



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

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

GRUPO – XII

GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO - GMI

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CABOS CONDUTORES ELÉTRICOS DO TIPO CAA USADOS
E SUA ADEQUAÇÃO AO RETRACIONAMENTO**

**Rogério Lavandoscki (*)
ISA CTEEP**

RESUMO

Diversas linhas aéreas de transmissão de energia elétrica da CTEEP foram construídas numa época em que as normas prescreviam distâncias do cabo condutor ao solo menos exigentes que as necessidades atuais. Uma das alternativas para a correção do problema de cabos baixos é o emprego do processo de retracionamento para alteamento dos mesmos.

O objetivo deste trabalho é o estudo da influência do grampo de suspensão em determinadas propriedades mecânicas dos condutores, visto que esse ponto do condutor é deslocado para fora do grampo de suspensão quando da aplicação do retracionamento, e submetido a um aumento do carregamento mecânico.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de transmissão, fadiga, fretting, condutores, retracionamento

1.0 - INTRODUÇÃO

Muitas das linhas de transmissão da CTEEP foram construídas numa época em que as normas prescreviam distâncias do cabo condutor ao solo menos exigentes do que as necessidades atuais, sendo que um número considerável de projetos foi baseado na norma alemã VDE, a qual prescrevia distâncias fase/solo menores do que a norma atual NBR 5422 [1,2].

As reformas de LTs, através de alteamentos e recapacitações, são realizadas, na maioria das vezes, através da inserção de estruturas no meio do vão, necessitando em alguns casos retracionar os cabos ou relocar as estruturas, proporcionando a suspensão desses cabos. Isso elimina problemas de cabos baixos, dilatados pelo aquecimento proveniente do aumento do transporte de energia elétrica ou mesmo nos casos em que ocorrem mudanças nos tipos de veículos que trafegam abaixo dos cabos, como por exemplo, veículos agrícolas altos.

A utilização do processo de retracionamento ocorre com algumas restrições já que as LTs em suas condições de serviço estão sujeitas ao processo de envelhecimento e vibração eólica. Estes processos alteram as propriedades mecânicas dos condutores, por exemplo, limite de resistência a tração e limite de resistência a fadiga, principalmente nas regiões correspondentes aos pontos de grampeamentos, que são deformados e sujeitos a ação de fretting [3].

Condutores aéreos de transmissão de energia são submetidos a solicitações mecânicas devido ao próprio peso, carregamento acidental como gelo, e carregamento cíclico devido a sua interação dinâmica com o vento. A maioria das falhas em cabos condutores de energia esta associada à fadiga do material, causada pela ação das forças eólicas que aceleram a formação de fretting [4,5]

A ocorrência de fretting promove o desgaste de material e conseqüentemente o início da fadiga ocorre normalmente nos pontos em que o movimento dos condutores é restringido. Assim sendo, a ruptura dos fios e mais comum no interior ou nas extremidades do grampo de suspensão [6]

(*) Rua Casa do Ator, n° 1155 – 4º andar – Edifício Celebration – CEP 04546-004 São Paulo, SP, – Brasil
Tel: (+55 11) 3138-7030 – Fax: (+55 11) 3138-7011 – Email: rlavandoscki@ctEEP.com.br

Desta forma para avaliar a viabilidade do alteamento de cabos pelo método de retracionamento faz-se necessário determinar a influência da região de grampeamento deslocada para o “meio” da linha e os efeitos de envelhecimento nas propriedades mecânicas dos condutores

2.0 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

De modo a avaliar a influência da região do grampo de fixação nas propriedades mecânicas dos condutores elétricos e determinar os possíveis níveis de carga aplicados na operação de retracionamento foram realizados ensaios de tração e vibração que serão descritos a seguir.

2.1 Ensaio de Tração

Para realização do ensaio de tração fez-se necessário a construção de uma máquina especial de ensaios devido às condições de comprimento mínimo de corpo de prova, solicitadas pela norma adotada NBR7302 [7].

Assim foi construído um equipamento de 12,5m de comprimento com capacidade de 20 ton com sistema de aquisição de dados para realização do ensaio. A Figura 1 mostra o equipamento em detalhe.



FIGURA 1 – Máquina de Ensaio de Tração

O ensaio de tensão x deformação prescrito pela norma determina a utilização de um corpo de prova com um comprimento mínimo de 8m, que é carregado a 30, 50 e 70% da resistência mecânica calculada, mantido por um determinado tempo nestes valores e em seguida é descarregado até um carregamento final que rompa o condutor.

2.2 Ensaio de Vibração

Assim como ensaio de tração, fez-se necessário desenvolver e construir o equipamento para ensaio. O ensaio consiste na fixação do corpo de prova de 5m de comprimento a um ponto rígido, o qual é submetido a uma carga constante e ação de um sistema vibratório.

A frequência e a carga a que os corpos de prova estão sujeitos depende do tipo de condutor a ser ensaiado, neste caso o valor específico de frequência foi de 25Hz e o valor de carga de 2,4 ton. O ensaio é realizado até que sejam obtidos 10.000.000 ciclos ou que haja ruptura do corpo de prova. As Figuras 2 e 3, respectivamente, ilustram a estrutura do equipamento para o ensaio de vibração e sistema de vibração.

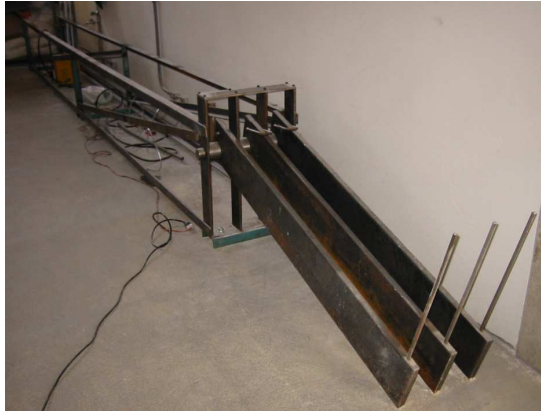


FIGURA 2 – Estrutura da Máquina de Vibração



FIGURA 3 - Sistema de Vibração

Para a realização dos ensaios foram recebidos 06 cabos condutores de alumínio com alma de aço – CAA do tipo Grosbeak, ou seja, com a parte externa (corona) com 26 fios de Al (Al 1350 –H19) e a parte interna (alma) com 07 fios de aço zincado. A tabela 1 indica a quantidade de corpos de prova e os respectivos ensaios.

Tabela 1 – Número de Corpos de Prova e Tipo de Ensaio

Quant.	Amostra	Ensaio
03	CN	Tração
01	AACN	Tração
03	CUSG	Tração
03	CUCG	Tração
03	AACU	Tração
03	CUSG	Vibração
03	CUCG	Vibração

CN – Cabo novo

AACN – Alma de aço do cabo novo

CUSG – Cabo usado sem grampo

CUCG –Cabo usado com grampo

2.3 Análise Microestrutural

A análise microestrutural foi realizada utilizando as técnicas de microscopia ótica - MO e eletrônica de varredura - MEV. Foram realizadas análises nos condutores submetidos à tração e vibração, com a presença e ausência da região do grampo de fixação.

3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados a uma velocidade constante de 10kgf/s. As Figuras 4, 5 e 6 ilustram, respectivamente, os gráficos obtidos para ensaio de tração para o condutor completo para os cabos novos, usados sem grampo e usados com grampo.

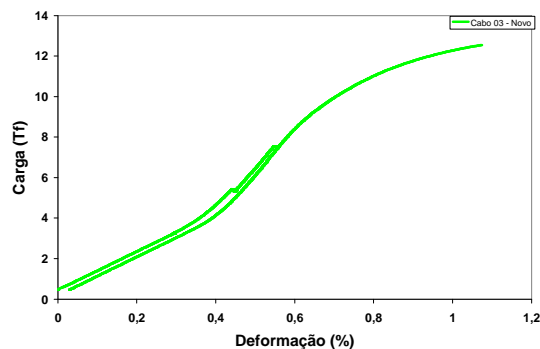


Figura 4 - Gráfico da Curva ilustrativa de carga x deformação cabo novo.

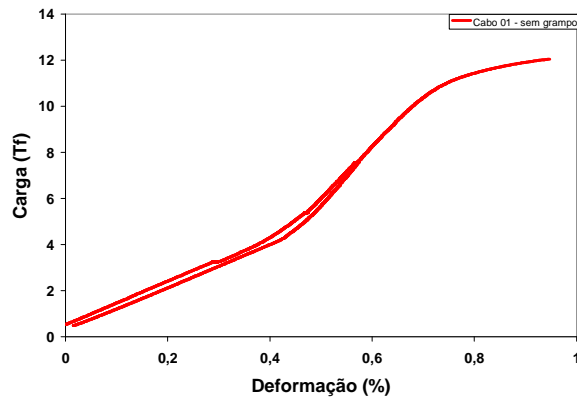


Figura 5 - Gráfico da curva ilustrativa de carga x deformação para o cabo usado sem grampo.

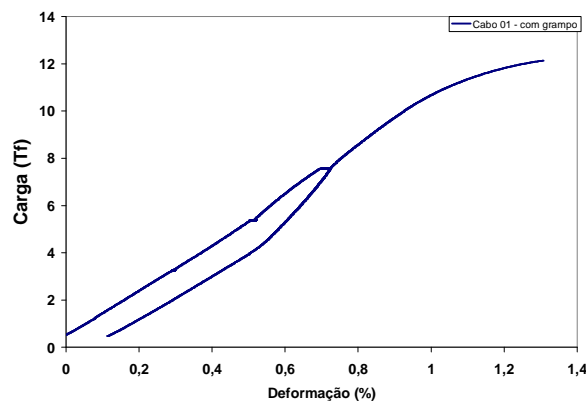


Figura 6 - Gráfico da curva ilustrativa carga x deformação para cabo usado com grampo.

A tabela 2 a seguir mostra os resultados de carga de ruptura e alongamento percentual.

Tabela 2 – Valores obtidos pelo ensaio de tração

Corpo de prova	Carga de Ruptura (Tf)	Alongamento final (%)
Cabo Novo	11,9	0,9
	13,0	1,3
	12,5	1,1
Média	12,5	1,1
Cabo usado sem Grampo	12,0	0,9
	8,2	1,1
	11,8	1,1
Média	11,9	1,0
Cabo usado com Grampo	12,1	1,3
	12,0	1,1
	11,9	1,3
Média	12,0	1,2

Os valores médios de carga de ruptura dos cabos usados (12ton) foram cerca de 4% inferiores ao apresentado pelos cabos novos. Já em relação ao alongamento, os cabos usados com grampo apresentaram um valor médio de alongamento 9% superior aos cabos novos. Tais valores indicam o efeito de envelhecimento dos cabos usados em relação aos novos.

O cálculo da média de carga de ruptura para a condição de cabo usado sem grampo foi realizado desconsiderando-se o valor de 8,2 Tf, pelo fato de após o ensaio ter sido realizado foram identificadas marcas profundas na superfície, que afetaram a resistência mecânica do condutor.

Comparando-se os valores dos cabos usados com e sem grampos nota-se que não há uma diferença significativa entre os valores.

Com relação à influência da região de grampeamento, observou-se que a mesma não influencia nos valores de carga de ruptura e alongamento dos condutores, principalmente pela pequena diferença entre os valores obtidos. Além disso, todos os pontos de ruptura nos condutores foram distantes dos pontos de grampeamento. Outro ponto a ser avaliado é o grau de repetibilidade do ensaio, principalmente pela análise das curvas carga x deformação, que são semelhantes, e pela proximidade de valores experimentais obtidos.

3.2 Ensaio de Vibração

Com relação ao ensaio de vibração o mesmo foi realizado nos cabos usados com e sem a região de grampeamento, a uma frequência de 25Hz e com uma carga constante de 2,4ton, como durante o ensaio não houve ruptura dos condutores o mesmo transcorreu até que fossem atingidos 10.000.000 ciclos.

O fato de o ensaio ter transcorrido até 10.000.000 ciclos a uma carga constante de 2,4ton é um ponto de suma importância em termos de projeto, pois a carga de 2,4ton corresponde a 20% da carga de ruptura dos cabos usados valor este utilizado para operação de retracionamento (EDS).

3.3 Análise Microestrutural

A análise microestrutural utilizando microscopia ótica foi realizada nos fios de alumínio, dos cabos novos e usados, sendo que a mesma revelou uma estrutura deformada, que é decorrente do processamento do material, como é apresentado nas Figuras 7 e 8.



Figura 7 – Fotomicrografia da microestrutura apresentada pelos cabos usados.

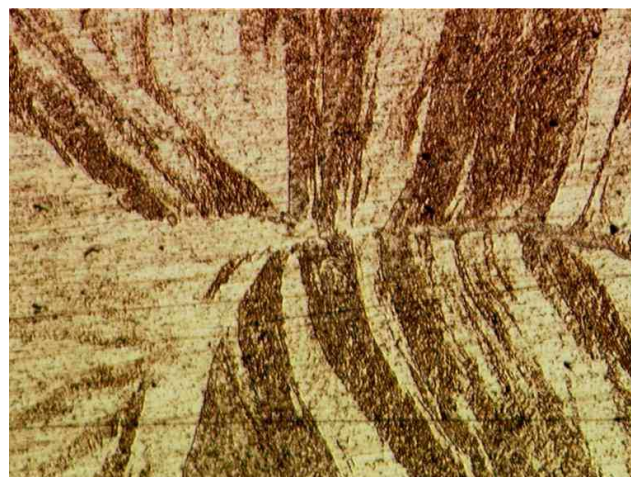


Figura 8 – Fotomicrografia da microestrutura apresentada pelos cabos novos

A liga de alumínio em questão é Al 1350 – H19, com alto teor de pureza, cerca de 99%, sendo que o seu processo de endurecimento é através de encruamento sem um posterior recozimento, o que justifica a microestrutura observada.

Comparando-se as microestruturas dos cabos usados com os novos, nota-se a presença pontos escuros nas amostras de cabos usados, causados pelo ataque químico, durante o preparo da amostra, de vazios deixados

provavelmente devido à presença de impurezas a base de óxidos, formados durante a fusão do alumínio. Estes cabos usados foram fabricados a mais de 30 anos, época em que as condições de limpeza de banhos de alumínio não estavam otimizadas. Não foi observada nenhuma diferença microestrutural entre os cabos usados com e sem grampo.

Com relação à degradação dos condutores foram observadas marcas na parte interna e externa na região de fixação dos grampos, sendo que as mesmas foram geradas pela deformação plástica promovida pelos grampos e pelo movimento relativo dos fios de alumínio, como mostra a Figura 9.

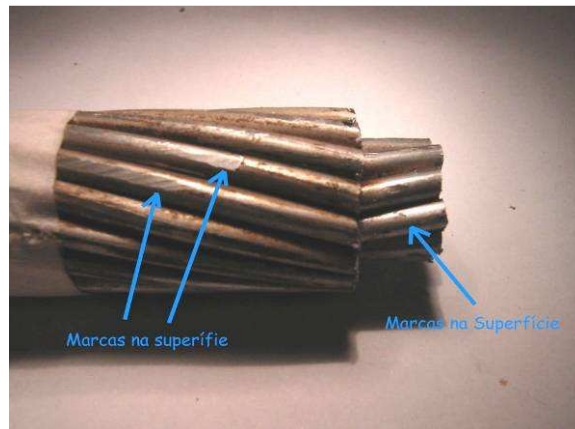
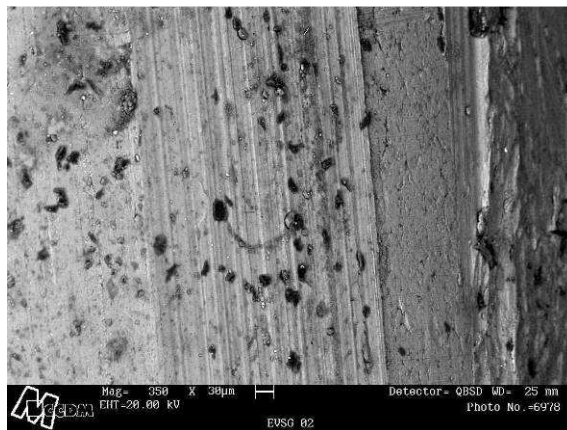


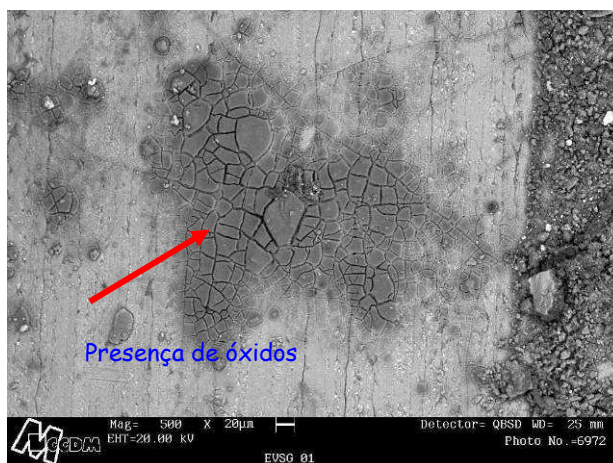
Figura 9 – Marcas na superfície dos fios de alumínio da camada mais externa e interna o condutor.

Em uma análise mais detalhada foi observada a presença de fretting, ou seja, quando duas superfícies são postas em contato e em movimento. A Figura 10 ilustra a presença de fretting nos fios da camada intermediária de fios de alumínio.



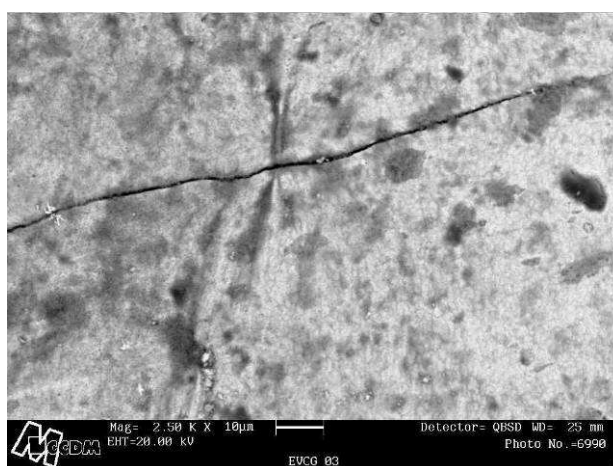
Fotografia 10 – Observação por MEV da ocorrência de fretting nos fios de alumínio.

O fretting produz partículas que são produtos químicos de substâncias abrasivas e o ambiente. No caso dos condutores há a formação de um composto mais escuro, que através de microanálise foi identificado como o óxido de alumínio. A Figura 11 ilustra as partículas de Al_2O_3 formadas nas superfícies dos condutores.



Fotografia 11 – Observação por MEV de partícula abrasiva Al_2O_3 na superfície dos fios de alumínio.

Segundo Azevedo [8] a presença de marcas de fretting afeta a carga de ruptura dos condutores e o limite de resistência a fadiga. Analisando a alma de aço dos condutores observou-se, que todos apresentaram trincas como mostra a Figura 12.



Fotografia 12 – Observação por MEV de trincas existentes na alma de aço.

Segundo Zhou [9] a presença destas marcas de fretting é decorrente de vibração eólica, afetando assim a resistência a fadiga do condutor.

Ainda segundo Zhou [9] há 03 mecanismos de contato que podem induzir a formação de marcas de fretting: (a) contato entre fios de alumínio de diferentes camadas; (b) contato entre fios de alumínio e aço; (c) contato dos fios da camada externa com o grampo de fixação.

As amostras que foram submetidas ao ensaio de vibração apresentaram uma maior quantidade de marcas de fretting do que as que foram apenas tracionadas. Isto é uma confirmação de que estas marcas estão relacionadas com a vibração do condutor. Além disso, os pontos de grampeamento apresentaram um número maior de marcas de fretting devido ao contado grampo/camada externa, contudo estas marcas não apresentaram grande influência nas propriedades mecânicas dos condutores.

4.0 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos ensaios realizados pode-se concluir que apesar da região de grampeamento apresentar um maior número de marcas de fretting, em um primeiro momento esta não é uma região crítica de ruptura dos condutores. Isto é justificado pelo fato da ruptura dos condutores estar situada distante dos pontos de grampeamento e pela pequena diferença de valores de carga de ruptura, alongamento e módulo de elasticidade obtidos.

Dessa forma, para o caso específico estudado, pode-se concluir que não há necessidade de substituição dos cabos condutores, podendo-se aplicar inclusive o procedimento de retracionamento para alteamento da LT.

A reforma da LT sem a necessidade da substituição dos cabos corresponde a uma economia em materiais e mão de obra equivalente a 30% de todo o custo da obra, o que torna o empreendimento mais vantajoso em relação às reformas com substituição de componentes sem avaliação da sua necessidade.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Norma VDE-210, "Normas para construção de Linhas de Alta Tensão", 1962.
- [2] Norma ABNT NBR-5422, "Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica – Procedimento", 1985
- [3] Ramey, G. E. and Silva, J.M., An Experimental Evaluation of Conductor Aeolian Fatigue Damage Mitigation by Amplitude Reduction, IEEE PES Summer Meeting, Portland, Oregon, July, 1981, pp. 26 – 31
- [4] Doocy, E.S.; Hard, A. R., "Instruction", Transmission Line Reference Book: Wind Induced Conductor Motion. Electric Power Research Institute, Palo Alto, Califórnia, 1979.
- [5] Castilho, I. C.; Sanglard, M.; Rewagen, B. Determinação de curva de fadiga em cabo CAA 336, 4MCM Linnet. XVSNPTEE – Seminário Nacional de Produção de Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu, p 2 – 6, 1999.
- [6] Lindley, T.C., Fretting Fatigue in Engineering Alloys, Int. J. Fatigue, Vol. 19, No1, pp S39 - S49, 1997.
- [7] Norma ABNT NBR 7302, "Condutores elétricos de alumínio - Tensão-deformação em condutores de alumínio – Método de ensaio", 1982.
- [8] Azevedo, C. R. F., Cescon, T. Failure Analysis of cable Steel Reinforced (ACSR) Conductor of the Transmission Line Crossing the Parana River Engineering Failure Analysis 9 (2002) pp. 645-664.
- [9] Zhou, Z. R., A., Goudreau, s. & Fiset, M., "Fundamental investigations of electrical conductor fretting fatigue", Tribology International, 1996, Vol. 29: 221-232.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rogério Lavandoscki

Nascido em Santa Bárbara D'Oeste - SP em 23 de fevereiro de 1969.

Mestre em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos - SP (2005) / Bacharel em Engenharia de Produção Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade Metodista de Piracicaba - SP (1995) / Técnico em Eletrônica pelo Instituto Técnico de Eletrônica Industrial de Santa Bárbara D'Oeste - SP (1987)

Experiência Profissional: FIAT Automóveis S/A, 1988 / CESP – Cia Energética de São Paulo, 1989 a 1999 / CTEEP – Cia. de Transmissão de Energia Elétrica Paulista, 1999 até o momento

Atualmente: Engenheiro Sênior Análise da Manutenção da Divisão de Gestão da Manutenção – São Paulo

Diversos trabalhos publicados em congressos e seminários, sendo premiado com o 3º lugar em trabalho apresentado no SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2011, Florianópolis - SC e também 1º e 3º lugares nas Jornadas Técnicas ISA 2010 em dois trabalhos na área de Linhas de Transmissão, Bogotá - Colômbia.