixa  $\pm 2\%$  desde ensaios de curta duração (50 min) e também por centenas de horas (ensaio de vibração excitado pelos ventos). O curso de 700 mm não é o suficiente para as trações mais elevadas, quando a temperatura ambiente está em torno de 30° C, devido a dilatação dos cabos condutores.

O controle atendeu os requisitos mesmo com ventos de até 10 m/s, o que permitiu que em momentos em que a LTE fosse apanhada por rajadas de ventos, a tração não saísse da faixa de  $\pm 2\%$  da tração alvo.

### 8.3.4 Programa desenvolvido para a LTE

Os programas desenvolvidos para a LTE são modulares, podendo a qualquer momento serem implementados novos ensaios em espaços no código reservados para este fim. Foram desenvolvidos três módulos de ensaios para a LTE:

- e) monitoramento da ação eólica na LTE (cabos, acessórios e estrutura) com disparos da execução do registro de dados:
  - gravação dos sensores da LTE (célula de carga, anemômetros e etc.);
  - disparo por períodos pré-definidos de tempo (a cada 5 min);

- disparo por superação de patamar predefinido de ventos, como rajadas de ventos, com intensidade definidas pelo operador;
- por nível de vibração baseado na amplitude determinada pelo operado, em  $\mu\text{m}_{\text{p-p}}$ .

Este programa foi utilizado durante quatro meses e os dados adquiridos não foram utilizados para este trabalho, compondo trabalhos mencionados no capítulo 9.

a) monitoramento da ação eólica na LTE (cabos, acessórios e estrutura) com registro de dados feitos continuamente:

- gravação dos sensores e controle de tração dos condutores continuamente;
- definição das trações alvo para cada um dos três condutores, ou, se preferir, definir qual fase será testada individualmente;
- período em que os blocos de dados serão enviados para o disco rígido do computador local;
- registro de erros foi gravado em um arquivo destacado para a esta função.

b) Excitação do condutor de forma harmônica por varredura de frequência:

- Os ensaios foram realizados em cada uma das fases, separadamente;
- As trações foram controladas dentro da faixa de  $\pm 2\%$  do valor almejado;
- A duração e faixa de frequência definem a rampa de varredura em frequência, valores inseridos pelo operador;
- Os dados foram gravados durante todo o período de tempo e enviado de uma só vez para o disco rígido, onde ficou disponível para análise em momento oportuno;
- A velocidade de excitação vibracional definida para varredura foi de 50 mm/s;

## 9 TRABALHOS FUTUROS

Como fruto do desenvolvimento da LTE e os dados adquiridos neste laboratório e no LECA durante os ensaios realizados, abre-se um leque de oportunidades para a continuação da pesquisa. A seguir são mencionados alguns trabalhos em andamento e outros que se vislumbra até o momento e de possível realização.

### 9.1 PROJETOS DE P&D EM ANDAMENTO

Os projetos mencionados a seguir irão utilizar os atributos da LTE assim como implementar novas funcionalidades. Para tanto foram aprovados pela COPEL, em uma primeira fase, alguns projetos de P&D, são eles:

- a) Desenvolvimento de Amortecedores Customizados Construídos por Manufatura Aditiva

Este projeto está sendo escrito entre o Lactec e a PUC-PR. Os ensaios dos amortecedores desenvolvidos serão testados na LTE, para o levantamento da eficiência dos acessórios desenvolvidos no projeto.

Proponente: Instituto de pesquisa para o desenvolvimento - Lactec.

Co executor: PUC-PR.

- b) Estudo e Avaliação de Linhas de Transmissão Compactas com Potência Natural Elevada, para Níveis de até 525 kV, 1850 MW

Este trabalho tem por objetivo estudar a viabilidade de construção de uma LPNE (Linha de Potência Naturalmente Elevada), no âmbito do conceito de linhas compactas com capacidade de transmissão de potência mais elevada que o usual (1850 MW em circuito simples) por meio de técnicas de arranjo dos feixes de condutores e de potência natural elevada. Muitos dos conhecimentos obtidos no projeto, construção e operação da LTE serão utilizados para o desenvolvimento da LPNE, utilizando tecnologia em fibra óptica para a instrumentalização da linha.

Proponente: Lactec

- c) Avaliação da resposta mecânica de torres e linhas de transmissão à ação do vento

Há mais de um século estruturas treliçadas vêm sendo utilizadas em linhas de transmissão de energia elétrica, entretanto, os efeitos do vento sobre esses componentes não são inteiramente conhecidos. Assim, essa proposta surge da real necessidade, da engenharia da COPEL, de estudos e medições dos coeficientes de arrasto de cantoneiras e de seções completas de torres, possibilitando a comparação com os coeficientes de arrasto trazidos pelas normas NBR 5422/1985 e/ou IEC 60826. Neste projeto prevê-se a utilização das torres da LTE para instrumentação e monitoramento juntamente com o comportamento dos cabos que equipam a linha.

Proponente: Lactec.

## **9.2 CONTINUIDADE DA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS DA LTE BASEADO NOS DADOS ADQUIRIDOS DURANTE O PROJETO**

No período de oito meses foram adquiridas centenas de horas de dados dos sensores da LTE, sendo em torno de 10% deles efetivamente explorados para este trabalho. Para se ter ideia do que se está falando, são em torno de 500 MB de dados gravados de 41 sensores, permitindo a análises da parte estrutural (torre 1), três diferentes tipos de condutores, os próprios sistemas da LTE e o ineditismo aplicado nas soluções técnicas adotadas, comportamento vibracional eólico entre outros. A seguir sugestões de alguns trabalhos baseado no que foi mencionado:

- a) Análise da resposta em frequência das varreduras de frequência baseado nos acelerômetros dos vibradores eletrodinâmicos

As análises da resposta em frequência das varreduras realizadas em frequência nas três amostras foram feitas tomando como base os valores de força lidas pelas células de carga instaladas nos êmbolos dos três vibradores eletrodinâmicos e a amplitude nos vibrógrafos instalados na torre 2. Essas mesmas análises podem ser feitas a partir dos acelerômetros instalados na mesa destes mesmos excitadores.

Outras formas de avaliar o comportamento vibracional dos três condutores é analisar os estímulos obtidos através das células de carga e acelerômetros dos vibradores eletrodinâmicos utilizando os seis acelerômetros instalados nos três condutores a 20 e 60 m a partir da estrutura 2.

b) Análise modal operacional (AMO)

Baseado nos dados dos dois anemômetros instalados na torre 1 e 2 da LTE é possível realizar estudos de técnicas de análise modal operacional nos condutores da LTE, sujeitos a excitações eólica aleatórias com a presença de componente harmônico. Essa técnica pode ser comparada com os ensaios realizados com os excitadores eletrodinâmicos para validação da metodologia em diferentes configurações.

### **9.3 TRABALHOS NA ÁREA ACADÊMICA EM ANDAMENTO QUE SE BENEFICIARÃO DO TRABALHO REALIZADO**

Com os dados já adquiridos no projeto da LTE atual, está sendo municiado de dados e informações os seguintes trabalhos de pós-graduação (*strictu sensu*):

a) Título ainda não definido: doutoranda Jacqueline Terre

Neste trabalho utilizaram-se procedimentos de análise modal operacional (OMA, do inglês, *Operational Modal Analysis*) que é feita considerando a influência de forças externas desconhecidas, enquanto a análise modal experimental (EMA, do inglês, *Experimental Modal Analysis*) é desenvolvida em laboratório, com todas as cargas de entrada controladas. A EMA utiliza sinais que podem estar no domínio do tempo ou no domínio da frequência e, dependendo da origem do sinal, diferentes métodos para a identificação dos parâmetros modais são utilizados. Neste trabalho foram utilizados dois métodos no domínio do tempo: SSI-Cov e SSI-Data; um no domínio da frequência: Peak Peaking. Parte do estudo aborda o caso do comportamento vibracional dos cabos condutores da LTE.

b) Identificação dos parâmetros modais em cabos de transmissão (título provisório: doutoranda Mayara Calado)

O trabalho em andamento trata da análise dinâmica e estrutural de três diferentes cabos ensaiados: Greeley, Phosphorus e Tern, nos vãos de 34 e 54 m, com trações mecânicas variáveis (entre 7 e 35% da tração de ruptura). Os ensaios dinâmicos foram realizados em uma bancada de testes de componentes de linhas de transmissão utilizando-se um martelo de impacto para excitação do sistema e cinco acelerômetros para obtenção dos dados vibratórios. São também mostrados resultados experimentais com o amortecedor *Stockbridge* em diferentes posicionamentos variando-se a tração no cabo Greeley. Baseado nos dados obtidos por dois anemômetros instalados na torre 1 e 2 da LTE é possível realizar estudos de técnicas de análise modal operacional (AMO) nos condutores da LTE, sujeitos a excitações eólica aleatórias com a presença de componente harmônico. Essa técnica pode ser comparada com os ensaios realizados na bancada do LACTEC para validação da metodologia.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT/CB-003. **Ensaio de resistência elétrica**. ABNT. [S.l.], p. 3. 1986. (ABNT NBR 6814:1986 versão corrigida 2001).

ABNT/CB-003. **Fios e cabos elétricos - Ensaio de resistência elétrica**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, p. 3. 2001. (NBR 6814:2001).

ABNT/CB-003. **Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, p. 49. 2009.

ABNT/CB-003. **Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, p. 64. 2012. (ABNT NBR 7117:2012).

ABNT/CB-003. **Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, p. 47. 2013. (15751:2013).

ABNT/CB-003. **Condutor elétrico de alumínio — Retirada e preparo de corpo-de-prova para ensaio de tipo**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.], p. 3. 2014. (29.060.20).

ABNT/CB-003 ELETRICIDADE. **Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. ABNT. São Paulo, p. 57. 1985.

AGUILERA, J. R. F. D. **Estudo de dispositivos para avaliação de vibração e análise modal experimental de cabos de linhas de transmissão**. Universidade federal do Pará. Belém, p. 78. 2005.

ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. D. **Fundamentos de metrologia**. primeira edição. ed. Barueri: Manoele, v. 1, 2012. 408 p.

ALENCAR, R. F. M. D. **Fadiga em cabos condutores tipo CAL dispostos em feixe duplo vertical - um estudo de caso para uma linha de transmissão de 230 kV**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 102. 2014.

AMARAL, G. R. D.; LOPES, E. M. D. O. METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA EFICÁCIA DE NEUTRALIZADORES DINÂMICOS DE VIBRAÇÃO PARA CABOS AÉREOS. **Revista interdisciplinar de pesquisa em engenharia**, Brasília, 9 Novembro 2016. 20. CILAMCE 2016.

ARAÚJO, J. A. et al. AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE CABOS. **XXII SNPTEE - Seminário Nacional de produção e transmissão de energia elétrica**, Brasília, 2013 outubro 2013. 8.

AZEVEDO, C. R. F. et al. Fretting fatigue in overhead conductors: Rig design. **Engineering Failure Analysis**, 20 Janeiro 2008. 136 - 151. Acesso em: 06 Fevereiro 2008.

BALLUFF. **Linear Position Sensing and Measurement**. [S.l.]. 2016.

BARBIERI, N.; BARBIERI, R.; JÚNIOR, O. H. D. S. **STRUCTURAL DAMPING ESTIMATION OF TRANSMISSION LINE CABLES**. 17th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM2003. São Paulo, p. 8. 2003.

BARRETT, J. S.; MOTLIS, Y. Allowable tension levels for overhead-line conductors. **IEE Proc.-Gener. Distrib.**, 148, n. No. 1, January 2001. 54-59.

BARRY, O. **Finite Element Analysis of a Single Conductor with a Stockbridge Damper Under Aeolian Vibration**. Ryerson university. Toronto, p. 135. 2010.

BARRY, O.; ZU, J.; OGUAMANAM, D. C. D. Analytical and experimental investigation of overhead transmission line vibration. **Journal of Vibration and Control**, 21, 2015. 2825 - 2837.

BELLORIO, M. B. **Revisão sobre critérios de fadiga para cabos condutores de energia e uso de metodologia para estimativa de sua vida remanescente**. Universidade de Brasília - UNB. Brasília, p. 89. 2010.

BUCKNER, W.; KERNER, H.; PHILIPPS, W. Stresses in transmission line conductors near the suspension clamp. **International conference on large high tension electric systems - CIGRÉ**, Paris, 20 Junho 1968. 14.

CASTRO, C. A.; BRACARENSE, A. Q. Avaliação de uma nova metodologia para cálculo de acúmulo de dano considerando as cargas aplicadas durante todo o carregamento. **CONEM 2008**, Salvador, 2008. 8.

CAVALCANTE, T. F. B. **Implantação do sistema de qualidade no laboratório de fadiga em cabos condutores da universidade de Brasília: fase II**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 66. 2012.

CEMIG. **Estudos comparativo de vibração eólica para diferentes critérios de esticamento de cabos de LT's**. Belo Horizonte, p. 42. 2007.

DAYOU, J. **Fixed-points theory for global vibration control using vibration neutralizer**. Journal of Sound and Vibration. Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia, p. 765-776. 2006.

DEN HARTOG, J. P. **Mechanical Vibrations**. 3ª. ed. Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill Book Company, 1947.

DIANA, G. et al. Field measurement and field data processing on conductor vibration (comparison between experimental and analytical results). **International conference on large high voltage electric systems**, Paris, 9 Setembro 1982. 9.

DIANA, G. et al. Dynamic analysis of the transmission line crossing "Lago de Maracaibo". **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 74-76, 1 Abril 1998. 977-986. Acesso em: 7 Janeiro 2000.

DIANA, G. et al. Large Wind-Induced Vibrations on Conductor Bundles: Laboratory Scale Measurements to Reproduce the Dynamic Behavior of the Spans and the Suspension Sets. **IEEE transaction on power delivery**, Milano, 20, abril 2005. 8.

DULHUNTY, P. Vibration damper on ACC and AAC conductors. **22nd International Conference on Electricity Distribution**, Estocolmo, Suíça, 10-13 Junho 2013.

DYKE, P. V.; HARDY, C.; ST-LOUIS, M. Comparative field tests of various practices for the control of wind-induced conductor motion. **IEEE Power & Energy Society**, 12, Abril 1997. 1029 - 1034.

ENGETOWER. **LT 230 kV Experimental Circuito Simples**. Belo Horizonte, MG. 2015.



ENGETOWER ENGENHARIA. **Torre tipo PDS 2 - Lista de materiais, parafusos e ferragens**. Belo Horizonte, p. 38. 2014.

EPRI. **EPRI Transmission Line Reference Book—Wind-Induced conductor Motion**: The “Orange Book”. second edition. ed. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2008. 114-116 p. ISBN 1016294.

EPRI. **EPRI transmission line book reference - wind induced conductor motion**. Palo Alto, p. 130. 2009.

FADEL, A. A. et al. Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an Ibis steel reinforced aluminium conductor. **International Journal of Fatigue**, Brasilia, 42, 07 Stembro 2012. 24-34. Acesso em: 25 Março 2011.

GEARY, R. et al. **Introduction of high temperature low sag conductors to the Irish transmission grid**. Cigré. Paris, p. 12. 2012.

GUERY, D. et al. Aeolian vibrations on high voltage lines comparative self damping as evaluated on the field. **CIGRÉ B2-214 2008**, Paris, 25-29 Agosto 2008. 11.

HEICS, R. C.; HAVARD, D. G. Influence of vibration recorders on conductor vibration. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Toronto, 9, 2 Abril 1994. 919-938.

HENRIQUES, A. M. D. **Bancada de ensaios mecânicos à fadiga de cabos condutores de energia**. Brasília, p. 162. 2006.

HORTÊNCIO, T. M. D. O. S. **Ensaio de fadiga sob condições de fretting com o cabo CAA 397,5 MCM - ibis**. Universidade de Brasília - UNB. Brasília, p. 101. 2009. (ENM.DM-141/09). Dissertação de mestrado.

HUNG, P. V. et al. Large amplitude vibrations of long-span transmission lines with bundled conductors in gusty wind. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 126, Março 2014. 48-59.

IEEE PES. **IEEE Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors**. IEEE. New York, p. 35. 2007.

IEEE TD. **IEEE Guide for Laboratory Measurement of the Power Dissipation Characteristics of Aeolian Vibration Dampers for Single Conductors**. new York, p. 23. 1993.

IEEE TD. **IEEE Guide for Aeolian Vibration Field Measurement of Overhead Conductors**. IEEE Power Engineering Society. New York, p. 35. 2006. (0-7381-5309-5 SS95610).

KALOMBO, R. B. et al. Assessment of the fatigue failure of an All Aluminium Alloy Cable (AAAC) for a 230 kV transmission line in the Center-West of Brazil. **Engineering Failure Analysis**, 05 setembro 2015. 77 - 87. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/efa](http://www.elsevier.com/locate/efa)>. Acesso em: 2017.

KALOMBO, R. B. et al. Influence of the catenary parameter (H/w) on the fatigue life of overhead conductors, Abril 2017. 141 - 149.

LABEGALINI, P. R. et al. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. 2ª edição. ed. São Paulo, SP: Edgard Blucher Ltda, 1992.

LÉVESQUE, F. et al. Experimental Study of Dynamic Bending - Stiffness of ACSR Overhead Conductors. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, 30, 20 Abril 2015. 2252 - 2259. Acesso em: 21 Setembro 2015.

MANNALA, M. J. et al. **Linhas de transmissão de energia experimental automatizada para ensaios mecânicos reais**. National Instruments. São Paulo, p. 6. 2017.

MANNALA, M. J.; HOFFMANN, J. N. Medição de parâmetros elétricos em condutores de linhas de transmissão sob condições de tracionamento e temperatura nominais de operação. **Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica**, Recife, Novembro 2009. 8.

MINER, M. A. Cumulative Damage in Fatigue. **Journal of Applied Mechanics**, 1945. 159-164.

MUNASWAMY, K.; HALDAR, A. Self-Damping Measurements of Conductors with Circular and Trapezoidal Wires. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, 15, Abril 2000. 604-609.

NATIONAL INSTRUMENTS. **NI USB-9234 - 4-Channel,  $\pm 5$  V, 24-Bit Software-Selectable IEPE and AC/DC**. National Instruments. Austin, p. 23. 2016.

NIGOL, O.; HOUSTON, H. J. **Aeolian Vibration of Single Conductor and Its Control**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. [S.l.], p. 3245-3254. 1985.

PCB PIEZOTRONICS. **Model 601A01 - Platinum Low-cost Industrial ICP® Accelerometer**. PCB Piezotronics, Inc. Depew, p. 19. 2016.

PFISTERER. **Advanced Recorders To Measure Conductor Motions**. PFISTERER SEFAG AG. Winterbach, p. 6. 2018.

POFFENBERG, J. C.; SWART, R. L. Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 84, Abril 1965. 281 - 289. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4766192/>>.

PUFFER, R. et al. **220-kV field study of different high temperature low sag conductors**. Cigré. Paris, p. 8. 2014.

RAWLINS, C. B. Flexural self-damping in overhead electrical. **Journal of Sound and Vibrations**, New York, n. 323, 16 Abril 2009. 232-256. Acesso em: 31 Janeiro 2009.

ROBERTO DA SILVA LEME, I. P. C. **Monitoramento de campo das vibrações eólicas**. PLP Brasil. Cajamar, p. 9. 2005. (DOC N° 695 rev-1).

ROLIM, A. L. et al. Differential displacement and strain analysis of transmission line. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Brasília, 15 Junho 2013. 327 - 336.

SADEL. **catálogo de ferragens eletrotécnicas**. Sadel indústria metalúrgica. Jacareí, p. 80. 2018.

SANTOS, A. S. D. **Estudo de vibrações eólicas em linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão**. Universidade do Pará. Belém, p. 197. 2008. (CDD 19ª 620.3).

SCHIMITH, S. B. **Vibrógrafo autônomo para aquisição remota de dados de vibrações eólicas de linhas de transmissão elétricas suspensas**. Universidade Estadual de Londrina. Londrina, p. 71. 2012. (vtls000182063).

SCHMIDT, J. T.; BIEDENBACH, G.; KRISPIN, H. J. Laboratory Measurement of the Power Dissipation Characteristics of Aeolian Vibration Dampers. **IEEE transaction on power apparatus**, Schwabach, 15-20 setembro 1996. 352-358.

SILVEIRA, D. S. R. M. D. **Relatório de ensaios geotécnicos**. Lactec. Curitiba, p. 17. 2015. (4281 2015).

SMITH, G. W.; MAILEY, S. The Henday Radisson Dorsey 500 kV DC transmission line spacer damper rehabilitation project. **2003 IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 2003. 2003 IEEE ESMO.**, Orlando, p. 67-73, 29 abril 2003.

SOUZA\_JUNIOR, O. H. D. **Vibrações em cabos aéreos de linhas de transmissão - estudo teórico e experimental por meio de modelos lineares e não lineares**. Universidade Católica do Paraná. Curitiba, p. 211. 2010.

STROUHAL, V. **On a Particular Way of Tone Generation**. [S.l.]: New series, v. 5, 1878.

SUBSTATION COMMITTEE. **IEEE guide for safety in AC substation grounding**. IEEE Power Engineering Society. New York, p. 191. 2000. (0-7381-1927-X).

TC 64. **Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects**. International Electrotechnical Commission. [S.l.], p. 117. 2005. (60479-1:2005).

TEBO, G. B. Measurement and control of conductor vibration. **Electrical Engineering**, 60, Dezembro 1941. 1188-1193.

TEMINOVA, R. et al. New approach to overhead line conductor temperature measurement by passive remote surface acoustic wave sensors, Paris, 2006. 9.

TIMASHOVA, L. et al. **New conductor types application for overhead transmission lines design optimization and reliability improvement**. cigré. Paris, p. 11. 2014.

TRANSMISSION AND DISTRIBUTION COMMITTEE. **IEEE Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors**. IEEE Power Engineering Society. New York, p. 25. 2007. (IEEE Std 1368-2006).

VARGAS, A. J. **Certificado de calibração dos termopares tipo T**. Lactec. Curitiba, p. 2. 2016. (CCL 025/17).

WG 22.04. Recommendations for the evaluation of the lifetime of transmission line conductors. **electra**, Paris, p. 43, 1979.

WG B2.12. **ALTERNATING CURRENT (AC) RESISTANCE OF HELICALLY STRANDED CONDUCTORS**. cigré. [S.l.], p. 59. 2008. (978-2-85873-033-9).

WG B2.48. **Experience with the mechanical performance of non-conventional conductors**. Cigré. Paris, p. 84. 2017. (978-2-85873-398-9).

WHAPHAM, R. Aeolian Vibration of Conductors: theory, laboratory simulation & field measurement. **ELECTRICAL TRANSMISSION AND SUBSTATION STRUCTURES 2012**, Mayfield Village, 09 Novembro 2012. 262 - 274.

## APÊNDICES

**A. ANÁLISE ESTRUTURAL PARA A ANCORAGEM DOS SISTEMAS  
DE TRAÇÃO**

## ANÁLISE ESTRUTURAL PARA A ANCORAGEM DOS SISTEMAS DE TRAÇÃO

A análise do projeto da torre de ancoragem, modelo PDF60, foi realizada para encontrar uma solução quanto ao tracionamento dos cabos condutores. Essas modificações, por outro lado, não podiam alterar significativamente o projeto inicial ou, caso necessário, alterar o mínimo possível para que não afetassem os carregamentos previstos no projeto inicial da torre.

A análise foi realizada com base nos arquivos “Cálculo estrutural do projeto da torre PDF60” (ENGETOWER, 2015). Para facilitar a visualização dos pontos de ancoragem, foram feitos desenhos em 3D de partes da torre onde são ancorados os condutores. Neste caso, foram encontrados dois pontos diferentes de ancoragem: a “mísula”, onde são ancoradas as fases laterais, Figura 47, e um ponto junto ao corpo da torre, onde é ancorada a fase superior, Figura 48.

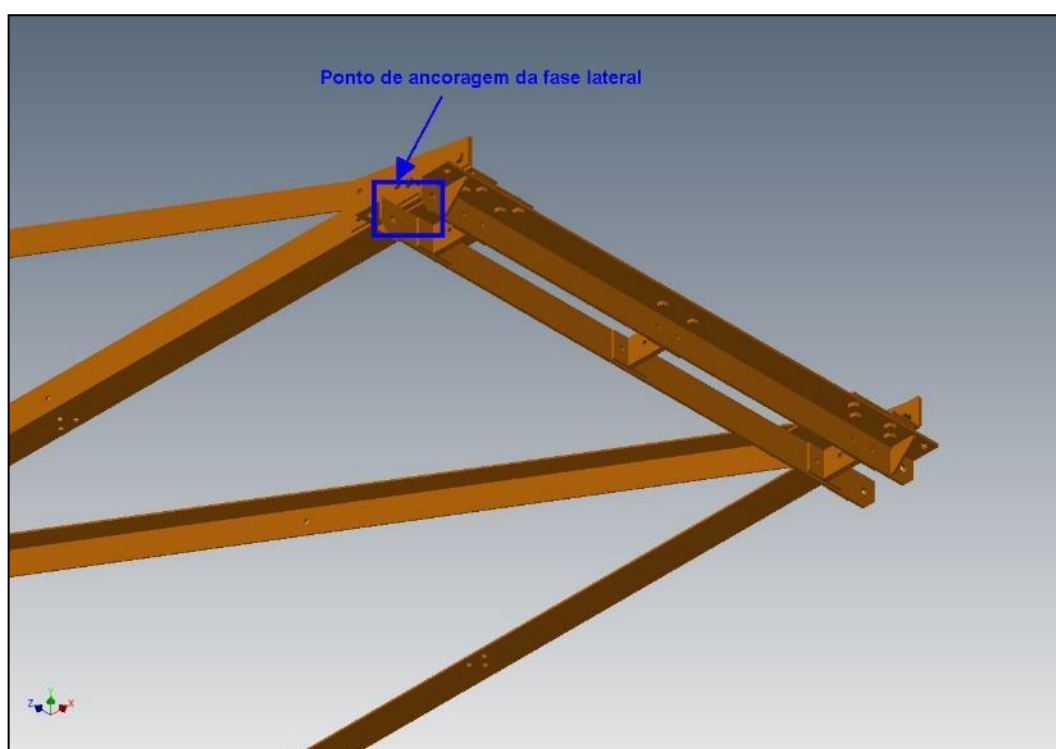


Figura 47 - Ponto de ancoragem da fase lateral na mísula (fases 1 e 2)  
Fonte: Lactec.

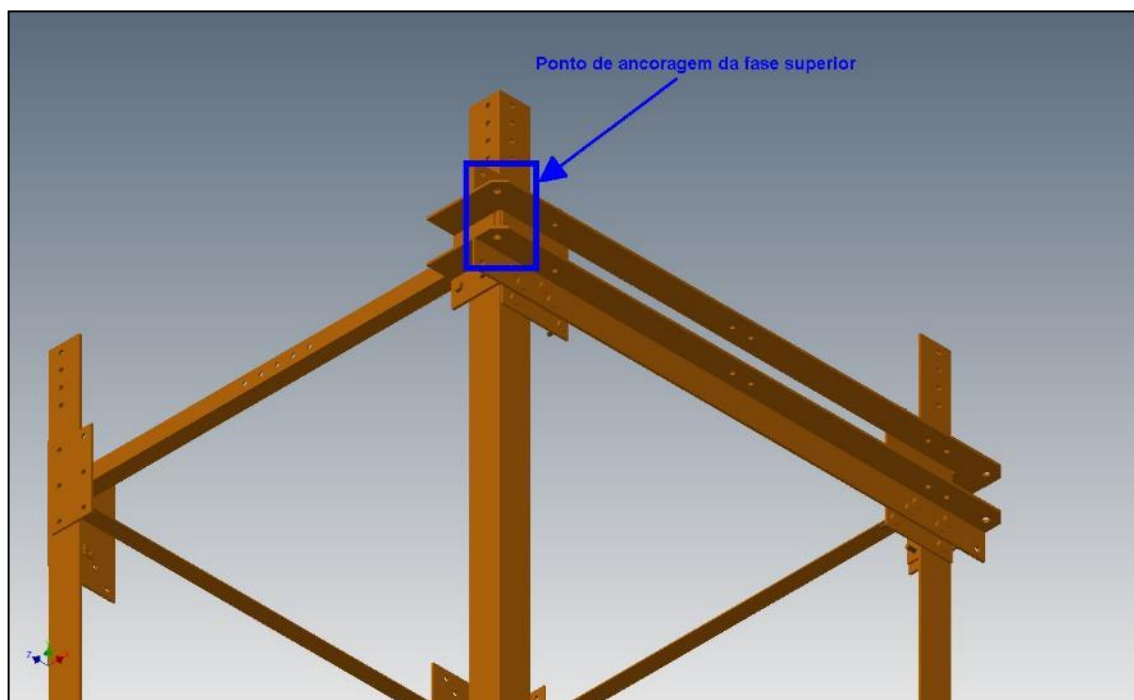


Figura 48 - Ponto de ancoragem da fase superior (fase 3)  
Fonte: Lactec.

Ao analisar os pontos onde são ancorados os condutores, foi observado que, pelo modo que foram dispostos, não havia como inserir um sistema para tracionar o cabo. Com isso, foi necessário analisar a possibilidade de uso de outros pontos encontrados no projeto original.

Para a mísula, foi possível aproveitar os pontos utilizados para a ancoragem de cargas durante a montagem da torre para a fixação do sistema. Para que isso fosse viável, fez-se necessário o aumento de tamanho de duas cantoneiras das mísulas das fases 1 e 2 para a fixação do sistema de excitação, Figura 49.



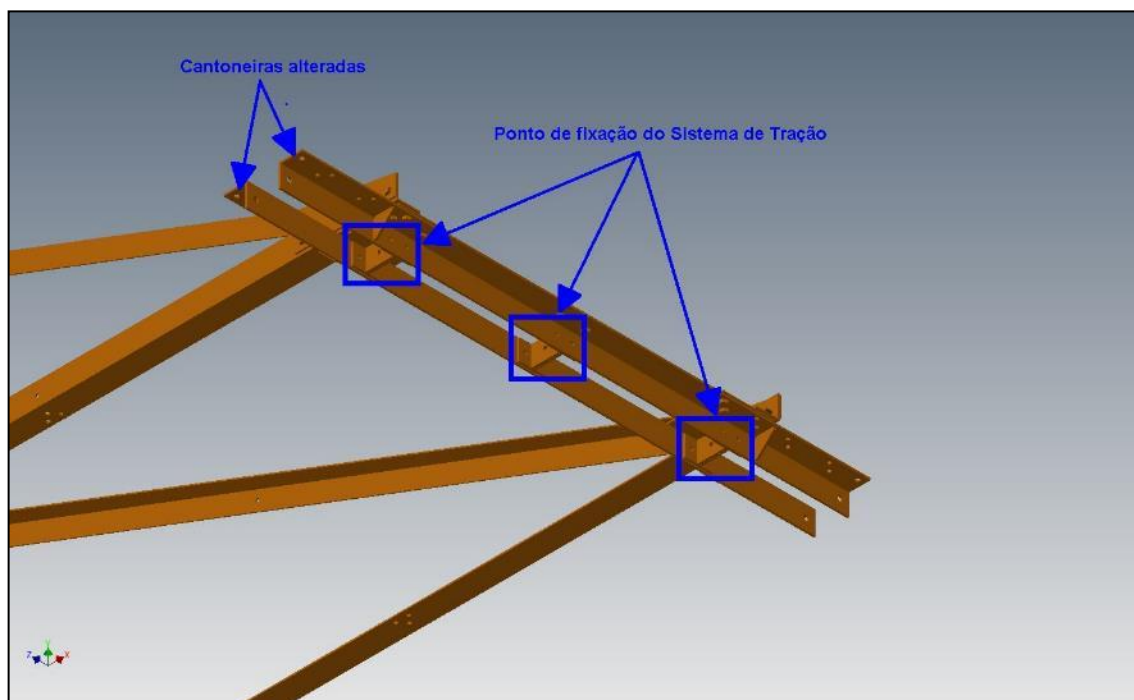


Figura 49 – mísula fases 1 e 2 alterada em relação ao projeto original  
Fonte: Lactec.

Para a fase superior (fase 3), não foi possível aproveitar a estrutura já existente, foi necessário a alteração da fixação, como visto na Figura 50.

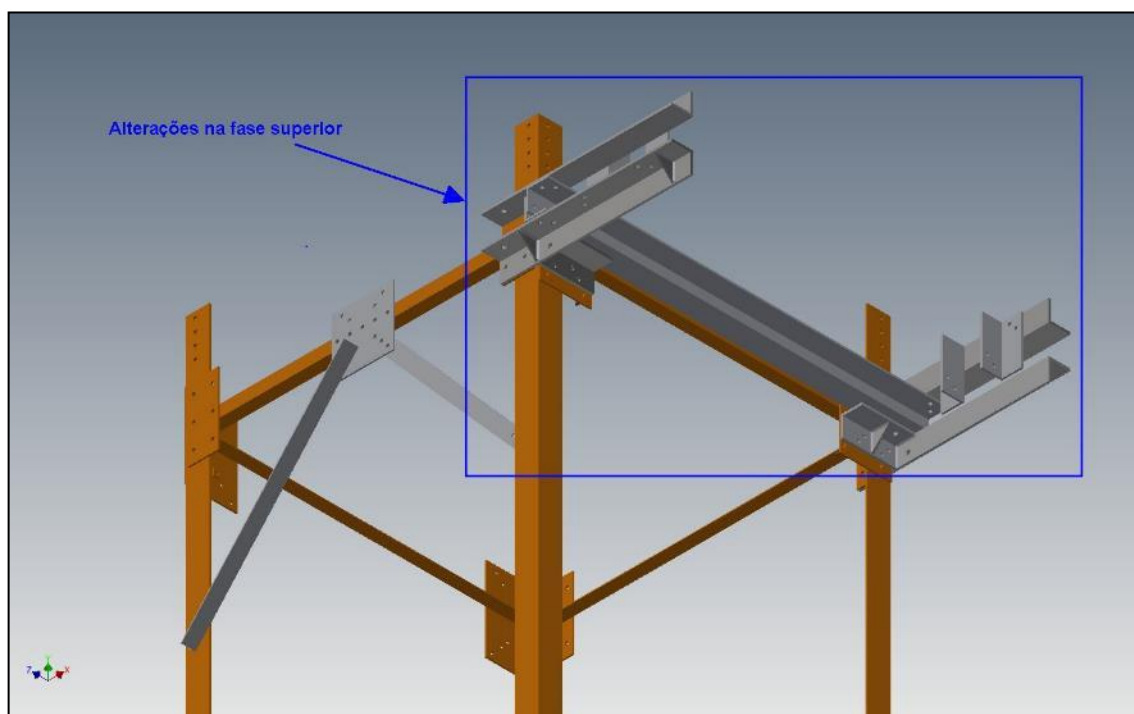


Figura 50 - Alteração na fase superior (fase 3)  
Fonte: Lactec.

O cálculo da força devido à massa do cabo, isoladores e da força devido ao vento, foi baseado nos dados obtidos na especificação do fabricante do cabo Tern e dos isoladores fornecidos pelo arquivo do “Cálculo estrutural do projeto da torre PDF60” (ENGETOWER, 2015), Tabela 41. Esses cálculos foram realizados considerando o vão gravante entre a torre de ancoragem, onde está instalado o sistema de tração e a torre de suspensão.

## **B. CONSTRUÇÃO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL**

## **CONSTRUÇÃO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL**

O objetivo principal para a construção da Linha de Transmissão Experimental (LTE) foi a identificação dos efeitos vibracionais diante das diferentes trações em cabos de transmissão de energia elétrica em condições mais próximas possíveis às condições reais. Como o comportamento vibracional está associado ao comprimento das amostras analisadas, foi projetada e construída uma linha de transmissão contendo um vão destinado para testes nos cabos condutores, para as medições com ventos e vibrações forçadas induzidas. Assim os experimentos realizados em laboratório permitem uma comparação aos testados em condições de campo.

Esta seção apresenta as adequações de infraestrutura necessárias, contendo detalhes dos aspectos construtivos da linha de transmissão, a fim de avaliar o comportamento vibracional dos cabos, acessórios e estrutural das torres.

### **TERRENO PARA CONSTRUÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL**

O espaço destinado a construção da LTE deve cumprir os seguintes pré-requisitos para a seleção do local:

- a) permitir que o vão experimental tenha os cabos nivelados e o mais próximo dos vãos médios utilizados;
- b) fácil acesso até o local onde as estruturas se encontram;
- c) acesso à energia elétrica e dados (internet);
- d) permitir que a linha possa ser construída perpendicularmente aos ventos predominantes na região;
- e) disponível para a construção e operação, com o menor tráfego de transeuntes e veículos possível;
- f) segurança das instalações, minimizando o risco de furtos e danos nas instalações da linha experimental.

Dos seis terrenos disponíveis analisados o que mais se aproximou das características citadas está situado ao lado da subestação de 230 kV de Campo Comprido, dentro do município de Curitiba, no bairro de Orleans.

## REQUISITOS TÉCNICOS PARA O PROJETO DA LTE

A seguir seguem os requisitos para a construção da linha experimental:

- a) as estruturas devem ser para circuito simples, cabos singelos e tensão de 230 kV, muito utilizadas no Brasil;
- b) as estruturas assim como a fundação deve suportar as trações de testes, permitindo atingir valores de até 60% acima dos valores usuais de projeto, limitado a 5000 kgf (5 tf) por fase;
- c) ter flexibilidade de projeto para compensação do terreno através do uso de extensões dos pés e o corpo da torre, permitindo o nivelamento dos cabos no vão experimental;
- d) Os três cabos condutores devem distintos, porém, com capacidades de corrente próximas entre si, possibilitando a comparação entre eles. Esses condutores devem ser de diferentes compostos e materiais, sendo bem requisitados em projetos praticados no Brasil;
- e) permitir a comunicação entre as torres através de fibra óptica.

### DESCRIÇÃO DOS CABOS UTILIZADOS NA LTE

Os cabos selecionados são compostos por um cabo convencional do tipo CAA e outros dois mais recentemente utilizados no Brasil, os cabos CAL. Eles são descritos a seguir:

- a) Tern: cabo de alumínio com alma de aço (CAA) 795 kcmil e diâmetro de 27,00 mm, composto por 7 fios de aço e 19 fios de alumínio liga 1350 e resistência mecânica calculada (RMC) de 98,05 kN (vide os anexos A);
- b) Greeley: cabo composto inteiramente de material de alumínio, liga 6201, 37 fios, bitola de 927 kcmil, diâmetro de 28,14 mm e RMC de 135 kN (vide anexo B); e
- c) Phosphorus: cabo composto inteiramente de material de alumínio, liga 1120, 37 fios alumínio liga 1120, a bitola do cabo é de 823 kcmil, diâmetro de 26,53 mm e RMC de 91,2 kN (vide anexo C).

Como é descrito com maiores detalhes nas próximas seções, as torres demandam dois cabos para-raios. Para cumprir os pré-requisitos, um deles será utilizado para a comunicação entre os sistemas de controle e aquisição de dados entre as torres. Os cabos para-raios utilizados são descritos a seguir:

- a) Dotterel: cabo de alumínio com alma de aço extraforte, com bitola de 176,9 kcmil, 15,40 mm de diâmetro e carga de ruptura de 76,85 kN (vide anexo D);
- b) cabo para-raios com fibra óptica modelo DG1.030.133.S36: possui seção transversal de 101 mm<sup>2</sup>, com núcleo contendo tubo de alumínio de 7,1 mm de diâmetro e 10 fios de aço galvanizados, carga de ruptura de 93 kN e 36 fibras óptica do tipo monomodo (vide anexo E).

### **DESCRIÇÃO DAS ESTRUTURAS UTILIZADAS NA LTE**

As estruturas de ancoragem e de suspensão adotadas são torres treliçadas desenvolvidas pela empresa ENGETOWER. Elas derivam de projetos dos modelos CDF60 e CDS2, recebendo alterações na parte superior do tronco, a fim de suportarem esforços adicionais, tiveram os seus nomes alterados para PDF60 e PDS2

**Fonte bibliográfica inválida especificada..**

O primeiro vão da LTE é considerado o vão ativo, onde estão instalados os equipamentos e sensores e o segundo vão é o passivo. Na Figura 51 é contemplado da esquerda para direita a torre PDF60 (ancoragem), PDS2 (suspensão) e o perfil do terreno.

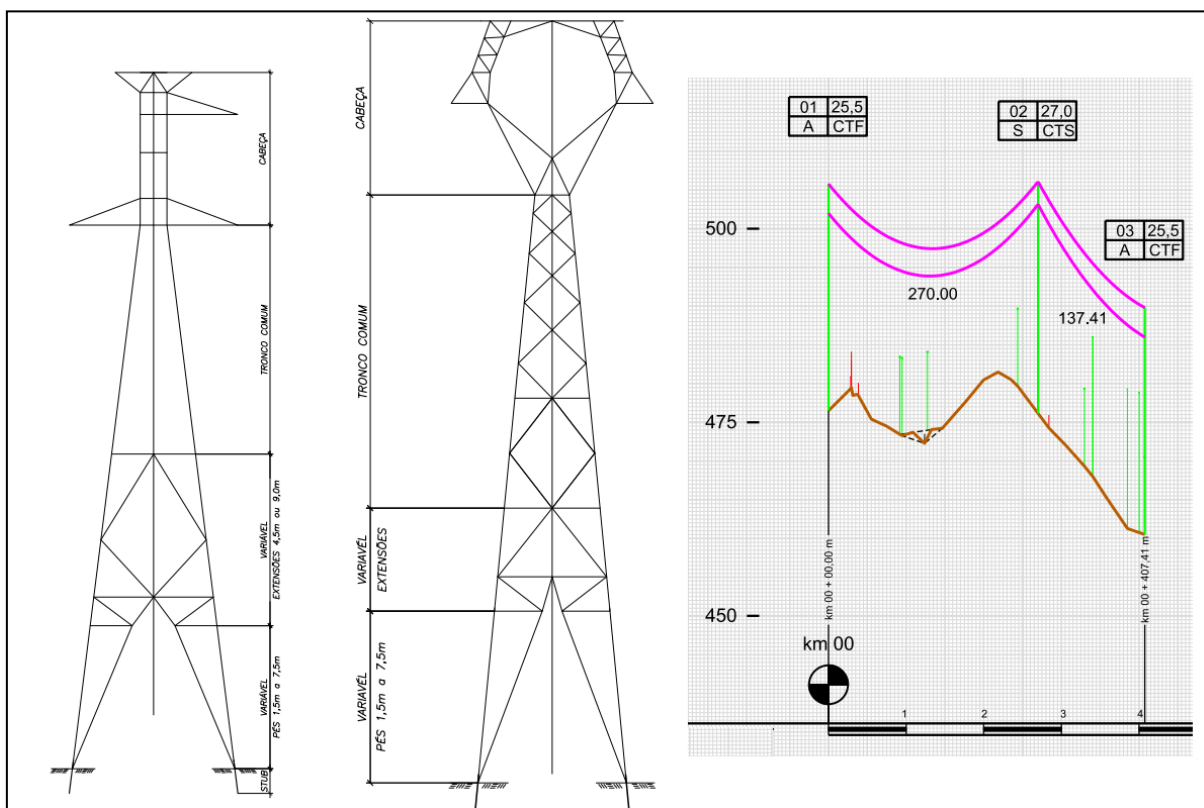


Figura 51. Estruturas PDF60, PDS2 e perfil do terreno  
Fonte: O autor.

Nos anexos F e G são mencionados os detalhes das hipóteses de carregamento das estruturas mencionadas, referentes a revisão do projeto, para suportar as cargas que são demandadas devidas às trações impostas pelos condutores durante os testes.

As estruturas foram distribuídas conforme os dados e perfil representado da Tabela 36.

Tabela 36 – Localização das estruturas

Est.	DIST.PROG. (m)	COTA EST. (m)	VÃO À FRENTE (m)	VÃO MÉDIO (m)	TIPO	ALTURA (m)
1		968,44	270,00	135,00	PDF60	25,5
2	270,00	968,11	137,41	203,70	PDS2	27,0
3	407,41	952,46		68,70	PDF60	25,5

Fonte: Copel GeT.

## FUNDAÇÃO DAS ESTRUTURAS

Foi realizada uma campanha para investigação do tipo de solo na qual foi alocada as três torres. Ela consistiu em executar sondagens à penetração com torque

(SPT) e ensaios de laboratórios, os quais compreenderam a testes para determinação da massa específica dos grãos e cisalhamentos direto **Fonte bibliográfica inválida especificada.**

Com base nos esforços máximos de projeto a serem suportados pelas torres, obtidos pelo projeto, as fundações foram construídas com tubulações de concreto, sendo também preenchidas com concreto em seu interior. A Figura 52 mostra as fundações das torres 1 a 3, com as ferragens (estub) emergido do concreto.



Figura 52. – Fundações das torres 1 a 3 concretada com as ferragens afloradas acima do concreto  
Fonte: O autor.

### LANÇAMENTO DOS CABOS

Quanto a instalação dos cabos condutores, como foram instalados três cabos diferentes, eles ficaram posicionados nas mísulas das estruturas de tal forma a minimizar o efeito torcional nas torres de ancoragem, devido às diferenças de tração nas três fases. Portanto, a disposição dos três cabos ficou a seguinte:

- fase (1) da esquerda: Tern;
- fase (2) da direita: Greeley; e
- fase (3) central: Phosphorus.

A Figura 53 apresenta a disposição das fases na torre de ancoragem (PDF60) e suspensão (PDS2).



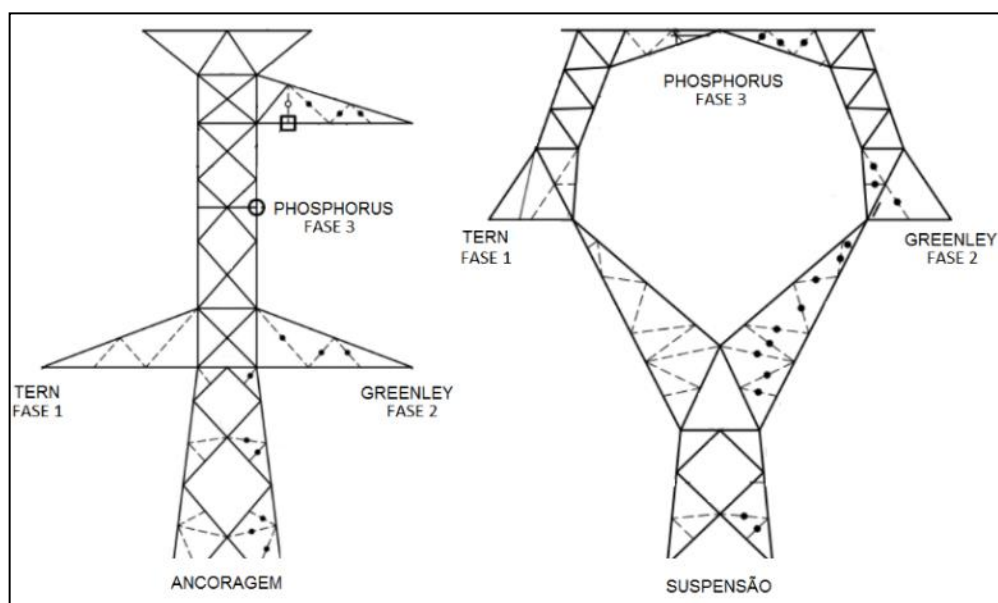


Figura 53. Posicionamento de cada tipo de cabo na torre PDF60 (à esquerda) e PDS2 (à direita)  
 Fonte: Engetower editada pelo autor.

No lançamento dos cabos condutores, as terminações nas ancoragens devem ter um valor que otimize o curso do carro de tração do sistema de tração, que possui curso útil total de 700 mm. Portanto, no início como no fim do curso, os valores das trações devem ser úteis para os ensaios.

Para isso, deve ser considerada a influência dos alongamentos (fluência ou *creep*), efeito da dilatação térmica do material e a deformação das duas ancoragens devido a variação das trações (torres 1 e 3). A equação (32) apresenta a soma das deformações que foram levadas em consideração durante a instalação dos cabos condutores.

$$D_{total} = 2D_{et} + D_{ec} + D_{tc} + D_{pc} \quad (32)$$

sendo que as variáveis  $D_{total}$ ,  $D_{et}$ ,  $D_{ec}$ ,  $D_{tc}$  e  $D_{pc}$ , se referem respectivamente: deformação elástica das ferragens da torre, deformação elástica do cabo, dilatação térmica do cabo e deformação plástica do cabo (fluência ou *creep*).

As imagens da Figura 54 seguir mostram as estruturas de 1 a 3 na etapa de nivelamento dos cabos condutores e dos para-raios.



Figura 54. Estrutura de número três pós-lançamento de cabos (à esquerda) e o vão experimental formado pelas torres 1 e 2  
Fonte: O autor.

Após o lançamento dos cabos, o condutor Tern foi tracionado com 32% da RMC (31,375 kN), sendo que as outras fases foram niveladas baseada na catenária do cabo Tern. Os condutores foram tracionados até 35% da RMC por três dias em acomodação, com o objetivo de que as fundações das torres tenham a necessária acomodação necessária, para que os cabos deformem plasticamente (fluência) e ocorra acomodação geométrica. Findo o período de três dias, as trações dos cabos foram reduzidas para a tração mínima de 12% da RMC à temperatura de 20°C (11,766 kN), para o condutor Tern. A tração aplicada nos outros dois condutores foi a necessária para manter a mesma catenária do cabo Tern.

Depois de acertada a tração dos cabos, foram posicionadas as três cadeias de suspensão da torre 2. Como a tração inicial é mais baixa, as inclinações de cada uma das cadeias penderam 5° em relação ao vertical para o lado do vão definidos pelas torres 2 e 3 (vão passivo). Posicionando a cadeia desta forma, os cabos poderão ser tracionados no sentido da estrutura 1 e assim compensar a inclinação das cadeias de suspensões que estão levemente inclinadas para o lado da estrutura 3.

Os dois cabos para-raios (Dotterel e OPGW) foram lançados com tração de 10% da RMC. Estes cabos foram fixados em suas extremidades por alças pré-formadas.

### **INFRAESTRUTURA DA LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL AUTOMATIZADA**

A LTE é composta por três torres para circuito simples, projetada para tensão de 230 kV, embora os testes sejam realizados com a linha desenergizada. Para análise vibracional dos cabos condutores, a LTE é composta por cinco sistemas, que

necessitam de infraestrutura base para garantir o seu funcionamento, composto por um contêiner, dois painéis, entrada de serviço e rede de dados. A seguir mais detalhes a respeito das partes mencionadas.

### **CONTÊINER PARA OPERAÇÃO E ABRIGO DOS EQUIPAMENTOS**

Para que fosse possível realizar ajustes e ensaios controlados no local, foi necessário o uso de um contêiner de 20 pés (6,10 x 2,35 x 2,39 m – C x L x H) para abrigar os equipamentos próxima à base da torre, permitindo controlar a LTE de maneira segura e independentemente das condições climáticas.

Esta sala conta com acesso à internet, e abriga os equipamentos de conversão do sinal de fibra óptica, computadores e também foi utilizado para o desenvolvimento e operação da LTE. Igualmente aos painéis, a temperatura no interior do contêiner também é controlada por um aparelho de ar condicionado. A ideia é que quando houver necessidade de alguma manutenção ou ensaio supervisionado fisicamente, o operador possa controlar os ensaios da LTE de forma segura e abrigada.

#### **INSTALAÇÕES E INFRAESTRUTURA DA LTE**

Para a alimentação elétrica da LTE foram contratadas junto à Copel Distribuição duas entradas de serviço sendo uma monofásica de 127 V-30 A, para alimentação da torre 2 e uma trifásica 127/220 V-50 A, para a torre 1. Dois painéis foram montados para acondicionar os equipamentos para controle e aquisição de dados. No painel 1 são alocados a controladora principal, seis inversores e as fontes e amplificadores do sistema de vibração. No painel 2 estão alocados a controladora secundária, contendo os módulos para leitura dos sinais dos vibrógrafos, acelerômetros instalados nos cabos condutores e anemômetro, interligado à controladora principal através do cabo para-raios com fibra óptica (OPGW). Ambos os painéis possuem ar condicionado para manter a temperatura à  $25\pm 2^\circ$  C.

#### **INSTALAÇÃO DO PAINEL 1 E CABLAGEM NA TORRE 1**

O ideal é que os painéis fossem instalados o mais próximo possível junto a alimentação, contêiner e os sistemas que compõe a LTE, portanto, no alto das torres 1 e 2. Isso só foi possível na torre 2, porém, na torre 1 não, devido ao tamanho (0,7 x 0,5 x 2,2 m – LPH), peso do painel e área exposta ao vento, adicionando esforços consideráveis à torre 1.

A solução foi instalar o painel 1 junto ao pé da torre que fica mais próxima do contêiner, permitindo assim que toda a cablagem suba por este pé através de eletrocalhas.

### **INSTALAÇÃO DO PAINEL 2 E CABLAGEM NA TORRE 2**

Dadas as dimensões menores e peso do painel 2, foi possível instalá-lo no alto da torre, próximo dos sensores (vibrógrafo, acelerômetros e anemômetro). A Figura 55 mostra a instalação do painel.

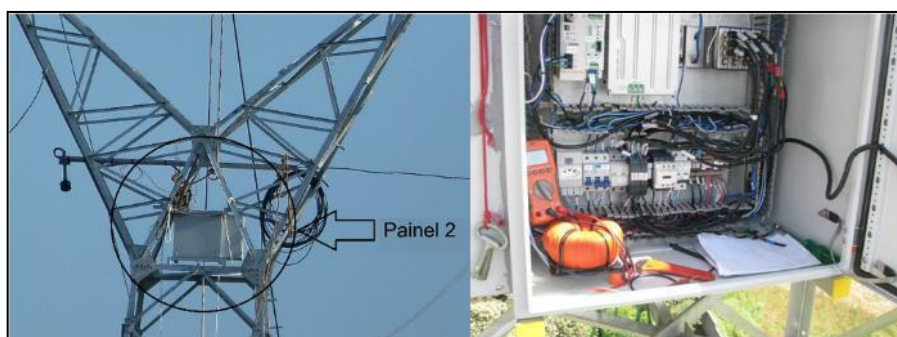


Figura 55. detalhes da instalação do painel na torre 2  
Fonte: O autor.

### **COMUNICAÇÃO ENTRE AS TORRES 1 E 2**

Para fazer a comunicação (transferência de dados) entre as torres 1 e 2, foram utilizadas fibras ópticas através de um cabo *OPGW* (*Optical Ground Wire*) ou para-raios com fibra óptica. Este cabo possui a função de interligar as controladoras e rede de dados entre as torres 1 e 2.

Foram realizadas a fusão de seis pares de fibras, portanto, tem-se disponível para uso na LTE um total de 6 (seis) pares de fibras. Nesta primeira etapa está sendo utilizado 1 par (duas fibras). As demais são reservadas para projetos futuros.

A conexão da LTE com a internet através de fibra óptica, para que os dados sejam transmitidos de forma mais rápida e eficiente para o servidor dos Lactec, tornando possível a operação remota da LTE.

### **ATERRAMENTO DAS INSTALAÇÕES**

Foi realizado o aterramento da torre em concordância com as normas: ABNT NBR 15749:2009, "Sistemas de Aterramento de Subestações" ABNT NBR 7117, a fim

de melhorar a coordenação da proteção contra surto de toda a instrumentação instalada na torre, no painel e contêiner e principalmente dos operadores e transeuntes próximos a LTE.

## C. CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS VIBRÓGRAFOS

## CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS VIBRÓGRAFOS

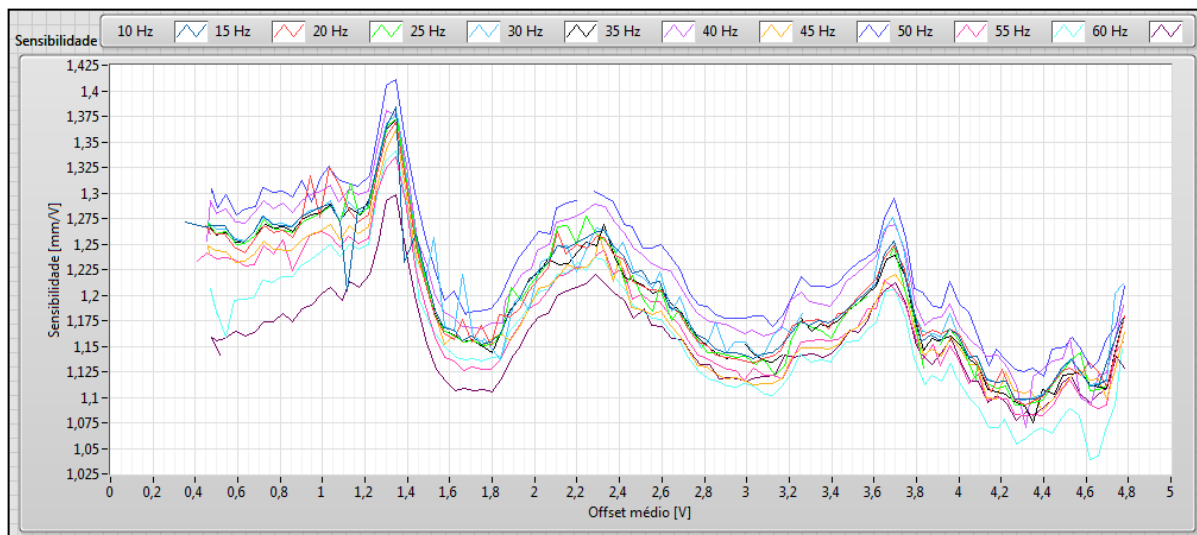


Figura 56 - Gráfico da sensibilidade em função da posição (*offset*) do vibrômetro 01  
Fonte: O autor.

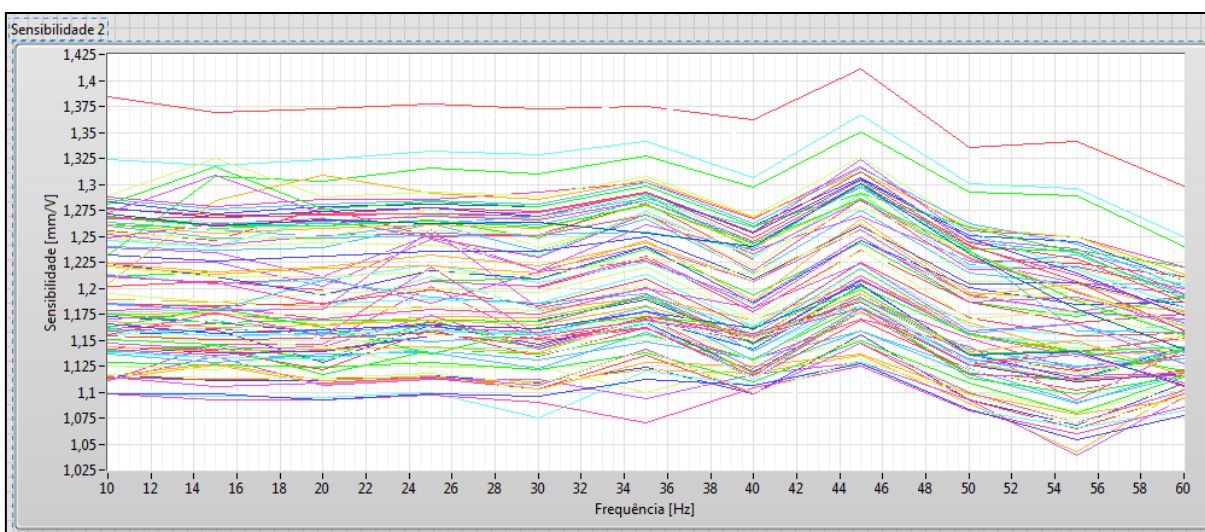


Figura 57 - Gráfico da sensibilidade em função da frequência vibrômetro 02  
Fonte: O autor.

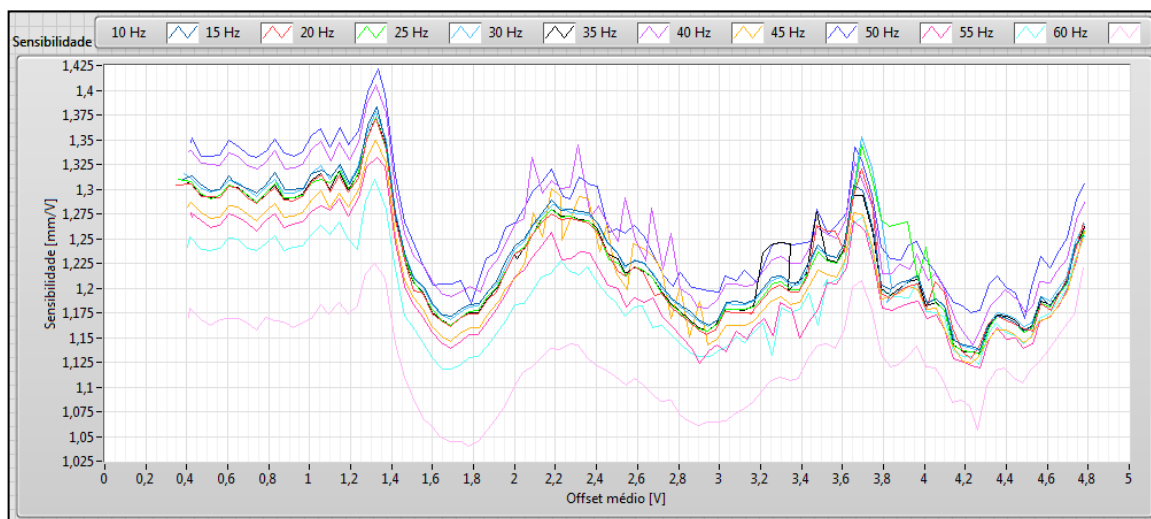


Figura 58 - Gráfico da sensibilidade em função da posição (*offset*) do vibrógrafo 02  
 Fonte: O autor.

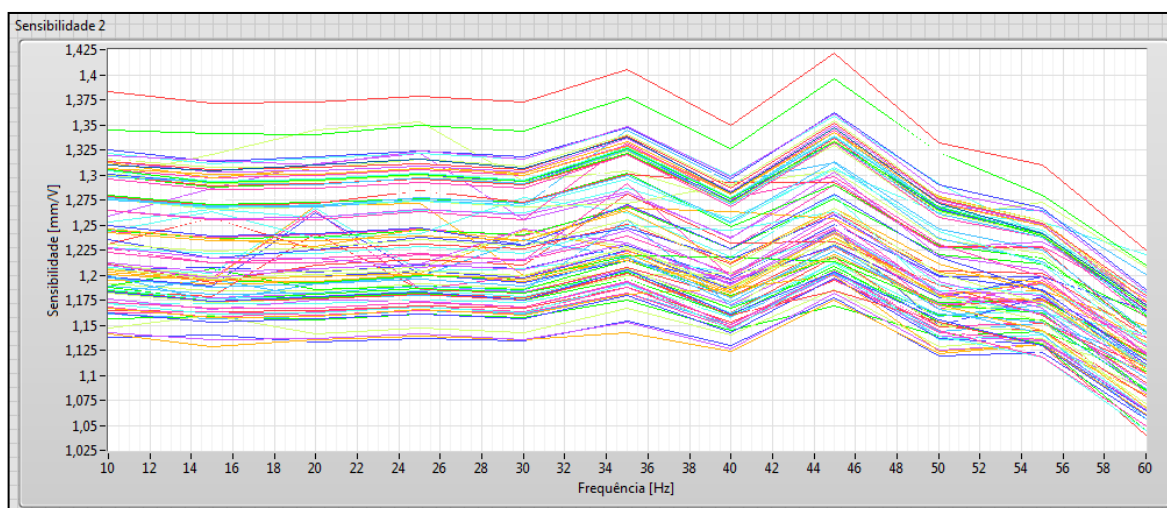


Figura 59 - Gráfico da sensibilidade em função da frequência do vibrógrafo 02  
 Fonte: O autor.

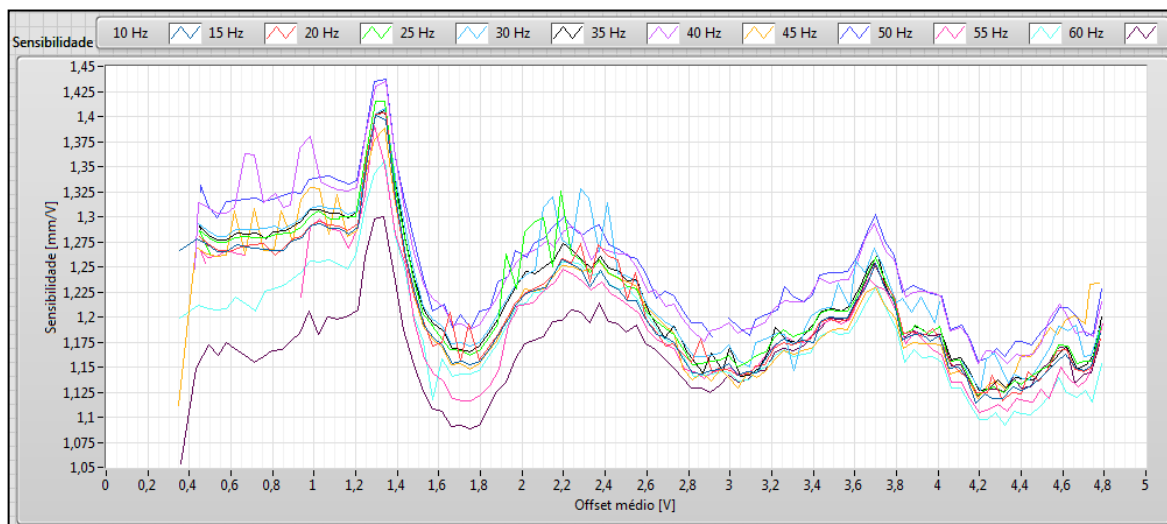




Figura 60 - Gráfico da sensibilidade em função da posição (*offset*) do vibrógrafo 03  
Fonte: O autor.

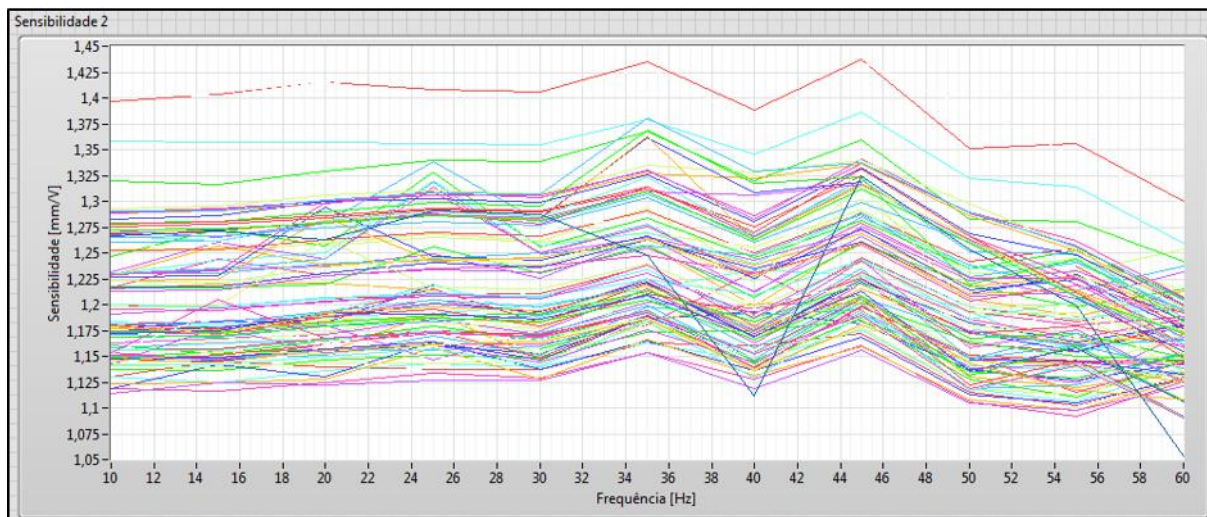


Figura 61 - Gráfico da sensibilidade em função da frequência do vibrógrafo 03  
Fonte: O autor.

## D. PROJETO DO SISTEMA DE TRAÇÃO

## PROJETO DO SISTEMA DE TRAÇÃO

A estrutura do sistema de tração foi projetada com base:

- Na análise do projeto da torre (para a fixação do sistema de tração);
- Forças devido ao carregamento no cabo, peso do cabo e ação do vento; e
- Fixação dos outros componentes (macaco mecânico, guia linear, etc.) do sistema.

Com a definição dos pontos de fixação do equipamento na torre, foram projetadas as cantoneiras que fixam o sistema de tração na torre pela mísula, Figura 62, ou pela fase superior, Figura 63. A única diferença entre as estruturas para a fixação na mísula e na fase superior, são as dimensões e localização dos furos, para fixação na torre, das cantoneiras superior.

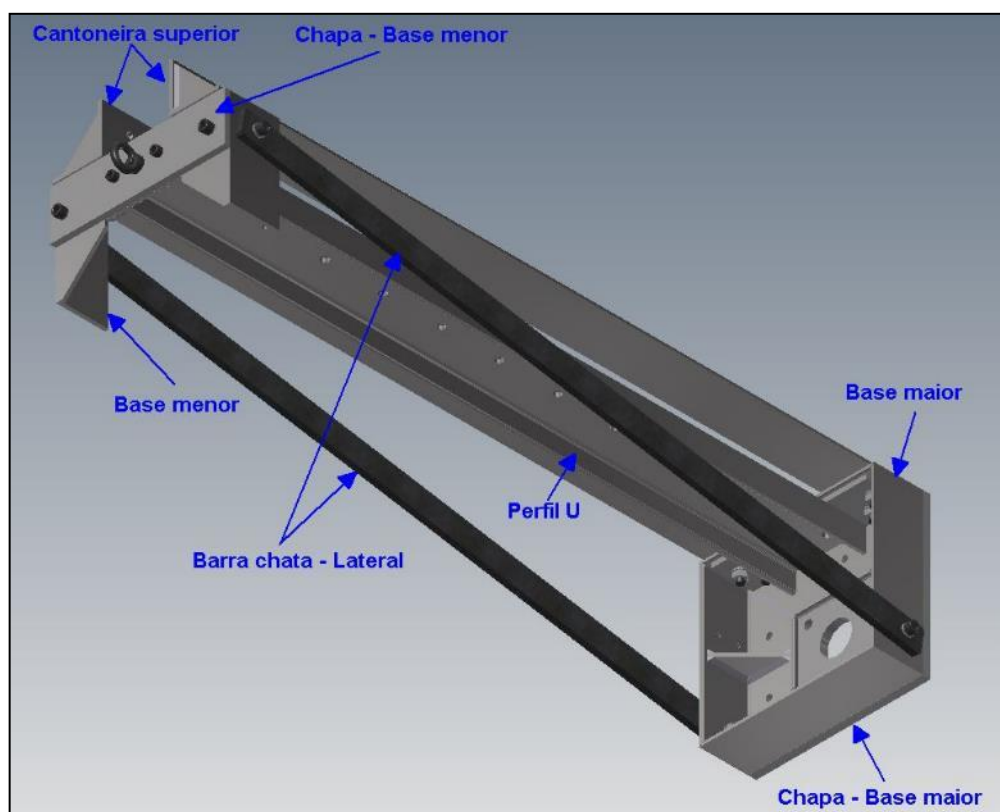


Figura 62 - Projeto da estrutura do sistema de Tração da mísula  
Fonte: Lactec.

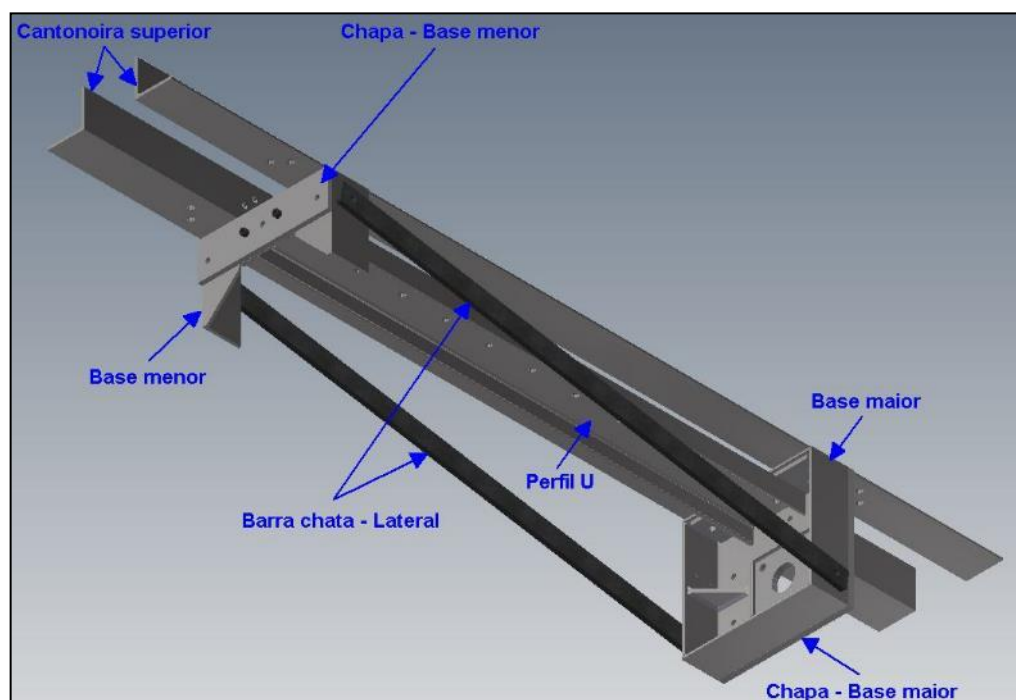


Figura 63 - Estrutura do sistema de tração da fase superior  
Fonte: Lactec.

A Tabela 37 - Elementos da estrutura do sistema de tração apresenta as dimensões, material, massa dos elementos que compõe a estrutura do Sistema de Tração e as propriedades mecânicas dos materiais utilizados.

Tabela 37 - Elementos da estrutura do sistema de tração

	DIMENSÕES (mm)	MATERIAL	MASSA (kg)
Barra chata Lateral	19,05 x 50,8 x 1.420	ASTM-A36	10,79
Base maior	7,94 x 101,6 x 360 x 330	ASTM-572 Grau 50	11,88
Base menor	7,94 x 101,6 x 360 x 200	ASTM-572 Grau 50	6,79
Cantoneira superior	7,94 x 101,6 x 2300	ASTM-572 Grau 50	28,06
Fase superior	7,94 x 101,6 x 1460	ASTM-572 Grau 50	17,81
Cantoneira superior mísula	7,94 x 101,6 x 1460	ASTM-572 Grau 50	17,81
Chapa Base maior	15,88 x 360 x 330	SAE 1045	14,90
Chapa Base menor	12,7 x 360 x 200	SAE 1045	3,62
Perfil U	7,98 x 51 x 152,4 x 1400	ASTM-A36	30,8

Fonte: Lactec

A partir do projeto inicial das estruturas, foi realizada uma análise considerando as forças que atua no sistema e suas direções, como mostrada na Figura 64.

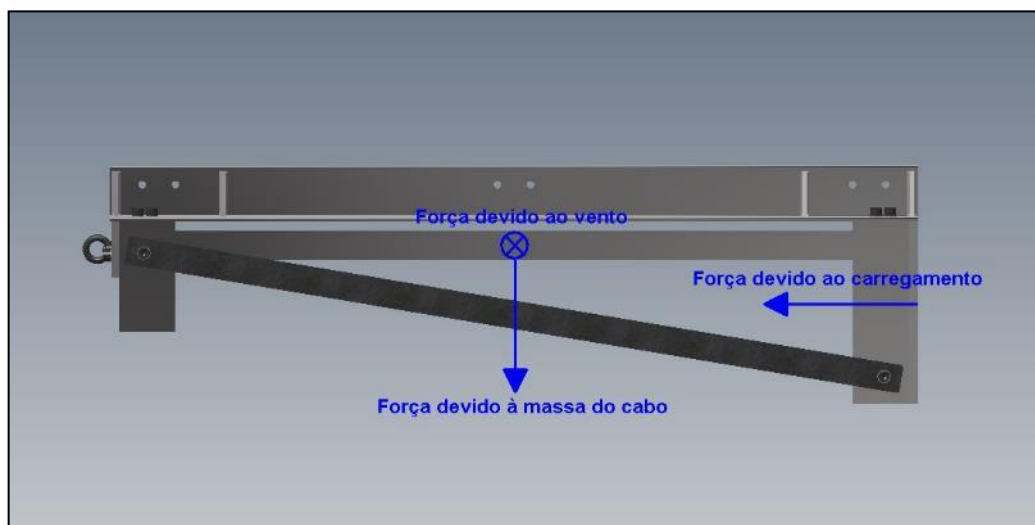


Figura 64 - Forças que atuarão no sistema  
Fonte: Lactec.

A força devido ao vento e à massa do cabo, atuam diretamente no perfil U. Já a força devido ao carregamento, atua diretamente na “Base maior”, “Chapa - Base maior” e “Barra chata – Lateral”. Na estrutura do sistema de tração, a “Barra chata – Lateral” é peça mais crítica quando submetida ao carregamento, por isso foi importante a análise no dimensionamento deste. Para a análise, foi considerada somente a força devido ao carregamento já que as outras não atuarão na “Barra chata – Lateral”.

Para a força devido ao carregamento, foi considerado o diagrama de corpo livre da Figura 65, onde  $F_c$  é a força devido ao carregamento,  $Fr1$  refere-se a força de reação 1,  $Fr2$  trata-se da força de reação 2,  $Fr2a$  é a força de compressão nas barras chatas laterais,  $Fr2b$  trata-se da componente vertical da força de compressão nas barras chatas laterais,  $x$  é a distância entre o engaste e o ponto de aplicação a força de carregamento e  $y$  refere-se a distância entre o engaste e o ponto da força de reação 2.

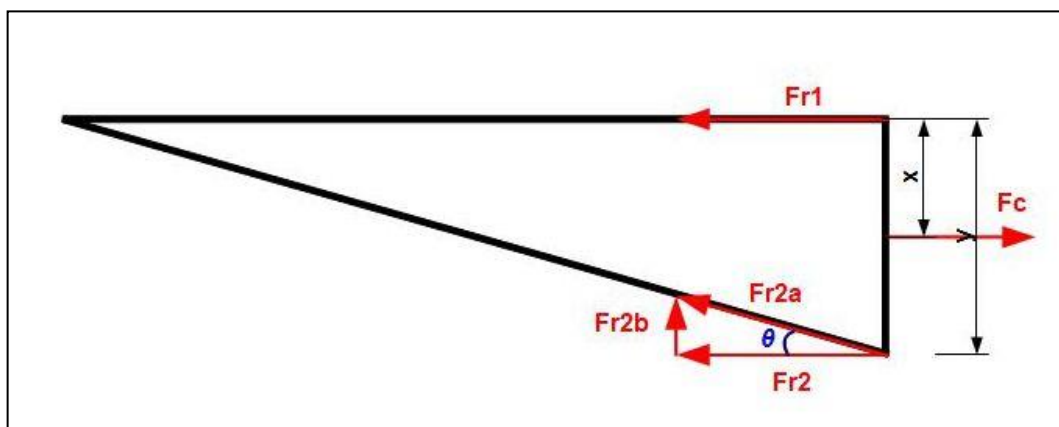


Figura 65 - diagrama de corpo livre para a força de carregamento  
Fonte: O autor.

Fazendo-se uma análise estática do diagrama de corpo livre pode-se considerar que:

$$F_c = Fr1 + Fr2 \quad (33)$$

$$\Sigma M = F_c \cdot x - Fr2 \cdot y = 0 \quad (34)$$

$$Fr2a = \frac{Fr2}{\cos \theta} \quad (35)$$

$$Fr2b = Fr2 \cdot \tan \theta \quad (36)$$

Para os valores das variáveis apresentados na Tabela 38, pelas equações (33), a (36) obtêm-se os valores das variáveis da equação (37):

Tabela 38 - Valores das variáveis consideradas no projeto	
VARIÁVEL	VALOR
$F_c$	4000 kgf
$x$	174 mm
$y$	280 mm
$\theta$	9,48°
E	200 GPa

Fonte: O autor

Tabela 39 - Valores das variáveis calculadas

VARIÁVEL	VALOR
$Fr1$	1514,28 kgf
$Fr2$	2485,72 kgf
$Fr2a$	2520,13 kgf
$Fr2b$	431,15 kgf

Fonte: O autor

A força  $Fr2a$ , exerce compressão nas barras chatas laterais. Considerando que essa força de compressão está distribuída igualmente em cada barra chata, então o valor para a análise da flambagem nas barras é de  $Fbarra=1242,86$  kgf.

A carga de flambagem é calculada pela equação (37).

$$F_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot l)^2} \quad (37)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade (GPa),  $I_{min}$  trata-se do menor momento de inércia de área da seção transversal ( $mm^4$ ),  $l$  é a distância entre os pontos de aplicação da carga (m) e  $K$  refere-se o coeficiente para a forma de apoio.

No caso do projeto, a barra chata foi considerada como uma viga biarticulada, sendo assim, o valor de  $K = 1$ . O momento de inércia para uma seção transversal retangular é obtido pela equação (38):

$$I_{min} = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (38)$$

sendo  $b$  a medida da base do retângulo (mm) e  $h$  referente à altura do retângulo (mm).

Considerando as dimensões da barra chata fornecidas pela Tabela 37, calculou-se o momento de inércia de área com relação ao eixo X e Y. Com isso, obteve-se a carga crítica de flambagem, valores apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 - momento de inércia de área da seção transversal retangular

VARIÁVEL	VALOR CALCULADO
$I_{xx}$	208 115,71 $mm^4$
$I_{yy}$	29 266,27 $mm^4$
$F_{crit}$	3 271,57 kgf

Fonte: O autor

Pelos valores de  $F_{crit}$  e  $F_{barra}$ , pode-se verificar que  $F_{crit} < F_{barra}$ , e com isso conseguindo-se um coeficiente de segurança de aproximadamente 2,6.



**E. BASE DE CÁLCULO PARA O PROJETO DO SISTEMA DE TRAÇÃO**

## BASE DE CÁLCULO PARA O PROJETO DO SISTEMA DE TRAÇÃO

Tabela 41 - Dados fornecidos pelo arquivo "Cálculo estrutural do projeto da torre PDF60"

DADOS PARA O PROJETO DO SISTEMA DE TRAÇÃO	
Diâmetro do cabo CAA "TERN"	d = 2,7 cm
Área da seção transversal do cabo CAA TERN	A <sub>c</sub> = 4,3100 cm <sup>2</sup>
Densidade linear do cabo CAA TERN	ρ = 1,332 kgf/m
Carga de ruptura do cabo CAA TERN	CR = 10.000 kgf
Módulo de elasticidade inicial do cabo CAA TERN	E <sub>i</sub> = 0,5410 x 106 kgf/cm <sup>2</sup>
CAA TERN	E <sub>f</sub> = 0,6680 x 106 kgf/cm <sup>2</sup>
Coefficiente de dilatação térmica linear inicial	α <sub>i</sub> = 2,0300 x 10 <sup>-5</sup>
Coefficiente de dilatação térmica linear final	α <sub>f</sub> = 2,0300 x 10 <sup>-5</sup>
Área exposta ao vento da cadeia de suspensão	A <sub>S</sub> = 0,520 m <sup>2</sup>
Peso da cadeia de suspensão	P <sub>S</sub> = 70 kgf
Área exposta ao vento da cadeia de ancoragem	A <sub>A</sub> = 0,556 m <sup>2</sup>
Peso da cadeia de ancoragem	P <sub>A</sub> = 100 kgf
Velocidade do vento de projeto	V <sub>P</sub> = 33,33 m/s

Fonte: Engetower

O comprimento do vão gravante, entre a torre de ancoragem instrumentada e a torre de suspensão, e a distância entre as duas torres de ancoragem foram definidas no início do projeto, os valores estão apresentados na Tabela 42.

Tabela 42 - Dados para o comprimento do cabo.

Vão com vento máximo	V <sub>g</sub> = 303 m
Comprimento total do cabo	L <sub>t</sub> = 470 m

Fonte: O autor

A força devido ao peso do cabo (P<sub>ca</sub>) e acessórios foi obtida pela equação (39), em que F<sub>PC</sub> é dado em kgf.

$$P_{ca} = P_S + P_A + \rho \cdot 303 \quad (39)$$

Conforme os valores da Tabela 41, obteve-se o valor de P<sub>ca</sub> = 644,13 kgf.

Já para a força devido ao vento (F<sub>v</sub>), foi calculada pela equação (40), conforme a NBR-5422.

$$F_V = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot V_P^2 \cdot C_{xc} \cdot \alpha \cdot d \cdot V_g \cdot \sin^2 \theta \quad (40)$$

onde ρ<sub>ar</sub>, V<sub>P</sub>, C<sub>xc</sub>, α, θ e d são respectivamente a massa específica do ar (kg/m<sup>3</sup>), velocidade do vento de projeto (m/s), coeficiente de arrasto, α é referente ao fator de

efetividade,  $\theta$  ângulo de incidência do vento em relação à direção do vão,  $d$  é o diâmetro do cabo (m) e  $V_g$  vão com vento máximo.

Considerando os valores da Tabela 43, baseados na NBR-5422/1985 (ABNT/CB-003 ELETRICIDADE, 1985) obteve-se o valor para  $F_V = 438,76$  kgf.

Tabela 43 - Valores considerados conforme NBR-5422

COEFICIENTES	VALORES
$\alpha$	0,79
$C_{xc}$	1,00
$\theta$	90°

Fonte: O autor

Para obter o deslocamento necessário do sistema de tração, calculou-se a deformação do cabo quando submetido a carga de 1500 kgf e a 4000 kgf (equação (41)), e considerando o valor do módulo de elasticidade inicial, devido a maior deformação.

$$\Delta L = \frac{F \cdot L_c}{E_i \cdot A_c} \quad (41)$$

Onde o  $F$  é a força axial aplicada ao condutor (N),  $L_c$  é o comprimento do condutor (m),  $E_i$  módulo de elasticidade inicial do condutor (GPa) e  $A_c$  é área da seção transversal do condutor (m<sup>2</sup>). O resultado é mostrado na tabela 7.

Tabela 44 - Deformação do cabo para carga de 1500 e 4000 kgf

CARGA (kgf)	DEFORMAÇÃO m
1.500	0,302
4.000	0,806

Fonte: O autor

Com os valores da deformação, calculou-se o deslocamento necessário do sistema de tração pela diferença entre a deformação da carga mínima e máxima. O valor obtido é de 504 mm. Para compensar a deformação das ancoragens torres 1 e 3 e a fluência dos cabos condutores, o sistema foi projetado para ter um curso de deslocamento de aproximadamente 750 mm (700 mm com os dispositivos de segurança).

**valores de rotação, torque e potência necessária no eixo de acionamento**

$$RPM = \frac{V_l \times 1000 \times RED}{P_f} \quad (42)$$

sendo,

*RPM*: Rotação por minuto no eixo de acionamento (rpm);

*V<sub>l</sub>*: Velocidade linear do fuso (m/min);

*RED*: Redução;

*P<sub>f</sub>*: Passo do fuso (mm).

$$T_e = \frac{F_c \times C}{2000 \times 3,1416 \times \eta} \quad (43)$$

onde,

*T<sub>e</sub>*: Torque necessário no eixo de acionamento (Nm);

*F<sub>c</sub>*: tração do cabo condutor (N);

*C*: Deslocamento do fuso por rotação na rosca sem fim (mm);

*η*: Rendimento.

$$P_e = \frac{T_e \times RPM}{9550} \quad (44)$$

em que:

*P<sub>e</sub>*: Potência necessária no eixo de acionamento (kW).

Para o cálculo do torque e potência no eixo de acionamento do macaco mecânico, os valores considerados da carga máxima e velocidade linear do fuso estão na Tabela 45.

Tabela 45 - Valores da carga e velocidade linear do fuso.

Carga (kgf)	4000
Velocidade linear do fuso (mm/s)	3

Fonte: O autor

Com os valores da carga e velocidade linear do fuso, foram obtidos os valores da rotação, torque e potência necessária no eixo de acionamento, Tabela 46.

Tabela 46 - Rotação, torque e potência necessária no eixo de acionamento

ACIONAMENTO DO FUSO	
Rotação (rpm)	154,3
Torque (Nm)	31,5
Potência (kW)/(cv)	0,51/0,69

Fonte: O autor

**F. MONITORAMENTO DOS ESFORÇOS DOS PÉS DA TORRE 1**

## MONITORAMENTO DOS ESFORÇOS DOS PÉS DA TORRE 1

O sistema de monitoramento dos esforços dos pés da torre 1 é descrito neste trabalho, como menção de todas as partes da LTE, embora não seja mencionado nenhum resultado nesta tese e sim no projeto na qual ele está inserido. Ele tem como objetivo monitorar as reações vibracionais e estática da fundação da torre de ancoragem. Os registros a serem obtidos nas duas modalidades são: esforços de tração, compressão, cisalhamento e flexão nos quatro pés da torre.

Esse sistema foi instalado em cada um dos quatro pés da torre, cada qual contendo três placas eletrônicas responsáveis pela aquisição, condicionamento do sinal e transmissão dos dados para a controladora. Foram instrumentados apenas os montantes, na interface entre a ferragem da estrutura e o concreto da fundação. Para isso, foram utilizados três extensômetros de ponte completa em cada pé e três condicionadores de sinal. Para diminuir a influência da torção e flexão, foi decidido instalar três extensômetros em ponte completa, dois posicionados em cada um dos lados da cantoneira (eixo X e Y) e outro no baricentro da cantoneira (O) (vide Figura 66).

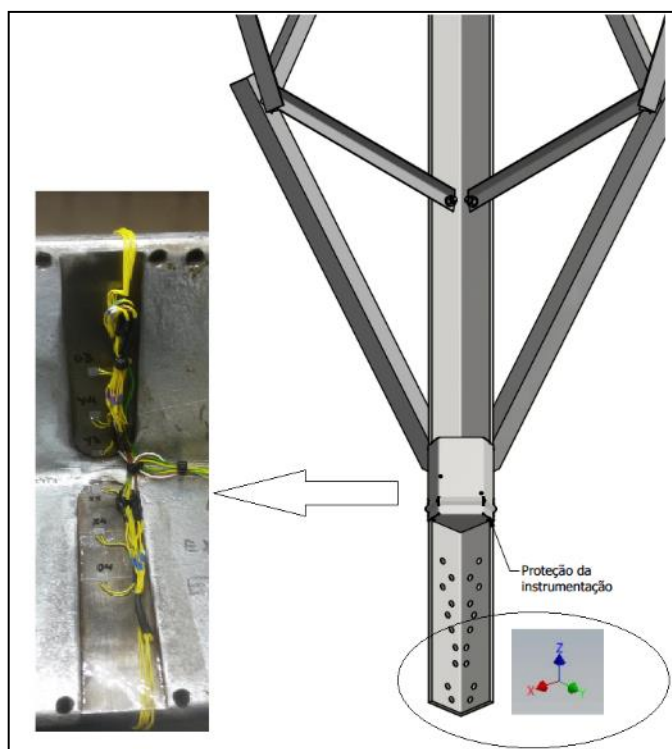


Figura 66 – Montante monitorado com os extensômetros instalados e orientação dos eixos  
Fonte: Engemovi.

## INSTRUMENTAÇÃO

Os montantes foram instrumentados com extensômetros do tipo resistivo em ponte de Wheatstone, 350 Ohms, instalados em três pontos de cada montante que compõe os pés da torre. Algumas partes do processo estão demonstradas nas Figura 67 a Figura 70.



Figura 67 - Colagem dos extensômetros no montante  
Fonte: Engemovi.

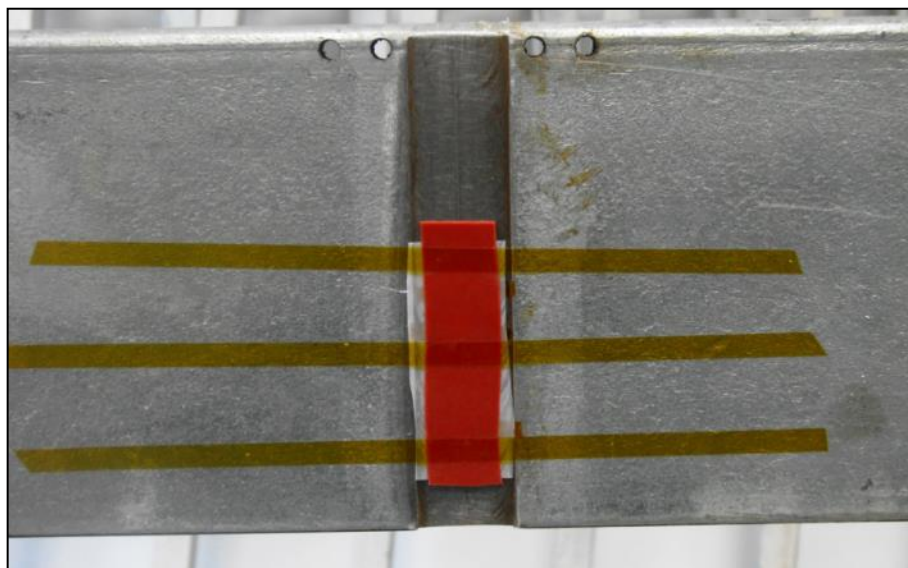


Figura 68 – Extensômetros do tipo resistivo  
Fonte: Engemovi.



Figura 69 - Instrumentação dos montantes  
Fonte: Engemovi.



Figura 70 - Capa de proteção da instrumentação  
Fonte: Engemovi.

## CALIBRAÇÃO

A montagem foi realizada na bancada de cabos do Lactec, por esse motivo o deslocamento para bancadas de maior capacidade tornou-se difícil. Assim, a calibração foi feita na bancada de ensaios de cabos, com capacidade máxima de 250 kN. A força mínima utilizada foi de 5 kN, e máxima de 225 kN. A Figura 71 mostra o montante montado na bancada para calibração.



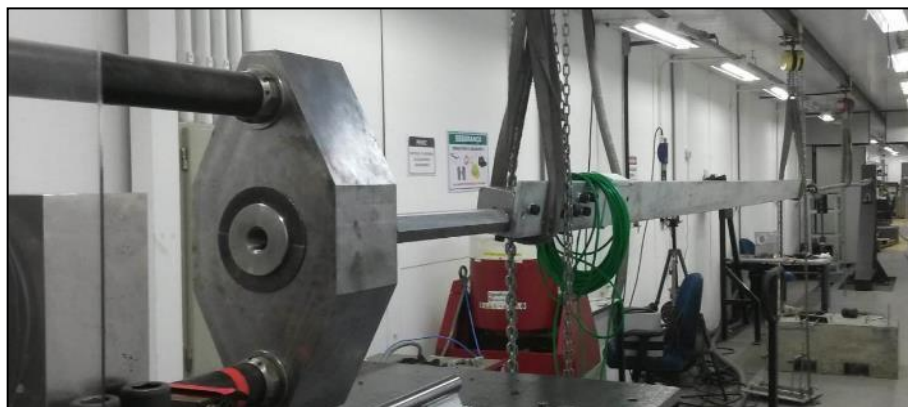


Figura 71 – Calibração de um dos montantes que compõe os pés da torre 1  
Fonte: O autor.

### ZERAGEM VERTICAL DOS MONTANTES

Visto que a calibração dos montantes foi realizada na horizontal, não foi possível assegurar o zero da mesma. Para isso foi necessário realizar um processo de zeragem vertical do montante, garantindo a medição correta sem influência da flexão sobre o montante. O procedimento está ilustrado na Figura 72.



Figura 72 - medição do zero real (Vertical)  
Fonte: O autor.

## INSTALAÇÃO DOS MONTANTES NA TORRE

Após o projeto, a fabricação, a montagem, a calibração e a zeragem dos montantes instrumentados, as peças foram montadas juntamente com o restante da estrutura da torre e os tracionadores. As Figura 73 e Figura 74 ilustram a etapa da montagem dos pés da torre de ancoragem PDF60.



Figura 73 - montagem da torre instrumentada com detalhe do montante instrumentado  
Fonte: O autor.

A Figura 74 ilustra o detalhe do pé da torre e o ponto onde se encontram as pontes de medição.

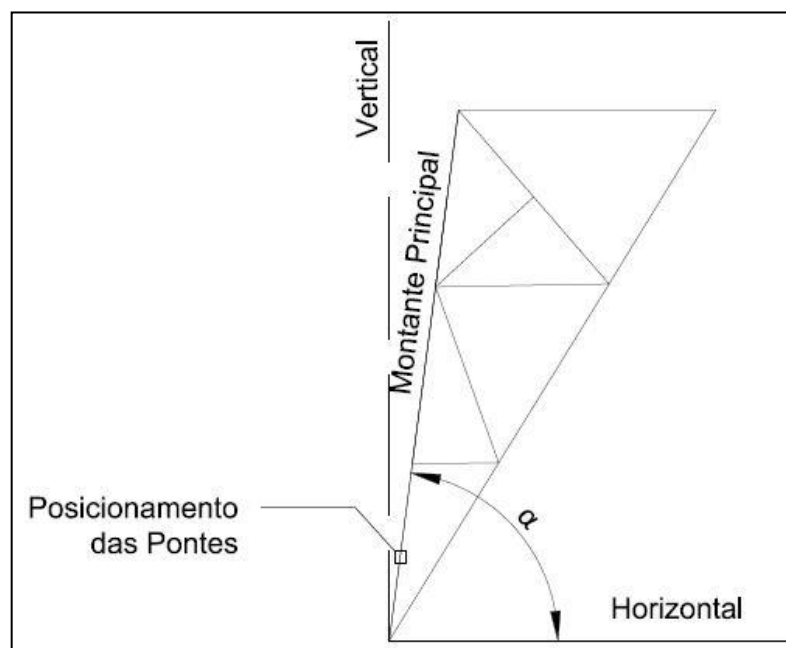


Figura 74 - Detalhe pé da torre e posição das pontes  
Fonte: Engemovi.

A soma dos esforços nos quatro montantes obtidos pela instrumentação obteve-se um total de 65,53 kN, considerando o sinal dos esforços de tração e compressão. Portanto, uma diferença do valor estimado pela instrumentação em relação aos dados de projeto foi inferior a 3,6%.

O sistema de monitoramento projetado para avaliar os esforços transmitidos pelas estruturas metálicas às fundações foi cuidadosamente instalado e verificado por meio de uma hipótese simplificada de carregamento. Previamente à avaliação de campo, o sistema foi calibrado e testado em laboratório, sob condição de carregamento de tração, apresentando ótimo desempenho. A instalação de campo foi bem-sucedida e forneceu resultados compatíveis com os valores totais estimados numericamente para a ação decorrente do peso próprio e sistemas de tracionamento para os cabos condutores.

## **CONCLUSÃO**

Com um sistema simples e robusto, com baixa interferência ao projeto original da torre PDF60, foi possível adaptar o sistema de tração. Os equipamentos instalados abrangem a faixa de tração de interesse, permitindo assim uma análise vibracional mais aprofundada dos três cabos, sem necessidade de intervenção humana sob a estrutura e, portanto, com segurança.

## **MECANISMO DE FUSO PARA A TRAÇÃO DO CABO**

Foi adotado um macaco mecânico, que é um equipamento para movimentação de carga com recurso multiplicador de força através de um mecanismo de fuso, coroa e eixo sem fim. É utilizado em diversas aplicações na automação industrial com a finalidade de posicionamento, levantamento, abertura ou fechamento de equipamentos. Ideal para substituição de sistemas hidráulicos e pneumáticos, pois não oferece riscos de contaminação e ruídos.

O fuso não realiza o movimento de rotação, apenas de movimentação linear, como mostrado na Figura 75.

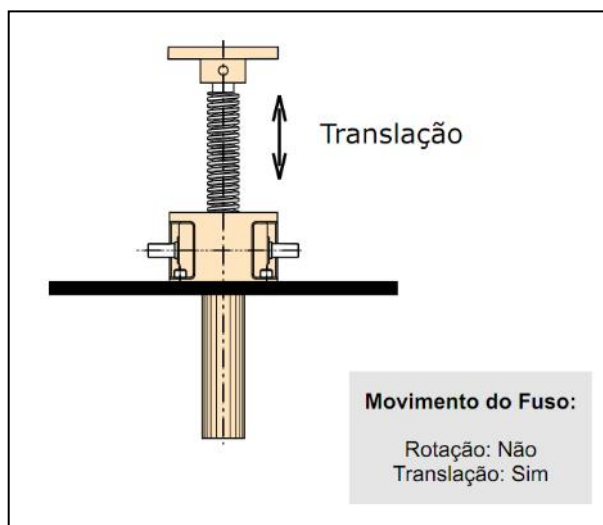


Figura 75 - macaco mecânico com fusos de translação  
Fonte: Imetex.

A especificação do macaco mecânico é apresentada na Tabela 47.

Tabela 47 - Especificação do macaco mecânico

FABRICANTE	PROFF
Modelo	LMA 5,0 T
Capacidade (kgf)	5000
Curso do fuso (mm)	1000
Coeficiente de segurança	1,5

Fonte: Proff indústria e comércio de equipamentos mecânicos

**G. PARTES DO PROGRAMA DE CONTROLE LTE**

## PARTES DO PROGRAMA DE CONTROLE LTE

Nesta seção o painel do supervisor apresentado na Figura 76 é utilizado para detalhar a operação dos diversos sistemas que compõe a LTE, conforme descrito a seguir.

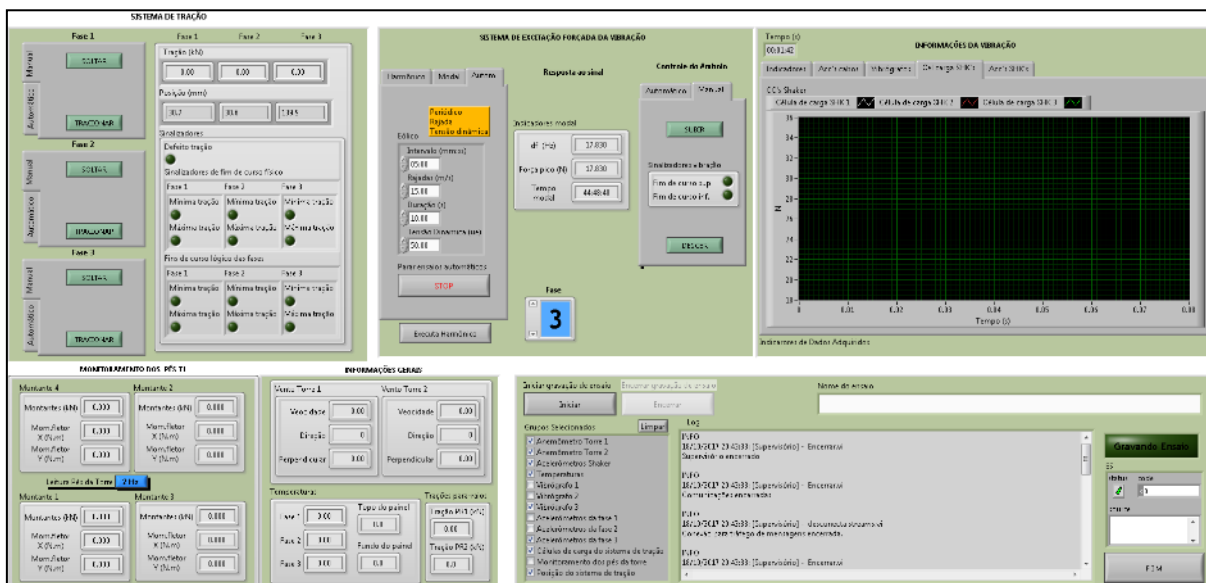


Figura 76. Painel da interface com o usuário, desenvolvido em LabVIEW  
Fonte: O autor.

## CONTROLE MANUAL E AUTOMÁTICO DA TRACÇÃO

O sistema de tração possui dois modos de controle: manual e automático. No modo manual, para tracionar o condutor da fase de interesse, basta apertar a tecla “TRACIONAR”, referente à fase em questão, do contrário, acionar a respectiva tecla “SOLTAR”.

No modo automático é possível acionar os tracionadores com valores alvo de posição (mm) ou de força (kN) nas três fases da LTE ao mesmo tempo. O valor da tração e posição das três fases podem ser acompanhadas simultaneamente, e o sistema fornece também indicadores de ativação de fins de curso, tanto lógicos quanto físicos.

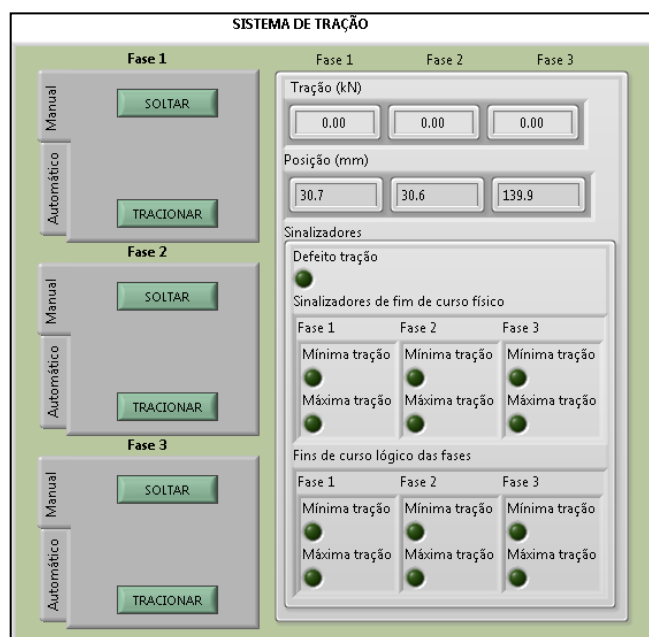


Figura 77. Controle e indicadores referentes à posição do carro do sistema de tração  
Fonte: O autor.

## SISTEMA DE VIBRAÇÃO - EXCITAÇÃO

Tem a função de se configurar a geração de um sinal senoidal de excitação, ajustando-se a frequência e a amplitude do sinal desejado (vide Figura 78). O controle da excitação do sistema de vibração pode ser realizado em malha aberta ou malha fechada. Ainda, pode-se realizar o controle da posição do êmbolo do sistema de vibração de forma manual ou automática. Os efeitos da vibração nas fases podem ser acompanhados através das leituras de dois acelerômetros e um vibrógrafo entre outras informações processadas pelo sistema, como deslocamento (mm), a velocidade em mm/s, etc. Limita-se a vibração forçada a uma fase por vez, tendo em vista a influência que múltiplas vibrações forçadas teriam umas sobre as outras.

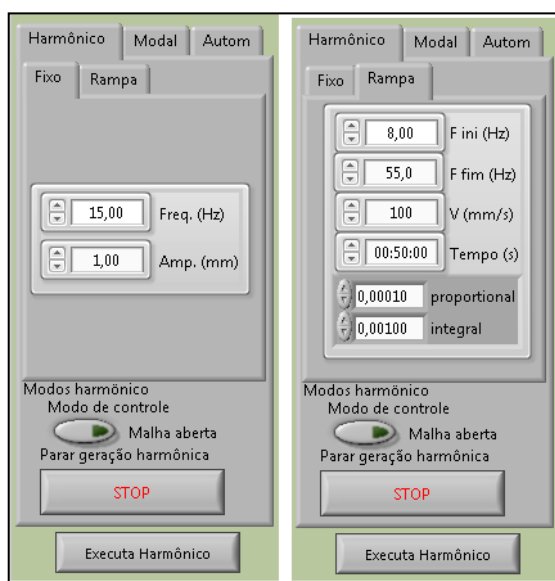


Figura 78. Controles disponíveis para a realização para vibração em frequência fixa e variável  
Fonte: O autor.

## INDICADORES E GRÁFICOS

À direita do painel principal do painel do programa, na parte superior, são encontrados alguns indicadores adicionais dos sensores de vibração e cinco gráficos destes sensores, dispostos em abas. Com respeito aos cinco gráficos, as várias curvas podem ser ativadas, conforme o interesse do operador. Outros detalhes são mencionados a seguir.

- Aba de indicadores: apresentam os valores lidos e tratados pelo cRIO referentes aos sensores vibrógrafos e acelerômetros instalados nas fases nas distâncias de aproximadamente 20 e a 60 m de distância da torre 2 (vide Figura 79);



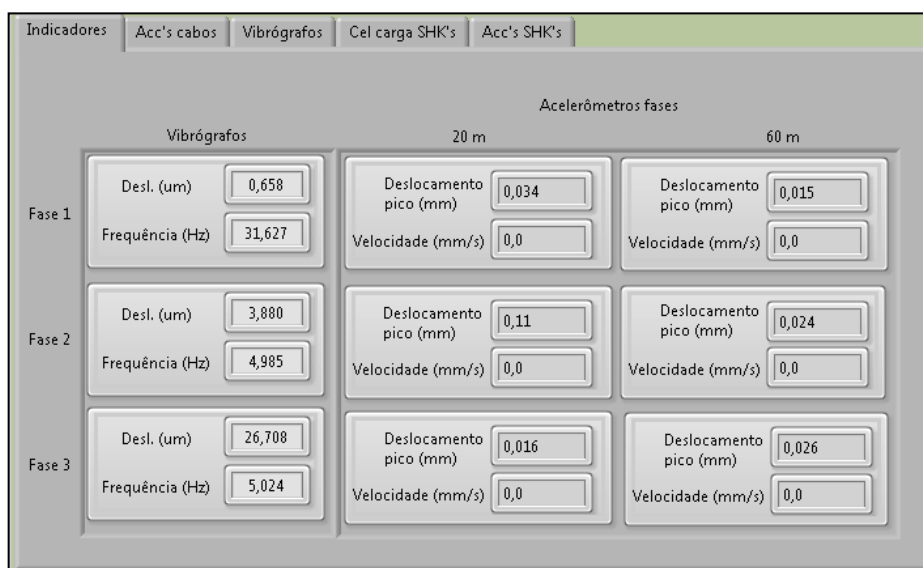


Figura 79. Indicadores dos dados tratados dos vibrógrafos e acelerômetros  
Fonte: O autor.

- Acelerômetros dos cabos: mostra graficamente a leitura realizada pelos seis acelerômetros (em g) instalados nos cabos condutores (vide Figura 80);

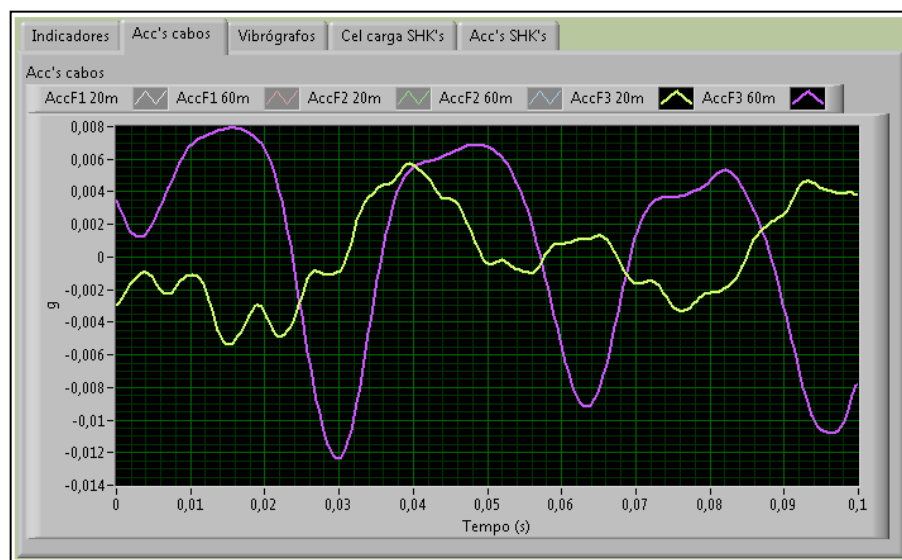


Figura 80. Indicadores dos acelerômetros instalados nas três fases da LTE próximo a torre 2  
Fonte: O autor.

- Vibrógrafos: mostra em tempo real o registro das ondas vibracionais (em  $\mu\text{m}$ ) nos três vibrógrafos instalados nos grampos monoarticulado de suspensão na torre 2 (vide Figura 81);

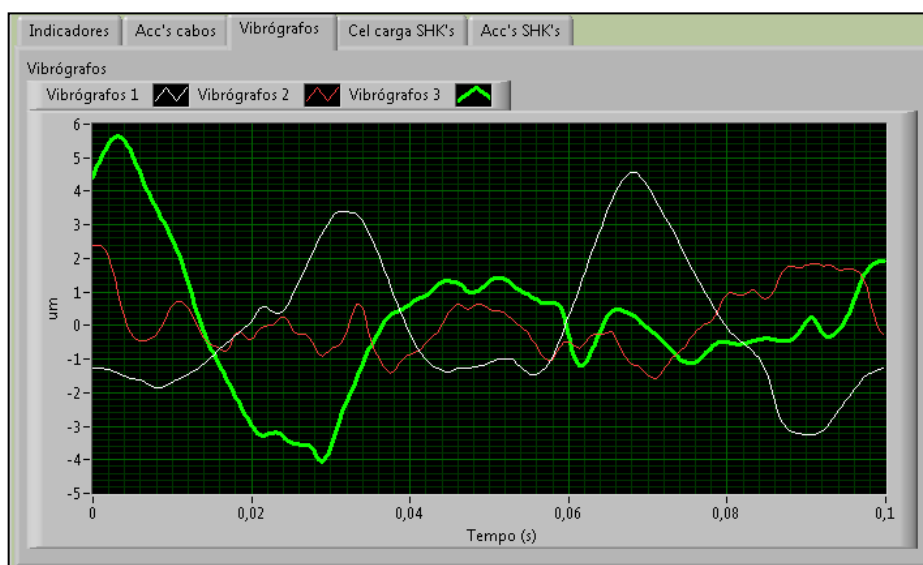


Figura 81. Indicadores dos três vibrógrafos instalados na torre 2  
Fonte: O autor.

- Células de carga dos excitadores eletrodinâmicos: as células de carga instaladas no êmbolo dos vibradores mostram a força gerada. Pelas curvas pode-se avaliar o comportamento dos excitadores (eventuais defeitos) assim como o comportamento do cabo condutor durante os testes vibracionais (vide Figura 82);

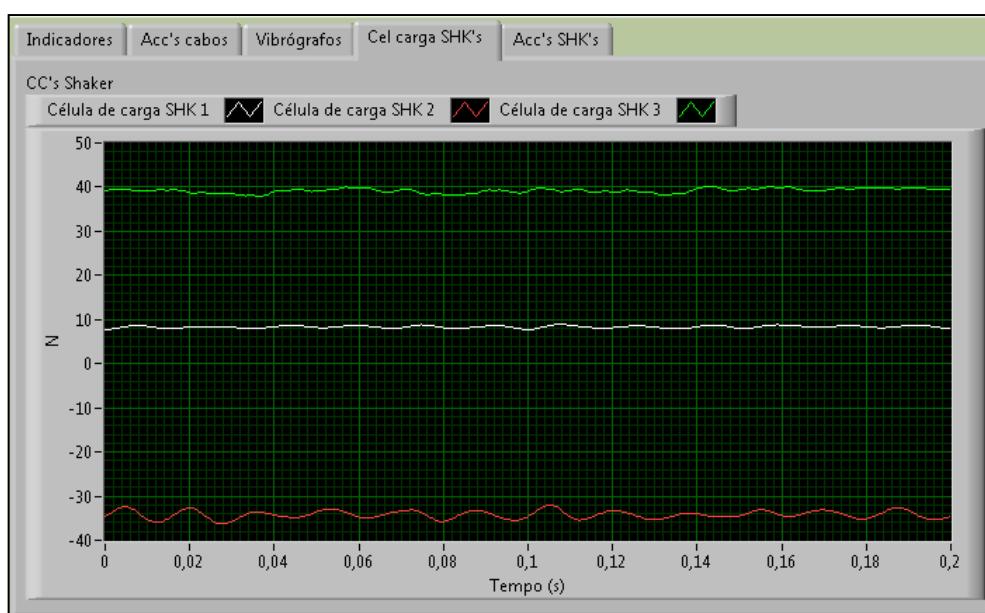


Figura 82. Células de carga instaladas nos êmbolos dos vibradores  
Fonte: O autor.

- Acelerômetros dos excitadores eletrodinâmicos: os sensores estão instalados na mesa dos vibradores com o objetivo de mostrar os valores

de aceleração a que ela é submetida pelo atuador (*voice coil*) e também pelo êmbolo, devido as vibrações vindas do condutor no ponto onde ele está preso. Pelas curvas pode-se avaliar o comportamento dos excitadores eletrodinâmicos (até eventuais defeitos) - vide Figura 83.

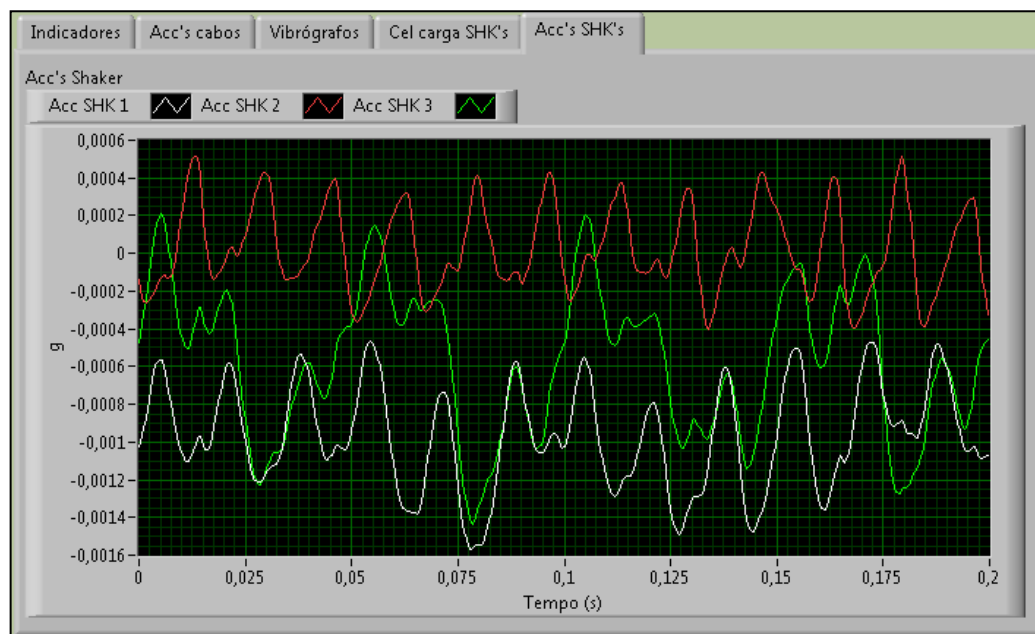


Figura 83. Controle para acesso dos três ensaios automáticos

Fonte: O autor.

## GRAVAÇÃO DE DADOS

A qualquer momento é possível solicitar ao sistema que realize o armazenamento em memória de massa dos dados sendo adquiridos, e quais serão efetivamente gravados. Isso possibilita que análises posteriores possam ser realizadas. Estas informações são armazenadas em um arquivo de ensaios no nó de tempo real, e após o término do ensaio no controlador cRIO 9035, e após o término do ensaio, enviadas via rede para o terminal do supervisor, ficando disponíveis ao usuário. O sistema ainda apresenta um registro (*log*), reportando os eventos ocorridos durante a execução do sistema, sejam eles informações, avisos ou indicações de possíveis erros que venham a acontecer. Os comandos do usuário também ficam notificados neste espaço (vide Figura 84).

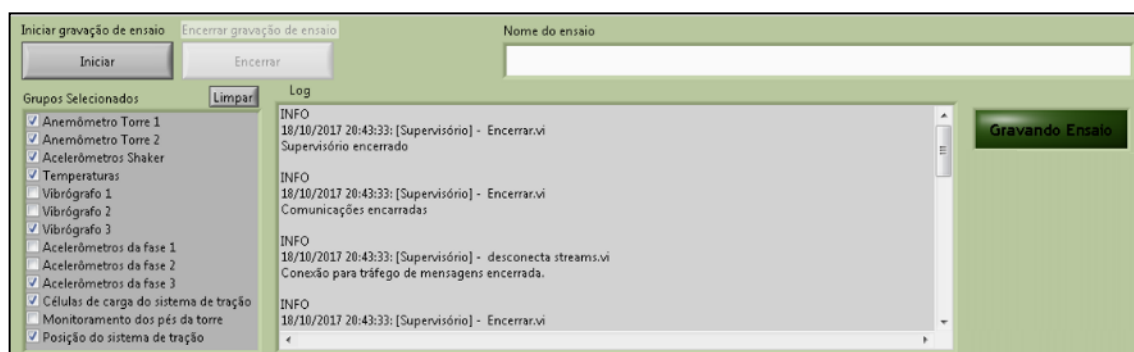


Figura 84. Tela com as funções para gravação dos dados

Fonte: O autor.

## LISTA DE EQUIPAMENTOS SE SENSORES UTILIZADOS PARA OS ENSAIOS MODAIS

Foram utilizados os seguintes equipamentos para os testes realizados nos três condutores, conforme mencionados a seguir.

- Sistema de tração Lactec, capacidade de 30 tf;
- Sistema de aquisição de dados NI PXIe-1078;
- Placas de aquisição de dados e controle NI PXI 4461 e 4462;
- Amplificador de sinais HBM MGC Plus;
- Célula de carga HBM 1-U10M/250 kN – Capacidade de medição: 250 kN;
- Martelo HP PCBI 291M55;
- Acelerômetro PCB Piezotronics 352C33 –Nº de Série: LW146524;
- Acelerômetro PCB Piezotronics 352C33 –Nº de Série: LW146518;
- Medidor de distância a laser Bosch GLM 50 Professional – Capacidade de medição: 50 000 mm, Nº de Série: 209386008;
- Trena metálica Lufkin YSL30CM – Capacidade de medição: 30 000 mm; e
- Torquímetro Rahsol TorcoFlex-K –Faixa de atuação: 20 a 200 N m.

Os equipamentos mencionados foram de utilização comum aos três testes. Na Tabela 48 são mencionados os sensores utilizados para medição vibracional específica de cada um dos três condutores.

Tabela 48. Acelerômetros e martelo de impacto utilizados nos experimentos.

	Phosphorus	Tern	Greeley
AC1L/16	352C33SNLW144907	338C04SN4808	338C04SN4808
AC2 L/8	352C33SNLW146518	352C33SNLW146518	352C33SNLW146518
AC3 L/4	338C04SN5260	338C04SN5260	338C04SN5260
AC4 3L/8	352C33SNLW146524	352C33SNLW146524	352C33SNLW146524
AC5 L/2	338C04SN5261	338C04SN5261	338C04SN5261
Martelo	HP PCBI 291M55	HP PCBI 291M55	HP PCBI 291M55

Fonte: O autor.

## **H. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS NOS CABOS CONDUTORES**

## **DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS NOS CABOS CONDUTORES**

Esta seção apresenta a metodologia empregada para medição da resistência elétrica dos cabos Tern, Phosphorus e Greeley, empregados na LTE. Os três cabos possuem capacidades de condução de corrente próximas, embora com materiais (ligas de alumínio diferentes) e diâmetros diferentes.

### **INTRODUÇÃO**

Os valores de impedância em cabos condutores de linhas de transmissão e distribuição são normalmente calculados teoricamente a partir das propriedades físicas dos fios componentes do cabo, sendo que as normas técnicas aplicáveis não contemplam ensaios para as medições destes. Os valores dos parâmetros elétricos normalmente são determinados apenas à temperatura ambiente e não simulam as condições próximas a realidade, como o tracionamento do condutor.

A metodologia apresentada estabelece uma forma para determinação mais precisa dos parâmetros elétricos dos condutores, obtendo-os em condições mais próximas das condições reais. A realização da aquisição dos dados é feita durante a aplicação da corrente nominal do condutor e tração mecânica de projeto, abrangendo toda faixa de temperatura prevista no projeto da linha, podendo-se garantir uma maior proximidade com as condições encontradas em campo.

A determinação mais precisa da resistência elétrica permite uma melhor aproximação nos cálculos de temperatura dos condutores. Essas diretrizes são muito importantes para as definições durante a fase de projeto das linhas de transmissão e em consequência sobre as flechas do condutor, que são limitadas por distâncias de segurança estipuladas em norma e nível vibracional, ambas influenciam na confiabilidade dos projetos. Para tal, foi estabelecida como premissas a obtenção destes parâmetros durante a aplicação da corrente alternada em torno do valor nominal de cada uma das amostras, para o aquecimento dos condutores.

### **REALIZAÇÃO DA MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS**

O valor da resistência elétrica de um cabo condutor depende de diversos fatores, entre os quais a temperatura, o encordoamento do cabo e o efeito *skin*. Atualmente não há ensaio especificado em normas técnicas para a medição da resistência elétrica de cabos condutores para linhas aéreas no Brasil. A norma NBR 7270, que trata de ensaio em cabos com alma de aço, especifica alguns pontos, são eles:

- a) para efeito de cálculo, a resistividade volumétrica dos fios de alumínio deve ser considerada como  $0,028264 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ , a  $20^\circ \text{C}$  (alumínio 1350);
- b) no que se refere à resistência elétrica do cabo, é apresentada uma tabela para a correção dos valores calculados para os fios componentes do cabo, levando em consideração o encordoamento. Esta correção varia de 1,5 a 3,0%, dependendo do encordoamento;
- c) no cálculo da resistência elétrica do condutor completo, a alma de aço não deve ser considerada;
- d) nos ensaios de recebimento, é especificado ensaio de verificação da condutividade do fio de alumínio componente do cabo, apenas.

Portanto, a resistência elétrica do cabo condutor completo não tem sido medida, e sim calculada a partir de parâmetros físicos dos fios de alumínio componentes do cabo, com coeficientes de correção para outros fatores que interferem sobre o valor desejado.

### **RESISTÊNCIA EM CORRENTE CONTÍNUA (CC)**

Nas faixas usuais de operação dos cabos ( $0-90^\circ \text{C}$ ), a resistência em CC de um fio de alumínio é considerada proporcional à temperatura, sendo expressa por:

$$R_2 = R_1 (1 + \alpha_1 (T_2 - T_1)) \quad (45)$$

Onde  $R_1$  e  $R_2$ , são valores da resistência elétrica nas temperaturas  $T_1$  e  $T_2$  respectivamente.  $\alpha_1$  é o coeficiente de variação da resistência na temperatura  $T_1$ , variando na prática entre 0,0035 e 0,0045, dependendo da resistividade do fio e da temperatura.



Para calcular a resistência em corrente contínua de um condutor, e calcula-se a resistência elétrica de cada fio (seção x resistividade elétrica) e corrige-se pelo fator de encordoamento, considerando então uma associação em paralelo dos fios e finalmente, corrigindo-se para a temperatura desejada.

### **RESISTÊNCIA EM CORRENTE ALTERNADA (CA)**

Os condutores oferecem maior resistência elétrica em CA do que em CC, devido ao efeito *skin*, histerese e outros fenômenos. A referência brochura 345, do CIGRÉ, permitem estimar a influência destes fenômenos por meio de correções ao valor calculado para CC, valores estes que podem chegar a 15% de acréscimo em casos práticos.

As normas consultadas para descrição do levantamento da resistência elétrica em corrente contínua baseou-se na norma NBR 6814. Os equipamentos necessários para a medição da resistência poderão ser compostos por ponte dupla tipo Kelvin ou um potenciômetro desde que a resistência da amostra seja inferior a 1 Ohm. Uma ponte de Wheatstone pode ser utilizada também, no caso de a amostra possuir resistência acima de 1 Ohm.

### **PROCEDIMENTO DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO**

Os levantamentos dimensionais da amostra devem ser feitos utilizando instrumentos de medição de no mínimo 0,05%. Deve-se tomar o cuidado de medir o comprimento dos terminais do potencial de medição a partir do lado interno do vão analisado.

A dimensão da seção transversal da amostra deve ser levantada através da medição dos diâmetros dos fios através de um micrômetro. O número de medições deve ser o suficiente para que se tenha uma média dentro de 0,10%.

Quando forem utilizados terminais para leitura dos potenciais, deve-se manter a distância de cada terminal potencial com o correspondente de corrente a uma distância de no mínimo 1,5 vezes o perímetro da amostra. O circuito de medição não deve influenciar significativamente no valor da resistência medida. Para isso deve se adotar uma forma de compensar o valor de resistência adicional incrementada pelos acessórios dos equipamentos utilizados.

Deve se cuidar com que a temperatura ambiente e o da amostra estejam equalizados. O valor da corrente utilizada e o tempo de aplicação da corrente devem ter um valor que não altere significativamente o valor de temperatura da amostra, durante a sequência de aquisição dos valores de resistência. O valor de corrente aplicado deve ser o bastante para gerar uma queda de tensão suficiente para que haja precisão na leitura, mantendo a precisão de 0,15%. As superfícies de contato deverão ser mantidas limpas e desengraxadas, para que não seja inserida resistência adicional a leitura.

Foi utilizada uma bancada de ensaios, construída dentro do laboratório de ensaios mecânicos do Lactec, no campus da Universidade Federal do Paraná, em uma área total de 84 m<sup>2</sup> e comprimento total de 21 m. O vão empregado possui vão útil de 14 m e capacidade de até 300 kN de tração, tendo o corpo da bancada um comprimento total de 20 m, conforme apresentado na Figura 85.



Figura 85. Disposição da montagem do ensaio para medições da resistência elétrica em CA e CC  
Fonte: O autor.

### **SISTEMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE**

O sistema de controle é composto por um microcomputador com placas de aquisição e controle da National Instruments® (NI). O programa de controle foi desenvolvido com a ferramenta Labview®, possibilitando a automação do conjunto, realizando as medições e controle de tração automaticamente.

Todas as medições da resistência elétrica da amostra, deslocamento e tração são adquiridas para fins de controle e também registradas em memória. As informações registradas na memória compõem os gráficos e relatórios apresentados em tempo real e cálculos realizados no fim das medições.

Para a geração de corrente no condutor, foi utilizado um transformador de corrente (TC) com capacidade máxima de 3 kA. Para a alimentação do TC foi utilizado um variador de tensão monofásico de 0 – 440 V com potência de 80 kVA. Com este conjunto, consegue-se variar a corrente na amostra ensaiada, atingindo valores de corrente nominais dos condutores. Procedendo assim é possível levantar os parâmetros elétricos não somente à temperatura ambiente, mas nas temperaturas de projetos e emergencial.

### **SENSORES E TRANSDUTORES QUE COMPÕE O SISTEMA**

Como o ensaio é realizado a tração controlada, com malha do sistema fechada através de uma célula de carga. Desta forma, permite a manutenção do valor de tração desejada, com variação inferior a 0,5% do valor alvo. Para a medição da temperatura, são utilizados quatro termopares tipo T. Eles são distribuídos na amostra de forma se obtenha uma média precisa da temperatura. Como os terminais de corrente funcionam como dissipadores ou geradores de calor, próximo a estas conexões têm-se um valor de temperatura diferente, principalmente quando se trata de correntes elevadas, onde o gradiente de temperatura fica evidente. Portanto, o trecho principal para o qual ocorre a determinação dos parâmetros elétricos deve possuir temperatura o mais uniforme possível, minimizando corrente de ar no trecho medido. O ensaio é realizado a partir de temperatura ambiente até temperaturas elevadas para operação nas linhas de distribuição e transmissão de energia.

Para as medições de corrente é utilizado um TC de janela de precisão de 0,1%. O condutor de alimentação da amostra passa através da janela do TC, e na saída do TC instala-se um *shunt* de precisão. Para a aquisição do valor da queda de tensão no cabo testado, são dois canais de tensão de uma placa que utiliza o barramento PCI de um *desktop*, um para medição do *shunt* e outro para a queda de tensão do condutor. Cada canal possui 24 bits de precisão, com resolução de 10 nV, para a faixa de +/- 0,1 V. A leitura de tensão pico a pico máximo é de +/- 10 V.

## NORMAS UTILIZADAS

O ensaio é realizado conforme procedimento desenvolvido no Lactec, baseado na norma ABNT NBR 6814 – Ensaio de resistência elétrica e na brochura CIGRE WG B2.12 – *Alternating current (AC) resistance of helically stranded Conductors*.

Como se propunha uma disposição mais próxima do real encontradas em campo se fez necessário uma composição eletro termomecânica para a determinação dos parâmetros elétricos. A seguir é descrito a metodologia para o levantamento dos parâmetros elétricos.

### PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE CABOS CONDUTORES

A amostra de cabo tem as terminações preparadas em um ambiente separado, obedecendo à norma NBR 7273. Nesta amostra de cabo são prensados dois equalizadores com o objetivo de realizar as leituras de tensão. O vão entre os equalizadores é de 10 m, distribuídos no meio do vão de 13 m.

### INSTRUMENTAÇÃO DA AMOSTRA

Antes da instalação da amostra, as células de carga possuem os ganhos e zeros checados. Na sequência o condutor é pré-tensionado o bastante para suspendê-lo e também permitir a introdução dos termopares entre a primeira e segunda coroa de fios da amostra testada. São instalados três termopares entre os equalizadores e os outros quatro são distribuídos dois a dois opostamente, entre os equalizadores e os terminais de ancoragem. O cabo então é carregado à tração de 10% da RMC.

O condutor ensaiado passa por dentro da janela do TC, sendo que a saída do equipamento possui uma resistência calibrada (*shunt*). As conexões para leitura dos sinais de tensão do *shunt* e dos equalizadores são conectadas na placa de aquisição. (ver Figura 86).

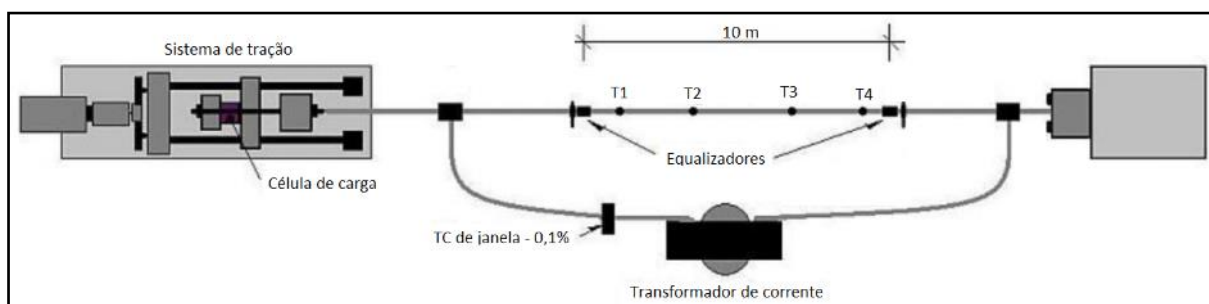


Figura 86. Montagem do ensaio de levantamento dos parâmetros elétricos dos cabos condutores  
Fonte: O autor.

## REALIZAÇÃO DO ENSAIO

Com o condutor tracionado no valor de ensaio, aplica-se corrente no cabo no valor nominal de corrente fornecido pelo fabricante. Em seguida inicia-se a aquisição na taxa de 1 amostra por segundo dos dados de tração, temperatura dos quatro termopares, variação do comprimento do vão de 10 m através dos transdutores de deslocamento, valores de tensão do *shunt* e queda de tensão entre os equalizadores.

A cada aquisição de dados ocorre também a atualização dos gráficos do ensaio no monitor. Os gráficos podem ser acompanhados em tempo real, como: valor de tração, do valor de resistência do condutor, valor de corrente, temperatura e de indutância da amostra ensaiada. Quando o condutor atinge a temperatura máxima do ensaio, a aplicação de corrente é interrompida e os gráficos atualizados.

É possível o acompanhamento do gráfico da resistência elétrica, calculada por meio da equação (46), *versus* a temperatura no condutor ( $^{\circ}$  C) a cada nova aquisição:

$$\mathbf{R} = \text{Re}(\mathbf{V}/\mathbf{I}), \quad (46)$$

onde  $\mathbf{R}$  é o vetor resistência elétrica do condutor no vão útil,  $\mathbf{V}$  é o fasor de tensão elétrica no condutor no vão útil e  $\mathbf{I}$  é o fasor de corrente elétrica fornecida ao corpo-de-prova.

## RESULTADOS OBTIDOS NAS TRÊS AMOSTRAS

Nesta seção são apresentados os resultados da medição da resistência elétrica em CA e CC realizada nas três amostras de condutores. Na Tabela 49 são fornecidos os parâmetros adotados para os ensaios em corrente alternada e contínua.

Tabela 49. Parâmetros de ensaio

CONDUTOR	VÃO ÚTIL (mm)	CORRENTE CA (A)	CORRENTE CC (A)	TRAÇÃO (kN)
Tern	10 000	1014	500	9,80
Phosphorus	10 004	1012	500	9,12
Greeley	10 004	1027	500	13,5

Fonte: Autor

As curvas de resistência elétrica em corrente alternada em função da temperatura para os três condutores são apresentadas na Figura 87. A cada uma dessas curvas é ajustada uma reta, pelo método dos mínimos quadrados, cujos coeficientes angular e linear são apresentados na Tabela 50.

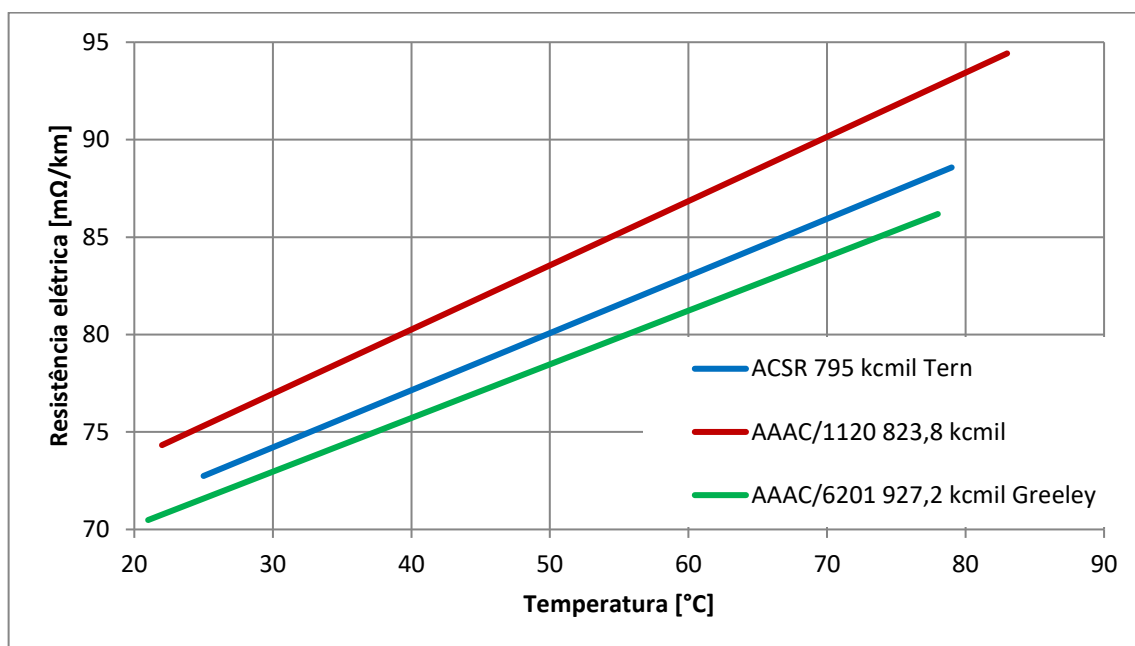


Figura 87. Retas ajustadas aos resultados dos ensaios em corrente alternada

Fonte: Lactec.

Tabela 50. Resultados dos ensaios em corrente alternada (CA)

CONDUTOR	CORRENTE (A)	COEF. LINEAR (mΩ/km)	COEF. ANGULAR (mΩ/km/° C)
Tern	1014	65,417	0,29311
Phosphorus	1012	67,078	0,32948
Greeley	1027	64,699	0,27546

Fonte: Autor

Finalmente, a Tabela 51 apresenta os parâmetros e resultados dos ensaios em corrente contínua, com correção para a temperatura de 20° C pela equação (45).

Tabela 51. Resultados dos ensaios em corrente contínua (CC)

CONDUTOR	TEMP. (° C)	RES. $R_{\theta}$ (m $\Omega$ /km)	COEF. DE CORREÇÃO, $\alpha_{\theta 0}$ (° C <sup>-1</sup> )	RES. à 20° C, $R_{\theta 0}$ (m $\Omega$ /km)
Tern	19,82	71,990	0,00403	72,044
Phosphorus	20,49	72,461	0,00390	72,324
Greeley	19,70	70,082	0,00347	70,155

Fonte: Autor

**MOTOR ELÉTRICO**

O motor elétrico será utilizado para o acionamento do macaco mecânico, Figura 88. Para o projeto, a partir dos requisitos e parâmetros calculados para o acionamento do macaco mecânico, foi especificado um motor de indução trifásico, conforme apresentado na Tabela 52 - Especificação do motor elétrico.



Figura 88 - motor elétrico utilizado no projeto

Fonte: O autor.

Tabela 52 - Especificação do motor elétrico

FABRICANTE	WEG
Modelo	W22
Tensão nominal	Trifásico 220/380 V
Corrente nominal de operação 220/380 V	3,02/1,75 A
Potência	0,75 kW / 1 CV
Número de polos	4
Frequência	60 Hz
Rotação nominal	1730 rpm
Grau de proteção	IP66
Modelo da carcaça	80

Fonte: Weg acionamentos

## I. WÖHLER



## WÖHLER

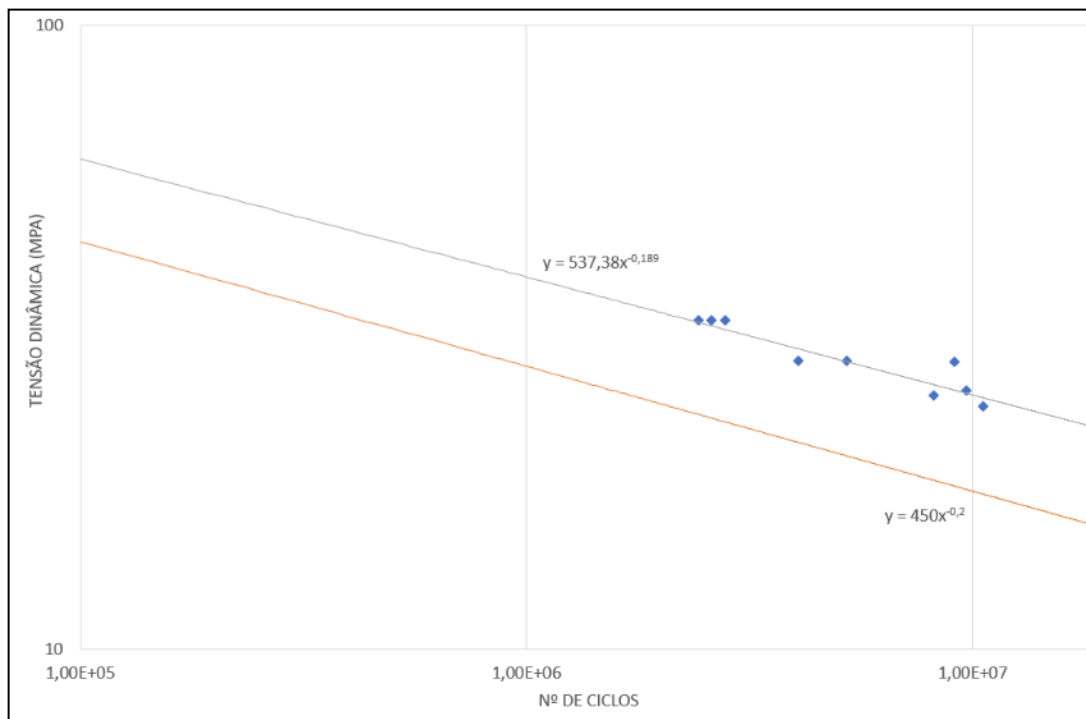


Figura 89. Curvas do cabo Tern para baixa tração  
Fonte: O autor.

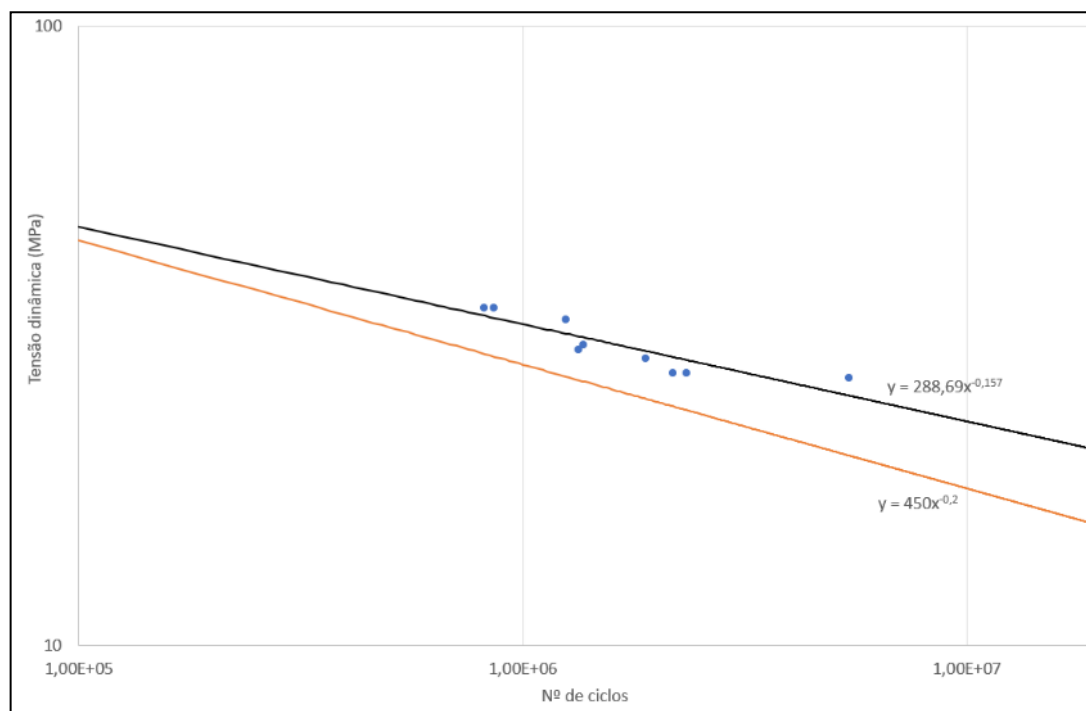


Figura 90. Curvas do cabo Tern para média tração  
Fonte: O autor.

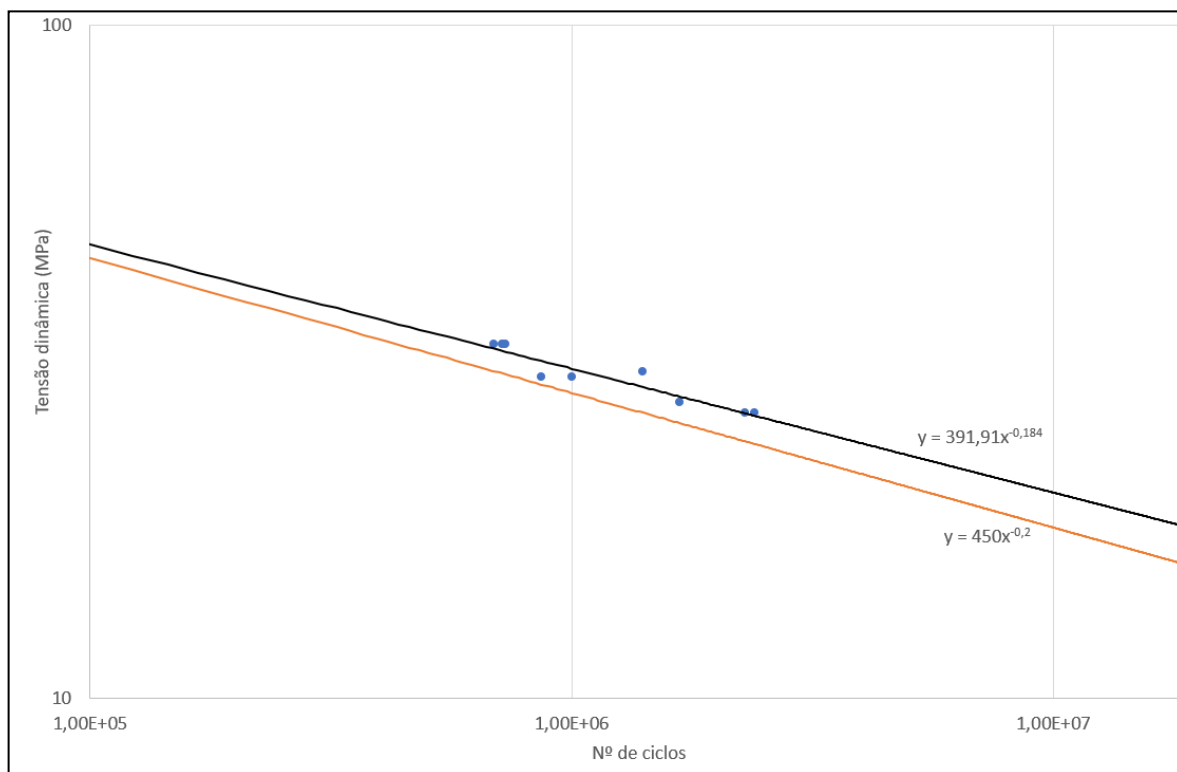


Figura 91. Curvas do cabo Tern para alta tração  
Fonte: O autor.

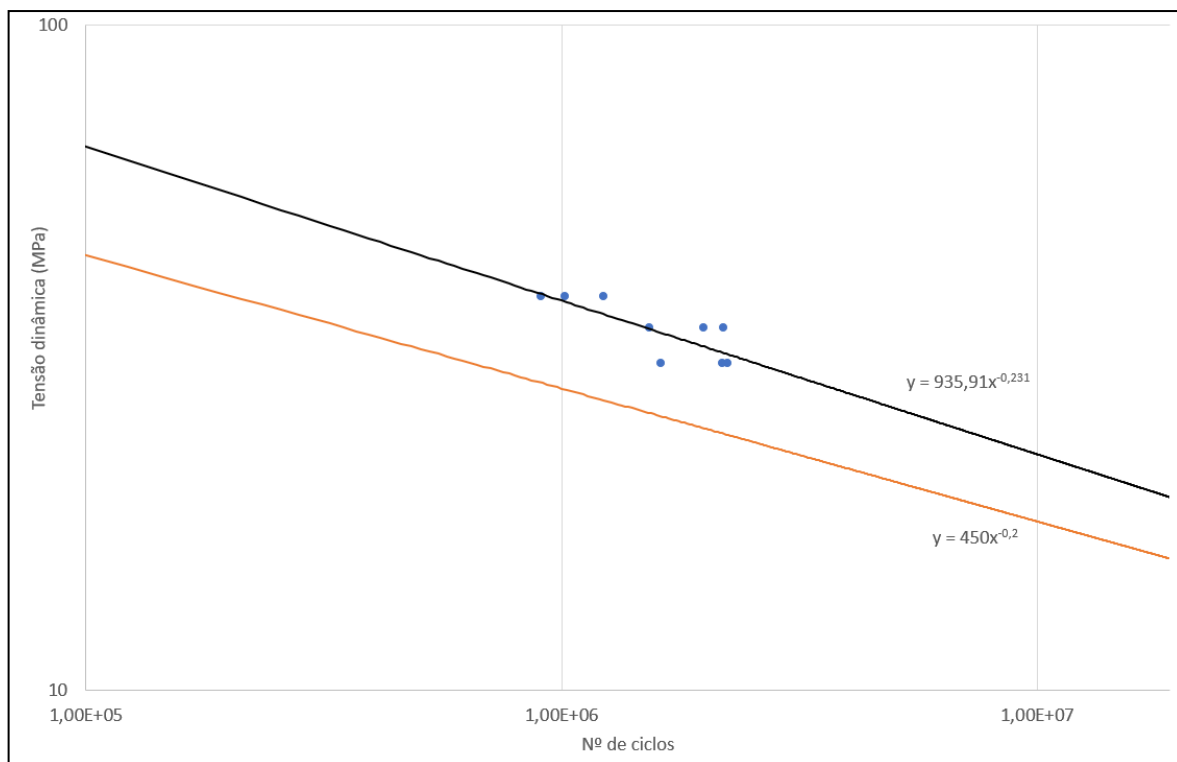


Figura 92. Curvas do cabo Phosphorus para baixa tração  
Fonte: O autor.

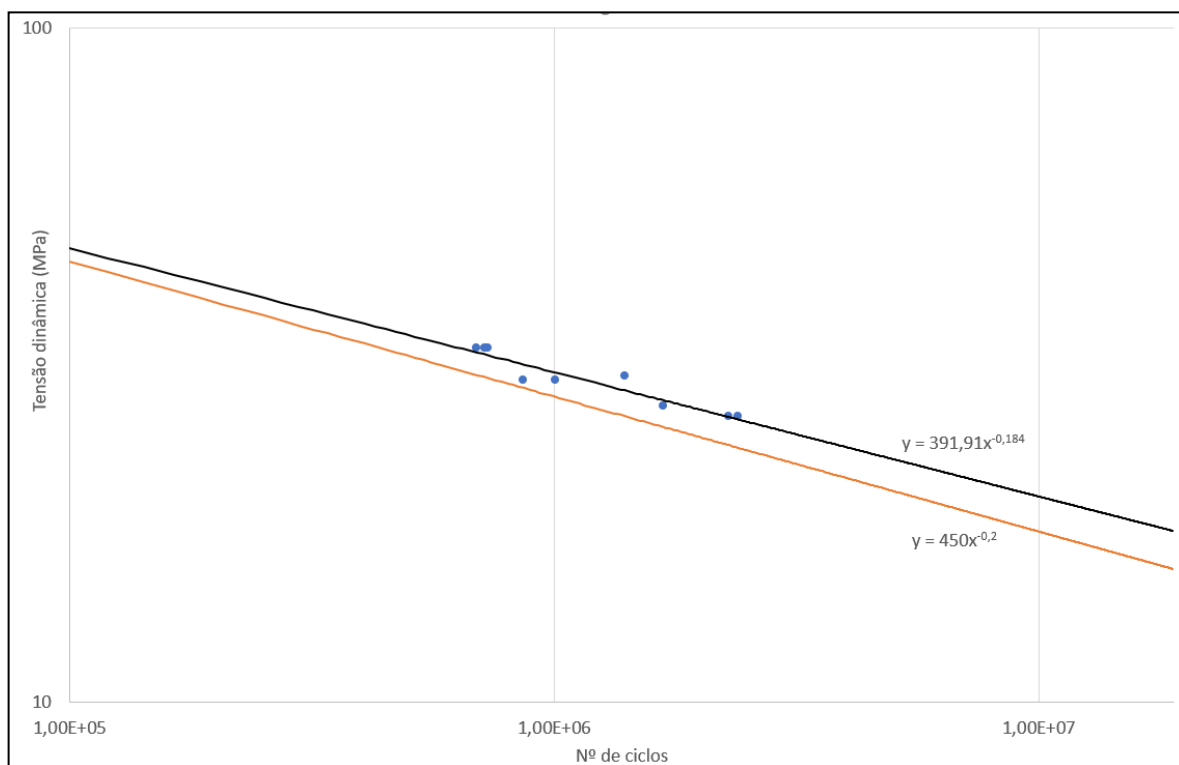


Figura 93. Curvas do cabo Phosphorus para média tração  
Fonte: O autor.

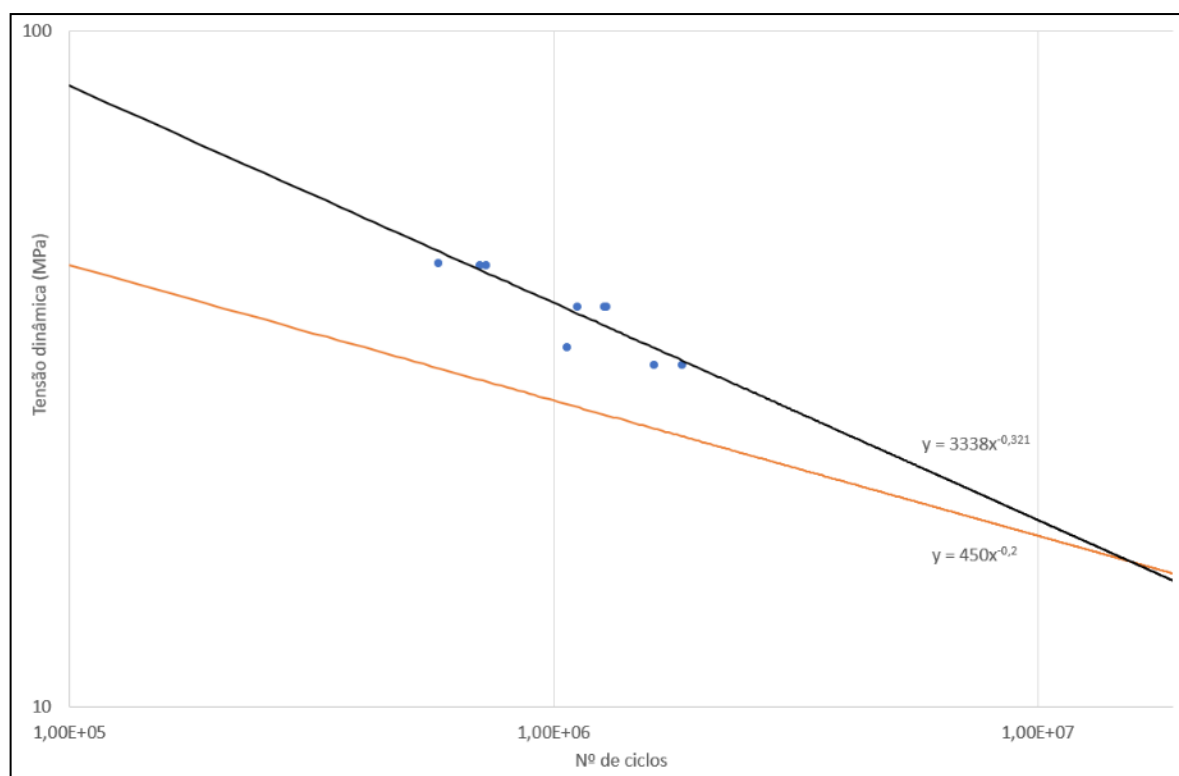


Figura 94. Curvas do cabo Phosphorus para alta tração  
Fonte: O autor.

**J. RESULTADOS COMPARATIVO DOS ENSAIOS DINÂMICOS EM  
CABOS DE TRANSMISSÃO COM E SEM AMORTECEDOR**

## RESULTADOS COMPARATIVO DOS ENSAIOS DINÂMICOS EM CABOS DE TRANSMISSÃO COM E SEM AMORTECEDOR

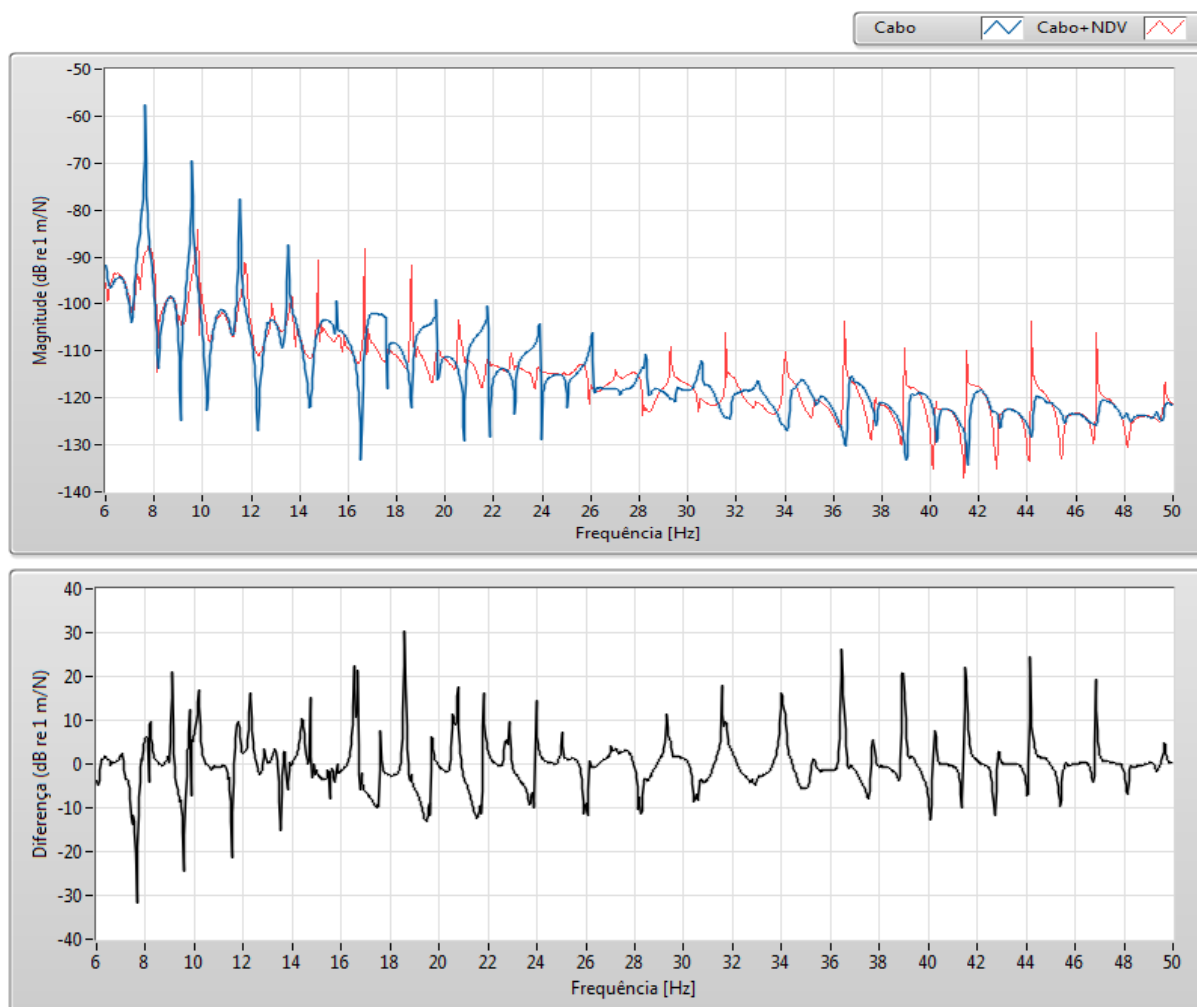


Figura 95. Cabo Tern, 15,6% da RMC

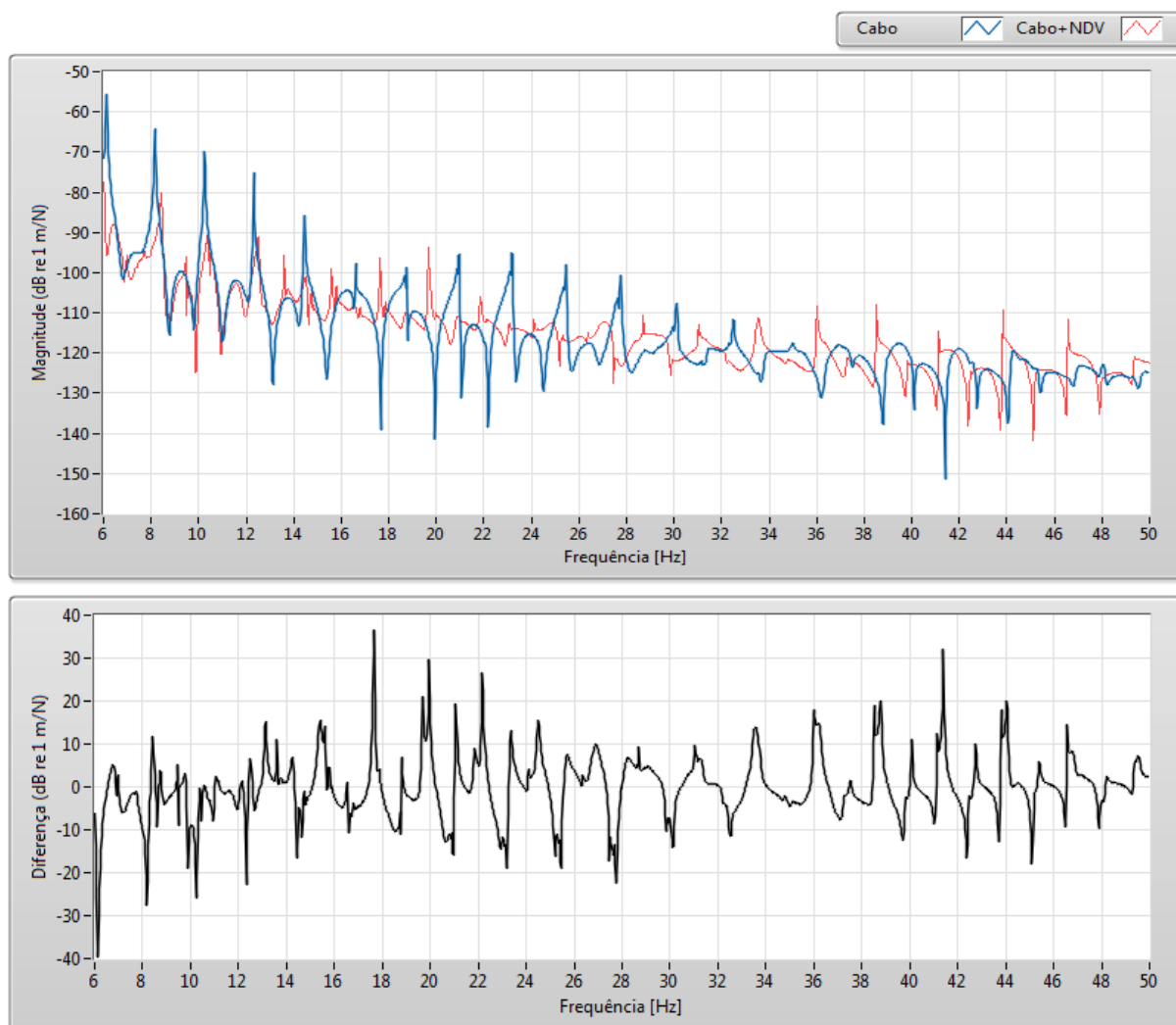
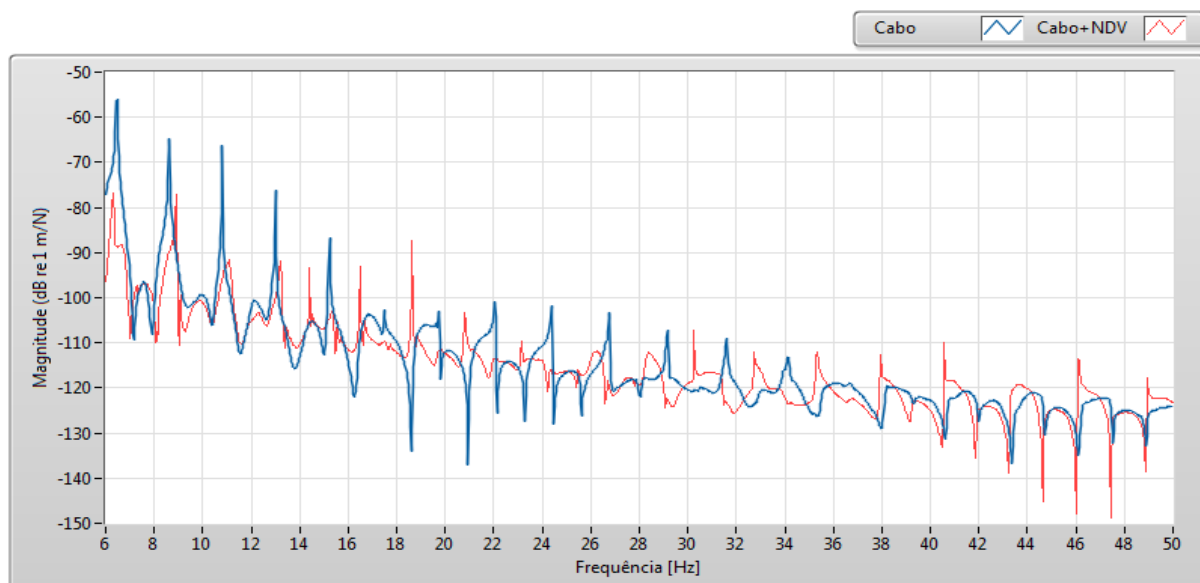


Figura 96. Cabo Tern, 17,8% da RMC



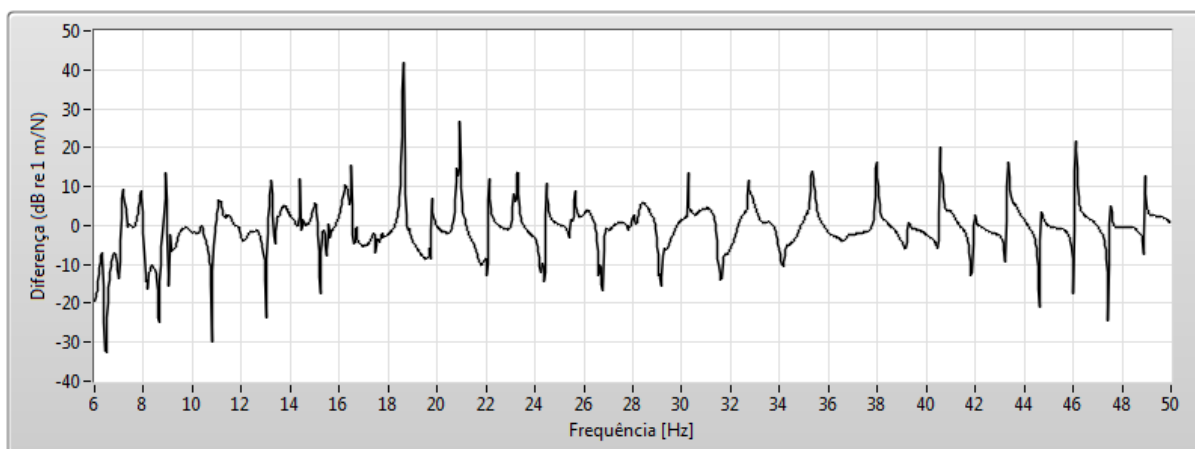


Figura 97. Cabo Tern, 20,1% da RMC

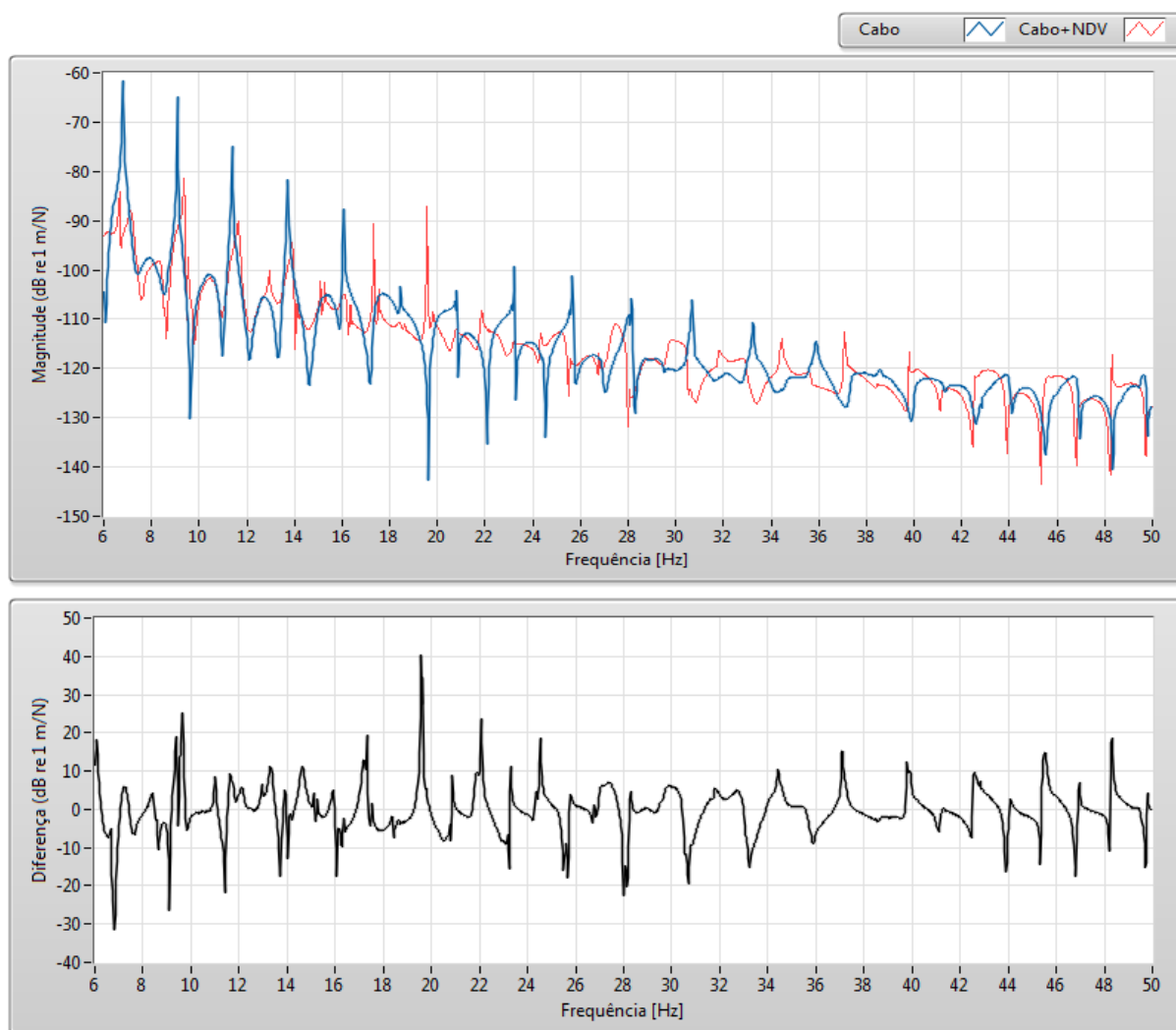


Figura 98. Cabo Tern, 22,3% da RMC

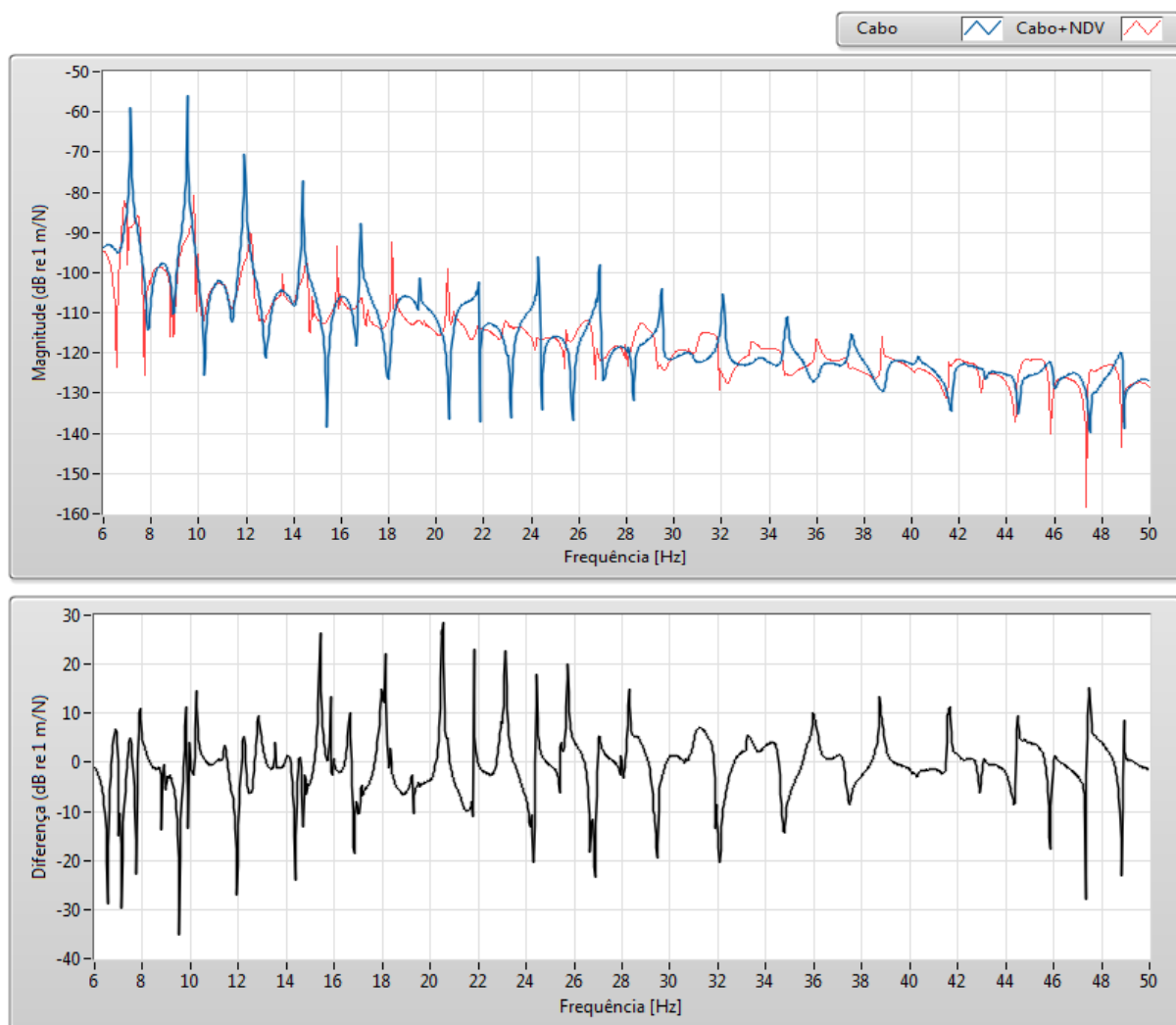


Figura 99. Cabo Tern, 24,5% da RMC



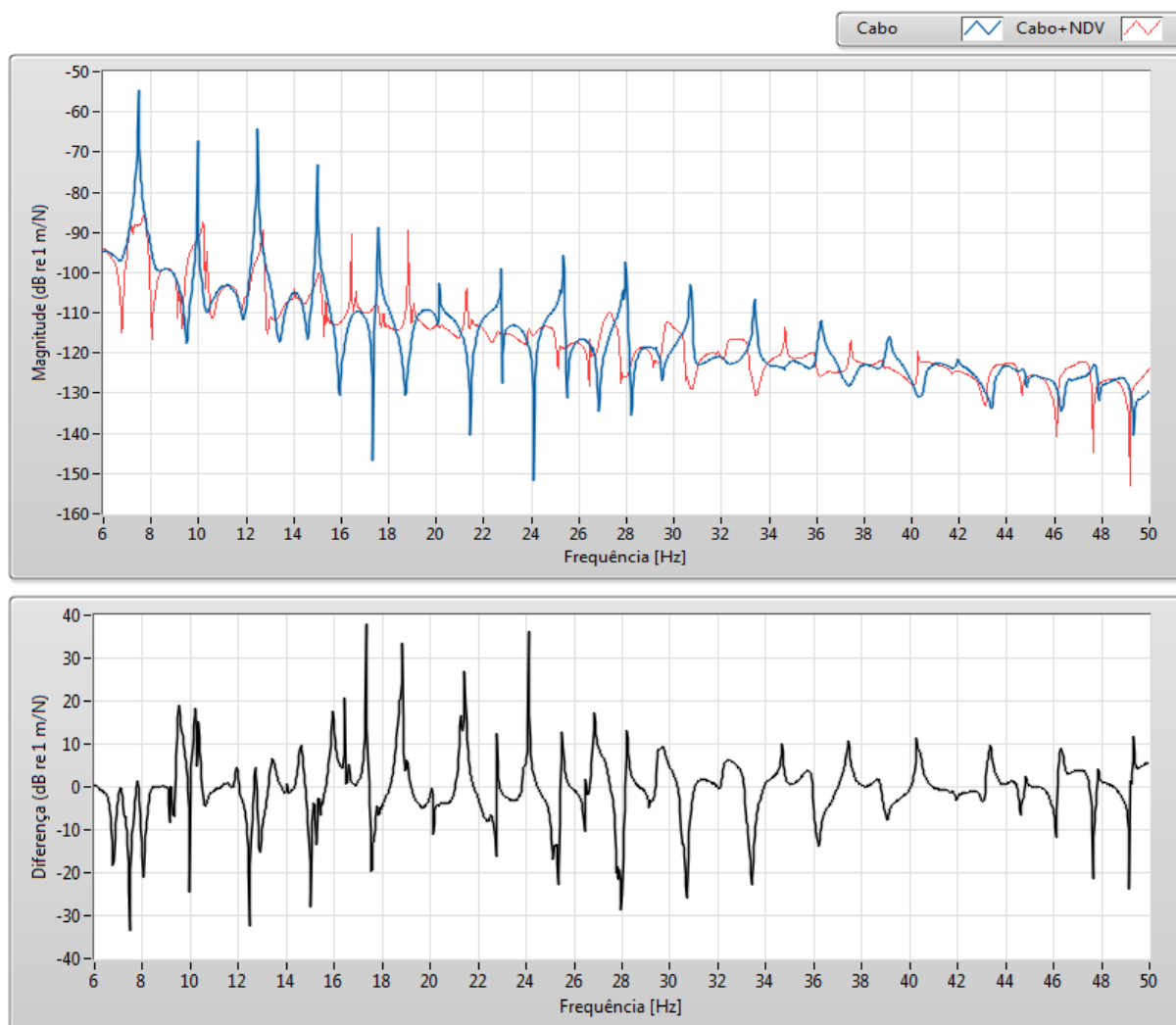


Figura 100. Cabo Tern, 26,7% da RMC

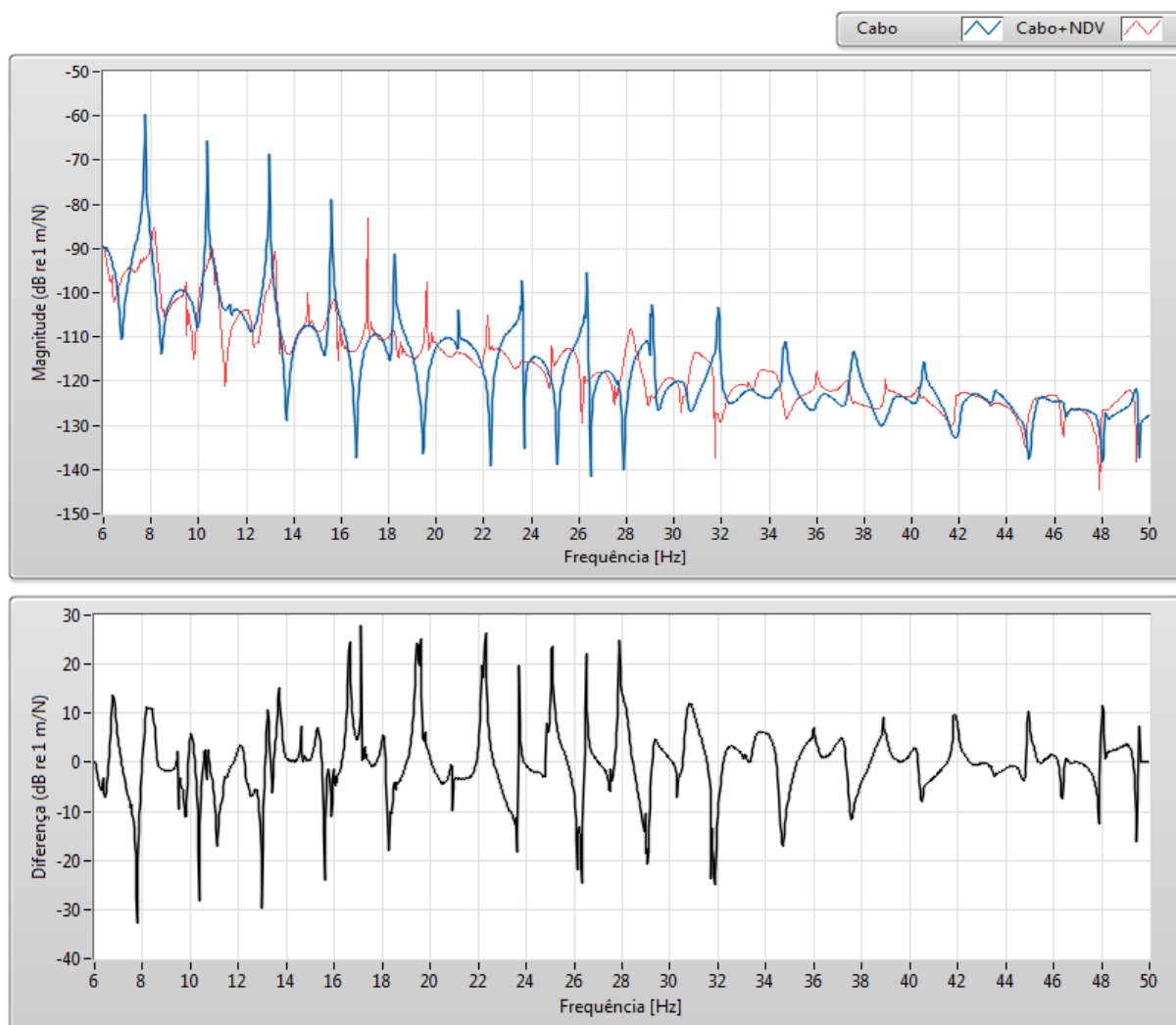
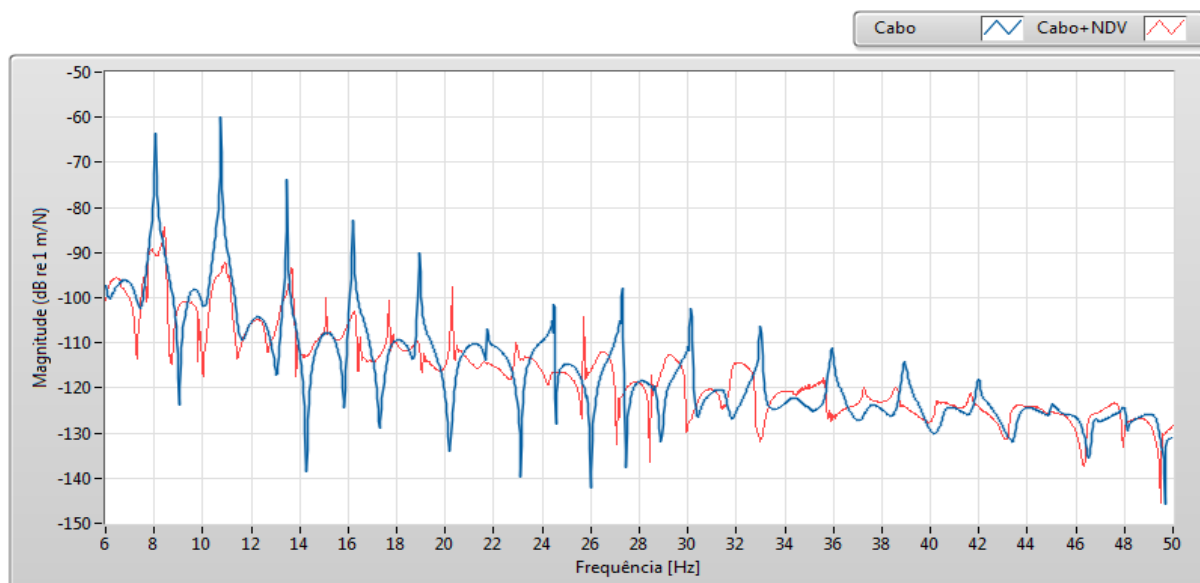


Figura 101. Cabo Tern, 29,0% da RMC



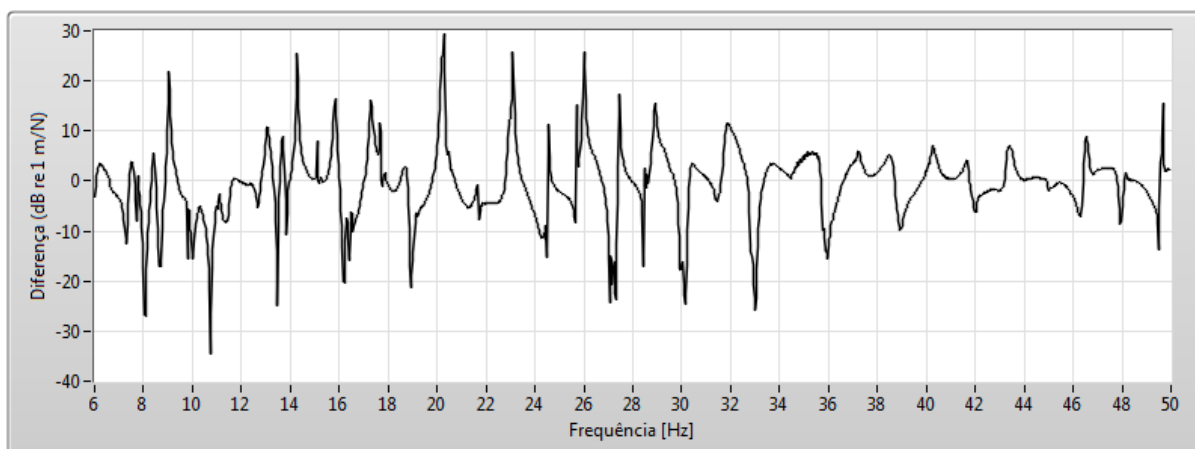


Figura 102. Cabo Tern, 31,2% da RMC

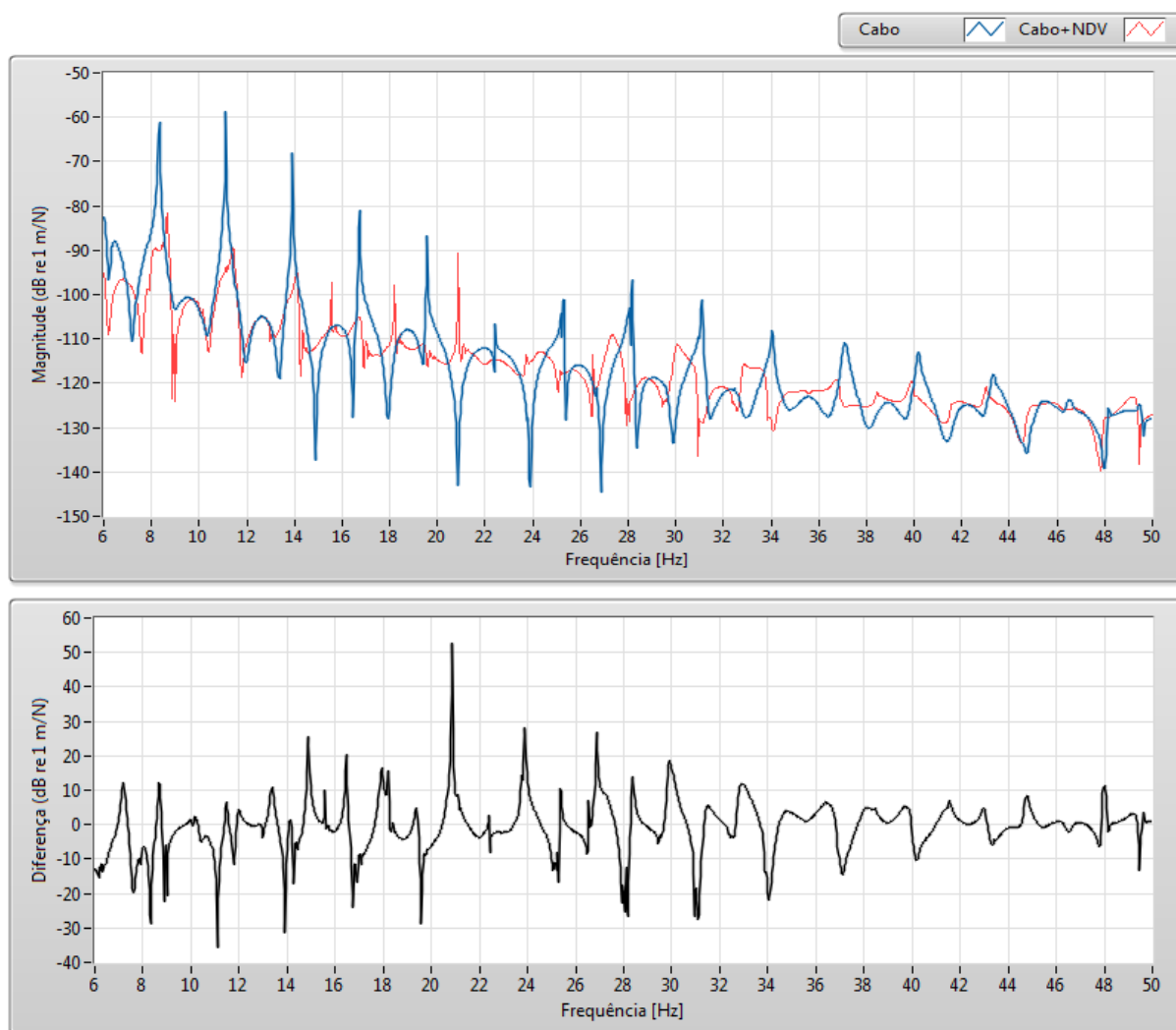


Figura 103. Cabo Tern, 33,4% da RMC

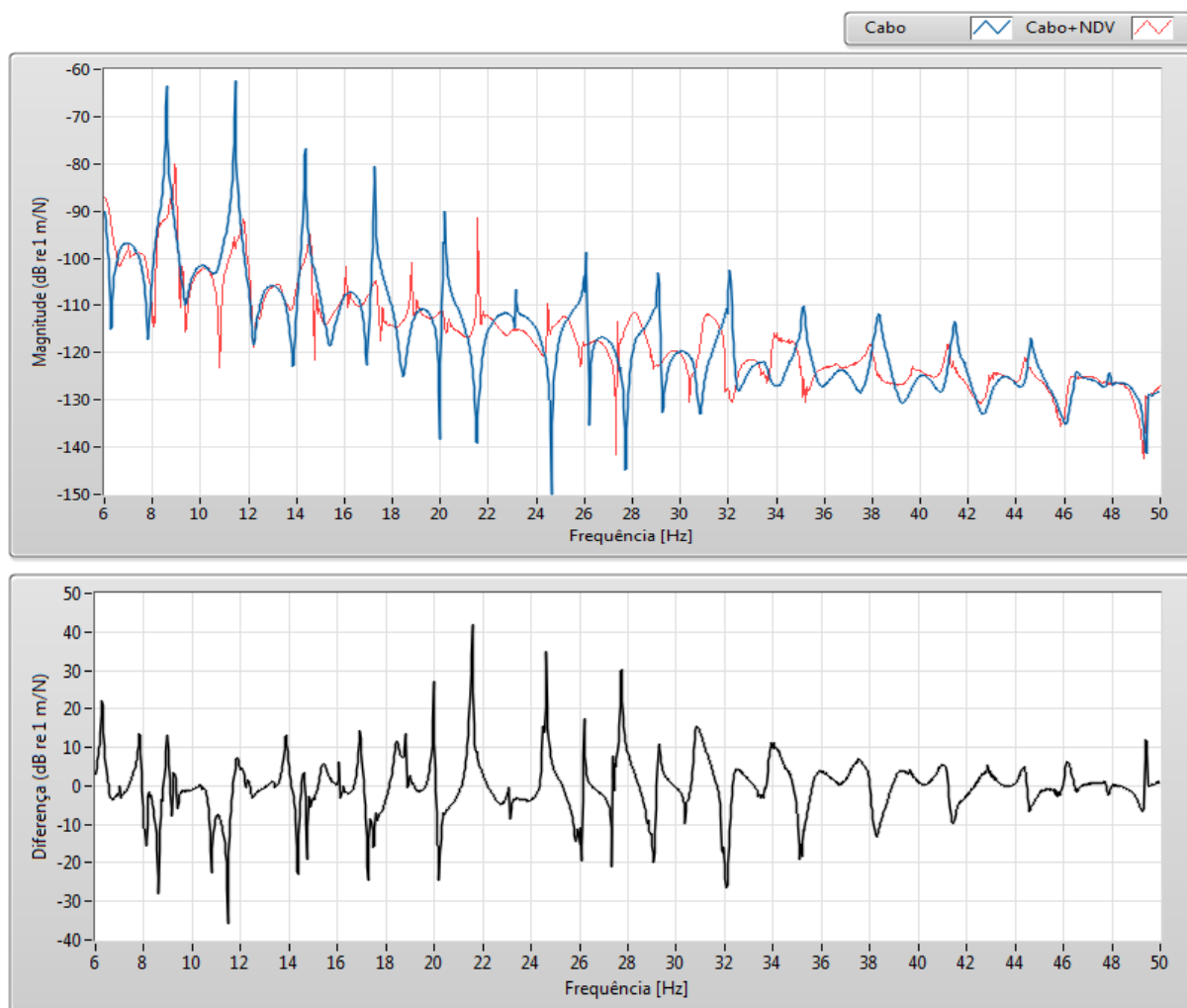
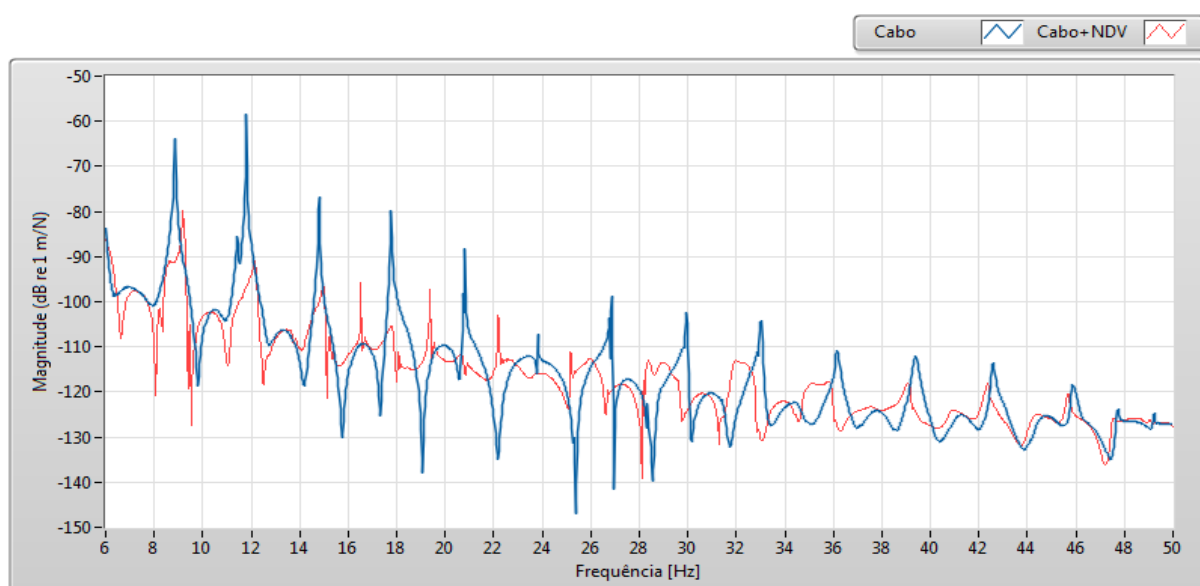


Figura 104. Cabo Tern, 35,7% da RMC



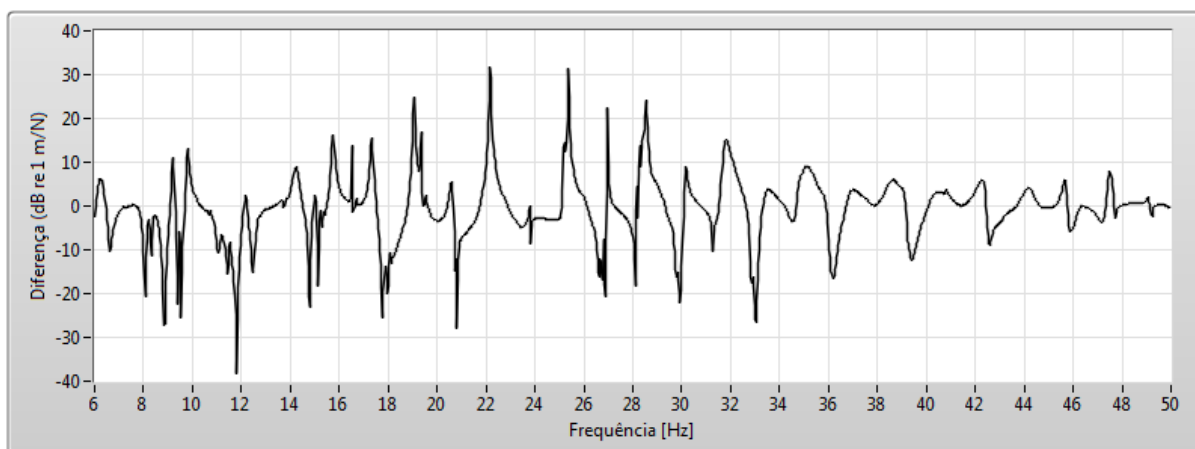


Figura 105. Cabo Tern, 37,9% da RMC

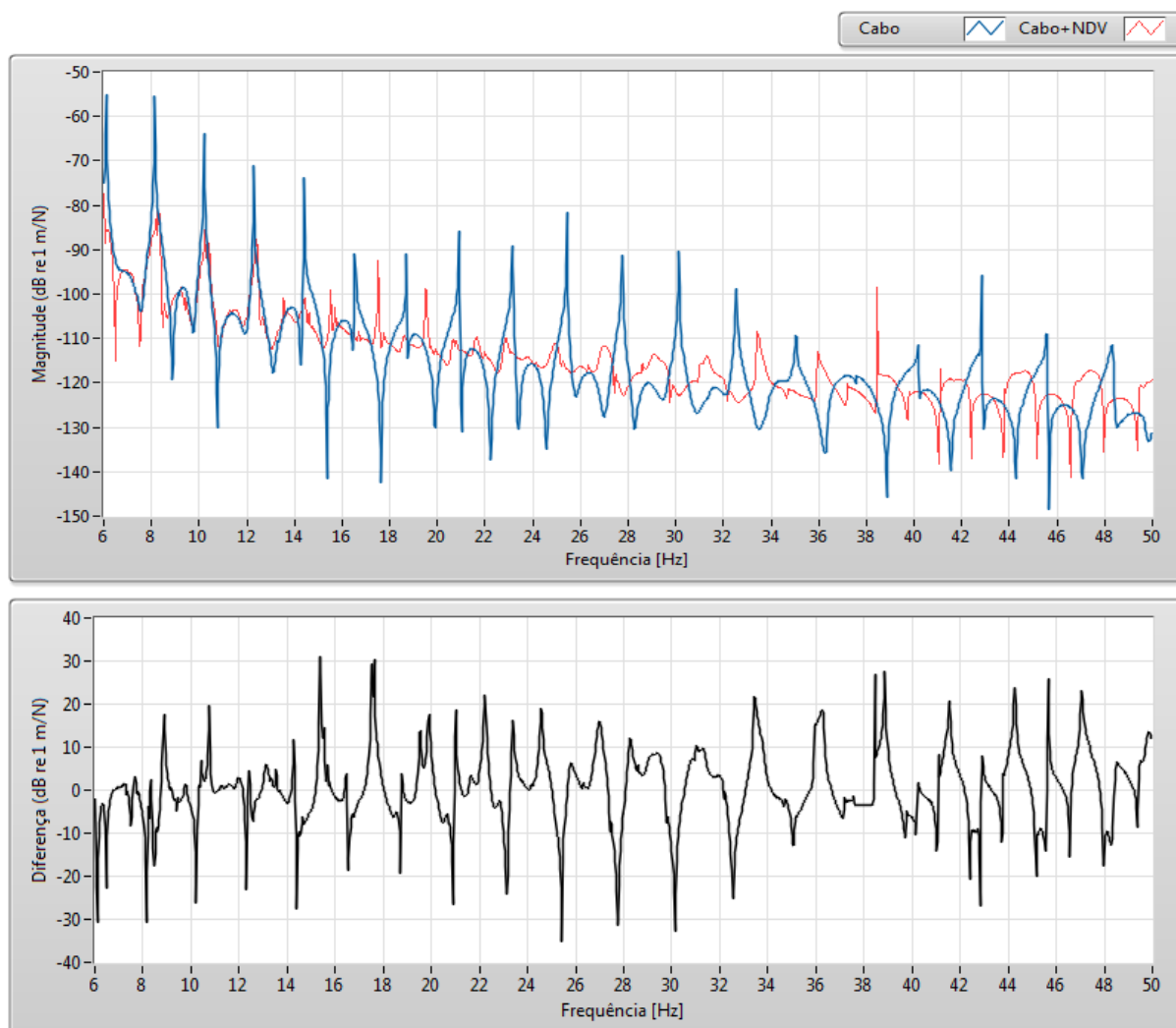


Figura 106. Cabo Phosphorus, 14% da RMC

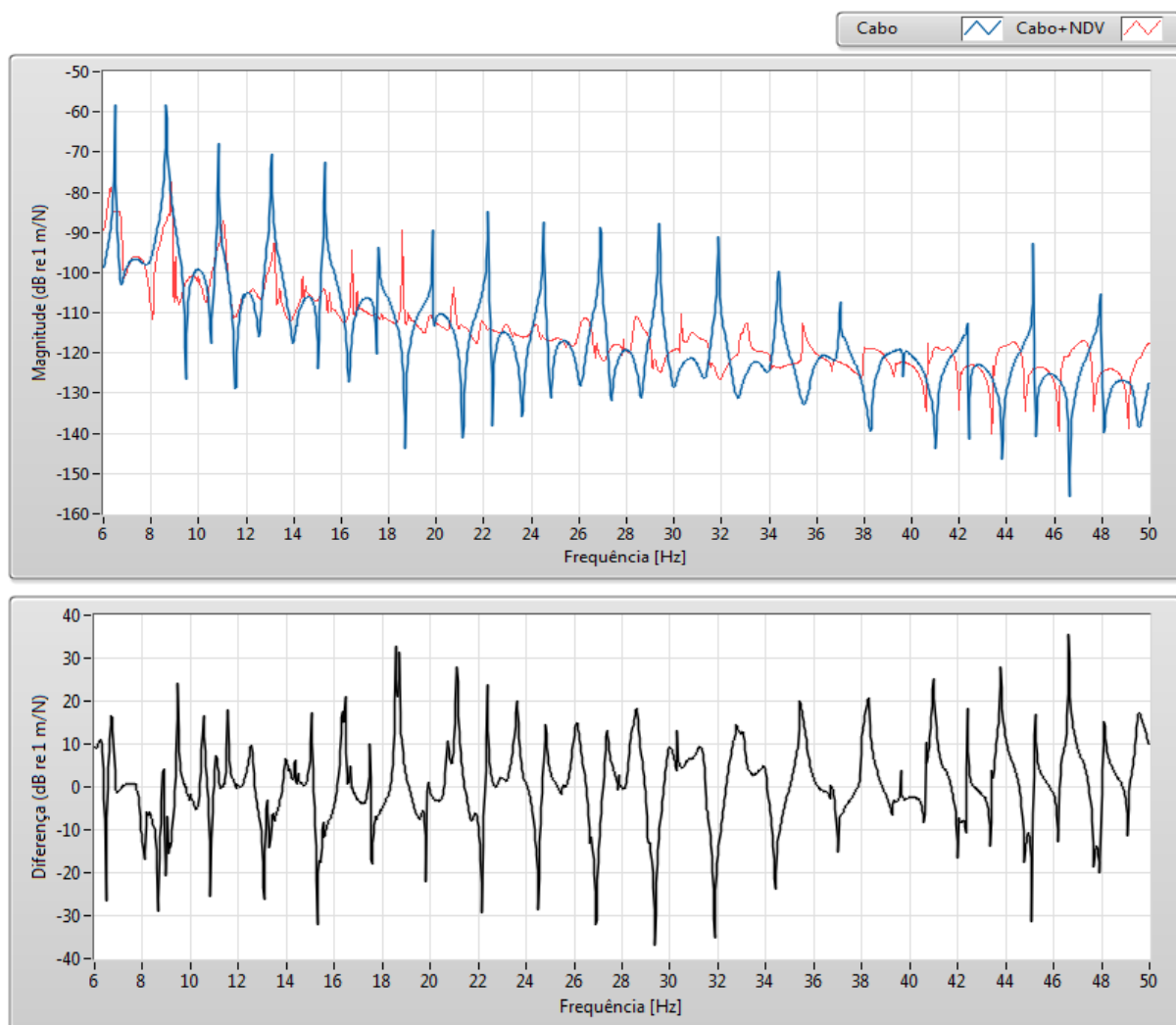
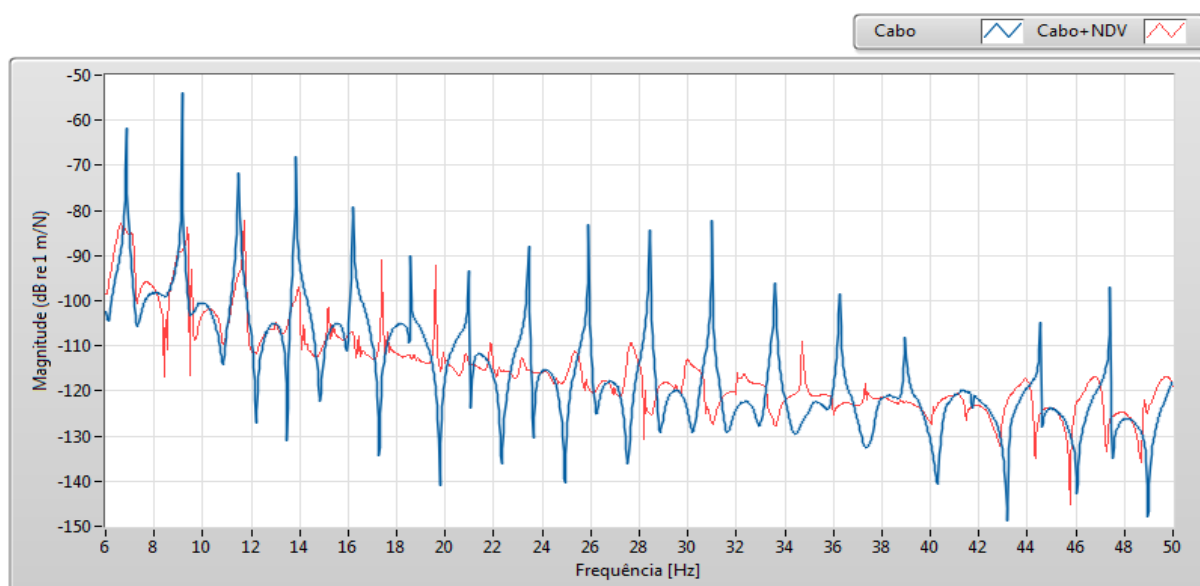


Figura 107. Cabo Phosphorus, 16% da RMC



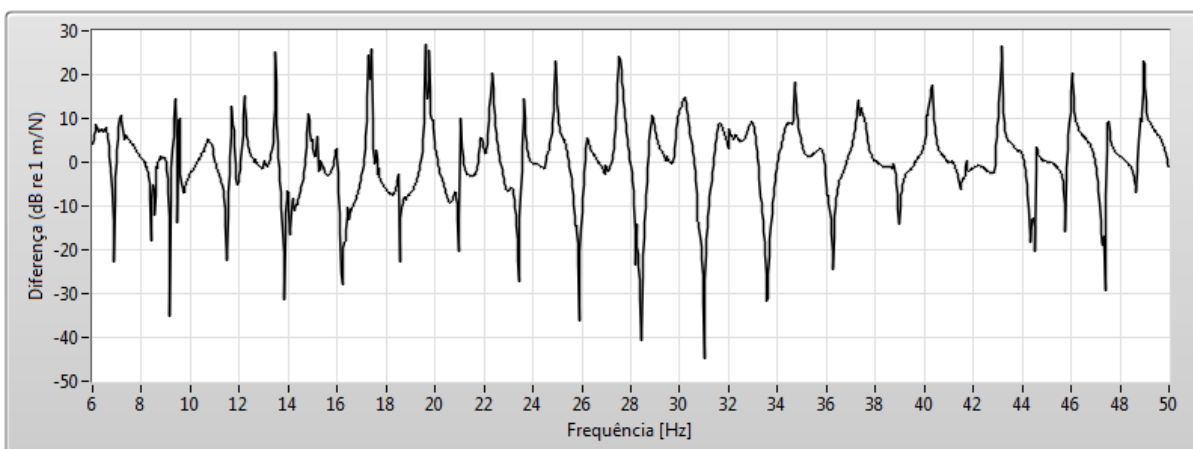


Figura 108. Cabo Phosphorus, 18% da RMC

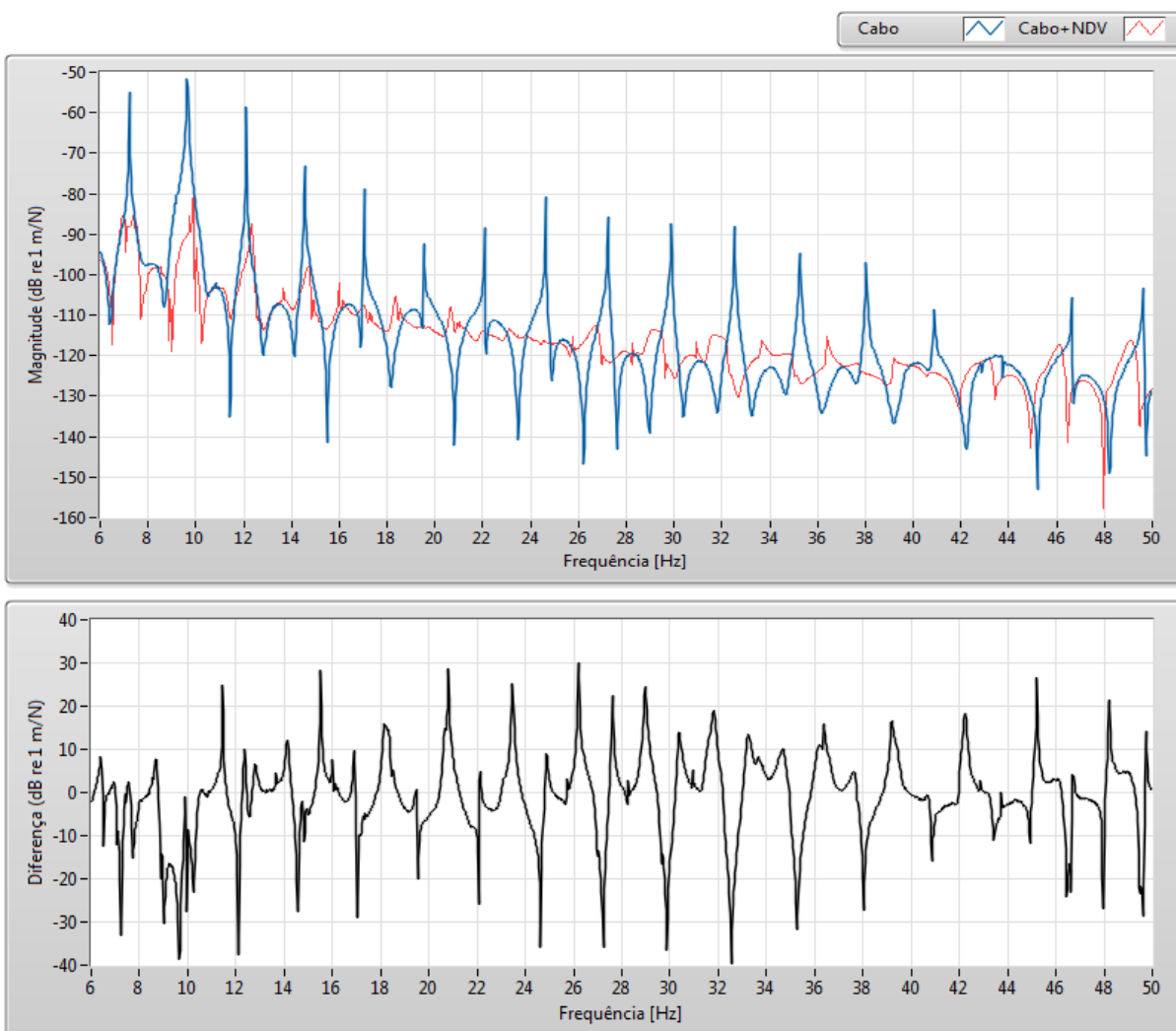


Figura 109. Cabo Phosphorus, 20% da RMC

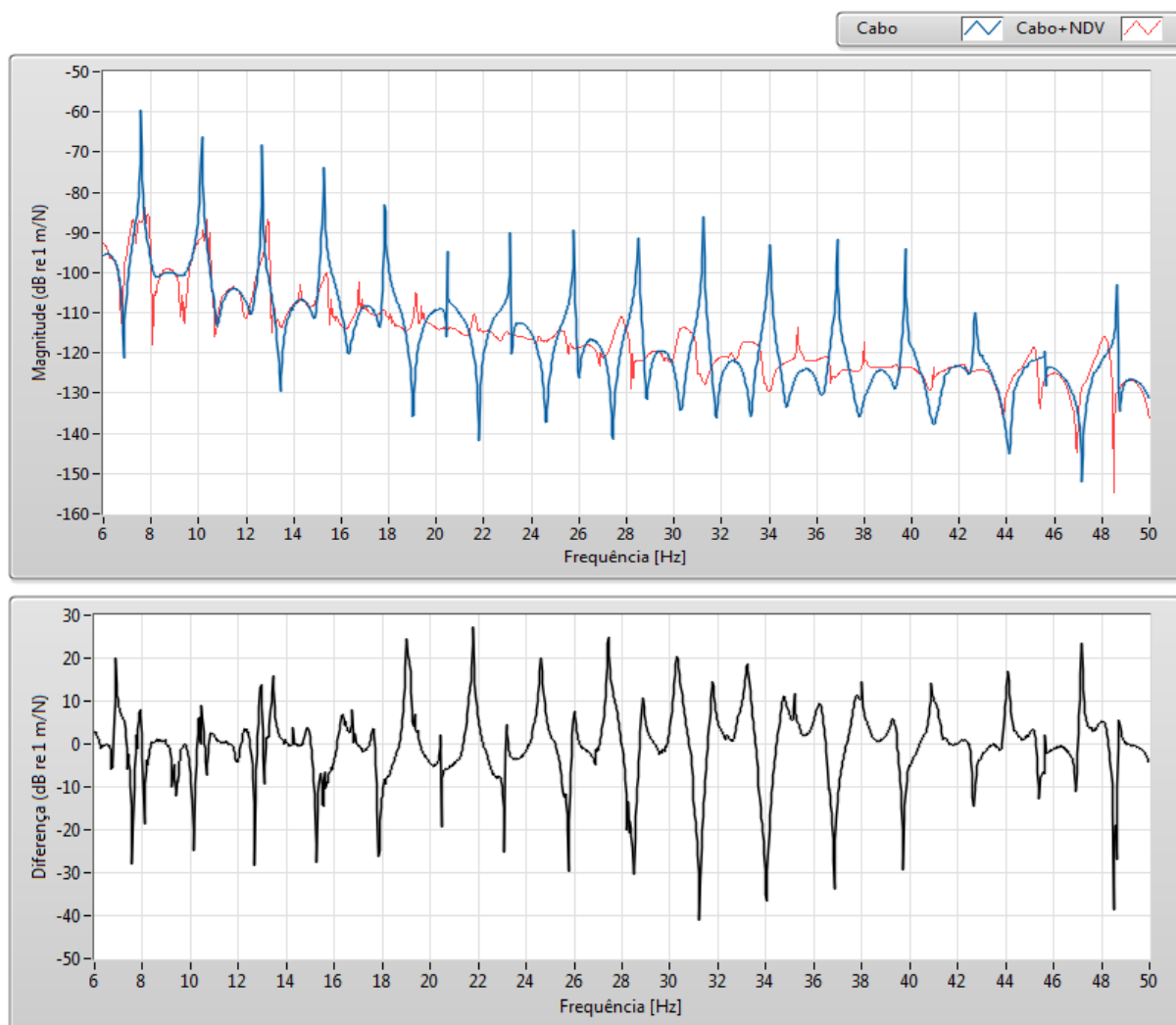
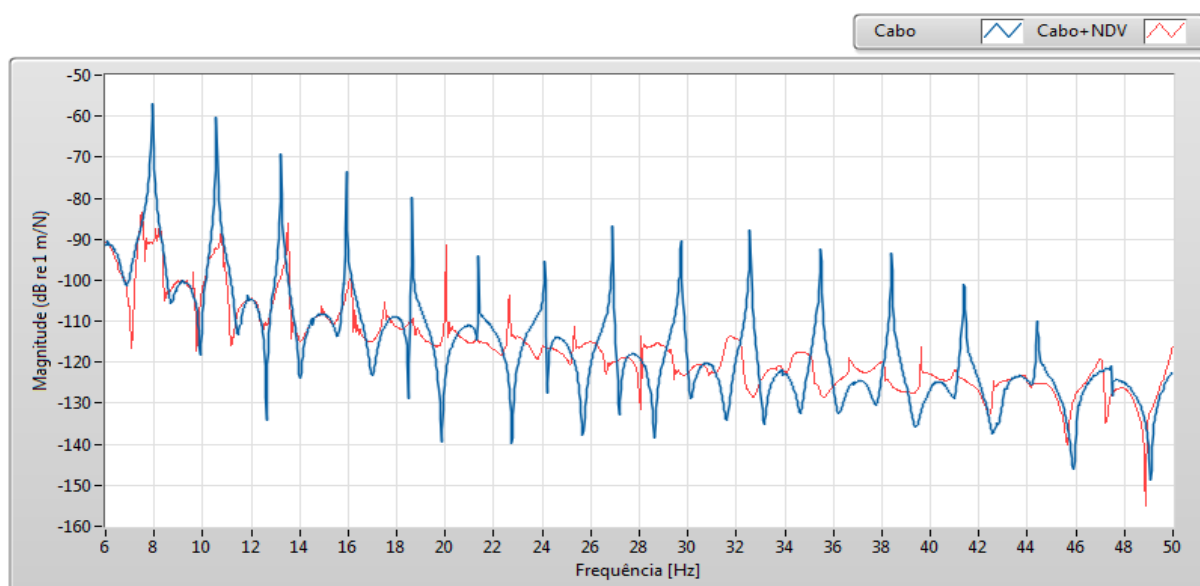


Figura 110. Cabo Phosphorus, 22% da RMC





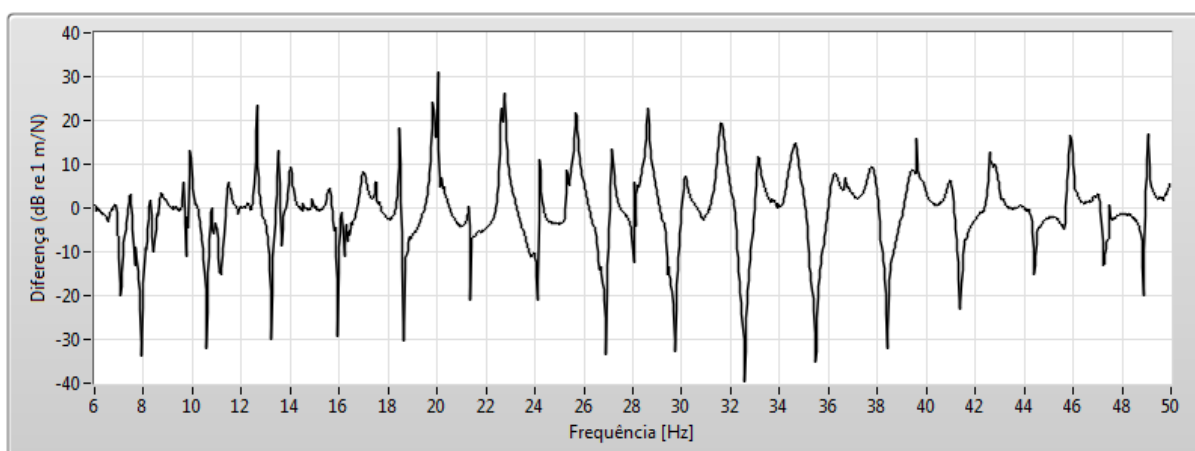


Figura 111. Cabo Phosphorus, 24% da RMC

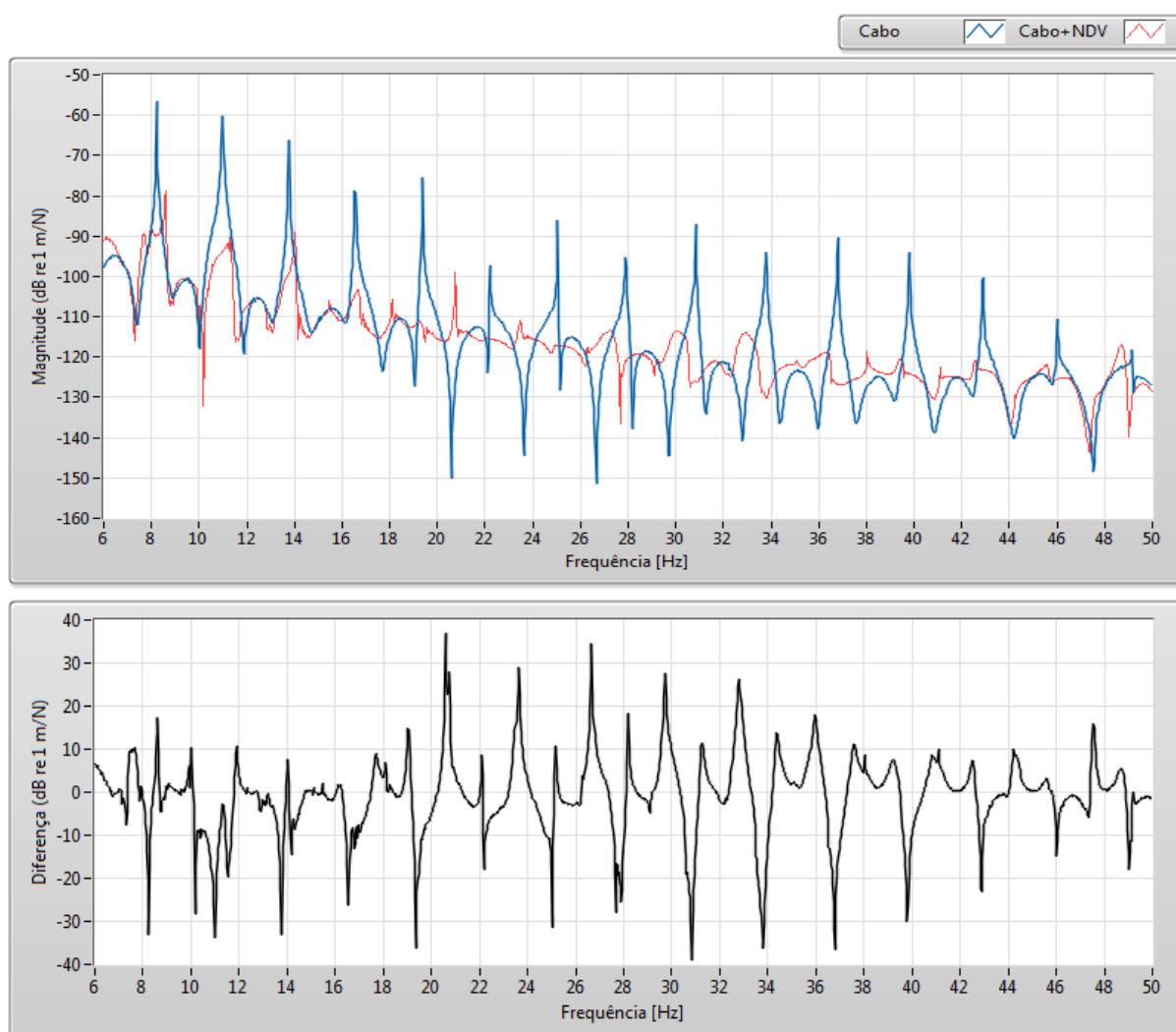


Figura 112. Cabo Phosphorus, 26% da RMC

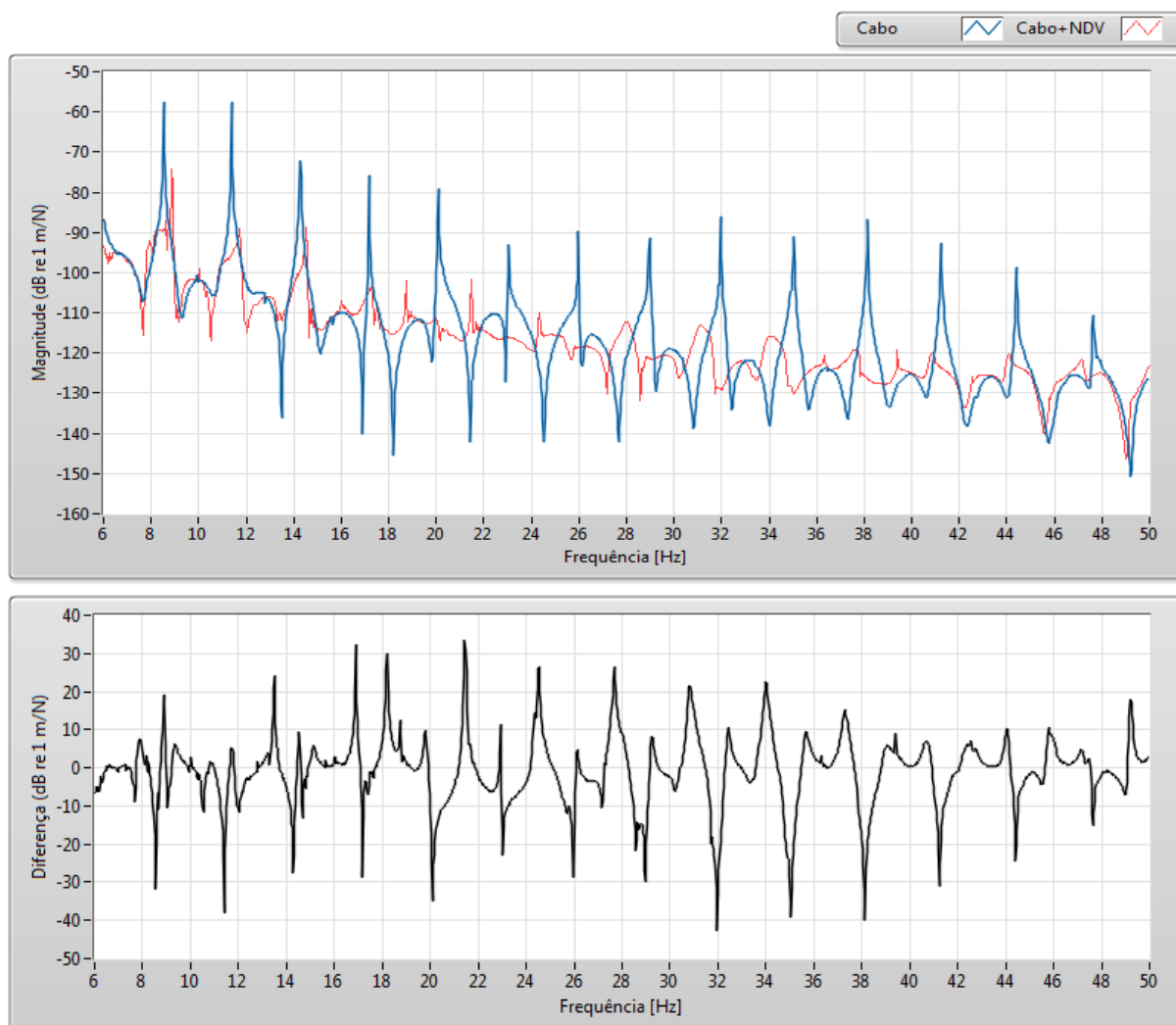
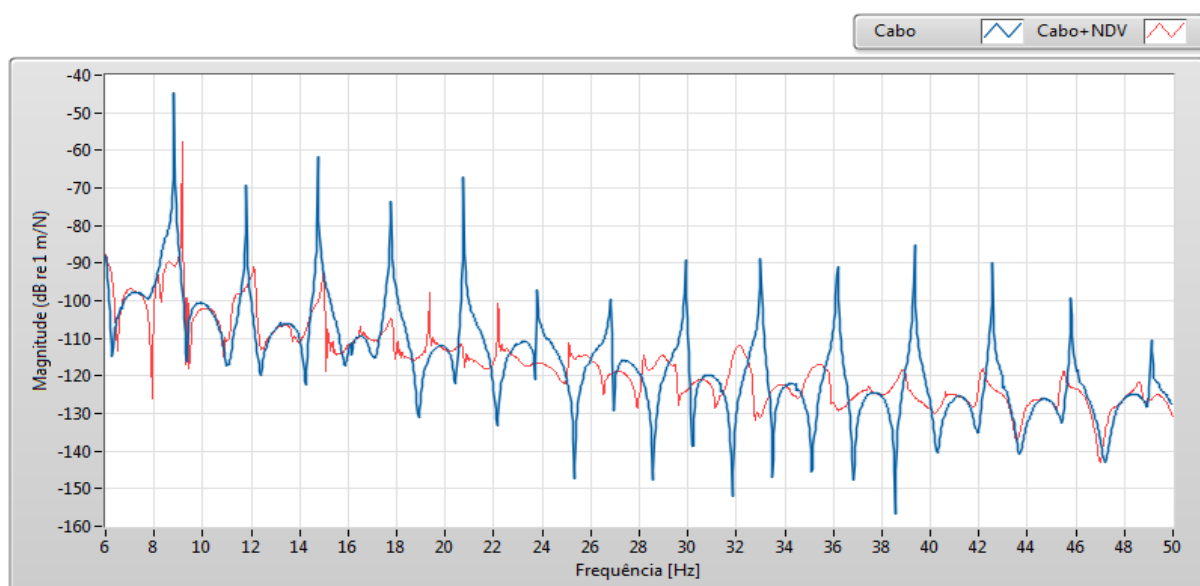


Figura 113. Cabo Phosphorus, 28% da RMC



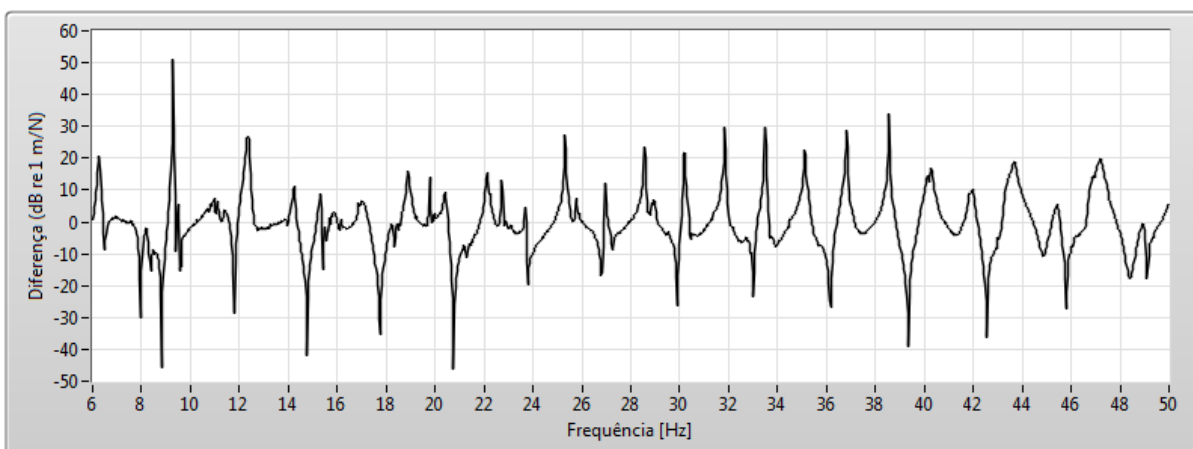


Figura 114. Cabo Phosphorus, 30% da RMC

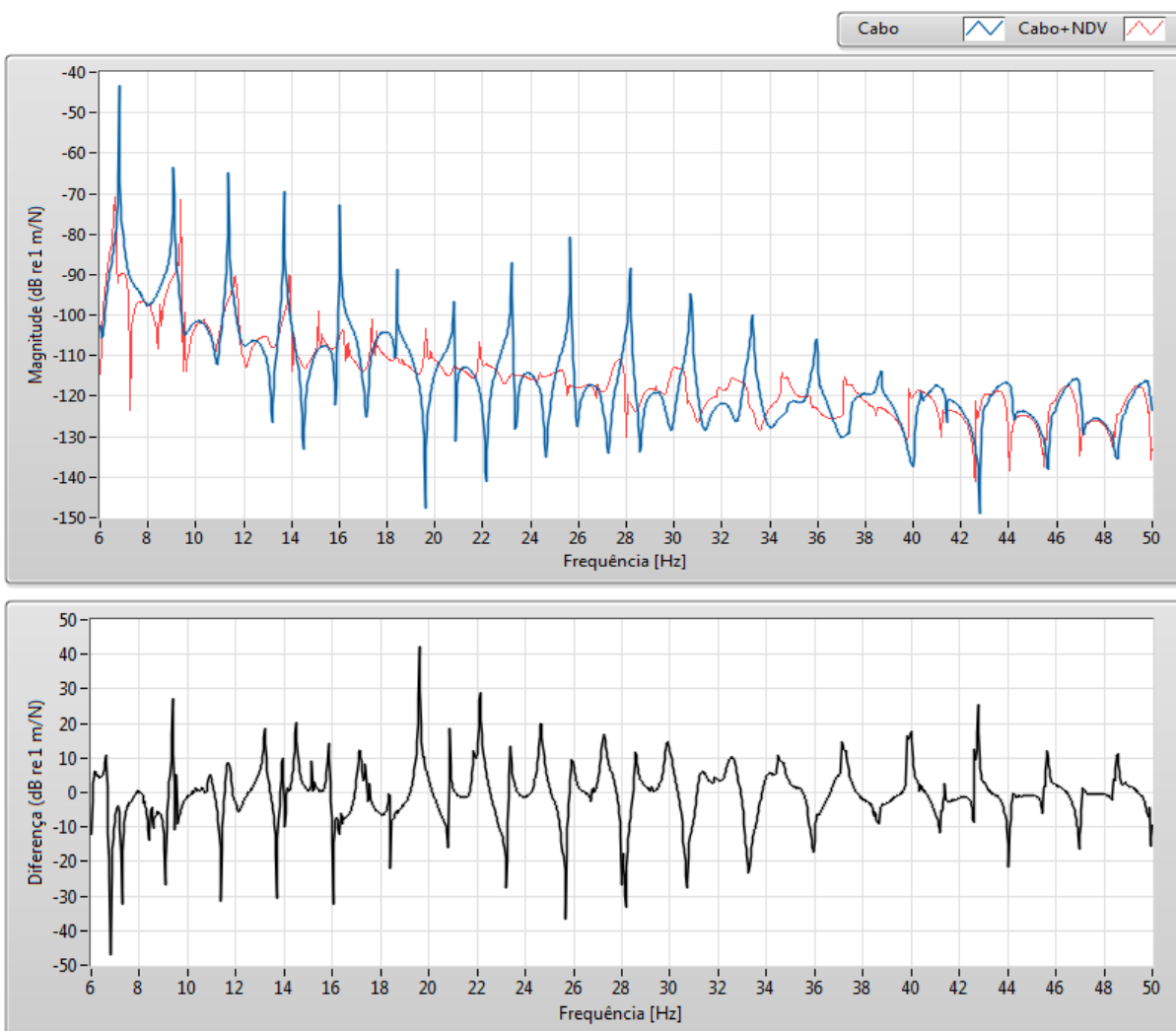


Figura 115. Cabo Greeley, 14% da RMC

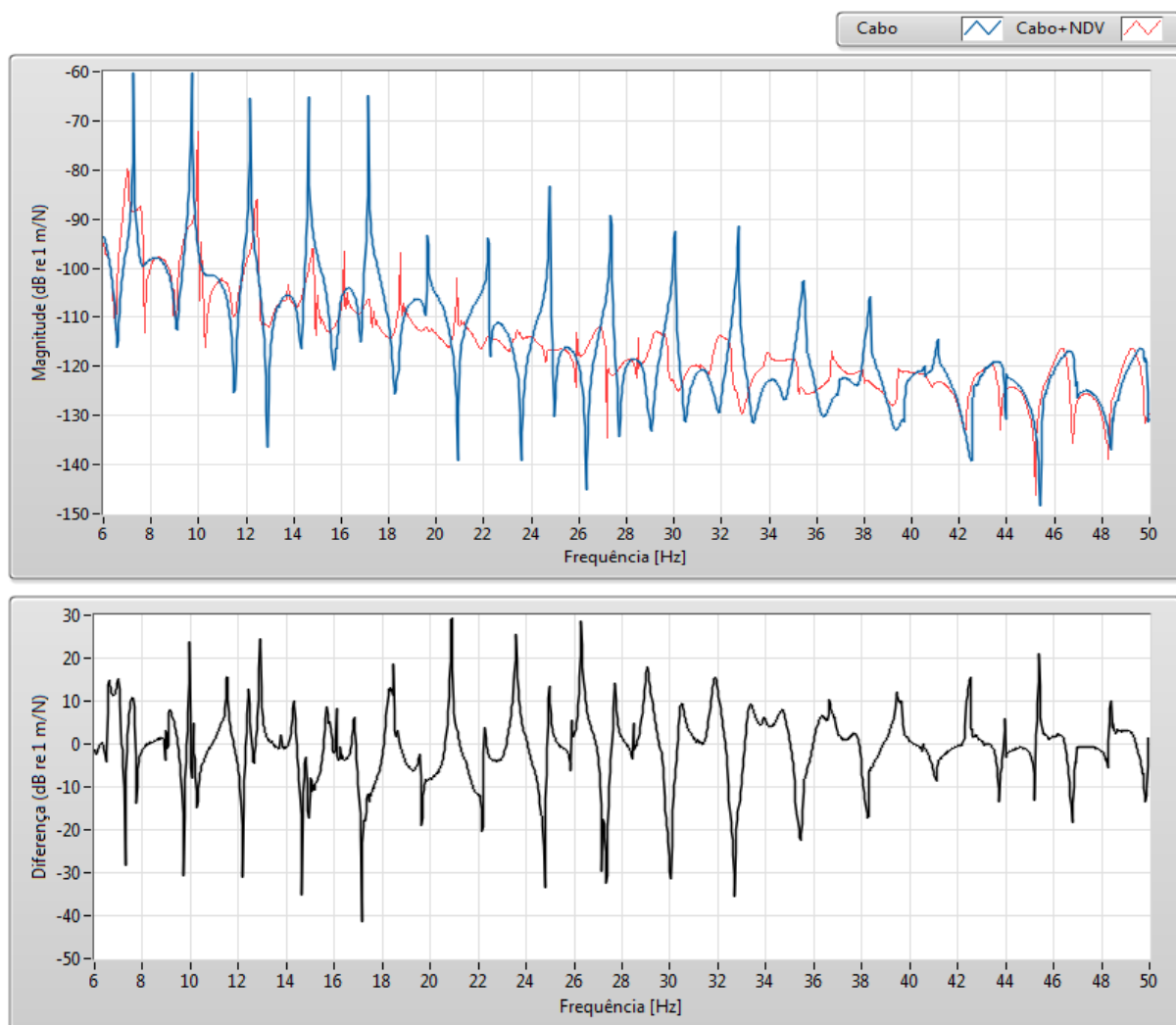
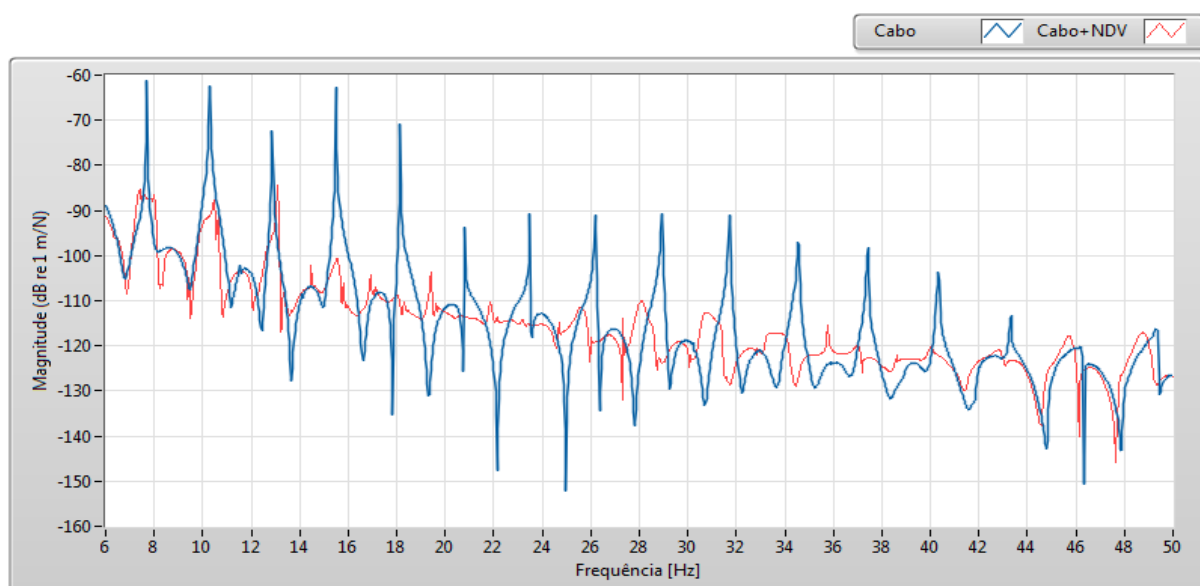


Figura 116. Cabo Greeley, 16% da RMC



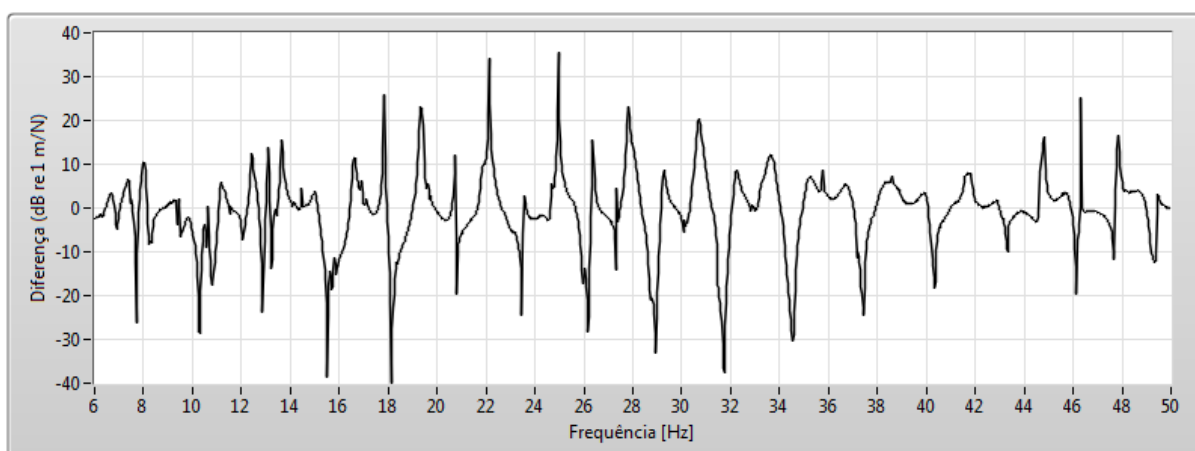


Figura 117. Cabo Greeley, 18% da RMC

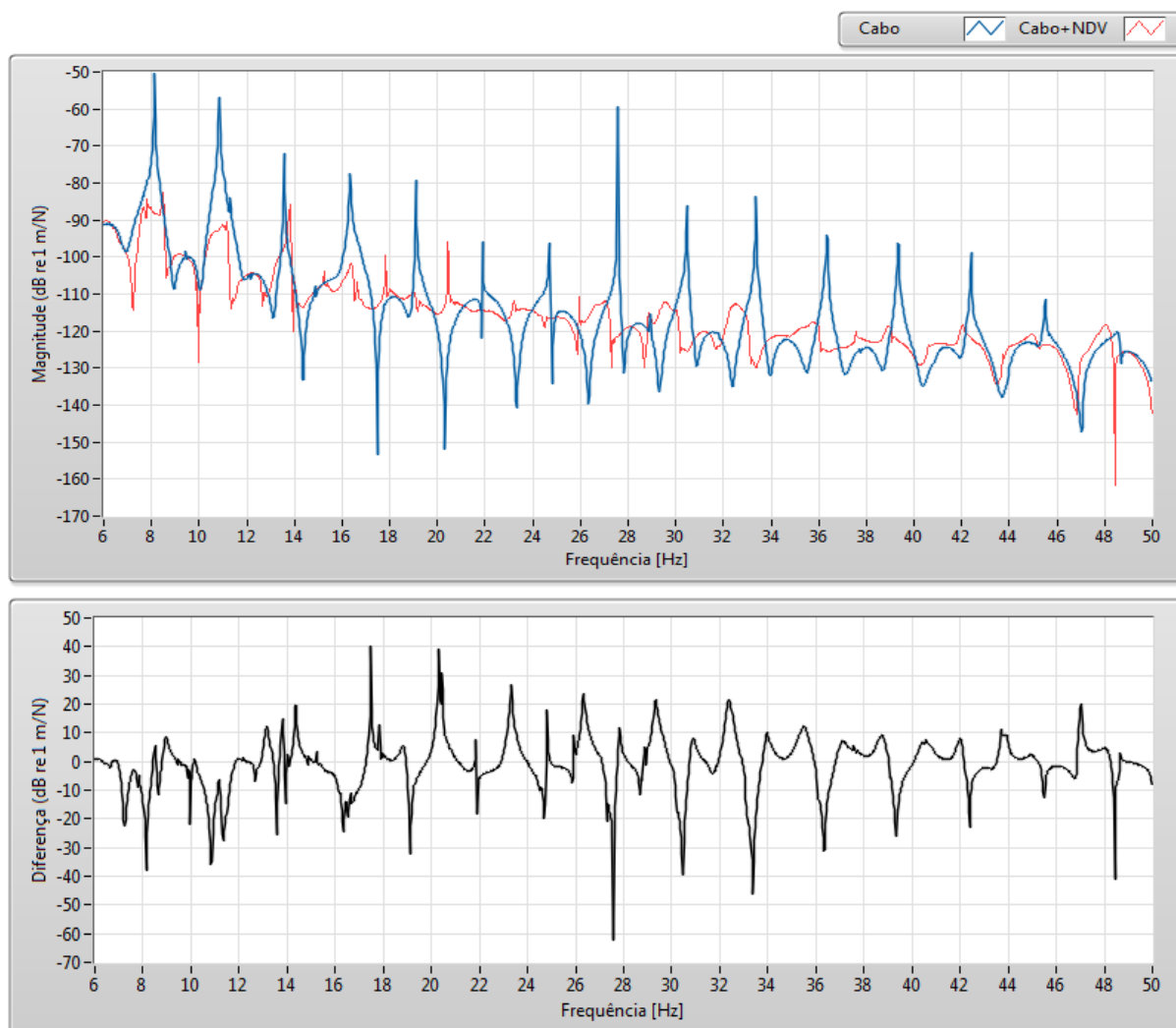


Figura 118. Cabo Greeley, 20% da RMC

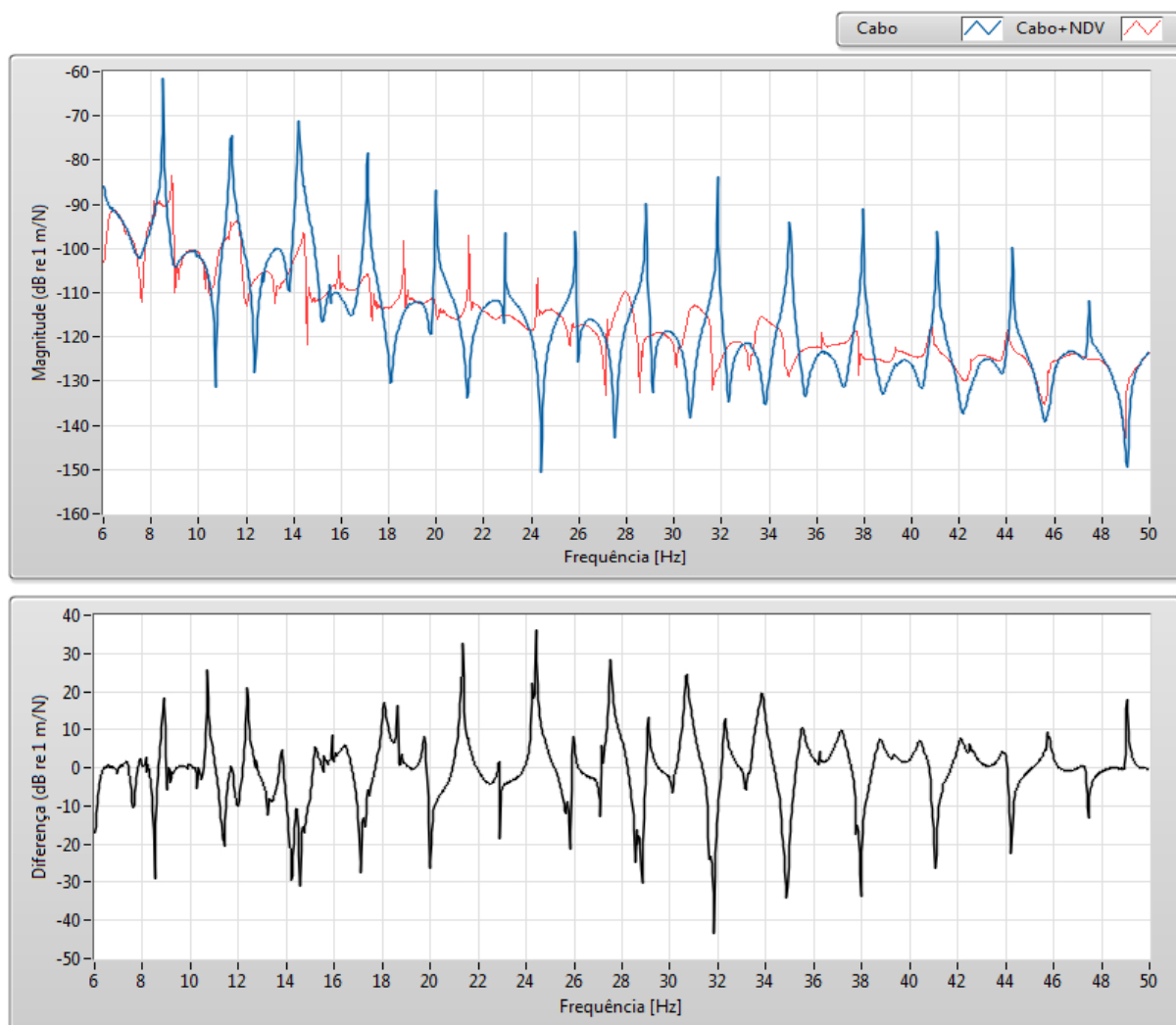
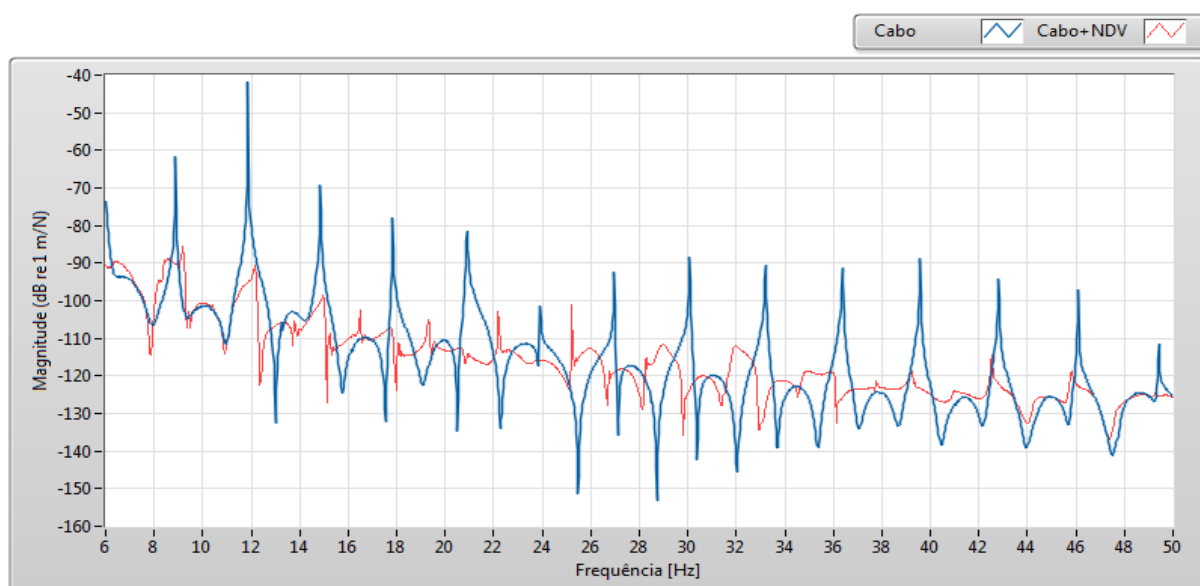


Figura 119. Cabo Greeley, 22% da RMC



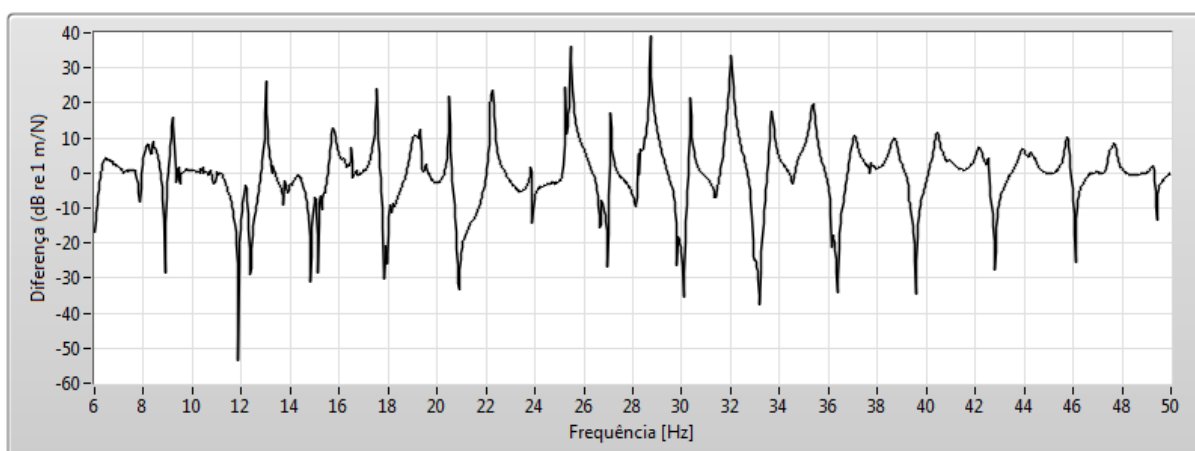


Figura 120. Cabo Greeley, 24% da RMC

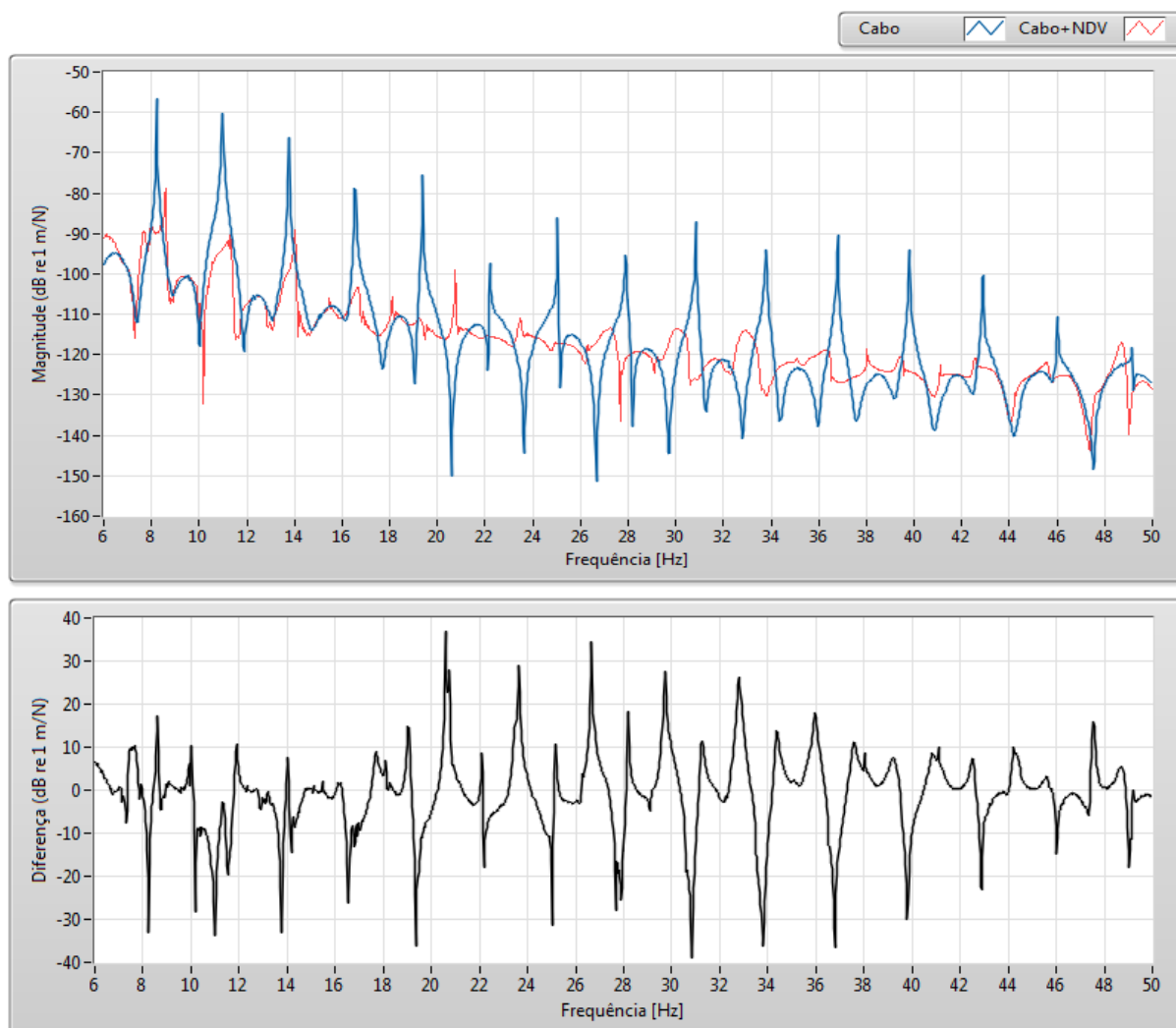


Figura 121. Cabo Greeley, 26% da RMC

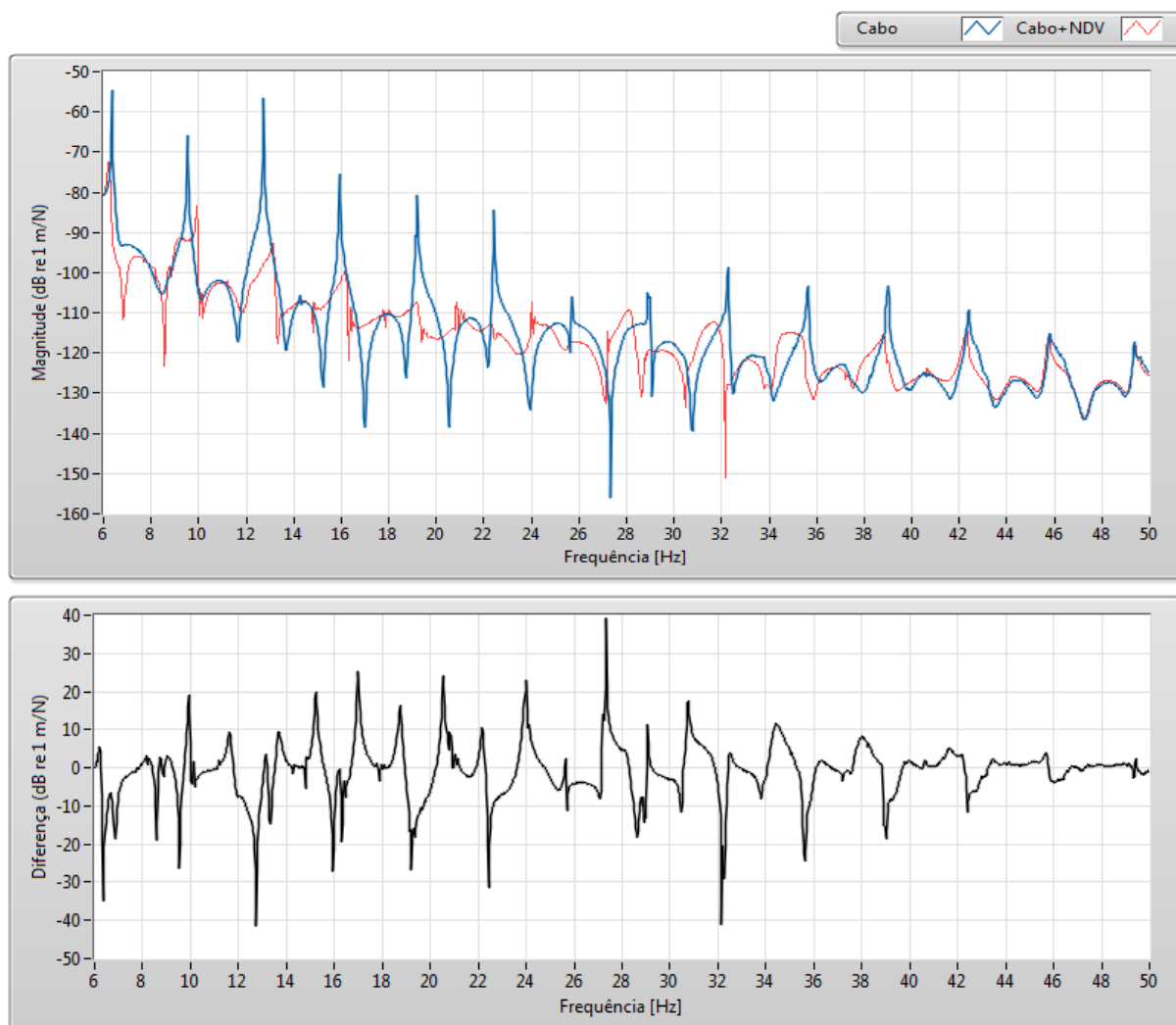
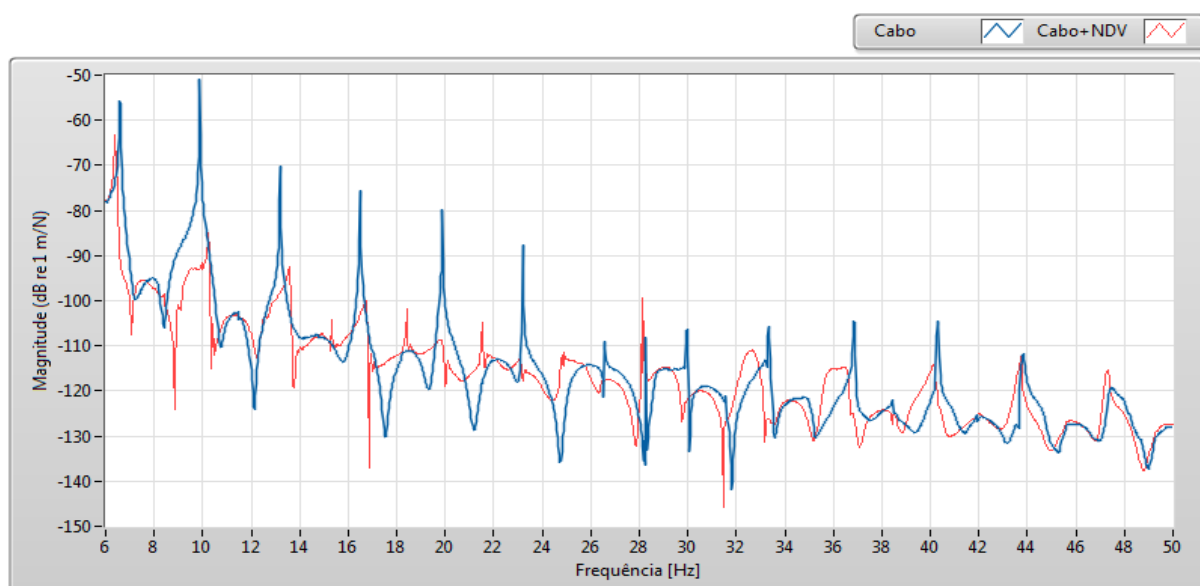


Figura 122. Cabo Greeley, 28% da RMC





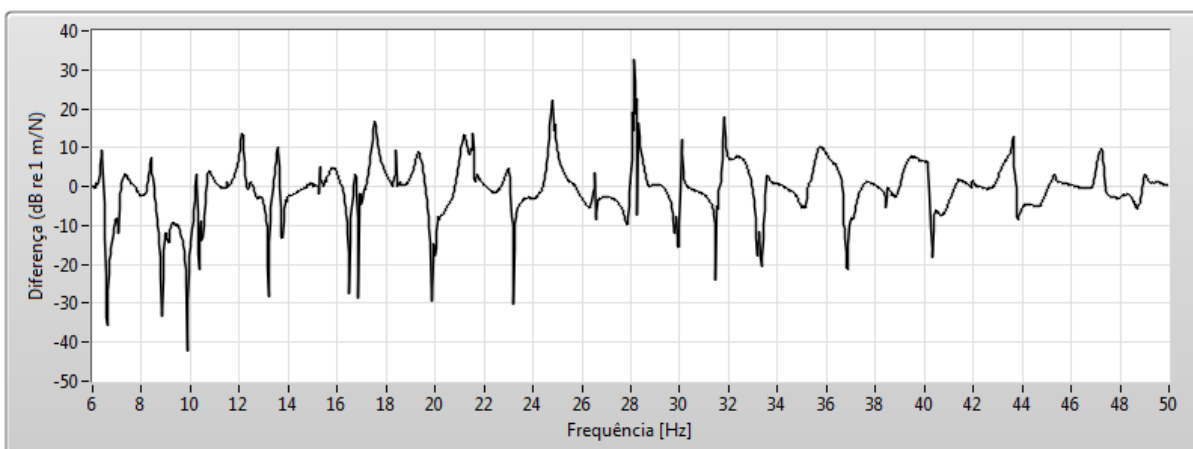


Figura 123. Cabo Greeley, 30% da RMC

### 9.3.1.1.1.1.1.1 CABO GREENLEY

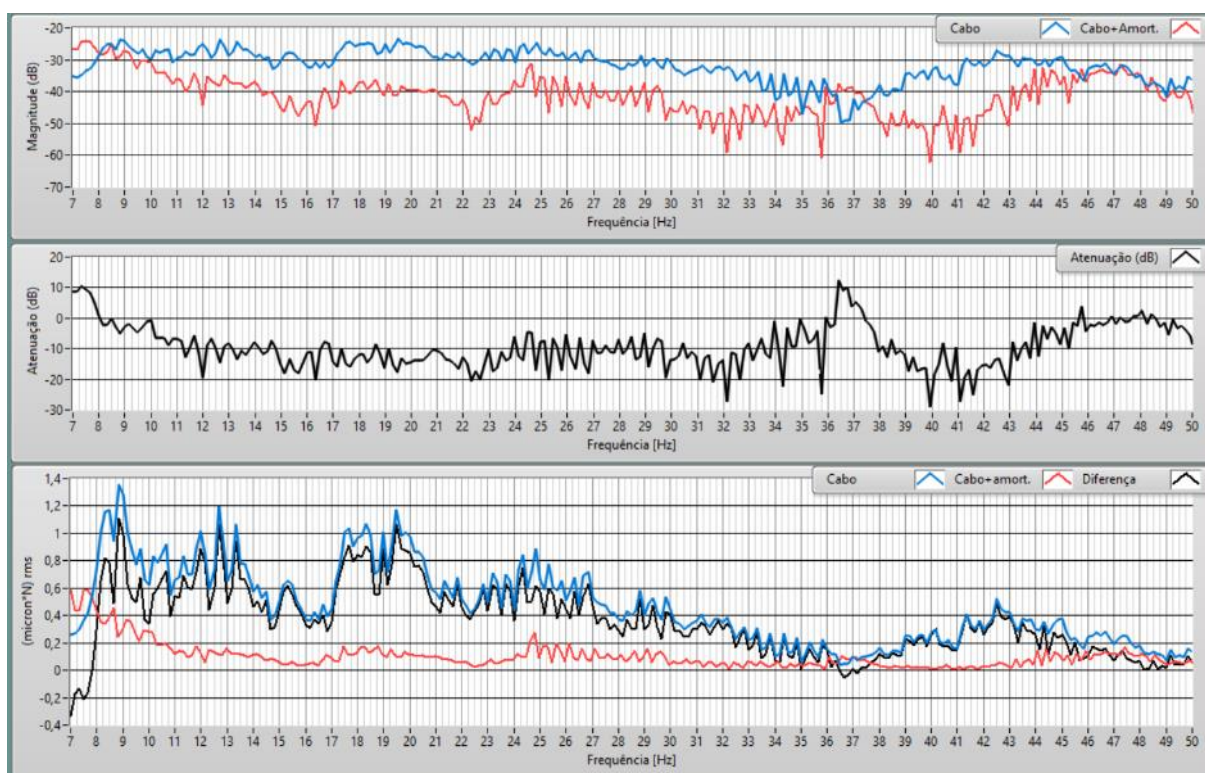


Figura 124. Cabo Greeley a 11,5% da RMC  
Fonte: O autor.

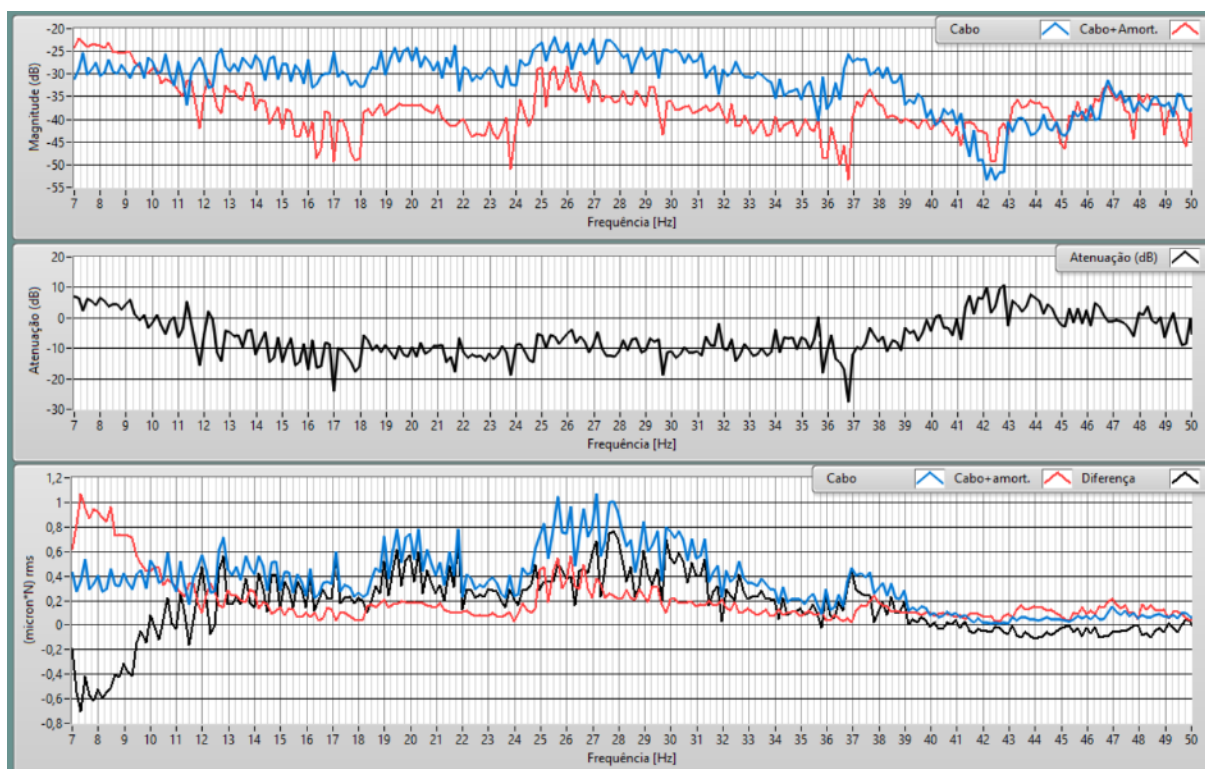


Figura 125. Cabo Greeley a 15% da RMC

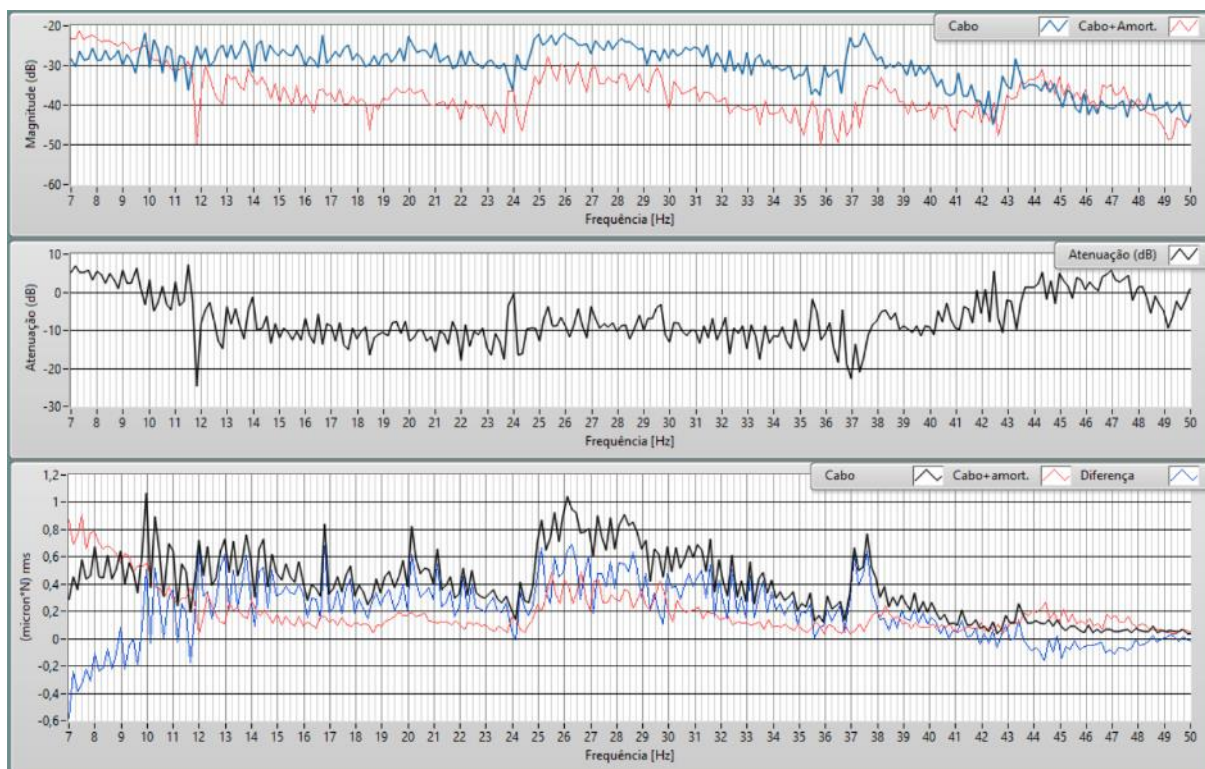


Figura 126. Cabo Greeley a 17% da RMC

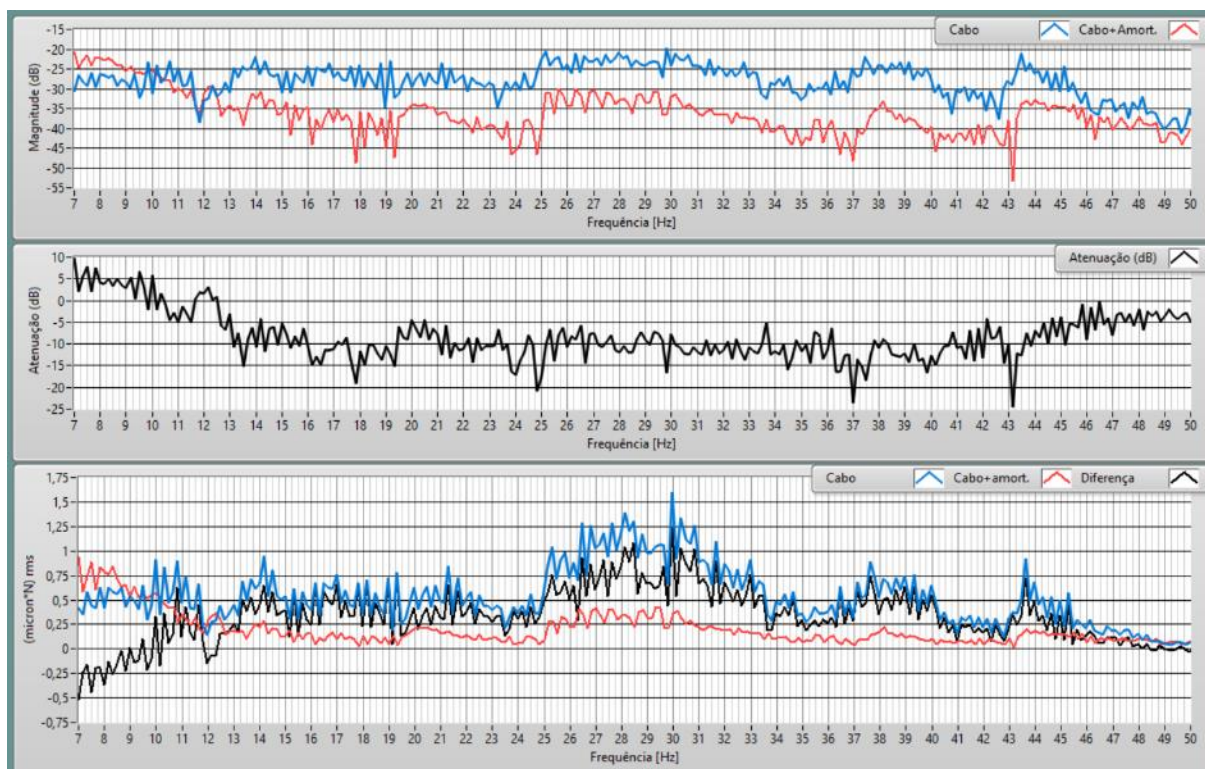


Figura 127. Cabo Greeley a 19 % da RMC

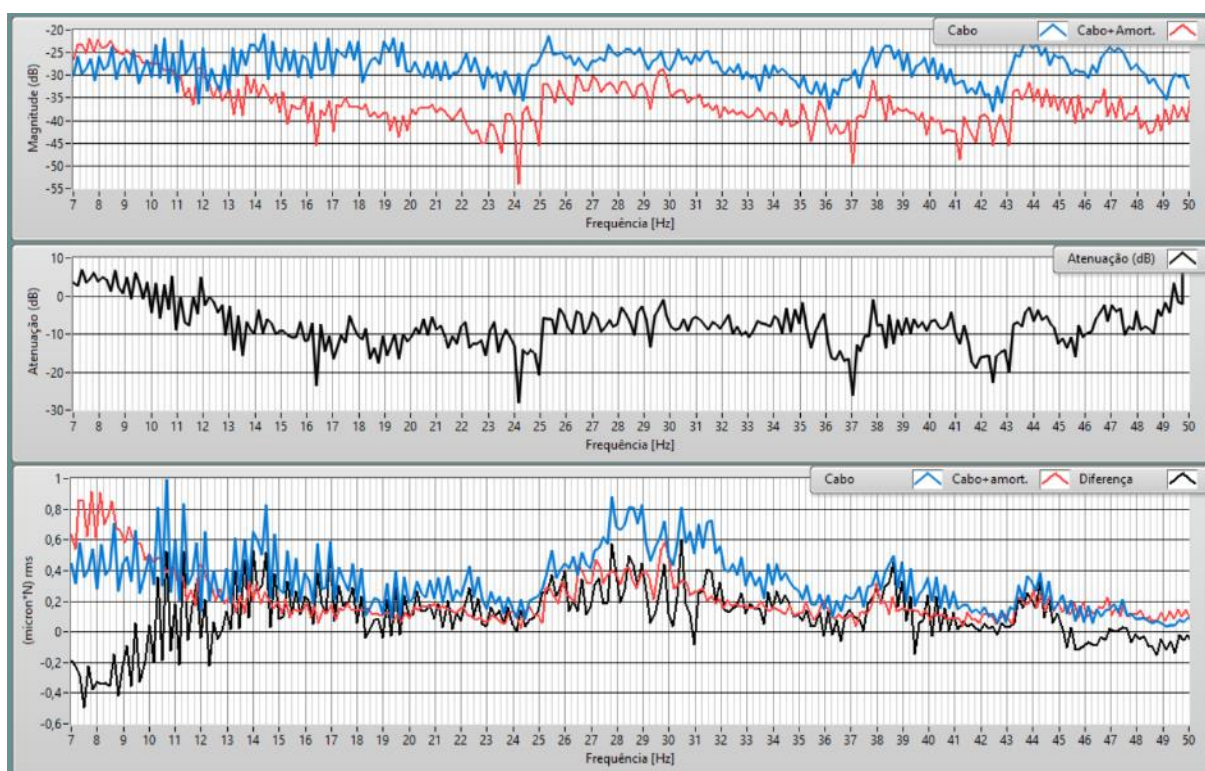


Figura 128. Cabo Greeley a 20,5 % da RMC



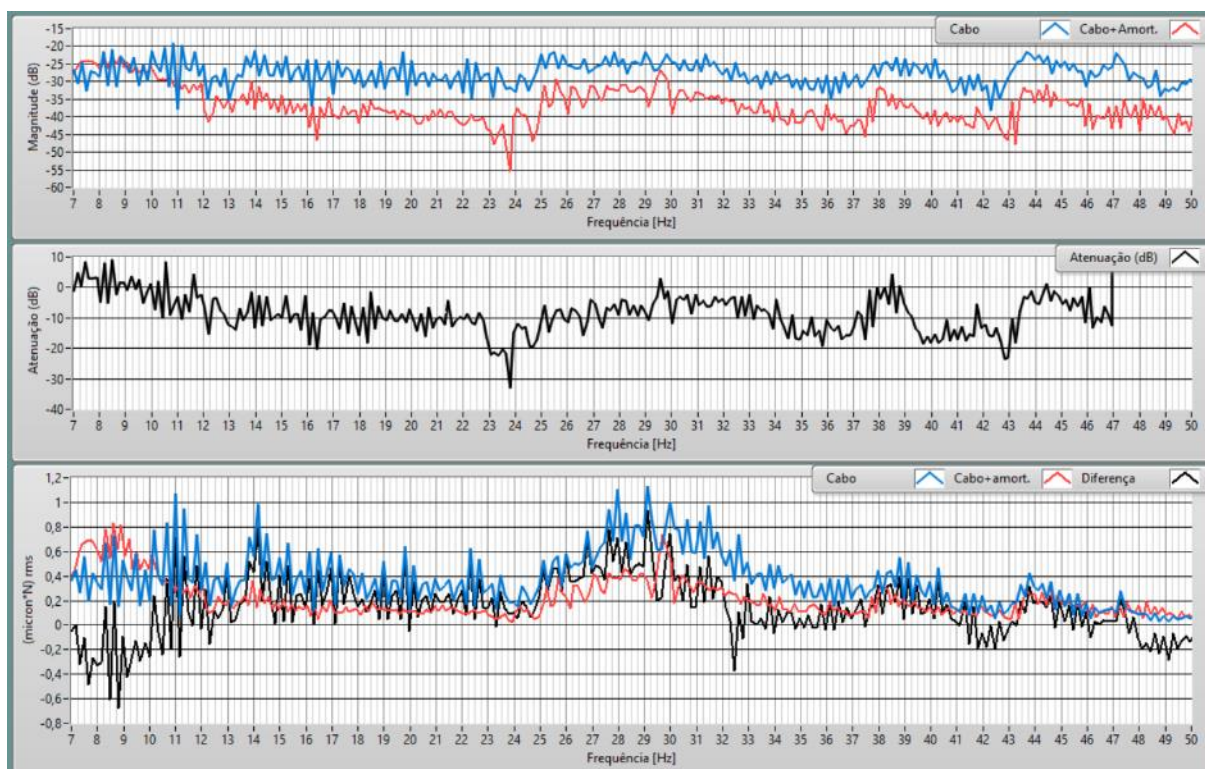


Figura 129. Cabo Greeley a 22 % da RMC

## CABO PHOSPHORUS

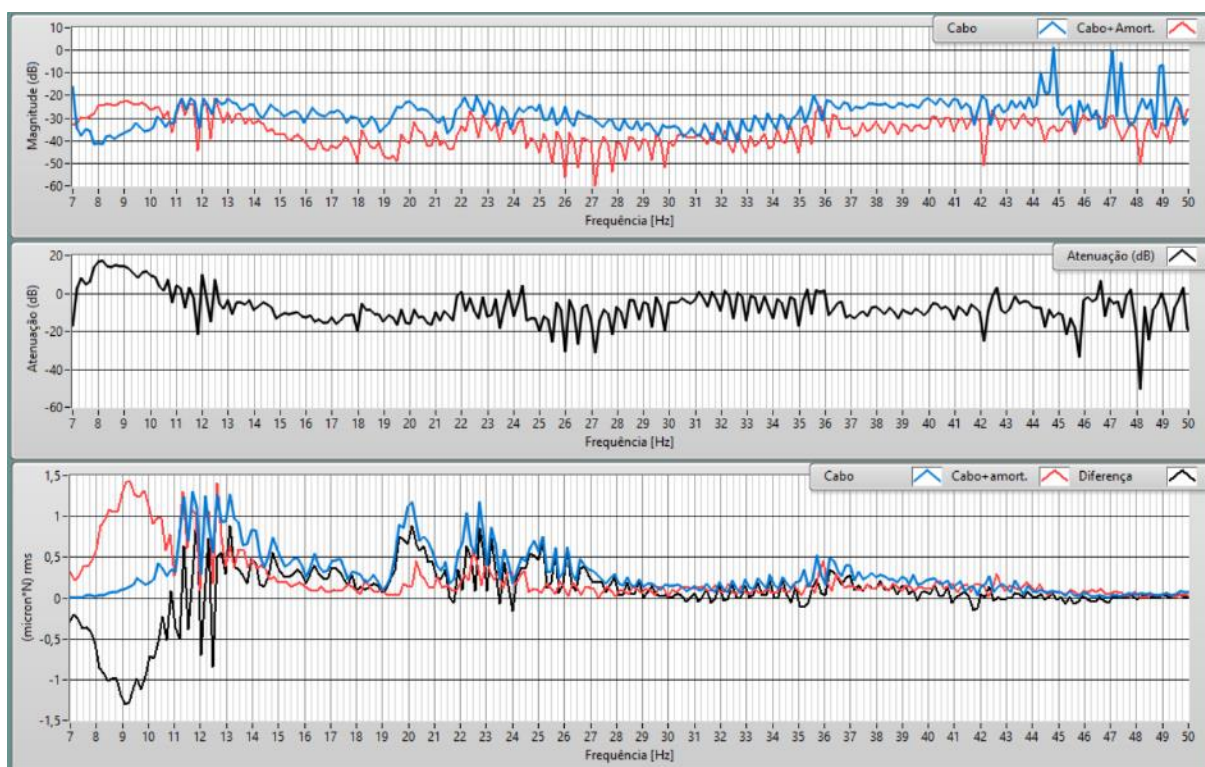


Figura 130. Cabo Phosphorus a 13 % da RMC

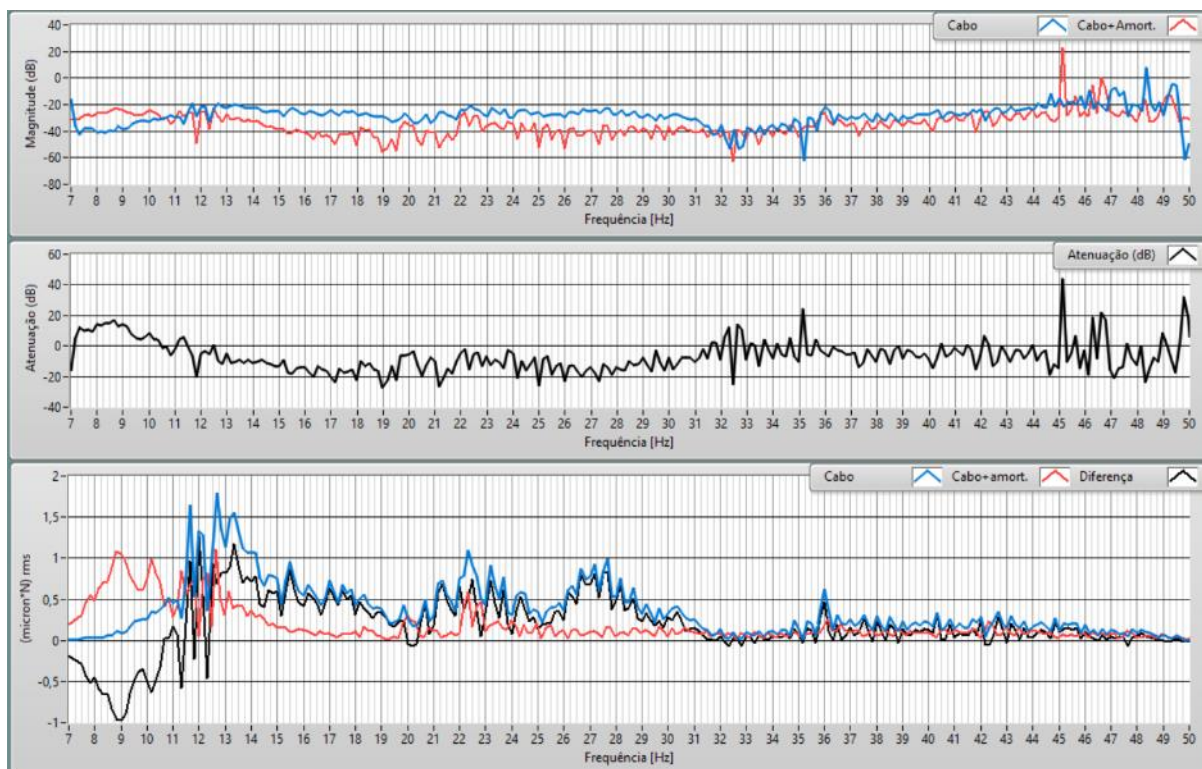


Figura 131. CAL 1120 Phosphorus 823 kcmil a 15 % da RMC

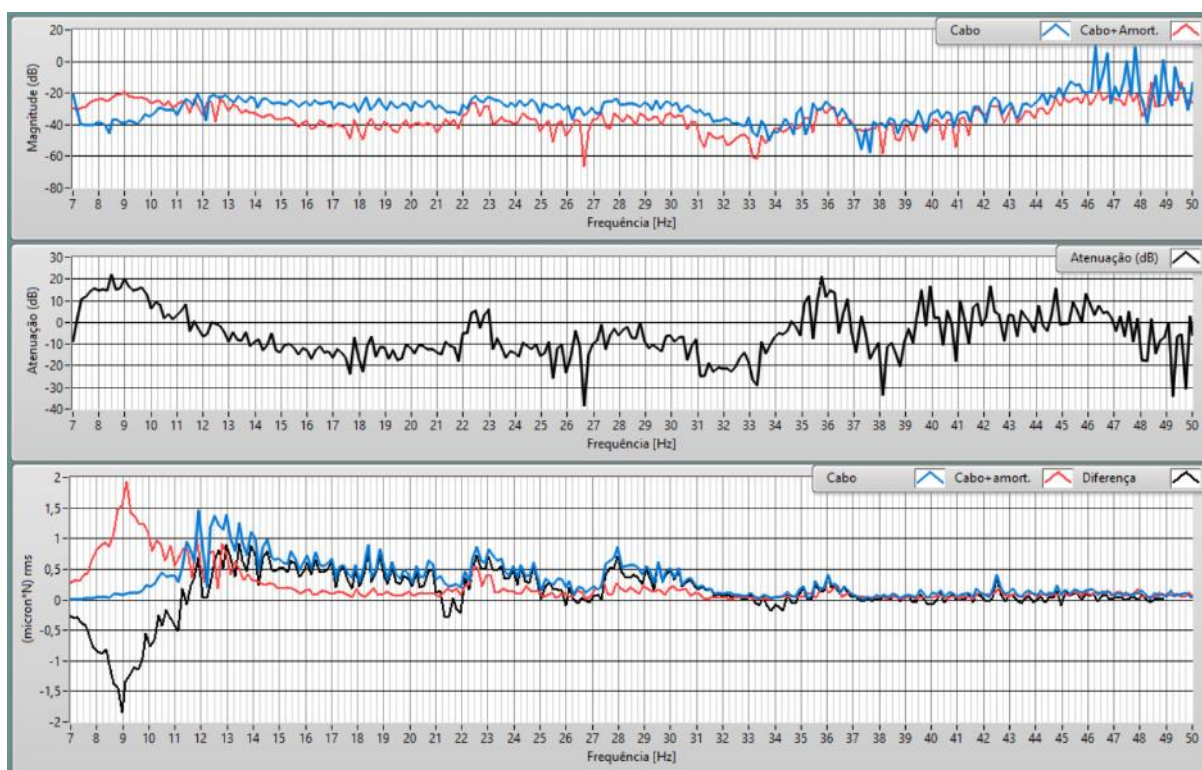


Figura 132. Cabo Phosphorus a 17 % da RMC



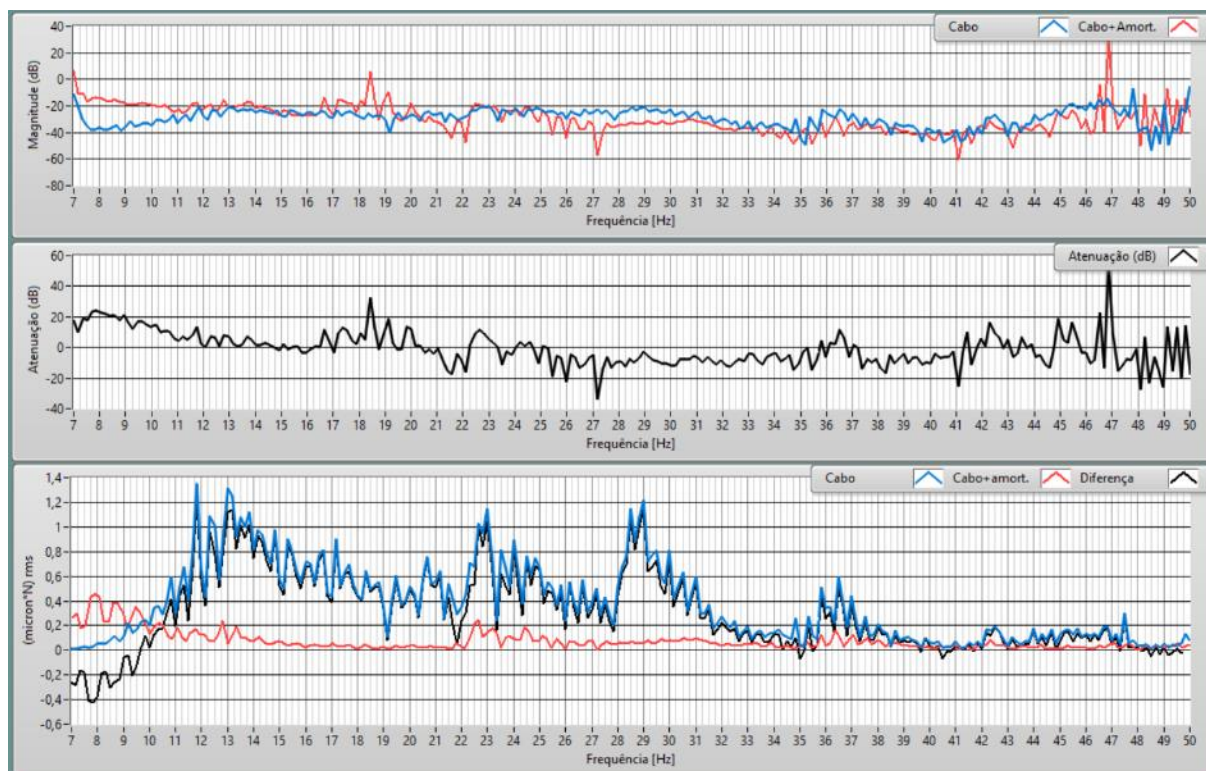


Figura 133. Cabo Phosphorus a 19 % da RMC

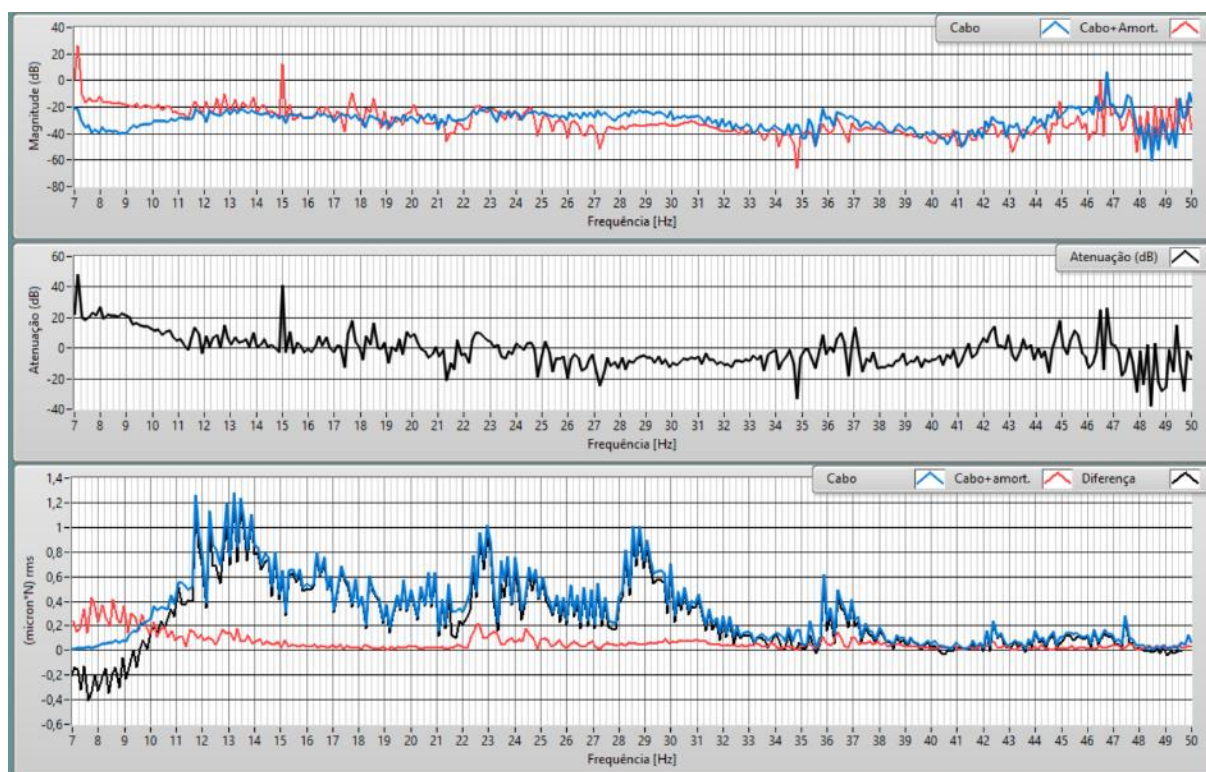


Figura 134. Cabo Phosphorus a 21 % da RMC

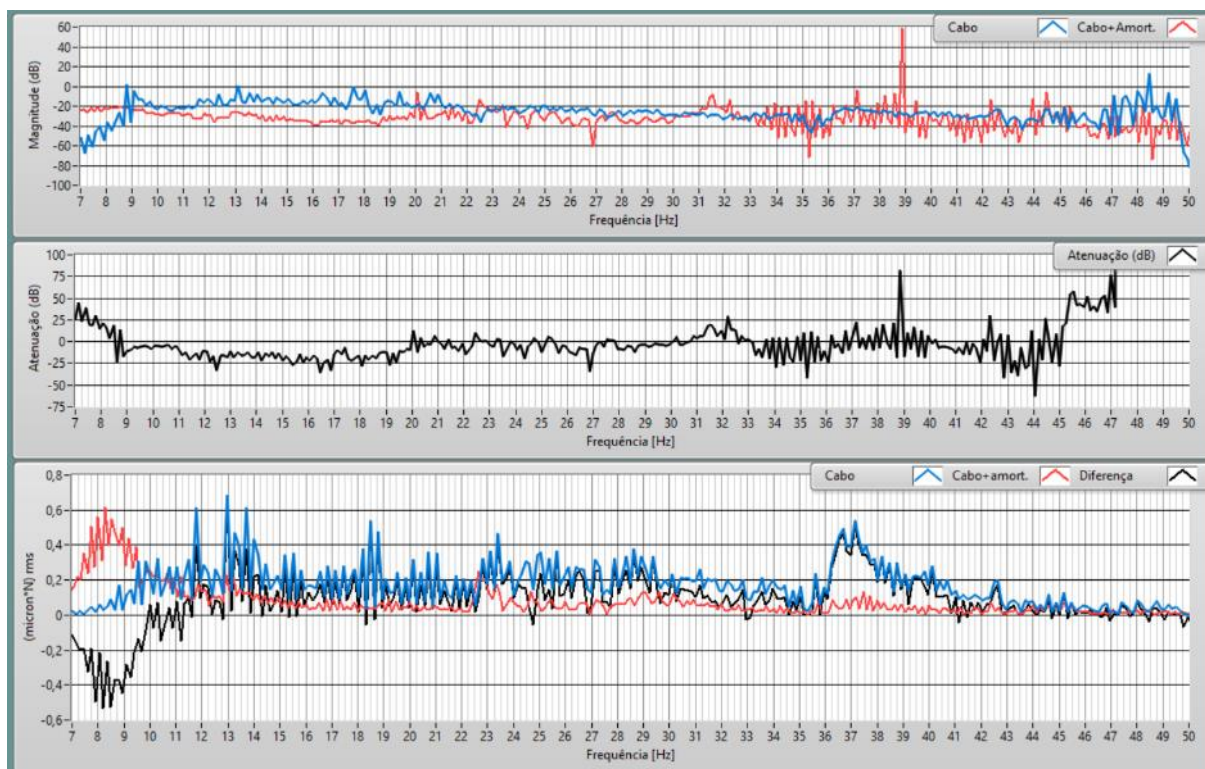


Figura 135. Cabo Phosphorus a 23 % da RMC

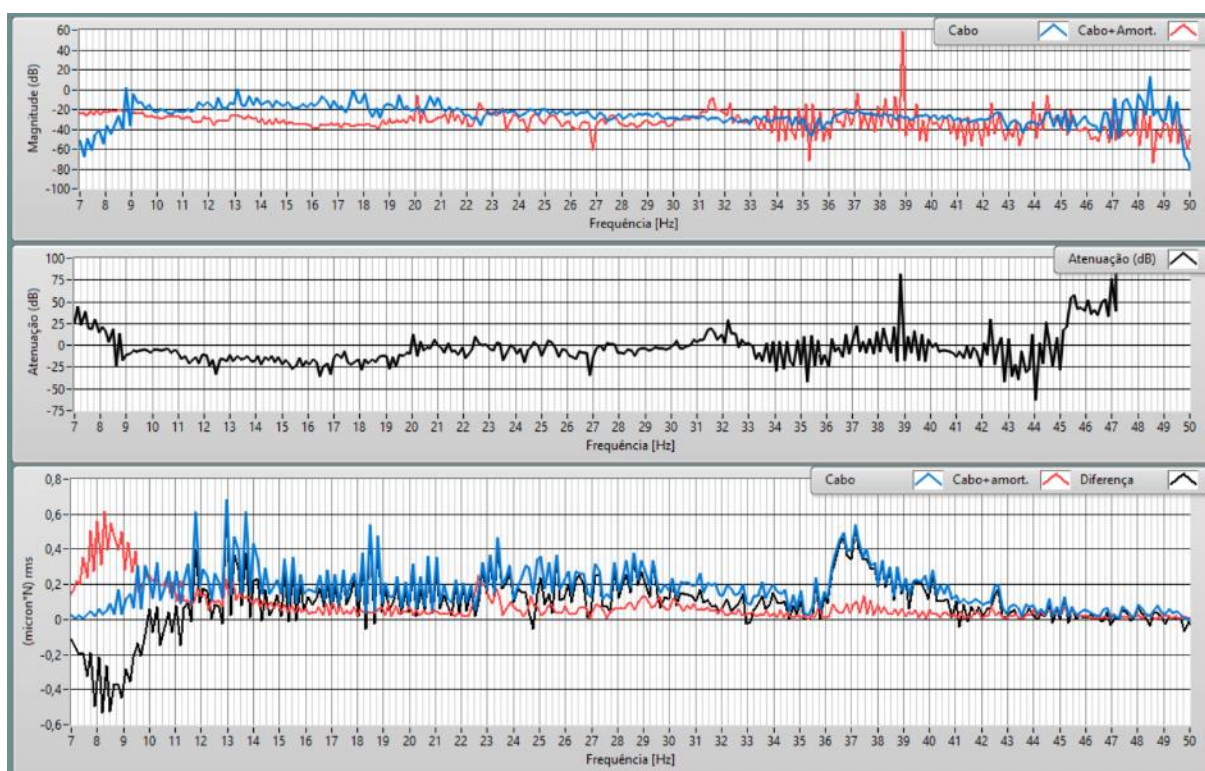


Figura 136. Cabo Phosphorus a 25 % da RMC



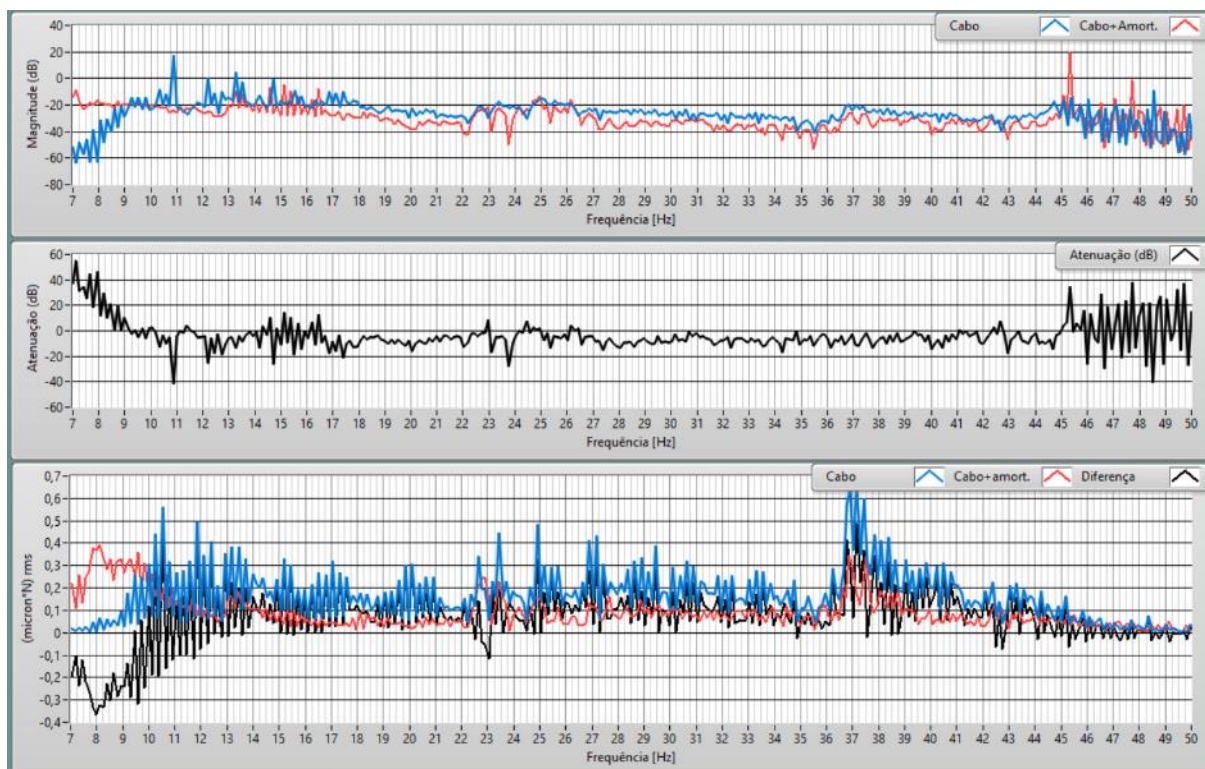


Figura 137. Cabo Phosphorus a 27 % da RMC

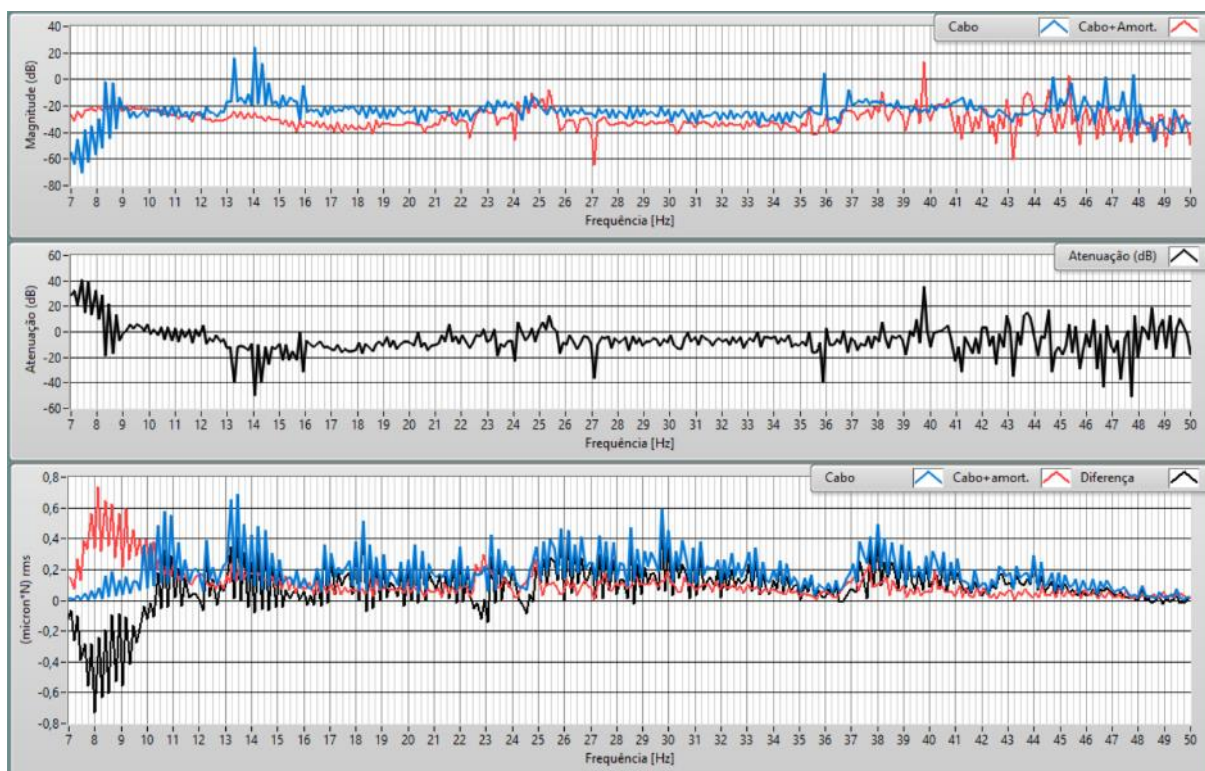


Figura 138. Cabo Phosphorus a 29 % da RMC



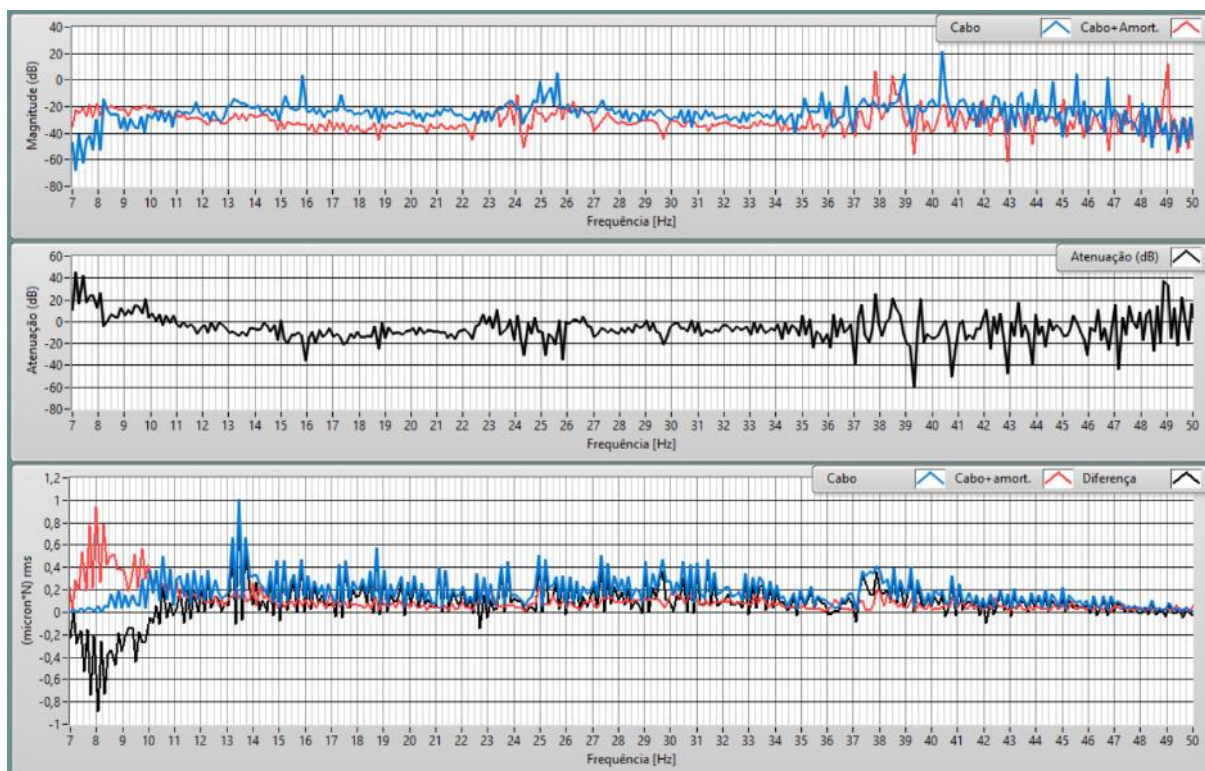


Figura 139. Cabo Phosphorus a 31 % da RMC

### CABO TERN

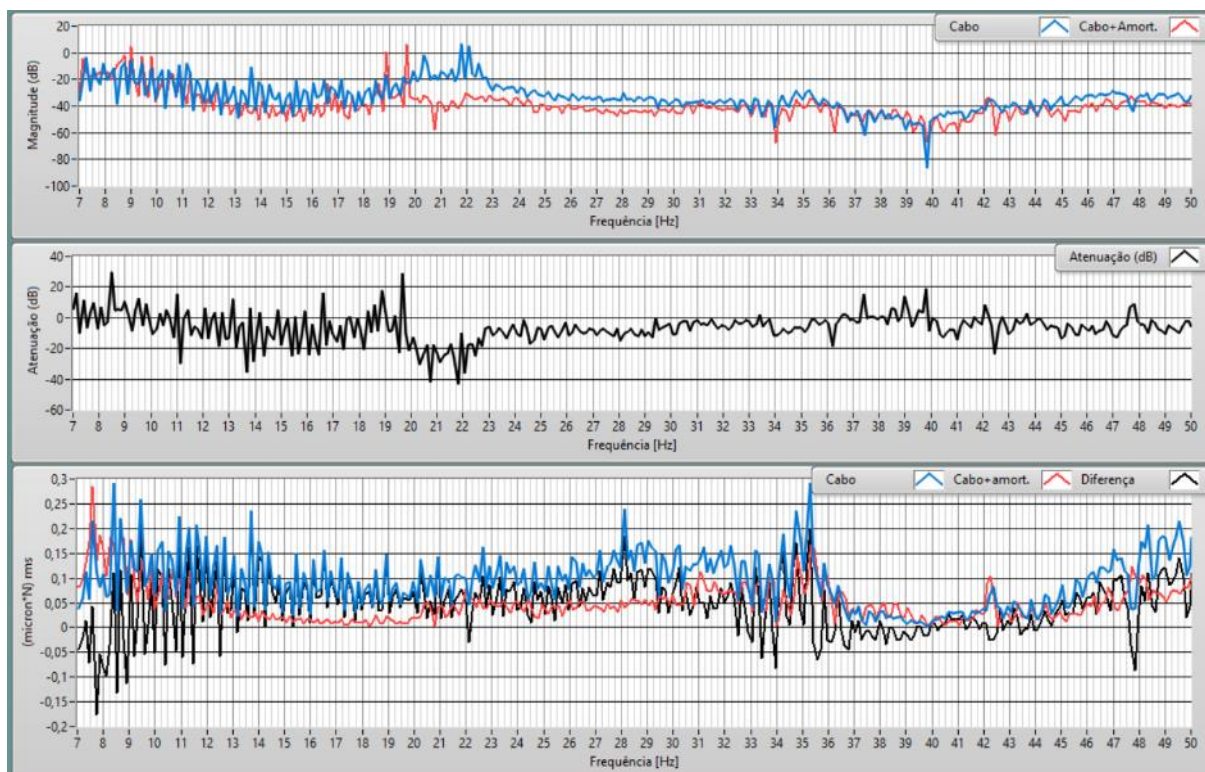


Figura 140. Cabo Tern a 17 % da RMC

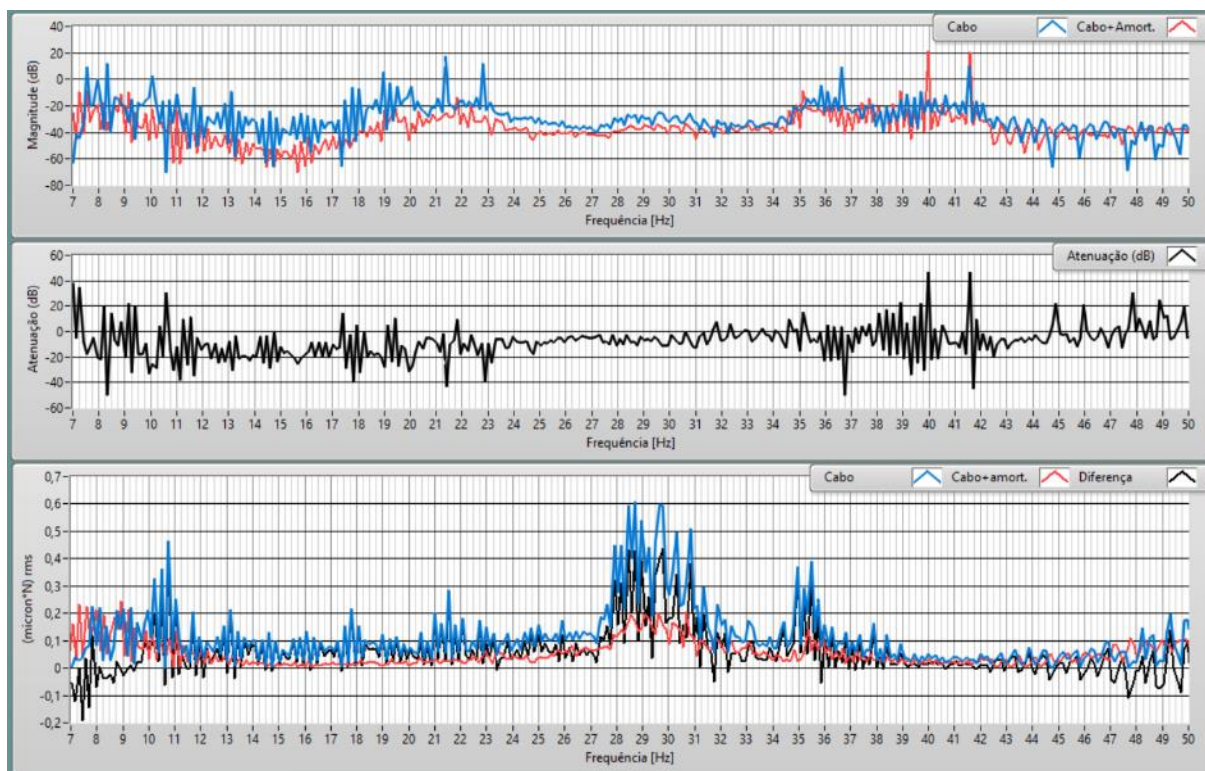


Figura 141. Cabo Tern a 19 % da RMC

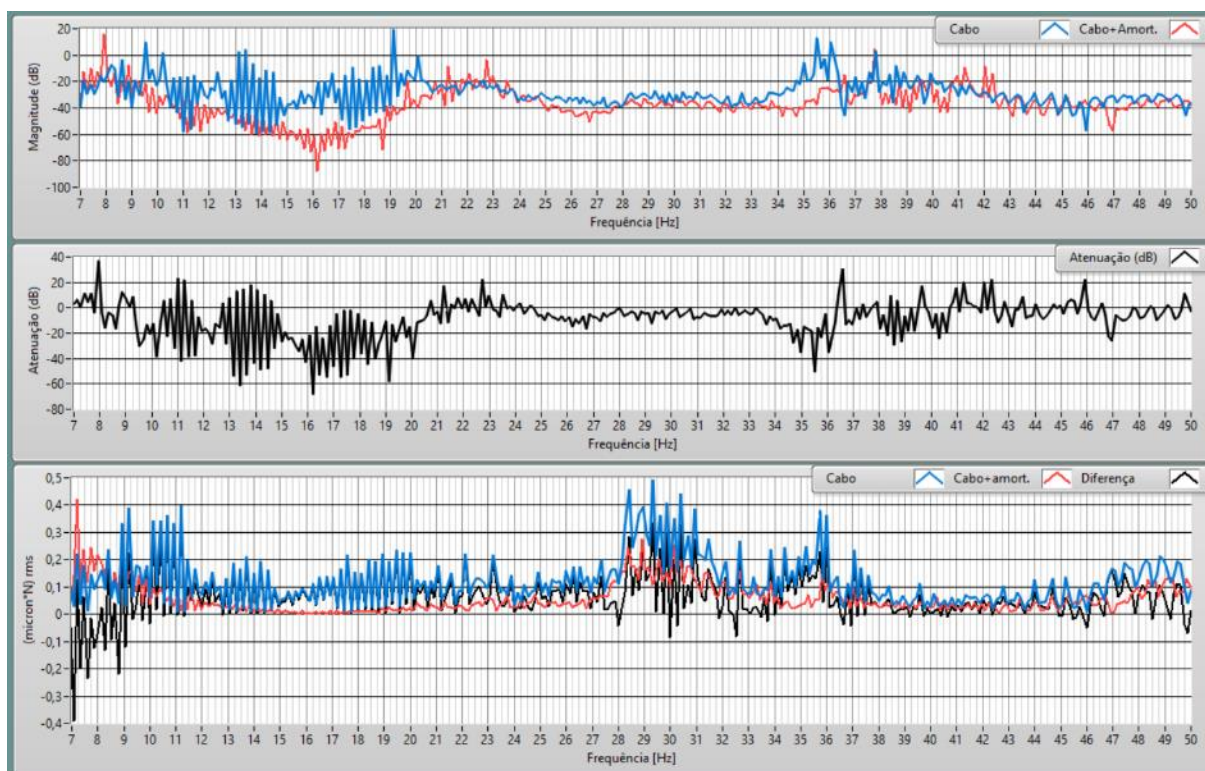


Figura 142. Cabo Tern a 21% da RMC



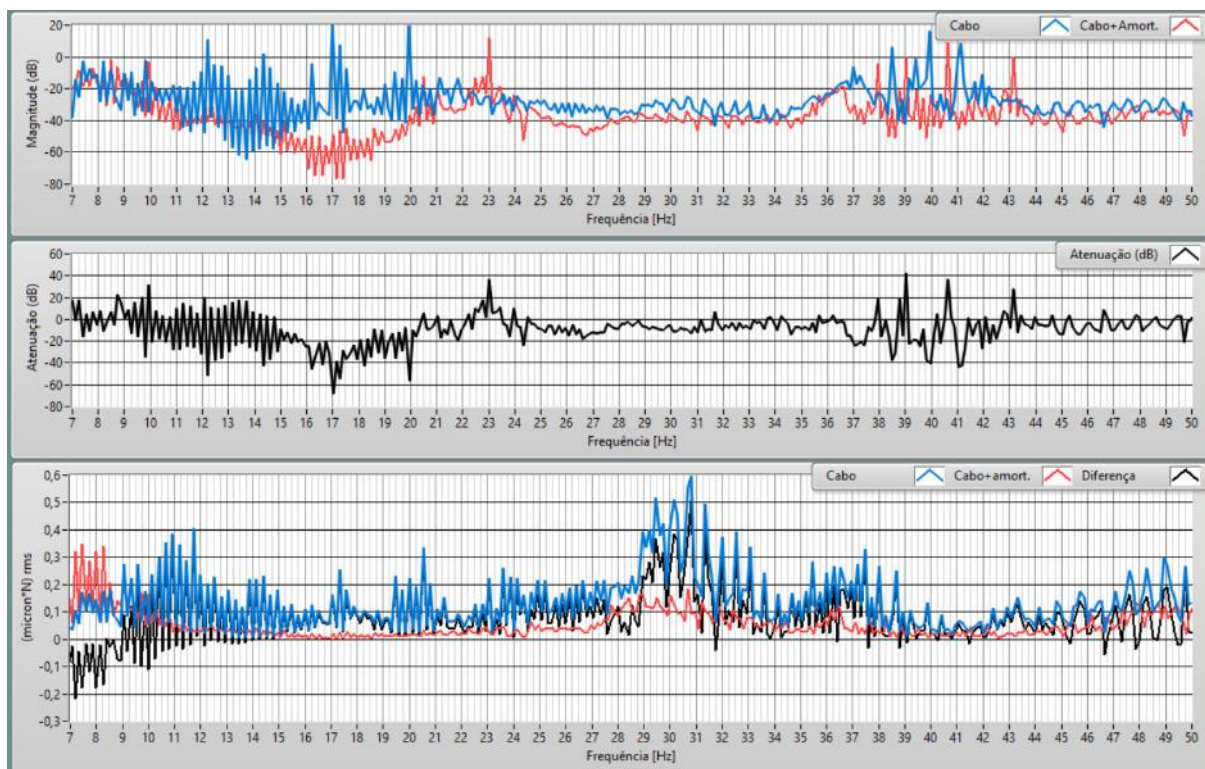


Figura 143. Cabo Tern a 23% da RMC

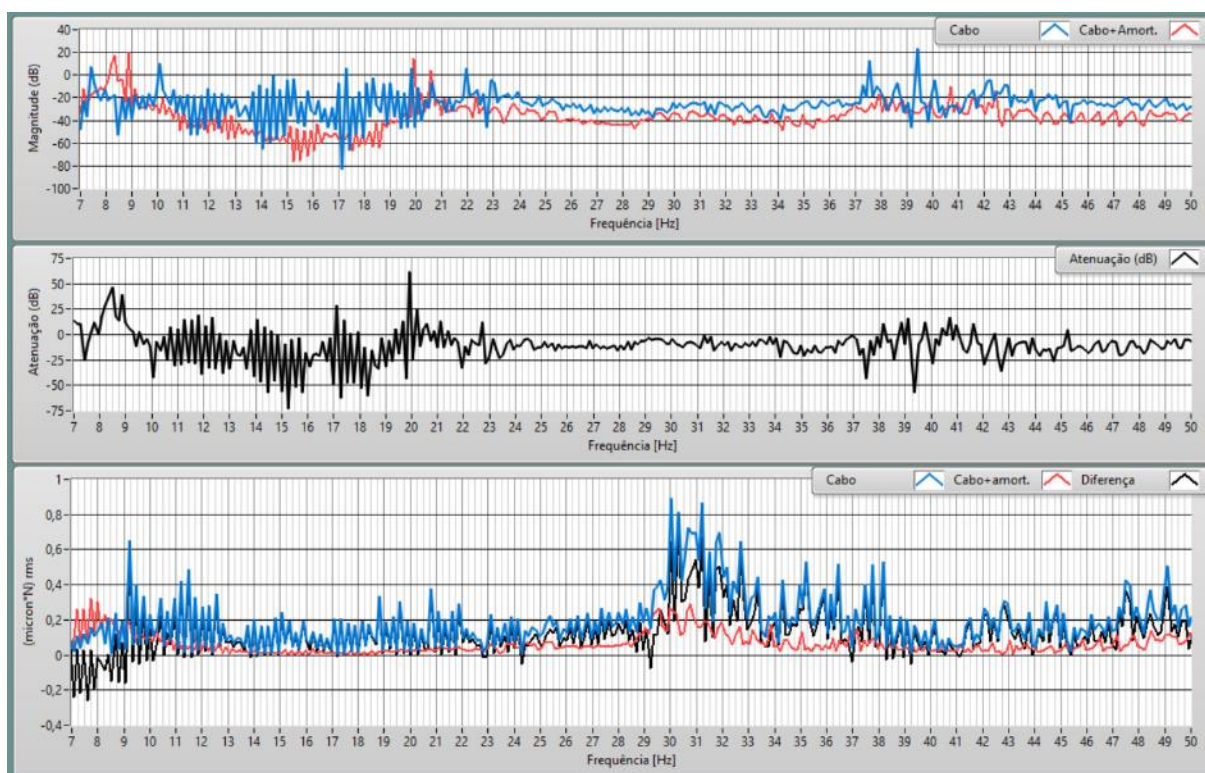


Figura 144. Cabo Tern a 25% da RMC

**K. CURVAS LEVANTADAS PELO ENSAIO EÓLICO NA LTE – DANOS  
ACUMULADOS**

## CURVAS LEVANTADAS PELO ENSAIO EÓLICO NA LTE – DANOS ACUMULADOS

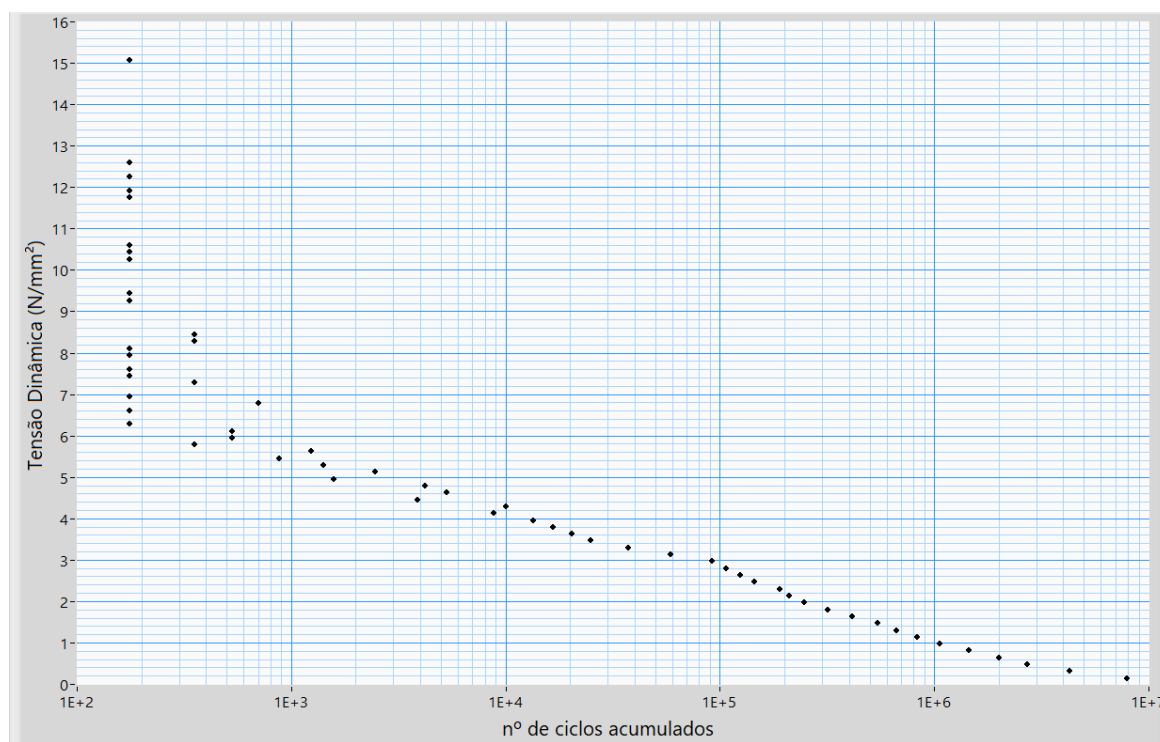


Figura 145 – Fase 1 (Tern a 20% da RMC)

Fonte: Autor.

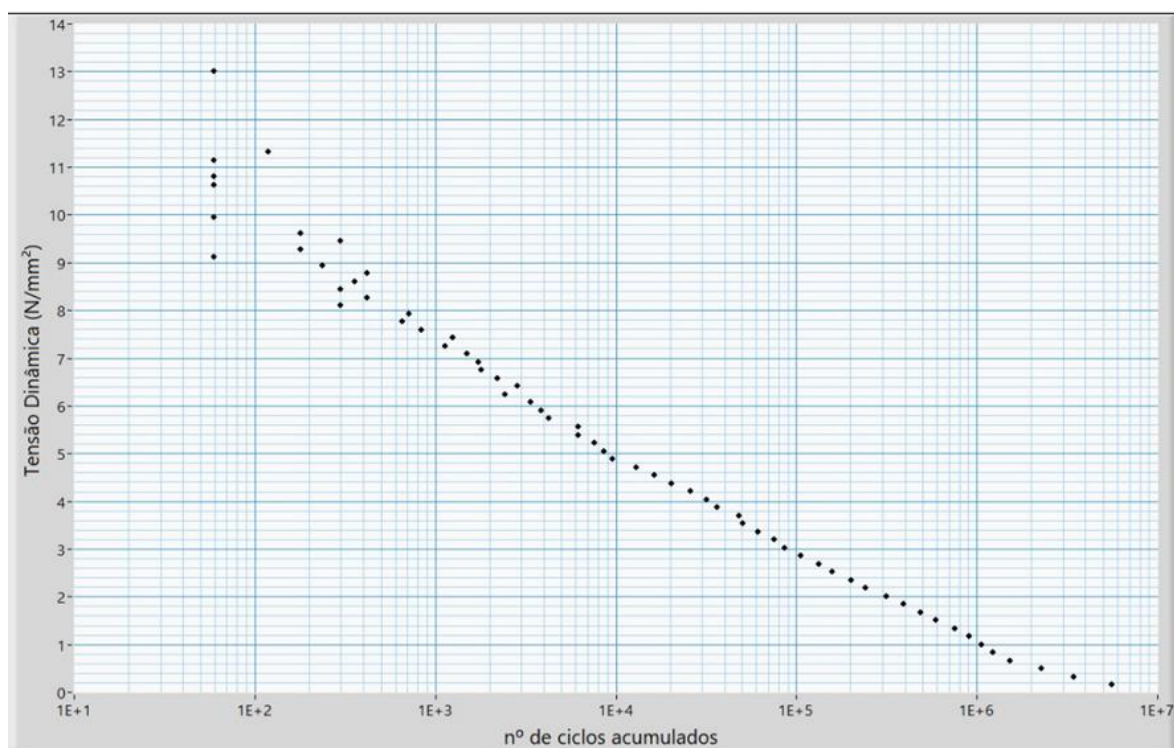


Figura 146 – Fase 2 (Greeley a 14% da RMC)  
Fonte: Autor.

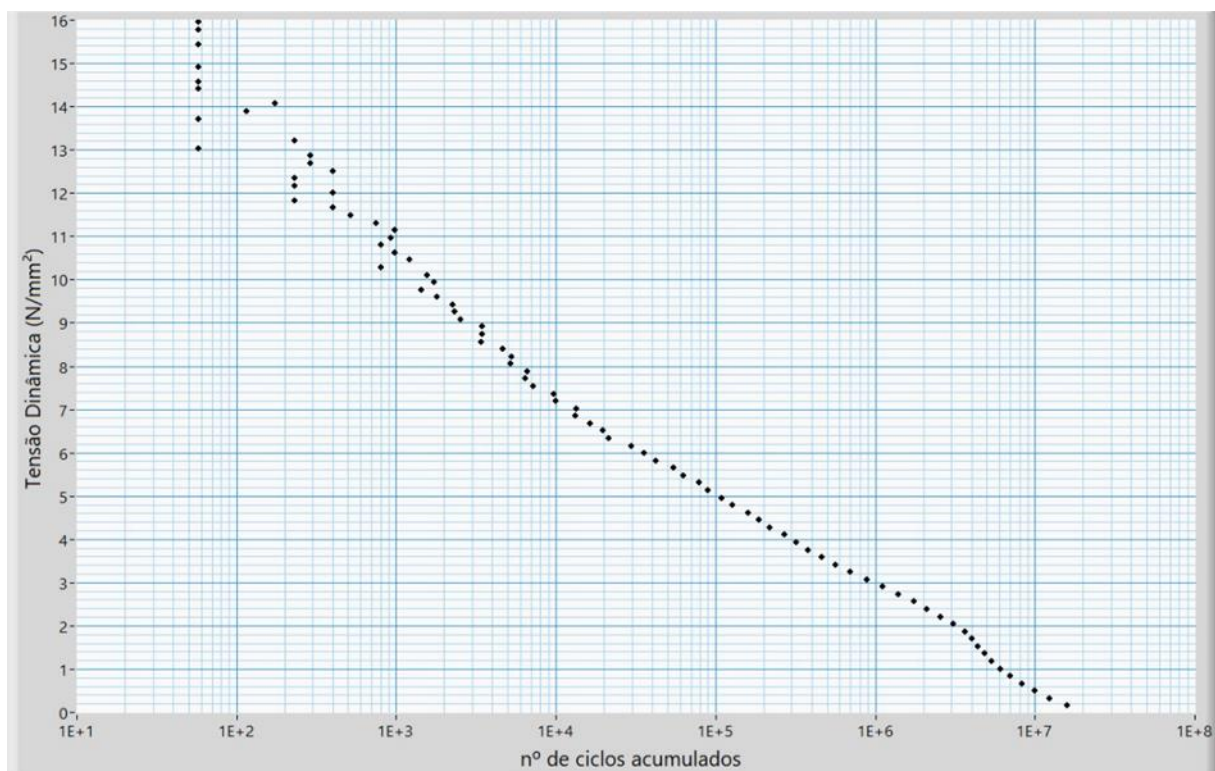


Figura 147 – Fase 3 (Phosphorus a 19% da RMC)  
Fonte: Autor.



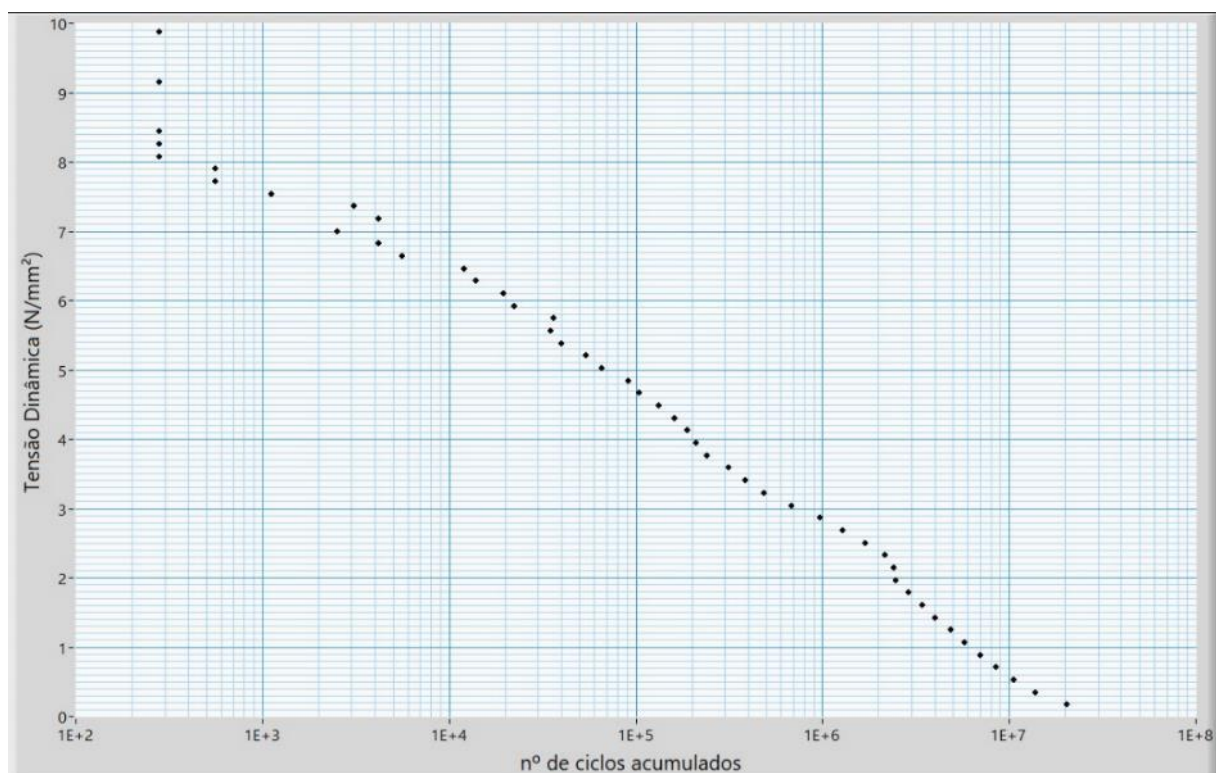


Figura 148 – Fase 1 (Tern a 26% da RMC)  
Fonte: Autor.

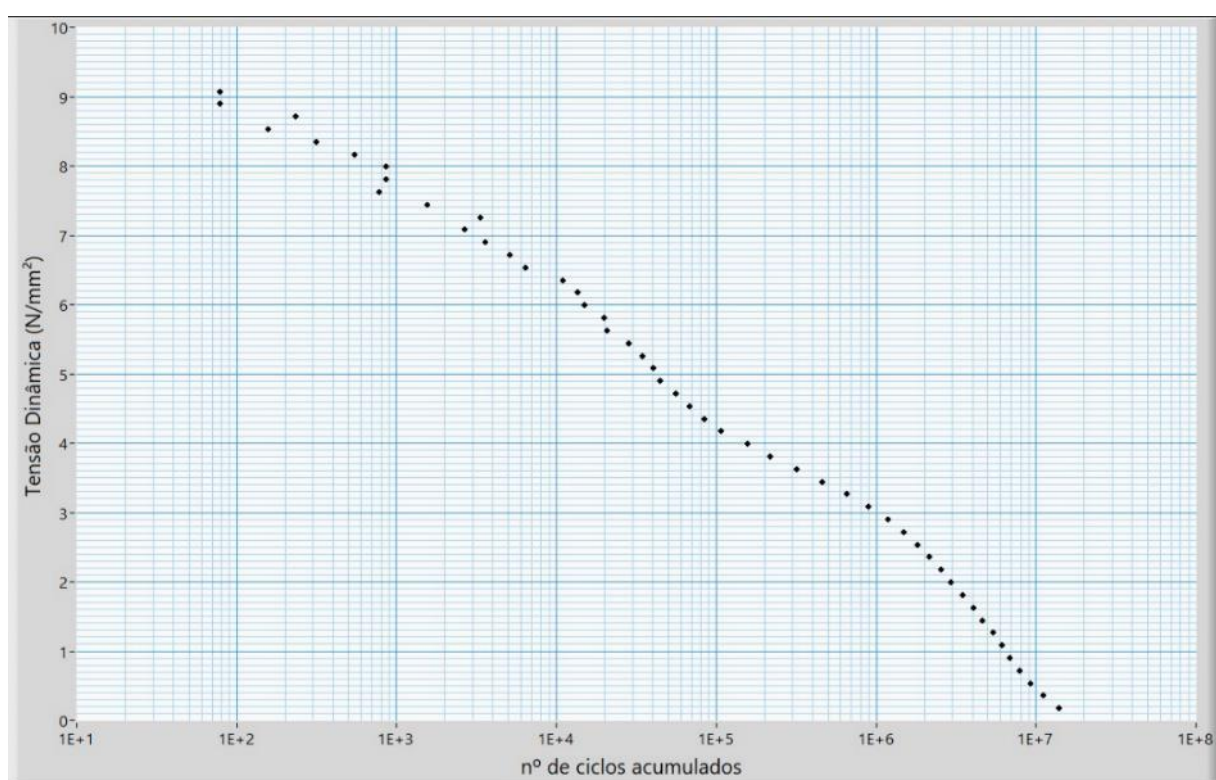


Figura 149 – Fase 2 (Greeley a 18% da RMC)  
Fonte: Autor.

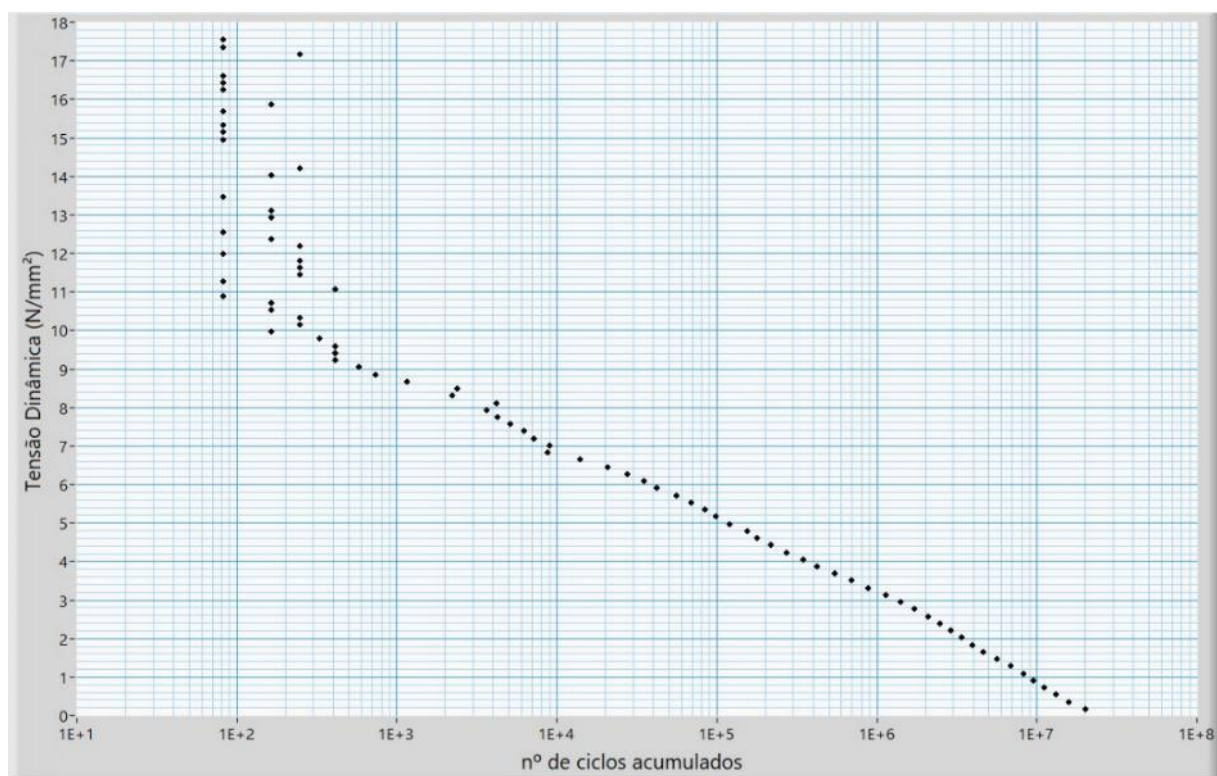



Figura 150 – Fase 3 (Phosphorus a 24% da RMC)  
Fonte: O autor.



**ANEXOS**

## A. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CABO CAA TERN 795 KCMIL

ENGENHARIA DE PRODUTO	PLANILHA DE DADOS TÉCNICOS GARANTIDOS	
--------------------------	---------------------------------------	---

### CARACTERÍSTICAS GARANTIDAS DOS FIOS

CARACTERÍSTICA	TERN
<b>Fios de alumínio</b>	
a) Condutividade mínima, 20°C (%IACS)	61,0
b) Carga de ruptura (kgf)	151
c) Alongamento na ruptura (%/250mm)	1,7
d) Diâmetro nominal (mm)	3,38
e) Distância entre soldas em fios de alumínio do cabo completo, num mesmo fio ou em fios diferentes (m)	15
f) Tipo de solda e tratamento	Pressão a frio
g) Tensão de ruptura das soldas (kgf/mm <sup>2</sup> )	13,3
<b>Fios de aço</b>	
a) Carga de ruptura (kgf)	588
b) Alongamento na ruptura (%/250mm)	3
c) Carga para 1% de alongamento (kgf/mm <sup>2</sup> )	133,6
d) Diâmetro nominal (mm)	2,25
e) Peso mínimo da camada de zinco (g/m <sup>2</sup> )	215

### CARACTERÍSTICAS GARANTIDAS DOS CABOS COMPLETOS

a) Comprimento de cabo por bobina e respectiva tolerância (m)	2.350 ± 117		
b) Classe de zincagem da alma de aço	A		
c) Processo de zincagem dos fios	Imersão a quente		
d) Peso unitário e tolerância (kgf/km)	1.336 ± 2%		
e) Diâmetro (mm)	27,00		
f) Número de fios de alumínio/aço (formação)	45/7		
g) Carga de ruptura (kgf)	9.998		
h) Área da seção de alumínio (mm <sup>2</sup> /kcmil)	402,74 / 795		
i) Área da seção da alma de aço (mm <sup>2</sup> )	27,84		
j) Área da seção do cabo (mm <sup>2</sup> )	430,58		
k) Módulo de elasticidade			
· inicial (kgf/mm <sup>2</sup> )	5.413		
· final (kgf/mm <sup>2</sup> )	6.574		
l) Coeficiente de dilatação linear			
· inicial (°C)	20,3x10-6		
· final (°C)	20,7x10-6		
m) Resistência elétrica			
· CC, a 20°C (Ω/km)	0,0719		
· CA, 60Hz, a 25°C (Ω/km)	0,0750		
· CA, 60Hz, a 50°C (Ω/km)	0,0821		
· CA, 60Hz, a 75°C (Ω/km)	0,0892		
n) Raio médio geométrico do cabo (mm)	10,70		
o) Normas de fabricação e ensaios	ASTM B-232 / NBR 7270		
<b>Elaborado por:</b>	<b>Revisado por:</b>	<b>Data:</b>	<b>Aprovação do Cliente:</b>
Eduardo Blauth	Juarez Ribeiro	08/08/2014	

Ane

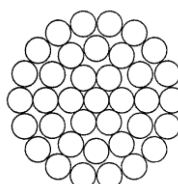
## B. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CABO CAL 6201 GREENLEY 927,2 KCMIL

ENGENHARIA DE PRODUTO  
PLANILHA DE DADOS TÉCNICOS GARANTIDOS



### Dados técnicos e características garantidas Cabos de Alumínio Liga 6201 - CAL

Item	Descrição	Características ou Unidade
1	Tipo do condutor	CAL/6201
2	Bitola do condutor	927,2 MCM
3	Código do condutor	GREELEY
4	Seção nominal Al Liga 6201	469,81 mm <sup>2</sup>
5	Formação do cabo	37 fios
6	Diâmetros	
	a) Dos fios de alumínio	4,02 mm
	b) Do cabo	28,14 mm
7	Peso do cabo	1295 kg/km
8	Têmpera do material condutor	T 81
9	Acondicionamento	Carretel de madeira
10	Resistência elétrica a 20° C – CC máx.	0,0713 ohm/km
11	Resistência mecânica calculada ( RMC )	135kN
12	Normas aplicáveis	ASTM B-399



CAL 6201 37 fios

Elaborado por:	Revisado por:	Data:	Aprovação do Cliente:
Eduardo A. Blauth	Juarez Ribeiro	17/Dezembro/2014	

### C. ESPECIFICAÇÕES DO CABO CAL 1120 PHOSPHORUS 823 KCMIL

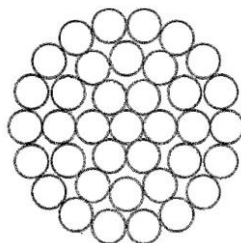
ENGENHARIA DE PRODUTO  
PLANILHA DE DADOS TÉCNICOS GARANTIDOS



#### CAL 1120 823MCM

Item	Descrição	Unidade	Características
1	Norma de referencia		AS 1531
2	Tipo de cabo		Cabo de alumínio liga 1120 (CAL)
3	Material do condutor		Alumínio liga 1120
4	Bitola do cabo	AWG/MCM	823 kcmil
5	Marca / código do cabo		CAL 823 kcmil
6	Seção nominal	mm <sup>2</sup>	417,4
7	Formação do cabo	N° de fios x diâmetro mm	37 x 3,79
8	Informações dos parâmetros elétricos a) resistência elétrica CC máx. a 20°C b) resistência elétrica CC máx. a 50°C c) resistividade dos fios de alumínio a 20°C d) capacidade de corrente (*)	ohm/km ohm/km ohm.mm <sup>2</sup> /m A	0,0716 0,0815 0,0293 865
9	Informações dos parâmetros mecânicos do cabo: a) diâmetro externo nominal do cabo b) relação de encordoamento última coroa c) passo de encordoamento d) massa linear do cabo e) carga de ruptura nominal do cabo f) coeficiente de dilatação linear final g) módulo de elasticidade final h) sentido de torção da última camada	mm  mm kg/km kN por °C GPa	26,53 10 a 14 265,30 a 371,42 1.149,6 91,2 23x10E-6 64 (calculado) / 56 (prático) direita
10	Características dos fios de alumínio a) diâmetro b) tensão de ruptura média antes do encordoamento c) alongamento à ruptura em 250mm, máx.	mm  Mpa %	3,79 ± 1%  230 1,2

\*Para cálculo de capacidade de corrente foram considerados os seguintes fatores: temperatura ambiente de 40°C, temperatura no condutor de 80°C, velocidade do vento 2,2m/s, emissividade 0,5 e sem contribuição do sol.



37 fios - Al liga 1120

Elaborado por:	Revisado por:	Data:	Aprovação do Cliente:
Eduardo Blauth	Juarez Ribeiro	04/dezembro/2015	

## D. ESPECIFICAÇÕES DO CABO CAA DOTTEREL NO CATÁLOGO DA GENERAL CABLE



### CABO DE ALUMÍNIO COM ALMA DE AÇO (CAA)

#### Descrição:

O cabo CAA é um condutor encordoado concêntrico composto de uma ou mais camadas (coroas) de fios de alumínio 1350, têmpera dura (H19) e um núcleo (alma) de aço galvanizado de alta resistência mecânica. Conforme a dimensão do cabo, o núcleo pode ser constituído por um único fio de aço ou vários fios de aço encordoados.

Devido às numerosas combinações possíveis de fios de alumínio e aço, pode-se variar a proporção dos mesmos, a fim de se obter relação entre capacidade de transporte de corrente e resistência mecânica para cada aplicação.

O núcleo de aço pode ser fornecido com dois diferentes pesos de cobertura de zinco (Classes A e B). Para uma melhor proteção onde as condições corrosivas são severas, podem ser usadas as coberturas de zinco de Classe B. Há, contudo, alguma redução na resistência mecânica final quando esta cobertura é usada. As tabelas apresentadas contêm as dimensões e encordoamento normalmente usados. Outros projetos podem ser elaborados para exigências especiais, pois seria impraticável relacionar todas as combinações possíveis de dimensões e encordoamento.

#### Construções Típicas:



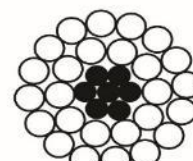
6 Al - 1 Aço



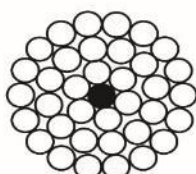
18 Al - 1 Aço



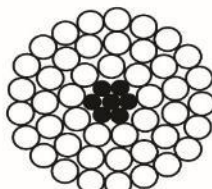
12 Al - 7 Aço



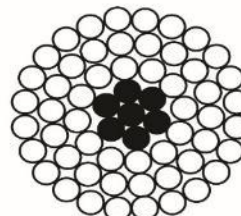
26 Al - 7 Aço



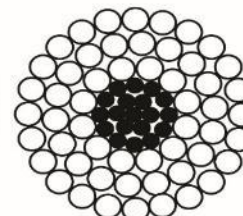
36 Al - 1 Aço



45 Al - 7 Aço



54 Al - 7 Aço



54 Al - 19 Aço

# CABO DE ALUMÍNIO COM ALMA DE AÇO (CAA)

## Características Técnicas

Resistência Mecânica Extra Alta					
Denominação	Porcentagem de Massa Total		Carga de Ruptura kN	Resistência Elétrica Máxima em CC a 20 °C $\Omega/\text{km}$	Código do Produto
	Alumínio	Aço			
Magpie	20,75	79,25	19,69	2,70896	00110.033.102
Shrike	20,75	79,25	30,43	1,70559	00110.033.104
Snipe	20,75	79,25	46,84	1,07245	00110.033.202
—	31,75	68,25	37,68	0,80426	00110.027.109
Shoebill	20,75	79,25	51,11	0,98449	00110.033.108
—	31,75	68,25	41,10	0,73919	00110.027.110
Grouse	50,4	49,6	23,06	0,71113	00110.021.112
Petrel	37,8	62,2	46,15	0,56166	00110.043.113
Minorca	37,8	62,2	50,18	0,51604	00110.043.114
Leghorn	37,8	62,2	60,69	0,42479	00110.043.116
Guinea	37,8	62,2	71,06	0,32961	00110.043.118
Dotterel	37,8	62,2	76,72	0,32319	00110.043.119
Dorking	37,8	62,2	82,76	0,29965	00110.043.121
Brahma	28,3	71,7	126,50	0,28138	00110.071.123
Cochin	37,8	62,2	91,86	0,27060	00110.043.124



## E. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CABO OPGW DUAL

### 1.030.133.S36



## OPGW DUAL - DG1.030.133.S36

Ref. 7915

### CARACTERÍSTICAS GERAIS

- Cabo para-raios com fibra óptica, OPGW, formado por um tubo de aço inoxidável em um tubo de alumínio.
- Projeto compacto de única camada com fios de diâmetro adequado para uma ótima proteção elétrica.
- Flexibilidade no projeto do cabo de acordo com a capacidade de curto-circuito e resistência mecânica necessária.
- Conveniente para ambientes altamente corrosivos.
- Dupla proteção nas fibras contra os efeitos ambientais.
- Excelente resistência mecânica à compressão.

### CONSTRUÇÃO E DESENHOS

CABO COMPLETO	UNIDADE	ESPECIFICAÇÃO
Área da Seção Transversal Nominal	mm <sup>2</sup>	101
Núcleo - Tubo de Alumínio - N° / Diam	mm	1/7,1
Camada 1 - Fios de Aço Galvanizado - N° / Diam	mm	10/3,09
Sentido de Encordoamento - Camada Externa		Esquerdo

DADOS GERAIS	UNIDADE	ESPECIFICAÇÃO
Diâmetro Nominal Total	mm	13,3
Resistência Máxima à Ruptura	kN	93
Massa Total Aproximada	kg/km	682
Resistência Elétrica à 20°C	Ω/km	0,698
Módulo de Elasticidade	N/mm <sup>2</sup>	168.442
Coefficiente de Expansão Linear	x10 <sup>-6</sup> /°C	12,6
Capacidade de Corrente de Curto-Circuito (Ambiente = 50°C)	kA <sup>2</sup> s	30
Descarga Atmosférica	C	150

### INFORMAÇÕES ÓPTICAS

ITEM	UNIDADE	ESPECIFICAÇÃO
Tipo de Fibra Óptica	-	Monomodo G.652D
Fabricante	-	Furukawa
Diâmetro de Campo Modal - 1310nm	μm	9,2±0,4
Diâmetro de Campo Modal - 1550nm	μm	10,4±0,8
Diâmetro do Revestimento Primário	μm	125,0±0,7
Erro de Concentricidade do Campo Modal/Casca	μm	≤ 0,5
Não Circularidade da Casca	%	≤ 1,0

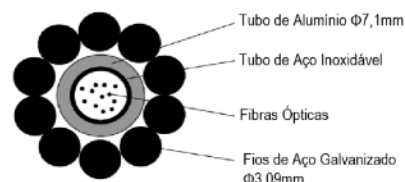
ITEM	UNIDADE	ESPECIFICAÇÃO
Diâmetro do Revestimento Secundário	μm	245±5
Erro de Concentricidade Fibra/Revestimento	μm	<12
Coefficiente de Atenuação-1310nm	dB/km	≤0,35
Coefficiente de Atenuação-1550nm	dB/km	≤0,21
Comprimento de Onda de Corte	nm	≤1260
Comprimento de Onda de Dispersão Zero	nm	1302-1322
Inclinação da Curva de Dispersão Zero	Ps/nm <sup>2</sup> .km	≤0,092

### CÓDIGO DE CORES

Fibra 1 até Fibra 12: Verde, Amarela, Branca, Azul, Vermelha, Violeta, Marrom, Rosa, Natural, Cinza, Laranja, Água-marinha

Fibra 13 até Fibra 24: Mesma base de cores e tipo de fibras, porém com uma marcação preta em intervalos regulares

Fibra 25 até Fibra 36: Mesma base de cores e tipo de fibras, porém com duas marcações pretas em intervalos regulares



### CÓDIGOS DO PRODUTO

12 Fibras - DG1.030.133.S12	24 Fibras - DG1.030.133.S24
36 Fibras - DG1.030.133.S36	48 Fibras - DG1.030.133.S48

\*\*Os tipos comuns de fibras estão disponíveis de acordo com IEEE 1138, IEC 60794-4, ITU - G652, G655  
 \*\*\*Os cabos OPGW são criados de acordo com os requisitos de cada cliente

Escritório de Vendas:  
 Tel. +55-11-5501-5713 - propostas@furukawa.com.br  
 Tel. +55-11-5501-5800 - cmo@furukawa.com.br

www.furukawa.com.br  
 www.furukawa.com.br



## F. CÁLCULO ESTRUTURAL DA TORRE PDS2



### 3 HIPÓTESES DE CARGA

#### 3.1 DEFINIÇÕES BÁSICAS

##### 3.1.1 CARACTERÍSTICAS DOS CABOS

- CABO CONDUTOR (1 cabo / fase):
  - CAA "TERN", 795 MCM (Classe A)
  - A = área da seção transversal =  $4.3100 \text{ cm}^2$
  - $\emptyset$  = diâmetro = 2.7000 cm
  - $\rho$  = peso = 1.3320 kgf/m
  - CR = carga de ruptura = 10000 kgf
  - Ei = módulo de elasticidade inicial =  $0.5410 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
  - Ef = módulo de elasticidade final =  $0.6680 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
  - $\alpha_i$  = coeficiente de dilatação térmica linear inicial =  $2.0300 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
  - $\alpha_f$  = coeficiente de dilatação térmica linear final =  $2.0900 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
- CABO PÁRA-RAIOS 1:
  - cabo OPGW  $\emptyset$  13.4 mm
  - A = área da seção transversal =  $1.0300 \text{ cm}^2$
  - $\emptyset$  = diâmetro = 1.3400 cm
  - $\rho$  = peso = 0.6820 kgf/m
  - CR = carga de ruptura = 9477 kgf
  - Ei = módulo de elasticidade inicial =  $1.3800 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
  - Ef = módulo de elasticidade final =  $1.3800 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
  - $\alpha_i$  = coeficiente de dilatação térmica linear inicial =  $1.3200 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
  - $\alpha_f$  = coeficiente de dilatação térmica linear final =  $1.3200 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
- CABO PÁRA-RAIOS 2:
  - CAA "DOTIEREL", 176.9 MCM (Classe A)
  - A = área da seção transversal =  $1.4193 \text{ cm}^2$
  - $\emptyset$  = diâmetro = 1.5420 cm
  - $\rho$  = peso = 0.6570 kgf/m
  - CR = carga de ruptura = 7865 kgf
  - Ei = módulo de elasticidade inicial =  $0.9720 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
  - Ef = módulo de elasticidade final =  $1.0600 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
  - $\alpha_i$  = coeficiente de dilatação térmica linear inicial =  $1.4700 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
  - $\alpha_f$  = coeficiente de dilatação térmica linear final =  $1.5400 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$

##### 3.1.2 CADEIAS DE ISOLADORES

- CADEIA DE SUSPENSÃO I:
  - peso = 70 kgf
  - Ae = área exposta ao vento  $\cong 14 \times 0.146 \times 0.254 = 0.520 \text{ m}^2$

##### 3.1.3 AÇÃO DO VENTO

###### 3.1.3.1 VENTO MÁXIMO

- De acordo com IEC/TR 60826, considerando-se período de integração igual a 2-3 segundos para a ação do vento sobre cabos, cadeia de isoladores e estrutura.
- T = período de retorno = 150 anos
- VR(50) = velocidade de referência do vento para T igual a 50 anos = 29.72 m/s
- VR(150) = velocidade de referência do vento para T igual a 150 anos = 33.33 m/s
- Terreno categoria "B" ( $K_r = 1.00$ )
- $q_0$  = pressão dinâmica de referência =  $1/2 \times \rho \times [K_r \times VR(150)]^2/g$ 
  - $\rho$  = massa específica do ar =  $1.245 \text{ kg/m}^3$  (temperatura =  $9^\circ\text{C}$ , altitude = 0 m)
  - g = aceleração da gravidade =  $9.81 \text{ m/s}^2$
  - $\Rightarrow q_0 = 70.5 \text{ kgf/m}^2$
- Obs.: A pressão dinâmica reduzida será tomada igual a 36% do valor acima calculado





### 3.1.3.2 VENTO DE ALTA INTENSIDADE

- Será considerado vento com velocidade 15% maior que aquela correspondente à rajada de 2-3 segundos da velocidade de referência para T = 150 anos [VR(150)], constante com a altura, atuando integralmente sobre a estrutura e sobre 25% do vão médio.
  - $VR(150) = Kr \times 33.33 = 33.33 \text{ m/s}$
  - Fator de conversão do vento de 10min para 2-3s: 1.40
  - Vrajada =  $33.33 \times 1.40 = 46.66 \text{ m/s}$
  - $V_i$  = velocidade do vento de alta intensidade =  $1.15 \times 46.66 = 53.66 \text{ m/s}$
  - $q_i$  = pressão dinâmica associada a  $V_i = 1/2 \times \rho \times V_i^2/g$ 
    - $\rho$  = massa específica do ar =  $1.245 \text{ kg/m}^3$  (temperatura =  $9^\circ\text{C}$ , altitude = 0 m)
    - $g$  = aceleração da gravidade =  $9.81 \text{ m/s}^2$
- $\Rightarrow q_i = 182.7 \text{ kgf/m}^2$

### 3.1.4 TRAÇÕES NOS CABOS

- ESTADOS DE CARGA:
  - 1 EDS:  $20^\circ\text{C}$ , sem vento
  - 2 Temperatura mínima:  $-7^\circ\text{C}$
  - 3 Temperatura máxima:  $70^\circ\text{C}$  no condutor e  $40^\circ\text{C}$  no pára-raios
  - 4 Vento máximo  $90^\circ$  (transversal), temperatura =  $9^\circ\text{C}$
  - 5 Vento máximo  $75^\circ$ , temperatura =  $9^\circ\text{C}$
  - 6 Vento máximo  $60^\circ$ , temperatura =  $9^\circ\text{C}$
  - 7 Vento máximo  $45^\circ$ , temperatura =  $9^\circ\text{C}$
  - 8 Vento máximo  $30^\circ$ , temperatura =  $9^\circ\text{C}$
  - 9 Vento máximo  $15^\circ$ , temperatura =  $9^\circ\text{C}$
  - 10 Vento máximo  $0^\circ$ , temperatura =  $9^\circ\text{C}$
  - 11 Vento reduzido  $90^\circ$ , temperatura =  $9^\circ\text{C}$
- Resultados, na condição final, para vãos básicos máximos da LT:

ESTADO DE CARGA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CONDUTOR	4000	5310	2358	6365	6202	5758	5178	4705	4522	4507	4891
PÁRA-RAIOS 1	1137	1330	1027	2417	2323	2063	1700	1369	1222	1209	1505
PÁRA-RAIOS 2	1093	1324	969	2643	2536	2234	1806	1394	1196	1177	1567

- Notas: a) Trações para vão básico de:  
 $\Rightarrow$  cabo CONDUTOR: 234.0 m  
 $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 1: 234.0 m  
 $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 2: 234.0 m
- b) Trações para condição final, considerando-se:  
 $\Rightarrow$  cabo CONDUTOR: Tração final EDS = 40.0% de CR (flecha final condição EDS = 2.280 m)  
 $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 1: Tração final EDS = 12.0% de CR (flecha final condição EDS = 4.106 m  $\rightarrow$  180% CONDUTOR) (flecha final temperatura mínima = 3.510 m  $\rightarrow$  204% CONDUTOR)  
 $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 2: Tração final EDS = 13.9% de CR (flecha final condição EDS = 4.115 m  $\rightarrow$  180% CONDUTOR) (flecha final temperatura mínima = 3.397 m  $\rightarrow$  198% CONDUTOR)
- c) Pressões máximas de vento sobre cabos:  
 $\Rightarrow$  cabo CONDUTOR :  $134.66 \text{ kgf/m}^2$  (H = 12.0m  $G_C = 1.91$   $G_L = 1.00$ )  
 $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 1 :  $141.00 \text{ kgf/m}^2$  (H = 16.0m  $G_C = 2.00$   $G_L = 1.00$ )  
 $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 2 :  $141.00 \text{ kgf/m}^2$  (H = 16.0m  $G_C = 2.00$   $G_L = 1.00$ )
- d) Flechas na temperatura mínima para vão básico:  
 $\Rightarrow$  cabo CONDUTOR : 1.7 m  
 $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 1 : 3.5 m  
 $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 2 : 3.4 m
- e) Flechas na temperatura máxima para vão básico:



- ⇒ cabo CONDUTOR : 3.9 m
- f) Alturas médias dos cabos para vão básico:
- ⇒ cabo CONDUTOR:  $H = 7.5 + 3.9 + 1.2 - 2/3 \times 1.7 = 11.5$  m (adotada: 12.0 m)  
 Obs.: 7.5 m = distância mínima fase/solo  
 1.2 m = distância típica fase inferior ao c.g. das fases
- ⇒ cabo PÁRA-RAIOS 1:  $H = 7.5 + 3.9 + 6.0 - 2/3 \times 3.5 = 15.1$  m (adotada: 16.0 m)  
 Obs.: 6.0 m = altura típica pára-raios em relação à fase inferior
- ⇒ cabo PÁRA-RAIOS 2:  $H = 7.5 + 3.9 + 6.0 - 2/3 \times 3.4 = 15.1$  m (adotada: 16.0 m)  
 Obs.: 6.0 m = altura típica pára-raios em relação à fase inferior

### 3.1.5 CARGAS LONGITUDINAIS DECORRENTES DE RUPTURA DE CABO

- PÁRA-RAIOS: 1.25 x Tração EDS
- FASES: 0.35 x Tração EDS

### 3.1.6 HIPÓTESES DE CARGA E FATORES DE SOBRECARGA - SUSPENSÃO

- HIP. 1: Cabos intactos, com vento transversal máximo (90°)
- HIP. 2: Cabos intactos, com vento longitudinal máximo
- HIP. 3: Cabos intactos, com vento máximo a 45°, 60° ou 75°
- HIP. 4: Ruptura de 1 fase, sem vento
- HIP. 5: Ruptura de 1 pára-raios, sem vento
- HIP. 6: Construção/Manutenção, sem vento
- HIP. 7: Cabos intactos, com vento transversal de alta intensidade
- HIP. 8: Cabos intactos, com vento longitudinal de alta intensidade
- HIP. 9: Cabos intactos, com vento de alta intensidade a 45°, 60° ou 75°
- Fatores de sobrecarga:
  - ⇒ Cargas transversais:
    - HIP. 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8 e 9 : 1.00
    - HIP. 6 : 1.50
  - ⇒ Cargas verticais:
    - HIP. 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8 e 9 : 1.15 (normais) ou 0.87 (reduzidas)
    - HIP. 6 : 1.50
    - Para hipóteses com cargas verticais reduzidas, fator de sobrecarga considerado para o peso próprio da estrutura: 0.87
  - ⇒ Cargas longitudinais:
    - HIP. 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8 e 9 : 1.00
    - HIP. 6 : 1.50

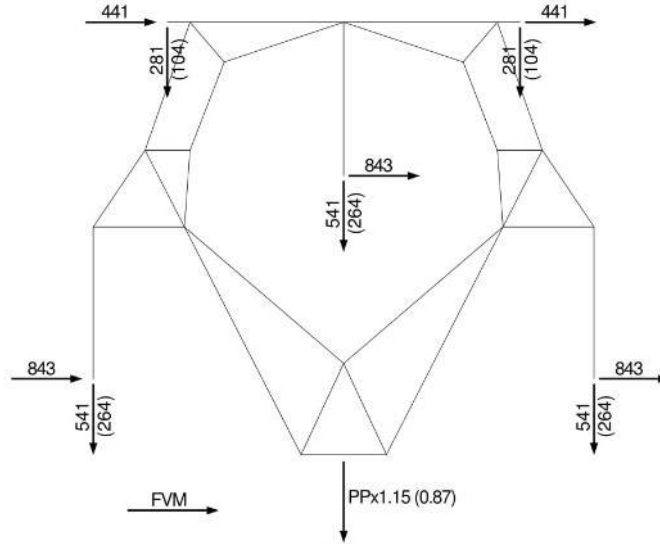
### 3.1.7 CARGAS POR HIPÓTESE

Notas:

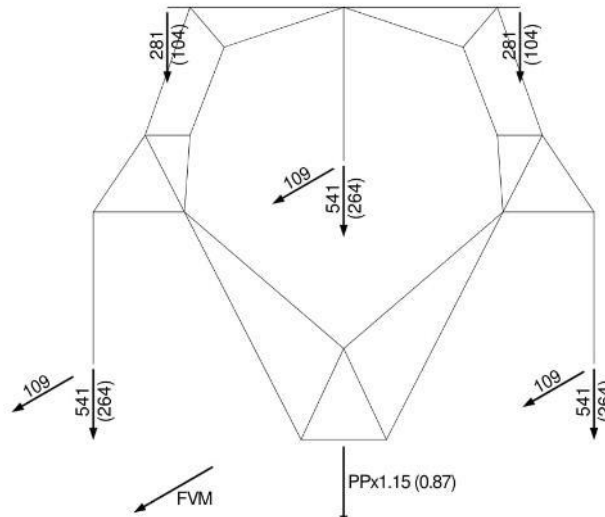
1. Para as hipóteses com vento de alta intensidade (hip. 7, 8 e 9), considerou-se trações atuantes iguais às obtidas para Vento Reduzido (90°)



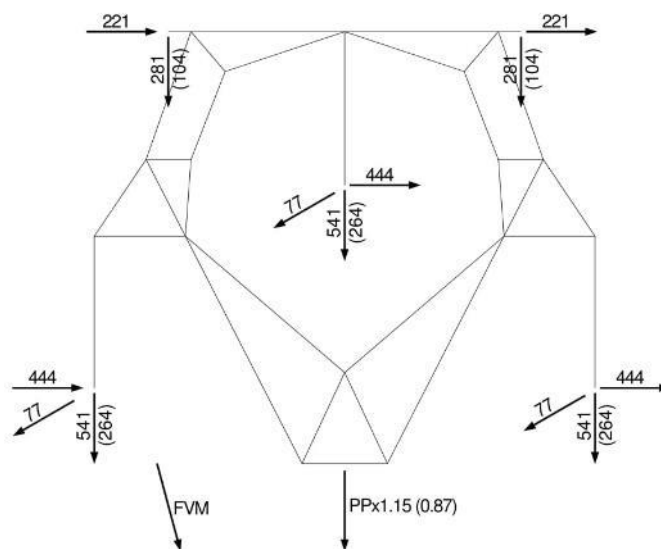
**3.2 ÁRVORES DE CARGA**



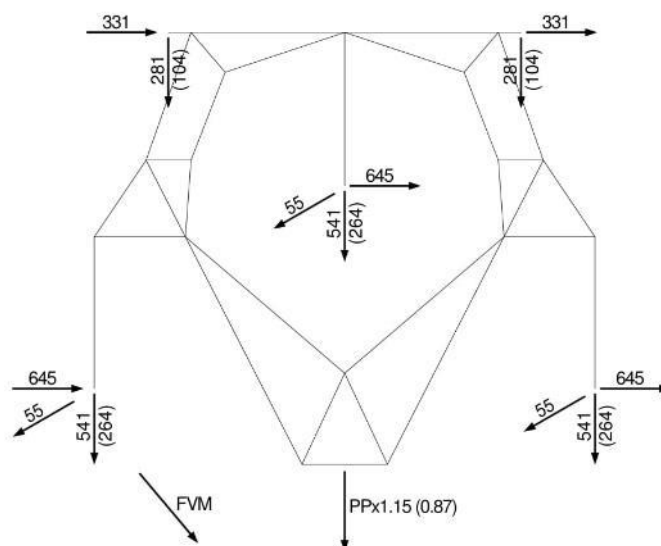
**HIPÓTESE 1**  
(VENTO MÁXIMO TRANSVERSAL)  
(CABOS INTACTOS)



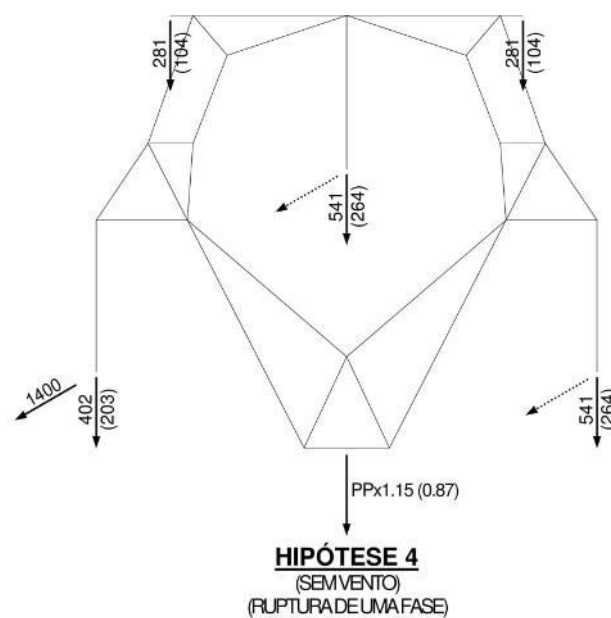
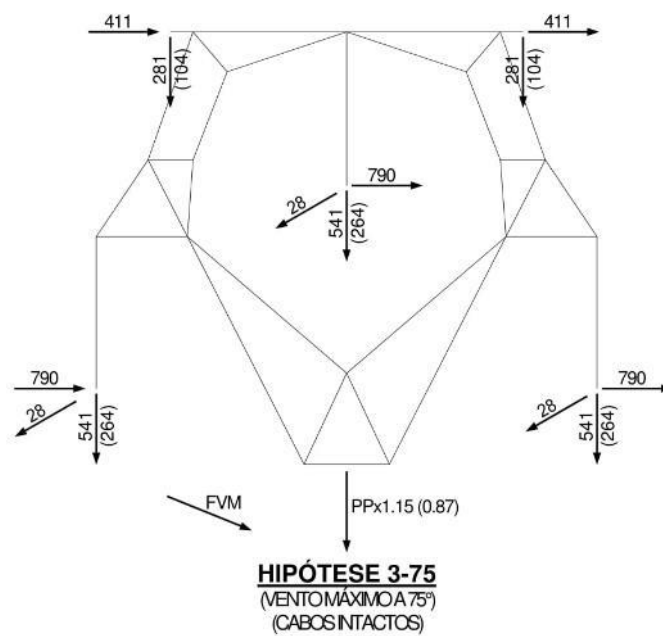
**HIPÓTESE 2**  
(VENTO MÁXIMO LONGITUDINAL)  
(CABOS INTACTOS)

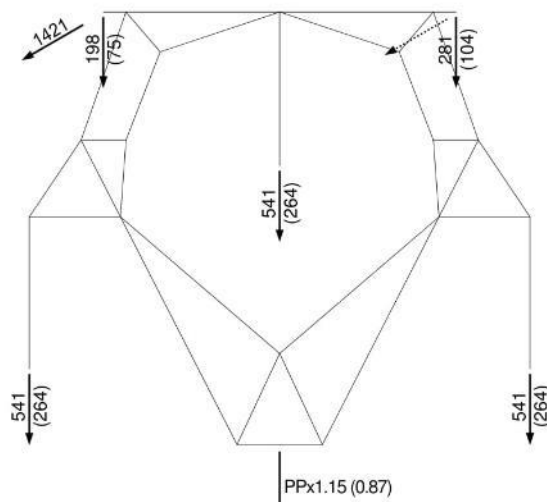


**HIPÓTESE 3**  
(VENTO MÁXIMO A 45°)  
(CABOS INTACTOS)

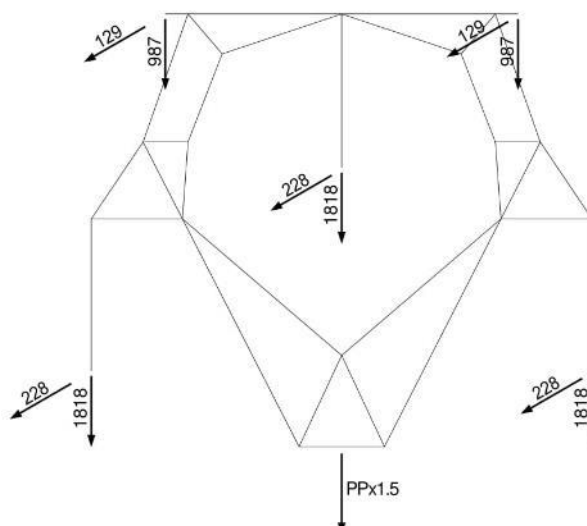


**HIPÓTESE 3-60**  
(VENTO MÁXIMO A 60°)  
(CABOS INTACTOS)

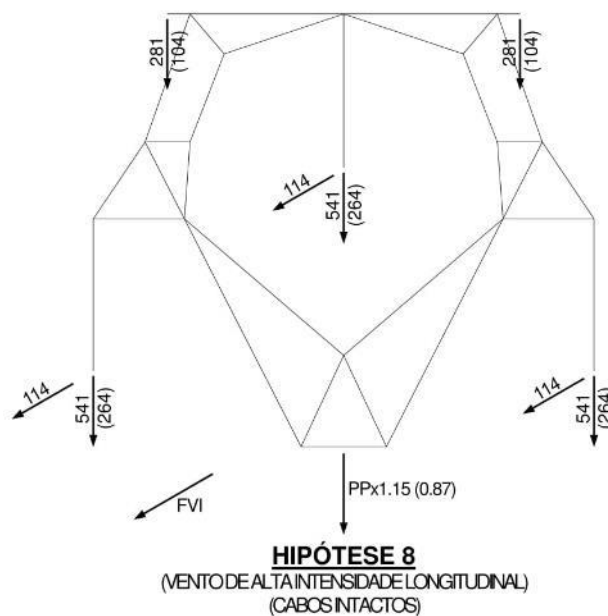
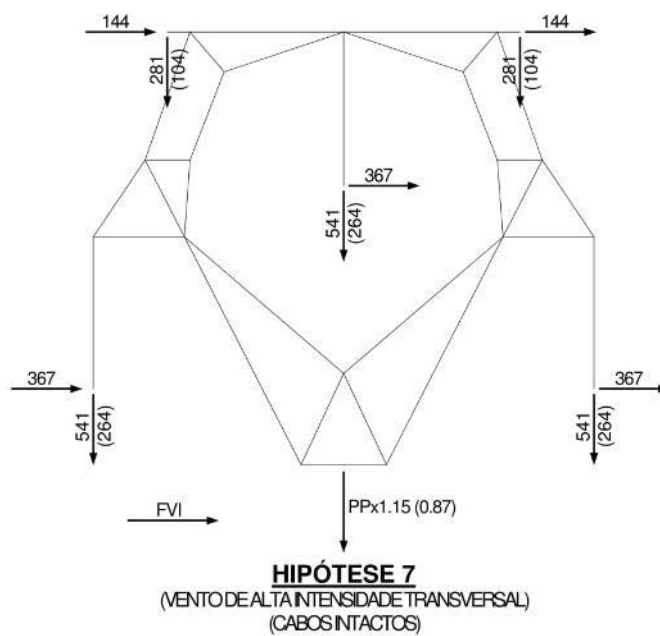


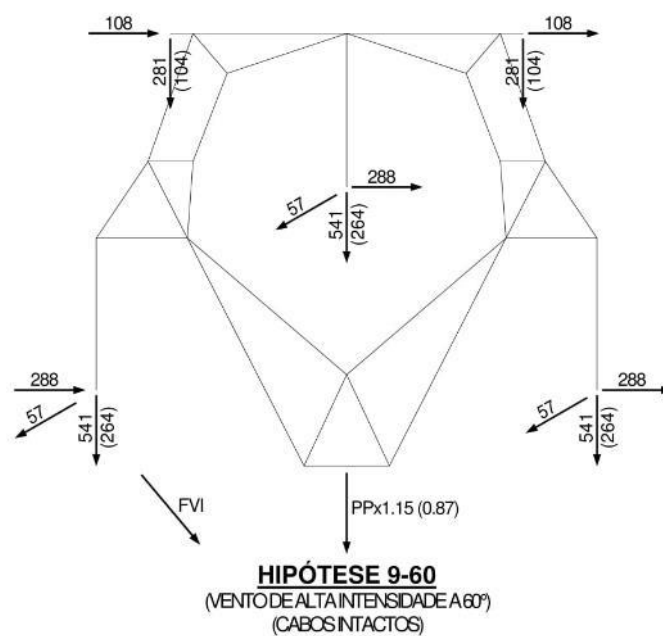
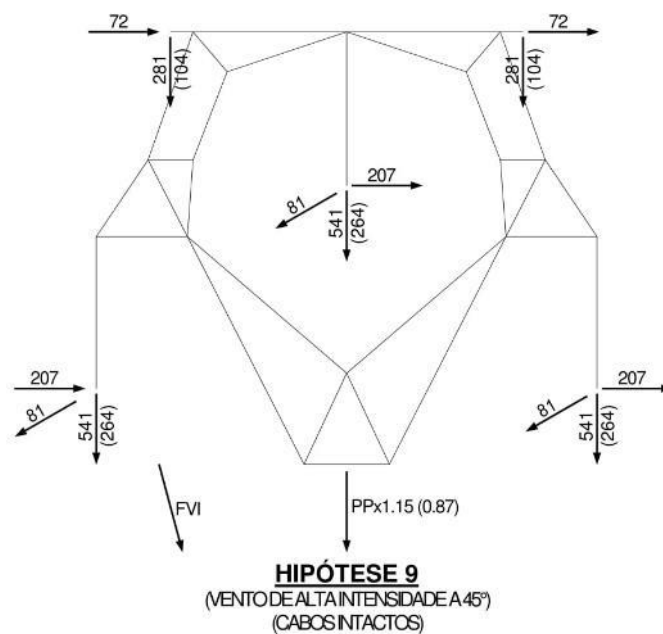


**HIPÓTESE 5**  
(SEM VENTO)  
(RUPTURA DE UM PÁRA-RAIOS)

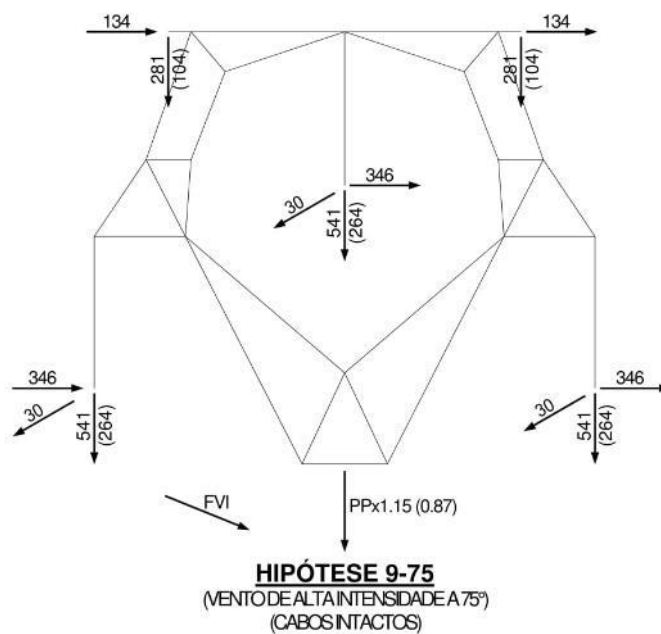


**HIPÓTESE 6**  
(SEM VENTO)  
(CONSTRUÇÃO/MANUTENÇÃO)











### 3.3 NOTAS PARA ÁRVORES DE CARGA

- a) Cargas são últimas (incluem os respectivos fatores de sobrecarga) e estão em kgf.
- b) **FVM** indica a força devida à ação do vento máximo sobre a própria torre e **FVI** indica a força devida à ação do vento de alta intensidade. Para cálculo de **FVM** e **FVI**, ver páginas seguintes.
- c) **PP** indica o peso próprio da torre.
- d) As árvores de carga apresentadas representam as hipóteses de carga básicas consideradas no cálculo. Algumas destas hipóteses foram desdobradas para a análise estrutural, conforme se esclarece nas notas subsequentes.
- e) **Hipóteses 4** (ruptura de uma fase): **e** na denominação da hipótese de carga indica ruptura da fase esquerda, **d** indica ruptura da fase direita e **m** indica ruptura da fase central.
- f) **Hipóteses 5** (ruptura de um pára-raios): **e** na denominação da hipótese de carga indica ruptura do PR esquerdo e **d** indica ruptura do PR direito.
- g) **Hipóteses 6** (construção/manutenção):  
**Ae**: cargas somente no PR esquerdo;  
**Ad**: cargas somente no PR direito;  
**B**: cargas somente nos 2 PR's;  
**Ce**: cargas somente nos 2 PR's e na fase da esquerda;  
**Cd**: cargas somente nos 2 PR's e na fase da direita;  
**D**: cargas somente nos 2 PR's e na fase central;  
**Ee**: sem as cargas da fase da esquerda;  
**Ed**: sem as cargas da fase da direita;  
**F**: sem as cargas da fase central;  
**G**: todas as cargas aplicadas.
- h) ` na denominação da hipótese de carga indica inversão de sentido das cargas longitudinais.
- i) **R** na denominação da hipótese de carga indica cargas verticais mínimas (valores entre parênteses nas árvores de carga).




## G. CÁLCULO ESTRUTURAL DA TORRE PDF60

LT 230 kV EXPERIMENTAL CIRCUITO SIMPLES P&D ANEEL 6491-0243/2011

AUMENTO DA CAPACIDADE DE LINHAS AÉREAS

TORRE TIPO PDF60

CÁLCULO ESTRUTURAL

0A	SJF	RCM	PRRLS	01/06/15	EMISSÃO INICIAL				
REV.	FEITO	VERIF.	APROV.	DATA	DESCRIÇÃO				
PROJETO ESTRUTURAL:				CLIENTE:					
				 					
FEITO	VERIF.	V. PROJ.	APROV.	DATA	O.S.	Nº DO DESENHO	REV.	TOT. DE FOLHAS	
SJF	RCM	RCM	PRRLS	01/06/15	1580	424.01-C2001	0A	1/30	



## ÍNDICE

1 NOTAS GERAIS DE CÁLCULO	Pág.	3		
2 ESQUEMA ESTRUTURAL	Pág.	4		
3 HIPÓTESES DE CARGA	Pág.	5	a	11
4 CARGAS DEVIDAS AO VENTO SOBRE A TORRE	Pág.	12	a	13
5 DIMENSIONAMENTO DE BARRAS E CONEXÕES	Pág.	14	a	20
6 CARGAS ÚLTIMAS SOBRE FUNDAÇÕES	Pág.	21	a	29
7 CÁLCULO DO STUB	Pág.	30		



## 1 NOTAS GERAIS DE CÁLCULO

### 1.1 PARÂMETROS BÁSICOS DA TORRE

Tensão	230 kV
Circuito	SIMPLES
Aplicação	ANCORAGEM TERMINAL
Vão básico (m)	234
Ângulo de deflexão	0°
Vão médio (m)	135
Vão gravante (m)	-100 a 200
Cabo pára-raios	cabo OPGW Ø 13.4 mm ou CAA "DOTTEREL", 176.9 MCM (Classe A)
Cabo condutor	CAA "TERN", 795 MCM (Classe A)

Obs.: Cálculo estrutural efetuado com base nas condições estabelecidas no e-mail enviado pelo LACTEC em 22/04/2015.

### 1.2 MATERIAIS EMPREGADOS

Aço estrutural:

ASTM A36	Fy = 2531 kgf/cm <sup>2</sup> (Tensão de fluência)
	Fu = 4077 kgf/cm <sup>2</sup> (Tensão de ruptura)
ASTM A572 GRAU 50	Fy = 3515 kgf/cm <sup>2</sup> (Tensão de fluência)
	Fu = 4570 kgf/cm <sup>2</sup> (Tensão de ruptura)
ASTM A572 GRAU 60	Fy = 4218 kgf/cm <sup>2</sup> (Tensão de fluência)
	Fu = 5273 kgf/cm <sup>2</sup> (Tensão de ruptura)

Parafusos (rosca excluída da seção de corte):

ASTM A394 TIPO "0"	Fv = 2620 kgf/cm <sup>2</sup> (Tensão admissível ao corte)
--------------------	--

### 1.3 NORMAS E ESPECIFICAÇÕES PARA DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento da torre (barras e ligações) foi feito de acordo com a Norma ASCE 10-97 ("Design of Latticed Steel Transmission Structures"), adotando-se um coeficiente de minoração de resistências igual a 0.85. Isto significa que as tensões admissíveis utilizadas no dimensionamento estrutural foram obtidas multiplicando-se as tensões limites recomendadas pela ASCE pelo fator 0.85.

### 1.4 SOFTWARE USADO NO CÁLCULO

O cálculo estrutural foi feito com a utilização de programas de computador desenvolvidos por ENGETOWER, baseados no método dos elementos finitos e que fazem a análise estática linear de estruturas reticuladas. O modelo estrutural empregado foi o de treliça espacial.



### 3 HIPÓTESES DE CARGA

#### 3.1 DEFINIÇÕES BÁSICAS

##### 3.1.1 CARACTERÍSTICAS DOS CABOS

- CABO CONDUTOR (1 cabo / fase):
  - CAA "TERN", 795 MCM (Classe A)
  - A = área da seção transversal =  $4.3100 \text{ cm}^2$
  - $\emptyset$  = diâmetro = 2.7000 cm
  - $\rho$  = peso = 1.3320 kgf/m
  - CR = carga de ruptura = 10000 kgf
  - $E_i$  = módulo de elasticidade inicial =  $0.5410 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
  - $E_f$  = módulo de elasticidade final =  $0.6680 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
  - $\alpha_i$  = coeficiente de dilatação térmica linear inicial =  $2.0300 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
  - $\alpha_f$  = coeficiente de dilatação térmica linear final =  $2.0900 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
- CABO PÁRA-RAIOS 1:
  - cabo OPGW  $\emptyset$  13.4 mm
  - A = área da seção transversal =  $1.0300 \text{ cm}^2$
  - $\emptyset$  = diâmetro = 1.3400 cm
  - $\rho$  = peso = 0.6820 kgf/m
  - CR = carga de ruptura = 9477 kgf
  - $E_i$  = módulo de elasticidade inicial =  $1.3800 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
  - $E_f$  = módulo de elasticidade final =  $1.3800 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
  - $\alpha_i$  = coeficiente de dilatação térmica linear inicial =  $1.3200 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
  - $\alpha_f$  = coeficiente de dilatação térmica linear final =  $1.3200 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
- CABO PÁRA-RAIOS 2:
  - CAA "DOTTEREL", 176.9 MCM (Classe A)
  - A = área da seção transversal =  $1.4193 \text{ cm}^2$
  - $\emptyset$  = diâmetro = 1.5420 cm
  - $\rho$  = peso = 0.6570 kgf/m
  - CR = carga de ruptura = 7865 kgf
  - $E_i$  = módulo de elasticidade inicial =  $0.9720 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
  - $E_f$  = módulo de elasticidade final =  $1.0600 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
  - $\alpha_i$  = coeficiente de dilatação térmica linear inicial =  $1.4700 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
  - $\alpha_f$  = coeficiente de dilatação térmica linear final =  $1.5400 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$

##### 3.1.2 CADEIAS DE ISOLADORES

- CADEIA DE ANCORAGEM:
  - peso = 110 kgf
  - $A_e$  = área exposta ao vento  $\cong 15 \times 0.146 \times 0.254 = 0.556 \text{ m}^2$

##### 3.1.3 AÇÃO DO VENTO

###### 3.1.3.1 VENTO MÁXIMO

- De acordo com IEC/TR 60826, considerando-se período de integração igual a 2-3 segundos para a ação do vento sobre cabos, cadeia de isoladores e estrutura.
- T = período de retorno = 150 anos
- VR(50) = velocidade de referência do vento para T igual a 50 anos = 29.72 m/s
- VR(150) = velocidade de referência do vento para T igual a 150 anos = 33.33 m/s
- Terreno categoria "B" ( $K_r = 1.00$ )
- $q_0$  = pressão dinâmica de referência =  $1/2 \times \rho \times [K_r \times \text{VR}(150)]^2/g$ 
  - $\rho$  = massa específica do ar =  $1.245 \text{ kg/m}^3$  (temperatura =  $9^\circ\text{C}$ , altitude = 0 m)
  - g = aceleração da gravidade =  $9.81 \text{ m/s}^2$
- $\Rightarrow q_0 = 70.5 \text{ kgf/m}^2$
- Obs.: A pressão dinâmica reduzida será tomada igual a 36% do valor acima calculado



### 3.1.3.2 VENTO DE ALTA INTENSIDADE

- Será considerado vento com velocidade 15% maior que aquela correspondente à rajada de 2-3 segundos da velocidade de referência para T = 150 anos [VR(150)], constante com a altura, atuando integralmente sobre a estrutura e sobre 25% do vão médio.
- $VR(150) = Kr \times 33.33 = 33.33 \text{ m/s}$
- Fator de conversão do vento de 10min para 2-3s: 1.40
- Vrajada =  $33.33 \times 1.40 = 46.66 \text{ m/s}$
- $V_i$  = velocidade do vento de alta intensidade =  $1.15 \times 46.66 = 53.66 \text{ m/s}$
- $q_i$  = pressão dinâmica associada a  $V_i = 1/2 \times \rho \times V_i^2/g$ 
  - $\rho$  = massa específica do ar =  $1.245 \text{ kg/m}^3$  (temperatura =  $9^\circ\text{C}$ , altitude = 0 m)
  - $g$  = aceleração da gravidade =  $9.81 \text{ m/s}^2$
- $\Rightarrow q_i = 182.7 \text{ kgf/m}^2$

### 3.1.4 TRAÇÕES NOS CABOS

- ESTADOS DE CARGA:
  - 1 EDS:  $20^\circ\text{C}$ , sem vento
  - 2 Temperatura mínima:  $-7^\circ\text{C}$
  - 3 Temperatura máxima:  $70^\circ\text{C}$  no condutor e  $40^\circ\text{C}$  no pára-raios
  - 4 Vento máximo  $90^\circ$  (transversal), temperatura =  $9^\circ\text{C}$
  - 5 Vento máximo  $75^\circ$ , temperatura =  $9^\circ\text{C}$
  - 6 Vento máximo  $60^\circ$ , temperatura =  $9^\circ\text{C}$
  - 7 Vento máximo  $45^\circ$ , temperatura =  $9^\circ\text{C}$
  - 8 Vento máximo  $30^\circ$ , temperatura =  $9^\circ\text{C}$
  - 9 Vento máximo  $15^\circ$ , temperatura =  $9^\circ\text{C}$
  - 10 Vento máximo  $0^\circ$ , temperatura =  $9^\circ\text{C}$
  - 11 Vento reduzido  $90^\circ$ , temperatura =  $9^\circ\text{C}$
- Resultados, na condição final, para vãos básicos máximos da LT:

ESTADO DE CARGA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CONDUTOR	4000	5310	2358	6365	6202	5758	5178	4705	4522	4507	4891
PÁRA-RAIOS 1	1137	1330	1027	2417	2323	2063	1700	1369	1222	1209	1505
PÁRA-RAIOS 2	1093	1324	969	2643	2536	2234	1806	1394	1196	1177	1567

Notas: a) Trações para vão básico de:

- $\Rightarrow$  cabo CONDUTOR: 234.0 m
- $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 1: 234.0 m
- $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 2: 234.0 m

b) Trações para condição final, considerando-se:

- $\Rightarrow$  cabo CONDUTOR: Tração final EDS = 40.0% de CR (flecha final condição EDS = 2.280 m)
- $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 1: Tração final EDS = 12.0% de CR (flecha final condição EDS = 4.106 m  $\rightarrow$  180% CONDUTOR) (flecha final temperatura mínima = 3.510 m  $\rightarrow$  204% CONDUTOR)
- $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 2: Tração final EDS = 13.9% de CR (flecha final condição EDS = 4.115 m  $\rightarrow$  180% CONDUTOR) (flecha final temperatura mínima = 3.397 m  $\rightarrow$  198% CONDUTOR)

c) Pressões máximas de vento sobre cabos:

- $\Rightarrow$  cabo CONDUTOR :  $134.66 \text{ kgf/m}^2$  (H = 12.0m  $G_C = 1.91$   $G_L = 1.00$ )
- $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 1 :  $141.00 \text{ kgf/m}^2$  (H = 16.0m  $G_C = 2.00$   $G_L = 1.00$ )
- $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 2 :  $141.00 \text{ kgf/m}^2$  (H = 16.0m  $G_C = 2.00$   $G_L = 1.00$ )

d) Flechas na temperatura mínima para vão básico:

- $\Rightarrow$  cabo CONDUTOR : 1.7 m
- $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 1 : 3.5 m
- $\Rightarrow$  cabo PÁRA-RAIOS 2 : 3.4 m

e) Flechas na temperatura máxima para vão básico:

**COPEL  
LACTEC**

**LT 230 kV EXPERIMENTAL C.S. P&D ANEEL 6491-0243/2011/ GUAÍRA  
TORRE TIPO PDF60**

**6 R0A**



- ⇒ cabo CONDUTOR : 3.9 m
- f) Alturas médias dos cabos para vão básico:
- ⇒ cabo CONDUTOR:  $H = 7.5 + 3.9 + 1.2 - 2/3 \times 1.7 = 11.5$  m (adotada: 12.0 m)  
 Obs.: 7.5 m = distância mínima fase/solo  
 1.2 m = distância típica fase inferior ao c.g. das fases
- ⇒ cabo PÁRA-RAIOS 1:  $H = 7.5 + 3.9 + 6.0 - 2/3 \times 3.5 = 15.1$  m (adotada: 16.0 m)  
 Obs.: 6.0 m = altura típica pára-raios em relação à fase inferior
- ⇒ cabo PÁRA-RAIOS 2:  $H = 7.5 + 3.9 + 6.0 - 2/3 \times 3.4 = 15.1$  m (adotada: 16.0 m)  
 Obs.: 6.0 m = altura típica pára-raios em relação à fase inferior

### 3.1.5 CARGAS LONGITUDINAIS DECORRENTES DE RUPTURA DE CABO

- PÁRA-RAIOS: 1.50 x Tração EDS
- FASES: 0.75 x Tração EDS

### 3.1.6 HIPÓTESES DE CARGA E FATORES DE SOBRECARGA - TERMINAL

- HIP. 1T: Cabos intactos, com vento transversal máximo (90°)
- HIP. 2T: Cabos intactos, com vento longitudinal máximo
- HIP. 3T: Cabos intactos, com vento máximo a 45°
- HIP. 4T: Ruptura de 1 fase, sem vento
- HIP. 5T: Ruptura de 1 pára-raios, sem vento
- HIP. 6T: Construção/Manutenção, sem vento
- HIP. 7T: Cabos intactos, com vento transversal de alta intensidade
- HIP. 8T: Cabos intactos, com vento longitudinal de alta intensidade
- HIP. 9T: Cabos intactos, com vento de alta intensidade a 45°
- Fatores de sobrecarga:
  - ⇒ Cargas transversais:
    - HIP. 1T, 2T, 3T, 4T, 5T, 7T, 8T e 9T : 1.00
    - HIP. 6T : 1.50
  - ⇒ Cargas verticais:
    - HIP. 1T, 2T, 3T, 4T, 5T, 7T, 8T e 9T : 1.15
    - HIP. 6T : 1.50
    - Para hipóteses com cargas verticais reduzidas, fator de sobrecarga considerado para o peso próprio da estrutura:
      - HIP. 1T, 2T, 3T, 4T, 5T, 7T, 8T e 9T : 0.87
      - HIP. 6T : 0.67
  - ⇒ Cargas longitudinais:
    - HIP. 1T, 2T, 3T, 4T, 5T, 7T, 8T e 9T : 1.00
    - HIP. 6T : 1.50

### 3.1.7 CARGAS POR HIPÓTESE

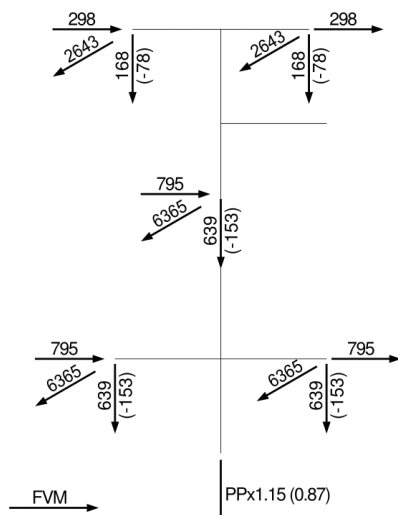
Notas:

1. Para as hipóteses com vento de alta intensidade (hip. 7T, 8T e 9T), considerou-se trações atuantes iguais às obtidas para Vento Reduzido (90°)

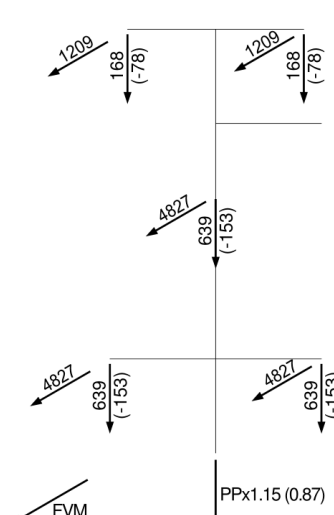




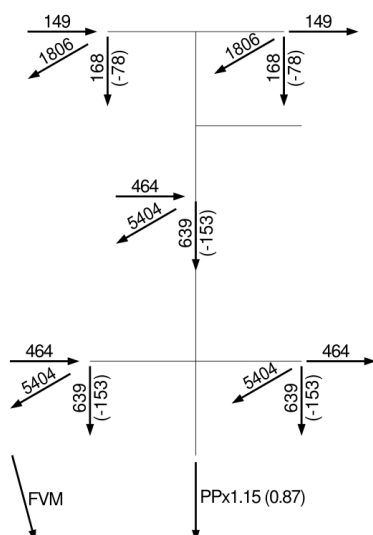
### 3.2 ÁRVORES DE CARGA



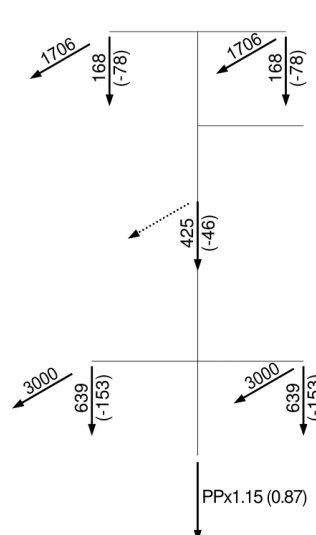
**HIPÓTESE 1T**  
(VENTO MÁXIMO TRANSVERSAL)  
(CABOS INTACTOS)



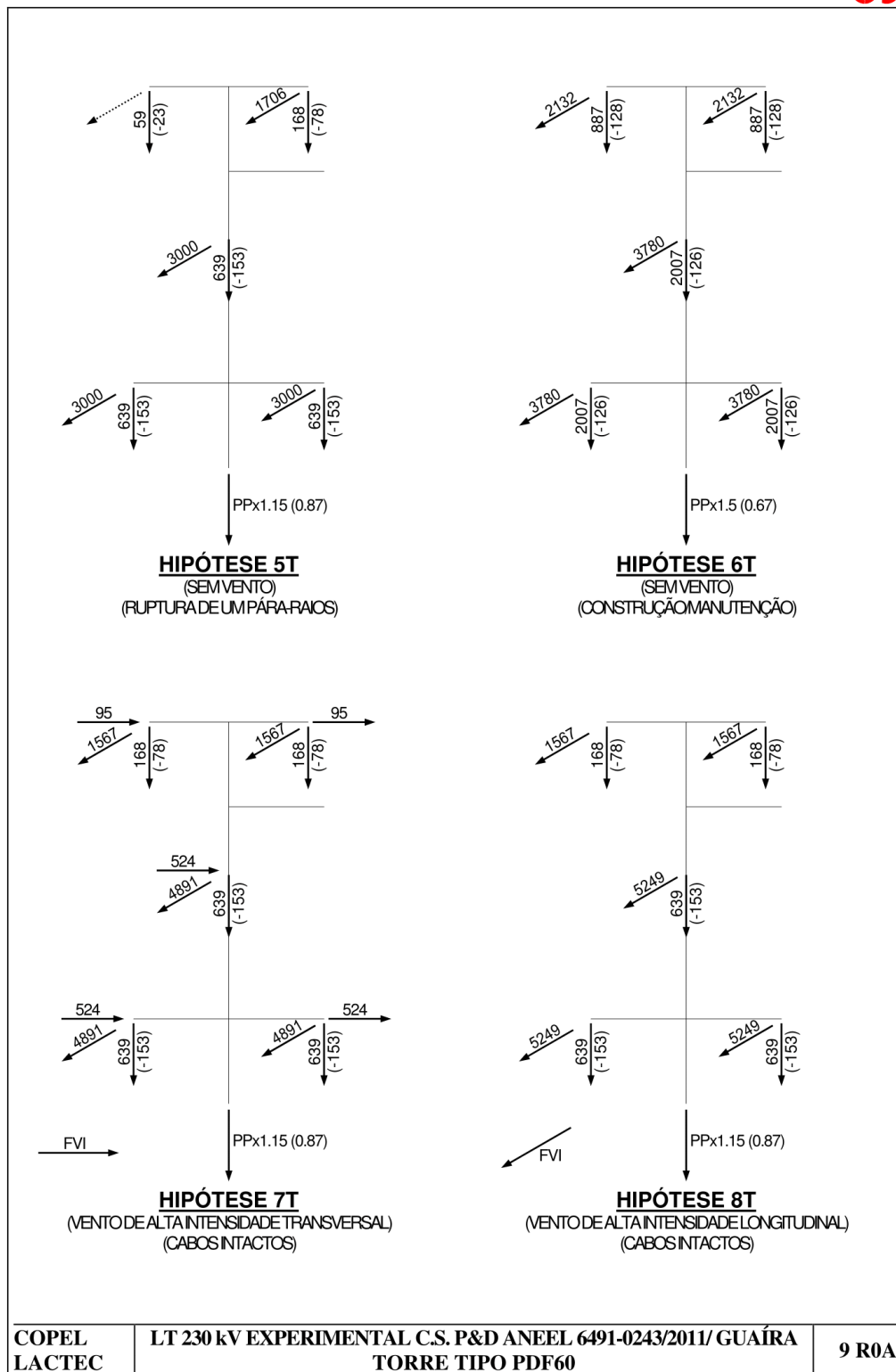
**HIPÓTESE 2T**  
(VENTO MÁXIMO LONGITUDINAL)  
(CABOS INTACTOS)

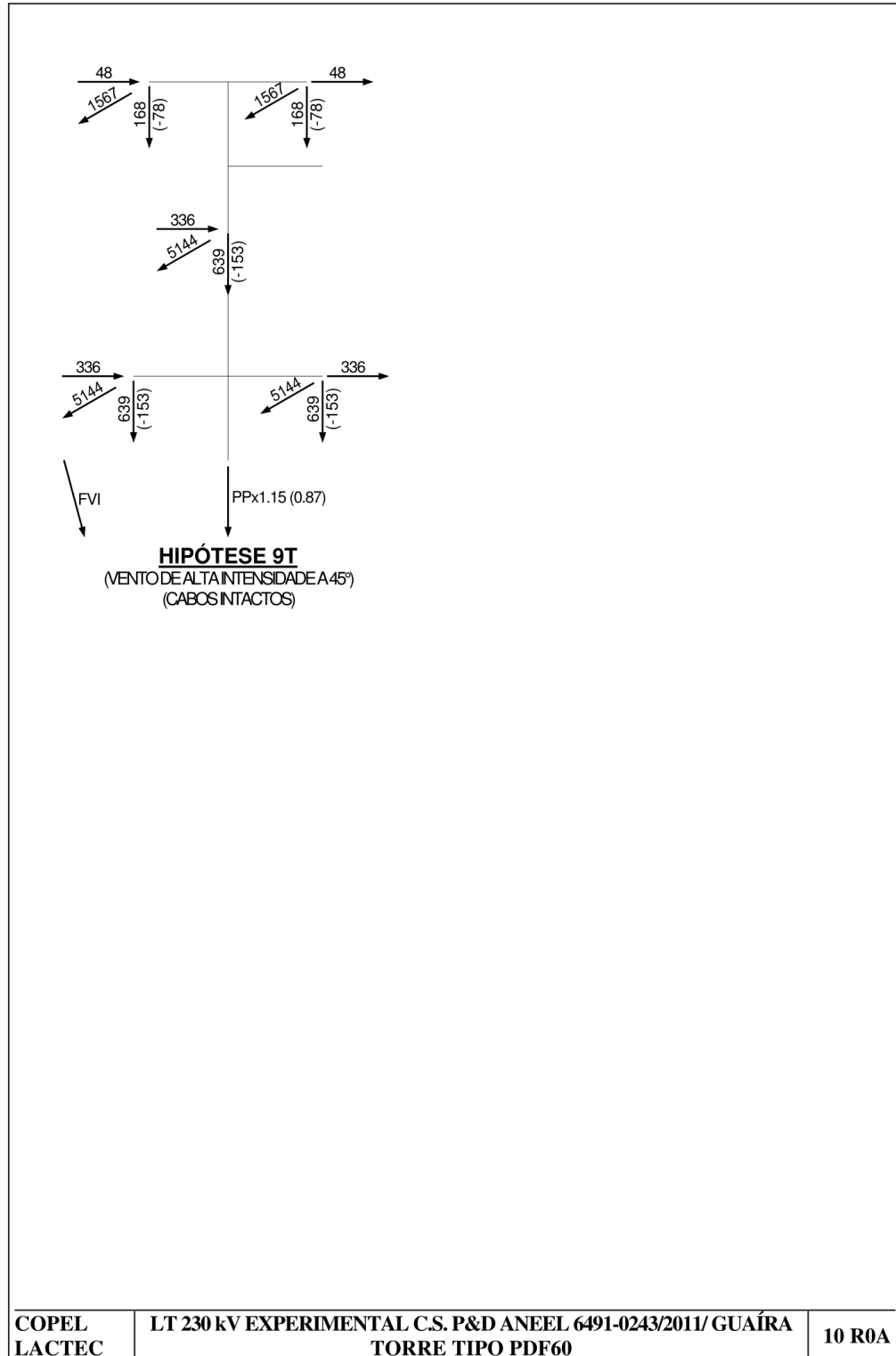


**HIPÓTESE 3T**  
(VENTO MÁXIMO A 45°)  
(CABOS INTACTOS)



**HIPÓTESE 4T**  
(SEM VENTO)  
(RUPTURA DE UMA FASE)







### 3.3 NOTAS PARA ÁRVORES DE CARGA

- a) Cargas são últimas (incluem os respectivos fatores de sobrecarga) e estão em kgf.
- b) **FVM** indica a força devida à ação do vento máximo sobre a própria torre e **FVI** indica a força devida à ação do vento de alta intensidade. Para cálculo de **FVM** e **FVI**, ver páginas seguintes.
- c) **PP** indica o peso próprio da torre.
- d) As árvores de carga apresentadas representam as hipóteses de carga básicas consideradas no cálculo. Algumas destas hipóteses foram desdobradas para a análise estrutural, conforme se esclarece nas notas subsequentes.
- e) **Hipóteses 4T** (ruptura de uma fase): **s** na denominação da hipótese de carga indica ruptura da fase superior, **m** indica ruptura da fase inferior esquerda e **i** indica ruptura da fase inferior direita.
- f) **Hipóteses 5T** (ruptura de um pára-raios): **e** na denominação da hipótese de carga indica ruptura do PR esquerdo e **d** indica ruptura do PR direito.
- g) **\*** na denominação da hipótese de carga indica inversão de sentido das cargas transversais.
- h) **R** na denominação da hipótese de carga indica cargas verticais mínimas (valores entre parênteses nas árvores de carga).
- i) Ancoragem terminal - Distribuição de carga por face:
  - i.1) Cargas verticais: 100% na face anterior.
  - i.2) Cargas longitudinais: 100% na face anterior.
  - i.3) Cargas transversais: 100% na face anterior.