



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

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE CABOS CONDUTORES ATRAVÉS DA COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA, METALOGRAFIA E ENSAIOS MECÂNICOS REALIZADOS

**Beline Quintino de Araújo Fonseca(*)
CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A.**

**Alexandre Queiroz Bracarense
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**Carlos Alberto Cimini Jr.
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**Flaviano Lopes Pereira
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico do cabo condutor e sua degradação física ao longo do período de operação de uma linha de transmissão - LT. Foram utilizadas amostras de condutores de LT existentes e de condutores novos para a realização da análise química, metalografia e dos ensaios de tração, resistência elétrica em CC e dureza. Os resultados dos ensaios foram utilizados para verificar a existência de correlação entre as diversas propriedades mecânicas e elétrica dos materiais que compõem o cabo e para o desenvolvimento da ferramenta computacional de predição da vida útil do cabo condutor.

PALAVRAS-CHAVE

Cabo condutor de energia elétrica, Vida útil de cabo condutor, Ensaio de tração de cabo condutor, Ensaio de dureza de cabo condutor, Metalografia de cabo condutor.

1.0 - INTRODUÇÃO

O cabo condutor é o elemento mais importante no transporte de energia elétrica exigindo um cuidadoso trabalho de manutenção preditiva e preventiva, evitando-se o comprometimento de fornecimento de energia elétrica aos diversos segmentos de clientes. Caso isso ocorra, a concessionária estará sujeita ao pagamento de multas devido a indisponibilidade da instalação.

Vida útil é o tempo calculado para a utilização dos cabos condutores em uma linha aérea de transmissão ou linha de transmissão - LT. Consideram-se as seguintes condições de segurança no cálculo do tempo de utilização: segurança da instalação, segurança de terceiros e manutenção e operação da linha de transmissão.

O estudo do comportamento mecânico dos materiais que compõem o cabo condutor, Alumínio e aço, pode ser realizado através da análise química dos elementos componentes dos materiais, da análise de imagens metalográficas e dos ensaios mecânicos e elétrico, sendo um ponto importante na manutenção preditiva de cabos condutores. Nesse caso, consideram-se os parâmetros de operação da LT, ou seja, corrente transportada e tensão de esticamento, tempo de utilização e condições ambientais.

Esse trabalho tem como objetivo avaliar as mudanças ocorridas nas propriedades mecânicas dos materiais que compõem os cabos condutores a partir da análise dos resultados dos diversos ensaios realizados nas amostras de cabos condutores Linnnet – CAA 336 MCM 170 mm² e Penguin – CAA 4/0 107 mm², e apresentar os resultados através de uma ferramenta computacional desenvolvida no âmbito do P&D151 Aneel – Desenvolvimento de

metodologia para determinação da vida útil de cabos condutores utilizados em Linhas Aéreas de Subtransmissão e Transmissão de Energia Elétrica.

A ferramenta computacional foi desenvolvida com as seguintes finalidades:

- Integrar as seguintes informações: dados obtidos através de ensaios – resistência mecânica, análise química, dureza e resistência elétrica; dados de operação e manutenção – correntes transportadas e ocorrências de manutenção; e dados coletados sobre o meio ambiente – temperatura e velocidade de vento nas regiões atravessadas pela LT.
- Prover recursos tecnológicos para auxiliar na avaliação das condições atuais de cabos condutores existentes com vistas à manutenção preditiva, reforma e recapacitação de LT.

A validação dessa ferramenta é realizada através da comparação com os resultados do programa de ensaios de amostras retiradas das linhas de subtransmissão da CEMIG.

2.0 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Obtenção das amostras para realização dos ensaios

Foram utilizadas informações dos ensaios realizados com amostras das seguintes LT:

- Pirapora - Montes Claros, 138 kV – amostra 3.
- Sete Lagoas 2 – Cominci, 138 kV – amostra 7.
- Várzea da Palma - Pirapora, 69 kV – amostra 4.
- Cabo CAA Linnet 336 MCM novo – amostra 8.
- Cabo CAA Penguin 4/0 novo – amostra 9.

2.2 Metodologia desenvolvida

Como premissa para o desenvolvimento da metodologia considera-se que o núcleo de aço galvanizado dos cabos CAA será afetado somente por temperatura acima de 225°C (7), nesse caso foram analisados somente os resultados dos ensaios dos fios de Alumínio.

O desenvolvimento da metodologia foi realizado nas seguintes etapas:

2.2.1 Realização da análise química, metalografia, ensaio de resistência elétrica, ensaios de tração e dureza do cabo condutor das linhas de transmissão onde foram retiradas as amostras.

2.2.2 Realização da análise química, metalografia, ensaio de resistência elétrica, ensaios de tração e dureza de uma amostra de cabo condutor Linnet novo.

2.2.3 Realização da análise química, ensaio metalografia, ensaio de resistência elétrica, ensaios de tração e dureza de uma amostra de cabo condutor Penguin novo.

2.2.4 Levantamento do histórico térmico das diversas Linhas de Transmissão (tempo de exposição do cabo condutor as diversas temperaturas de operação) considerando os dados ambientais da região atravessada (vento e temperatura ambiente) e carregamento da linha (data, horário e corrente).

2.2.5 Verificação da influência dos elementos componentes do Alumínio e aço, indicados na análise química, nas propriedades mecânicas das diversas amostras.

A adição de elementos liga como Magnésio, Silício e Cobre, pode melhorar as características físicas do Alumínio como a resistência mecânica, resistência à corrosão e outras.

Influência dos elementos químicos nas propriedades do Alumínio:

- O Ferro é utilizado em condutores elétricos para fornecer um pequeno aumento em resistência mecânica e melhor característica de creep a elevadas temperaturas devido a sua limitada solubilidade (5).

- Cobre, Ferro, Magnésio e Manganês favorecem a redução do tamanho de grão (8).
- Magnésio e Manganês: a adição de elementos permitem obter maiores taxas de endurecimento por deformação, devido à maior densidade de discordâncias (8).
- O Boro é usado em Alumínio e suas ligas como um refinador de grão para melhorar a condutividade pela precipitação de Vanádio, Titânio, Cromo, e Molibdênio, todos os quais são prejudiciais a condutividade elétrica em seus usuais níveis de impureza no Alumínio de classe comercial (5).
- Manganês, o Cromo e o Zircônio influenciam o formato dos grãos (8).

2.2.6 Análise da microestrutura atual das diversas amostras retiradas das LT através da comparação de sua imagem metalográfica com a imagem metalográfica do cabo Linnet novo.

A análise da microestrutura produzida no material durante o período de exposição a temperatura de operação característica de uma linha de transmissão pode ser correlacionada com a resistência à tração dos fios de alumínio recozidos em serviço.

Se a microestrutura interna de um material é bem correlacionada com a resistência à tração do condutor, esta informação pode ser usada para estimar a vida útil remanescente do carregamento atual (6).

2.2.7 Análise da microestrutura atual das diversas amostras retiradas das LT através da comparação de sua imagem metalográfica com a imagem metalográfica do cabo Penguin novo.

2.2.8 Análise dos ensaios de dureza

Os resultados dos ensaios de dureza das amostras das LT em comparação com os resultados de um cabo condutor novo podem indicar o recozimento do material. A correlação com ensaios de resistência elétrica, de tração e metalográfico pode indicar a situação atual do condutor.

2.2.9 Análise dos ensaios de resistência elétrica

Os processos de recuperação e recristalização podem alterar a resistência elétrica do Alumínio. Os resultados dos ensaios de resistência elétrica das amostras das LT em comparação com os resultados de um cabo condutor novo podem indicar o recozimento do material, sendo que, a correlação com ensaios de dureza, de tração e metalográfico pode indicar a situação atual do condutor.

2.2.10 Avaliação da vida útil remanescente dos cabos condutores através dos ensaios de tração

Os resultados dos ensaios de tração das amostras das LT em comparação com os resultados de um cabo condutor novo indicam a situação atual do cabo condutor em relação ao recozimento do material.

2.2.11 Correlação entre os parâmetros dos diversos ensaios realizados e o histórico térmico das linhas de transmissão.

Caso não exista o histórico térmico da LT para cálculo da vida útil remanescente em função da temperatura de operação, pode-se utilizar os resultados dos ensaios de tração para definir a vida útil remanescente do cabo condutor.

Os ensaios de resistência elétrica e dureza podem ser utilizados isoladamente ou em conjunto para avaliar a degradação do cabo condutor.

2.2.12 Validação da metodologia

O resultado deste estudo está sendo utilizado como base para o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de predição da vida útil do cabo condutor nas condições que se fizerem necessárias para novos projetos, estudos de recapacitação e de reforma de Linhas de Subtransmissão e Transmissão existentes.

2.2.13 Apresentação dos resultados através da ferramenta computacional desenvolvida.

O ambiente computacional utilizado foi o MATLAB versão R14 de 05/2004. O MATLAB é um sistema interativo e uma linguagem de programação para computação técnica e científica em geral. Ele integra a capacidade de fazer cálculos, visualização gráfica e programação em um ambiente fácil de usar.

3.0 - RESULTADOS

3.1 Análise química

A Tabela 1 mostra o resultado da análise química realizada nas amostras de cabos condutores das diversas LT e de cabos condutores novos, sendo informado na primeira a composição química do vergalhão Alumínio 1350 conforme estabelece a NBR 7103 (3).

TABELA 1 – Composição química das amostras utilizadas nos ensaios

Elemento (%)	Norma	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 7	Amostra 8	Amostra 9
Alumínio - A (Min)	99,85	99,697	99,6641	99,748	99,7147	99,7961
Silício - Si (Max)	0,1	0,0659	0,0633	0,0513	0,0509	0,0427
Ferro - Fe (Max)	0,4	0,2171	0,2518	0,1622	0,2101	0,1354
Cobre - Cu (Max)	0,05	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
Manganês - Mn (Max)	0,01	0,0061	0,008	0,0071	0,0051	0,0048
Zinco - Zn (Max)	0,05	< 0,0050	< 0,0050	0,0152	< 0,0050	< 0,0050
Cromo - Cr (Max)	0,01	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
Titânio - Ti + Vanádio - Va (Max)	0,02	< 0,0020	< 0,0020	< 0,0020	0,0032	< 0,0020
Boro - Bo (Max)	0,05	0	0	0	0	0
Gálio - Ga (Max)	0,03	0	0	0	0	0
Outros cada: Magnésio - Mg (Max)	0,03	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
Outros cada: Níquel - Ni (Max)	0,03	0,0053	0,0062	0,0053	0,0069	0,0082
Outros cada: Chumbo - Pb (Max)	0,03	0,0033	0,0027	0,0034	0,003	0,0031
Outros cada: Estanho - Sn (Max)	0,03	0,0039	0,004	0,0042	0,0044	0,0045
Outros total (Max)	0,1	0,0175	0,0179	0,0179	0,0193	0,0208

3.2 Metalografia

A Figura 1 apresenta a metalografia realizada para as amostras de cabo condutor Linnet com ampliação de 200X.

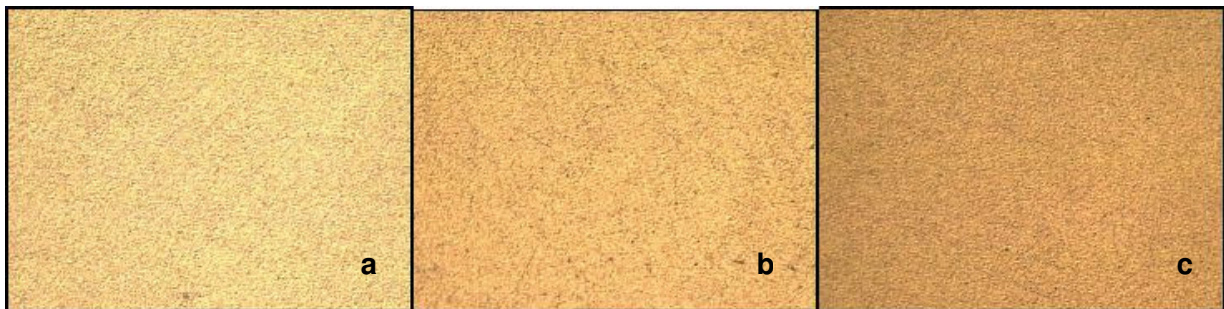


FIGURA 1 – Metalografia do fio do cabo condutor novo(a), LT Pirapora – MClaros(b) e LT SLagoas 3 – Cominci(c)

A Figura 2 apresenta a metalografia realizada para as amostras de cabo condutor Penguin com ampliação de 200X.

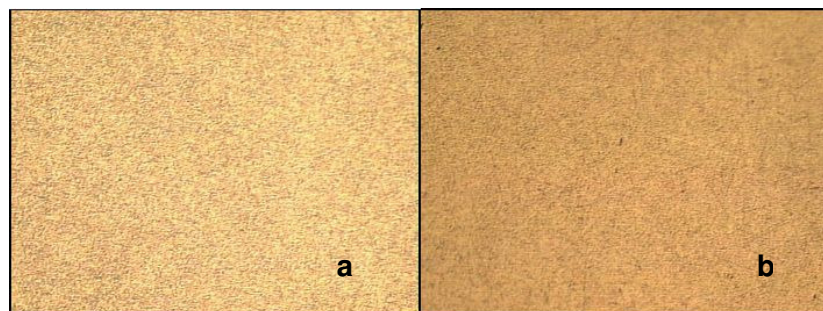


FIGURA 2 – Metalografia do fio do cabo condutor novo(a) e LT VPalma – Pirapora(b)

3.3 Ensaio de tração, dureza e resistência elétrica em corrente contínua

A Figura 3 apresenta os resultados dos ensaios realizados com o cabo condutor Linnet novo e com amostras da LT Pirapora – Montes Claros, 138 kV.

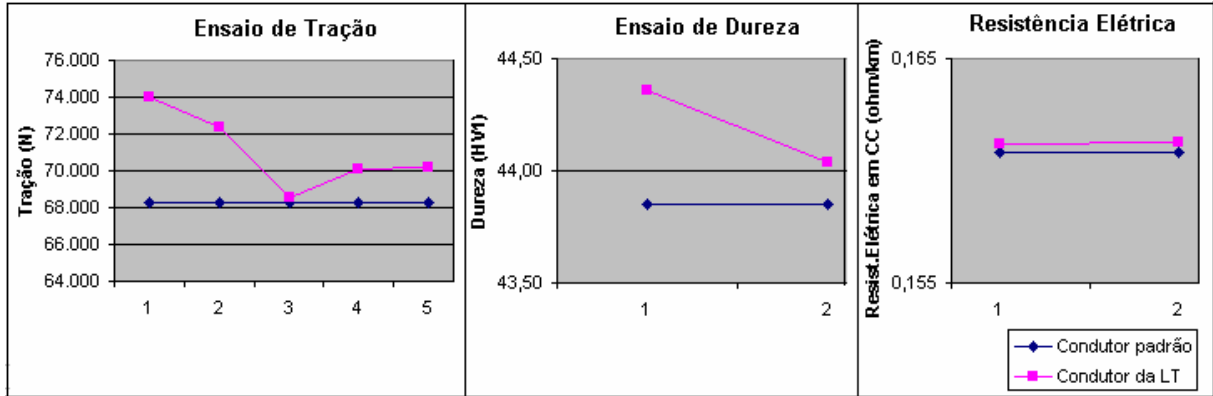


FIGURA 3 – Resultados dos ensaios do cabo condutor Linnet novo e LT Pirapora – Montes Claros, 138 kV

A Figura 4 apresenta os resultados dos ensaios realizados com o cabo condutor Linnet novo e com amostras da LT Sete Lagoas 3 – Cominci, 138 kV.

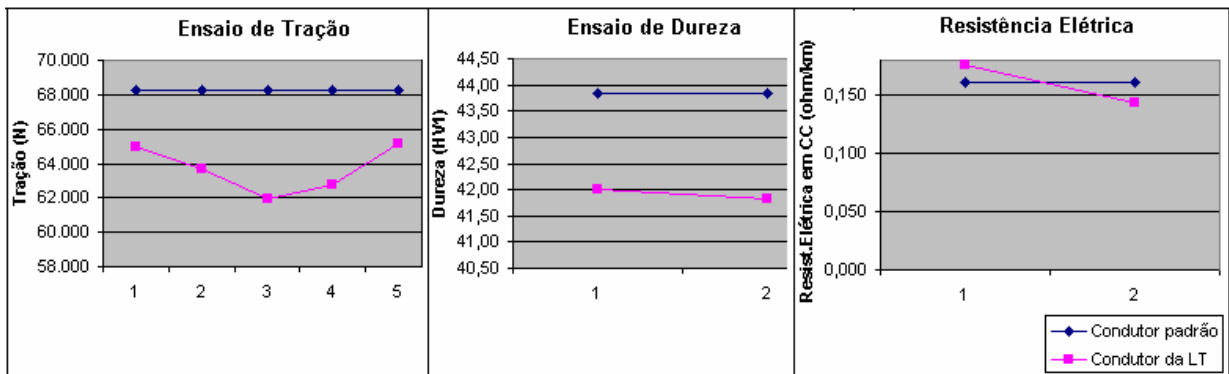


FIGURA 4 – Resultados dos ensaios do cabo condutor Linnet novo e LT Sete Lagoas 3 – Cominci, 138 kV

A Figura 5 apresenta os resultados dos ensaios realizados com o cabo condutor Penguin novo e com amostras da LT Várzea da Palma – Pirapora, 69 kV.

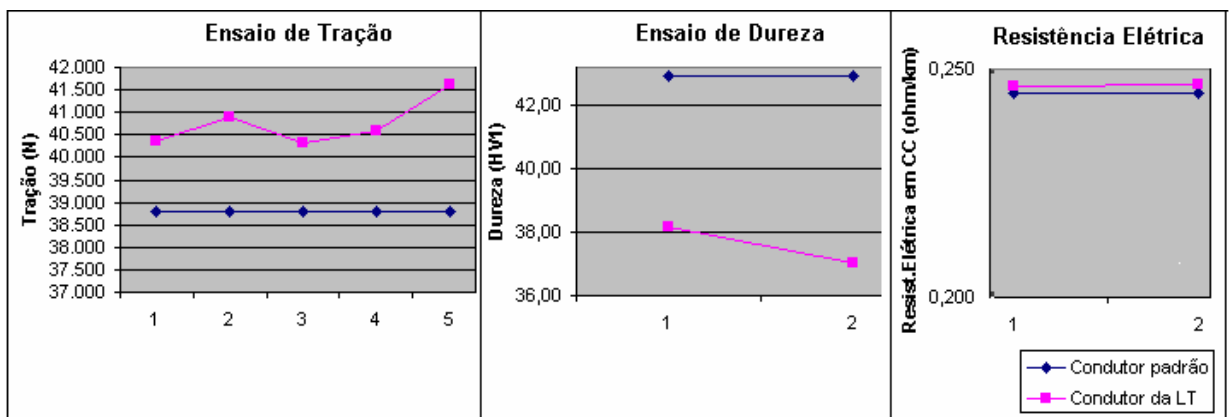


FIGURA 5 – Resultados dos ensaios do cabo condutor Penguin novo e LT Várzea da Palma – Pirapora, 69 kV

3.4 Apresentação dos resultados através da ferramenta computacional desenvolvida

Para a apresentação dos resultados foram consideradas as seguintes premissas:

- para os resultados de análise química, a comparação entre o valor descrito na Norma e o resultado da análise da amostra padrão/cabo condutor novo está na segunda linha, e a comparação entre o valor descrito na Norma e o resultado da última análise está na terceira linha;
- para os resultados de ensaio de tração, dureza e resistência elétrica a comparação entre o valor descrito na Norma e o resultado da análise da amostra padrão/cabo condutor novo está à esquerda da amostra padrão;
- para os resultados de ensaio de tração, dureza e resistência elétrica a comparação entre o valor padrão e os resultados das análises realizadas está à direita da amostra padrão;

Ensaio	Comparação de valores (%)			
	Verde	Branco	Amarelo	Vermelho
Análise Química	V > 100	B = 100	A < 100	
Resistência Mecânica à tração	V > 100	B = 100	100 > A > 49	V < 50
Dureza	V > 100	B = 100	A < 100	
Resistência elétrica		B = 100	A < 100	V > 100

FIGURA 6 – Legenda utilizada na comparação de resultados da ferramenta computacional

3.4.1 LT Sete Lagoas 3 – Cominci, 138 kV

A Figura 7 mostra a comparação entre valores de Norma, ensaios e a simulação da vida útil dos cabos condutores em relação a perda da resistência mecânica em função da temperatura de operação.

Dados Gerais da LT															
Nome: Sete Lagoas 3 - Cominci		Tensão (kV): 138		Extensão (m): 24.5		Codigo: 30220									
Dados do Cabo Condutor Completo															
Nome: Linnet		Material: CAA		Formação (Fios Al e Aço): 26/7		Área Nominal Total (mm ²): 198.38									
Redução: 69		Diâmetro Nominal Cabo (mm): 18.31		Diâmetro Nom. Fio Alumínio (mm): 2.89		Diâmetro Nom. Fio Aço (mm): 2.25									
Tempo de Operação															
Data de energização: 1/1/1972		Tempo de medição de corrente (anos): 1.99726		Tempo de operação (anos): 37.2849											
Análise Química															
	Al_min(%)	Si_max(%)	Fe_max(%)	Cu_max(%)	Mn_max(%)	Cr_max(%)	Zn_max(%)	Bo_max(%)	Ga_max(%)	Ti+V_max(%)	Outros_max(%)				
NBR-7103	99.85	0.10	0.4	0.05	0.01	0.01	0.05	0.05	0.03	0.02	0.10				
Condutor novo LT	99.714	0.0509	0.2101	0.005	0.0051	0.005	0.005	0	0	0.0032	0.0193				
Última análise	99.748	0.0513	0.1622	0.005	0.0071	0.005	0.0152	0	0	0.002	0.0179				
Data	1/2/2007														
Ensaio de Tração															
Resistência mecânica nominal - NBR-7270		Condutor novo LT		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5			
63637		106 68298.9		64919.5 95		63638.4 93		61962.1 90		62769.2 91		65121.6 95			
		Data de realização		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007			
Ensaio de Dureza															
Dureza Nominal - HV1		Data Ensaio		Média		Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4		Ponto 5	
0		Amostra_Padrão 1/2/2007		0 43.8467		34.3		43.4		43.9		41.8667		45.7667	
		Amostra 1 1/2/2007		42 95		41.8 94		40.3 92		44 100		42 100		41.9 91	
		Amostra 2 1/2/2007		41.82 95		41.9 94		40.3 92		44.1 100		41.8 99		41 89	
Ensaio de Resistência Elétrica															
Resistência elétrica nominal - NBR-8815		Condutor novo LT		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5			
0.16925		94 0.16074		17.7865 100		0 0		0 0		0 0		0 0			
		Data de realização		20/9/2006		0 0		0 0		0 0		0 0			
Vida Útil remanescente do cabo condutor (Método Morgan) - Limite 58% RMN do cabo condutor															
Data de realização: 05-Abr-2009		Tempo de medição de corrente (%RMN): 99.9034		Simulação Tempo de operação da LT (%RMN): 96.6527											
Simulação		50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C	130°C	140°C	150°C			
Vida Útil Remanescente (Anos):		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000			
Vida Útil Remanescente (%RMN):		95.7441	95.3737	94.8585	94.1478	93.1786	91.879	90.1772	88.0221	85.4196	82.4811	79.4635			
Perda Fio Alumínio (%RMN):		2.15114	3.02786	4.24753	5.93029	8.22475	11.3014	15.3305	20.4325	26.5937	33.5505	40.6946			

FIGURA 7 – Comparação dos valores de Norma e ensaiados da LT Sete Lagoas 3 – Cominci, 138 kV

Os cabos condutores novos, Linnnet e Penguin, utilizados para validar a ferramenta computacional não pertenciam a nenhuma das LT escolhidas e foram retirados do almoxarifado da Cemig.

4.0 - CONCLUSÕES

Os ensaios de tração mostraram que os cabos condutores das linhas de transmissão onde foram retiradas as amostras apresentam valores de resistência a tração maiores que os cabos condutores novos. A exceção fica por conta da LT Sete Lagoas 3 – Cominci, 138 kV, onde as amostras retiradas estavam cobertas por uma camada de argila conforme mostra a Figura 8, o que provavelmente elevou a temperatura de operação do cabo condutor.

Esta situação está diretamente ligada ao processo de fabricação dos cabos condutores em períodos diferentes. A LT Pirapora – Montes Claros, 138 kV foi energizada em 1978, a LT Sete Lagoas 3 – Cominci, 138 kV em 1972, a LT Várzea da Palma – Pirapora, 69 kV em 1965 e as amostras dos cabos condutores novos fabricadas em 2006.



FIGURA 8 – Amostra de cabo condutor LT SLagoas - Cominci

A análise química não forneceu indicação de alteração na composição química que pudessem afetar as propriedades físicas e mecânicas dos cabos condutores,

A análise metalográfica visa acompanhar a transformação da microestrutura dos fios de Alumínio desde a energização da linha de transmissão até a presente data. Nesse caso, foram apresentadas as imagens metalográficas realizadas com a utilização de microscópio óptico e ampliação de 200X, não sendo realizada a análise da evolução da microestrutura dos fios de Alumínio devido a dificuldade de utilização dessas imagens nas correlações.

A retirada de amostra de cabo condutor durante a construção de uma linha de transmissão é fundamental para o acompanhamento do comportamento do cabo ao longo de sua vida útil em relação aos diversos parâmetros que podem ser monitorados: resistência à tração, dureza, resistência elétrica e estrutura cristalina.

A análise em conjunto dos ensaios de tração, dureza e resistência elétrica resultou nas seguintes conclusões:

4.1.1 LT Pirapora – Montes Claros, 138 kV

O cálculo da vida útil remanescente do cabo condutor utilizando-se o histórico térmico de 2,6 anos e uma simulação para o tempo de operação da LT igual 31,3 anos resultou em uma perda de resistência a tração igual a 4%. Esta tendência é indicada nos resultados dos ensaios de tração e dureza do fio de Alumínio da LT que apresentam valores maiores que do fio do cabo condutor novo.

O ensaio de resistência elétrica apresenta valores praticamente iguais, o aumento da resistência elétrica do fio de Alumínio da LT não ocasionou aumento da temperatura de operação da LT conforme verificado em cálculos realizados.

4.1.2 LT Sete Lagoas – Cominci, 138 kV

O cálculo da vida útil remanescente do cabo condutor utilizando-se o histórico térmico de 02 anos e uma simulação para o tempo de operação da LT igual 37,3 anos resultou em uma perda de resistência a tração igual a 3,3%.

Ao contrário do resultado do cálculo da vida útil remanescente do cabo da LT, os resultados dos ensaios de tração e dureza indicam uma perda maior de resistência a tração, normalmente os ensaios realizados mostram valores maiores de resistência a tração dos cabos das LT em relação ao cabo novo. Provavelmente esse cabo condutor operou a temperatura mais elevada que a normal porque estava coberta por uma camada de argila, conforme mostrado na Figura 8.

O ensaio de resistência elétrica apresenta valores praticamente iguais, o aumento da resistência elétrica do fio de Alumínio da LT não ocasionou aumento da temperatura de operação da LT conforme verificado em cálculos realizados. Um dos valores medidos está incoerente com a situação do cabo condutor, o que requer outra medição para confirmar resistência elétrica atual do cabo.

4.1.3 LT Várzea da Palma – Pirapora, 69 kV

O cálculo da vida útil remanescente do cabo condutor utilizando-se o histórico térmico de 2,6 anos e uma simulação para o tempo de operação da LT igual 44,3 anos resultou em uma perda de resistência a tração igual a 0,4%. Esta tendência é indicada nos resultados dos ensaios de tração do fio de Alumínio da LT que apresentam valores maiores que do fio do cabo condutor novo.

A redução do diâmetro dos fios de Alumínio é fundamental para a perda de resistência, ou seja, quanto maior a redução de diâmetro no processo de fabricação do fio, maior a perda em um dado intervalo de tempo de exposição, conforme Morgan (9). Nesse caso, o cabo condutor Linnet tem uma redução de diâmetro de 69% e o Penguin de 49%, sendo esses valores responsáveis pela reduzida perda de resistência mecânica a tração encontrada nos cálculos realizados utilizando o modelo matemático desenvolvido por Morgan (9).

Os resultados dos ensaios de dureza indicam um recozimento maior do fio de Alumínio, o que contrasta com o resultado do ensaio de tração. Esse ensaio deve ser repetido para confirmação do valor de dureza do fio de Alumínio.

O ensaio de resistência elétrica apresenta valores praticamente iguais, o aumento da resistência elétrica do fio de Alumínio da LT não ocasionou aumento da temperatura de operação da LT conforme verificado em cálculos realizados.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5422 - Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de energia elétrica, 1985.
- (2) ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7270: Cabos de Alumínio com alma de aço para linhas aéreas. Rio de Janeiro, 1978.
- (3) ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7103: Vergalhão de Alumínio 1350 para fins elétricos – Especificação. Rio de Janeiro, 1981.
- (4) AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API Recommended Practice 580: Risk-based Inspection. First Edition. Washington, D.C., May/2002.
- (5) ASM INTERNATIONAL. ASM Specialty Handbook - Aluminium and Aluminum Alloys. Fifth edition. Material Park, Ohio, 2002.
- (6) ASSUNÇÃO, F.C.R.; CARVALHO, A.H.P.; SAMICO, R.A.M. e ROSA FILHO, P.P. Investigation on the aging of old ACRS cables in transmission lines: microstructural evolution and loss of strenght. Cigré Session, Paris, 1992.
- (7) ELECTRA. Paris: Cigré, n° 162, 1995. Bimestral. Loss in strength of overhead electrical conductors caused by elevated temperature operation.
- (8) HATCH, J.E. Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, ASM, Metals Park, USA, 1990.
- (9) MORGAN, V.T. The loss of tensile strength of hard-drawn conductors by annealing in service. In: IEEE PES Summer Meeting, Los Angeles, CA, July/1978.
- (10) MORGAN, V.T. Thermal Behaviour of Electrical Conductors – Steady, Dynamic and Fault-Current Ratings. CSIRO Division of Applied Physics, 1990.