



XXXIII JORNADAS SUDAMERICANAS
DE INGENIERIA ESTRUCTURAL
Santiago, 26 al 30 de Mayo de 2008



www.asaae.org.br

ESTUDO COMPARATIVO DAS METODOLOGIAS DO CIGRÉ E EPRI PARA DETERMINAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE CABOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

COMPARATIVE STUDY OF CIGRÉ AND EPRI METHODOLOGIES FOR DETERMINATION OF LIFETIME EXPECTANCY OF TRANSMISSION LINE CONDUCTORS

Adriana Lima Rolim (1); Luís Augusto Conte Mendes Veloso (2); Remo Magalhães de Souza (2); José Alexander Araújo (3)

(1) Mestranda, UFPA – Universidade Federal do Pará

(2) Professor Doutor, Faculdade de Engenharia Civil UFPA

(3) Professor Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica UnB

Campus Universitário do Guamá, Rua Augusto Côrrea, 01 CEP 66075-110 - Caixa postal 479
PABX +55 91 3201-7000 - Belém - Pará - Brasil

Resumo

Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo entre as duas metodologias mais empregadas para determinação da expectativa de vida útil de cabos de linha de transmissão, a do IEEE - Cigré e a do EPRI. Esse estudo foi realizado a partir de dados coletados na linha Vila do Conde – Guamá 500 kVA na travessia do Rio Guamá, Pará – Brasil. A medição dos níveis de vibração dos condutores foi realizada por meio de um vibrógrafo instalado no condutor. Na abordagem do Cigré as amplitudes de flexão são convertidas em tensão dinâmica na vizinhança do grampo pela equação de Poffenberger-Swart e a estimativa de vida útil é obtida considerando-se a teoria de dano cumulativo, Teoria de Miner. Por sua vez, na metodologia do EPRI níveis de vibração abaixo do determinado limite implicam numa vida útil infinita do condutor. De acordo com as análises realizadas verificou-se que o condutor apresenta risco de ruptura por fadiga.

Palavra-chave: Vibração Eólica, Linha de Transmissão, Fadiga, Expectativa de Vida Útil.

Abstract

In this work a comparative study was developed between the two more employed methodologies for determination of the life expectancy of transmission line conductors, the IEEE - Cigré and the EPRI methodologies. This study was carried through from data collected in the Vila do Conde - Guamá transmission line 500 kVA over the crossing of Guamá River, Pará - Brazil. The measurement of the levels of vibration of the conductors was made by means of a vibration recorder installed on the conductor. According to the Cigré methodology the bending amplitude in converted into dynamic stress at the vicinity of the clamp by the Poffenberger-Swart equation and the lifetime expectancy is obtained considering the theory of cumulative damage, Theory of Miner. On the other hand, in the EPRI methodology levels of vibration below the determined limit imply in infinite conductor lifetime. According to analyses carried out, it was verified that the conductor presents risk of rupture for fatigue.

Keywords: Aeolian Vibration, Transmission Line, Fatigue, Lifetime Expectancy.

1 INTRODUÇÃO

Vibrações eólicas são causadas pela formação de vértices em torno de um corpo exposto a um fluido laminar ou turbulento. No caso de cabos de linhas de transmissão, as vibrações eólicas são consideradas um dos principais fatores responsáveis pela fadiga do cabo condutor, podendo levar a possível ruptura do mesmo, ou causar danos em outros componentes da linha, como amortecedores, armaduras e sinalizadores.

Segundo RAWLINS [1], usualmente a presença deste tipo de dano ocorre em regiões onde o comportamento dinâmico é restringido, tais como proximidades do grampo de suspensão, espaçadores e amortecedores. Os efeitos da fadiga são causados por tensões dinâmicas de flexão alternada dos condutores.

Estudos sobre análise de vida útil de cabos condutores têm sido realizados desde 1965, quando o IEEE Task Force on The Standardization of Conductor Vibration Measurements [2] padronizou o método da amplitude a flexão, que seria definido pelo deslocamento diferencial relativo ao grampo de suspensão, no ponto a 89 mm do último de contato do cabo com o grampo.

POFFENBERGER & SWART [3] formularam um campo de deflexão dinâmica do condutor na vizinhança do grampo e assim, forneceram relações para converter a amplitude de flexão em tensões de flexão na superfície dos fios da camada mais externa do condutor.

Neste trabalho buscou-se comparar duas metodologias para estimativa de vida útil de cabos condutores, ambas utilizam a equação de Poffenberger, sendo a primeira a ser estudada a do CIGRÉ [4], por conseguinte a dos limites do EPRI [5].

Para realização das comparações foram utilizados dados coletados em campo na Linha de Transmissão Vila do Conde – Guamá, na travessia do Rio Guamá, Belém, Pará, Brasil. Os dados de frequência e amplitude do condutor Grosbeak 636 desta linha foram obtidos com a utilização de vibrógrafo modelo PAVICA®.

2 METODOLOGIA DO CIGRÉ

Esta metodologia proposta pelo Comitê de Estudos de Linhas Aéreas CIGRÉ [4], é baseada na teoria de dano acumulado de MINER [6], segundo a qual o dano dos materiais do cabo condutor é cumulativo, sendo uma função linear independente da ordem que as tensões dinâmicas são aplicadas. Na equação 1 o parâmetro D representa o dano, e a relação de n_i e N_i , respectivamente o número de ciclos medidos em campo e obtidos pela curva de segurança do Cigré.

$$\sum D_i = \frac{n_i}{N_i} = \sigma_m \quad (1)$$

De acordo com a equação, o dano parcial é acumulado linearmente, numa proporção igual à relação entre o número de ciclos coletados em campo e o número de ciclos que levariam a falha do cabo para o mesmo nível de tensão. Logo o dano total é a representação da soma de todos os danos parciais.

Esta metodologia utiliza a curva de segurança do CIGRÉ [4], baseada em valores de limites de resistência à fadiga. Essas curvas são obtidas em laboratório, sendo conhecidas como curvas de Wöhler, ou curvas de fadiga. A curva de fadiga apresenta no eixo das ordenadas valores de resistência à fadiga, e no eixo das abscissas, o número de ciclos necessários para a ruptura de 10% dos fios do cabo, ou de 3 fios, prevalecendo o menor valor. A figura 1 mostra curvas de fadiga obtidas por diversos ensaios realizados em vários países, compilados pelo CIGRÉ [4].

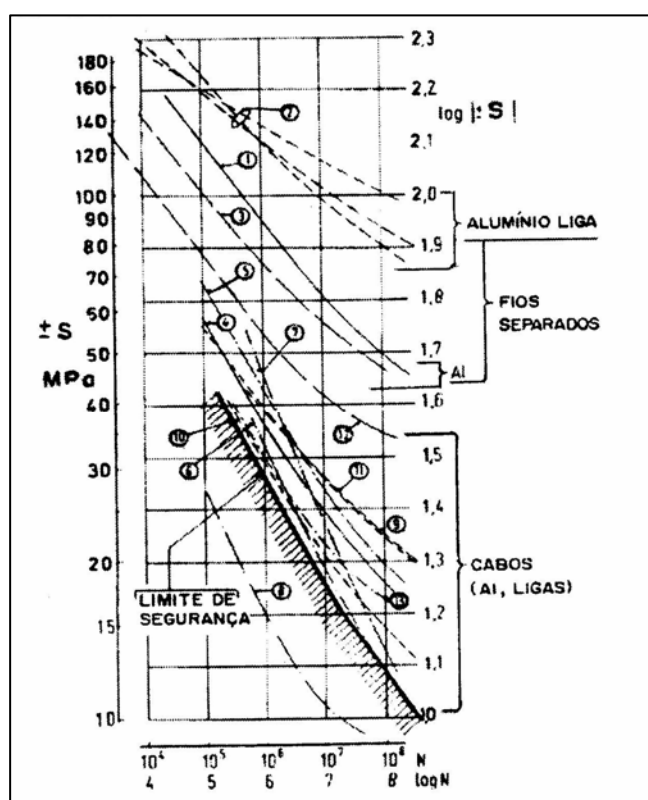


Figura 1 – Curva S-N do CIGRÉ.

A metodologia proposta pelo CIGRÉ [4] pode ser utilizada em condutores de alumínio, alumínio liga (CA) e do alumínio com alma de aço (ACSR). No caso deste estudo, todas as análises foram feitas para o condutor Grosbeak 636 com alma de aço.

A curva limite de segurança do CIGRÉ é representada pela equação 2.

$$\sigma_a = AN^b \quad (2)$$

Na expressão 2, σ_a é a tensão dinâmica em MPa e N representa a vida útil do cabo em número de ciclos. Os valores das constantes A e b são obtidos a partir da tabela 1, de acordo com o número de camadas de fios de alumínio.

TABELA 1 – Valores das constantes da curva de fadiga do CIGRÉ

N.º de Camadas de Fios de Alumínio do Cabo Conductor	N < 2.10 ⁷		N > 2.10 ⁷	
	A	b	A	b
1	730	-0,2	430	-0,168
>1	450	-0,2	263	-0,168

A figura 2 mostra a curva de fadiga obtida a partir da equação 2 para o cabo Grosbeak.

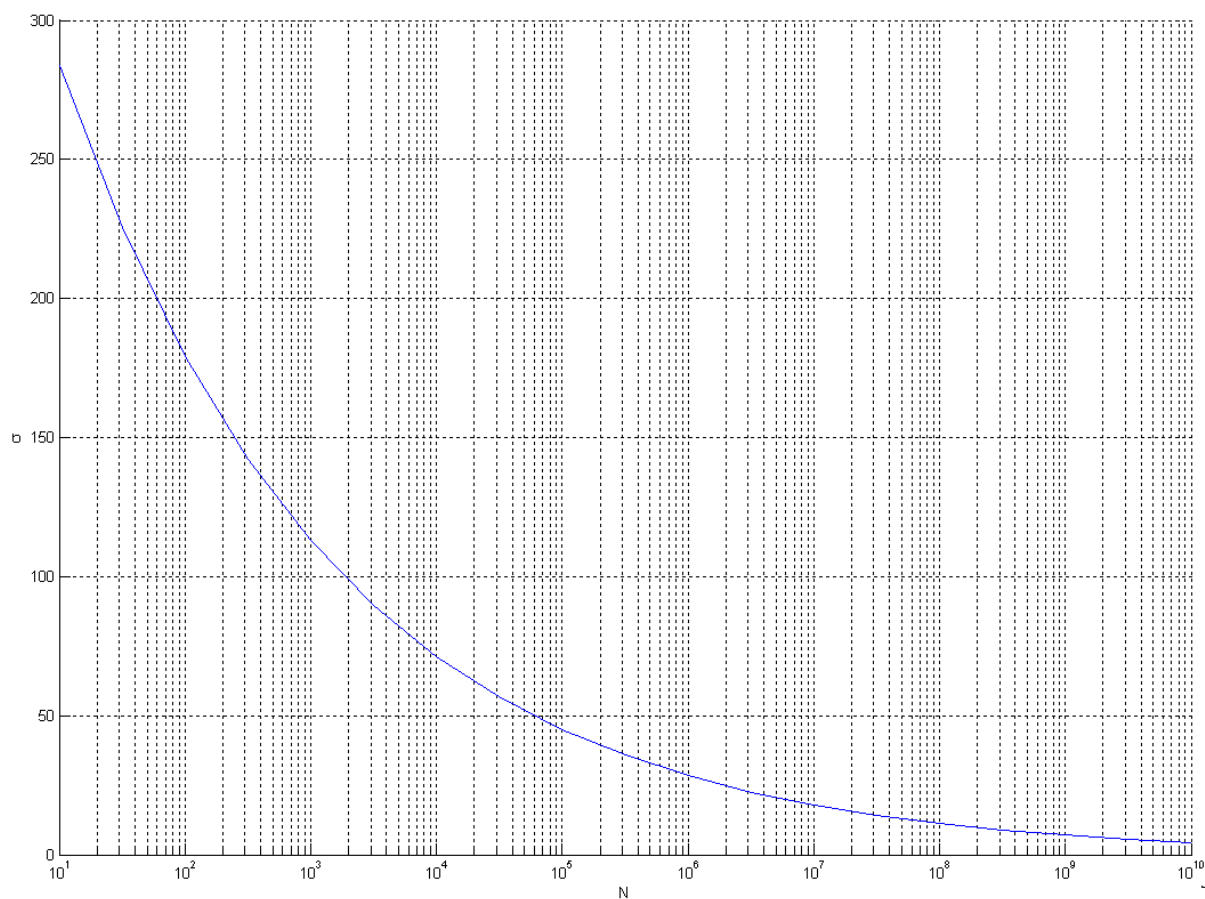


Figura 2 – Curva de fadiga segundo equação do CIGRÉ para o cabo Grosbeak

3 METODOLOGIA DO EPRI

A metodologia proposta pelo EPRI [5] considera que se o valor de número de ciclos até a ruptura for elevado, o valor de tensão dinâmica irá tender ao chamado “limite de resistência à fadiga” garantindo, dessa forma, uma vida extensa ao cabo. A tabela 2 descreve quais seriam os limites de resistência de acordo com o número de camadas de fios de alumínio do cabo.

TABELA 2 – Limites de resistência à fadiga do EPRI.

N.º de Camadas de Fios de Alumínio do Cabo Condutor	Limite de Resistência (MPa)
1	22,5
>1	8,5

Os valores descritos na tabela 2 permitem a obtenção dos valores admissíveis de amplitude, utilizando a equação de Poffenberger-Swart, equação 3, que relaciona os níveis de amplitude de flexão, Y_{bi} com tensões dinâmicas na superfície do cabo.

$$\sigma_{fi} = QY_{bi} \quad (3)$$

$$Q = \frac{(q^2 E_e d_e)}{4(qa - 1 + e^{-qa})} \quad (3.1)$$

$$q = \left(\frac{T}{EIP} \right)^{1/2} \quad (3.2)$$

Sendo:

E_e - módulo de elasticidade do material da superfície;

EIP - valor de rigidez à flexão mínimo;

d_e - diâmetro do fio da camada mais externa do cabo;

T - tração do condutor.

a - distância do último ponto de contato do grampo de suspensão até o sensor do aparelho vibrógrafo.

Neste estudo o cabo é um Grosbeak, cabo de alumínio com alma de aço (ACSR). Por padronização do IEEE [2] o valor da distância a deve ser de 89 mm.

4 LEVANTAMENTO DE DADOS EXPERIMENTAIS

As medições de campo foram realizadas com a utilização do vibrógrafo PAVICA® foi instalado em todas as medições de campo realizadas neste estudo, no trecho sobre o Rio Guamá, em Belém do Pará, no condutor modelo Grosbeak 636 do vão da LT-230 kV Vila do Conde - Guamá, que inclui as torres de linha de transmissão 102 e 103, e apresenta extensão de 678 m. A torre 102 situa-se no meio do Rio Guamá com altura de 79.65 m e a 103 na margem direita com altura de 73.65 m,



Figura 3 – Linha de transmissão Vila do Conde - Guamá

Este trecho foi escolhido, pois apresentava características favoráveis à medição. A travessia do rio é, naturalmente, livre de obstáculos. Além disso, o rio guia o fluxo do vento submetendo os cabos condutores a ventos predominantemente perpendiculares. A margem onde se situa a torre 103 é uma área plana, sem árvores de altura elevada ou outros obstáculos.

Caracteriza-se, portanto, uma região de grande exposição aos ventos, e como conseqüência os condutores deste vão estão mais sujeitos a vibração eólica.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Resultados obtidos pela metodologia do CIGRÈ

O vibrógrafo registrou valores de amplitude de flexão, estes foram convertidos em valores de tensão dinâmica na superfície do cabo utilizando a equação de 3.

Isolando-se o parâmetro N da equação 2 e utilizando a tabela 1 foi possível obter valores de números de ciclos correspondentes às tensões na superfície do cabo, utilizando o procedimento da equação 4.

$$N_d := \begin{cases} N_d \leftarrow \left(\frac{\sigma}{450}\right)^{-5} & \text{if } N_d \leq 2 \cdot 10^7 \\ N_d \leftarrow \left(\frac{\sigma}{263}\right)^{-6} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

Os valores de contagem de número de ciclos coletados pelo PAVICA no período de 39 dias foram extrapolados para o equivalente ao período de 1 ano. Em seguida, foi calculado o dano parcial pela relação mostrada na equação 1, e finalmente o dano total sendo o somatório dos danos parciais, como expresso na equação 5.

$$D_{Tc} := \sum_{i=1}^p D_{r_i} \quad (5)$$

O valor da expectativa de vida em anos foi obtido pela relação descrita na equação 6.

$$Y_{rs} := \frac{1}{D_{Tc}} \quad (6)$$

Também foi calculado o índice de vida útil utilizando a equação 7.

$$I_{cur} := \log(\bar{Y}_{rs}) \quad (7)$$

Os resultados são mostrados na tabela 3.

TABELA 3 – Resultados obtidos pela metodologia do CIGRÉ

\bar{Y}_{rs} Vida Útil (anos)	7.596×10^{-4}
Índice de Expectativa de Vida	-3.119

5.2 Resultados obtidos pela metodologia do EPRI

O valor limite de resistência a fadiga proposto pelo EPRI [5] é resultado da compilação de diversos ensaios. Para cabos de multicamadas ACSR este valor foi estimado em 22 MPa.

Inicialmente este valor foi convertido para valores de amplitude através da equação de Poffenberger-Swart, equação 3. Assim, foi possível estabelecer o valor de amplitude admissível para este cabo, definido no gráfico da figura 3 como os pontos em azul. A curva em vermelho expressa os valores de amplitude coletados pelo vibrógrafo. Em uma análise qualitativa observa-se que mais de 80% dos valores de amplitude encontram-se acima do valor admissível.

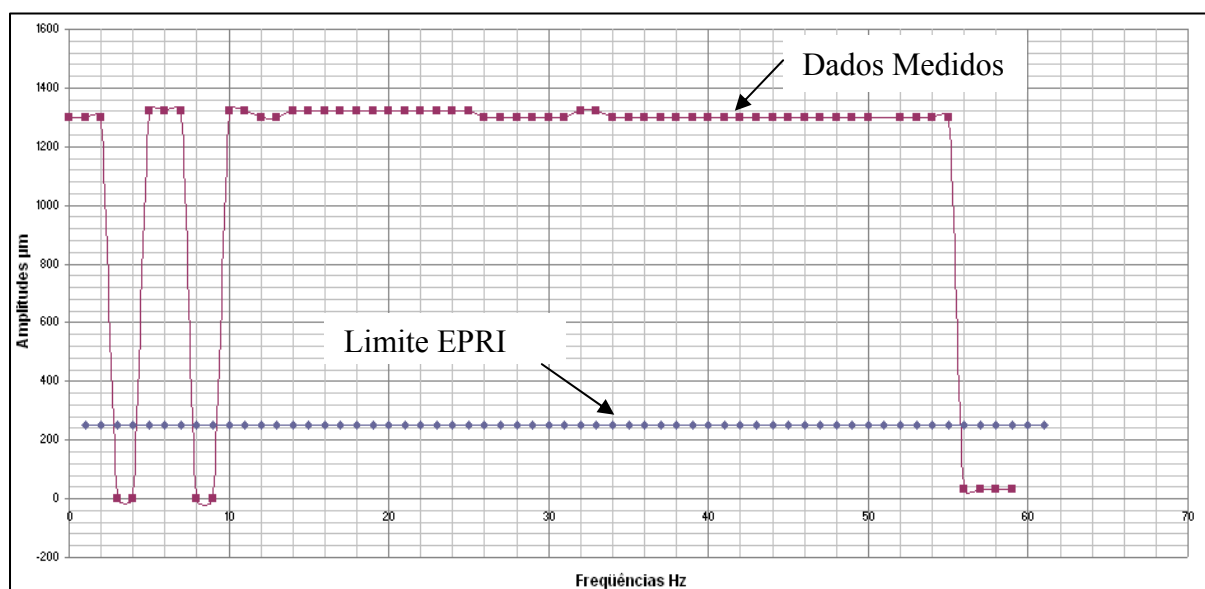


Figura 3 – Comparação das amplitudes coletadas em campo com o valor limite do EPRI

5.3 Resultados obtidos pela metodologia do PAVICA

O vibrógrafo PAVICA foi responsável pelas coletas de níveis de amplitude, podendo disponibilizar automaticamente os valores de vida útil e índice de vida utilizando o software PAVICOM que acompanha o equipamento. Todavia, no caso de cabos que possuem armadura pré-formada na região do grampo este resultado não é obtido automaticamente pelo equipamento. No seu manual [7] é descrita a metodologia de cálculo, baseada no método do CIGRÈ, de forma a considerar o acréscimo de rigidez da armadura pré-formada, apesar de referências como EPRI [5], que consideram pequena a efetividade da armadura como reforço de condutores, exceto quando aplicada em condutores pequenos.

O procedimento de cálculo é descrito inicialmente pelo algoritmo mostrado na expressão 8, escrito no formato do software MATHCAD®.

$$D_f := \begin{cases} \text{for } i \in 1..length(\sigma_f) \\ \quad \begin{cases} \text{if } \sigma_{f_i} \leq 15.6 \\ \quad \begin{cases} k \leftarrow 257 \\ a \leftarrow 6 \end{cases} \\ \text{otherwise} \\ \quad \begin{cases} k \leftarrow 450 \\ a \leftarrow 5 \end{cases} \\ \quad D_{f_i} \leftarrow \left(\frac{\sigma_{f_i}}{k} \right)^a \end{cases} \\ D_f \end{cases} \quad (8)$$

Em seguida, utiliza-se a equação 9, onde n_c é o número de ciclos coletados e D_t o dano parcial.

$$D_{t_i} := D_{f_i} \cdot n_{c_i} \quad (9)$$

O dano total é calculado pelo somatório dos danos parciais, equação 10.

$$D_T := \sum_{i=1}^n D_{t_i} \quad (10)$$

Após obter o valor de dano total, calcula-se o dano atual pela equação 11, onde t_{tot} é o intervalo de tempo em segundos dos registros efetuados pelo vibrógrafo e t_{meas} o tempo de duração da medição em segundos.

$$D_c := \frac{t_{tot}}{t_{meas}} D_T \quad (11)$$

O valor de vida do condutor em anos é dado pela equação 12, onde N_s representa o número de amostras coletadas pelo equipamento durante a medição.

$$V_{cur} := 3.17 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{t_{tot}}{D_c} \cdot N_s \quad (12)$$

Finalmente, o índice de expectativa de vida é dado pela equação 13.

$$I_{cur} := \log(V_{cur}) \quad (13)$$

Os resultados são apresentados na tabela 5.

TABELA 5 – Resultados obtidos pela metodologia do PAVICA

Y_{rs} Vida Útil (anos)	7.489×10^{-4}
Índice de Expectativa de Vida	-3.126

6 CONCLUSÕES

De acordo com as análises realizadas, verificou-se que os valores de expectativa de vida e índice de expectativa de vida obtida pela metodologia do CIGRÉ e a recomendada no manual do PAVICA são muito próximos entre si, e indicam valores extremamente baixos de vida útil, tabelas 4 e 5.

A metodologia do EPRI também indica que cerca de 80% dos valores estão acima do limite recomendado, indicando uma alta probabilidade da ocorrência de dano por fadiga.

Deve-se entretanto considerar que tanto a curva do CIGRÉ como o método proposto pelo EPRI são conservativos. Portanto, para se obter uma análise mais realista do problema é necessária a obtenção da curva de fadiga do cabo por meio de ensaios em laboratório.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ELETRONORTE e ao CNPQ (projeto intitulado “Resistência em Fadiga e Utilização da Fórmula de Poffenberger-Swart para Sistemas Cabo Condutor/Grampo de Suspensão” e bolsa de desenvolvimento tecnológico processo institucional nº. 551632/2005-4) pelo apoio às pesquisas realizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RAWLINS, C.B., “*Some Effects of Mill Practice on the Stress Behavior of ACSR*”, IEEE Transactions on Power Delivery, PE-325-PWRD-0-12-1997.
- [2] IEEE Committee Report. Standardization of Conductor Vibration Measurements, IEEE PAS-85, 1966, vol. 85, n. 1, pp 10-22, 1966.
- [3] POFFENBERGER, J. C. & Swart R. L. 1965. *Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain*, IEEE Trans. Paper, Vol. PAS – 84, pp. 281 – 289.
- [4] CIGRÉ WG 04 SC 22 – 02, *Recommendations for the Evaluation of the Lifetime of Transmission Line Conductors*, Electra n. 63, 1979.
- [5] ELECTRICAL POWER RESEARCH INSTITUTE, “*Wind Induced Conductor Motion*”, EPRI Transmission Line Reference Book, Palo Alto, CA, 1979.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado”. NBR6118, Rio de Janeiro, 2005.
- [6] MINER M. A. Cumulative Damage in Fatigue, Proc. ASME, *Journal of Applied Mechanics*, 1945, p. 159.
- [7] ROCTEST, 2003. PAVICA Instruction Manual, ROCTEST/TELEMAC.