

# Determinação de Propriedades Mecânicas dos Condutores CAA – Gossbeak para o Processo de Retracionamento

C.B. Carletti, CCDM-UFSCar/Unesp; E.C. Bonome, CCDM-UFSCar/Unesp, C. Bolfarini, CCDM – UFSCar/Unesp, M. A. Sylvestre, CCDM – UFSCar/Unesp, R. L. Vicentim, CCDM – UFSCar/Unesp, R. Lavandoski, CTEEP

**Resumo-** Muitas das linhas de transmissão LTs de energia no Brasil são provenientes de uma época, a qual o país dispunha de pouca tecnologia em relação projeto e construção das mesmas. A reforma das LTs através do alteamento de cabos é uma alternativa econômica e ecológica para este problema. Este trabalho tem como objetivo determinar os níveis de carga que podem ser utilizados para operação de alteamento de cabos condutores do tipo CAA (cabo de alumínio reforçado com alma de aço – Grossbeak) pelo método de retracionamento utilizando os ensaios de tração e vibração, e avaliando também a influência da região de grampeamento nas propriedades mecânicas finais através de análise de metalográfica utilizando microscopia ótica e eletrônica de varredura. Os resultados do ensaio de tração indicaram que não há uma influência direta da região de grampeamento nos valores de carga de ruptura e alongamento dos condutores. Com relação ao ensaio de vibração todos os condutores não apresentaram nenhum tipo de fratura, o que levou o ensaio a ser realizado até 10000000 ciclos. As análises microestruturais mostraram a presença de marcas de fretting na parte camada mais externa e interna dos condutores.

**Palavras – chave:** Conductor Grossbeak, Ensaio de Tração, Ensaio de Vibração, Fretting, Retracionamento.

## I. INTRODUÇÃO

Muitas das linhas de transmissão da CTEEP foram construídas em uma época em que o Brasil detinha pouca tecnologia no projeto e construção das mesmas, 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 recapitações, 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, processos estes que 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 a 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 é mais comum no interior ou nas extremidades do grampo de suspensão [6]

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

## II. 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.

### A. Ensaio de tração

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

Assim foi construído um equipamento com de 12,5m de comprimento com capacidade de 20 ton com sistema de aquisição de dados para realização do ensaio. A figura 01 mostra o equipamento em detalhe.



Figura 01 – 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 nestes valores e em seguida é descarregado até um carregamento final que rompe o condutor.

### B. 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 1000000 ciclos ou que haja ruptura do corpo de prova. As figuras 02 e 03, respectivamente, ilustram a estrutura do equipamento para o ensaio de vibração e sistema de vibração.



Figura 02 – Estrutura da máquina de vibração.



Figura 03 - Sistema de vibração.

Para a realização dos ensaios foram recebidos 06 cabos condutores de alumínio com alma de aço – CAA do tipo grossbeak, 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 01 indica a quantidade de corpos de prova e os respectivos ensaios.

Tabela 01 – 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

### C. Análise Microestrutural

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

## III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### A. Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados a uma velocidade constante de 10Kgf/s. As figuras 03, 04 e 05 ilustram, respectivamente, os gráficos obtidos para ensaio de tração para o condutor completo para os cabos novos, usados sem grampo e usados com grampo.

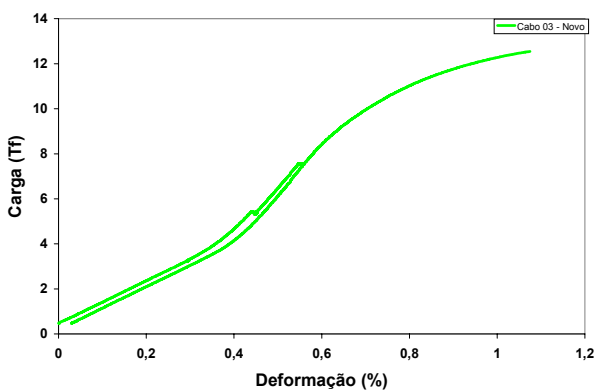


Figura 03 – Curva ilustrativa de carga x deformação cabo novo.

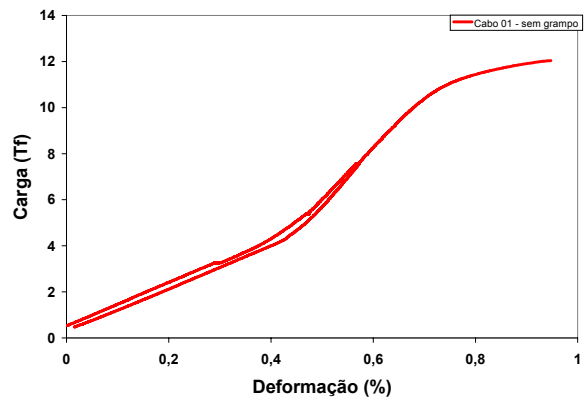


Figura 04 – Curva ilustrativa de carga x deformação para o cabo usado sem grampo.

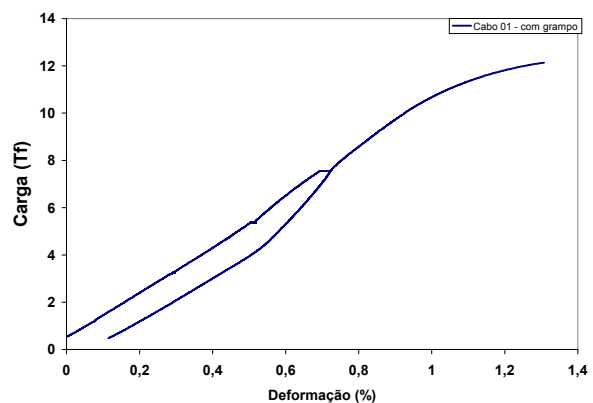


Figura 05 – Curva ilustrativa carga x deformação para cabo usado com grampo.

A tabela 02 a seguir mostra os resultado de carga de ruptura e alongamento percentual.

Tabela 02 – 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 apresentados 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.

A tabela 03 mostra os valores do módulo de elasticidade dos condutores ensaiados.

Tabela 03 – Valores de módulo de elasticidade.

	Módulo de Elasticidade (GPa)		
	Inicial Inferior	Inicial Superior	Final
Cabo Novo	30,28	46,88	66,21
	25,52	36,47	65,15
	25,33	37,19	63,31
Média	27,04	40,18	64,89
Cabo Usado sem Grampo	24,46	36,57	58,86
	23,98	21,18	40,16
	25,09	20,33	65,19
Média	24,51	26,03	54,74
Cabo Usado com Grampo	25,03	25,09	45,58
	25,01	27,35	61,51
	24,58	24,19	52,80
Média	24,87	25,55	53,30

Segundo a norma NBR 7302, o módulo de elasticidade do condutor deve ser avaliado em três etapas: inicial inferior, inicial superior e final. A diferença de valores em cada etapa é devido aos sucessivos carregamentos e descarregamentos, que são responsáveis pelo encruamento do material, a que são submetidos os condutores.

O módulo de elasticidade é uma medida da rigidez dos condutores, analisando a tabela 03 nota-se uma diferença significativa entre os valores dos cabos novos com relação ao usados. Tal diferença é decorrente do efeito de envelhecimento dos cabos causado pela ação de vibração eólica.

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

Com relação a 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 diferenças 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.

#### B. Ensaios 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 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 10000000 ciclos.

O fato de o ensaio ter transcorrido até 10000000 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).

#### C. 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 figura 06 e 07.



Figura 06 – Microestrutura apresentada pelos cabos usados.

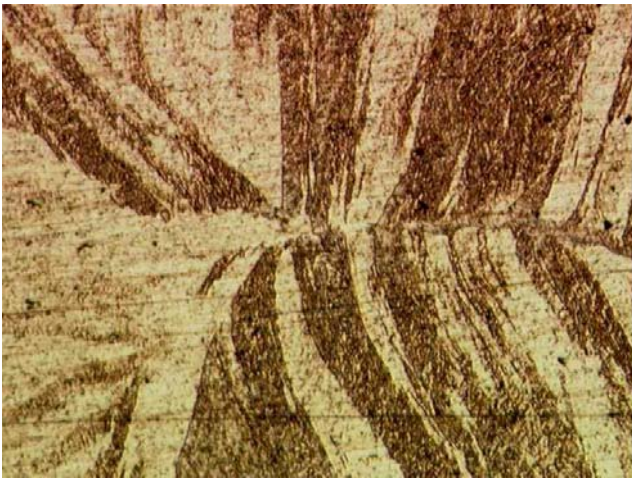


Figura 07 – Microestrutura apresentada pelos cabos novos  
A liga de alumínio em questão é Al 1350 – H19, com alto teor de pureza, cerca de 99% , sendo que o seu processo de endurecimento é através de encruamento sem um posterior recozimento, o que justifica a microestrutura observada.

Comparando-se as microestruturas dos cabos usados com os novos, nota-se a presença pontos escuros nas amostras de cabos usados, que podem ser decorrentes da presença de intermetálicos, como  $Fe_3SiAl_{12}$ ,  $FeSiAl_8$ , já que o Fe atua como impureza e possui baixa solubilidade em alumínio. A formação em grande número deste intermetálicos estaria relacionada com o efeito Joule a que é submetido o condutor. Não foi observada nenhuma diferença microestrutural entre os cabos usados com e sem grampo.

Com relação a degradação dos condutor foram observadas marcas na parte interna e externa no na região de fixação do 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 07.

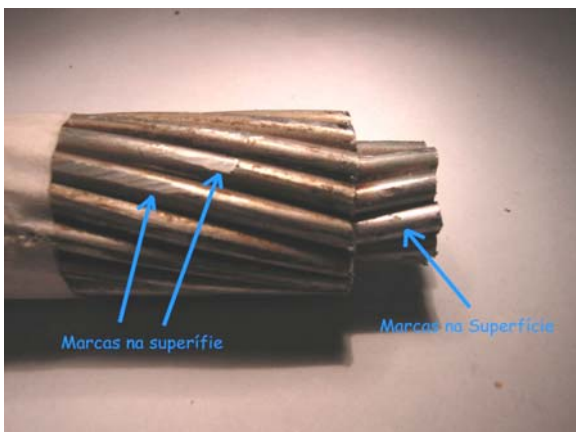


Figura 07 – Marcas na superfície dos fios de alumínio da camada mais externa e interna o condutor.

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 08 ilustra a presença de frente nos fios da camada intermediária de fios de alumínio.

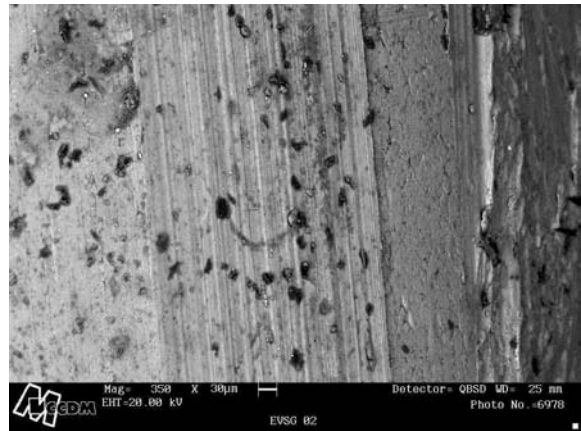


Figura 08 – Ocorrência de fretting nos fios de alumínio.

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 09 ilustra as partículas de  $Al_2O_3$  formadas nas superfícies dos condutores.



Figura 09 – 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 condutores observou-se, que todos apresentaram trincas como mostra a figura 10.

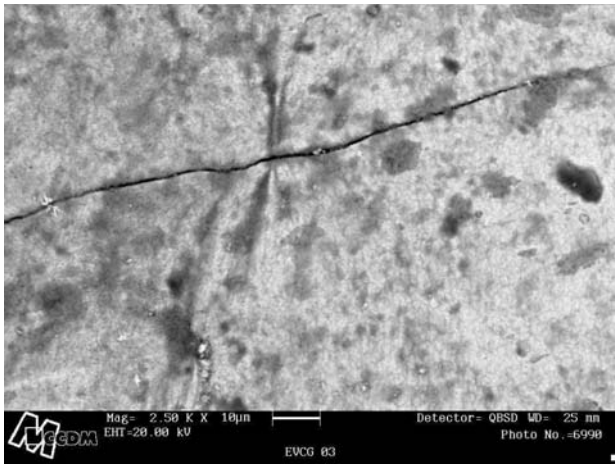


Figura 10 – Trincas observadas na alma de aço.

Segundo Zhou [9] a presença destas marcas de fretting são decorrentes 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 diferentes camadas; (b) contato com fios da mesma camada; (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 condutor. Além disso, os pontos de grampeamento apresentaram um número maior de marcas de fretting devido ao contato grampo/camada externa, contudo estas marcas não apresentaram grande influência nas propriedades mecânicas dos condutores.

#### IV CONCLUSÕES

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 de 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.

#### V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a contribuição de A. Resende recebida para realização deste trabalho e o apoio oferecido pela CTEEP e CCDM/UFSCar.

#### VI 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., “ Intruccion”, Transmission Line Reference Book: Wind Induced Conductor Motion. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 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, N<sup>o</sup>1, 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.