

Avaliação da Fórmula de Poffenberger-Swart para Levantamento de Curvas S-N para Montagens Cabo/Grampo Operando com Elevada EDS

Aida A. Fadel, José A. Araújo, Leonardo B. Murça, Jorge L.A. Ferreira, Antonio M. D. Henriques

Universidade de Brasília

Resumo - Este artigo apresenta um estudo experimental que visa avaliar a consistência e os limites de aplicação da Fórmula de Poffenberger-Swart. Esta expressão, usada na construção das curvas S-N de cabos condutores de energia, correlaciona a amplitude de vibração em uma seção posicionada a uma distância específica próxima da zona de falha com a tensão nominal. Os ensaios foram conduzidos na bancada de ensaios dinâmicos de cabos de transmissão de energia elétrica da Universidade de Brasília – UnB [1]. O cabo utilizado nos ensaios foi o ACSR 397,5 MCM Íbis, comumente utilizado nas linhas de transmissão de 138KV. Foram realizados ensaios estáticos e dinâmicos para diferentes níveis de amplitude e frequências de vibração. Os resultados experimentais foram comparados aos resultados teóricos fornecidos pela Fórmula de Poffenberger-Swart.

Palavras-chave — Curva S-N, Extensometria, Conductor Íbis, Fórmula de Poffenberger-Swart.

I. INTRODUÇÃO

A quantificação da resistência mecânica à fadiga de cabos condutores permite determinar a vida remanescente, resultando em informação de particular interesse para as áreas de projeto e, sobretudo de manutenção das linhas de transmissão.

A fadiga em condutores aéreos é provocada por esforços dinâmicos oriundos da interação do vento sobre o cabo tensionado, constituindo-se na maior causa de falhas mecânicas em condutores aéreos. O processo de fadiga pode ser dividido em três etapas: *i*) nucleação da trinca, *ii*) propagação da trinca, ou crescimento macroscópico, *iii*) ruptura final. No caso do cabo condutor, a ruptura tem início nas zonas de contato entre o condutor e os diversos tipos de ferragens como grampos de suspensão, amortecedores, etc. As trincas propagam-se nos fios de alumínio do condutor, levando à perda de eficiência no processo de transmissão, eventualmente podem levar à ruptura catastrófica da linha se atingirem os fios da alma de aço (cabos CAA) Projetos de linhas de transmissão, utilizam usualmente critérios para evitar que as falhas ocorram, garantindo a operação dentro de limites de segurança. A curva S-N para cabos condutores é um desses critérios [2,3,4,5,6].

A curva de Wöhler correlaciona cada nível de tensão nominal cíclica na região de falha com o número de ciclos necessários para a ruptura desse material.

Em geral, a resistência em fadiga da montagem cabo/grampo de suspensão é obtida de maneira análoga a usada para corpos-de-prova sólidos, ou seja: o levantamento da curva S-N é feito realizando-se ensaios nos quais a amostra é submetida a uma mesma amplitude dinâmica (tensão) até a ruptura do terceiro fio de alumínio do cabo. Registra-se en-

tão o número de ciclos necessários para induzir tal condição de falha, obtendo-se assim um ponto da curva S-N.

A fórmula de Poffenberger-Swart (P-S) [7] é usualmente utilizada para correlacionar uma amplitude de deslocamento medida em uma posição padronizada a partir do grampo (ou outro tipo de ferragem) com uma amplitude de tensão no ponto mais externo do cabo e na saída (boca) do grampo. Assim, em termos práticos, é fácil converter amplitude de deslocamento vertical em uma tensão nominal de referência para a curva S-N de um cabo.

Os autores ressaltaram uma limitação importante no uso desta fórmula, pois a fratura do fio é provocada não apenas pelo movimento alternado do cabo, mas também por um estado de tensão local extremamente complexo oriundo do contato mecânico sob um regime de escorregamento parcial. Apesar destas restrições a fórmula de Poffenberger-Swart tem sido uma importante ferramenta para avaliação da severidade dos níveis de vibração em cabos condutores por mais de trinta anos.

Cardou et al. [8] e Zhou et al. [9] apresentaram diversos resultados de fadiga para cabos ACSR em espaçadores e grampos de suspensão para um mesmo nível de tensão mecânica diária (*Every Day Stress*, EDS), que equivale a um percentual da carga de ruptura do condutor, é o valor estabelecido em projeto para a tensão de esticamento do condutor a ser aplicada na montagem em campo.

Pappaliou [10] apresenta um modelo analítico, a partir do qual contesta a eficiência de Poffenberger para amplitudes de deslocamento elevadas, onde a variação da rigidez é significativa.

O presente trabalho tenta estabelecer a validade da fórmula de P-S para diferentes níveis de EDS, em do interesse na aplicação de cargas de esticamento cada vez mais elevadas.

II. CÁLCULO DAS TENSÕES IDEALIZADAS

O cabo condutor (Fig.1) é uma estrutura mecânica composta por uma associação de fios. Os fios enrolados em torno de uma alma (geralmente de aço) formam várias camadas que possuem movimento independente quando submetidas a um esforço. Deste modo, o condutor apesar de ser uma estrutura rígida, resiste apenas aos esforços de tração que se distribuem pelos diversos fios que o compõem gerando a deformação do fio na direção em que foi enrolado.

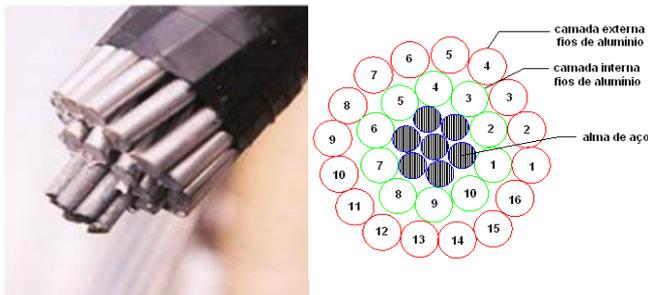


Figura 1 – Configuração do cabo ACSR Ibis 397,5 MCM.

Devido à complexidade da configuração desta estrutura e do estado de tensão provocado pelo processo de flexão do cabo previamente tensionado, um modelo simplificado foi desenvolvido por Poffenberger & Swart [7].

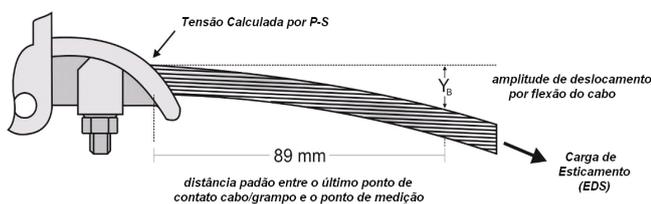


Figura 2 – Montagem esquemática cabo/grampo mostrando a posição padrão para medida da amplitude de deslocamento, Y_b .

De acordo com este modelo, que associa o condutor na zona de restrição a uma viga de Euler, o deslocamento vertical (medido pico a pico), de um ponto do cabo distante 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, produz uma tensão equivalente num fio de alumínio da camada mais externa do cabo e na boca do grampo, cuja magnitude é dada pela expressão:

$$\sigma_a = KY_b \quad (1)$$

Onde, σ_a - é a faixa de tensão dinâmica (zero a pico), Y_b é a amplitude de deslocamento pico a pico, medida a partir de um ponto sobre o cabo distante 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, e a constante de Poffenberger é expressa por

$$K = \frac{E_a dp^2}{4 \left(e^{-px} - 1 + px \right)} \quad \left[\text{N} / \text{mm}^3 \right] \quad (1.1)$$

Sendo, E_a (MPa), o módulo de elasticidade (módulo de Young) e d (mm) o diâmetro dos fios de alumínio da camada externa do cabo, x é a distância ao longo do cabo entre o último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão e o ponto de medição, usualmente 89 mm (Fig. 1), e a rigidez da montagem é expressa por

$$p = \sqrt{\frac{T}{EI}} \quad (1.2)$$

Onde T (N) é a carga de esticamento para a temperatura média durante a medição, EI ($\text{N} \cdot \text{mm}^2$) é a rigidez à flexão do cabo, cujo valor mínimo é dado por:

$$EI_{\min} = n_a E_a \frac{\pi d_a^4}{64} + n_s E_s \frac{\pi d_s^4}{64} \quad (1.3)$$

Onde n_a , E_a , d_a são o número, diâmetro individual e o módulo de elasticidade dos fios de alumínio, e n_s , E_s , d_s são o número, diâmetro individual e o módulo de elasticidade dos fios de aço.

O uso da Eq. (1) deve exercido com cuidado, pois ela não leva em consideração a variação da rigidez à flexão do cabo em função do comportamento dinâmico. Note que, para pequenos níveis de amplitude de tensão, deve-se esperar que os fios individuais do condutor não deslizem entre si e, portanto o cabo se comporta como uma barra rígida, respondendo a flexão com sua máxima rigidez. Por outro lado, à medida que a amplitude de vibração aumenta mais e mais fios passam a escorregar e a rigidez a flexão se aproxima de EI_{\min} . Neste caso, a fórmula de P-S torna-se uma melhor aproximação para os níveis de tensão na camada mais externa do cabo [10].

III. PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS – PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DA FÓRMULA DE POFFEMBERGER-SWART

A – Extensometria

O objetivo da aplicação do procedimento de extensometria neste trabalho é a validação e determinação da abrangência e limitações da equação de Poffenberger-Swart. Como dito anteriormente, usada para a obtenção da tensão nominal na zona de falha. Para avaliar a tensão nominal a amostra ensaiada foi instrumentada com extensômetros colados nos fios da camada mais externa do condutor para estabelecer uma correlação entre a deflexão pico a pico do cabo em um ponto padrão (89 mm) e a amplitude de tensão nominal no último ponto de contato cabo/grampo.

Esses extensômetros têm seu princípio de funcionamento baseado na variação de resistência que ocorre em um fio quando sua seção transversal é alterada. Associados a um circuito elétrico conhecido como ponte de Wheatstone fornecem a leitura direta da deformação (ϵ) sofrida no ponto instrumentado do fio do condutor, a qual se correlaciona com a amplitude de tensão (σ), por meio da lei de Hooke:

$$\sigma = E\epsilon \quad (4.5),$$

Onde, E é o módulo de elasticidade (Módulo de Young) do fio de alumínio no qual o extensômetro é colado.

Foram conduzidas medidas de deformação nos fios da amostra submetida à EDS de 20% e de 30%, e pela imposição de carregamentos estáticos e dinâmicos em diferentes faixas de frequência. Avaliou-se a resposta da amostra quando submetida a diferentes amplitudes de deslocamento Y_B , no ponto localizado à 89 mm do último ponto de contato cabo/grampo.

Para avaliação dinâmica foram adotadas frequências de excitação próximas àquelas de ressonância da amostra.

Para a avaliação estática, restringiu-se o deslocamento vertical do cabo por meio da colocação de um apoio, de modo a simular a influência do comprimento nodal na resposta em tensão na zona de interesse. Essa verificação é baseada na compreensão de que a energia empregada para obter a flecha que gera a amplitude desejada a 89 mm, pode apresentar valores distintos dependendo da curvatura imposta, a qual depende da configuração utilizada para aplicar o carregamento.

Foram testadas três configurações, conforme ilustrado na Figura 3: (a) viga bi-apoiada com carregamento central, chamado aqui de ensaio estático com restrição, (b) viga simplesmente engastada com carregamento estático num dos extremos, chamado aqui de ensaio estático sem restrição, e, (c) carregamento senoidal, chamada de ensaio dinâmico.

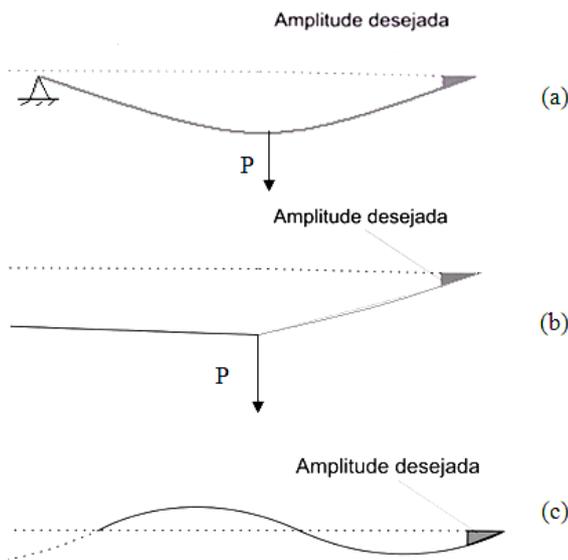


Figura 3 – Formato de onda gerada no ensaio estático (a) com apoio, (b) sem apoio, (c) no ensaio dinâmico [11].

A escolha do ponto de imposição da restrição foi realizada com base nas distâncias nodais (meio comprimento de onda) mínimas e máximas, obtidas da varredura em frequência para os valores entre 10 e 40 Hz, faixa em que foram realizados os ensaios dinâmicos. Assim, o apoio foi fixado a 3 e 6m do grampo de suspensão e a carga aplicada no ponto central do vão, simulando a formação da onda, para a realização do ensaio tipo (a), descrito acima.

O sumario do planejamento dos experimentos é apresentado pelas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Planejamento dos ensaios estáticos para avaliação da Fórmula P-S. [11]

ENSAIOS ESTÁTICOS			
Y_B	20% EDS	Y_B	30% EDS
0,2		0,2	
0,4		0,4	
0,6	SEM RESTRIÇÃO	0,6	SEM RESTRIÇÃO
0,8		0,8	
1,0		1,0	
1,1		1,1	
0,2		0,2	
0,4		0,4	
0,6	COM RESTRIÇÃO	0,6	COM RESTRIÇÃO
0,8		0,8	
1,0	3 m	1,0	3 m
1,1		1,1	
0,2		0,2	
0,4		0,4	
0,6	COM RESTRIÇÃO	0,6	COM RESTRIÇÃO
0,8		0,8	
1,0	6 m	1,0	6 m
1,1		1,1	

Tabela 2 – Planejamento dos ensaios dinâmicos para avaliação da Fórmula P-S [11].

ENSAIOS DINÂMICOS			
Y_B	20% EDS	Y_B	30% EDS
0,2		0,2	
0,4		0,4	
0,6	10-20 Hz	0,6	10-20 Hz
0,8		0,8	
1,0		1,0	
1,1		1,1	
0,2		0,2	
0,4		0,4	
0,6	20-30 Hz	0,6	20-30 Hz
0,8		0,8	
1,0		1,0	
1,1		1,1	
0,2		0,2	
0,4		0,4	
0,6	30-40 Hz	0,6	30-40 Hz
0,8		0,8	
1,0		1,0	
1,1		1,1	

Para os ensaios dinâmicos foram escolhidas as frequências mostradas na Tabela 3, que apresenta a relação das frequências de ensaio e os respectivos comprimentos nodais.

Tabela 3 – Frequências de ensaio e comprimentos nodais dos ensaios dinâmicos [11].

20% EDS		30% EDS	
Freq. [Hz]	Comprimento Nodal [m]	Freq. [Hz]	Comprimento Nodal [m]
13,70	4,71	14,23	5,68
23,97	3,29	16,76	4,83
32,49	2,39	24,07	3,45

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão apresentados os materiais utilizados durante o desenvolvimento deste trabalho, os procedimentos adotados para cada tipo de ensaio realizado.

A – A Bancada de Ensaio

A bancada do Laboratório de Ensaio de Fadiga em Cabos Condutores da Universidade de Brasília usada para a realização dos ensaios possui a configuração ilustrada pela Fig. 4. O vão ativo de ensaio foi montado com um comprimento total igual a 39 m e durante todo o ensaio a temperatura do ambiente foi mantida controlada para evitar alterações na tensão de esticamento do cabo devido a variações térmicas.

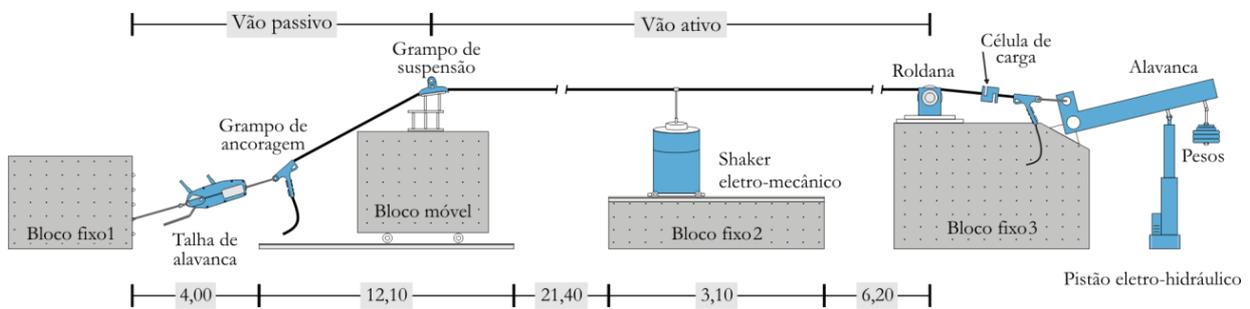


Figura 4 – Desenho esquemático da Bancada de Ensaio de Fadiga em Cabos Condutores da Universidade de Brasília [11].

B – Conjunto Cabo/Grampo

O condutor ensaiado foi o IBIS - 397,5 MCM, cujas características são apresentadas nas Tabelas 4 e 5 (respectivamente, as características estruturais e dimensionais do condutor e as propriedades mecânicas da liga dos fios de alumínio 1350-H19 que o compõem).

Tabela 4 – Características do condutor Ibis [12].

Bitola MCM	Área Nominal [mm²]			Encordoamento (nº fios x diâmetro)	
	Alumínio	Aço	Total	Alumínio	Aço
397,5	201,21	234	435,21	26x3,139	7x2,441
Diâmetro nominal cabo [mm]		Peso linear [kg/km]		Carga Ruptura [kgf]	
19,88		557,5		7394	

Tabela 5 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio 1350-H19 [1].

Propriedades Físicas e Mecânicas	Unidade	Valor
Coefficiente de Poisson	-	0,33
Densidade	Kg/m³	2705
Dureza Brinell	-	50
Elongação na Quebra (Min)	%	1,5
Limite de escoamento	MPa	165
Limite de Resistência à Tração	MPa	186
Módulo de Elasticidade	GPa	68,9
Resistência a Fadiga para 5x10 ⁸ Ciclos	MPa	48,3
Resistência ao Cisalhamento	MPa	103

O grampo utilizado é adequado para o uso em cabos condutores de alumínio ou aço/alumínio (CA - Cabo de Alumínio ou CAA – Cabo de Alumínio com Alma de Aço) com diâmetro mínimo de 17 mm e máximo de 29 mm, possui carga de ruptura de 7.000 kg e peso total de 1,28 kg.

As Figuras 5a e 5b ilustram o conjunto: cabo condutor/grampo de suspensão mono-articulado e o parafuso tipo U do grampo, respectivamente.

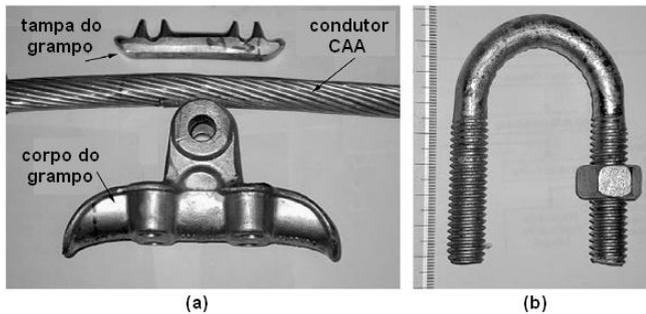


Figura 5 – a) Conjunto: cabo condutor/grampo de suspensão mono-articulado e (b) Parafuso tipo U do grampo de suspensão [1].

C – Extensometria

A Figura 6 apresentada a seguir descreve a disposição adotada para os extensômetros posicionados próximos ao grampo de suspensão. A partir dos registros, transformados em tensão nominal, por meio da Lei de Hooke, é possível calcular uma tensão nominal no fio de alumínio da camada mais externa do cabo no último ponto de contato (UPC) cabo/grampo. Essa tensão experimental é então comparada à calculada por meio da Fórmula de P-S.

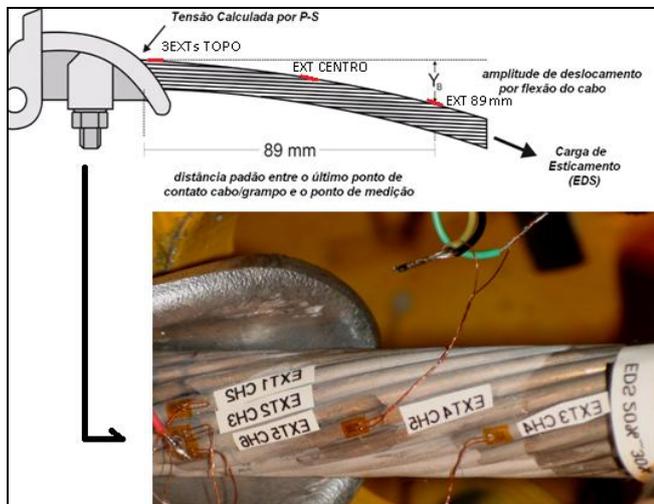


Figura 6 – Desenho esquemático e detalhe do grampo mono-articulado e dos extensômetros aplicados aos fios do condutor [11].

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A – Resultados Estáticos

As tensões obtidas por meio dos extensômetros nos carregamentos estáticos, aplicados sem imposição de restrição, com EDS de 20% , para os diferentes níveis de amplitude, são apresentadas na Tabela 6, que apresenta os registros dos diversos extensômetros transformados em tensão.

A última coluna da Tabela 6 apresenta os valores calculados pela expressão de Poffenberg-Swart.

É possível verificar que a melhor representação dos valores é obtida por meio da leitura extraída do extensômetro de topo. Observa-se ainda que para o menor nível de amplitude de deslocamentos ($Y_B=0,5$ mm) verificou-se a maior diferença entre o valor lido e o calculado.

Entretanto, de maneira geral, a fórmula de P-S parece capaz de representar apropriadamente as tensões (deformações) nos fios de alumínio da camada mais externa quando o cabo é solicitado por um carregamento estático transversal (na direção vertical). A variação média entre o valor lido e o valor calculado para todas as medidas foi de apenas de 4,4%.

Tabela 6 – Tensões referentes às medidas nos extensômetros nos ensaios estáticos para EDS 20% [11].

Y_B [mm]	σ [MPa] (pico a pico)					σ_{P-S} (EDS20%)
	Ext. topo esquerdo	Ext. topo	Ext. topo direito	Ext. centro	Ext. 89mm	
0,5	13,10	28,06	11,69	16,72	0,035	31,79
0,8	30,59	50,82	20,89	27,12	0,055	50,86
0,9	35,31	57,33	23,84	30,40	0,062	57,22
1,0	42,27	66,81	28,19	35,03	0,070	63,58
1,1	47,10	73,47	31,18	38,42	0,076	69,94
1,2	51,09	79,53	33,95	41,67	0,083	76,29

A seguir foi realizada uma investigação para detectar a influência do comprimento nodal sobre a efetiva tensão registrada no ponto de interesse (último ponto de contato cabo/grampo - UPC), isto é, se a frequência de ensaio pode alterar os resultados obtidos, uma vez que a fórmula de P-S não contém parâmetros representativos desse fator.

Esta verificação baseia-se na compreensão de que mais energia deve ser empregada para obter a flecha que gera a amplitude de deslocamentos imposta no ponto 89 mm, no caso de vãos curtos. Enquanto no ensaio estático a amplitude imposta é obtida por meio de um deslocamento linear do condutor, tão mais suave quanto maior for a distância do UPC (Figura 3a), no ensaio dinâmico a curva descrita pelo cabo tem forma senoidal (Figura 3b) e é obtida da excitação do cabo na vizinhança de uma de suas frequências ressonantes, o que aparentemente, pode resultar numa razão entre o esforço empregado e a amplitude obtida, diferente do caso estático.

A Tabela 7 apresenta a comparação dos resultados das medidas do carregamento estático nas condições descritas pelas Tabelas 1 e 2, onde a localização do apoio pretende simular uma condição da formação da onda senoidal na excitação dinâmica (Fig. 3a).

As medidas da Tabela 7 referem-se à média dos valores lidos pelos extensômetro de topo (Fig. 6).

Tabela 7 – Tensões de P-S e medidas nos ensaios estáticos para EDS de 20% e 30% (simulando diferentes comprimentos nodais) [11].

Y_B [mm]	P-S _{20%} [MPa]	P-S _{30%} [MPa]	SEM RESTRIÇÃO		RESTRIÇÃO 3 m		RESTRIÇÃO 6 m			
			20% EDS	$\Delta\sigma\%$	30% EDS	$\Delta\sigma\%$	30% EDS	$\Delta\sigma\%$	30% EDS	$\Delta\sigma\%$
0,5	31,9	36,37	28,06	11,73	40,38	-11,04	39,03	-7,33	38,50	-5,86
0,8	50,86	58,19	50,81	0,08	60,19	-3,45	59,19	-1,73	58,06	0,22
0,9	57,22	65,46	57,33	-0,19	65,69	-0,35	63,79	2,55	63,71	2,67
1,0	63,58	72,73	66,81	-5,08	70,87	2,56	69,93	3,85	68,89	5,28
1,1	69,94	80,00	73,53	-5,05	77,69	2,89	77,79	2,77	75,54	5,58
1,2	76,29	87,28	79,53	-4,24	-	-	-	-	-	-

Como pode ser verificado para o caso estático, a partir da análise da Tabela 8, a variação média da tensão medida em relação àquela calculada por Poffenberger-Swart, mostra uma tendência de redução do erro ao utilizar a restrição a 3m (menor comprimento de onda). Entretanto, de maneira geral, as medidas se aproximam bastante do valor calculado por P-S, sendo esta uma boa representação para as tensões estáticas.

Tabela 8 – Tensões de P-S e medidas nos ensaios estáticos para EDS de 20% e 30% [11].

SEM RESTRIÇÃO		RESTRIÇÃO 3 m	RESTRIÇÃO 6 m
$\Delta\sigma\%$ EDS 20%	$\Delta\sigma\%$ EDS 30%	$\Delta\sigma\%$ EDS 30%	$\Delta\sigma\%$ EDS 30%
4,40	4,06	3,64	3,92

Considerando o erro de medição do processo, que envolve além do erro não medido do laser usado na obtenção da medida, o ruído de medição de cerca de 15 microstrains, o qual equivale a 4% da medida em média, é possível avaliar que, para as condições aplicadas no ensaio, a influência do comprimento nodal na aplicação da carga, que impõe Y_B , é bastante discreta podendo ser desprezada. Como será visto adiante este comportamento foi corroborado pelos resultados da análise dinâmica.

B – Comparação dos resultados estáticos e dinâmicos

O gráfico da Figura 7 estabelece comparação entre o comportamento experimental para carregamentos estáticos e dinâmicos (em cada frequência), e o valor calculado. Nota-se uma concordância significativa entre os valores, para cada amplitude de deslocamento.

A resposta dinâmica varia muito pouco, em média, do valor calculado como é possível observar do gráfico a seguir (Fig.8) onde se percebe que à medida que o comprimento nodal se reduz (maiores frequências), a resposta melhora. Este comportamento concorda com o observado na avaliação estática.

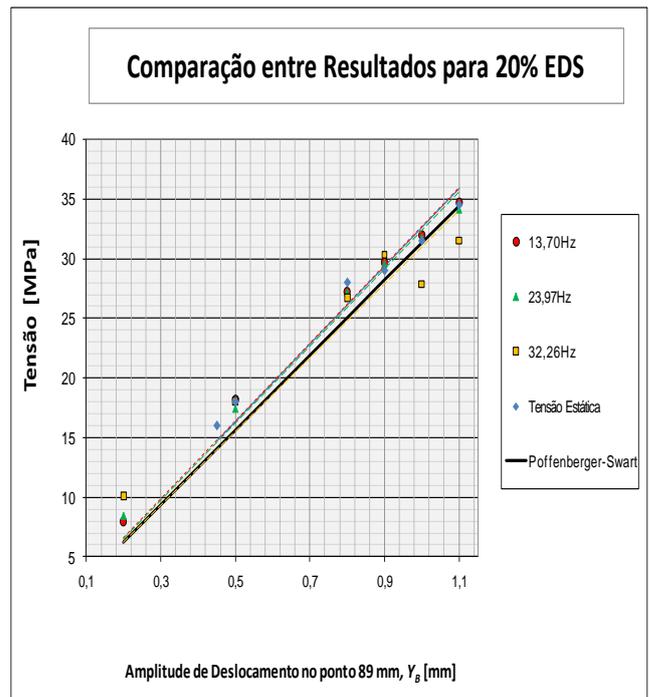


Figura 7 – Tensões experimentais (carregamentos estáticos e dinâmicos) com EDS 20% x P-S [11].

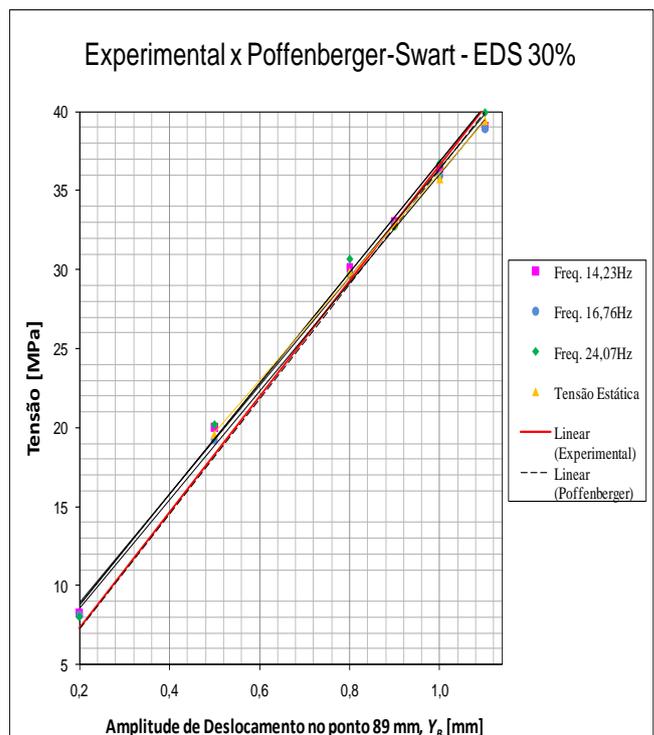


Figura 8 – Comparação entre valores experimentais e P-S em EDS 30% [11].

Os gráficos abaixo (Fig.9 e Fig.10) permitem uma análise da dispersão encontrada entre valores obtidos por meio do uso de P-S e experimentais, para cada nível de tensão.

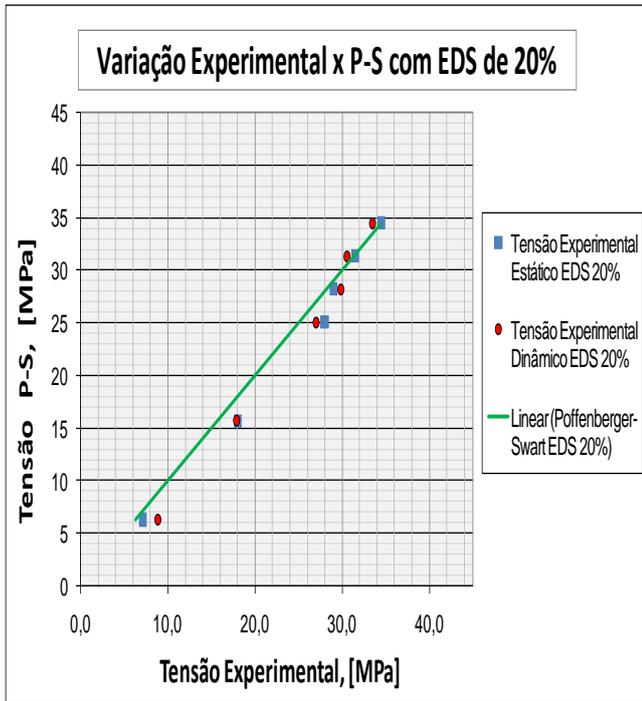


Figura 9– Variação das Tensões Experimentais (dinâmico e estático) em relação à P-S em EDS 20% [11].

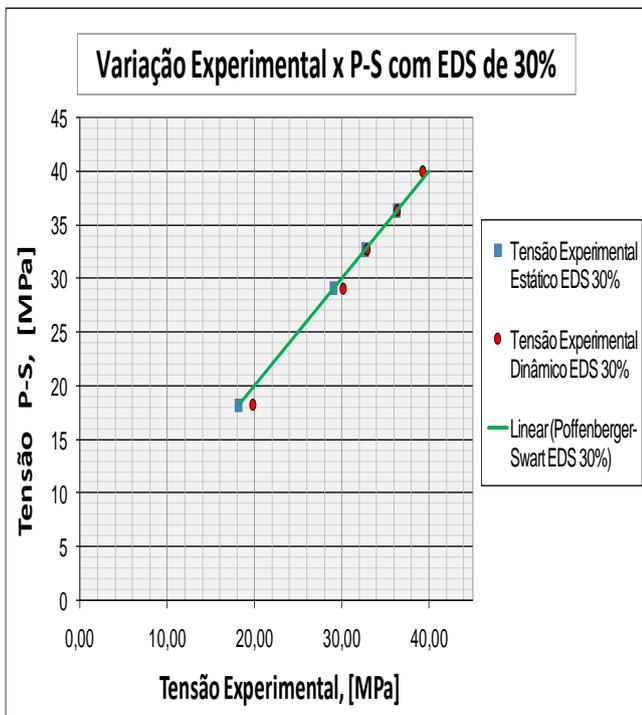


Figura 10– Variação das Tensões Experimentais (dinâmico e estático) em relação à P-S em EDS 30% [11].

Quando avaliados os resultados tendo apenas como base a ampliação do nível de tensão média é possível ver uma variação mais significativa da tensão medida contra a calculada, no terço médio da faixa de deslocamentos, Y_B , imposta à amostra. Entretanto, em síntese a comparação revelou uma excelente concordância do comportamento experimental com a previsão analítico experimental, fornecida pela fórmula de P-S, tanto para o carregamento estático quanto para o carregamento dinâmico, como mostrado no gráfico da Figura 11 a cada nível de EDS.

Especial nota deve ser dada ao fato de a frequência aplicada à amostra não impactar a dispersão dos pontos. Assim, considera-se que para os níveis de amplitudes de vibração avaliados (Y_B entre 0,2 e 1,3 mm) a fórmula de Poffenberger-Swart representa bem a tensão nominal na região de falha.

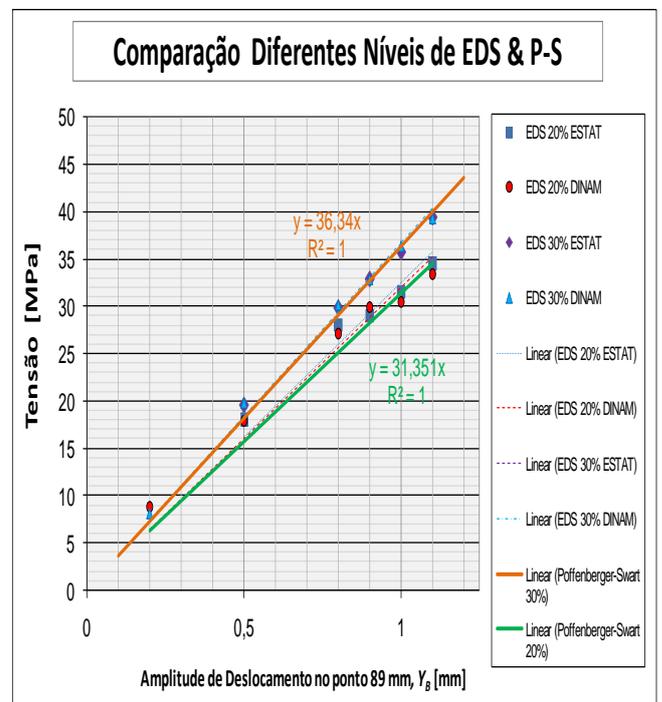


Figura 11 – Comparação entre valores experimentais e P-S para EDS de 20 e 30% [11].

VI. CONCLUSÕES

O estudo que procurou verificar a qualidade dos dados fornecidos pelo uso da Fórmula de Poffenberger-Swart na obtenção dos valores de tensão nominal, que serão usados na construção das curvas S-N, constatou que a expressão empírico-analítica possui um nível de concordância bastante alto (cerca de 96%) com os valores experimentais de tensão registrados nas amostras.

Além disso, não foi verificada influência significativa com relação à frequência (mais elevada ou mais baixa) utilizada na condução dos ensaios, sobre os valores de tensão obtidos por P-S. Conclui-se, deste modo, que os ensaios podem ser conduzidos em frequências elevadas (ensaios mais curtos,

menor custo) sem que haja inserção de erro na tensão considerada como responsável pela falha.

Em suma, para as condições do ensaio descritas e a faixa de amplitudes avaliada, a utilização da Fórmula P-S forneceu uma boa aproximação para as tensões nominais verificadas experimentalmente na zona de falha. Constituindo-se em ferramenta confiável para a construção das curvas S-N.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Henriques, A. M. D.: (2006), "Bancada de Ensaios Mecânicos à Fadiga de Cabos Condutores de Energia". Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- [2] Rawlings, C. B., "Fatigue of Overhead Conductors", Transmission Line Reference Book, Electrical Power Research Institute, Palo Alto CA, 1979, pp 51-81.
- [3] CIGRE WG 04 SC 22 - 02 Recommendations for the evaluation of the lifetime of transmission line conductors. ELECTRA 63. March 1979.
- [4] CIGRE SC 22, Final Report of Working Group 04, Endurance Capability of Conductors Inside Clamps, Paris, Jul 1988, 19p.
- [5] CIGRE SCB2-WG11-TF 7-04-18, Fatigue Endurance Capability of Conductor/Clamp Systems-Update of Present Knowledge - Part 1 - Mechanics of the Phenomenon, Draft August 2004.
- [6] Azevedo, C.R.F. and Cescon, T. , Failure analysis of aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Paraná River, Engineering Failure Analysis, 9, 2002. pp. 645-664. International, 1996, 29: 221-232.
- [7] Poffenberger, J.C., and Swart, R. L., Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain, IEEE Transactions Paper, Vol PAS 84, 1965, pp. 281-289.
- [8] Cardeau, A., Leblond, A., Goudreau, S., Cloutier, L., Electrical Conductor Bending Fatigue at Suspension Clamp: a Fretting Fatigue Problem, Fretting Fatigue, ESIS 18, Mechanical Engineering Publications, London, 1994, pp. 357-266.
- [9] Zhou, Z. R., Cardou, A., Goudreau, S. & Fiset, M., "Fundamental investigations of electrical conductor fretting fatigue", Tribology
- [10] Papailiou, K.O. (1997), "On the Bending Stiffness of Transmission Line Conductors", IEEE Trans. Power Deliv. Vol. 12. No 4. pp. 1576-1588.
- [11] Fadel, A. A., (2010). Avaliação do Efeito de Tracionamento em Elevados Níveis de EDS Sobre a Resistência em Fadiga do Condutor IBIS (CAA 397,5 MCM). Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM. TD-005/2010, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 185 p.
- [12] Nexans (2007). Dados dos cabos CAA. Catálogo do Fabricante.