



GRUPO – III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

**INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA DOS FIOS DE ALUMÍNIO NA VIDA EM FADIGA DE CABOS
CONDUTORES DE ENERGIA ELÉTRICA**

GUSTAVO REINKE (*)
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

COSME ROBERTO M. DA SILVA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

JORGE LUIZ A. FERREIRA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

JOSÉ ALEXANDER ARAÚJO
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

MARCOS CÉSAR DE ARAÚJO
ELETRONORTE – ELN

REMY KALOMBO BADIBANGA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar possíveis causas das diferenças das vidas em fadiga em dois cabos condutores comerciais ("A" e "B"), juntamente com limites de resistência a tração e escoamento e dureza, confeccionados da mesma liga de alumínio 6201 e sujeitos a carregamentos cíclicos semelhantes. Utilizando-se microscopia eletrônica de varredura, elétrons retroespalhados e programa de análise de imagens, foi possível identificar precipitados de impurezas da liga presentes nas amostras de maneira qualitativa e quantitativa. Quantidades elevadas de fases secundárias podem resultar na redução de propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas de ligas de alumínio da série 6xxx.

PALAVRAS-CHAVE

Fadiga, Cabos Condutores, Alumínio Liga, Microestrutura, Microscópio Eletrônico de Varredura

1.0 - INTRODUÇÃO

1.1 Fadiga

Fadiga pode ser definida como sendo um tipo de falha mecânica, causada primeiramente pela aplicação de carregamentos repetidos (tensões ou deformações) variáveis, sendo caracterizada pela geração e propagação gradual e lenta de trincas que levam à ruptura e ao colapso repentino do material.

Ao longo da vida útil do cabo condutor as vibrações causadas pela ação dos ventos produzem frequências de vibração, podendo chegar próximo das frequências naturais dos cabos, havendo uma grande absorção de energia do movimento de oscilação, que produzem falha por meio da combinação do carregamento cíclico no cabo e do processo de *fretting*, os quais facilitam o surgimento e o crescimento de trincas nos fios (1) e (2). Giummarra *et al.* (3) traz um problema de fadiga por *fretting* em seu trabalho, onde os autores buscam investigar os efeitos das características da microestrutura em uma resposta ao *fretting* em ligas de alumínio, afirmando que o problema de fadiga por *fretting* é uma preocupação da indústria aeroespacial em termos de como a ela pode nuclear trincas em metais sob condições de fadiga antes mesmo que elas venham a aparecer.

Este tipo de falha ocorre em regiões onde há restrições ao movimento oscilatório do condutor, tais como grampos de suspensão, espaçadores, amortecedores, etc. Tais restrições fazem com que os fios do cabo condutor escorreguem um contra o outro e as forças de atrito relativo levam ao surgimento do *fretting* entre os fios e entre os fios e a região de restrição (4).

(*) Universidade de Brasília – Campus Univ. Darcy Ribeiro - Bloco SG-9 – CEP 70310-500, Brasília, DF – Brasil
Email: gustav.reinke@gmail.com

A morfologia das superfícies de fratura de uma peça que rompe por fadiga depende do nível das tensões aplicadas e do modo de sollicitação, seja torção, flexão, tração, etc. (5). Durante um processo de falha por fadiga, existem três estágios: i) nucleação da trinca, ii) propagação da trinca ou crescimento microscópico e iii) ruptura (6), Figura 1. Normalmente a trinca tem seu início em uma descontinuidade do material onde o estado de tensão é máximo. Tais descontinuidades podem ter surgido devido a concentradores de tensão, falha no processo de fabricação, formação de cavidades devido ao rolamento/deslizamento de superfícies, etc.



Figura 1 – Representação gráfica dos estágios do processo de fadiga (2).

1.2 Fórmula de Poffenberger-Swart e a curva S-N

Um dos modos de se caracterizar a vida em fadiga é utilizando a curva de Wöhler, ou curva S-N, que correlaciona a vida, em número de ciclos, com a tensão de trabalho, e seus pontos são obtidos ao se submeter corpos de prova do material à determinada amplitude de tensão (S) que se mantém constante durante todo o ensaio, até que a falha ocorra após determinado número de ciclos (N).

O cabo condutor é uma estrutura composta de vários fios, que são enrolados ao redor de um fio central formando várias camadas que possuem movimento independente quando submetidas a um esforço e devido à complexidade desta configuração estrutural do cabo, uma expressão matemática foi proposta por Poffenberger e Swart, ver Equação 1, que correlaciona a amplitude de deslocamento pico-a-pico (Y_b) de uma região do cabo a tensão dinâmica de flexão (σ_a) em um ponto diametralmente oposto ao último ponto de contato (UPC) entre o cabo e grampo (7), ver Figura 2.

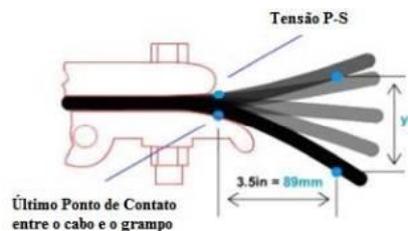


Figura 2 – Desenho esquemático da montagem do condutor no grampo, mostrando a amplitude de deslocamento (Y_b) e o local onde a tensão média é medida.

$$\sigma_a = K \cdot Y_b \quad (1)$$

Onde, σ_a [MPa] é a tensão dinâmica de flexão (0-a-pico), Y_b é amplitude de deslocamento (pico-a-pico) do condutor medido verticalmente em uma posição de 89mm a partir do último ponto de contato, e K representa a constante de Poffenberger, ver Equação 2:

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

Onde E_a [MPa], d [mm] e a constante x [mm] são, respectivamente, o módulo de Young do material, o diâmetro do cabo, a distância do último ponto de contato (UPC), posição onde o deslocamento vertical é medido. O valor de x é usualmente 89 mm e a constante p é dada pela expressão, ver Equação 3:

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

Onde T [N] é a carga diária média de esticamento para uma temperatura constante durante a medição, também chamado de EDS (*Every Day Stress*) e EI [N.mm²] é a rigidez a flexão do cabo, cujo valor mínimo é dado por, ver Equação 4:

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

Onde, n_a é o número de fios de alumínio do cabo, E_a é o módulo de Young para o alumínio, d_a é o diâmetro do fio de alumínio, n_s é o número de fios de aço do cabo, E_s é o módulo de Young para o aço e d_s é o diâmetro do fio de aço.

1.3 Alumínio e suas ligas

O alumínio é o segundo mais abundante elemento metálico presente na terra, e se tornou um competidor econômico nas aplicações de engenharia no começo do século XIX. E o que trouxe a atenção para este metal e suas ligas foram seu baixo peso, propriedades físicas, fácil conformabilidade, propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Dentre tais propriedades pode-se citar a densidade, o alumínio possui uma menor densidade quando comparado com outros metais como o aço, cobre e bronze. As condutividades elétrica e térmica do alumínio são boas, algumas ligas possuem altos graus de resistividade elétrica, sua condutividade elétrica chega a ser perto de duas vezes a do cobre em um peso equivalente. A condutividade térmica, chega a 50-60% a do cobre, tendo várias aplicações. O alumínio é um elemento com a propriedade de ser não ferromagnético, propriedade importante nas indústrias de eletrônicos. O alumínio é um metal não tóxico sendo usado em recipientes de comidas e bebidas (8).

Alumínios liga são usados na engenharia devido a suas propriedades, como baixo peso, alta razão resistência-peso, resistência a corrosão e custo relativamente baixo. Também são utilizados pela alta condutividade térmica e elétrica e facilidade de fabricação. É conveniente dividir as ligas de alumínio em duas grandes categorias: fundidos e forjados. Muitas ligas respondem a tratamentos térmicos baseados na solubilidade de fases. Dentre esses tratamentos incluem-se envelhecimento (artificial ou natural), precipitação, endurecimento, etc. (8) e (9).

A grande gama de propriedades mecânicas das ligas de alumínio depende da composição química, tratamento térmico, trabalho a frio e outros fatores. As ligas 6xxx utilizam magnésio e silício, na forma de composto intermetálico Mg_2Si (siliceto de magnésio), para garantir bom desempenho dos tratamentos de solubilização e precipitação.

1.4 Fretting

Por se tratar de cabos condutores que são compostos de vários fios que estão em constante contato uns com os outros e com o grampo de suspensão, ocorre um fenômeno chamado de *fretting*. Podendo ser definido como um fenômeno que ocorre na região de contato entre dois materiais e estão sujeitos a pequeno movimento relativo quando submetidos a forças oscilatórias tangenciais de pequena amplitude, gerando zonas de microdeslizamento (10). Na Figura 3 está mostrado um desenho esquemático da marca gerada pelo contato fio/fio e na Figura 4 um exemplo de uma marca gerada pelo contato fio/fio. Essas marcas geradas são grandes concentradores de tensão e podem nuclear uma trinca.

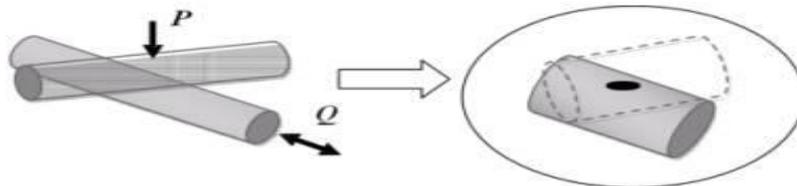


Figura 3 – Desenho esquemático do fenômeno do *fretting* devido ao contato fio/fio (11).

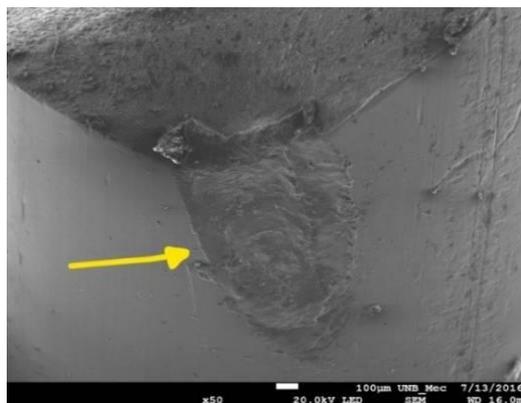


Figura 4 – Exemplo da marca gerada devido ao contato fio/fio.

1.5 Material e os cabos condutores

A liga 6201-T81 foi usada na confecção dos fios de ambos os cabos avaliados neste trabalho. Este tipo de liga contém em sua composição, principalmente, os elementos magnésio e silício. Os principais elementos presentes nos cabos condutores estão dispostos na tabela 1.

Tabela 1 – Principais elementos da composição química dos cabos “A” e “B” (13).

Elemento [%]	Cabo “B”	Cabo “A”
Cobre (Cu)	<0,01	<0,01
Silício (Si)	0,50	0,58
Ferro (Fe)	0,18	0,21
Magnésio (Mg)	0,60	0,65
Boro (B)	0,0030	0,0032
Alumínio (Al)	Restante	Restante

Os cabos condutores são do tipo CAL (Cabo Alumínio Liga) e são compostos de um grupo de fios dispostos concêntricamente ao fio central, formando camadas de fios torcidos, de maneira que cada camada esteja torcida em sentido contrário a camada anterior, ver Figura 5.

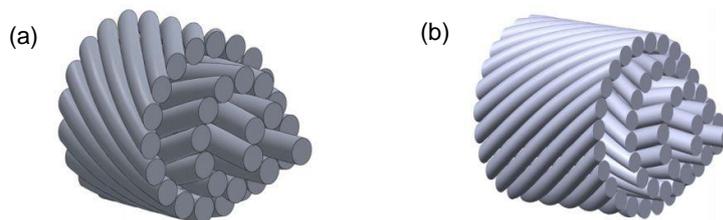


Figura 5 – Disposição e orientação dos fios (a) Cabo “A” e (b) Cabo “B”.

1.6 Metodologia experimental

Para a realização do ensaio de fadiga nos cabos, foram utilizadas 9 amostras do cabo “A” e 9 amostras do cabo “B”. Todos os testes foram feitos com o uso de grampos de suspensão mono-articulados. Os testes foram realizados com uma EDS (*Every Day Stress*), ou carga de esticamento, de 20% da carga de rompimento (3125 kgf). Na figura 6, é mostrado o esquema da bancada de ensaios, que faz parte do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia – LabCabos/UnB. O vão ativo utilizado para os testes é de 40 m. A temperatura do laboratório foi controlada com o intuito de evitar mudanças na tensão de carregamento devido à alteração da temperatura.

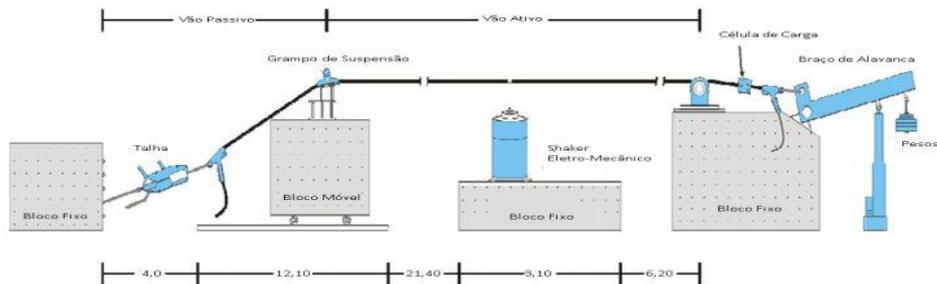


Figura 6 – Desenho esquemático da bancada experimental dos ensaios de fadiga.

2.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.1 Ensaio de fadiga

Dos ensaios de fadiga realizados foram geradas curvas S-N para cada um dos cabos analisados e os resultados são apresentados na Figura 7 e nas Tabelas 2 e 3. Nestas tabelas encontram-se a primeira e última quebra de cada teste.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de vida em fadiga para o cabo condutor “A”.

Ensaio	Amplitude de Desloc. [mm]	Amplitude de Tensão [Mpa]	1ª quebra [ciclos]	Última quebra [ciclos]
1	0,68	23,7	5,60E+05	1,08E+06
2		23,7	1,03E+06	1,50E+06
3		23,7	6,88E+05	1,29E+06
1	0,81	28,22	2,42E+05	6,13E+05
2		28,22	9,74E+05	1,37E+06
3		28,22	4,00E+05	9,21E+05
1	0,9	31,35	4,34E+05	7,44E+05
2		31,35	2,93E+05	7,63E+05
3		31,35	5,47E+05	6,08E+05

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de vida em fadiga para o cabo condutor “B”.

Ensaio	Amplitude de Desloc. [mm]	Amplitude de Tensão [Mpa]	1ª quebra [ciclos]	Última quebra [ciclos]
1	0,87	28,22	1,27E+06	3,13E+06
2		28,22	1,01E+06	3,11E+06
3		28,22	1,43E+06	3,02E+06
1	0,97	31,35	1,14E+06	2,33E+06
2		31,35	1,14E+06	2,61E+06
3		31,35	1,34E+06	2,41E+06
1	1,07	34,49	5,22E+05	2,22E+06
2		34,49	6,19E+05	2,10E+06
3		34,49	7,35E+05	2,09E+06

Análises qualitativas dos resultados apresentados mostram que o cabo “A” tem vidas cerca de 3 vezes menores, quando comparado com as encontradas para o cabo “B”, mostrando uma menor resistência a fadiga. Nota-se que os resultados obtidos para o cabo “B” apresentam uma certa repetitividade e que o coeficiente de correlação (R^2) está bem próximo de 1, indicando que os pontos se adequam bem a linha de tendência. Já os resultados obtidos para o cabo “A” não apresentaram boa repetitividade. Além disso o coeficiente de correlação não se adequa bem a linha de tendência.

É esperado que com o aumento da amplitude de tensão a vida do cabo diminuísse devido a maior tensão presente nos fios, como visto nos trabalhos de (4), (12), (14) e (15). Todavia, o cabo “A” apresenta resultados inconsistentes. Para este cabo, ensaios realizados na amplitude de 28,22 MPa apresentam vida menor quando comparado com ensaio realizado com maior amplitude de tensão

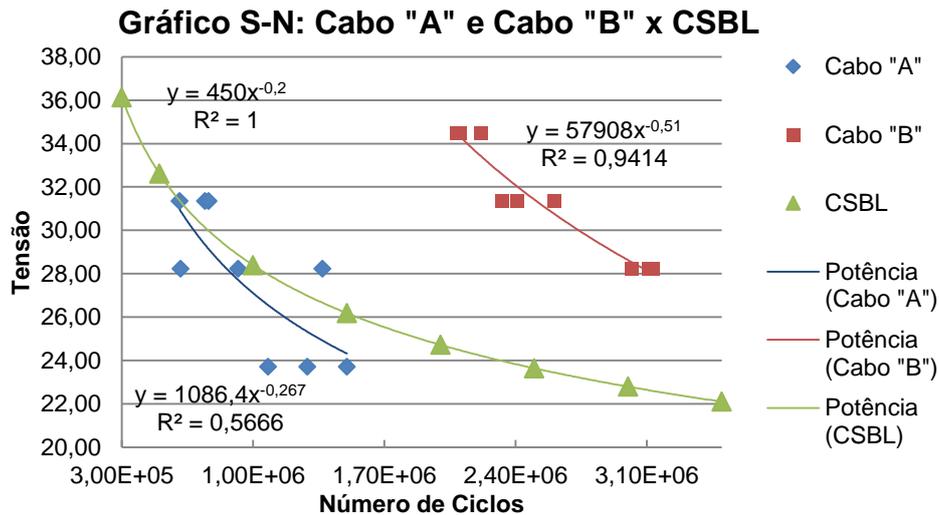


Figura 7 – Curvas S-N dos cabos “A” e “B” juntamente com a curva de segurança CIGRÉ (CSBL – CIGRÉ Safe Border Line).

2.2 Análise da Falha

A análise da falha busca analisar basicamente os seguintes aspectos: superfície da fratura a nível macro e microscópico, qualidade do material, projeto do componente e histórico de carga aplicada, buscando características que indicam o processo de falha.

Durante a análise de falha deste trabalho, as fraturas dos fios dos cabos condutores ensaiados, tiveram sua origem em locais onde o desgaste se mostrou mais acentuado como marcas elípticas de *fretting* devido ao contato fio/fio ou contato fio/grampo. A rugosidade superficial e refletividade ótica provêm dicas qualitativas relativas aos eventos associados com a propagação da trinca. As superfícies de crescimento da trinca são tipicamente lisas quando comparadas com a região da fratura catastrófica, que apresenta superfície mais rugosa. Superfícies amorfas indicam fratura dúctil em microescala, enquanto superfícies brilhantes e altamente reflexivas indicam uma fratura frágil ou fratura intergranular (16).

Na Figura 8 é possível verificar as diferentes áreas de uma fratura por fadiga, como a iniciação da trinca, propagação da trinca e fratura. A seta amarela indica o local de contato fio/fio e local de nucleação da trinca. A seta vermelha indica a região mais lisa, remetendo a zona de propagação da trinca. As setas azuis indicam a região de natureza mais rugosa, revelando a zona de ruptura, Figura 8.

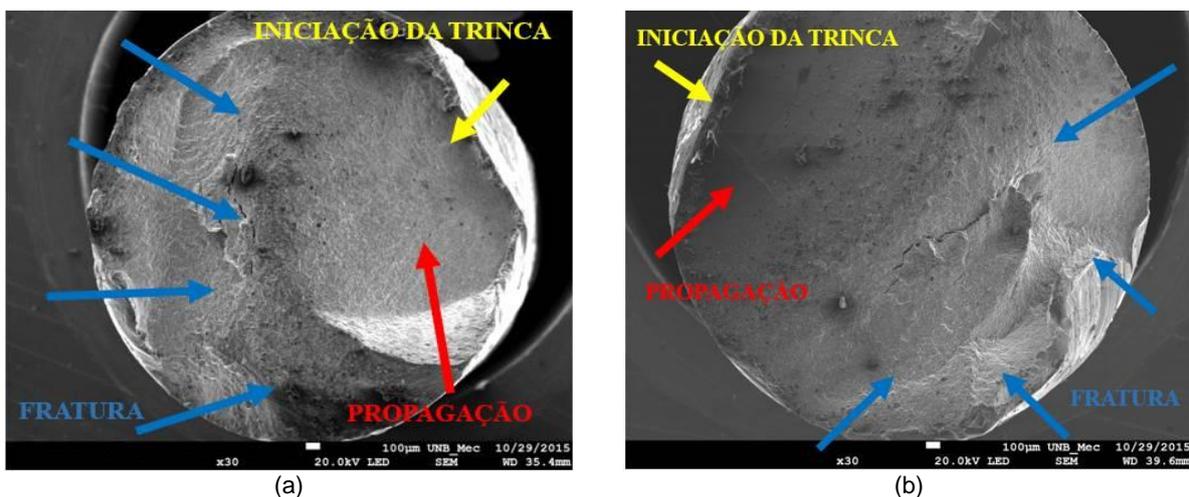


Figura 8 – Vista superior da fratura do cabo condutor mostrando os diferentes estágios de uma fratura por fadiga, indicadas pelas setas (a) Cabo “A” e (b) Cabo “B”. MEV. 30x.

2.3 Propriedades mecânicas e microestrutura

Ensaio de tração uniaxial e dureza Vickers foram realizados em fios dos cabos “A” e “B”, visando avaliação comparativa, tendo em vista que apesar de serem confeccionados com a mesma liga e, teoricamente, submetidos

a tratamentos térmicos idênticos, os respectivos cabos apresentaram resultados distintos nos ensaios de fadiga. Os resultados obtidos nestes ensaios de tração (Tabela 4) revelaram que os fios do cabo “A” apresentaram menor limite de resistência à tração, de alongamento e de dureza que os fios do cabo “B”.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de tração para os fios dos cabos “A” e “B”.

Propriedades Mecânicas	Cabo "A"	Cabo "B"
Limite escoamento [MPa]	299 ± 7,8	320 ± 23,9
Limite Resistência à Tração [MPa]	309 ± 8,3	340 ± 17,2
Dureza Vickers [HV]	90 ± 6,93	102,95 ± 1,41

As propriedades mecânicas do alumínio são influenciadas por alguns fatores, como por exemplo, precipitados finos formados durante tratamento de envelhecimento e que promovem o endurecimento da liga, compostos intermetálicos grosseiros que se formam durante a solidificação ou em processos subsequentes, tamanho e forma dos grãos, dentre outras (17).

Na Figura 9 encontram-se imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura utilizando o recurso retroespalhado com o objetivo de revelar os precipitados existentes na superfície das amostras. Análises EDS, ver Figura 10, dos pontos claros e conclui-se tratar de precipitados de Al-Fe-Si. O Fe é a impureza mais comum encontrada no alumínio, sendo difícil a sua retirada, podendo ser incorporada a liga por ser material dos tanques de fundição. A solubilidade do Fe no Al é baixa, por isso a grande parte do Fe é encontrado na forma de partículas de segunda fase em conjunto com Al e outros elementos (18).

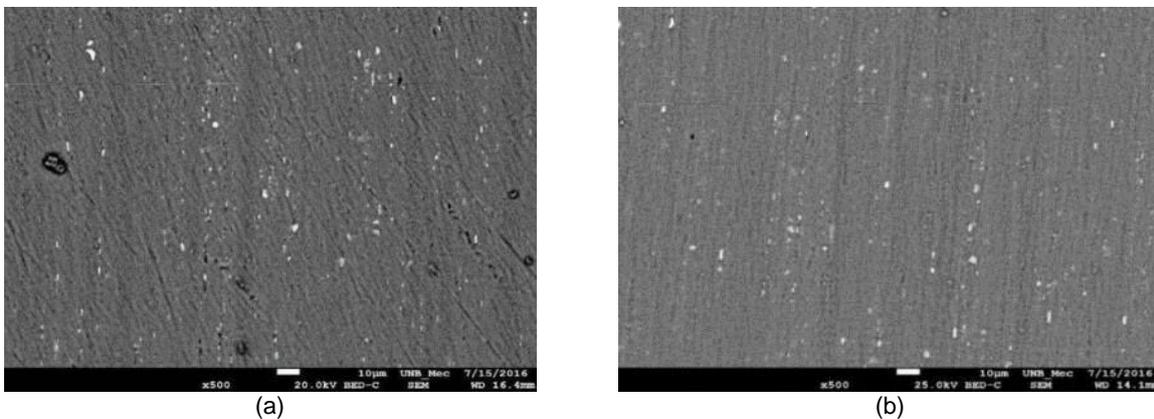


Figura 9 – Amostras dos fios dos cabos mostrando precipitados em sua superfície (a) cabo “A” e (b) cabo “B”.

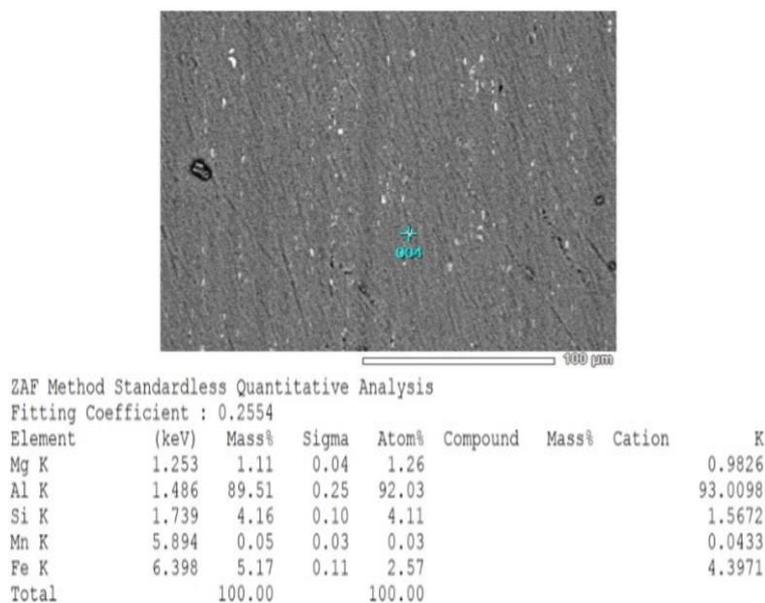


Figura 10 – Análise EDS realizada em um precipitado claro revelou grande concentração de Al-Fe-Si.

Com a ajuda do software ImageJ, pode-se quantificar os precipitados quanto ao seu tamanho médio e área total ocupada pelos mesmos, conforme mostrado na Tabela 5. Das análises efetuadas nas amostras constatou-se que a quantidade de precipitados é semelhante. Da Tabela 5 percebe-se que nos fios do cabo “A” foram encontrados

precipitados com maior tamanho médio, cerca de 12%, e que ocupavam uma maior área dentro da matriz, cerca de 10%, quando comparados com os fios do cabo “B”.

Tabela 5 – Comparação dos precipitados claros nas amostras dos fios dos cabos.

Fio	Média Área [%]	Tamanho Médio [μm]
Cabo "A"	$0,573 \pm 0,033$	$0,769 \pm 0,081$
Cabo "B"	$0,514 \pm 0,065$	$0,673 \pm 0,098$

Essas partículas grosseiras ricas em Al-Fe-Si encontradas nos fios do cabo “A” podem ser uma justificativa para o pior comportamento em fadiga e maior dispersão dos resultados, uma vez que tais partículas podem agir como concentradores de tensão e criar novos sítios de nucleação de trincas (19). Na Figura 11 mostram as microestruturas tratadas com software de imagem dos fios dos cabos buscando revelar os precipitados encontrados nas duas microestruturas.

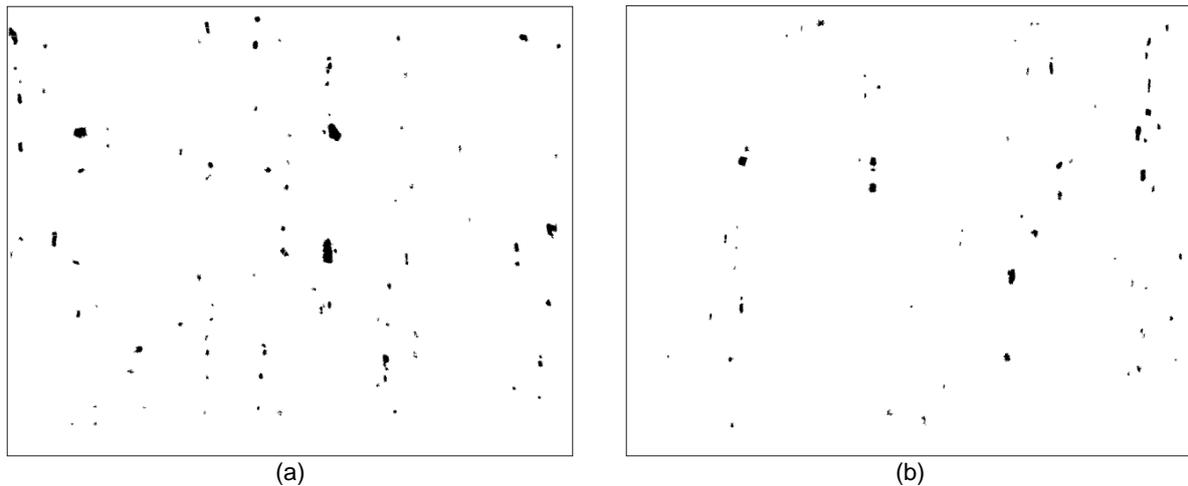


Figura 11 – Amostras dos fios tratadas com o software de edição de imagem (ImageJ) evidenciando os precipitados encontrados (a) Cabo “A” e (b) Cabo “B”. MEV. 1000x.

3.0 - CONCLUSÕES

Deste presente trabalho pode-se inferir as seguintes conclusões:

- i. Vidas em fadiga inferiores para o cabo “A”, ficando abaixo a curva de segurança proposta por CIGRÉ (CSBL), obtendo vidas bem menores – cerca de 3 vezes – quando comparado com o cabo “B” e apresentando resultados muito dispersos.
- ii. Nas análises fractográficas, verificou-se que os fios de ambos os cabos apresentaram características condizentes com o processo de fadiga, apresentando os 3 estágios característicos de uma falha por fadiga.
- iii. Das análises das propriedades mecânicas (limite de escoamento, resistência à tração e dureza), constatou-se que os fios do cabo “A” apresentam piores desempenhos nessas propriedades quando comparados com o cabo “B”. Estas propriedades mecânicas diferentes estão diretamente relacionadas aos precipitados encontrados nas microestruturas.
- iv. A partir das propriedades mecânicas estáticas inferiores dos fios cabo “A” em relação aos do cabo “B”, infere-se que as mesmas influenciam nas propriedades mecânicas dinâmicas dos cabos. Acarretando em vidas em fadiga menores e dispersão dos resultados.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CIGRE SC22, WG04 (1985); “Guide for Endurance Tests of Conductors Inside Clamps” – Electra, N°100, pp. 77-86.
- (2) 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 – Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília – Brasília, DF – Brasil.
- (3) Giummarra, C.; Bray, G.H.; Duquette, D.J. (2006); “Fretting Fatigue in 2XXX Series Aerospace Alloys” – Elsevier. Tribology International, v. 39, pp. 1206-1212.
- (4) Fadel, A.A.; Rosa, D.; Murça, L. B.; Ferreira, J. L. A.; Araújo, J. A. (2012); “Effect of High Mean Tensile Stress on Fretting Fatigue Life on an IBIS Steel Reinforced Aluminium Conductor” – International Journal of Fatigue, Volume 42, September 2012, pp.24-34.

- (5) Riva, I.R. (2004); “Análise de Fadiga de Estruturas Metálicas com Ênfase em Offshore” – Projeto de Final de Curso – Departamento de Engenharia Mecânica Aplicada e Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, RJ – Brasil.
- (6) Shigley, J.E. (2005); “Projeto de Engenharia Mecânica”, Bookman. Michigan, USA.
- (7) Poffenberger, J.C.; Swart, R.L.; Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain. IEEE Transactions Paper, v. PAS 84, pp. 281-289. 1965.
- (8) ASM Handbook, Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International (American Society for Metals), Materials Park, Ohio, USA, 1990 (6th printing: 2000).
- (9) MIL-HDBK-694A(MR) – Military Standardization Handbook – Aluminum and Aluminum Alloys, Washington, USA, 1966.
- (10) Lindley, T.C., “Fretting Fatigue in Engineering Alloys,” International Journal of Fatigue, Vol. 19, Issue 9, pp. S39-S49, 1997.
- (11) Murça, L.B, “Estudo Experimental do Efeito da Sequência de Carregamento Sobre a Resistência à Fadiga de Cabos Condutores,” Dissertação (Mestrado), Brasília, DF, 2011.
- (12) Kalombo, R.B.; Martinez, J.M.G.; Ferreira, J.L.A.; da Silva, C.R.M.; ARAÚJO, J.A. (2015); “Comparative Fatigue Resistance of Overhead Conductors of Aluminium and Aluminium Alloys: Testes and Analysis” – 6th Fatigue Design Conference – Fatigue Design Conference – France.
- (13) TORK Controle Tecnológico de Materiais Ltda. - Análise da composição química da Liga de Alumínio 6201, 2015 - São Paulo, SP.
- (14) Kalombo, R.B.; Araújo, J.A.; Ferreira, J.L.A.; da Silva, C.R.M.; Alencar, R.; Capra, A.R; Assessment of the Fatigue Failure of an All Aluminium Alloy Cable (AAAC) for 230 kV Transmission Line in the Center-West of Brazil. Engineering Failure Analysis, v. 61, pp. 77-87. 2016.
- (15) da Silva, B.L.; Ferreira, J.L.A.; Oliveira, F.; Araújo, J.A.; Influence of Mean Stress on the Fatigue Strength of A743 CA6NM Alloy Steel. Frattura ed Integrità, v. 14, pp. 17-26. 2010.
- (16) Fett, G., “Test for Fatigue,” Adv. Mater. Process., p. 37, 1999.
- (17) Polmear, I. J.; Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals, ed. Arnold, London: Metallurgy and Materials Science Series, 1995.
- (18) Hatch, J. E.; Aluminium Properties and Physical Metallurgy. Metals Park: American Society for Metals, 1984.
- (19) Yi, J. Z.; Gao, Y. X.; Lee, P. D., “Effect of Fe-content on fatigue crack initiation and propagation in a cast aluminium-silicon alloy,” Materials Science and Engineering: A, v. 386, Issues 1-2, pp. 396-407, 2004.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Gustavo Reinke, nascido em Uberlândia, MG, no ano de 1986. Graduado em engenharia mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia, 2013, e mestre em ciências mecânicas pela Universidade de Brasília, 2016. Atuando na área de fadiga, materiais, tratamento térmico e análise fractográfica. Tendo como principais publicações:

Reinke, G.; Gennari Jr, W.; Piratelli Filho, A.; Silva, R. B.; Arencibia, R. V.; Costa, E. S., Relação entre o Desgaste da Ferramenta e a Qualidade de uma Superfície de Forma Livre Usinada por CAD/CAM. In: VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2014, Uberlândia. Anais Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2014.

Reinke, G.; Silva, R. B.; Gennari Jr, W.; Piratelli Filho, A.; Arencibia, R. V., Influência da Estratégia do caminho da Ferramenta no Acabamento Superficial e Tempo de Usinagem no Fresamento de Aço VP100. In: Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, 2013, La Plata. Actas del XI Congreso Ibero-Americano de Ingeniería Mecánica - Resúmenes, 2013.