

Análise Numérica e Experimental para Determinar a Vida Útil de Cabos Condutores de Linhas de Transmissão

R. Lavandoscki, CTEEP, J. G. Damilano e H. S. Teixeira Jr, CEMEF.

Resumo – Este trabalho apresenta os resultados de estudos sobre o comportamento estrutural de cabos de linhas de transmissão, sujeitos a carregamentos eólicos. São determinados deslocamentos, tensões, modos, frequências naturais de vibração e respostas dinâmicas com o objetivo de se estimar parâmetros relacionados à vida útil desses cabos. Foram realizadas análises não-lineares, análise modal, análise dinâmica de resposta e análise estática linear. As tensões calculadas para os cabos são, então, utilizadas para se estimar o parâmetro de vida útil dos mesmos.

Palavras-chave – Análise numérica, cabos condutores, experimental, linhas de transmissão, vida útil.

I. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta os resultados de estudos sobre o comportamento estrutural dinâmico e determinação de parâmetros de vida útil, para cabos condutores de linhas de transmissão. Foi utilizado o método dos elementos finitos na elaboração de modelos dos cabos. Com tais modelos foi possível determinar as frequências naturais e modos de vibração dos cabos. Uma análise de resposta dinâmica determinou níveis de tensões aos quais os cabos estão submetidos e, com tais resultados, foi possível se estimar parâmetros de vida útil para o cabo analisado. Os resultados das análises numéricas foram, quando possível, comparados a valores experimentais obtidos com o Medidor e Analisador PAVICA [1]. Para cabos com armadura de proteção, para os quais o analisador acima citado não faz estimativa de vida útil, desenvolveu-se um procedimento de análise, baseado nas formulações apresentadas em [1], [2], [3] e [4], para se estimar a vida útil desses cabos.

II. OS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

A. O Modelo de Vigas

Para o primeiro modelo foi considerado o cabo Hawk, com armadura, já existente em campo. Primeiramente foram considerados os efeitos de peso próprio do cabo e a carga tracionante existente, determinando-se o deslocamento vertical e comparando-se com valores existentes (análise não-linear). O comprimento do cabo considerado (vão) foi de 220 m, e a pré-carga considerada foi de 17.338 N (20% da carga de ruptura). O sistema de eixos considerado tem x na direção longitudinal do cabo, y na vertical, e z na direção transversal. As propriedades mecânicas do cabo e de sua armadura são: Cabo Hawk: EX = 3.74 GPa, NUXY = 0.3, GXY = 1.43846 GPa, $\rho = 3.587794 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, área da seção transversal $A = 3.720690 \times 10^{-4}$, momentos de inércia $I_y = 1.102560 \times 10^{-8}$, $I_z = 1.102560 \times 10^{-8}$, constante torsional $J = 2.203270 \times 10^{-8}$,

fator de cisalhamento no eixo y igual a 8.865240×10^{-1} e no eixo z igual 8.865340×10^{-1} .

Cabo Hawk com armadura: EX = 52.4 GPa, NUXY = 0.3, GXY = 20.154 GPa, $\rho = 2.622868 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, área da seção transversal $A = 1.083630 \times 10^{-3}$, momentos de inércia $I_y = 9.352280 \times 10^{-8}$, $I_z = 9.352280 \times 10^{-8}$, constante torsional $J = 1.868880 \times 10^{-7}$, fator de cisalhamento nos eixos y igual a 8.865250×10^{-1} e no eixo z igual a 8.865310×10^{-1} . Com estes dados foi elaborado um modelo de vigas para o qual uma das extremidades dos cabos foi engastada, e a outra restrita em 5 direções (translações u_y e u_z e rotações r_x , r_y e r_z). Na análise não linear efetuada, foi considerado o peso e a pré-tensão. A análise modal considerou as condições existentes (obtidas na análise não-linear), e foram obtidos os modos e frequências naturais de vibração. Para a análise de resposta dinâmica foi aplicada uma excitação harmônica na extremidade no nó 221, simulando-se condição de teste existente, que representaria uma excitação eólica típica, com amplitude de deslocamento vertical de 21.77 mm, com varredura de 0 a 10000 Hz. Considerou-se um amortecimento modal de 1%, aplicado em todos os modos calculados na análise de resposta. Os nós com requisição de resultados (acelerações e deslocamentos) foram 1 (extremidade engastada), 11 (distante de 2.187 m do início do cabo), 111 (meio do vão) e 221 (extremidade subsequente).

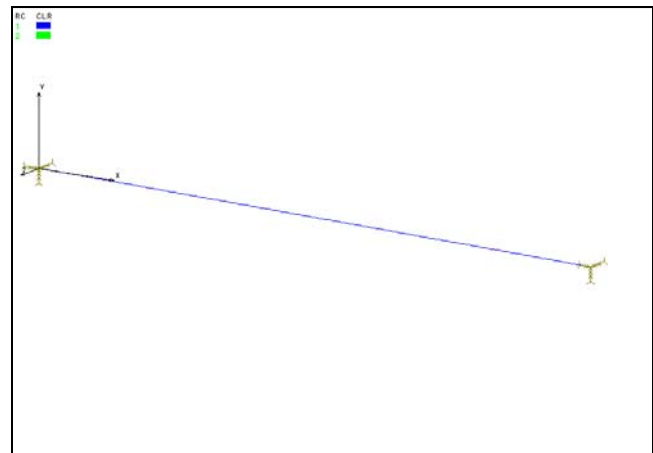


Figura 1. Modelo de vigas e condições de contorno.

B. O Modelo Sólido

No modelo representado por elemento sólidos, uma das extremidades dos cabos foi engastada, e foi considerado o comprimento equivalente à distância entre os nós 1 e 11 do modelo de vigas (2.187 m). Então, foram impostos os deslocamentos obtidos (somatória do resultado da análise não-linear e do pico da análise dinâmica de resposta), para se determinar a distribuição de tensões no cabo. Os modelos de elementos utilizados, condições de contorno e

carregamentos utilizados podem ser visualizados nas figuras a seguir.

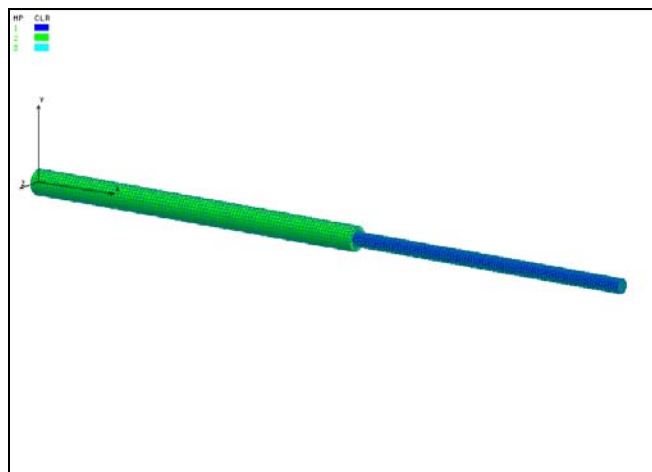


Figura 2 - Modelo de elementos sólidos (cabo e armadura).

foi de 138.3 MPa.

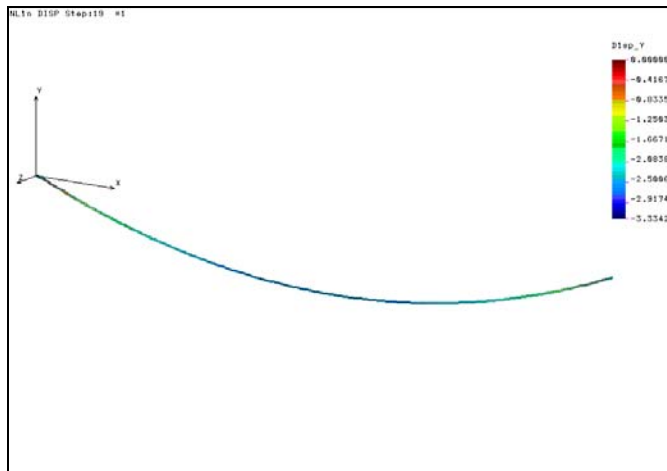


Figura 3 - Deslocamentos verticais – análise não-linear

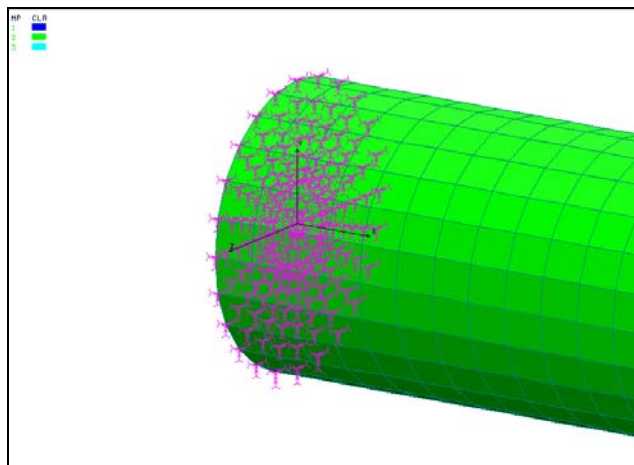


Figura 2 - Região de fixação (engastamento) do cabo.

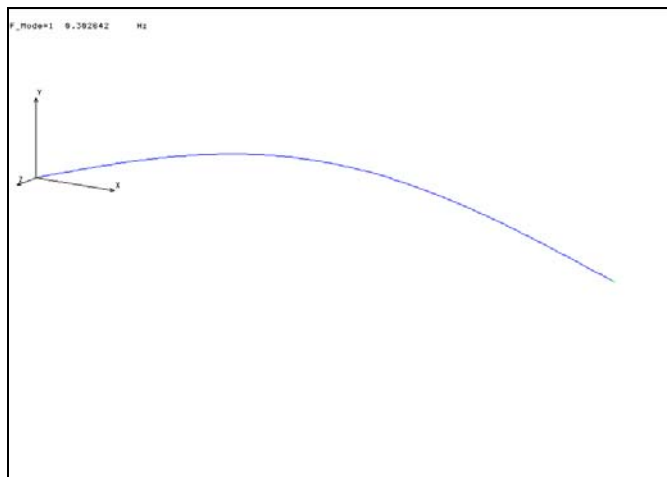


Figura 4 - Primeiro Modo de Vibração

Os resultados iniciais obtidos para a análise não-linear apresentam um deslocamento vertical $u_y = 3.33$ m, idêntico ao valor medido em campo para o cabo analisado. Os deslocamentos no nó 11 são: $U_x = 2.055E-03$, $U_y = -1.244E-01$, e $R_z = -5.946E-02$.

Para a análise modal, considerando o cabo tensionado e com efeito do peso próprio, foram obtidas as primeiras 500 frequências naturais. A frequência fundamental para este cabo é $0.3026415E+00$ Hz, e é apresentada na Fig. (4).

Os resultados da análise de resposta dinâmica (harmônica) apresentam os deslocamentos máximos obtidos no nó 11 como $u_x = 6.800E-04$ m, e $u_y = 1.068E-02$ m. A Fig. (5) apresenta os deslocamentos na direção y em função das frequências.

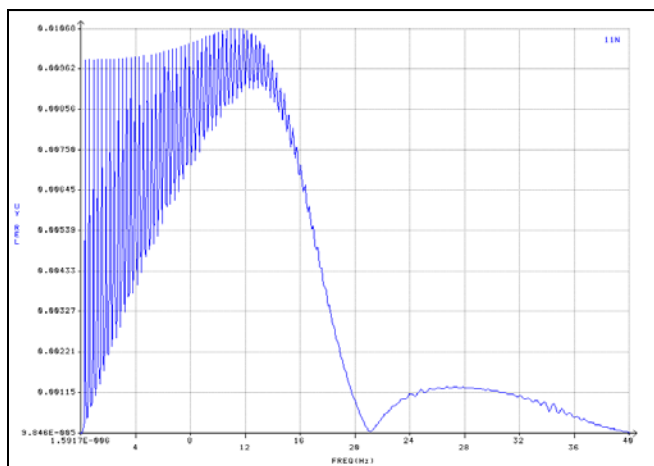


Figura 5 – Resposta dinâmica no nó 11 direção y.

Para a análise linear estática (modelo sólido) foram impostos os deslocamentos (nó em posição equivalente ao nó 11 do modelo de vigas): $u_x = 2.755E-03$ m, e $u_y = -1.351E-01$ m. A tensão máxima obtida (Von Mises)

A Fig. (6), a seguir, apresenta os deslocamentos verticais no modelo sólido. A distribuição de tensões (Von Mises) é apresentada na Fig. (7).

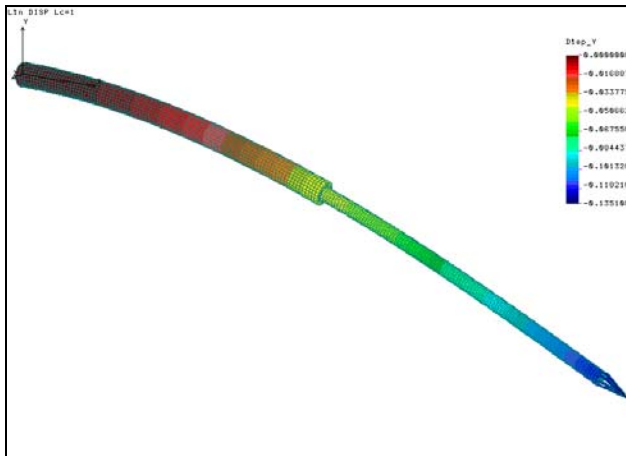


Figura 6 – Deslocamentos na direção y.

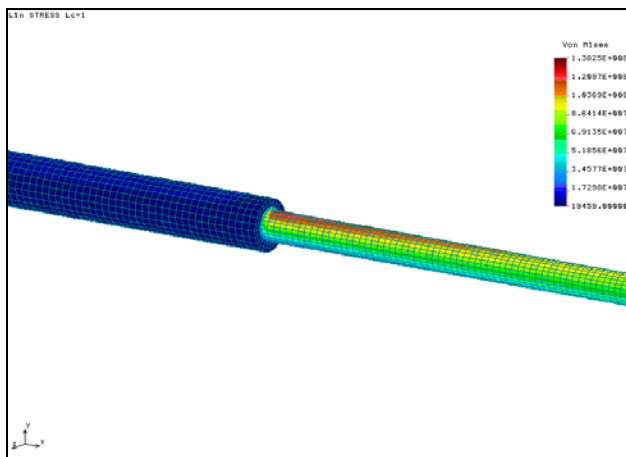


Figura 7 – Distribuição de tensões (von Mises).

O cálculo de resposta dinâmica utilizando superposição modal foi realizado com número suficiente de modos participando na resposta, pois que a somatória das massas modais dos modos avaliados é superior a 80% da massa total nas direções x, y e z. Evidentemente, os valores de pico obtidos nas análises de resposta para acelerações ou deslocamentos dependem do amortecimento modal existente.

A utilização do medidor e analisador PAVICA, para obtenção de dados experimentais para avaliação de vida útil de cabos submetidos à vibração eólica, somente é possível para cabos sem armadura. Com resultados comparativos entre cabos com e sem armadura (obtidos em modelo validado de elementos finitos), é possível avaliar-se a vida útil de cabos com armadura. Foram também obtidos resultados para modelo de cabo sem armadura. Neste caso, os valores finais de deslocamentos verticais foram de 3.33 m (equivalente à análise com armadura), e os deslocamentos no nó 11 foram de $-1.209E-01$ m na análise não-linear e de $-1.129E-02$ m na análise harmônica, com deslocamento vertical final no nó 11 de -0.1322 m (praticamente o mesmo valor do modelo com armadura).

As tensões obtidas, Fig. (7), são inferiores aos

valores admissíveis considerados. O baixo erro apresentado pelos valores de deslocamentos, na análise não-linear, em relação aos valores reais existentes, valida o modelo teórico elaborado com elementos finitos. Com este modelo validado, além de conseguirem-se valores de tensões associados às cargas de vento, podem ser feitas comparações de tensões entre cabos com e sem armaduras, e a partir de dados experimentais de vibrações eólicas (por exemplo, medidas obtidas através do PAVICA), extrapolar-se a vida útil de cabos com armadura. Percebeu-se, praticamente, nenhuma influência no comportamento global do cabo, em termos de flechas, com a colocação de armadura. No entanto, alterações nos valores de tensões são esperados.

III. ANÁLISE COMPARATIVA PARA OS CABOS COM E SEM ARMADURA

A. Relação entre tensões – fator multiplicativo f_m

Como citado, a utilização do medidor e analisador PAVICA, para obtenção de dados experimentais para avaliação de vida útil de cabos submetidos à vibração eólica, somente é possível para cabos sem armadura. No entanto, com o uso do modelo de elementos finitos validado, será efetuada análise comparativa de tensões para cabos com e sem armadura, de forma a possibilitar o cálculo de vida útil de cabos submetidos à vibração para ambas as condições.

Foram elaborados modelos para diversos cabos, a saber: Grosbeak, Hen, Hawk, Linnnet, Partridge, Leghorn, Oriole, Alumoweld 7x9, Aço Galvanizado 3/8” e Aço Galvanizado 5/16”. Os desenhos e dados utilizados como referência foram fornecidos pela CTEEP.

Foram executadas análises estáticas lineares, obtendo-se deslocamentos e tensões. Utilizou-se o método dos elementos finitos, através do programa COSMOS/M. O sistema de eixos considerado tem x na direção longitudinal do cabo, y na vertical, e z na direção transversal. Foram impostos deslocamentos nas extremidades dos modelos, com valores baseados em análise não-linear previamente elaborada. Para as condições de contorno, uma das extremidades dos cabos foi engastada, como mostra a

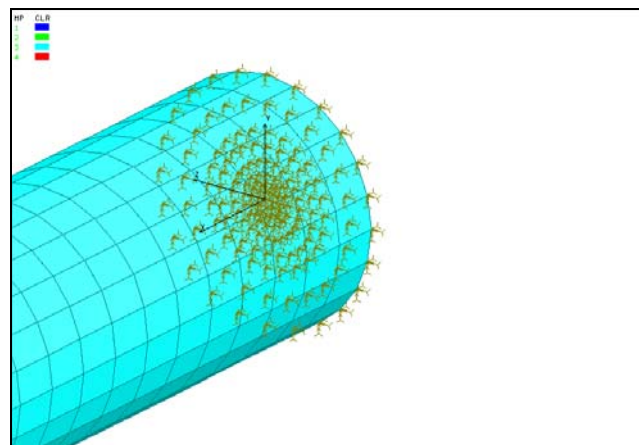


Figura 8 – Engastamento da extremidade do cabo.

Fig. (8). Os deslocamentos resultantes da análise não-linear foram somados àqueles obtidos na resposta dinâmica, e o resultado foi imposto ao modelo para análise, como apresentado na Fig. (9).

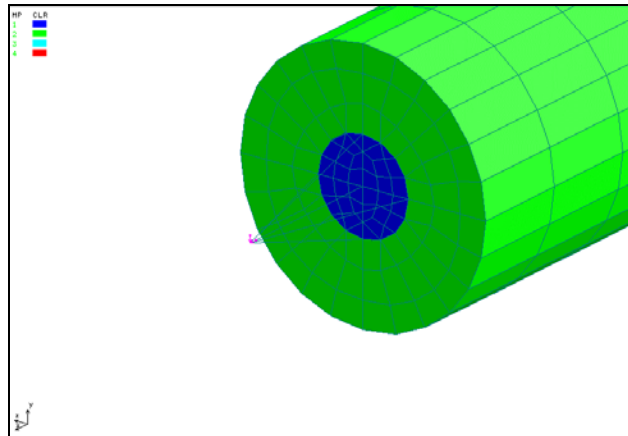


Figura 9 – Deslocamentos impostos

As figuras a seguir apresentam os modelos de elementos finitos elaborados para os diversos tipos de cabos. Foram modelados os cabos com e sem armadura, porém, aqui somente são apresentados os modelos com armadura.

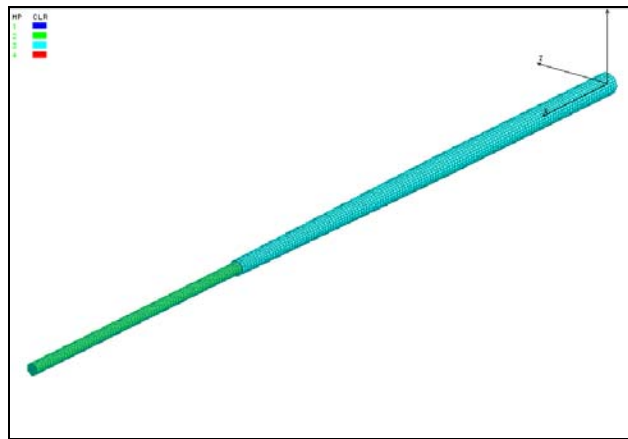


Figura 10 - Cabo Grosbeak com armadura cônica SADE

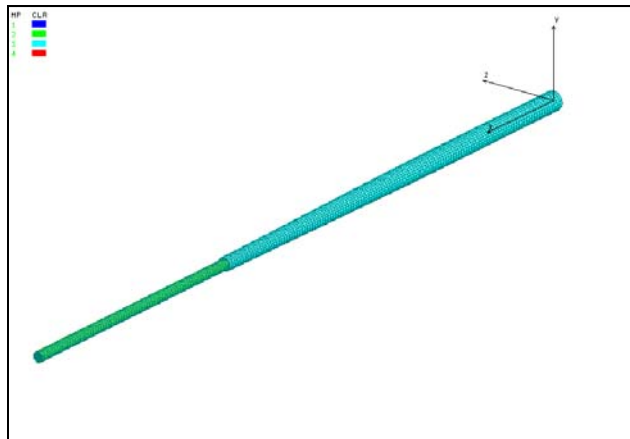


Figura 13 - Cabo Linnet com armadura cônica SADE

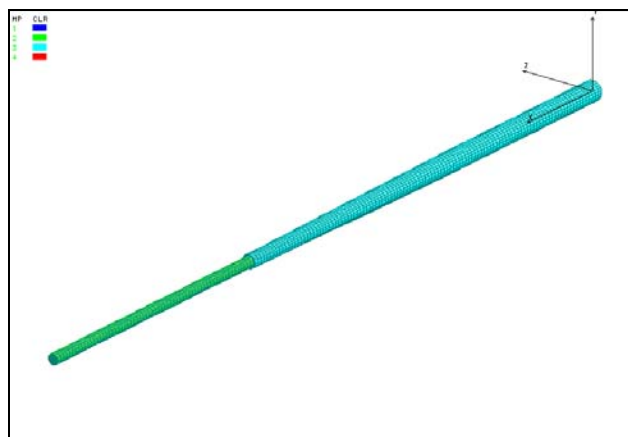


Figura 11 - Cabo Hen com armadura cônica SADE

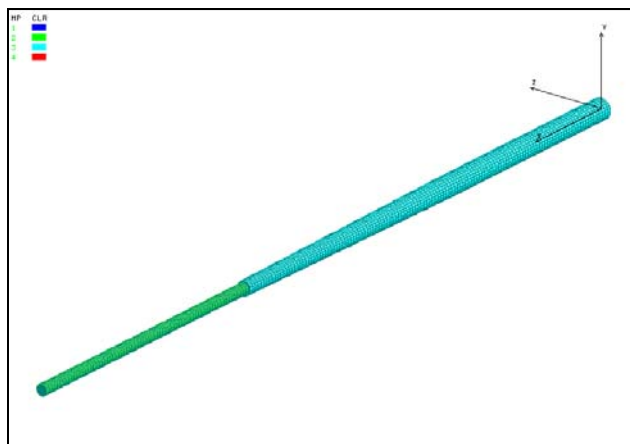


Figura 14 - Cabo Partridge com armadura cônica SADE

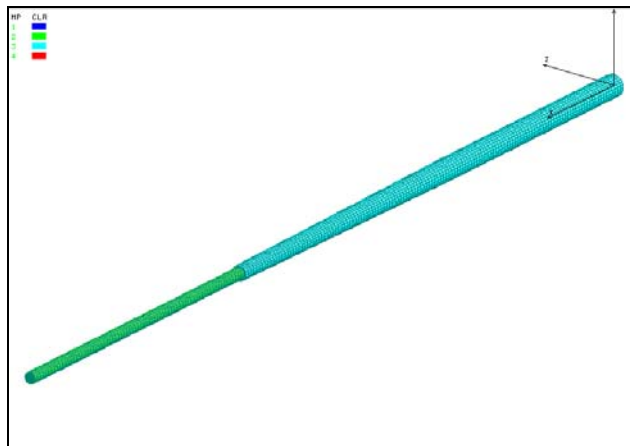


Figura 12 - Cabo Hawk com armadura cônica SADE

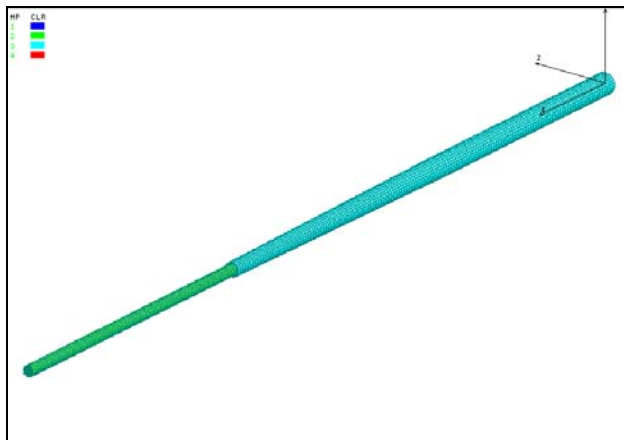


Figura 15 - Cabo Leghorn com armadura cônica SADE

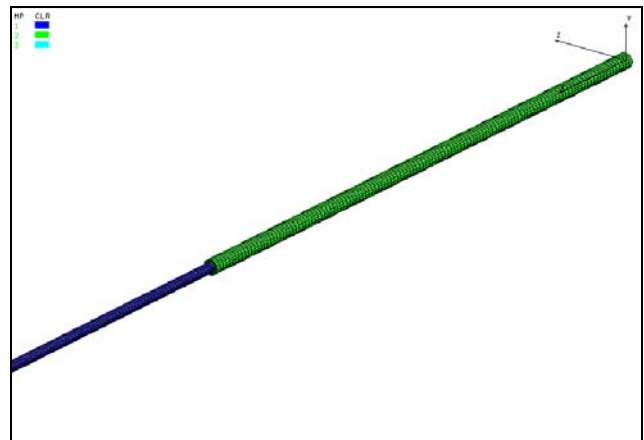


Figura 18 - Cabo Aço Galvanizado 3/8" com armadura cilíndrica PLP

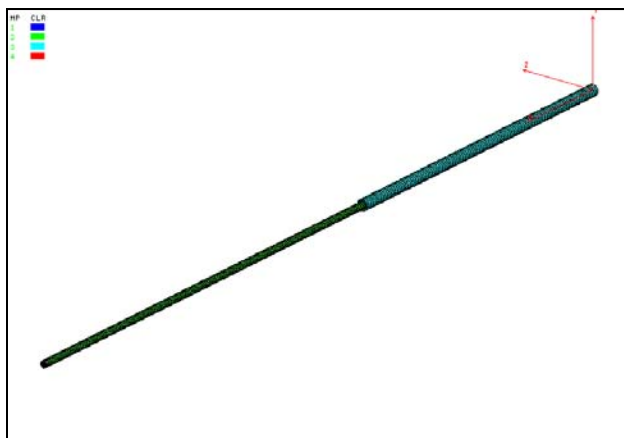


Figura 16 - Cabo Oriole com armadura cilíndrica PLP

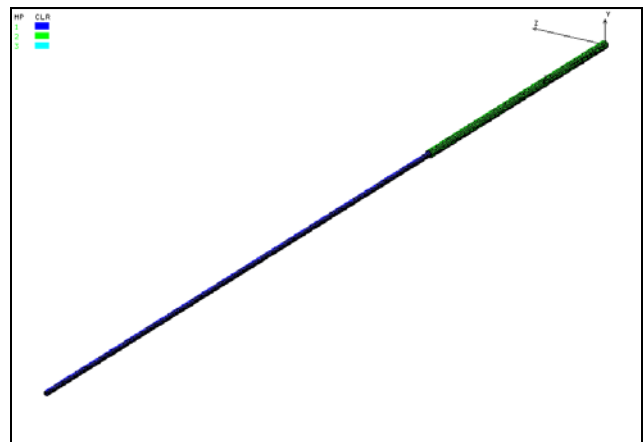


Figura 18 - Cabo Aço Galvanizado 5/16" com armadura cilíndrica PLP

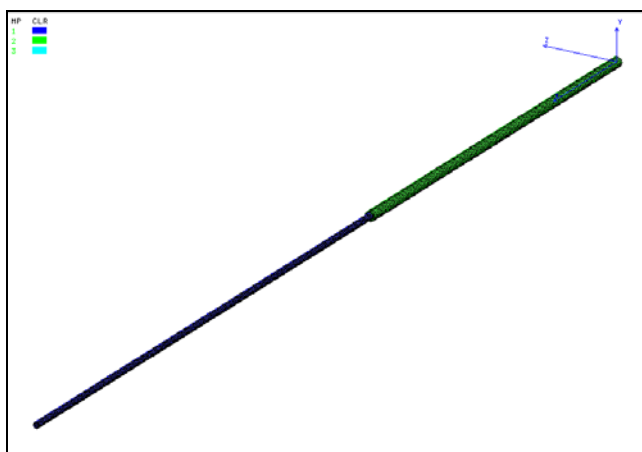


Figura 17 - Cabo Alumoweld com armadura cilíndrica PLP

Cada um dos cabos acima descritos, foi analisado de acordo com o procedimento apresentado na seção II, deste trabalho. As tensões máximas resultantes, para as condições sem armadura e com armadura, apresentadas na Tab. (1), a seguir, foram utilizadas para a determinação de um fator multiplicativo f_m , mostrado na Tab. (2).

Tabela 1 – Tensões (Von Mises) para cada tipo de cabo

Tipo de CABO	Tensão Máxima (MPa)		
	Sem armadura	Armadura SADE	Armadura PLP
Grosbeak	146.3	112.6	113.8
Hen	144.0	118.1	118.3
Hawk	137.5	113.5	113.9
Linnet	128.5	111.5	110.2
Partridge	123.5	111.3	112.5
Leghorn	195.6	179.1	181.1
Oriole	134.4	-----	114.7
Alumoweld7x9	293.8	-----	276.4
Aço galv. 3/8	278.2	-----	260.8
Aço galv. 5/16	269.8	-----	256.8

Tabela 2 - Fatores multiplicativos

Tipo de Armadura	Tipo de Cabo	Fator multiplicativo para máxima tensão (f_m)
SADE	Grosbeak	0.7697
	Hen	0.8201
	Hawk	0.8255
	Linnet	0.8677
	Partridge	0.9012
	Leghorn	0.9156
PLP	Grosbeak	0.7779
	Hen	0.8215
	Hawk	0.8284
	Linnet	0.8576
	Partridge	0.9109
	Leghorn	0.8534
	Oriole	0.8534
	Alumoweld7x9	0.9408
	Aço galv. 3/8	0.9375
Aço galv. 5/16	0.9518	

Este fator multiplicativo pode agora ser usado para se estimar a vida útil de cabos com armadura, conhecendo-se a estimativa de vida útil para o mesmo cabo, porém sem armadura. Tal procedimento é mostrado a seguir.

B. Utilização do fator multiplicativo f_m

De acordo com medidas de campo obtidas na Europa Central [3], o número total de oscilações em cabos condutores, devidas à excitações eólicas, é, em média, 30 milhões de ciclos por ano (30E06). Em terrenos planos, valores aproximadamente 8 vezes maiores têm sido medidos, ou seja, cerca de 250 milhões de ciclos de tensões por ano. Assim, durante o período de vida útil total de condutores, ou seja, 30 anos [2], o número total de ciclos de tensões seria de 30 x 250 milhões, ou seja, 7.5E09 ciclos. É importante observar que o valor de 1.0E09 ciclos coincide com resultados de campo de 33 milhões de ciclo por ano [3].

A referência [3] apresenta resultados de várias centenas de estudos de campo mostrando os efeitos de vários parâmetros na resistência mecânica de cabos condutores. Com base naqueles dados, cita-se: “Uma expectativa de vida útil média dos cabos de 30 anos parece uma estimativa razoável, tecnicamente e também economicamente.”

O cálculo da vida útil de um cabo condutor, em função do dano total acumulado durante um período de medições pode ser realizado, utilizando-se a regra de Palmgren-Miner [5], da seguinte forma

$$V = \frac{30}{D}, \quad (1)$$

onde V representa a vida em anos, e D é o dano total acumulado.

Nas medições realizadas com o aparelho PAVICA, obtém-se o Índice de Expectativa de Vida (Lifetime Index

ou Life Expectancy) [1], resultado do logaritmo da vida (V) do cabo, ou seja,

$$L_i = \log_{10}(V). \quad (2)$$

Assim, uma vez realizada a medição com o aparelho PAVICA para cabo sem armadura, e obtido o L_i , faz-se:

$$V = 10^{L_i}, \quad (3)$$

obtendo-se assim a vida útil do cabo em anos; como os cabos sofrem cerca de 33 milhões de oscilações por ano, calcula-se o número de oscilações N_{oscil} que ocorrerão durante os anos de vida do cabo, ou seja

$$N_{oscil} = 33E06 * V. \quad (4)$$

Agora, conhecido o número de oscilações que o cabo sofrerá durante sua vida útil V, com a ajuda da “Safe border line”, obtém-se a correspondente tensão para o cabo sem armadura:

$$\sigma = 450N_{oscil}^{-0.200} \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ para } N_{oscil} \leq 2E07, \quad (5)$$

$$\sigma = 263N_{oscil}^{-0.168} \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ para } N_{oscil} > 2E07. \quad (6)$$

Assim, é possível calcular-se a tensão existente para cabos com armadura, usando

$$\sigma_{ca} = f_m \times \sigma_{sa}, \quad (7)$$

sendo, σ_{ca} a tensão no cabo com armadura, σ_{sa} a tensão no cabo sem armadura e f_m o fator multiplicativo apresentado na Tab.(2). Em seguida, avalia-se o número de ciclos de oscilações N_{oscil}^{ca} para o cabo com armadura através de

$$N_{oscil}^{ca} = \left[\frac{\sigma_{ca}}{450} \right]^{-5}, \text{ para } N_{oscil} \leq 2E07. \quad (8)$$

$$N_{oscil}^{ca} = \left[\frac{\sigma_{ca}}{263} \right]^{-6}, \text{ para } N_{oscil} > 2E07. \quad (9)$$

e assim, torna-se então possível avaliar a vida útil para o cabo com armadura, da seguinte forma:

$$V_{ca} = \frac{N_{oscil}^{ca}}{33E06}, \quad (10)$$

sendo V_{ca} o valor da vida útil, em anos, para o cabo com armadura.

Agora, tome-se por exemplo o cabo Hawk, cujo resultado em tensão máxima, devido a vibrações eólicas, é igual a 137.5 MPa na condição sem armadura. Para o

mesmo cabo com armadura SADE, o resultado obtido através do método dos elementos finitos resultou em tensão máxima igual a 113.5 MPa, como mostra a Fig. (19). Estes

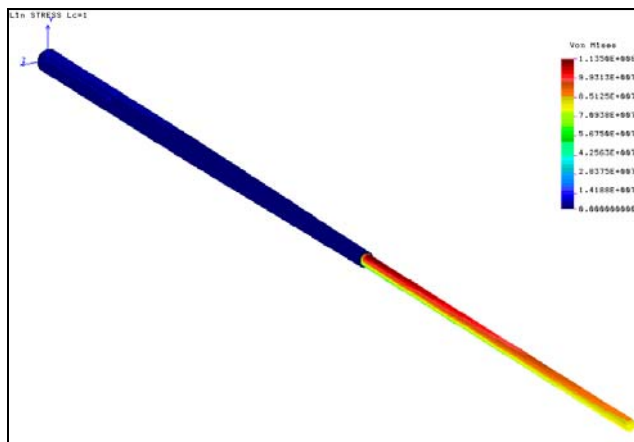


Figura 19 – Tensões Von Mises - Cabo Hawk com armadura cônica SADE

valores resultam um fator multiplicativo f_m igual a 0.8255, como apresentado na Tab. (2). Medições de campo para cabo Hawk, cujas principais características são: alma de aço, 7 tentos de diâmetro 2.67462 mm e o restante de 26 tentos de alumínio com diâmetro de 3.43 mm, e diâmetro externo total de 21.77 mm; armadura de vergalhões cônicos (SADE) com os seguintes comprimentos: parte cilíndrica de 965 mm, parte cônica com 2 x 610 mm, e comprimento total de 2185 mm, composta por 10 vergalhões de alumínio, diâmetro maior das varetas igual a 9.45 mm, e diâmetro menor das varetas igual a 3.15 mm. Para o comprimento total de 220.00 m, e pré-carga de 17 338 N (20% da carga de ruptura), o deslocamento máximo medido em campo foi de 3.33 m, resultado idêntico ao obtido com o modelo de elementos finitos em análise não-linear.

Durante o mês de maio de 2003 foram realizadas medições em Santa Bárbara do Oeste, SP, em cabo Hawk com e sem armadura. O medidor e analisador PAVICA somente apresenta estimativa de vida útil dos cabos na condição sem armadura. Assim, utilizou-se tais dados experimentais, através da relação entre tensões obtida nos modelos de elementos finitos, ou seja, o fator multiplicativo, f_m , para se estimar a vida útil para o mesmo cabo com armadura. Em uma das medidas obteve-se o “Lifetime Index”, L_i , igual a 4.69919. Da eq. (3) resulta a vida útil do cabo, em anos, V , igual a 50 025 anos. Através da eq. (4) calcula-se o número de oscilações para o cabo sem armadura, resultando N igual 1.6508E12; como este valor é maior que 2.0E07, usa-se a eq. (6) para calcular a correspondente tensão na curva “Safe border line”, cujo resultado é 2.33 N/mm². Este valor de tensão é então multiplicado pelo fator f_m , que para este caso é 0.8255, para se obter a tensão correspondente no cabo com armadura. O resultado deste cálculos é uma tensão igual a 1.92 N/mm². Como a eq. (6), utilizada acima, é correspondente à eq. (9), esta última é então usada para se obter o número de oscilações para o cabo com armadura, que resulta em 6.5333E12. Finalmente, a eq. (10) permite estimar a vida útil para o cabo com armadura, cujo resultado é 197 979 anos. Assim, o índice de expectativa de vida do cabo com

armadura será, eq. (2), 5.297. É importante observar a coerência deste resultado, pois é de se esperar que a armadura proteja o cabo, prolongando sua vida útil.

C. Resultados dos programas “fadiga.f” e “vutil.f”

Baseados na formulação apresentada em [1], foram desenvolvidos dois programas em linguagem fortran para se estimar a vida útil de cabos condutores em função dos dados obtidos em campo com o medidor e analisador PAVICA. As rotinas desenvolvidas, diferentemente do analisador PAVICA, calculam essas estimativas tanto para cabos sem armadura, quanto para cabos com armadura. A Tab.(3), a seguir, apresenta os valores de “Lifetime Index” obtidos, para os cabos condutores sem armadura.

Tabela 3 – “Lifetime Index” para cabos sem armadura

Medida	PAVICA (campo)	fadiga.f (calculado)	erro(%)	vutil.f (calculado)	erro(%)
M10	7.0340	6.8980	-1.93	6.5180	-7.33
M13	4.6992	4.6213	-1.66	6.7975	44.65
M14	5.6403	5.45313	-3.32	5.0731	-10.06

Como citado anteriormente, estas medidas de campo e análises referem-se todas a cabo Hawk sem armadura e com armadura cônica. Os dados obtidos em campo para os cabos com armadura, resultaram nos valores de “Lifetime Index” apresentados na Tab. (4).

Tabela 4 – “Lifetime Index” para cabos com armadura

Medida	fadiga.f (calculado)	vutil.f (calculado)
M4	5.283	4.903
M5	5.823	5.443
M6	6.452	8.628
M8	5.740	5.360

É importante observar que as diferenças entre as medidas realizadas limitam-se aos tempos de medidas e números de medições realizadas.

IV. CONCLUSÕES

Foi considerado validado procedimento para avaliação experimental de vida útil diretamente em cabos com armadura sem que haja necessidade de novas medidas para o mesmo cabo sem a mesma.

Pode-se ainda efetuar-se a extensão de resultados em análises experimentais em cabos sem armadura para cabos com armadura, de forma a avaliar-se a eficácia de sua utilização.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Roctest, PAVICA Instruction Manual, 1997.
- [2] CIGRE Study Committee 22, Working Group 04, "Recommendations for the Evaluation of the Lifetime of Transmission Line Conductors," Electra No. 63, March 1979.
- [3] CIGRE Study Committee 22, Working Group 04, "Endurance Capability of Conductors," Final Report, July 1988.
- [4] Hardy, C., e Leblond, A., "Statistical Analysis of Stranded Conductor Fatigue Endurance Data," Fourth International Symposium on Cable Dynamics, Montréal, Canada, May 28-30, 2001.
- [5] N. E. Dowling, *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice-Hall, Inc., 1999, p. 402.