

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

RELAÇÃO ENTRE A AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO E A TENSÃO DE FLEXÃO DINÂMICA EM CONDUTORES MONTADOS EM DIFERENTES TIPOS DE GRAMPO DE SUSPENSÃO

THIAGO BARBOSA DE MIRANDA(1); REMY KALOMBO BADIBANGA(1); JORGE LUIZ DE ALMEIDA FERREIRA(1); JOSÉ ALEXANDER ARAÚJO(1)
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA(1)

RESUMO

Este estudo avalia experimentalmente a tensão de flexão dinâmica em função da amplitude de vibração de cabos condutores montados em quatro tipos de grampo – grampo de suspensão metálico, metálico com armadura, elastomérico e elastomérico com armadura. No caso dos grampos elastoméricos, os dados obtidos confirmaram e quantificaram a redução da tensão de flexão dinâmica na região de acoplamento cabo/grampo. Os resultados apresentados neste trabalho possibilitam que medições de vibração em linhas de transmissão possam ser correlacionados, de forma mais precisa, com a tensão de flexão, para posteriormente serem utilizados em modelos de previsão da vida em fadiga de cabos condutores.

PALAVRAS-CHAVE

1.0 INTRODUÇÃO

Grampos de suspensão tem a função primária de suspender o cabo condutor na torre de transmissão, além disso o grampo deve ter a capacidade de suportar os carregamentos mecânicos impostos pelo condutor em todas as condições de serviço. O grampo de suspensão é o local mais crítico para ocorrência de falhas devido ao movimento oscilatório do cabo condutor e está diretamente relacionado a causa da falha (MCGILL; RAMEY, 1986; SANDBERG, 1949).

A montagem cabo/grampo de suspensão é o local onde o cabo experimenta uma combinação de carregamentos estáticos e dinâmicos que levam a falha por fadiga, por isso a sua importância para a integridade mecânica do condutor. A maneira que o grampo de suspensão afeta a vida em fadiga dos cabos condutores se baseia em como o grampo acomoda o movimento do cabo. A curvatura do grampo, a forma e a pressão de contato que é distribuída para o cabo dentro do grampo são os principais fatores que influenciam a resistência a fadiga de condutores (CIGRÉ, 1985; MCGILL; RAMEY, 1986). Existem diferentes configurações de grampos de suspensão que vão afetar de maneira distinta a severidade do fenômeno de fadiga em cabos condutores.

A incidência de ventos em cabos condutores de energia elétrica provoca um deslocamento transversal devido ao desprendimento de vórtices de forma alternada ao longo do vão, este fenômeno é denominado vibração eólica e tem como característica a amplitude de vibração correspondentes ao valor do diâmetro do cabo condutor e frequências de 3 Hz a 150 Hz (EPRI, 2006). A frequência de excitação pelo vento depende do diâmetro do cabo condutor e da velocidade do escoamento, já a amplitude de vibração dependerá da carga de esticamento, intensidade do vento e do sistema de amortecimento de vibrações da linha.

O movimento oscilatório provocado pelo vento gera tensões de flexão alternada e que combinadas com as tensões estáticas (carga de esticamento, força compressiva no interior do grampo, curvatura do cabo) formam um estado complexo de tensões na região de contato entre os fios, o que provoca a fadiga por *fretting* do condutor nos pontos de restrição de movimento, como grampos de suspensão, espaçadores, amortecedores.

Nesse sentido, a estimativa da tensão de flexão nos fios do condutor é o fator mais importante na avaliação da fadiga em cabos condutores de energia. Pesquisadores e projetistas, usualmente, utilizam a formulação proposta por Poffenberger-Swart (P-S) (POFFENBERGER; SWART, 1965) para correlacionar a amplitude de deslocamento com a tensão dinâmica na região de acoplamento entre o cabo e o grampo de suspensão.

A tensão idealizada por Poffenberger-Swart se baseia na correlação entre o deslocamento vertical, Y_b , e as características geométricas e materiais do condutor, K , (ver Equação 1). O deslocamento é medido, em geral, a uma distância de 89 mm a partir do último ponto de contato entre o cabo e grampo (TEBO, 1941), como pode ser visto na Figura 1.

$$\sigma_a(Y_b) = KY_B \quad (1)$$

De maneira que $\sigma_a(Y_b)$ é a tensão dinâmica (zero a pico), Y_B corresponde a amplitude de deslocamento (pico-pico), medida a uma distância x em relação ao último ponto de contato entre o cabo e o grampo (UPC). O valor de K é o fator de conversão que leva em consideração as características construtivas do cabo e é calculado a partir da Equação (2).

$$K = \frac{E_a d p^2}{4(e^{-px} - 1 + px)} \quad (2)$$

em que E_a e d são o módulo de elasticidade e diâmetro dos fios da camada mais externa do condutor, respectivamente. A variável x representa a distância entre o UPC e o ponto de medição de Y_B . O parâmetro de rigidez p pode ser obtido a partir da Equação (3)(3).

$$p = \sqrt{\frac{H}{EI}} \quad (3)$$

H é a carga de esticamento do cabo e EI é a rigidez a flexão do condutor, onde assume-se que os fios do condutor vibram de forma independente e em sua linha neutra, portanto é adotado o valor mínimo da rigidez a flexão que pode ser obtido pela Equação (4):

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

n_a , E_a e d_a representam respectivamente, a quantidade, o módulo de elasticidade e diâmetro (individual) dos fios de alumínio.

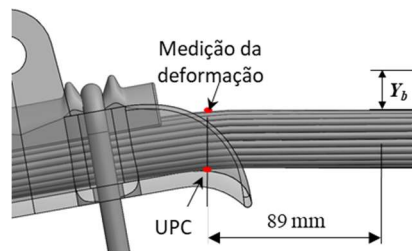


Figura 1 – Ilustração do grampo de suspensão indicando o ponto de medição do deslocamento, Y_b , e da deformação.

Apesar da formulação de P-S apresentar uma boa correlação com resultados experimentais, tal fórmula foi estabelecida para o grampo suspensão metálico e sua validade é comprovada apenas para este caso. Assim, a estimativa da tensão de flexão por meio da fórmula de P-S, para grampos de suspensão fabricados com material elastomérico ou que possuam proteção de armadura pré-formada, não levará em consideração o efeito do elastômero e da armadura na redução da tensão de flexão.

O emprego incorreto da formulação de P-S implicará em uma estimativa de vida útil do cabo inferior ao real. Podendo gerar custos desnecessários com manutenção ou sistemas de amortecimento mais robustos. Normalmente, a estimativa de vida é feita pela abordagem sugerida pelo CIGRÉ (1979, 1988). Esta metodologia utiliza a teoria do dano cumulativo de Miner (1945) para prever a vida remanescente da montagem cabo grampo. A regra de Miner considera que o material irá falhar quando o dano acumulado de todas os ciclos de tensão alcançarem um determinado valor (BRUNAIR; ED RAMEY; DUNCAN, 1988). Para o caso da metodologia do CIGRÉ este valor é referenciado de acordo com: (i) a Curva de Segurança da CIGRÉ (CSBL - sigla em inglês), a qual foi gerada a partir de ensaios experimentais e estabelece um limite de segurança conservativo para vida em fadiga de cabos condutores; ou (ii) curvas de fadiga produzidas em laboratório para um condutor específico.

De forma prática, a intensidade de vibração em uma linha de transmissão pode ser medida por meio de vibrógrafos. Tal equipamento mede a amplitude de vibração próximo ao grampo de suspensão, sendo possível convertê-las em tensão e estimar o dano causado por cada ciclo de vibração. É possível ainda considerar que o condutor estará sujeito as mesmas condições de vibração durante todo o tempo de serviço e estimar a vida remanescente do mesmo.

Em face do exposto, este trabalho tem por objetivo avaliar experimentalmente a tensão de flexão dinâmica em função da amplitude de vibração de cabos condutores montados em quatro tipos de grampo – grampo de suspensão

metálico, metálico com armadura, elastomérico e elastomérico com armadura. A obtenção dos resultados foi feita em uma bancada de vibração e fadiga em cabos condutores de energia. Foi utilizado nos ensaios um condutor de alumínio liga 1120, o qual foi tracionado na bancada experimental com uma carga de esticamento equivalente a 20% de sua carga de ruptura.

2.0 MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Condutor e Grampos de Suspensão

Este trabalho consistiu na análise da montagem de um mesmo tipo de cabo condutor montado em quatro diferentes configurações de grampos de suspensão. O condutor utilizado nos ensaios foi o CAL 823 MCM fabricado a partir do alumínio 1120, o qual possui 37 fios. O diâmetro nominal do condutor é de 26,53 mm e sua Resistência Mecânica Calculada (RMC) é de 9705 kgf. Condutores de alumínio 1120 ganharam notoriedade no cenário nacional nos últimos anos por conta do equilíbrio entre suas propriedades elétricas e mecânicas, quando comparado com as ligas 6201 e 1350 (BARBER; CALLAGHAN, 1995; PETTERSSON; BRONNVALL, 1988). Os quatro tipos de grampos de suspensão são apresentados na Figura 2 e descritos abaixo.

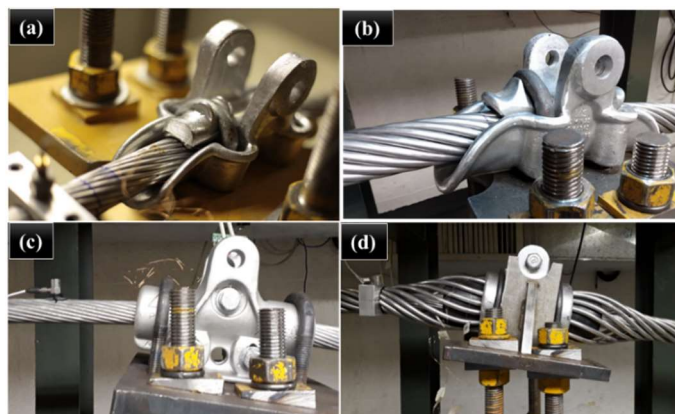


Figura 2 – Grampos de suspensão: (a) Metálico; (b) Metálico com armadura; (c) Elastomérico; (d) HAES.

- Grampo de suspensão metálico: é um grampo de alumínio liga em que o cabo é acomodado no corpo do grampo e fixo por meio de uma telha na parte superior que é travada utilizando-se de parafusos no formato de U. O corpo do grampo possui uma geometria com ângulo de saída em suas extremidades para minimizar a tensão de flexão estática devido a flecha do condutor no vão. Este tipo de grampo de suspensão oferece a menor proteção contra fadiga devido a vibração do cabo. Na montagem com este tipo de grampo, existe um alto carregamento compressivo imposto ao condutor na região de aparafusamento do grampo, o que pode causar danos ou endentações e, além disto, a amplitude de vibração tende a ser maior, uma vez que o condutor não possui armadura pré-formada.
- Grampo de suspensão metálico com armadura pré-formada: este grampo é idêntico ao grampo metálico, porém com a adição de varetas pré-formadas ao longo da região do grampo. As varetas pré-formadas são fios no formato helicoidal que são colocados em volta do cabo condutor para aumentar a rigidez do cabo. As varetas atuam aumentando a região onde as forças compressivas são distribuídas. Além disto, a camada extra de fios em volta do cabo, aumenta a capacidade de amortecimento do sistema, por meio da fricção entre os fios da armadura e do cabo condutor.
- O grampo de suspensão elastomérico: este grampo tem como característica principal o material elastomérico que é a parte do grampo que faz o contato com o cabo. Essa configuração permite que o cabo condutor não sofra danos ou endentações devido ao esforço compressivo e que a tensão de flexão dinâmica seja reduzida, uma vez que este grampo permite que condutor vibre dentro da região acolchoada do grampo.
- No grampo de suspensão armado ou HAES (da sigla em inglês) assim como no grampo elastomérico, a parte do grampo que faz contato com o cabo condutor é feita de elastômero e como diferencial conta com a adição de varetas de alumínio pré-formadas. Este grampo oferece o maior nível de proteção contra a fadiga de cabos, uma vez que ele une as principais vantagens do grampo de suspensão elastomérico e as varetas pré-formadas. A desvantagem deste tipo de grampo é o seu custo elevado e instalação mais complexa, quando comparado com os demais grampos.

2.2 Bancada Experimental

Os testes foram conduzidos nas bancadas do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da Universidade de Brasília. Um esquema da bancada é apresentado na Figura 3, enquanto mais detalhes podem ser encontrados em no artigo produzido por Fadel et al. (2012).

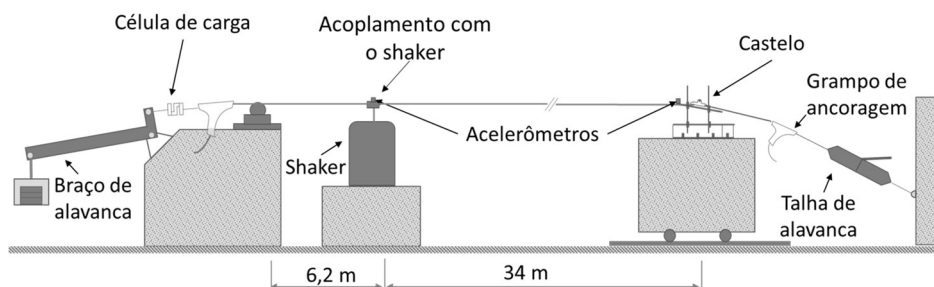


Figura 3 – Esquema da bancada de vibração em cabos condutores

2.3 Instrumentação do ensaio

Dois tipos de sensores foram utilizados para avaliar a severidade da tensão de flexão em função do deslocamento: acelerômetros e extensômetros. O primeiro foi empregado para o controle e monitoramento do deslocamento enquanto o segundo mede a deformação nos fios no condutor para então calcular a tensão de flexão. A posição de montagem dos sensores foi escolhida a partir de recomendações do CIGRÉ (1985) e do IEEE (2006).

Os acelerômetros foram posicionados a 89 mm do Último Ponto de Contato entre o cabo e grampo de suspensão (UPC), no caso dos grampos metálico, elastomérico e metálico com armadura – o deslocamento medido nesta posição é denominado Y_b (Ver Figura 1). Já o acelerômetro montado no grampo HAES (mede o deslocamento Y_c) é posicionado no primeiro ponto de contato entre o cabo e as varetas da armadura pré-formada, conforme indicado na Figura 4.

Os extensômetros são colados nos fios do cabo condutor sempre nos locais onde espera-se as maiores tensões de flexão. No caso do grampo metálico, metálico com armadura e elastomérico a posição crítica em relação à tensão de flexão é o ponto diametralmente oposto ao UPC. Por conta da restrição de movimento imposta pelo grampo, nessa posição, existe um aumento concentrado da curvatura do condutor que induz as máximas tensões de flexão nos fios do cabo.

Já o grampo HAES, possui uma geometria construtiva mais complexa, o que faz com que ele tenha duas posições críticas: o UPC entre o cabo e o elastômero e a borda do invólucro metálico do corpo do grampo. Nestas duas posições ocorrem uma limitação do movimento transversal que eleva a tensão de flexão.

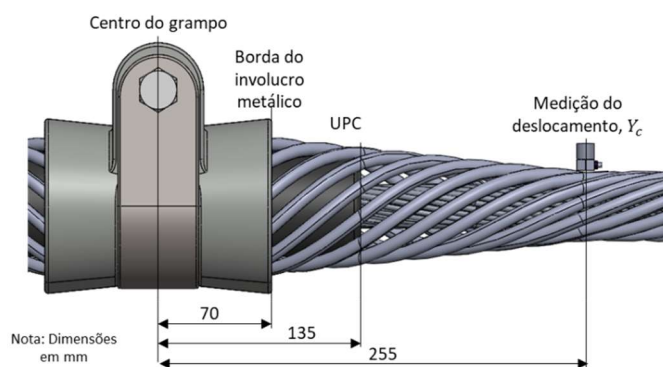


Figura 4 – Ilustração do grampo AGS

2.4 Execução do ensaio

O condutor é tracionado na bancada experimental com carga equivalente a 20% da RMC. A montagem cabo/grampo é feita de forma que exista um ângulo de 10° entre a horizontal e o grampo de suspensão, para simular o ângulo de saída real do cabo em uma linha de transmissão.

O condutor então é excitado por um *shaker* eletromecânico de forma a simular a ação do vento. As condições de vibração controladas durante o ensaio são a frequência e a amplitude de vibração. Como já mencionado, tais condições são monitoradas em um ponto próximo ao grampo de suspensão e por meio de acelerômetros. Na execução dos ensaios foi adotado uma frequência nominal de 24 Hz, enquanto a amplitude de vibração foi variada de forma a corresponder as amplitudes de vibração que podem ser observadas em campo.

3.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaios de Vibração – Amplitude de deslocamento *vs.* Tensão de Flexão

Nessa seção são apresentados e analisados os resultados das medições das tensões de flexão dinâmica. Os resultados dos ensaios do condutor CA/1120 823 MCM montado em diferentes configurações de grampos suspensão são apresentados na Figura 5. Nesses gráficos as relações entre a tensão de flexão, σ_a , e a amplitude de deslocamento (Y_b ou Y_c) foram estimadas com base em medições com extensômetros, e são comparadas com a tensão prevista pela fórmula de Poffenberger-Swart, Equação (1). Os resultados obtidos a partir das medições realizadas com extensômetros são apresentadas na forma de símbolos e a linha de tendência que melhor ajusta esses resultados é representada pela linha pontilhada, enquanto que os resultados estimados por meio da fórmula de Poffenberger-Swart (P-S) são representados por linha cheias.

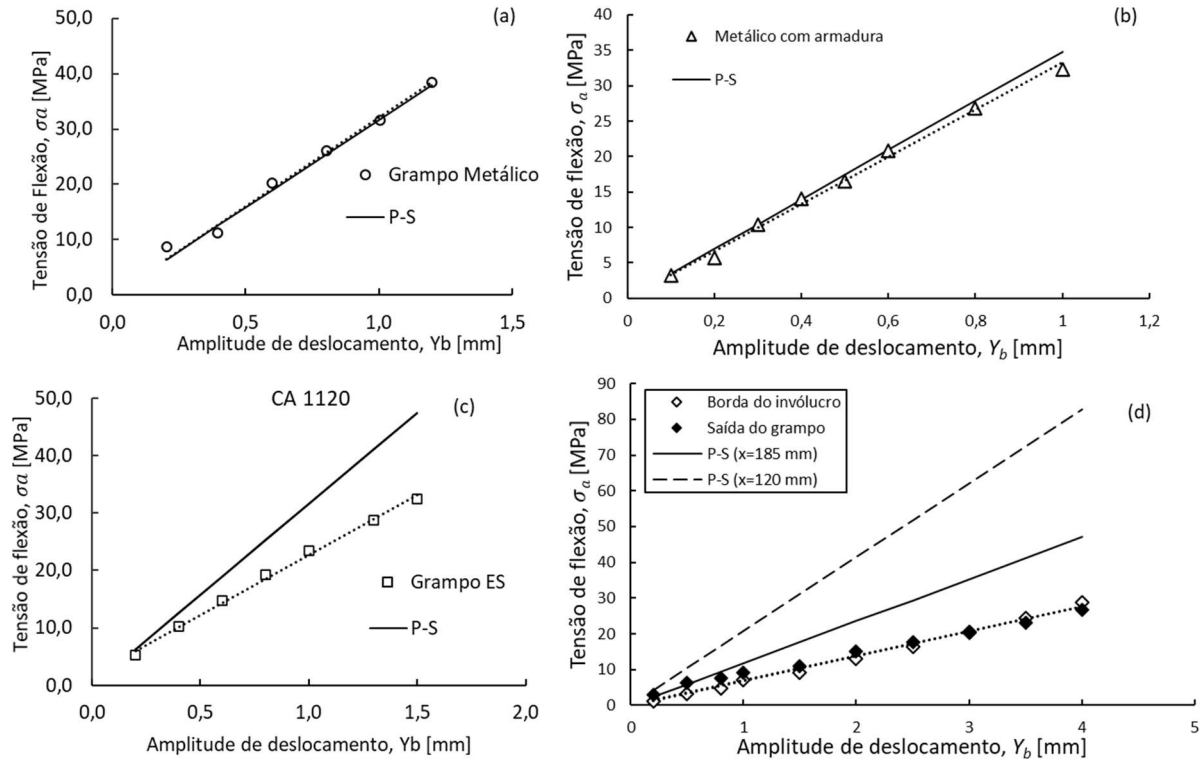


Figura 5 - Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento do condutor CA 1120 montado nos grampos: (a) Metálico; (b) Metálico com armadura; (c) Elastomérico; (d) HAES.

Os dados obtidos do ensaio dinâmico para o grampo metálico apontaram que a formulação de Poffenberger-Swart (P-S) é adequada para representar a relação existente entre deslocamento do condutor e a tensão de flexão nos fios do condutor. Nos ensaios realizados com armadura pré-formada, é importante observar também que a presença da armadura proveu uma pequena redução da tensão de flexão, quando comparado com a previsão da formulação de Poffenberger-Swart. Já o grampo de suspensão elastomérico atuou reduzindo significativamente as tensões de flexão em relação ao previsto pela fórmula de P-S.

Por fim, o grampo elastomérico com armadura (HAES) apresentou duas regiões críticas quanto a tensão de flexão dinâmica: a saída do grampo e a seção transversal da borda do invólucro metálico. Na Figura 5 – (d) são apresentados os resultados de medições de deformação realizados nas duas posições críticas. Os dados são comparados com o resultado previsto pela formulação de Poffenberger-Swart (P-S) calculado considerando duas posições de referências. A posição $x = 120$ mm que se refere à distância entre o ponto de medição do deslocamento e a saída do grampo, enquanto a posição $x = 185$ mm é referente à distância entre o ponto de medição do deslocamento e a seção transversal da borda do invólucro metálico (ver Figura 3). As tensões de flexão aquiritadas estiveram abaixo do previsto pela formulação de P-S, apontando que o material elastomérico atuou reduzindo a curvatura local dos fios do condutor nos pontos de medição.

Comparando a tensão de flexão nos dois pontos críticos do grampo HAES observa-se um comportamento semelhante das duas regiões. Ademais, as tensões de flexão na seção transversal da borda do invólucro foram maiores que na saída do grampo em amplitudes de deslocamento inferiores a 2,5 mm, nas amplitudes superiores a este valor a saída do grampo passou a registrar a máximas tensões de flexão.

Analisando qualitativamente a relação entre a amplitude de deslocamento e as tensões estimadas experimentalmente verifica-se que, independentemente do tipo de montagem, os dados apresentados na Figura 5 são muito bem ajustados a equação de uma reta que passa pela origem – o que mostra que a relação entre esses parâmetros é linear. Quantitativamente pode-se verificar a partir da análise de regressão dos dados experimentais

que o modelo de regressão linear com intercessão nula apresenta um coeficiente de Pearson, r , da ordem de 0,99, o que indica que o modelo linear é adequado para explicar a relação entre a amplitude de deslocamento medida próxima ao grampo e a tensão medida no fio diametralmente oposto ao último ponto de contato entre o cabo e grampo, σ_a . Com base nessa mesma análise pode-se obter tanto o valor esperado da constante de proporcionalidade, $K_\varepsilon(Y_b)$, que correlaciona a tensão de flexão (medida experimentalmente) com o deslocamento do condutor; bem como os limites do intervalo de confiança considerando um nível de significância de 5%. Os valores supracitados são reportados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo da análise de regressão linear dos dados experimentais do condutor CAL/1120 823 MCM (Modelo de regressão: $\sigma_a = K_\varepsilon Y_{b/c}$)

Grupo de suspensão	Coeficiente Angular, $K_{\varepsilon}(Y_b)$ (MPa/mm)			Coeficiente de Pearson (r)
	Média	Limites do Intervalo de Confiança (95.0%)		
		Inferior	Superior	
Metálico ¹	32,14	30,36	33,93	0,99
Metálico com armadura ¹	30,19	29,46	30,93	0,98
Elastomérico ¹	22,63	21,50	23,75	0,99
HAES (Saída) ²	6,873	6,551	7,194	0,99
HAES (Borda do invólucro) ²	6,921	5,214	8,627	0,99

¹ Coeficiente angular para deslocamento medido a 89 mm do UPC entre o cabo e o grampo (Y_b)

² Coeficiente angular para deslocamento medido no primeiro ponto de contato entre o cabo e a armadura (Y_c)

3.2 Correção do fator de correlação de P-S (K_{Yb} e K_{Yc}) para grampos elastoméricos e com armadura

Como exposto na seção anterior a formulação proposta por Poffenberger-Swart (P-S) se adequa apenas ao grampo de suspensão metálico com ou sem armadura. Em caráter investigativo, duas abordagens foram propostas para melhorar a correlação da predição de P-S da tensão de flexão em função do deslocamento. As abordagens consistem em considerar o efeito do material elastomérico e a presença da armadura pré-formada no cálculo das tensões.

No caso específico do grampo HAES, existe uma recomendação do CIGRÉ (1995) que define o distância x como sendo a distância entre o ponto de medição do deslocamento e o centro do grampo de suspensão (o que equivale à metade da região acolchoada), criando assim um comprimento efetivo, nomeado aqui por x' . A recomendação do CIGRÉ foi extrapolada para o grampo de suspensão elastomérico, para este o ponto de referência para a distância do braço de alavanca x é considerado como sendo a metade do comprimento do material elastomérico. A Figura 6 ilustra a distância a ser considerada como comprimento efetivo para os grampos elastomérico e HAES.

A adequação da formulação de P-S para grampos com armadura pré-formada foi avaliada a possibilidade de realizar um incremento na rigidez do condutor, o qual passaria a ser equivalente a soma da rigidez mínima da armadura somada à rigidez do condutor. Dessa forma a Equação (4) se torna:

$$EI_{min} = (n_v d_v^4 + n_f d_f^4) \frac{E\pi}{64} \quad (5)$$

onde n_v e d_v são o número de varetas pré-formadas e o diâmetro das varetas, respectivamente e n_f e d_f o número de fios e o diâmetro dos fios do condutor respectivamente.

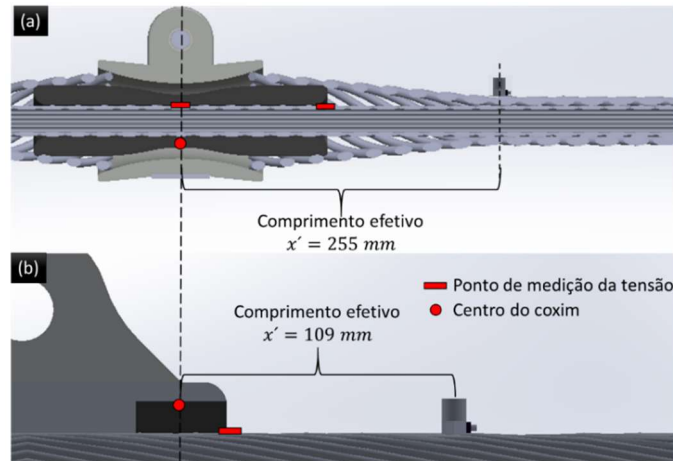


Figura 6 - UPC virtual entre o cabo e grampo considerado como sendo a metade do comprimento do material elastomérico. (a) Grampo AGS e (b) Grampo elastomérico.

Um novo cálculo do fator de correlação de Poffenberger-Swart (P-S) foi feito considerando as duas abordagens supracitadas e os resultados são apresentados na Tabela 2.

O coeficiente angular da regressão linear dos ensaios de dinâmicos apresentados na Tabela 1 representam as correlações entre a tensão de flexão dinâmica obtida experimentalmente, $\sigma_a(\varepsilon)$, e a amplitude de deslocamento, Y_B ou Y_c . Por conta disso, o coeficiente angular do ensaio dinâmico desempenha o papel do fator de correlação experimental, K_ε , que é comparado com o fator de correlação de P-S ajustado ($K'_{Yb/c}$) de acordo com as hipóteses mencionadas nesta seção. Vale ressaltar que como o grampo HAES possui duas posições críticas em relação a tensão deflexão, os pontos utilizados para gerar o coeficiente de correlação experimental para este grampo foram sempre os que apresentaram as maiores tensões para o deslocamento prescrito.

Os valores de K_ε e $K'_{Yb/c}$ ajustado são reportados na Tabela 2 para as montagens com o condutor CA 1120. Os parâmetros utilizados para o ajuste da constante de P-S, $K_{Yb/c}$, para cada condição de montagem, são mencionados nos rodapés das tabelas.

Tabela 2 – Fator de correlação de P-S (K'_{Yb} e K'_{Yc}) ajustado para grampos elastoméricos e com armadura pré-formada

Grampo	Condição	Fator de correlação experimental, $K_\varepsilon(Y_{b/c})$ (MPa/mm)	Fator de correlação de P-S ajustado, $K'_{Yb/c}$ (MPa/mm)	Sem ajuste $\left(\frac{K_\varepsilon - K_{Yb/c}}{K_\varepsilon}\right)$ [%]	Ajustado $\left(\frac{K_\varepsilon - K'_{Yb/c}}{K_\varepsilon}\right)$ [%]
Metálico	(1)	32,14 ($\pm 1,78$)	31,64	-1,6	-1,6
Metálico com armadura	(1)	30,19 ($\pm 0,73$)	31,64	-4,8	-4,8
Metálico com armadura	(2)	30,19 ($\pm 0,73$)	21,76	-4,8	27,9
Elastomérico	(3)	22,63 ($\pm 1,12$)	23,65	-39,8	-4,5
HAES	(4)	7,24 ($\pm 0,41$)	7,99	-185,9	-10,4
HAES	(5)	7,24 ($\pm 0,41$)	4,10	-185,9	43,3

(1) Condição sem nenhum ajuste: $EI_{min} = 2,586 \times 10^7 \text{ N.mm}^2$ e $x = 89 \text{ mm}$.

(2) Considerando a rigidez da armadura: $EI_{min} = 1,818 \times 10^8 \text{ N.mm}^2$ e $x = 89 \text{ mm}$.

(3) Comprimento efetivo em relação ao centro do elastômero: $x' = 109 \text{ mm}$.

(4) Sem considerar a rigidez da armadura, $EI_{min} = 2,586 \times 10^7 \times 10^8 \text{ N.mm}^2$ e comprimento efetivo em relação ao centro do grampo, $x' = 255 \text{ mm}$.

(5) Considerando a rigidez da armadura, $EI_{min} = 1,688 \times 10^8 \text{ N.mm}^2$ comprimento efetivo em relação ao centro do grampo, $x' = 255 \text{ mm}$.

Avaliando as diferenças relativas entre K_ε , $K_{Yb/c}$ e $K'_{Yb/c}$ para os grampos com material elastomérico, nota-se que a adequação do comprimento efetivo sendo a distância entre o ponto de medição do deslocamento e o centro do

material elastomérico resultou em uma melhoria significativa da previsão da tensão de flexão pela formulação P-S, corroborando com a recomendação do CIGRÉ (1995).

Por outro lado, a correção da rigidez a flexão considerando a rigidez da armadura pré-formada, originou erros superiores do que quando é considerado a constante de correlação $K_{yb/c}$ sem ajuste. A correção da rigidez, além de aumentar o erro, subestimou os valores de tensão, o que leva a uma análise não-conservativa do problema.

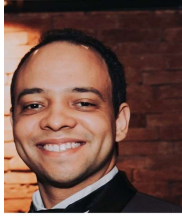
4.0 CONCLUSÃO

Os dados apresentados neste trabalho confirmaram e quantificaram a redução da tensão de flexão dinâmica, nos pontos de medição, para os grampos fabricados com material elastomérico, quando comparados com grampos metálicos. Os resultados alcançados possibilitam que medições de vibração em linhas de transmissão possam ser correlacionados com a tensão de flexão, por meio de fatores de correlação experimental para posteriormente serem utilizados em modelos de previsão da vida em fadiga de cabos condutores. Além disso, para casos onde não existam dados experimentais, uma abordagem analítica para a correlação entre tensão e deslocamento é sugerida e discutida ao final do trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- (1) BARBER, K. W.; CALLAGHAN, K. J. Improved overhead line conductors using aluminium alloy 1120. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 1, p. 403–409, 1995.
- (2) BRUNAIR, R. M.; ED RAMEY, G. E.; DUNCAN, R. R. An Experimental Evaluation of S-N Curves and Validity of Miner's Cumulative Damage Hypothesis for an ACSR Conductor. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, n. 3, p. 1131–1140, 1988.
- (3) CIGRÉ. Guide for endurance tests of conductors inside clamps. Electra, v. WG 22.04, p. 78–86, 1985.
- (4) CIGRÉ. Guide to Vibration Measurements On Overhead Lines. Électra, v. 162, n. Task Force 2 of Working Group 11 of Study Committee 22, 1995.
- (5) CIGRÉ SC 22 WG 04. Recommendations for the Evaluation of the Lifetime of Transmission Line Conductors. Electra, v. 63, p. 103–145, 1979.
- (6) CIGRÉ SC 22 WG 04. Endurance Capability of Conductors. Electra, v. Final Repo, p. 18 pages, 1988.
- (7) EPRI. Transmission Line Reference Book: wind-induced Conductor Motion. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 2006.
- (8) 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, v. 42, p. 24–34, 2012.
- (9) IEEE. Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors, Std 1368™-2006. New York
- (10) MCGILL, P. B.; RAMEY, G. E. Effect of Suspension Clamp Geometry on Transmission Line Fatigue. Journal of Energy Engineering, v. 112, n. 3, p. 168–184, 1986.
- (11) MINER, M. A. Cumulative Damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics, v. 12, p. A159–A164, 1945.
- (12) PETTERSSON, A. R.; BRONNVALL, W. AI 59-a Swedish standard for overhead aluminium alloy conductors with 59% conductivity (IACS). 1989 International Conference on Overhead Line Design and Construction: Theory and Practice. Anais...London, UK: 1988
- (13) POFFENBERGER, J. C.; SWART, R. L. Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 84, n. 4, p. 281–289, abr. 1965.
- (14) SANDBERG, S. A new transmission-line suspension clamp. Electrical Engineering, v. 69, n. 5, p. 410–410, 1949.
- (15) TEBO, G. B. Measurement and control of conductor vibration. Transactions AIEE Power Apparatus and Systems, v. 60, p. 1188–1193, 1941.

DADOS BIOGRÁFICOS



(1) THIAGO BARBOSA DE MIRANDA

Engenheiro Mecânico (UnB, 2014) com experiência em comportamento mecânico e vibratório de cabos condutores e acessórios para linhas de transmissão. Com mestrado e doutorado na área obtidos por meio da participação em dois projetos de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica da ANEEL, vinculados à Taesa e ao grupo TBE.

(2) REMY KALOMBO BADIBANGA

Remy Kalombo Badibanga é Doutor em Engenharia Mecânica e Pesquisador da Universidade de Brasília. Desde julho de 2019, atua como pesquisador e pós-doutorado do Programa de Pós Graduação em Ciências Mecânicas da Universidade de Brasília e vem desenvolvendo projeto de pesquisa. Publicou os artigos científicos em periódicos de alto fator de impacto e em anais de eventos científicos nacionais e internacionais. Possui maior experiência em projetos de pesquisa relacionados à transmissão de linhas de energia e cerca de 30 citações em sua produção científica, sendo o fator H-5 de acordo com a base Scopus.

(3) JORGE LUIZ DE ALMEIDA FERREIRA

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal Fluminense (1990), mestrado em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1993) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1997). Atua como professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília desde 1998. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Análise de Tensões, atuando principalmente nos seguintes temas: fadiga, elementos finitos, análise experimental de tensões, análise de tensões e confiabilidade estrutural.

(4) JOSÉ ALEXANDER ARAÚJO

Professor Associado 1 na Universidade de Brasília (UnB). Concluiu o doutorado pela Universidade de Oxford (2000) na área de Fadiga de Materiais, o Mestrado em Fadiga Multiaxial na UnB (1996) e a graduação em Engenharia Mecânica na Universidade Federal de Uberlândia (1994). Membro afiliado da Academia Brasileira de Ciências e recebeu o prêmio UnB de pesquisa na área de Ciências Exatas e Engenharias na categoria jovem cientista (até 10 anos de atuação como doutor). Professor Araújo desenvolve grande parte de seus trabalhos de pesquisa na área de modelagem e na realização de ensaios de fadiga em cabos condutores de energia.