



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

ANÁLISE DOS ESFORÇOS DE ORIGEM EÓLICA EM ESPAÇADORES-AMORTECEDORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Newton Sure Soeiro, nsoeiro@ufpa.br
Walter dos Santos Sousa, wss@ufpa.br
Daniilo de Souza Braga, daniilo.braga@itec.ufpa.br
Gustavo da Silva Vieira Melo, gmelo@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá. CEP 66075-110. Caixa postal 479. Belém - Pará – Brasil.

Resumo: Geralmente, as falhas em linhas de transmissão estão relacionadas ao carregamento excessivo de seus componentes, os quais estão sujeitos à ação do vento. Um desses acessórios de linha é o espaçador-amortecedor que tem como função espaçar os subcondutores a uma distância padronizada e atenuar o efeito vibratório oriundo das rajadas de vento. Este artigo, tem por objetivo analisar os esforços gerados sobre o espaçador-amortecedor devido a ação aleatória do vento. A análise é desenvolvida a partir de um modelo de elementos finitos para simulação da excitação do vento nas condições médias na Região Amazônica. Adota-se a hipótese de que não existem ações de cargas de origem elétrica sobre a mesma e, portanto, a excitação sobre a linha é devida apenas aos efeitos do vento na banda de frequência de 3 a 120 Hz, as quais levam ao aparecimento de vibração eólica com amplitudes de no máximo uma vez e meia o diâmetro do condutor. Os resultados são obtidos a partir de uma análise numérica, possibilitando a determinação do campo de tensão e deformação nos elementos do espaçador-amortecedor, de tal forma que aplicando um critério de falha, é possível determinar a condição de falha destes dispositivos. Uma análise química/metalográfica do material de fabricação do espaçador-amortecedor estudado complementa os resultados numéricos obtidos, atestando a predisposição à falha destes componentes da linha de transmissão.

Palavras-chave: Vibração Eólica, Espaçadores-Amortecedores, Falha em Espaçadores.

1. INTRODUÇÃO

Problemas de falhas em linhas de transmissão, além de desprender um tempo significativo para a medida corretiva, geram elevados custos para a empresa. Por conta disso, torna-se necessária a verificação da eficiência dos acessórios que são colocados na linha para garantir que os mesmos não falhem em operação.

Um acessório da linha de transmissão é o espaçador, o qual tem a função de espaçar os cabos condutores a uma distância padronizada e atenuar o efeito vibratório dos feixes proveniente da ação do vento. Assim, na linha de transmissão de energia elétrica, os cabos condutores recebem o esforço devido ao arrasto e transmitem para os espaçadores, os quais deveriam absorver a energia mecânica, mas se esse dispositivo não estiver em condições de suportar o carregamento ocorrerá a sua falha. Quando a falha ocorre, além de deixar a linha desprotegida do movimento vibratório e dos carregamentos devido à ação do vento, provoca alterações de campo elétrico dos subcondutores, causando ineficiente transmissão de energia.

Claren et al (1971) fizeram um estudo baseado na investigação do comportamento de feixe de cabos. É mostrado como o espaçamento entre espaçadores impõe tipos particulares de modos naturais, além da demonstração de tensões de flexão severas que acontecem no cabo perto das braçadeiras quando o espaçamento é grande.

Lilien et al (2000) fazem um estudo dos esforços de compressão sobre espaçadores de linhas de transmissão em condições de curto circuito, a partir do que foi demonstrado por Manuzio (1967). Essa situação abordada é denotada por uma situação de defeito na linha, gerando esforços bastante elevados a ponto de levar os espaçadores à falha.

Yamamura et al (2003) e Santos et al (1991), após observação dos problemas encontrados em espaçadores e análise de desempenho, chegam a algumas conclusões sobre os possíveis problemas desse dispositivo, das quais algumas são semelhantes às apresentadas neste trabalho, posteriormente.

Em CIGRE (2005) é feito um estudo generalizado sobre o estado da arte em espaçadores-amortecedores. As informações mais importantes estão nesse documento, tais como: recomendações de posicionamento, número de espaçadores por vão, os tipos existentes, a classificação, os materiais utilizados para a construção, etc. Sem dúvida essa referência foi imprescindível no estudo a que este trabalho se propõe, ou seja, a verificação da possibilidade de falha de espaçadores em serviço, devido ao carregamento imposto pelo vento.

2. METOTODOLOGIA

Considerando que os problemas de falha em espaçadores podem ser devido à rajada de vento e da qualidade do material empregado em sua fabricação, foi feito primeiramente análises química e metalográfica para melhor identificação do material do espaçador e possíveis contribuições para sua falha. Posteriormente, foi necessária a realização de ensaios mecânicos para obtenção das propriedades dos materiais presentes no espaçador. Entre os ensaios realizados destacam-se o de determinação da densidade dos materiais metálico e elastomérico e os de tração no material metálico e de compressão no material elastomérico, os quais permitiram a obtenção dos módulos de elasticidade e dos limites de resistência.

Com as propriedades dos materiais disponíveis, passou-se à modelagem sólida do espaçador e a construção da malha de elementos finitos. Em seguida, foi desenvolvida uma análise modal pelo método de elementos finitos e os resultados foram comparados com os da análise modal experimental, permitindo, então, o ajuste do modelo numérico. Finalmente, possuindo-se o modelo ajustado foi feita a análise dos esforços sobre o espaçador e a verificação de falha pelo carregamento estrutural.

3. DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS NO MATERIAL

3.1. Análise Química

Esta análise é importante para verificar se o material com que é feito o espaçador atende aos padrões estabelecidos por norma. A liga normalmente utilizada para a aplicação em espaçadores de linha de transmissão é a Al Si 12-ISO R 164, conhecida também como LM6 (BS 1490), assim, a análise química foi realizada através de um espectrômetro de massa buscando a identificação dos componentes da referida liga. A Tab. 1 permite a comparação entre a liga normalizada e o material do espaçador, destacando que os elementos Fe, Mg, Mn e Ni presentes no material do espaçador não atendem os requisitos da norma técnica.

Tabela 1. Comparação da composição química da liga do espaçador com a liga recomendada.

Elementos	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Pb	Si	Sn	Ti	Zn	V	Cr	Sb	Ca	Zr	Na	Sr	B
Liga Recomendada (%)	84,95 - 87,95	0,1	0,6	0,1	0,5	0,2	0,1	10 - 13	0,05	0,2	0,1	Outros, cada 0,05				Outros, total 0,15			
Liga espaçador (%)	87,25	0,19	0,26	0,03	0,04	0,02	0,08	11,44	0,06	0,19	0,12	0,1	0,07	0,07	0,05	0,05	0,04	0,03	0,01
Comparação	Ok	Ok	(0,34%) Baixo	(0,07%) Intermediário	(0,46%) Baixo	(0,18%) Baixo	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Outros, total (0,43%) Alto							

3.2. Análise Metalográfica

Em todas as amostras examinadas, com auxílio de um microscópio óptico, observa-se uma grande quantidade de inclusões não metálicas que podem ser óxidos e/ou poros. A presença destas inclusões pode ser devida à falha no processo de fabricação da liga, o que pode interferir diretamente nas propriedades do material como será mostrado a seguir. Na Figura (1) são mostradas tais inclusões presente em uma amostra do material fazendo uso de um reagente Tucker para relevação metalográfica, a qual é melhor visualizada com um aumento acentuado, como mostra a Fig. (2).

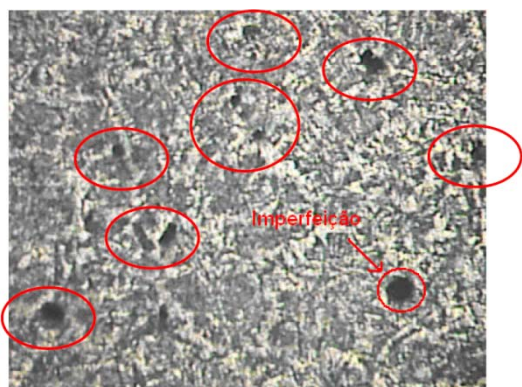


Figura 1. Macroscópica da liga Al-Si do espaçador (Aumento 5x) – Ataque Tucker.



Figura 2. Detalhe de uma imperfeição na estrutura do espaçador (aumento 10x).

4. PROPRIEDADES MECÂNICAS NECESSÁRIAS PARA GERAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS

4.1. Módulo de Elasticidade (E)

O ensaio de tração é um dos ensaios mecânicos mais aplicados para a determinação das principais propriedades mecânicas dos materiais. Dentro desta caracterização estão presentes o módulo de elasticidade, limite de resistência, limite de escoamento, alongamento, etc. Para o ensaio de tração, foram produzidos três corpos de provas com a configuração mostrado abaixo na Fig. (3), a partir de amostras retiradas dos espaçadores.

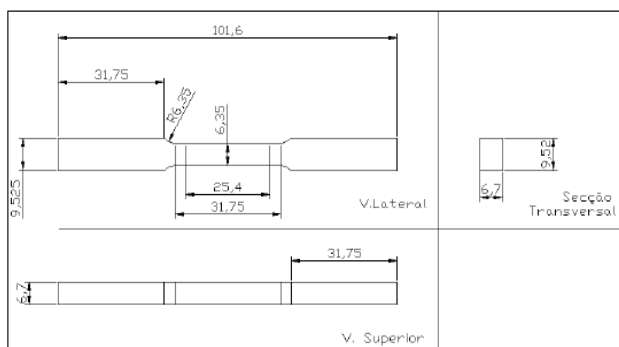


Figura 3. Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração.



Figura 4. Corpos de prova destruídos após o ensaio.

Após os ensaios, verifica-se o comportamento frágil dos corpos de prova como já se havia previsto, durante a análise metalográfica, considerando a grande quantidade de poros e interseções de óxidos, bem como pode ser visualizado na Fig. (4). Os seguintes valores foram obtidos, respectivamente, para limite de resistência, limite de escoamento e módulo de elasticidade: 103 MPa, 99 MPa e 66 GPa. Estes valores estão abaixo dos valores recomendados por norma para o limite de resistência (196 MPa) e módulo de elasticidade (70 GPa).

4.2. Densidade dos Materiais (ρ)

A densidade de um determinado material é determinada a partir da relação entre a sua massa e o seu volume. Seguindo este raciocínio, para determinar a densidade de cada material do espaçador, basta utilizar uma balança de precisão para pesar uma determinada quantidade dos dois materiais e medir os respectivos volumes utilizando uma proveta. Assim, os resultados obtidos foram: 2.744 kg/m³ para o metal e 1.105,7 kg/m³ para o elastômero.

5. ANÁLISE MODAL DO ESPAÇADOR-AMORTECEDOR

5.1. Análise Modal Experimental

Antes de modelar os espaçadores foi realizada a análise modal experimental desses componentes, objetivando ter uma base para ajustar o modelo numérico de elementos finitos. Assim, o espaçador e a fonte de excitação foram suspensas por fios de *nylon* flexíveis, simulando uma situação livre-livre, ou seja, como se a estrutura estivesse “flutuando” no espaço e os equipamentos utilizados para a medição foram: uma cabeça de impedância B&K 8001; dois pré-amplificadores B&K 2647A; um amplificador de potência B&K 2719; um excitador de vibrações B&K 4809; um analisador dinâmico de sinais HP 35665A; um acelerômetro PCB 352B68; um *stinger*; e cabos para conexão.

Para a obtenção dos modos em todas as direções, foram feitas duas configurações da cadeia de medição para o espaçador analisado. A primeira, objetivando a obtenção dos modos no plano XY, é mostrada na Fig. (5a) e a segunda, objetivando a obtenção dos modos na direção Z, é mostrada na Fig. (5b).

A extração dos parâmetros modais do espaçador analisado no ensaio experimental foi feita a partir do software de análise modal Test.Lab, com a aplicação do algoritmo PolyMAX ao conjunto de Funções Resposta em Frequências – FRF medidas.

Tomando por base a faixa de frequência de 3 a 120 Hz, onde ocorre a vibração eólica conforme CIGRÉ (1989), os resultados da análise modal experimental são apresentados na Tab. (2) e Fig. 6.

5.2. Análise Modal Numérica

Primeiramente, devido à grande complexidade da geometria do espaçador, o procedimento de modelagem sólida foi feito no software SOLIDWORKS. Em seguida, o modelo sólido foi exportado no formato “Parasolid” e lido no software ANSYS para a análise pelo método de elementos finitos.

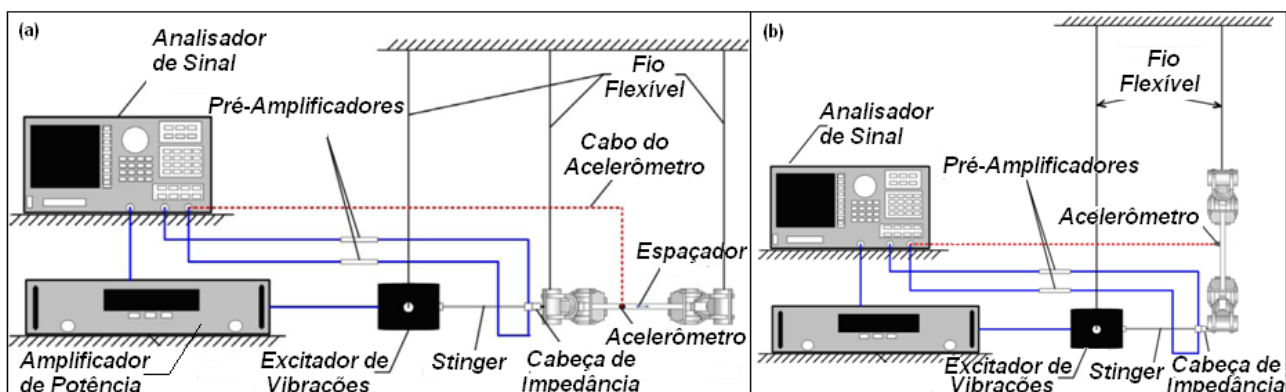


Figura 5. (a) Configuração de medição para a obtenção dos modos no plano XY (b) Configuração de medição para a obtenção dos modos a direção Z.

Tabela 2. Frequências naturais experimentais e orientação das formas do espaçador.

Modos	Frequência (Hz)	Orientação do Modo
Primeiro	52,63	Direção Z
Segundo	63,76	Plano XY
Terceiro	71,82	Plano XY
Quarto	88,71	Direção Z
Quinto	106,49	Plano XY

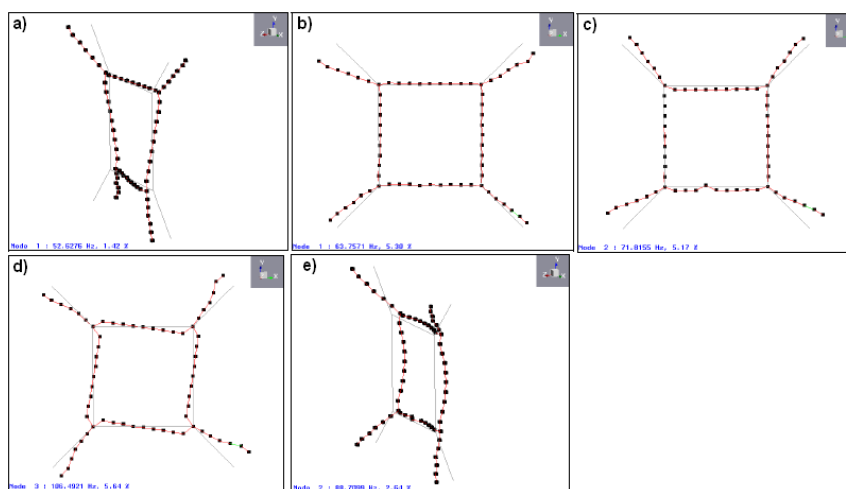


Figura 6. Formas modais do espaçador: (a) Primeiro modo, (b) Segundo modo, (c) Terceiro modo, (d) Quarto modo e (e) Quinto modo.

Para a malha de elementos finitos foi utilizado o elemento SOLID45, disponível na biblioteca do próprio software ANSYS, uma vez que o mesmo se adapta muito bem aos modelos sólidos de geometria complexa, tendo-se o cuidado de realizar teste de convergência para que a geometria possa ser corretamente representada. A Fig. (7) mostra o modelo sólido construído e a malha de elementos finitos construída no software ANSYS.

A análise modal desenvolvida no software ANSYS teve por base o algoritmo de solução de problema de autovalor-autovetor denominado de Block Lanczos, sendo que numa primeira análise, como seria esperado devido simplificações feitas na modelagem, os resultados apresentaram alguma divergência com os obtidos experimentalmente. Assim, foi feito o processo de atualização do modelo, tendo sido obtido os valores de frequência natural apresentados na Tab. (3), apresentando-se a forma modal referente à primeira frequência natural na Fig. (8), e a referente à quinta frequência natural na Fig. (9), a título de ilustração.

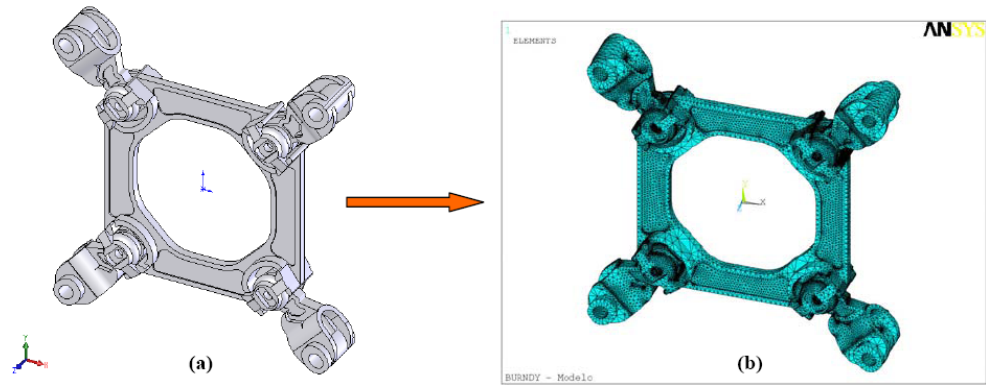


Figura 7. (a) Modelo geométrico do espaçador feito no SOLIDWORKS; (b) Malha de elementos finitos após importação do modelo geométrico para o ANSYS.

Tabela 3. Frequências naturais numéricas do modelo ajustado do espaçador.

Modo	Frequências (Hz)	Orientação do Modo
Primeiro	57,025	Direção Z
Segundo	64,181	Plano XY
Terceiro	71,269	Plano XY
Quarto	89,424	Direção Z
Quinto	106,207	Plano XY

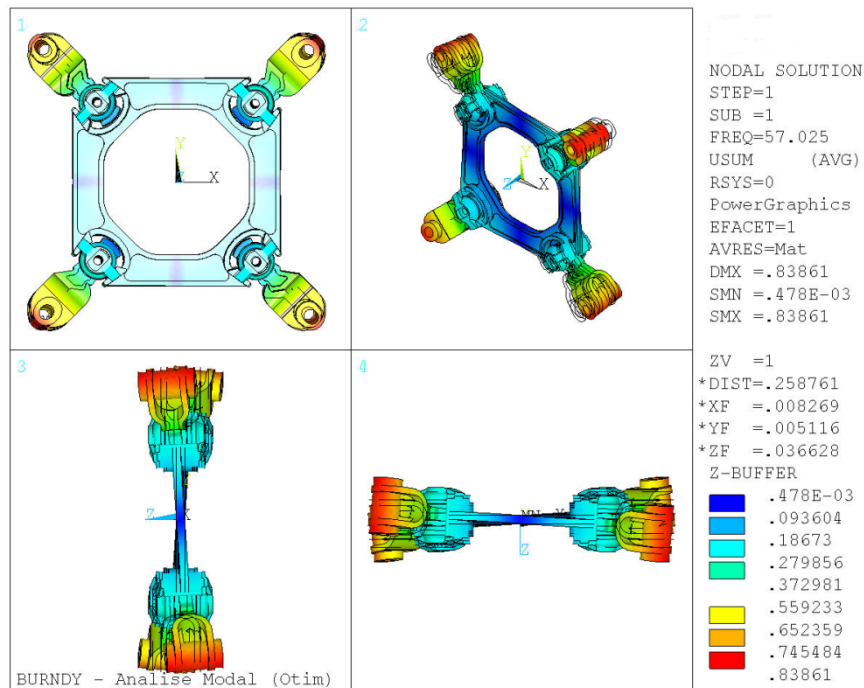


Figura 8. Primeira forma modal obtida da modelagem numérica após o ajuste do modelo.

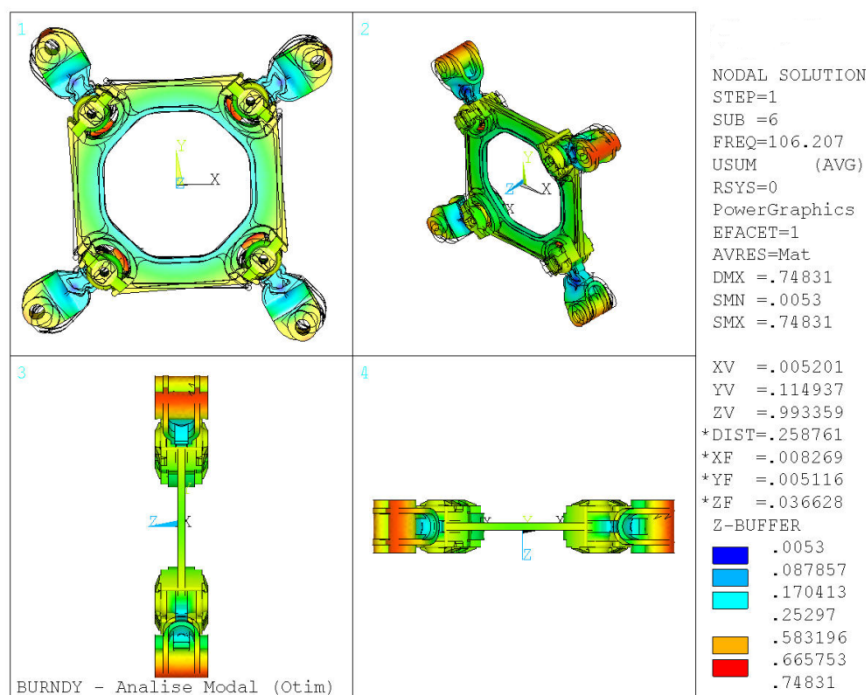


Figura 9. Quinta forma modal obtida da modelagem numérica após o ajuste do modelo.

6. METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO CARREGAMENTO DE VENTO SOBRE O ESPAÇADOR E SOBRE OS CONDUTORES

Para a determinação do carregamento que representa a ação do vento foi utilizada a norma NBR 6123. Nesse sentido, serão feitas três situações de carregamento de vento que estão previstas nessa norma. As duas primeiras situações dizem respeito ao esforço somente sobre o a estrutura do espaçador, sem considerar o esforço proveniente dos cabos condutores, sendo uma incidindo perpendicularmente à face da estrutura e a outra 45° paralelamente ao chão. A terceira situação simulará a ação do vento sobre um sub-condutor em um dos braços do espaçador.

6.1. Determinação dos esforços que incidem diretamente sobre o espaçador-amortecedor

Conforme dito anteriormente, a força que atua em uma estrutura, causada pela ação do vento, é calculada pela força de arrasto:

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e \tag{1}$$

sendo C_a o coeficiente de arrasto, q a pressão dinâmica e A_e a área frontal efetiva (ou área de sombra).

A pressão dinâmica q é dada por:

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \tag{2}$$

sendo V_k a velocidade característica do vento.

A velocidade característica do vento é calculada por:

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \tag{3}$$








sendo V_0 a velocidade básica do vento, S_1 o fator topográfico, S_2 fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo, e de sua altura sobre o terreno e S_3 o fator estatístico. Esses fatores foram selecionados e calculados pela norma NBR 6123 considerando o seguinte:

- Terreno plano ou fracamente acidentado: $S_1 = 1,0$;
- Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas (Categoria II). Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m (Classe C). A altura da torre tem 60 m: $S_2 = 1,14$;
- Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.): $S_3 = 1,1$.

A velocidade básica do vento pode ser determinada no gráfico de isopletras do Brasil, presente na norma NBR 6123, selecionando a região de incidência do vento onde se encontra a estrutura desejada para o estudo. Para este estudo, a velocidade básica do vento adotada será $V_0 = 35$ m/s, de acordo com a média de ventos para região. O que nos fornece, da equação (3), $V_k = 43,89$ m/s. Dessa forma, da equação (2), temos $q = 1180,84$ N/m².

Conforme dito anteriormente, A norma NBR 6123 prevê duas situações de incidência do vento: perpendicularmente à face da estrutura e a 45° paralelamente ao chão. Nesses casos, é necessário calcular a área frontal efetiva e estimar um valor de coeficiente de arrasto para a estrutura. Para ter como base, foi utilizada a Tab. (4) de coeficientes de arrasto para alguns objetos.

Tabela 4. Tabela de coeficientes de arrasto para os objetos selecionados (Fox 2006, adaptado).

Objeto	Prisma quadrado	Disco	Anel	Hemisfério (extremidade aberta de face para o fluxo)	Hemisfério (Extremidade de aberta faceando a jusante)	Seção-C (lado aberto de face para o fluxo)	Seção-C (lado aberto faceando a jusante)
Diagrama							
C_d ($Re \geq 10^3$)	$\frac{h/h}{l/h} = \infty \dots 2,05$ $\frac{h/h}{l/h} = 1 \dots 1,05$	1,17	$1,20^b$	1,42	0,38	2,30	1,20

Tendo por referência a Tab. (4), estimou-se que quando o vento incide perpendicularmente à face da estrutura $C_a = 1.5$, e quando o vento incide a 45° $C_a = 1.3$. Assim, utilizando a equação (1), podemos calcular as forças que agem sobre o corpo do espaçador-amortecedor para os dois casos: o vento incidindo perpendicularmente à face da estrutura e vento incidindo a 45° e paralelamente ao chão.

Para o primeiro, obtendo a informação do software de construção do modelo de que a área frontal efetiva para este caso é $A_e = 0,024193$ m², temos que a força de arrasto será:

$$F_a = 1,5 \cdot 1180,84 \cdot 0,024193 \quad \rightarrow \quad F_a = 42,85 \text{ N} \quad (4)$$

Obtendo a informação do software de construção do modelo de que a área frontal efetiva para este caso é $A_e = 0,07606$ m², a força que nos interessa é a sua componente a 45°, então a outra componente que se apresenta na direção longitudinal aos sub-condutores pode ser desprezada e, assim, a força de arrasto será:

$$F_a = 1,3 \cdot 1180,84 \cdot 0,07606 \cdot \sin 45 \quad \rightarrow \quad F_a = 82,56 \text{ N} \quad (5)$$

6.2. Determinação dos esforços que incidem sobre o condutor

Para o caso da ação do vento sobre o condutor serão feitas algumas hipóteses básicas: vamos supor que apenas um condutor recebe o esforço; a distância entre espaçadores será de 50 m; selecionaremos três espaçadores, sendo que consideraremos que os que estão nas extremidades não se moverão (simulando uma espécie de engaste) de tal maneira que toda a ação do vento fique concentrada no espaçador do meio. Segundo a norma NBR 6123 a força de arrasto para fios e cabos é calculada por:

$$F_a = C_a \cdot q \cdot l \cdot d \quad (6)$$

sendo l o comprimento do fio ou cabo e d o diâmetro do círculo circunscrito da seção do fio ou cabo. Para fios e cabos, os coeficientes de arrasto C_a dependem do valor do número de Reynolds Re , conforme a Tab. (5).

O cabo utilizado na linha de transmissão é o Grosbeak 636, de tal maneira que o fabricante nos fornece $d = 25,15$ mm e $r' = 1,985$ mm. Dessa forma, temos que o número de Reynolds é:

$$Re = 70000 \cdot V_k \cdot d \quad \rightarrow \quad Re = 70000 \cdot 43,89 \cdot 25,15 \cdot 10^{-3} \quad \rightarrow \quad Re \cong 7,73 \cdot 10^4 \quad (7)$$

Após calcular o número de Reynolds e sabendo que a relação $r'/d = 0,0789$, o que significa que $r'/d \geq 1/25$, e olhando na Tab. (5), temos que o coeficiente de arrasto será 1,1.

Tabela 5. Coeficiente de arrasto, C_a , para fios e cabos $l/d > 60$ (NBR 6123, modificado)

Regime do fluxo ($Re = 70000 V_k \cdot d$) [V_k em m/s; d em m]	Coeficiente de arrasto C_a para:			
	Fio liso	Fio moderadamente liso (galvanizado) ou pintado)	Cabos torcidos de fios finos $r/d \leq 1/30$	Cabos torcidos de fios grossos $r/d \geq 1/25$
$Re \leq 2,5 \cdot 10^4$	-	-	1,2	1,3
$Re \geq 4,2 \cdot 10^4$	-	-	0,9	1,1
$Re \leq 2,5 \cdot 10^5$	1,2	1,2	-	-
$Re \geq 4,2 \cdot 10^5$	0,5	0,7	-	-

Para Re e r/d intermediários, os valores de C_a são obtidos por interpolação

Como foi dito anteriormente em uma das considerações, a situação é a de que temos três espaçadores sendo que os dois ao extremo não se movem e o do meio recebe toda a ação do cabo condutor provocada pela rajada de vento. Como os espaçadores estão equidistantes em 50 m, o cálculo da força de arrasto resultante sobre o braço do espaçador será a soma dos dois comprimentos, ou seja, basta realizar o cálculo com $l = 100$ m.

Dessa forma, com todos os parâmetros determinados, podemos, finalmente, calcular a força de arrasto sobre o cabo condutor a partir da equação (6).

$$F_a = 1,1 \cdot 1180,84 \cdot 100 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \rightarrow F_a = 3266,79 \text{ N} \quad (8)$$

7. ANÁLISE DE TENSÕES UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

7.1. Ação do vento sobre o corpo do espaçador

A análise foi conduzida a partir do modelo de elementos finitos apresentado na Fig. (7), após a aplicação do carregamento e das condições de contorno, ou seja, aplicação das restrições nodais na área onde passam os cabos condutores. As respectivas forças de arrasto foram distribuídas por toda estrutura do espaçador.

Primeiramente foi feita a análise considerando a ação do vento na direção perpendicular à face da estrutura, Fig. (10), e depois a 45° e paralelamente ao chão, Fig. (11). Para os dois casos, é importante observar que quando se trata de carregamento de vento a força de arrasto determinada deverá ser distribuída ao longo da superfície de contato da estrutura. Por isso, para o caso do vento incidindo frontalmente à estrutura os esforços foram distribuídos somente de um lado do espaçador, enquanto que no caso do vento incidindo a 45° os esforços foram mais bem distribuídos devido à maior área efetiva. Com a aplicação do critério de falha de Von Mises, às máximas tensões geradas nos dois casos foram, respectivamente, 0,333 MPa e 0,514 MPa.

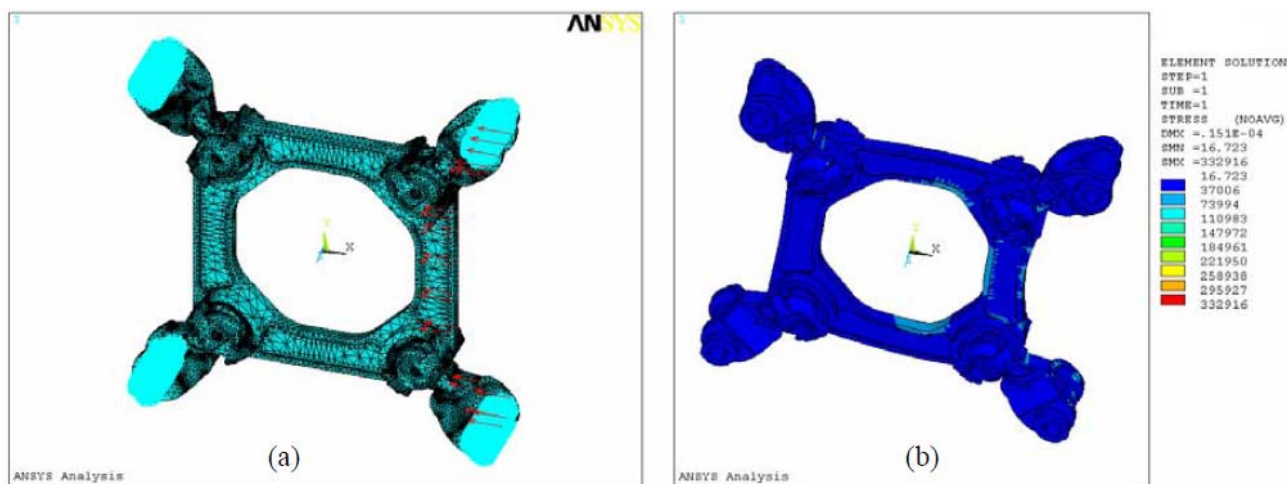


Figura 10. (a) Malha de elementos finitos com carregamento de vento frontal ao espaçador; (b) Análise de tensões devido à ação do vento frontal.

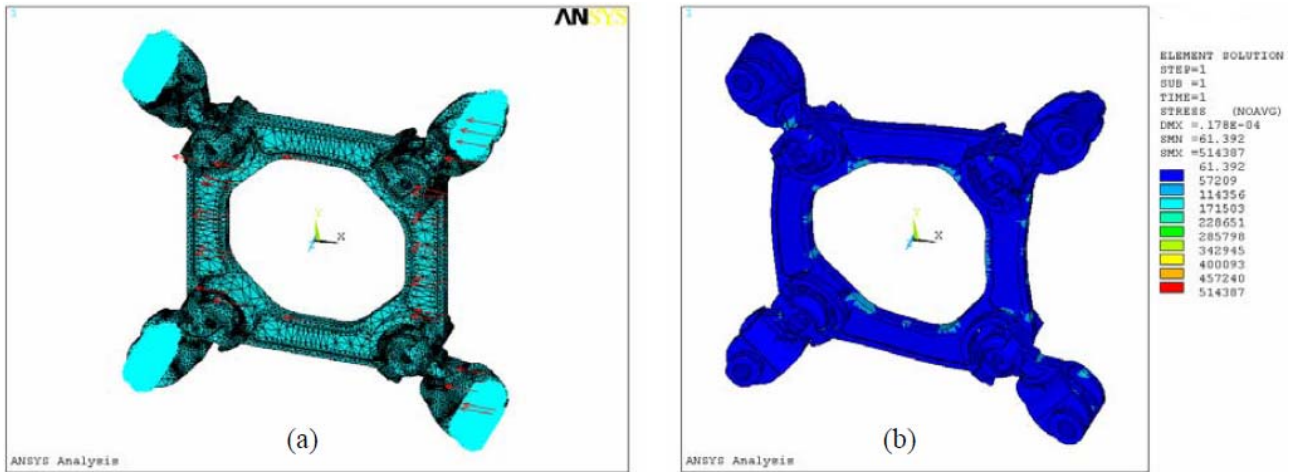


Figura 11. (a) Malha de elementos finitos com carregamento de vento a 45° e paralelo ao chão (b) Análise de tensões devido à ação do vento à 45°.

7.2. Ação do vento sobre o cabo condutor e sobre a garra do espaçador

O esforço causado sobre a principal região de falhas devido à ação do vento sobre o condutor pode ser calculado utilizando um somatório de momentos conforme mostrado na Fig. (12).

Considerando que o valor do carregamento aplicado na garra do espaçador é o determinado na equação (8), temos;

$$\sum M = 0 \rightarrow 3266,79 \cdot 0,0823 - 4 \cdot (F_r \cdot 0,0353) = 0 \rightarrow Fr \cong 1904N \quad (9)$$

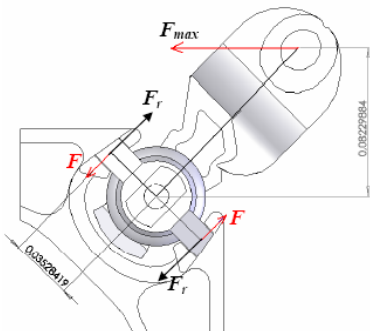


Figura 12. Esquema dos esforços aplicados.

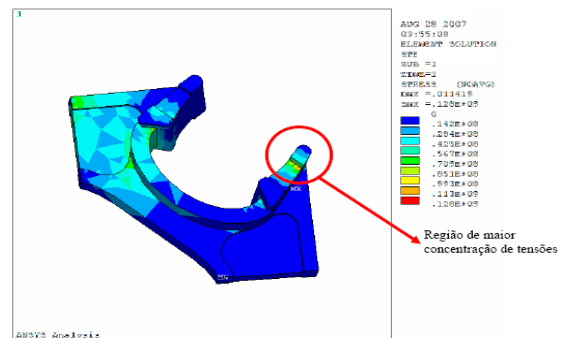


Figura 13. Análise das tensões geradas na região de falha.

A resposta ao carregamento que atua sobre a região crítica, tendo por base o critério de Von Mises é apresentada na Fig. (13), a qual identifica um ponto de concentração de tensão com valor de 128 MPa.

8. CONCLUSÕES

Diante da análise química realizada a partir do material metálico que compõe o espaçador-amortecedor, os elementos ferro (Fe), manganês (Mn) e níquel (Ni) estão abaixo dos valores recomendados para a liga. Além disso, pela sua análise metalográfica, o espaçador em estudo apresenta um grande número de inclusões não metálicas e poros. Estes resultados têm reflexos diretos sobre as propriedades mecânicas deste material, tal como comprovado no ensaio de tração, demonstrando que o material do espaçador apresenta um limite de resistência e de módulo de Young abaixo do recomendado.

A partir da análise modal experimental, pode-se observar a presença de pelo menos cinco modos de vibração do espaçador na faixa de frequência referente à vibração eólica que vai de 3 a 120 Hz, segundo a literatura pesquisada. Esses modos também foram observados nos modelos de elementos finitos, porém com a necessidade de ajuste, pois os mesmos possuíam frequências naturais distintas.

Sabendo que o valor médio de tensão de ruptura do material do espaçador gira em torno de 103 MPa, o qual foi obtido com ensaio de tração, e tendo como referência os resultados obtidos com os modelos numéricos, pode-se observar que a ação do vento diretamente sobre o espaçador não gera tensões elevadas, as quais variam entre 0,33 e 0,515 MPa, o que estaria dentro do regime elástico do material. Mas quando olhamos para os resultados obtidos devido à ação do vento nos condutores, percebe-se que o arrasto gerado nos cabos e transportados para a estrutura do espaçador

via garra de fixação gera pontos de concentração de tensão de até 128 MPa, o que ultrapassa o limite de resistência do material caracterizando a falha desse dispositivo na linha de transmissão.

É importante ressaltar que o cálculo da força de arrasto mostrado neste trabalho se apresenta num sentido bastante conservador, pois foi considerado que o espaçamento entre espaçadores era de 50 m e existem referências que permitem esse distanciamento de até 76 m, o que geraria um esforço ainda maior nos pontos de concentração de tensão podendo ocasionar a falha do espaçador mais precocemente.

9. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ELETRONORTE pelo apoio financeiro do projeto de pesquisa que abrange o presente trabalho.

10. REFERÊNCIAS

- Claren, R.; Diana, G.; Giordana, F.; Massa, E., 1971. "The Vibrations of Transmission Line Conductor Bundles". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS 90, no. 4, p. 1796-1814.
- Cigré, 1989 "Report on aeolian vibration". CIGRE SC-11, n. 124, pg. 39-77.
- Cigré, 2005. "State of the Art Survey on Spacers and Spacer Dampers". CIGRE WG – B2.11, TF – 5, Electra no. 277, 53 pp.
- Heylen W. and Lammens, S. and Sas, P., 1995, "Modal Analysis Theory and testing", Department Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- Hibbeler, R.C., 2006, "Resistência dos Materiais", 5.º Ed., Editora Livros Técnicos e Científicos.
- Jones, D. I. G., 2001, "Handbook of Viscoelastic Vibration Damping". John Wiley & Sons LTDA.
- Lilien, Jean-Louis; Papiliou, Konstantin O., 2000. "Calculation of Spacer Compression for Bundle Lines Under Short-Circuit". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, no. 2, p. 839-845.
- Manuzio, C., 1967. "An Investigation of the Forces on Bundle Conductor Spacers under Fault Conditions". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-86, no. 2, p. 166-184.
- NBR 6123, 1988, "Forças Devidas ao Vento em Edificações". Associação Brasileira de Normas técnicas – ABNT, Brasil.
- Simpson, A. and Sembhi, P.S., 1984, "On the use of exact modal analysis techniques in the design of damping devices for multiconductor overhead power lines". Journal of Sound and Vibration, v. 97, n. 3, p. 357-385.
- Yamamura, G. M.; Lemos, J. C. V.; Lavandoscki, R.; De Siqueira, F. J. S., 2003. "Aplicação de Espaçadores em Linhas de Transmissão – Uma Visão Crítica da CTEEP". XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, G. VII, no. 9, Uberlândia-MG, 6 pp.

ANALYSIS OF LOADS FROM WINDS IN SPACER-DAMPERS AT TRANSMISSION LINES OF ELECTRICITY

Newton Sure Soeiro, nsoeiro@ufpa.br

Walter dos Santos Sousa, wss@ufpa.br

Daniilo de Souza Braga, daniilo.braga@itec.ufpa.br

Gustavo da Silva Vieira Melo, gmelo@ufpa.br

Federal University of Pará, Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá. CEP 66075-110. Caixa postal 479. Belém – Pará – Brasil.

Abstract: Generally, transmission lines' failures are related to the excessive loading of components, which are subject to wind action. One such component is the spacer-damper, which is designed to protract the sub conductors in a standardized distance and minimize the effect of vibration induced by wind gusts. This paper aims to analyze the efforts generated on the spacer-dampers due to the random action of the wind. The analysis is performed using a finite element model to simulate to the conditions of wind in the Amazon region. It is considered that there are no loads due to electrical phenomena and the line excitation is only due to the effects of wind in the frequency band from 3 to 120 Hz, which leads to the appearance of wind induced vibration with amplitudes of the order of, at most, one and half time the conductor's diameter. The results are obtained from a numeric analysis, allowing the determination of stress and strain fields in the elements of the space-damper. Thus, after the application of a failure criterion, it is possible to determine the failure conditions of the latter. A chemical/metallographic analysis of the material, which constitutes the spacer-damper, complements the numerical results, confirming the predisposition to failure of these transmission line's components.

Keywords: wind vibration, spacers-dampers, spacer-damper failure.