

ESTUDO EXPERIMENTAL DA AMPLITUDE DE FLEXÃO EM CABOS CONDUTORES DE ENERGIA COM GRAMPO CGS

Mayara Gabi Moreira, mayaragabimoreira05@gmail.com¹

Gabriel Santos da Costa Pinto, gsdc94@gmail.com¹

Thiago Barbosa de Miranda, thiago_enm@hotmail.com¹

José Alexander Araújo, alex07@unb.br¹

Jorge Luiz de Almeida Ferreira jorge@unb.br¹

Luis Augusto Conte Mendes Veloso, lveloso@unb.br¹

¹ Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília-DF, CEP 70910-900

Resumo: Os cabos condutores de energia são os principais elementos de uma linha de transmissão. A ruptura dos cabos pode causar interrupção de energia elétrica, cuja principal causa é a fadiga, causada pelas tensões mecânicas induzidas pelo vento. Esses cabos tradicionalmente são sustentados nas torres de energia por grampos metálicos monoarticulados, onde há elevadas tensões de aperto do cabo no grampo e contato mecânico da superfície do grampo com o cabo, fazendo com que a região do cabo próxima ao grampo seja a mais suscetível à ruptura dos fios. No mercado há outras opções de grampos que possuem elementos elastoméricos reduzindo essas tensões, tais como o AGS (grampo de suporte armado) e o CGS (grampo de suspensão cushion-grip). Entretanto, os dados sobre o desempenho de cabos montados com esses grampos à fadiga, bem como do comportamento mecânico do conjunto são escassos. Esse artigo visa avaliar as tensões mecânicas de flexão no cabo com grampo CGS. Para isso, foram realizados ensaios com cabos Cal 1120 MCM 823 e Cal 6201 MCM 900 os quais foram montados nesse tipo de grampo. Os testes de vibração em laboratório foram realizados com diferentes cargas de tração e amplitudes de flexão variando de 0,2 mm a 1 mm. Foram medidas as deformações nos cabos, utilizando-se extensômetros elétricos, e os deslocamentos a partir dos dados gerados por acelerômetros. Para análise dos resultados foram consideradas abordagens que utilizam a amplitude de flexão (Y_b), bem como o deslocamento do primeiro antinó (Y_{max}). Os resultados mostram que a metodologia mais apropriada para análise de tensão é a baseada na amplitude de flexão através da equação de Poffenberger. Nesse caso, observou-se que a diferença entre as tensões medidas e calculadas analiticamente cresce com o aumento da amplitude de flexão e a equação de Poffenberger tende a superestimar as tensões no cabo.

Palavras-chave: cabos condutores, grampo CGS, amplitude de flexão

1. INTRODUÇÃO

Submetidas ao inevitável efeito do vento, as linhas de transmissão de energia sofrem vibrações, as quais geralmente são na direção vertical e sua intensidade aumenta com a velocidade do vento e varia com o diâmetro do cabo. Esses efeitos dinâmicos podem gerar falhas no cabo condutor em pontos específicos da linha, tais como no local do grampo de suspensão. Nesse local, o condutor suporta uma grande carga estática de tração na direção axial, UTS, que corresponde a cerca de 20% da tensão de ruptura, uma carga variante cíclica de flexão que provoca curvatura nele e uma força de aperto exercida pelo grampo, sendo que o torque do parafuso do grampo pode gerar deformação plástica no fio caso tenha uma magnitude alta (Ramey e Townsend, 1981 e Gomes, 2015).

Os cabos condutores são feitos de alumínio e sua estrutura é composta por várias camadas de fios enrolados em forma helicoidal. Assim, há atrito entre os fios que estão em contato, sendo que cada fio está em contato com outros dois da mesma camada e com todos das camadas anterior e posterior adjacentes. Somado isso às cargas que ele suporta, na região do grampo de suspensão, a maior causa de falhas nos condutores é a fadiga, especificamente por *fretting*, que é uma falha nos contatos entre os fios e o grampo devido às forças de atrito combinadas com o movimento relativo dos fios do cabo (EPRI, 2006). Desta forma, o conhecimento a respeito da influência do grampo no nível das cargas no condutor é expressivo, visto que ele é um dos componentes mais importantes na transmissão de energia, que representa cerca de 40% do custo de investimento na rede e que uma falha inesperada no mesmo gera consequências diversas para a população de destino dessa eletricidade (Maduro-Abreu *et al.*, 2010).

Diversos estudos que visavam caracterizar o comportamento e as cargas do condutor na região do grampo de suspensão já foram realizados. Por exemplo, McGill *et al.* (1986) observaram que quanto maior o raio de curvatura do grampo de suspensão menor a tensão medida e, consequentemente, maior era a resistência à fadiga da montagem. No

entanto, os estudos em grampos que não possuem raio de curvatura, tal como o grampo de Suspensão CUSHION-GRIP (CGS) são escassos. Esse grampo, além de não possuir raio de curvatura nas extremidades, contém coxins de elastômeros na entrada e saída, que minimizam tensões de flexão nos condutores em locais críticos de entrada. A Figura 1 apresenta uma ilustração desse grampo.

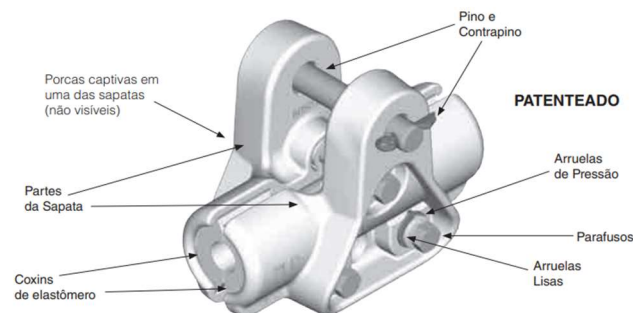


Figura 1. Grampo de Suspensão CUSHION-GRIP.

Com o intuito de avaliar as tensões mecânicas de flexão em condutores montados em grampos CGS, foram realizados ensaios com os cabos Cal 1120 MCM 823 e Cal 6201 MCM 900, aplicando diferentes níveis de tração e amplitudes de flexão. Para isso, foram medidas as tensões mecânicas empregando extensômetros e acelerômetros, e os resultados foram comparados com as tensões analíticas calculadas segundo três abordagens distintas.

Com isso, o presente trabalho primeiramente introduz o tema, em seguida, nos capítulos dois e três, apresenta as referências teóricas. Depois, no capítulo quatro, os experimentos são explicados e, no capítulo cinco, os resultados deles são mostrados e analisados. Por fim, o capítulo seis conclui o artigo.

2. A INFLUÊNCIA DO GRAMPO DE SUSPENSÃO NO CONDUTOR

Diversos estudos que investigam a influência da curvatura do grampo de suspensão no condutor já foram realizados. Sandberg (1950) supôs que o condutor é forçado a assumir a curvatura do seu grampo de suspensão devido ao “peso morto” do condutor no suporte. McGill *et al.* (1986), a partir da relação momento-curvatura da teoria de elasticidade e sabendo o raio de curvatura do grampo usados em seus testes, conseguiu determinar a tensão de flexão estática no cabo. Com isso, seus resultados mostraram que quanto menor o raio de curvatura da base longitudinal do grampo, maior é a tensão estática para ângulos de curvatura diferentes de zero, sendo essa tensão pouco influenciada pela tensão da linha de transmissão. Consequentemente, o raio de curvatura é o maior contribuinte no nível de deformação estática na região do grampo.

Em relação ao comportamento dinâmico, os testes feitos por McGill *et al.* (1986) indicaram que a deformação dinâmica também varia inversamente com o raio de curvatura do grampo. Assim, quanto menor o raio de curvatura, maiores são as deformações dinâmicas do cabo condutor nessa região e, portanto, o desempenho e a vida em fadiga diminuem.

Cardou *et al.* (1990) realizou um novo sistema para testar a resistência à fadiga dos condutores. Sobre a influência do grampo nos danos a fadiga, as rupturas tendem a ocorrer com mais frequência na região superior do condutor em contato com o grampo, sendo que a maioria das falhas ocorreu entre a borda de proteção e o último ponto de contato. Outro estudo realizado por Cardou *et al.* (1993), empregando um grampo instrumentado, constatou que as cargas máximas ocorrem no último ponto de contato do grampo com o condutor. Além disso, medindo as deformações da superfície do condutor na região do grampo, foi encontrado um comportamento de viga engastada entre a carga e o centro do grampo e flexão em placa na região inferior do grampo. Ademais, seus estudos dizem que, com o aumento no ângulo de curvatura, o contato se aproxima de um estado de *conformal contact* e a curvatura do condutor passa a ser controlada apenas pela curvatura do grampo.

Nos estudos realizados por Goudreau *et al.* (2010a) e Goudreau *et al.* (2010b), foram feitas medições de deformação durante testes de fadiga. Primeiramente, foi evidenciado que, assim como em outros artigos citados, o aumento do raio de curvatura do grampo diminui as deformações alternadas no condutor para um grampo genérico. Além disso, os experimentos mostram que a rigidez à flexão do condutor é variável com a posição circunferencial dos fios medidos ao longo do condutor até alcançar o ponto onde os fios cortados recuperam a força de tração próxima à nominal. Ademais, quando há um raio de curvatura uniformemente alternado, a deformação normal alternada diminui no momento em que ocorre algum deslizamento entre o fio da camada externa e a camada adjacente interna, de acordo com uma função diferente dependendo do tipo de lei de atrito (Goudreau *et al.*, 2010a).

Lalonde *et al.* (2018) propôs uma representação 3D do condutor juntamente com o grampo. Como resultado da simulação numérica realizada pelos autores, o aumento de Y_b gera acréscimo na amplitude de tensão, e o fio da camada mais externa é o mais solicitado. Além disso, seus estudos apontam que a saída do grampo é o local onde o condutor sustenta significativamente as tensões, e suporta as maiores tensões de flexão entre a borda da parte superior do grampo (KE) e o último ponto de contato (LPC).

Quanto aos outros parâmetros do grampo, a combinação da tensão do condutor e da tensão aplicada pelo grampo no cabo devido ao torque do parafuso do grampo geram deformações no condutor. Ramey e Townsend (1981) mostraram que há altos níveis de deformação da região da base superior do grampo. Além disso, evidenciaram que o aumento da área do suporte gera uma redução nessa deformação. De acordo com Xinze *et al.* (2013), conforme a força de aperto no grampo aumenta há acréscimo na área com tensão de contato, e a diminuição da tensão seccional faz com que a pressão da área de contato seja reduzida.

Em todos esses estudos, foram considerados grampos com raios de curvatura maiores que zero. No entanto, os Grampos de Suspensão CUSHION-GRIP não possuem raio de curvatura, que teoricamente proporciona grandes deformações no condutor principalmente no último ponto de contato. Mas, segundo o fabricante, esses grampos são projetados para reduzir tensões dinâmicas e estáticas no ponto de suspensão, a fim de diminuir os efeitos das oscilações dinâmicas, sendo o que protege o condutor contra abrasão, desgaste e fadiga são os coxins de elastômeros que o envolve, item que reduz a tensão de flexão em mais de 50%.

3. TENSÃO MECÂNICA E DEFLEXÃO DO CONDUTOR

A respeito da relação entre a deflexão do condutor e a tensão de flexão no fio, Poffenberger e Swart (1965) desenvolveram uma formulação analítica que permite determinar a tensão de flexão no fio mais distante do eixo do cabo, em função da amplitude de flexão Y_b , definido como deslocamento de pico a pico medido a 89 milímetros do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, Eq. (1). A expressão proposta depende da carga de tração no cabo e da rigidez à flexão do condutor, cujo valor convencionado é o seu valor mínimo, isto é, quando todos os fios do cabo fletam em relação aos seus próprios eixos.

$$\sigma_{a,ps} = \frac{E_a d_a p^2}{4(e^{-p} - 1 + px)} Y_b \quad (1)$$

$$p^2 = \frac{H}{EI_{min}} \quad (1.1)$$

onde E_a é o módulo de elasticidade de Young do material do fio da camada externa (N/mm^2), d é o diâmetro do fio da camada externa (mm), H carga de tração do condutor durante o período de teste (N), EI soma da rigidez de flexão de fios individuais em o cabo (N/mm^2) e x é a distância do ponto de medição até o último ponto de contato entre o grampo e o condutor.

A tensão mecânica também pode ser calculada através do deslocamento do nó, y_{max} , como uma alternativa a medição de do parâmetro Y_b . Nesse caso, a tensão de flexão pode ser expressa pela Eq. (2) (Goudreau *et al.*, 2010a),

$$\sigma_{a,(f,y_{max})} = \pi d E_a \sqrt{\frac{m}{EI_{min}}} f y_{max} \quad (2)$$

sendo E_a o módulo de elasticidade de Young do material do fio da camada externa (N/mm^2), d o diâmetro do fio da camada externa (mm), f é a frequência do movimento (Hz), m é a massa do condutor por unidade de comprimento (kg/m) e EI é a soma das rigidezes de flexão de fios individuais no cabo (N/mm^2).

Para pequenas deflexões é de se esperar que os fios do condutor se mantenham aderidos, sem sofrer deslizamentos, comportando-se com uma seção de uma viga sólida. Nesse caso, a rigidez à flexão se aproxima de seu valor máximo, EI_{max} . Com o aumento do nível de flexão, há escorregamento entre os fios. Caso todos os fios de uma seção transversal deslizem-se entre si, o valor da rigidez à flexão se aproxima do valor mínimo, EI_{min} . Portanto, dependendo do nível de solicitação, a rigidez à flexão do condutor pode variar entre EI_{max} e EI_{min} (Papailiou, 1997).

Lévesque *et al.* (2015) apresentam a formulação para determinação da deflexão de condutores com rigidez à flexão constante ao longo do comprimento, considerando o efeito da rigidez geométrica, Eq. (3).

$$y(x) = y_{max} \left(\sin(\beta x) - \frac{\beta}{\alpha \{ \sinh(\alpha x) + \tanh(\alpha L) [\cos(\beta x) - \cosh(\alpha x)] \}} \right) \quad (3)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{H}{2EI} + \sqrt{\frac{mw_n^2}{EI} + \left(\frac{H}{2EI_{min}}\right)^2}} \quad (4)$$

$$\beta = \sqrt{-\frac{H}{2EI} + \sqrt{\frac{mw_n^2}{EI} + \left(\frac{H}{2EI_{min}}\right)^2}} \quad (5)$$

onde L é o comprimento do condutor, H é a carga de tração estática, w_n é a frequência circular, EI é a rigidez à flexão, EI_{min} é a rigidez à flexão quando todos os fios escorregam e m é a massa do condutor por unidade de comprimento.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os testes foram realizados com o intuito de estudar as tensões mecânicas nos cabos na região do grampo de

suspensão tipo CGS (Cushion Grip), bem como a configuração deformada dos cabos para diferentes níveis de amplitudes de vibração (Y_b) e cargas de tração. Foram testados dois tipos de condutores, cujos fios são constituídos por liga de alumínio 1120 e 6201. As propriedades dos cabos estão presentes na Tab. 1.

Tabela 1. **Propriedades dos condutores.**

Condutor	Liga	Formação Nº de fios x diâmetro (mm)	Diâmetro nominal (mm)	Massa Linear (kg/m)	Carga de ruptura (N)	EI (N.mm ²)	
						min	max
Cal 1120 MCM 823	Alumínio 1120	37 x 3.79	26.5	1.151	87387	$2.582 \cdot 10^7$	$1.232 \cdot 10^9$
Cal 6201 MCM 900	Alumínio 6201	37 x 3.96	27.7	1.252	131458	$3.077 \cdot 10^7$	$1.468 \cdot 10^9$

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores da Universidade de Brasília. A bancada de ensaio foi construída e projetada seguindo as recomendações de CIGRE (1985) e de Cloutier *et al.* (2008). Na Figura 2 está apresentado um desenho esquemático contendo os equipamentos utilizados. A bancada possui um vão total de aproximadamente 47 metros de comprimento, dividida em vão ativo e passivo. O vão ativo define o comprimento do cabo ensaiado, correspondendo à distância entre o centro do bloco 3 e o centro do grampo de suspensão. O vão passivo é utilizado somente para fixação do cabo. A carga de esticamento do cabo é aplicada pelo sistema de braço de alavanca, onde a carga de tração no cabo é aferida por célula de carga. As vibrações mecânicas são aplicadas por meio de um excitador eletromecânico controlado por meio de um sistema de aquisição de dados de malha fechada, empregando dois acelerômetros de controle, sendo um posicionado sobre o excitador e outro a 89 mm do grampo de suspensão, garantindo as amplitudes de flexão (Y_b) e frequências de excitação de acordo com as necessidades dos testes. Todos os ensaios foram realizados em ambiente refrigerado com controle de temperatura.

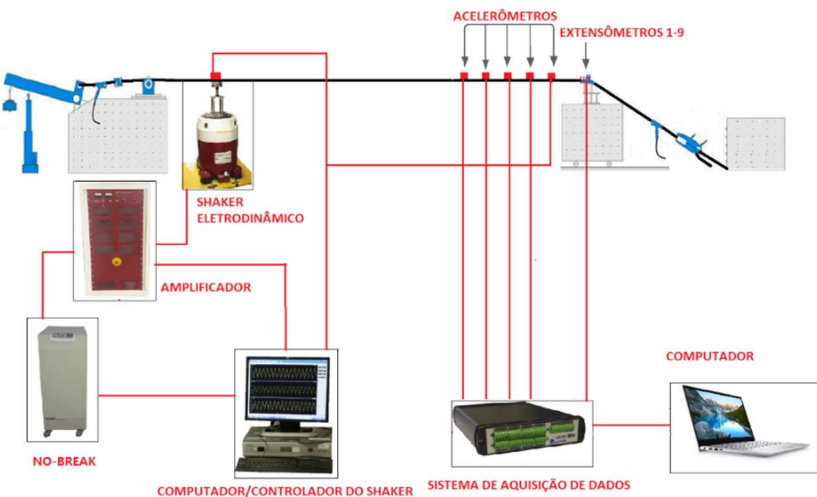


Figura 2. **Ilustração esquemática do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores da Universidade de Brasília.**

O cabo CAL 1120 foi testado para três diferentes cargas de esticamento, correspondentes a 16,5%, 22% e 27,5% da carga de ruptura à tração do cabo (UTS), enquanto o cabo CAL 6201 foi testado para as cargas de esticamento correspondentes a 15% e 20% de UTS. Foram investigadas cinco diferentes amplitudes de flexão Y_b , variando de 0,2 a 1,0 mm, Fig. 3. Todos os testes tiveram um minuto de duração a uma taxa de aquisição de 800 Hz.

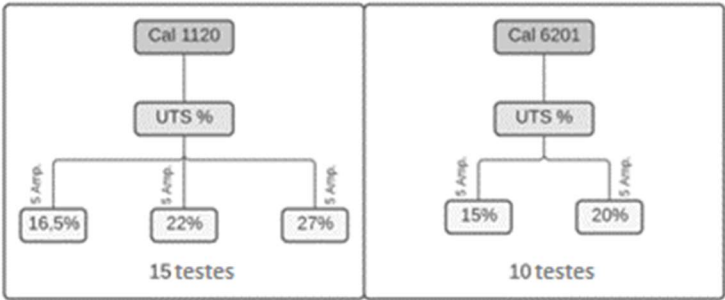


Figura 3. **Parâmetros dos testes.**

A configuração deformada do cabo foi medida através dos cinco acelerômetros instalados no primeiro loop adjacente ao grampo, Fig. 4. Para isso, o comprimento até o primeiro nó foi medido e dividido em quatro segmentos iguais, para fixação dos acelerômetros, sendo que essas distâncias variavam de acordo com o teste utilizado em função da frequência de excitação e da carga de tração aplicada no cabo, Tab. 2 e 3. O único acelerômetro mantido em posição fixa em todos os testes foi o acelerômetro 1, que dista a 89 mm da face do grampo, para medição da amplitude de flexão Y_b . O posicionamento dos acelerômetros está mostrado na Fig. 5. As deformações no cabo foram medidas em três seções transversais, no centro do grampo, na face interna do anel de elastômero e na região externa do grampo, na face externa do anel de elastômero. Em cada uma das seções transversais foram instalados três extensômetros nos fios mais distantes em relação ao eixo do cabo.

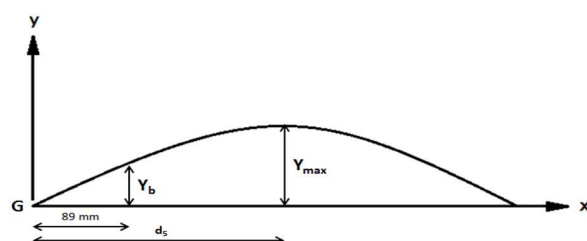


Figura 4. Comprimento do loop, Y_{max} e Y_b .

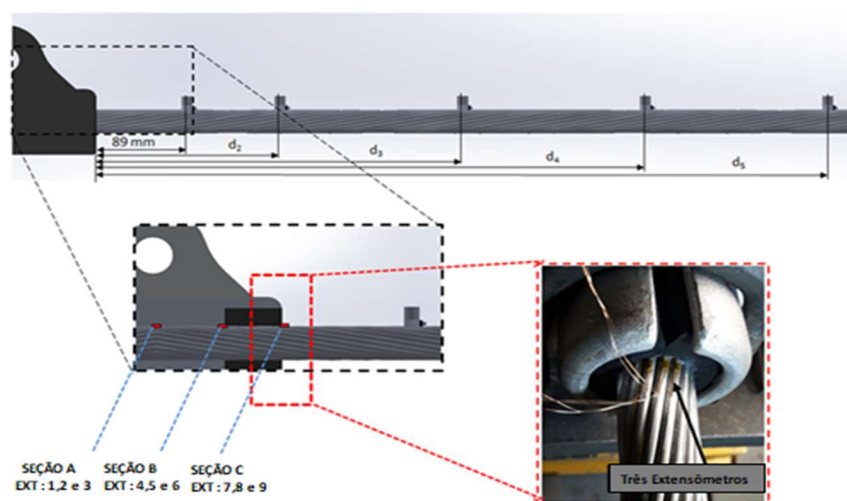


Figura 5. Localização dos extensômetros e acelerômetros.

Tabela 2. Posicionamento dos acelerômetros para condutor Cal 1120.

RTS (%)	Tração (N)	Frequência (Hz)	Acelerômetro 1 (mm)	Acelerômetro 2 (mm)	Acelerômetro 3 (mm)	Acelerômetro 4 (mm)	Acelerômetro 5 (mm)
16.5	14435	23.59	89	328	656	9841	1312
22	19241	22.56	89	385	770	1155	1540
27	23732	25.01	89	359	718	1077	1436

Tabela 3. Posicionamento dos acelerômetros para condutor Cal 6201.

RTS (%)	Tração (N)	Frequência (Hz)	Acelerômetro 1 (mm)	Acelerômetro 2 (mm)	Acelerômetro 3 (mm)	Acelerômetro 4 (mm)	Acelerômetro 5 (mm)
15	19741	21.40	89	392	785	1178	1570
20	26321	21.81	89	418	835	1253	1670

5. RESULTADOS

Nas Figuras 6 e 7 estão mostrados os diagramas das amplitudes de tensão medidas pelos extensômetros (0-Pico) em função da distância em relação ao centro do grampo, nos cabos Cal 1120 e 6201, respectivamente. Os marcadores correspondem às tensões calculadas através das medidas dos extensômetros, enquanto as linhas representam os valores médios. Em todos os testes realizados verificou-se que a seção transversal mais solicitada é a seção C, localizada na face externa do grampo.

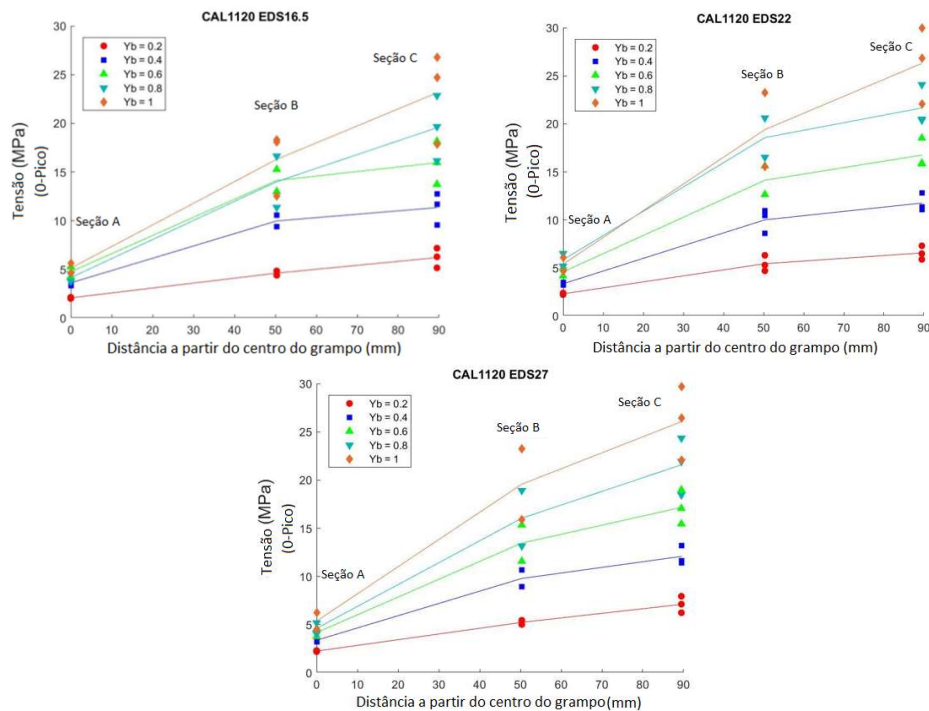


Figura 6. Amplitude média de tensão para Cal 1120.

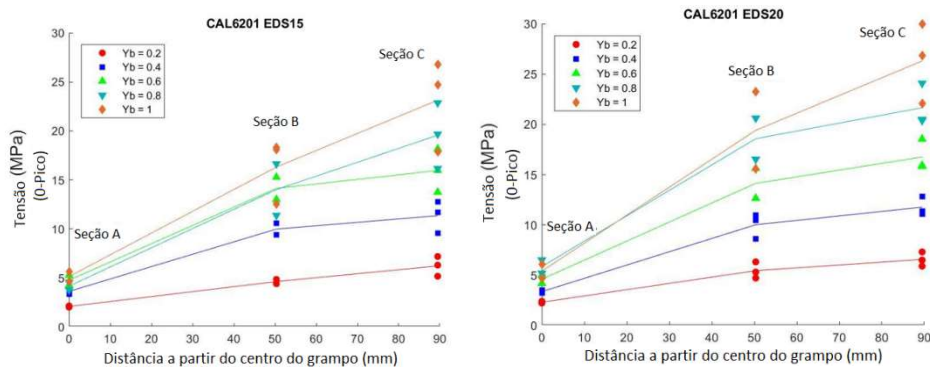
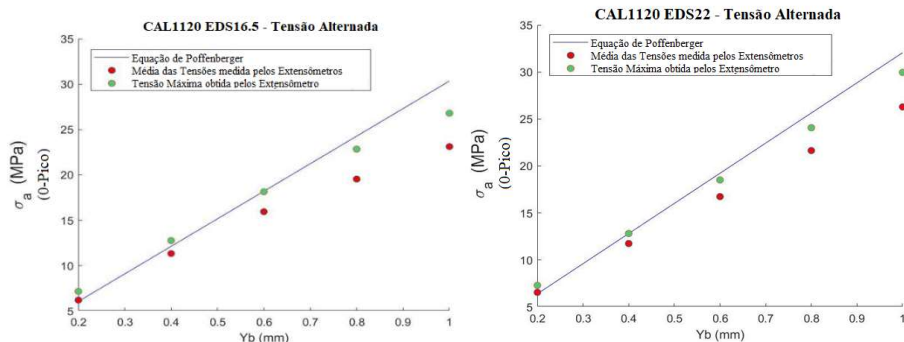


Figura 7. Amplitude média de tensão para Cal 6201.

Uma vez que as tensões máximas observadas no cabo estão localizadas na face externa do grampo, esses valores foram tomados como último ponto de contato entre o condutor e o grampo que é uma referência a ser utilizada na equação de Poffenberger. Nas Figuras 8 e 9 estão mostrados os valores médios e máximos das tensões medidas experimentalmente em função da amplitude de flexão Y_b . Para ambos os cabos testados, verifica-se que a formulação de Poffenberger fornece valores mais próximos dos valores máximos de tensão medidos do que os valores médios de tensão. Além disso, observa-se um bom ajuste entre os valores medidos e os calculados para pequenas amplitudes de flexão, porém com o aumento da amplitude de flexão, os valores calculados pela fórmula de Poffenberger tendem a superestimar a tensão no cabo.



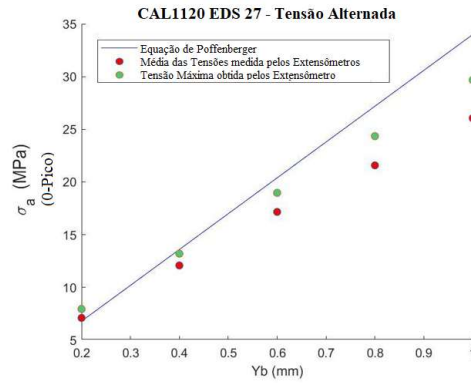


Figura 8. Tensão alternada (0-pico) em função da amplitude de flexão – Cal 1120.

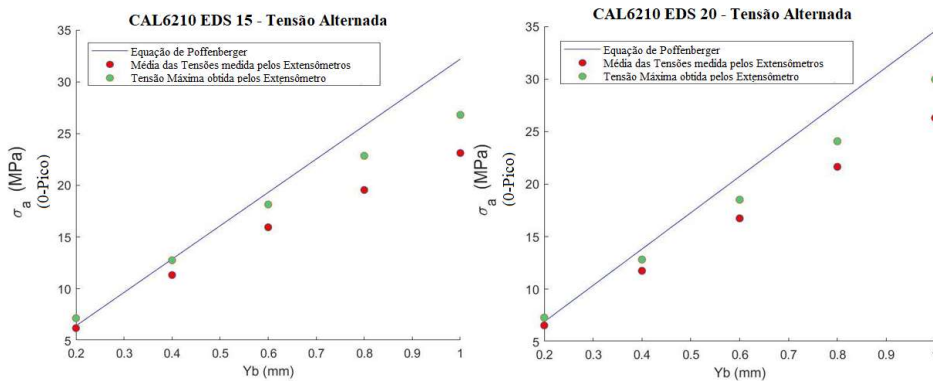


Figura 9. Tensão alternada (0-pico) em função da amplitude de flexão - Cal 6210.

As Tabelas 4 e 6 apresentam a comparação entre as tensões medidas experimentalmente e as calculadas através das formulações analíticas baseadas em Y_b e $fY_{m\acute{a}x}$ considerando rigidez à flexão máxima, $EI_{m\acute{a}x}$, e rigidez à flexão mínima, $0.3EI_{m\acute{a}x}$.

Tabela 4. Comparativo entre as abordagens de Poffenberger, $Y_{m\acute{a}x|0.3EI_{m\acute{a}x}}$ e $Y_{m\acute{a}x|EI_{m\acute{a}x}}$ para o cabo Cal 1120.

RTS (%)	Y_b (mm)	σ_{SG} (MPa)	σ_{Poff} (MPa)	$\sigma_{(f,Y_{m\acute{a}x} 0.3EI_{m\acute{a}x})}$ (MPa)	$\sigma_{(f,Y_{m\acute{a}x} EI_{m\acute{a}x})}$ (MPa)	$(\sigma_{Poff}-\sigma_{SG})/\sigma_{SG}$ (%)	$(\sigma_{(f,Y_{m\acute{a}x} 0.3EI_{m\acute{a}x})}-\sigma_{SG})/\sigma_{SG}$ (%)	$(\sigma_{(f,Y_{m\acute{a}x} EI_{m\acute{a}x})}-\sigma_{SG})/\sigma_{SG}$ (%)
16.5	0.2	7.2	6.1	2.1	7.9	-15.5	-70.8	10.5
	0.4	12.8	12.1	4.4	16.5	-4.9	-65.8	29.4
	0.6	18.2	18.2	6.6	25.0	0.3	-63.6	37.6
	0.8	22.8	24.3	8.0	30.4	6.3	-64.9	32.9
	1.0	26.8	30.3	9.6	36.1	13.2	-64.4	34.8
22	0.2	7.3	6.4	2.5	9.3	-1.3	-66.5	26.9
	0.4	12.8	12.8	4.8	18.0	0.0	-62.9	40.2
	0.6	18.5	19.2	6.7	25.4	3.8	-63.7	37.2
	0.8	24.1	25.6	8.9	33.6	6.5	-63.1	39.6
	1.0	30.0	32.1	10.8	41.0	7.0	-63.8	36.8
27	0.2	7.9	6.8	2.5	9.3	14.5	-69.1	16.9
	0.4	13.2	13.6	4.8	18.2	3.0	-63.5	38.1
	0.6	19.0	20.4	7.2	27.3	7.5	-62.0	43.8
	0.8	24.4	27.2	9.5	35.9	11.7	-61.0	47.5
	1.0	29.7	34.0	11.8	44.7	14.5	-60.2	50.6

Tabela 5. Erro quadrático médio entre as abordagens de Poffenberger, $Y_{m\acute{a}x|0.3EI_{m\acute{a}x}}$ e $Y_{m\acute{a}x|EI_{m\acute{a}x}}$ em relação aos valores obtidos por ensaio com o cabo Cal 1120.

RTS (%)	RMSE - σ_{Poff} (%)	RMSE - $\sigma_{(f,Y_{m\acute{a}x} 0.3EI_{m\acute{a}x})}$ (%)	RMSE - $\sigma_{(f,Y_{m\acute{a}x} EI_{m\acute{a}x})}$ (%)
16.5	9.8	65.9	30.6
22	4.6	64.0	36.5
27	11.2	63.2	41.2

Tabela 6. Comparativo entre as abordagens de Poffenberger, $Y_{m\acute{a}x|0.3EI_{m\acute{a}x}}$ e $Y_{m\acute{a}x|EI_{m\acute{a}x}}$ para o cabo Cal 6201.

RTS (%)	Y_b (mm)	σ_{SG} (MPa)	σ_{Poff} (MPa)	$\sigma_{(f.Y_{max} 0.3EI_{max})}$ (MPa)	$\sigma_{(f.Y_{max} EI_{max})}$ (MPa)	$(\sigma_{Poff}.\sigma_{SG})/\sigma_{SG}$ (%)	$(\sigma_{(f.Y_{max} 0.3EI_{max})}.\sigma_{SG})/\sigma_{SG}$ (%)	$(\sigma_{(f.Y_{max} EI_{max})}.\sigma_{SG})/\sigma_{SG}$ (%)
15	0.2	7.2	6.4	1.96	7.4	-10.3	-72.8	3.0
	0.4	12.8	12.9	4.01	15.2	0.9	-68.6	18.9
	0.6	18.2	19.3	6.04	22.8	6.4	-66.7	25.8
	0.8	22.9	25.8	7.33	27.7	12.7	-67.9	21.4
	1.0	26.8	32.2	8.75	33.1	20.1	-67.3	23.5
20	0.2	7.3	6.9	2.38	9.0	5.4	-67.4	23.3
	0.4	12.8	13.8	4.61	17.4	7.8	-64.1	35.9
	0.6	18.5	20.7	6.56	24.8	12.0	-64.6	34.0
	0.8	24.1	27.6	8.67	32.8	14.8	-64.0	36.2
	1.0	30.0	34.6	10.58	40.0	15.3	-64.7	33.6

Tabela 7. Erro quadrático médio entre as abordagens de Poffenberger, $Y_{m\acute{a}x|0.3EI_{m\acute{a}x}}$ e $Y_{m\acute{a}x|EI_{m\acute{a}x}}$ em relação aos valores obtidos por ensaio com o cabo CAL 6201.

RTS (%)	RMSE - σ_{Poff} (%)	RMSE - $\sigma_{f.Y_{max} 0.3EI_{max}}$ (%)	RMSE - $\sigma_{(f.Y_{max} EI_{max})}$ (%)
15	11.9	68.7	20.2
20	11.7	65.0	32.9

Nas Figuras 10 e 11 estão apresentadas as configurações deformadas dos cabos Cal 1120 e Cal 6201 medidas pelos acelerômetros para os diferentes níveis de amplitude de flexão, respectivamente. As linhas cheias representam as deflexões dos cabos calculadas através da Eq. (3), empregando-se 30% do valor máximo da rigidez à flexão dos condutores. Os resultados mostram bons ajustes entre os dados medidos e os calculados, principalmente para as regiões mais afastadas do grampo, mostrando que o valor correspondente a 30% da rigidez máxima dos cabos representa satisfatoriamente a configuração deformada dos condutores.

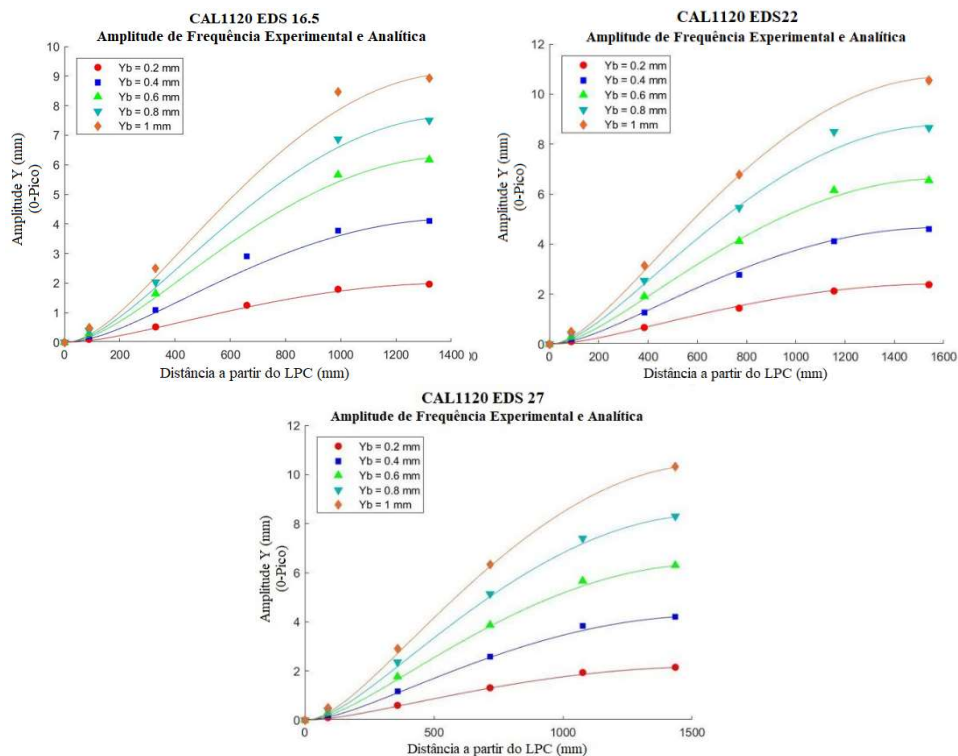


Figura 10. Configuração deformada do condutor – Cal 1120.

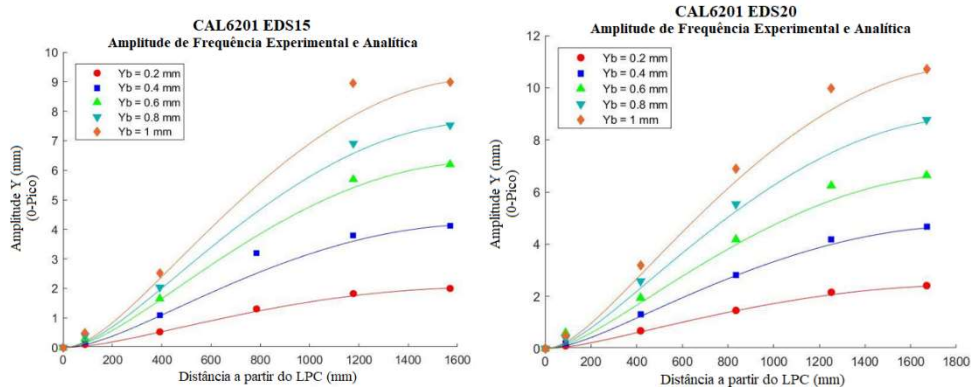


Figura 11. Configuração deformada do condutor – Cal 6201.

6. CONCLUSÕES

No presente artigo, foram realizados testes experimentais com dois tipos de condutores usando o grampo do tipo CGS. Os resultados das tensões e das amplitudes de flexão medidas foram comparados com três abordagens analíticas diferentes.

Através das deformações medidas em duas seções transversais no interior do grampo (seções A e B) e uma seção transversal na saída do grampo, foi verificado que as deformações máximas ocorrem na saída do grampo (seção C). Por isso, a saída do grampo foi considerada como último ponto de contato entre o grampo e o cabo que é um parâmetro para utilização da fórmula de Poffenberger.

Entre as abordagens utilizadas para cálculo da tensão de flexão no cabo, a abordagem que mais se aproxima dos resultados experimentais foi aquela que utiliza a equação de Poffenberger, que considera a amplitude de flexão Y_b . Foi observado um bom ajuste para baixos níveis de amplitude em ambos os condutores. Porém, para maiores níveis de amplitude de flexão, foi verificado que a diferença entre as tensões medidas experimentalmente e aquelas calculadas através da equação de Poffenberger cresce com o aumento da amplitude de flexão. Nesse caso, a equação de Poffenberger tende a superestimar as tensões no condutor.

As flechas medidas experimentalmente ficaram muito próximas das obtidas analiticamente calculadas considerando 30% do valor máximo da rigidez à flexão do cabo, indicando uma ótima correspondência mesmo para pontos mais distantes do grampo. Portanto, utilizando-se 30% do valor máximo da rigidez à flexão do cabo obtém-se adequadamente o aspecto deformado dos condutores. No entanto, utilizando-se 30% de EI_{max} na abordagem que $f_{y_{max}}$ foi observado que as tensões obtidas são significativamente inferiores às mensuradas, onde a diferença é da ordem de 60%, não sendo essa abordagem apropriada para calcular as tensões presentes no condutor.

Os dados experimentais obtidos no presente trabalho permitem o prosseguimento do estudo através de simulações computacionais do comportamento cabo-grampo, onde os dados experimentais permitirão a validação do modelo elaborado.

7. REFERÊNCIAS

- Cardou, A., Cloutier, L., Lanteigne, J. e M'Boup, P., 1990. "Fatigue strength characterization of ACSR electrical conductors at suspension clamps". *Electric Power Systems Research*, Vol 19, pp. 61-71.
- Cardou, A., Leblond, A. e Cloutier, L., 1993. "Suspension clamp and ACSR electrical conductor contact conditions". *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 119, pp. 19-31.
- CIGRE, 1985. *Guide for Endurance Tests of Conductors inside Clamps*. Electra. No. 100, 77-86 p.
- Cloutier, L., Leblond, A., Cosmai, U., Dulhunty, P., Ervik, M., Havard, D., Hearnshaw, D., Krispin, H., Landeira, M., Mouchard, P., Papailiou, K. O., Sunkle, D. e Wareing, B., 2010. *Engineering guidelines relating to fatigue endurance capability of conductor/clamp systems*. Ed. CIGRE.
- EPRI, 1979. *Transmission Line Reference Book: The Orange Book*. Ed. Electric Power Research Institute, Palo Alto, EUA.
- Gomes, F. B., 2015. *Análise comparativa de aparelhos para medição de vibração em cabos condutores de energia e cálculo da vida remanescente em cabos*. Monografia de Bacharel em Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Goudreau, S., Levesque, F., Cardou, A. e Cloutier, L., 2010a. "Strain Measurements on ACSR Conductors During Fatigue Tests II—Stress Fatigue Indicators". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, No. 4, pp. 2997-3006.
- Goudreau, S., Levesque, F., Cardou, A. e Cloutier, L., 2010b. "Strain Measurements on ACSR Conductors During Fatigue Tests III—Strains Related to Support Geometry". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, No. 4, pp. 3007-3016.
- Lalonde, S., Guilbault, R., e Langlois, S., 2018. "Numerical Analysis of ACSR Conductor–Clamp Systems Undergoing Wind-Induced Cyclic Loads". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 33, No. 4, pp. 1518-1526.

- Lévesque, F., Goudreau, S., Langlois, S. e Légeron, F., 2015. "Experimental Study of Dynamic Bending Stiffness of ACSR Overhead Conductors". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 30, No. 5, pp. 2252-2259.
- Maduro-Abreu, A., Saavedra, A.R., Araújo, J.A., Murça, L.B., Fragelli, R.R., Frontin, S.O. e Rêgo, V. B., 2010. *Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão*. Ed. Teixeira Gráfica e Editora, 1ª Edição, Brasília, Brasil.
- McGill, P.B. , Ramey, G.E. e ASCE, A. M., 1986. "Effect of Suspension Clamp Geometry on Transmission Line Fatigue". *Journal of Energy Engineering*. Vol. 112.
- Papailiou, K.O., 1997. "On the bending stiffness of transmission line conductors". *IEEE Trans Power Delivery*, Vol. 12, No. 4, pp. 1576-1588.
- Poffenberger, J. C. e Swart, R.L., 1965. "Differential displacement and dynamic conductor strain". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 84, No. 4, pp. 281-289.
- Ramey, G. E. e Townsend, J. S., 1981. "Effects of clamps on fatigue of ACSR conductors". *Journal of the Energy Division*, Vol. 107, pp. 103-119.
- Sandberg, S., 1950. "A new transmission-line suspension clamp". *Electrical Engineering*, Vol. 69, No. 5, pp. 410-410.
- Xinze, Z., Meiyun, Z., Wei, P., Zhicheng, Y. e Zhenxing, Y., 2013. "Analysis of Contact Characteristic of Overhead Line and Suspension Clamp". *Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering*, Vol.11, No.3, pp. 1456-1464.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EXPERIMENTAL STUDY OF CABLE BENDING AMPLITUDE OF ENERGY CONDUCTORS WITH CGS CLAMP

Mayara Gabi Moreira. mayaragabimoreira05@gmail.com¹

Gabriel Santos da Costa Pinto. gsdcp94@gmail.com¹

Thiago Barbosa de Miranda. thiago_enm@hotmail.com¹

José Alexander Araújo.alex07@unb.br¹

Jorge Luiz de Almeida Ferreira jorge@unb.br¹

Luis Augusto Conte Mendes Veloso. lveloso@unb.br¹

¹ Universidade de Brasília. Campus Universitário Darcy Ribeiro. Asa Norte. Brasília-DF. CEP 70910-900

Abstract. Power cables are the main elements of a transmission line. The cable's failure may cause electrical energy interruption, whose main cause is fatigue, caused by mechanical stresses induced by wind. In the typical configuration, the conductors are supported in the power towers by mono-articulated metal clamps that generate high clamping stresses on the conductor and contact stresses between the clamp and the conductor surfaces. Other commercial alternatives of clamps are available constituted with elastomeric elements, such as AGS (armored supported clamps) and CGS (cushion-grip suspension clamps). They are indicated to reduce the conductor mechanical stresses, as a result, improving the fatigue strength. However, there is very little data in the technical literature concerning the dynamic bending stress using these types of clamps. Thereat, this paper aims to evaluate the mechanical bending stresses of overhead conductors mounted with CGS clamps. Several tests were performed with two aluminum overhead conductors, AAC 1120 and AAC 6201, considering different bending amplitude and tensile loads. Strain gages and accelerometers were used to measure the mechanical strains on the wires and the conductor bending amplitude (Y_b) and the first antinode deflection (Y_{max}). It was used five accelerometers distributed between the last point of contact (LPC) and the first antinode deflection (Y_{max}) and nine strain gages in three sections between the middle of the clamp and the last point of contact (LPC). Mechanical stresses are calculated according to these two different approaches (Y_b) - well known as Poffenberger formula- and (Y_{max}). The results show that the most appropriate methodology for stress analysis is based on the bending amplitude through the Poffenberger equation. In this case, it was observed that the difference between the measured and analytically calculated tensions grows with the increase of the bending amplitude and the Poffenberger equation tends to overestimate the tensions in the cable.

Keywords: overhead conductor ;CGS clamp; bending amplitude.