



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GLT/13
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

AValiação Comparativa da Resistência à Fadiga de Cabos CAA e CAL

José A. Araujo (*)
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Marcos C. de Araújo
ELETRONORTE

Aida A. Fadel
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Antônio M. D. Henriques
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Mario Noburu Takai
ELETRONORTE

Larrisa Watanabe
UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA

Jorge L. de A. Ferreira
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo teórico e experimental sobre o desempenho a fadiga de cabos de alumínio liga (CAL) em relação aos cabos de alumínio com alma de aço (CAA). Nesse sentido foram discutidos aspectos teóricos sobre o comportamento a fadiga dessas ligas. Mostrou-se com esse estudo teórico que a liga usada na fabricação dos cabos CAL (liga AA 6201 T81), apesar de mais resistente, pode ter a sua resistência a fadiga reduzida em condições de operação em que haja contato mecânico, que é um fator que gera descontinuidades geométricas e fortes gradientes de tensão. Além disso, foi desenvolvido um programa de ensaios de fadiga que possibilitou a construção de 3 curvas S-N – duas para cabos CAL e uma para CAA. Com base nesse programa de ensaios foi possível demonstrar que, na faixa de vida estudada, os cabos CAA falham por fadiga quando são submetidos a níveis de tensão alternada em média 1,25 vezes maiores do que as suportadas pelos cabos CAL.

PALAVRAS-CHAVE

Fadiga, Cabos CAA, Cabos CAL, Curva S-N, Linha de Transmissão

1.0 - INTRODUÇÃO

O cabo condutor é o componente mais importante em uma linha de transmissão, pois sua função é transmitir energia e sua contribuição para o custo total da linha é significativa. Conseqüentemente, a manutenção desse componente torna-se vital para as empresas transmissoras. Entre os problemas que a linha experimenta durante sua operação a fadiga por fretting devido a vibração eólica provavelmente seja o mais sério, freqüente e oneroso. Vibrações eólicas são provocadas pela formação regular de vórtices devido a interação fluido (ar) estrutura (cabo). Os vórtices tomam a forma de ondas vibratórias que agem transversalmente a direção longitudinal do cabo provocando sua flexão em pontos de engaste ou restrição como em grampos de suspensão, espaçadores, amortecedores ou mesmo em emendas (1, 2). As tensões mecânicas flutuantes geradas por essa flexão, associadas às cargas de pré-esticamento provocam o fenômeno da fadiga. A fadiga pode ser definida como uma mudança (dano) localizada, progressiva e irreversível que surge quando tensões flutuantes agem sobre a estrutura, dando origem a trincas que podem eventualmente levar a uma ruptura catastrófica. Apesar da fadiga em alguns tipos de estruturas de engenharia ser um fenômeno razoavelmente bem compreendido, o mesmo não se pode dizer a respeito da fadiga em cabos condutores de energia.

Tradicionalmente a grande maioria das linhas de transmissão de alta voltagem no mundo é construída utilizando-se cabos de alumínio com alma de aço (CAA) com níveis de EDS entre 18 e 20%. A preferência pelo CAA se deve principalmente ao fato do aço presente em sua alma possuir uma resistência contra fadiga algumas ordens de grandeza maior do que a do alumínio. A faixa de EDS usada também garante longas vidas em fadiga pois produz baixos níveis de tensão mecânica estática e dinâmica. Por outro lado, restrições ambientais, físicas e econômicas tem exigido das empresas projetos otimizados com o uso de novos tipos de cabo e novas metodologias de projeto. Nesse sentido, cabos de alumínio liga (CAL) tem sido considerados como uma alternativa a cabos CAA pois a ausência de uma alma de aço permite ao cabo transmitir uma quantidade maior de energia para uma mesma bitola.

(*) Endereço Autor Responsável Campus Universitário Darcy Ribeiro, Bloco SG-09, Engenharia Mecânica – Universidade de Brasília. Asa Norte. Brasília/DF – Brasil - CEP: 70.910-900. Tel: (+55 61) 3107-1149/1151 – E-mail: alex07@unb.br

Por outro lado, a maior resistência mecânica dos fios de alumínio liga com relação a fios de alumínio puro conferem uma ótima resistência mecânica ao cabo que tem sido utilizado em algumas LTs no Brasil e no exterior com cargas de esticamento superiores a 20% da carga limite de resistência do cabo. Entretanto, são escassos os estudos quanto ao comportamento em fadiga de cabos CAL. Nesse sentido, Curvas S-N (ou curvas de Wohler) foram levantadas para cabos CAL e CAA, sob os mesmos níveis de carga de esticamento (EDS=20%). Para cada cabo os ensaios foram conduzidos em três diferentes amplitudes de tensão. Em cada nível de amplitude de tensão uma média de 3 ensaios foram realizados. Os resultados mostraram que a vida à fadiga do cabo CAL estudado pode ser até 5 vezes menor do que a do cabo CAA.

2.0 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Fadiga em Cabos Condutores e Curva S-N

A causa fundamental de fadiga em cabos é a flexão cíclica, da ordem de 200 – 1400 μm , imposta por vibrações nos condutores decorrentes da ação das correntes de ar – Aeolian vibration. Os pontos mais propensos a ocorrência desse tipo de falha estão localizados em regiões onde há restrições ao movimento vibratório do cabo condutor, tais como grampos, espaçadores, etc (1, 2, 3, 4, 5). Essa restrição faz com que os fios que constituem o cabo escorreguem entre si, e as forças de fricção aliadas a este movimento relativo causam o *fretting* entre os fios e nos contatos do cabo com os grampos de sustentação. Uma vez que uma trinca, induzida por fretting é formada, a mesma poderá propagar por fadiga levando ao rompimento do fio ou, em casos extremos ao rompimento do cabo (6). Uma forma de caracterizar o desempenho de materiais de engenharia com relação a vida a fadiga é realizada por meio do uso do diagrama de Wöhler (curva S-N). Este diagrama correlaciona o número de ciclos necessário para ocasionar a fratura completa de corpos de prova similares quando os mesmos são submetidos a níveis de tensão nominal cíclica prescritas. Devido à complexidade da configuração geométrica dos condutores e do estado de tensão provocado pelo processo de flexão do cabo previamente tensionado, os valores da tensão (mecânica) dinâmica utilizadas para a construção da curva de Wöhler para cabos condutores são obtidos baseados na formulação clássica desenvolvida por Poffemberger-Swart (P-S) (7), adotada pelo IEEE a partir de 1966 como padrão para as medições de vibrações de condutores. Outra particularidade das curvas de Wöhler dos cabos condutores está associada ao critério adotado para a caracterização da falha do condutor. Segundo critérios estabelecidos pela CIGRÉ (3), considera-se que um cabo condutor falhou por fadiga se o número de fios rompidos for igual ao maior valor entre: i) 3 ou ii) 10% do número total de fios de alumínio. Devido à dificuldade e ao alto custo financeiro exigidos nestes testes, o Comitê de Estudos de Linhas Aéreas da CIGRÉ propôs uma curva limite de segurança (2), conhecida como Cigré Safe Border Line, CSBL, para que as empresas não necessitem fazer grandes investimentos a fim de determinar a vida útil de um condutor. A Safe Border Line da Cigré é uma curva S-N derivada de vários ensaios de fadiga realizados para diversos componentes, como condutores, fios de alumínio etc (2). Ela representa um limite conservativo para as diversas curvas dos ensaios. A Safe Border Line também disponibiliza uma curva S-N, para qualquer montagem cabo/grampo de suspensão, a equação que descreve esta curva é apresentada abaixo.

$$\sigma_a = A \cdot N_i^B \quad (1)$$

onde, σ_a é a amplitude de tensão em MPa, N é a vida em ciclos para uma tensão e A e B são constantes que representam parâmetros materiais, tais valores são apresentados na Tab. 1 (2).

Tabela 1 - Constantes da curva limite de segurança (Safe Border Line - Cigré)

Nº DE CAMADAS DE FIOS DE ALUMÍNIO DO CABO CONDUTOR	NÚMERO DE CICLOS			
	N < 2 · 10 ⁷		N > 2 · 10 ⁷	
	A	B	A	B
1	730	-0,2	430	-0,17
>1	450	-0,2	263	-0,17

2.2 Fórmula de Poffemberger-Swart

A formulação proposta por Poffembeger e Swart (7) estabelece uma relação entre a amplitude de oscilação do condutor e os níveis de tensão atuantes sobre os pontos críticos da ligação do cabo com o elemento que restringe o seu livre movimento. Nesta formulação a intensidade do deslocamento é transformado em tensão mecânica, por meio de uma analogia da montagem cabo/grampo a uma viga engastada sob efeito de flexão (viga de Euler), conforme mostra a Fig.1. Como consequência dessa análise, a magnitude da tensão é dada pela Eq. (1).

$$\sigma_a = K \cdot y_b \quad (2)$$

onde, σ_a é a amplitude de tensão dinâmica (zero a pico), y_b é a amplitude de deslocamento pico a pico, medida a partir de um ponto posicionado a uma distância x do último ponto de contato (UPC) entre o cabo e o grampo de suspensão (tipicamente adota-se x igual a 89 mm) e K é a constante de Poffemberger, cuja expressão é apresentada na Eq. (3).

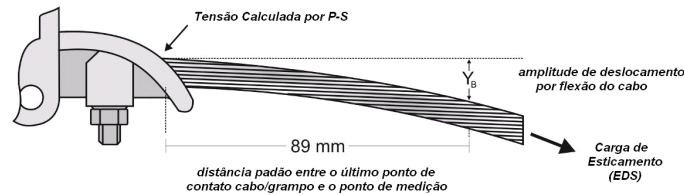


FIGURA 1 – Montagem esquemática cabo/grampo mostrando a posição padrão para medida da amplitude de deslocamento, Y_b .

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

Nessa expressão os parâmetros E_a [MPa], d [mm] e p são respectivamente o módulo de elasticidade (módulo de Young), o diâmetro dos fios de alumínio da camada externa do cabo e a rigidez da montagem, cujo valor é calculado por meio da Eq. (4).

$$p = \sqrt{\frac{T}{EI}} \quad (4)$$

onde T [N] é a carga de esticamento para a temperatura média durante a medição, EI [Nmm²] é a rigidez a flexão do cabo, cujo valor mínimo é calculado pela Eq. (5).

$$EI_{\min} = n_a E_a \frac{\pi d_a^4}{64} + n_s E_s \frac{\pi d_s^4}{64} \quad (5)$$

onde n_a , E_a e d_a são, respectivamente, o número, o módulo de elasticidade e o diâmetro nominal dos fios de alumínio, e n_s , E_s e d_s são o número, o módulo de elasticidade e o diâmetro nominal dos fios de aço

2.3 Características das Ligas de Alumínio Utilizadas na Construção dos Cabos CAA e CAL

Conforme comentado em parágrafos anteriores, na fabricação dos cabos tipo CAA e CAL são utilizadas respectivamente as ligas de alumínio 1350 H19 e 6201 T81.

2.3.1 Liga AA 1350 H19

A liga AA 1350 pertence a série 1xxx, que representa um grupo de ligas não tratáveis termicamente e que possuem um controle rigoroso no percentual de impurezas, pois a presença dessas impurezas podem reduzir drasticamente a condutividade elétrica do material. Como resultado, a condutividade elétrica dos fios fabricados com essa liga é igual a 62% IACS (International Annealed Copper Standard), o que na prática equivale a ter uma condutividade elétrica igual a 62% de um fio de cobre com o mesmo diâmetro. Além das boas características elétricas a liga 1350 oferece alta resistência à corrosão, boa conformabilidade, boa soldabilidade e boa resposta a anodização. Na forma natural essa liga é dúctil, mas devido ao processo de encruamento a frio sofrido pelo material até alcançar a forma final do fio condutor esse material se transforma em uma liga extra endurecida, o que lhe confere a denominação de tratamento H19. Nas Tab. 1 e 2 são apresentadas, respectivamente, a composição química e as propriedades mecânicas dessa liga.

2.3.2 Liga AA 6201 T81

A liga AA 6201 pertence a série 6xxx, que são ligas que possuem magnésio e silício como principais elementos de liga, as quais se combinam e formam o elemento intermetálico Mg_2Si , que antes de atingir o equilíbrio no superenvelhecimento, é o responsável pelo seu endurecimento. Quando essa liga é tratada de forma adequada, a presença desse elemento intermetálico favorece a formação de precipitados finos e uniformemente distribuídos, que acarretam um substancial aumento na dureza do material. Apesar de não possuir características elétricas tão boas quanto as da liga AA 1350, pois sua condutividade elétrica é da ordem de 52% IACS, a liga 6201 pode apresentar características de resistências a corrosão, abrasão e mecânica superiores a liga 1350. Como os cabos CAL foram concebidos com o objetivo de suprir as necessidades de um condutor econômico, para aplicação aérea, onde é requerida uma maior resistência mecânica do que a obtida com o condutor de alumínio CAA, a liga AA 6201 sofre, ainda um tratamento de solubilização, trabalho a frio e envelhecimento artificial até alcançar um grau específico de estiramento (o que confere a classificação T81). Nas Tab. 2 e 3 são apresentadas, respectivamente, a composição química e as propriedades mecânicas dessa liga.

2.4 Fatores de Redução de Resistência a Fadiga e Sensibilidade do Material a Presença de Entalhes

Comparando as propriedades mecânicas dessas duas ligas verifica-se que, como era de se esperar, a liga AA 6201 T81 possui características muito superiores às observadas para a liga AA1350 H19. Isso, a priori, poderia implicar na conclusão precipitada de que os condutores tipo CAL teriam uma resistência a fadiga muito superior aos condutores tipo CAA. Entretanto, devido às complexas condições interação de contato mecânico entre os fios e entre os fios da camada externa e o grampo de suspensão, geram gradientes de tensão e micro defeitos na superfície desses fios que possuem características de concentradores de tensão ou de entalhes. A presença de concentrador de tensão induz um aumento na intensidade das tensões em pontos específicos dos fios nas regiões de contato que podem ser quantificadas por meio da relação apresentada na Eq. (6).

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{nom}} \quad (6)$$

onde K_t é conhecido como fator teórico de concentração de tensões, σ_{\max} é a tensão local observada na região de concentração de tensões e σ_{nom} é a tensão nominal (calculada por exemplo utilizando-se a Eq. (2)).

Tabela 2 - Composição Química das Ligas de Alumínio AA1350 H19 e AA 6201 T81 (8, 9)

Liga de Al	Al	B	Cr	Cu	Ga	Fe	Mn	Mg	Si	V+Ti	Zn	Cada	Total
AA 1350 H19	≥ 99,5	≤0,05	≤0,01	≤0,05	≤0,03	≤0,4	≤0,01	-----	≤0,1	≥ 0,02	≤0,05	≤0,03	≤0,1
AA 6201 T81	97,3-98,9	≤0,06	≤0,03	≤0,1	-----	≤0,5	≤0,03	0,6-0,9	0,5 - 0,9	-----	≤0,1	≤0,03	≤0,1

Tabela 3 – Propriedades Mecânicas Básicas das Ligas de Alumínio AA1350-H19 e AA6201-T81 (8, 9, 10)

Liga de Al	Módulo de Young [GPa]	Limite de Resistência			Dureza [HBn]	Alongamento na Quebra [%]
		Tração, σ_t [MPa]	Escoamento, σ_y [MPa]	Fadiga, σ_e [MPa]		
AA 1350-H19	68,9	186	165	48,3	50	≥ 1,7
AA 6201-T81	69,0	330	310	105	88	6,0%

O fator de concentração de tensão é obtido analiticamente pela teoria da elasticidade, computacionalmente por métodos de modelagem por elementos finitos e experimentalmente por strain gages. Quando experimentos são conduzidos com precisão suficiente, excelentes concordâncias são obtidas em relação a bem-estabelecidos fatores de concentração de tensões analíticos.

Em análise de fadiga, é necessário redefinir o efeito dessas descontinuidades sobre a resistência a fadiga do material. Isso é realizado introduzindo-se os conceitos de fator de redução de resistência a fadiga e de fator de sensibilidade a presença de entalhes.

O fator de redução de resistência a fadiga, K_f , é um parâmetro empírico que procura avaliar o efeito da presença do concentrador de tensões sobre a resistência a fadiga da peça. Experimentalmente, tal fator é estimado por meio da relação apresentada na Eq. (7).

$$K_f = \frac{\sigma_f}{\sigma_{entalhe}} \quad (7)$$

onde σ_f é o limite de resistência a fadiga observado em corpos de prova não entalhados e $\sigma_{entalhe}$ é o limite de resistência a fadiga de corpos de prova entalhados, ambos fabricados do mesmo material.

Já o fator de sensibilidade a presença de entalhes, q , é outro parâmetro empírico que procura quantificar o efeito da sensibilidade do material à presença do concentrador de tensões. Em geral, quanto mais dúctil for um material, menor a sua sensibilidade ao entalhe. Materiais frágeis são mais sensíveis a descontinuidades. Como a ductilidade e a fragilidade dos metais estão fortemente correlacionadas à resistência e a dureza, materiais de baixa resistência e pouco duros tendem a ser menos sensíveis a descontinuidades, enquanto que os de alta resistência e muito duros tendem a ser mais sensíveis a descontinuidades. Além das características mecânicas do material, a sensibilidade do entalhe depende também do raio de arredondamento do entalhe - Empiricamente se verifica que a medida que o raio de arredondamento do entalhe tende para zero a sensibilidade do material decresce e também se aproxima de zero. Existem vários modelos clássicos disponíveis para a determinação da sensibilidade do material a presença de entalhes. Entretanto, um dos modelos mais utilizados foi proposto por Neuber (10), a partir da fórmula de Kuhn-Hardrath (10), em termos da constante de Neuber, \sqrt{a} , e da raiz de arredondamento do entalhe, r , cuja expressão é apresentada na Eq. (8).

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} \quad (8)$$

A constante de Neuber, \sqrt{a} , é um parâmetro que depende do tipo de material e é fortemente correlacionada ao limite de resistência a tração. Na Fig. 3(a) é apresentado o comportamento da constante de Neuber em função do limite de resistência a tração para ligas de alumínio recozidas e endurecidas. Considerando que as ligas aqui estudadas são ligas endurecidas, estima-se que a constante de Neuber das ligas AA 6201 T81 e AA 1350 H19, sejam respectivamente iguais a 0,977 e 1,517. Substituindo esses dois valores na Eq. (8) e escrevendo-a em termos de do raio de arredondamento, r , é possível avaliar o comportamento do fator de sensibilidade ao entalhe para esses dois materiais. Tal comportamento é apresentado na Fig. 3(b). A análise das curvas apresentadas na Fig. 3(a) permite constatar a convergência de q para zero quando $r \rightarrow 0$. Além de mostrar que na condição limite de $r \rightarrow 0$, que é uma condição que está associada a presença de micro defeitos superficiais devido ao processo de fabricação e ao processo de desgaste da superfície dos fios, a razão entre a sensibilidade ao entalhe da liga 6201 T 81 e relação a da liga AA 1350 H19 é da ordem de 1.55 e a medida que $r \rightarrow \infty$ a razão entre a sensibilidade ao entalhe desses materiais tende para 1.

2.4 Correção da Resistência a Fadiga em Função do Fator de Redução de Resistência a Fadiga

Expliciando na Eq. (7) obtém-se uma expressão que permite avaliar a resistência a fadiga de um componente mecânico que possui um concentrador de tensões a partir dos valores conhecidos da resistência a fadiga do material, σ_f , e do fator de redução de resistência a fadiga, K_f . Tipicamente, K_f se relaciona a q e a K_t por meio da relação apresentada na Eq. (9).

$$K_f = 1 + q \cdot (K_t - 1) \quad (9)$$

Substituindo essa expressão na Eq. (7) e explicitando $\sigma_{entalhe}$ resultará na Eq.(10).

$$\sigma_{entalhe} = \frac{\sigma_f}{1 + q \cdot (K_t - 1)} \quad (10)$$

Assim, com base na Eq. (10), verifica-se que a resistência a fadiga do cabo condutor será função não apenas da resistência a fadiga do material de fabricação do fio, mas também devido a intensidade do fator teórico de concentração de tensões e a sensibilidade do material a presença desses concentradores de tensões (exemplos: descontinuidades, entalhes, interação entre os fios devido a mecânica de contato entre eles). Outro aspecto extremamente relevante está relacionada a definição das condições de contato na ligação entre o cabo condutor e as ferragens. Tais ligações são extremamente complexas que, a priori, torna-se muito complicado prever não apenas o comportamento do campo de tensões resultante, mas também as condições de descontinuidades geradas pelo desgaste abrasivo desses materiais.

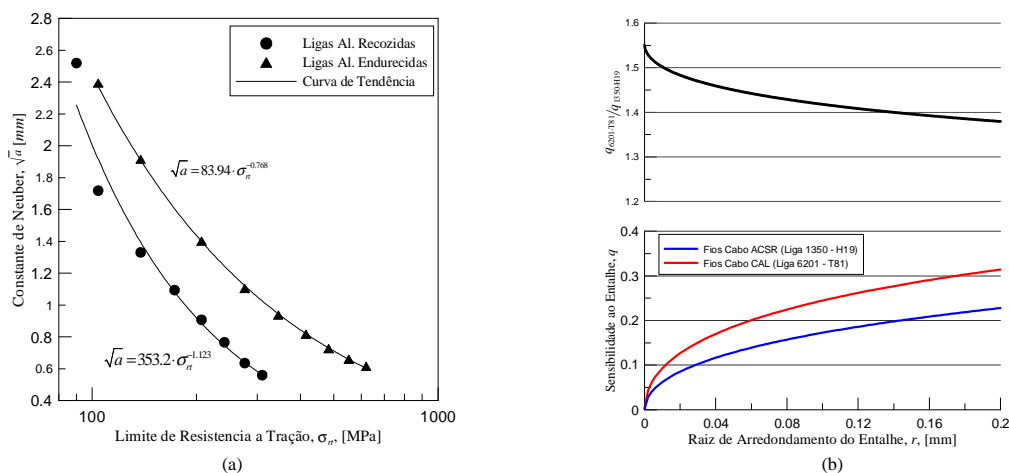


FIGURA 3 – (a) Comportamento da constante de Neuber em função do limite de resistência a tração das ligas de alumínio e (b) Comportamento da sensibilidade ao entalhe para os fios do cabo condutores tipo CAA e CAL.

3.0 - Programa Experimental

3.1 Materiais

No desenvolvimento dessa pesquisa foram utilizadas amostras de um condutor CAA, que será referenciado como condutor A, e dois condutores CAL, que serão referenciados como condutores B e C. Todos os ensaios foram realizados utilizando-se grampos monoarticulados adequados às bitolas dos cabos. Na Tab. 4 são apresentadas as cargas de ruptura e os valores da constante de Poffenberg de cada um dos condutores ensaiados, bem como as, respectivas, cargas de esticamento (resultantes da prescrição de um percentual de carga de esticamento, EDS, igual a 20% da carga de ruptura do condutor).

Tabela 4 – Valores da carga de ruptura e carga de esticamento.

Identificação do Condutor	Tipo	Carga de Ruptura [Kgf]	Formação, Número e Diâmetro dos Fios[mm]		Constante de Poffenberg [MPa/mm]	Carga de Esticamento [Kgf]
			Aço	Alumínio		
A	ACSR	7394	7 x 2,440	26 x 3,140	31,35	1479
B	CAL	13485		37 x 3,962	34,75	2697
C	CAL	15445		61 x 3,340	32,60	3089

Para fixação dos cabos na bancada foram utilizados grampos mono articulados com capacidade de montagem de cabos com diâmetros entre 17 e 28 mm (usados para montagem das amostras dos condutores A e B) e com diâmetros entre 28 e 38 mm (usados para montagem das amostras do condutore C).

3.2 Aparato Experimental

Na realização os ensaios utilizou-se a Bancada para Ensaios Mecânicos à Fadiga de Cabos Condutores de

Energia, do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. O desenho esquemático da bancada de ensaios pode ser visualizado na Fig. 4.

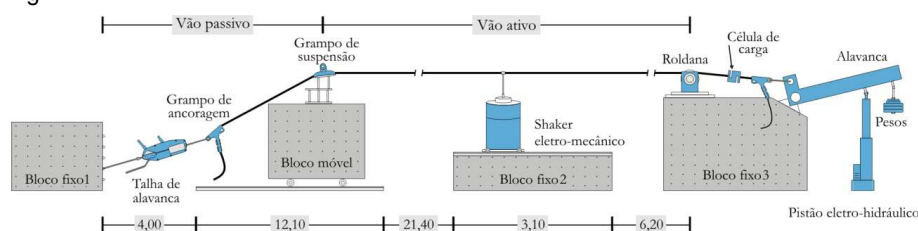


FIGURA 4 – Desenho esquemático da Bancada de Ensaios de Fadiga em Cabos Condutores da UnB

O vão ativo utilizado nesses ensaios possuía comprimento total da ordem de 40 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.

3.3 Procedimentos Experimentais

A avaliação do desempenho dos três cabos analisados com relação a vida de fadiga foi conduzida de forma a prescrever aproximadamente os mesmos níveis de tensão crítica no último ponto de contato, calculada com base na Eq.1. Ou seja, os cabos foram comparados em níveis de tensão e não em níveis de amplitude de ensaio (Y_b). Os ensaios foram controlados pelo deslocamento Y_b , medido por um acelerômetro posicionado em um ponto sobre o cabo, no vão ativo de teste, distante 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão. Com base na equação de Poffenberger-Swart, Eq. (2), correlacionou-se o deslocamento Y_b com a amplitude de tensão σ_a em um fio de alumínio da camada mais externa diametralmente oposto ao último ponto de contato entre cabo e grampo, definida como tensão crítica de fadiga. Assim, indiretamente é possível controlar o ensaio pela amplitude de tensão nesse ponto do fio de alumínio mencionado. Na Tab. 5 apresentam-se os valores nominais das tensões utilizadas para a estimativa experimental das curvas S-N e os respectivos valores de amplitude de deslocamento (Y_b) impostas em um ponto do cabo posicionado a 89 mm do UPC necessários a gerar tais níveis de tensão. A fim de se realizar uma comparação mais justa entre as curvas de fadiga, serão apresentadas as curvas de fadiga com base em 3 quebras para o condutor A e de 4 e 6 quebras para os condutores B e C (representando assim um percentual de fios quebrados igual a 10 % do número total de fios de alumínio). Para a construção das curvas de fadiga dos condutores A, B e C, foram utilizadas, respectivamente, 15, 12 e 7 ensaios válidos.

Tabela 5 – Tensões críticas de fadiga atuantes no último ponto de contato (UPC) e respectivas amplitudes de deslocamento no ponto a 89 mm do UPC.

Condutor	Tensão de Poffenberg [MPa]	27,8	28,1	31,0	31,3	34,5	32,6	34,2	34,5	39,8	43,5
A	Deslocamentos Prescritos no ponto a 89 mm do UPC [mm]		0,90		1,00	1,10				1,27	1,39
B		0,80		0,89				0,98			
C			0,86		0,96		1,00		1,06		

4.0 - Resultados

Com base nos resultados obtidos experimentalmente foi possível determinar as curva de resistência a fadiga dos condutores A, B e C utilizando-se como critério de falha a quebra de 3 fios de alumínio e a quebra de 10 % do total de fios de alumínio. Tais resultados são apresentados nas Fig. 5 (a) e (b).

A análise qualitativa dos resultados apresentados nas Fig. 5 (a) e (b) indica que, independentemente do modo de falha adotado, os condutores tipo CAL, respectivamente os condutores B e C possuem resistência a fadiga significativamente menor do que o condutor A, que é um condutor CAA. Nota-se também desses resultados que os pontos experimentais obtidos para os condutores B e C aparentemente estão muito próximos e em algumas situações a nuvem de pontos se sobrepõem. Isso pode indicar que esses conjuntos de dados representam o mesmo comportamento a fadiga. A fim de verificar tal hipótese, os dados amostrais de vida para os condutores B e C foram classificados por níveis de tensão para posteriormente aplicar-se o teste t de Student aos logaritmos das vidas (é comum assumir que a vida de fadiga segue distribuição log-normal). Com resultado dessas análise pode-se constatar, a um nível de significância de 95%, que os dados amostrais obtidos são provenientes da mesma amostra. Considerando que os condutores tipo CAL utilizados nesse estudo possuem características construtivas distintas (tais como: número de camadas e de fios de alumínio, diâmetro de fios, etc) e que os grampos utilizados nos ensaios tinham características dimensionais diferentes, torna-se possível inferir que a redução da resistência a fadiga dos condutores CAL em relação ao CAA foi provocada basicamente pela sensibilidade a fadiga da liga 6201 T81. Assim, admitindo a hipótese de que os dados experimentais de vida a fadiga obtidos para os condutores B e C representem o comportamento típico a fadiga de um condutor tipo CAL, os dados de vida dos condutores B e C poderão ser representados por meio de uma única curva de resistência a fadiga. Tal curva é apresentada abaixo na Fig. 6. A fim de avaliar o desempenho dos cabos condutores a fadiga, apresenta-se na Fig. 7 curvas que correlacionam a resistência a fadiga dos cabos CAL e CAA em relação a curva CSBL e entre a resistência a fadiga

da do cabo CAA em relação ao CAL.

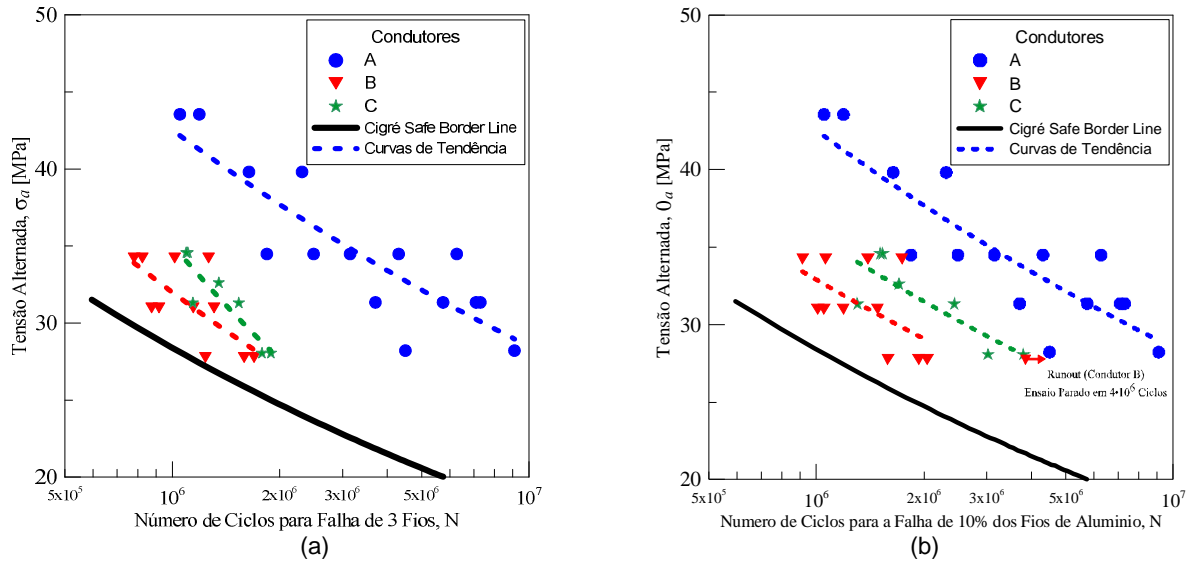


FIGURA 5 – Curvas Tensão versus Vida relacionadas a Falhas de: (a) 3 Fios de Alumínio e (b) 10% do Total de Fios de Alumínio

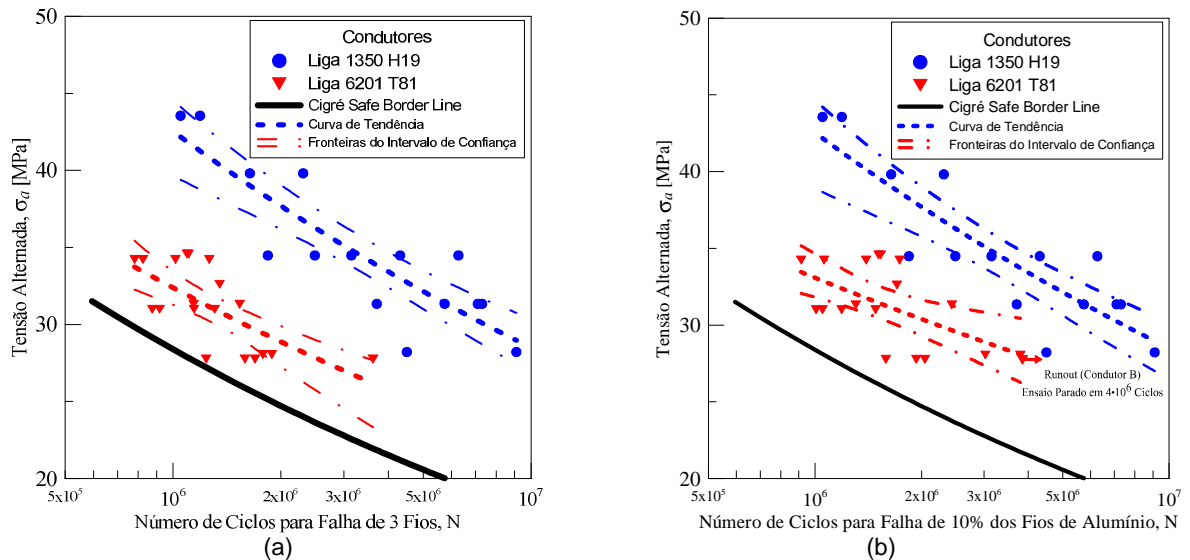


FIGURA 6 – Curvas Tensão versus Vida relacionadas a Falhas de Condutores CAA e CAL Considerando: (a) 3 Fios de Alumínio e (b) 10% do Total de Fios de Alumínio

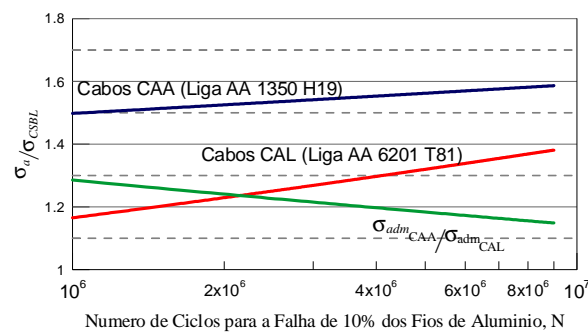


FIGURA 7 – Resistência a Fadiga Normalizada dos Cabos CAL e CAA em Relação à Curva CSBL e do Cabo CAA em Relação ao cabo CAL

5.0 - CONCLUSÕES

O presente artigo discutiu aspectos teóricos associados ao efeito da sensibilidade ao entalhe na resistência a fadiga das ligas de alumínio AA 6201 T81 e AA 1350 H19 utilizadas, respectivamente, na fabricação dos

condutores tipo CAL e CAA. Com base nessa discussão teórica, concluiu que a sensibilidade a fadiga da liga AA 6201 T81 é um fator deletério que pode reduzir de forma significativa a resistência a fadiga dos condutores tipo CAL.

Além dessa análise teórica, o artigo apresentou e discutiu os resultados de ensaios experimentais conduzidos com o objetivo de estimar as curvas de fadiga de dois condutores tipo CAL e um condutor tipo CAA. Com base nas curvas de fadiga obtidas pode-se concluir que:

- Qualitativamente o desempenho a fadiga dos cabos CAL é muito inferior ao observado para o condutor CAA,
- O conjunto de resultados experimentais obtidos para os cabos CAL apresentaram estatisticamente o mesmo comportamento a fadiga.
- A redução da resistência a fadiga dos condutores CAL em relação ao CAA foi provocada basicamente pela sensibilidade a fadiga da liga 6201 T81.
- Na faixa de vidas estudadas, os cabos CAA falham por fadiga quando são submetidos a níveis de tensão alternada 1,25 vezes maiores do que as suportadas pelos cabos CAL.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CIGRÉ-SCB2-WG11-TF7-06-01; "Fatigue endurance capability of conductor/clamp systems" – Update of Present Knowledge, 2006
- (2) IEEE, "Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors", 2007.
- (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) Rawlings, C. B., "Fatigue of Overhead Conductors", Transmission Line Reference Book, Electrical Power Research Institute, Palo Alto CA, 1979, pp 51-81.
- (6) Fadel, A.A., Rosa, D., Murça, L.B., Ferreira, J.L.A. and Araújo, J.A., 'Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an Ibis steel reinforced aluminium conductor', International Journal of Fatigue, Volume 42, September 2012, pp 24–34. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.03.007>)
- (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) Norma ASTM B398/B398M – 02 (Reapproved 2007), "Aluminum-Alloy 6201-T81 Wire for Electrical Purposes", Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States
- (9) <http://www.matweb.com>
- (10) SILVA, Braitner Lobato da ; ARAÚJO, José Alexander ; FERREIRA, J. L. A. . High-cycle notch sensitivity of alloy steel ASTM A743 CA6NM used in hydrogenator turbine components. Frattura ed Integrità Strutturale, v. 14, p. 36-44, 2010. <http://dx.doi.org/10.3221/IGF-ESIS.14.04>

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Aida Alves Fadel – Engenheira mecânica pelo CEFET-RJ, mestre em engenharia mecânica pelo IME e Doutora em Ciências Mecânicas pela Universidade de Brasília (UnB). Atualmente leciona nos cursos de Engenharia Mecânica e Mecatrônica como Professora Adjunta na UnB.

Antônio Manoel Dias Henriques – Engenheiro mecânico pela Universidade de Brasília – UnB (1979), mestre em Ciências Mecânicas pela PUC-Rio (1982) e Doutor em Estruturas e Construção Civil pela UnB em (2006). Atualmente atua como professor adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.

Jorge Luiz de Almeida Ferreira – Engenheiro Mecânico pela UFF (1990), mestre e doutor em Engenharia Mecânica pela PUC-Rio (1993 e 1997). Professor Adjunto da Universidade de Brasília desde 1998. Têm experiência na área de Análise de Tensões, com ênfase nos seguintes temas: fadiga, análise de tensões e confiabilidade estrutural.

José Alexander Araújo – Professor Adjunto da Universidade de Brasília – UnB. Engenheiro pela Universidade Federal de Uberlândia - UFU. Mestre em Engenharia Mecânica pela UnB e Ph.D em *Engineering Sciences* pela University of Oxford, UK. Membro afiliado da Academia Brasileira de Ciências e Pesquisador de Produtividade Nível 2 do CNPq.

Larissa Watanabe – Graduada em engenharia mecânica pela UNESP (2007), mestre em engenharia mecânica pela UNESP (2010) na área de mecânica dos sólidos. Doutoranda do Prog. de Pós Graduação em Ciências Mecânicas da UnB.

Marcos César de Araújo – Possui graduação em Engenharia Industrial Elétrica pelo Instituto Superior de Educação Santa Cecília(1981). Atualmente é Gerente Executivo da Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A

Mario Noburu Takai – Graduado em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica de São Paulo-USP (1974). Trabalhou 15 anos como engenheiro de projetos de linhas de transmissão na THEMAG Engenharia. É funcionário de carreira da Eletrobrás Eletronorte desde 1989, onde trabalha na Área de Projeto de Linhas de Transmissão-EETL