



**XV SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GLT/ 19

**17 à 22 de outubro de 1999
Foz do Iguaçu – Paraná - Brasil**

**GRUPO III
GRUPO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO (GLT)**

DETERMINAÇÃO DE CURVA DE FADIGA EM CABO CAA 336.4MCM LINNET

Ivan Celso de Castilho *
CEMIG

Márcio Sanglard
CEPEL

Bruno Rewagen
CEMIG

RESUMO

Este trabalho apresenta um resumo das pesquisas desenvolvidas na área de fadiga de condutores de alumínio quando sujeitos a vibração eólica simuladas no Laboratório do CEPEL.

Apresenta uma curva de fadiga do cabo CAA 336.4 MCM Linnet, utilizado em larga escala nas Linhas de Transmissão da CEMIG e correlaciona os resultados obtidos em laboratórios com os valores preconizados por outras entidades como o CIGRÉ, EPRI e IEEE. Os resultados obtidos fornecem uma base de informações mais precisas para a recapacitação e extensão de vida útil em condutores aéreos de Linhas de Transmissão.

PALAVRAS-CHAVE

Fadiga em Cabos Condutores, curva de Wöhler, Vibração, Recapacitação de Linhas de Transmissão, extensão de vida útil de Cabos Condutores de LTs.

1.0 – INTRODUÇÃO

Os danos causados a linhas de transmissão por fadiga devida à vibração eólica vêm sendo estudados pela CEMIG, de maneira sistêmica, desde 1983.

Neste período foram realizadas experiências em linhas experimentais e posto em prática um programa de medições em linhas em operação, obtendo-se registros de vibração de mais de 40 linhas do sistema. Participaram dessas atividades as Áreas de Tecnologia, Projeto e Manutenção de Linhas de Transmissão.

Como resultado, obteve-se um bom conhecimento das causas do fenômeno, e de como se proteger de seus efeitos. Destaca-se o mapeamento realizado das regiões do estado onde as condições ambientes são mais favoráveis à ocorrência de vibrações e o levantamento das características das linhas mais propensas a serem danificadas.

Os estudos e pesquisas focaram principalmente o comportamento dos cabos condutores, componente mais afetado pelas vibrações. Para estimativas de vida útil desses cabos, tomou-se como base recomendações da CIGRE, do IEEE e do EPRI, que por sua vez se fundamentam em resultados de ensaios realizados em cabos na Europa e América do Norte.

Em que pese a grande quantidade de dados de campo coletados e analisados, a falta de informações sobre a resistência à fadiga dos cabos utilizados pela CEMIG sempre foi considerada uma limitação a ser contornada por meio de considerações, que se acreditam conservativas, baseadas no conjunto de resultados experimentais obtidos pelas mencionadas instituições.

O levantamento do comportamento de cabos CAA com relação à fadiga depende de um ensaio complexo, de alto custo, que necessita de condições ambientes controladas, equipamentos sofisticados de controle e medição, amplo espaço de laboratório para comportar vão experimental de 30m ou mais e principalmente de tempo, pois uma amostra à ele submetida pode levar semanas para apresentar sinais de fadiga.

Não havia, até recentemente, laboratório ou instituição de pesquisa no Brasil capaz de realizá-lo, dentro dos

padrões da CIGRÉ, aceitos internacionalmente, a um custo razoável.

A CEMIG manifestou, desde 1988, seu interesse na realização desse ensaio, mas só no ano de 1996 pode ser atendida pelo CEPEL. Por considerações econômicas, limitou-se por enquanto a se levantar apenas as características do cabo CAA Linnet (170 mm²), devido à sua importância para o sistema da CEMIG e a quantidade de problemas de fadiga por ele apresentados.

Os resultados obtidos em ensaios com esse cabo são apresentados e analisados no presente trabalho.

2.0 - DETERMINAÇÃO DE CURVA DE FADIGA EM CABO 336.4 MCM CAA LINNET

2.1 Fadiga em cabos condutores sujeitos a vibração eólica

O dano mais comum causado por vibrações eólicas em linhas de transmissão aéreas, é o rompimento de fios individuais do condutor, por fadiga. A fadiga ocorre normalmente nos pontos em que o movimento dos condutores é restringido, e está diretamente relacionada com a rigidez com a qual esta restrição é feita, principalmente no sentido vertical.

Por isso, a ruptura de fios é mais comum no interior ou nas proximidades de grampos de suspensão, pois em outros dispositivos tais como grampos de ancoragem, espaçadores, emendas, etc., sempre há alguma mobilidade vertical.

A fadiga é causada pelos esforços dinâmicos resultantes do dobramento alternado do condutor nos pontos de restrição de movimento. Os efeitos dos esforços dinâmicos são agravados pela abrasão (“fretting”) entre a superfície dos fios, que causa a mútua remoção de material. Esse material finamente dividido reage com o oxigênio do ar formando um pó preto (óxido de alumínio), mais duro que o próprio metal, que acelera a taxa com que os fios são desgastados Ref.[1].

Os esforços dinâmicos que surgem no cabo, junto ao grampo de suspensão, são proporcionais à amplitude de vibração, sendo que a constante de proporcionalidade depende das características do cabo e da tensão de esticamento.

No Anexo A é mostrada a relação entre a tensão dinâmica e a amplitude de vibração medida pelos vibrógrafos, nas proximidades do grampo.

2.2 Resistência à Fadiga

Os limites de resistência à fadiga são determinados em ensaios de laboratório, nos quais a vida útil dos condutores, em número de ciclos, é determinada em função da intensidade de vibração.

As curvas obtidas nos ensaios são conhecidas como curvas de fadiga, ou curvas de Wöhler. Apresentam no eixo das ordenadas o esforço dinâmico (geralmente em MPa; 1MPa=1N/mm²) e no eixo das abscissas, em escala logarítmica, a vida útil em ciclos. A Figura 1 mostra diversos resultados de ensaios realizados em vários países, compilados na Ref. [2].

A vida útil é considerada como o número de ciclos necessários para a ruptura de 10% dos fios do cabo ou de 3 fios, prevalecendo o menor valor.

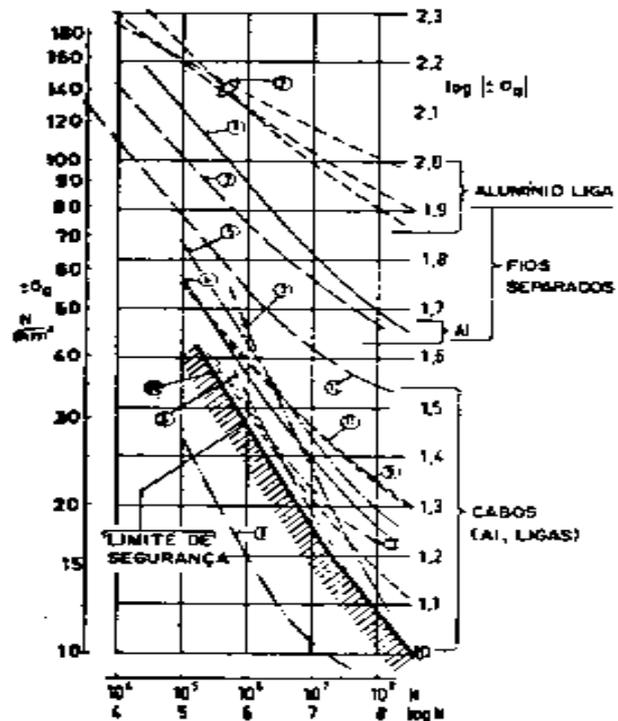


FIGURA 1 – RESULTADOS DE ENSAIOS COMPILADOS P/ CIGRÉ

2.3 Limite de Segurança da CIGRÉ

Da Figura 1 consta uma importante curva de fadiga, que é a curva limite de segurança (“Safe Border Line”), proposta pelo Comitê de Estudos de Linhas Aéreas (SC 22), da CIGRE, como uma estimativa conservadora da vida útil de cabos CAA e CALA.

As curvas de fadiga de cabos condutores normalmente podem ser aproximadas, através de análise de regressão, por exponenciais do tipo:

$$S = C.N^Z \quad (1)$$

onde S é a tensão dinâmica em MPa e N a vida em ciclos.

Estudos mais recentes recomendam, para as constantes C e Z, valores diferenciados para cabos com uma ou mais camadas de fios de alumínio, conforme consta da Tabela 1 [4].

TABELA 1 - CONSTANTES DA CURVA LIMITE DE SEGURANÇA ("SAFE BORDER LINE" DO CIGRÉ)

Nº de camadas de fios de alumínio do cabo condutor	N > 2,0.10 ⁷ ciclos		N < 2,0.10 ⁷ ciclos	
	C	Z	C	Z
1	430	-0,17	730	-0,2
>1	263	-0,17	450	-0,2

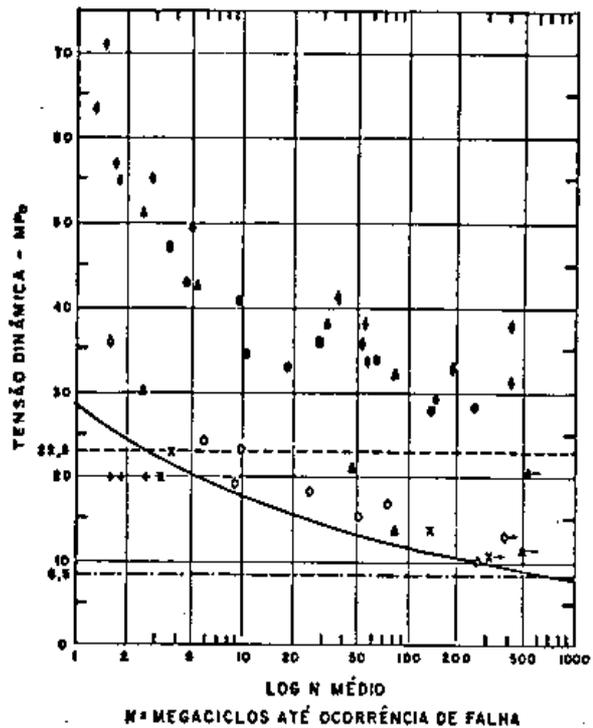
2.4 Limite de Segurança do EPRI

Para valores de N muito altos, S tende assintoticamente a um valor de tensão dinâmica chamado "limite de resistência à fadiga", que garante uma vida útil muito extensa para os cabos. Resultados de ensaios compilados pelo EPRI [3], mostrados na Figura 2, sugerem para os cabos CAA os limites de resistência mostrados na Tabela 2. Para cabos com mais de uma camada de fios de alumínio, como o Linnet, o limite de resistência à fadiga é de 8,5 MPa.

A partir destes limites é possível estabelecer amplitudes máximas admissíveis de vibração, para cada cabo, a partir das fórmulas demonstradas no Anexo A.

TABELA 2 - LIMITES DE RESISTÊNCIA À FADIGA DO EPRI

Nº de camadas de fios de alumínio do cabo	Limite de resistência (MPa)
1	22,5
>1	8,5



RESULTADOS DE ENSAIOS (REF. 5)	LIMITES DE SEGURANÇA
CONDUTOR (AWG/MCM)	1) CONFORME CIGRE
4 (8/1)	2) CONFORME EPRI
4 (7/1)	CONDUTOR DE 1 CAMADA
1/0 (6/1)	CONDUTOR DE MAIS DE 1 CAMADA
3/0 (6/1)	
387,6 (30/7)	
387,6 (30/7)	
799 (45/7)	
799 (45/7)	
934 (45/7)	

FIGURA 2 - RESULTADOS ENSAIOS COMPILADOS PELO EPRI

3- LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE FADIGA PARA O CABO LINNET

3.1 Por motivos de ordem prática e econômica, tendo em vista a longa duração e o alto custo dos ensaios, as seguintes limitações foram consideradas no levantamento das curvas de fadiga:

- as curvas foram levantadas apenas para o cabo LINNET, tendo em vista sua importância e representatividade perante o sistema CEMIG, e o fato de ser um dos cabos que mais apresentam problemas de vibração e fadiga [5,6];
- foram levantados nove pontos da curva de fadiga. Estes pontos ficam na parte da curva onde maiores tensões dinâmicas causam a ruptura mais rápida dos fios que compõem o cabo;

c) cada ponto da curva foi obtido a partir de ensaios em uma amostra.

3.2 Foram seguidas as recomendações da Ref. [7], de forma que os resultados pudessem ser comparados aos de ensaios semelhantes, realizados no Brasil e no exterior. A montagem do ensaio é mostrada na Fig. 3, e seus detalhes constam do Relatório de Ensaios do CEPTEL [8].

3.3 Os cabos foram instalados em grampos de acordo com o padrão 02.118 - CEMIG - 0058, Ref. [9].

4 - RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Os parâmetros de ensaio, bem como o número de ciclos até a ruptura do 3º fio, registrados para cada amostra, constam da Tabela 3.

TABELA 3 – RESULTADO DE ENSAIOS

amostra	Ampl. (mm)	Amp nó mm	Frequ. (Hz)	Tensão dinâmica (MPa)	Nciclos x10 ⁶
1	1,00	15,0	41,0	30,33	2,89
2	0,96	14,0	40,0	29,12	4,43
3	-	14,5	42,0	-	2,37
4	0,60	10,0	43,0	18,20	*
5	1,20	17,0	43,0	36,41	1,24
6	1,04	13,0	43,0	31,55	3,29
7	0,90	12,0	42,5	27,30	5,93
8	0,76	11,0	42,5	23,06	18,81
9	0,80	12,0	41,0	24,27	7,20
10	1,14	16,0	42,5	34,59	1,33

Nota:

Ampl. = amplitude a 89 mm do grampo (mm, pico a pico)

Amplnó = amplitude no antinó (mm, pico a pico)

Nciclos = N°. de ciclos até a ruptura do 3º fio

*Ensaio interrompido após 24x10⁶ ciclos, sem ruptura de nenhum fio da amostra.

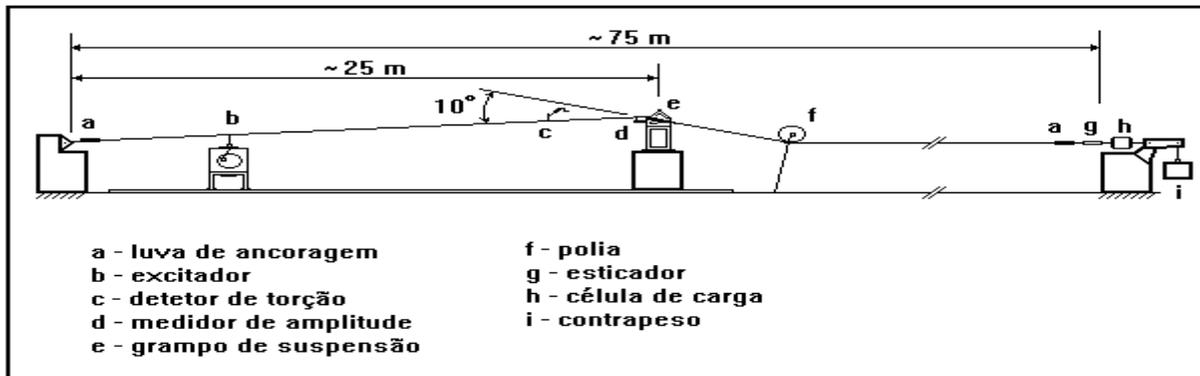


FIGURA 3- MONTAGEM PARA ENSAIO DE FADIGA

4.2 Através de análise de regressão, foi determinada a equação que melhor representa os resultados obtidos nos ensaios. Seu gráfico é mostrado na Fig. 4, que também inclui uma comparação com a curva limite de segurança “Safe Border Line” da CIGRE.

Nota-se claramente uma defasagem entre a curva levantada pelos ensaios e a “Safe Border Line” proposta pelo CIGRÉ, embora as curvas sejam muito semelhantes. A defasagem entre as curvas representa o fator de segurança considerado pelo CIGRÉ.

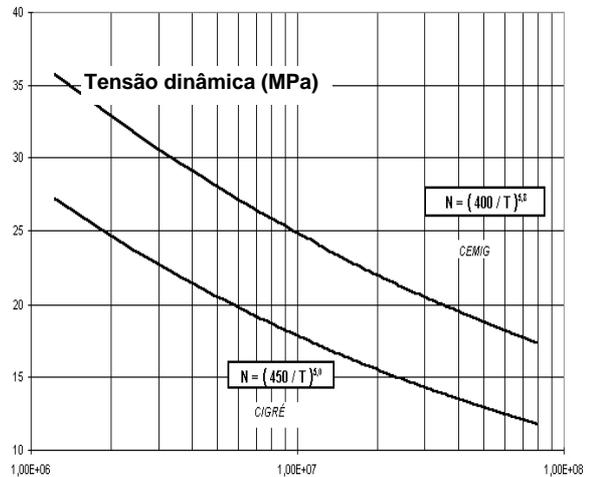


FIGURA 4 - CURVA DE FADIGA OBTIDA NO ENSAIO COMPARADA COM A “SAFE BORDER LINE” DA CIGRÉ

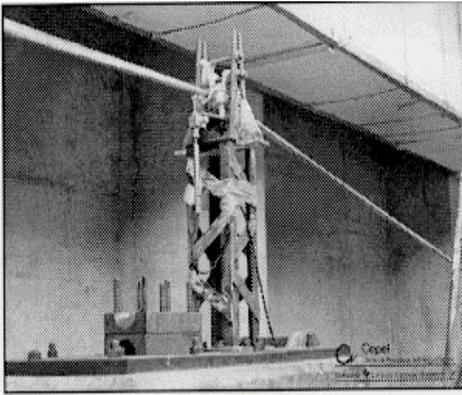


FIGURA 5 – DETALHE DO GRAMPEAMENTO DO CABO CONDUTOR NO VÃO DE ENSAIOS

5 - INFLUÊNCIA DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS ESTIMATIVAS DE VIDA ÚTIL

5.1 Da Tabela 4 constam valores de vida útil calculados a partir de dados de vibração obtidos em algumas linhas da CEMIG, em várias épocas, com vários tipos de vibrógrafos. Nesses cálculos utilizou-se o “Safe Border Line” da CIGRÉ. São também apresentados na tabela 4, os valores recalculados com base na curva de fadiga obtida para o cabo LINNET nos ensaios realizados no CEPTEL, a título de comparação.

5.2 Outra comparação que é sempre feita ao se analisar dados de vibração é das amplitudes máximas com o limite de fadiga considerado pelo EPRI (seção 2.4). Este limite é ainda mais conservativo que o “Safe Border Line” da CIGRÉ, pois como pode ser visto, prolongando a curva “CEMIG” na Figura 4, à tensão de 8,5 MPa, considerada limite para o cabo Linnet, corresponderia uma vida extremamente longa.

5.3 Apesar das grandes diferenças registradas na Tabela 4, os cálculos realizados com os novos parâmetros em pouco alterariam as decisões tomadas quanto à necessidade de se protegerem, ou não, as linhas com cabo LINNET. Isto se deve a que as estimativas de vida normalmente levam a valores muito menores (<1 ano) ou maiores (>100 anos) que o limite mínimo de 30 anos, considerado satisfatório. Mesmo nos casos em que isto não ocorre (LT Araxá - Fosfertil), a realização de medições em vários vãos permite estabelecer um padrão que subsidia uma decisão melhor fundamentada.

5.4 Deve-se levar em consideração que a “Safe Border Line” do CIGRÉ é muito conservativa quando se tem uma tensão dinâmica muito alta, casos que requerem uma proteção antivibratória dos condutores.

Entretanto, em situações de tensões dinâmicas menores, esse excesso de segurança pode levar a avaliações errôneas na extensão de vida útil dos condutores em casos de recapacitação e renovação de Linhas de Transmissão.

TABELA 4 - COMPARAÇÃO DE CÁLCULOS DE ESTIMATIVA DE VIDA

Linha de Transmissão	Vão	Tipo de amortecedor utilizado	Vida Estimada CIGRÉ (anos)	Vida Estimada CEMIG (anos)
Três Marias / Corinto	33 a 34	Helicoidal	> 100	> 100
Três Marias / Corinto	33 a 34	nenhum	0,9	6,6
Araxá / Fosfertil	52 a 53	nenhum	0,5	2,2
Araxá / Fosfertil	46 a 47	nenhum	2,6	14,3
Araxá / Fosfertil	67 a 68	nenhum	6,4	34,5
Mirabela / Januária	167 a 168	nenhum	<1	<1
Mirabela / Januária	99 a 100	nenhum	3	19
Mirabela / Januária	79 a 80	nenhum	<1	<1
Mirabela / Januária	43 a 44	nenhum	8	54
Mirabela / Januária	16 a 17	nenhum	<1	4

CIGRÉ: Usando o “Safe Border Line” da CIGRÉ

CEMIG: Usando a curva obtida a partir dos dados de ensaios

Todas as linhas são de 138 kV com cabo LINNET

6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 A curva de fadiga levantada em ensaios realizados no CEPTEL para o cabo LINNET 170mm² comprovou que a curva “Safe Border Line”, recomendada pela CIGRÉ e utilizada pela CEMIG leva a estimativas de vida conservativas. Comprovou também que as decisões quanto à necessidade, ou não, de se protegerem linhas com amortecedores são em sua grande maioria corretas. No caso pouco provável de uma decisão equivocada, esta teria sido no sentido de uma maior segurança.

6.2 É recomendável que os ensaios, que foram realizados com cabos novos, sejam repetidos com cabos usados, de forma a se fazer uma estimativa das condições de serviço dos cabos reutilizados em recapacitações.

6.3 Ensaios de fadiga em cabos condutores aquecidos (cerca de 100°C) estão sendo realizados no CEPEL por solicitação da CEMIG, de forma a se avaliar a influência da temperatura de operação da linha de transmissão na vida útil do cabo sujeito a vibrações eólicas. A análise da influência da temperatura do condutor em conjunto com sua tensão dinâmica fornecerá parâmetros mais precisos para os trabalhos de recapacitação e extensão de vida útil de condutores nas LTs da CEMIG.

ANEXO A :

A relação entre os esforços dinâmicos e a amplitude de vibração, que é medida pelos vibrógrafos nas proximidades do grampo, é dada por:

$$S = K \cdot ya$$

Onde:

S: tensão dinâmica (MPa)

ya: amplitude de vibração, pico a pico (mm).

O valor de K (N/mm³) é determinado a partir das características do cabo e da tensão de esticamento (EDS), de acordo com [1,2].

$$K = \frac{d \cdot Ea \cdot p^2}{4 \cdot (e^{-p \cdot x} - 1 + px)}$$

Onde:

d: diâmetro dos fios da camada mais externa do cabo (mm).

Ea: módulo de elasticidade do material da camada mais externa do cabo (MPa).

x: distância entre o sensor do medidor de vibração e o grampo (normalmente 89mm)

$$p = \sqrt{\frac{H}{EI}}$$

onde H: componente horizontal da

tensão no condutor (N)
EI: módulo de rigidez (Nmm²)
que, no caso de cabos CAA é dado por:

$$EI = ns \cdot Es \frac{p \cdot ds^4}{64} + na \cdot Ea \frac{p \cdot da^4}{64} \quad \text{onde:}$$

Ea, Es; módulos de elasticidade do alumínio e do aço (MPa).

na, ns: número de fios de alumínio e de aço.
da, ds: diâmetro dos fios de alumínio e de aço (mm).

Para um cabo Linnet, esticado com 18,5% da tensão de ruptura:

ns= 7; na=26; ds=2,245 mm; da=2,888 mm;
H=18,5% x 62.426 N = 11.549 N;
Es = 206.800 N/mm²; Ea = 68.950 Nmm²; ⇨
EI=7,93x10³ Nmm²; p=0,038 mm⁻¹
x= 89mm ⇨ K =29,8 N/mm³

$$S = 29,8 \cdot ya$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] 30.000 - TN/NT- 0140 - Vibração eólica em condutores aéreos - Princípios básicos.
- [2] Recommendations for the evaluation of the lifetime of transmission line conductors. CIGRE WG 22 - 02. ELECTRA 63. Março 1979
- [3] Transmission line reference book. Wind induced conductor motion - EPRI Research project 792 - 1979 (livro)
- [4] "Guide to Vibration Measurements on Overhead Lines". TF 2 WG 11 SC 22 CIGRÉ - ELECTRA nº 162 - October 1995
- [5] 30.000 - ST/NT2 - 012 Medições de vibração realizadas em linhas de transmissão da CEMIG
- [6] 30.000 - ST/DN3 - 0004 Mapeamento de ocorrências de vibração eólica em linhas de transmissão.
- [7] Guide for endurance tests of conductors inside clamps. CIGRE WG 22-04. ELECTRA nº 100
- [8] Relatório Técnico Num 133/97 Avaliação de fadiga em cabo condutor de alumínio com alma de aço, código Linnet. CEPEL - Fev/97.
- [9] 02.118 - CEMIG - 0059 Grampo de suspensão para cabos CAA até 230 kV.