



**GRUPO III
GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

**INVESTIGAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS DE
CABOS CAA EM TEMPERATURAS ELEVADAS**

Marcos José Mannala

LACTEC

Oswaldo Honorato de Souza Jr

LACTEC

João Nelson Hoffmann*

COPEL TRANSMISSÃO

RESUMO

Os projetos das linhas de transmissão normalmente são feitos utilizando-se parâmetros mecânicos de cabos que são determinados sob temperatura ambiente. Estes parâmetros encontram-se de alguma forma tabelados, e vem sendo utilizados ao longo de diversas décadas. Tem-se admitido que eles não sofrem variações significativas até temperaturas da ordem de 50 ou 60 °C, para as quais as linhas de transmissão tem sido normalmente projetadas.

No entanto, é cada vez mais freqüente a recapacitação das linhas de transmissão e a necessidade de operá-las em temperaturas cada vez maiores. Assim, neste trabalho busca-se uma melhor compreensão dos parâmetros mecânicos destes cabos às temperaturas reais de operação, que podem chegar a 90 °C, 100 °C ou até mais, objetivando identificar a influência destes parâmetros sobre o projeto eletromecânico das linhas de transmissão.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de Transmissão, Cabos Condutores, Ensaios Mecânicos

1.0 - INTRODUÇÃO

Os projetos das linhas de transmissão normalmente tem sido feitos utilizando-se parâmetros mecânicos dos cabos (Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Dilatação Térmica) que são usualmente determinados sob temperatura ambiente.

A Tabela 1 mostra alguns destes valores, que tem sido tradicionalmente utilizados em projetos de linhas de transmissão. Estes parâmetros encontram-se tabelados, e tem-se admitido que eles não sofrem variações significativas até temperaturas da ordem de 50 ou 60 °C, para as quais as linhas de transmissão tem sido freqüentemente projetadas.

TABELA 1 – Parâmetros Usuais dos Cabos		
CABO - Formação	Módulo de Elasticidade Final (kgf/mm ²)	Coeficiente de Dilatação Térmica (°C ⁻¹)
ACSR – 12/7	11.000	15,3 x 10 ⁻⁶
ACSR – 26/7	8.000	18,9 x 10 ⁻⁶
ACSR – 54/7	7.000	19,3 x 10 ⁻⁶

No entanto, fatores diversos como a desregulamentação do setor elétrico, o acesso livre, o adiamento dos investimentos e as dificuldades para a obtenção de novas faixas de servidão tem mudado o modo como a rede elétrica é utilizada, levando a um aumento na potência transmitida, e isto tem sobrecarregado as linhas de transmissão. Assim, a necessidade de operação dos condutores em temperaturas cada vez maiores nos leva também à necessidade de uma melhor compreensão dos parâmetros mecânicos destes cabos à temperatura real de operação, sendo que esta temperatura freqüentemente é muito superior a 50 ou 60 °C, podendo chegar a 90 °C, 100 °C ou até mais.

Com vistas a uma melhor compreensão deste problema, a COPEL e o LACTEC investiram na construção de um laboratório para ensaios mecânicos, onde é possível realizar qualquer tipo de ensaio que exija tração mecânica em cabos, os quais ao mesmo tempo podem ser levados a atingir temperaturas de até 200 °C.

2.0 - LABORATÓRIO DE ENSAIOS MECÂNICOS

O laboratório é composto por três bancadas para ensaios, sendo uma para testes mecânicos em cabo condutores, a segunda para ensaios de vibração e a terceira bancada para isoladores e acessórios de cabos. Os ensaios mencionados neste IT foram realizados na primeira bancada (*Figura 1*).



FIGURA 1 – Laboratório de Ensaio Mecânico

Nesta bancada podem ser realizados os ensaios de ruptura, tensão-deformação, dilatação térmica e fluência, sendo todos estes ensaios com ou sem aquecimento do cabo condutor. Este aquecimento na amostra pode ser obtido com a aplicação de corrente elétrica no cabo, ou com aquecimento por resistências blindadas, atingindo assim a temperatura superficial desejada. O controle da temperatura média da amostra tem precisão de $\pm 0,2$ °C, tanto nos ensaios em temperatura ambiente com em ensaios até 200 °C, sempre com monitoramento e controle automáticos. Estes ensaios seguem os procedimentos previstos em normas ABNT, onde aplicáveis, e desta forma pode-se determinar as características mecânicas dos cabos nestas condições. Detalhes construtivos são também encontrados na referência [1].

Um computador do tipo *desktop* efetua o controle de temperatura, tração e deformação programada por meio de algoritmos de controle digital. Um periférico é destinado à aquisição e envio de sinais de 16 bits com 15 canais. Externo ao microcomputador existe um condicionador de sinais com placas de recepção de sinais dos 7 termopares, 8 relés NA/NF, 8 canais de leitura de tensão/corrente, 6 canais de envio de tensão ± 10 V ou corrente 4 a 20 mA. Para o sistema de controle de temperatura são utilizados 7 canais de leitura de temperatura e envio de tensão para 4 controladores de potência, sendo 3 deles monofásicos e um trifásico. A potência total controlada é de 10 kW, distribuídas em 14 resistências (10 resistências de 600 W e 4 resistências de 1000 W cada uma). Quando os ensaios são à temperatura ambiente, o ar-condicionado instalado no recinto toma com referência a temperatura do condutor, e não do meio, mantendo a temperatura da amostra dentro do valor desejado.

2.1 Ensaio Preliminares nos cabos CAA 266, 397.5, 636 e 795 kCM

Foram realizados diversos ensaios utilizando-se cabos novos e cabos que estavam em operação há vários anos, dos tipos CAA 266 kCM (Partridge), 397,5 kCM (Ibis), 636 kCM (Grosbeak) e 795 kCM (Drake), visando a determinação do comportamento destes cabos através de parâmetros como o módulo de elasticidade, coeficiente de dilatação térmica e fluência, em temperaturas de até 150 °C.

As Figuras 2 e 3 mostram os resultados dos módulos de elasticidade Médio, Inferior e Superior, além do módulo de elasticidade Final, para um dos cabos ensaiados conforme previsto em normas técnicas aplicáveis.

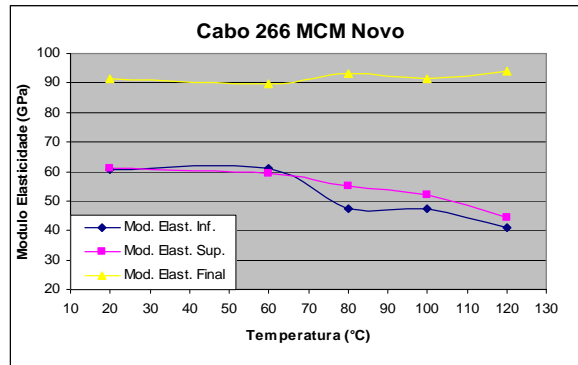


FIGURA 2 – Cabo 266 Novo

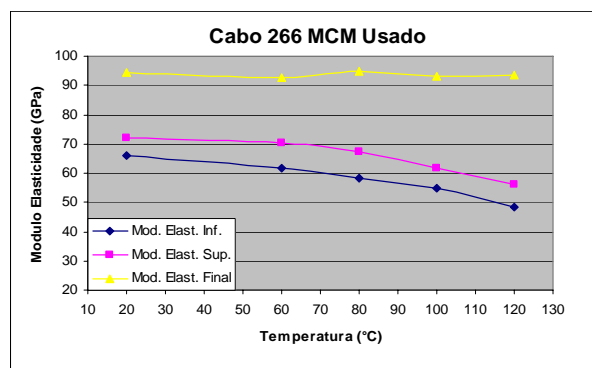


FIGURA 3 – Cabo 266 Usado

Analisando-se as Figuras 2 e 3, para os cabos 266 kCM novo e usado, verifica-se que o módulo de elasticidade Final não tem um comportamento de variação substancial, isto porque o cabo já sofreu uma tração elevada e a resposta não depende mais tanto da camada de alumínio e sim da camada de aço. Por outro lado, os módulos Inferior e Superior, na Figura 2, variam a partir de 60°C até a temperatura de 120°C e o mesmo comportamento é observado para o cabo usado (Figura 3). Verifica-se portanto, que os módulos de elasticidade, tanto do cabo novo quanto o usado, variam com a temperatura a partir de 60°C, com comportamentos similares, sendo os níveis de variação um pouco mais acentuado no cabo novo. Verificou-se também, que os módulos de elasticidade do aço e do alumínio, levantados a partir do banco de dados dos ensaios, não variam com a temperatura, com valores da ordem de 200GPa e 70 GPa respectivamente, tanto para o cabo novo quanto para o cabo usado.

Os ensaios de dilatação térmica no cabo usado apresentaram os seguintes resultados: cabo novo: $\alpha = 19,76 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$; cabo usado: $\alpha = 19,92 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$, valores um pouco superiores àqueles da Tabela 1.

3.0 - CASO PRÁTICO: LT 138 KV AREIA - SEGREDO

Em complemento aos ensaios acima descritos, foram realizados novos ensaios com o objetivo específico de subsidiar estudos para a recapitação de uma linha de transmissão de 138 kV, construída com cabo CAA 266 kCM (Partridge). Em função do ingresso de várias centrais hidrelétricas na região, esta linha passou a exigir temperaturas de projeto que poderiam chegar a 100 °C (operação normal) e 110 °C (emergência). A necessidade deste estudo motivou os ensaios e análises que se seguem.

3.1 Ensaio no cabo CAA 266 kCM

Para esta finalidade foram obtidas amostras de cabo CAA 266 kCM, retiradas de uma linha que estava sendo desmontada e que ficou em operação por 30 anos. Neste caso, foram feitos ensaios com temperaturas de 60 °C, 80 °C, 100 °C e 120 °C, visando o estabelecimento de critérios de projeto a serem considerados na recapitação da linha de transmissão. A Figura 4 mostra os resultados do ensaio de Tensão-Deformação, onde verifica-se que

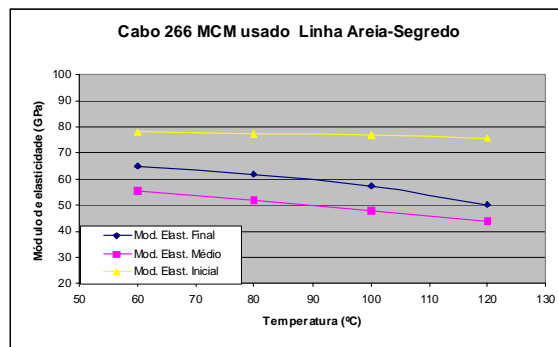


FIGURA 4 – Resultados do Cabo 266 kCM

o comportamento do módulo de elasticidade Final possui o mesmo comportamento dos resultados apresentados nas Figuras 2 e 3, com pequena variação. O comportamento dos módulos Superior e Inferior também apresenta-se com uma variação com a temperatura a partir das medições feitas a partir de 60°C, sendo os valores a 120°C da mesma ordem de grandeza do cabo considerado na Figura 3.

Para esta amostra, os ensaios de dilatação térmica apresentaram o valor médio de $21,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ para as temperaturas de 60 °C a 120 °C, portanto, significativamente superiores àqueles da Tabela 1.

3.2 Verificação da Influência no Projeto de LTs

Com os parâmetros do cabo CAA 266 kCM medidos nas temperaturas de 60, 80, 100 e 120 °C, foram feitas simulações utilizando o aplicativo *Pls-cadd* (2) de modo a verificar a influência destas temperaturas elevadas em projetos de linhas de transmissão. As curvas Tensão-Deformação para estas temperaturas estão ilustradas na Figura 5. Nota-se que, para uma mesma tensão mecânica aplicada no cabo condutor, o alongamento é maior à medida que aumenta a temperatura do condutor. Isto indica um possível aumento de flecha do condutor em temperaturas elevadas.

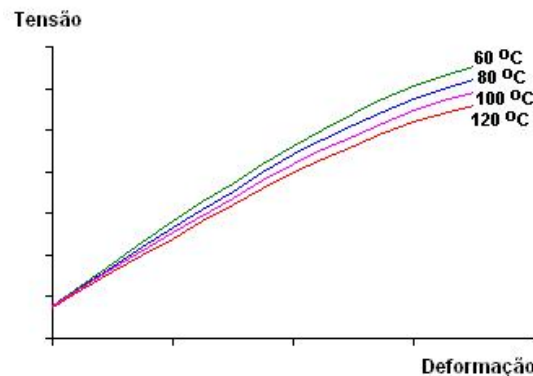


FIGURA 5 – Tensão-Deformação do cabo 266 kCM

Conforme padronização dos dados de entrada do *Pls-cadd*, as curvas Tensão-Deformação da Figura 5 podem ser representadas por um polinômio de 4ª ordem, cujos coeficientes foram determinados e estão mostrados na Figura 6, para as diversas temperaturas de operação.

Outer Strands		20 °C			
Final modulus of elast(daN/mm ² /100)	47.229				
Thermal expansion coeff. (/100 deg)	0.002304				
Polynomial coefficients (all strains in %)					
	A0	A1	A2	A3	A4
Stress-strain	-0.6087	40.5326	-41.635	4.52157	11.5156
Creep	-0.2241	17.2263	-25.218	26.2255	-9.8394
Core Strands (if different from outer strands)		20 °C			
Final modulus of elasticity (daN/mm ² /100)	27.286				
Thermal expansion coeff. (/100 deg)	0.001152				
Polynomial coefficients (all strains in %)					
	A0	A1	A2	A3	A4
Stress-strain	-0.0163	27.9678	-3.0368	-10.707	4.80977
Creep	0.09590	25.0482	8.91146	-46.314	30.4879

Outer Strands		60 °C			
Final modulus of elast(daN/mm ² /100)	78.13				
Thermal expansion coeff. (/100 deg)	0.0021				
Polynomial coefficients (all strains in %)					
	A0	A1	A2	A3	A4
Stress-strain	2.45895	48.9555	225.467	-1021.7	1167.98
Creep	2.45895	48.9555	225.467	-1021.7	1167.98
Outer Strands		80 °C			
Final modulus of elast(daN/mm ² /100)	78.13				
Thermal expansion coeff. (/100 deg)	0.0021				
Polynomial coefficients (all strains in %)					
	A0	A1	A2	A3	A4
Stress-strain	2.45032	59.5883	95.1404	-609.37	746.866
Creep	2.45032	59.5883	95.1404	-609.37	746.866

Outer Strands		100 °C			
Final modulus of elast(daN/mm ² /100)	76.93				
Thermal expansion coeff. (/100 deg)	0.0021				
Polynomial coefficients (all strains in %)					
	A0	A1	A2	A3	A4
Stress-strain	2.53543	56.3051	47.3926	-313.51	317.993
Creep	2.53543	56.3051	47.3926	-313.51	317.993
Outer Strands		120 °C			
Final modulus of elast(daN/mm ² /100)	75.74				
Thermal expansion coeff. (/100 deg)	0.0021				
Polynomial coefficients (all strains in %)					
	A0	A1	A2	A3	A4
Stress-strain	2.55999	47.3667	50.9053	-238.47	197.461
Creep	2.55999	47.3667	50.9053	-238.47	197.461

FIGURA 6 – Coeficientes da curva Tensão-Deformação

Com estes dados, foram feitas simulações de projeto considerando-se os parâmetros efetivamente medidos em laboratório, sob altas temperaturas, e considerando-se os parâmetros determinados sob temperatura ambiente. A Figura 7 ilustra os resultados num vão de 400 m, indicando que os parâmetros reais do cabo, determinados à sua temperatura real de operação, levam a um aumento da flecha dos condutores, e em conseqüência, a uma menor distância cabo-solo. Este aumento de flecha deve-se em parte às curvas Tensão-Deformação, e em parte à variação do coeficiente de dilatação térmica, conforme observado nas medições em laboratório apresentadas na seção 3.1.

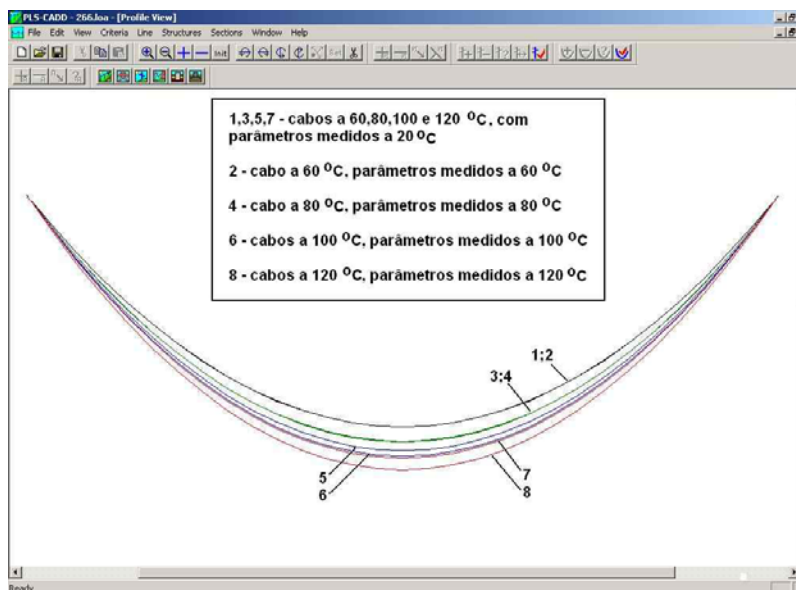


FIGURA 7 – Cabo CAA 266 kCM num vão de 400 m

A Tabela 2 mostra os valores da flecha do cabo 266 considerando apenas a influência das curvas Tensão-Deformação (coluna “C”) e a influência total (coluna “D”) considerando também a variação observada no coeficiente de dilatação térmica (α).

A	B	C	D
60	20	12,31	12,31
	60	12,32	12,51
80	20	13,10	13,10
	80	13,12	13,38
100	20	13,60	13,60
	100	13,89	14,22
120	20	13,99	13,99
	120	14,62	15,02

A = Temperatura de Projeto ($^{\circ}\text{C}$)

B = Temp. na qual os parâmetros do cabo foram obtidos ($^{\circ}\text{C}$)

C = Flecha (m) para um vão de 400 m, com $\alpha = 18,9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

D = Flecha (m) para um vão de 400 m, $\alpha = 18,9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a 20°C e $\alpha = 21 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ nos demais.

Pode-se concluir destas simulações que não há variação significativa na flecha até a temperatura de 80°C , quando utiliza-se no projeto o coeficiente de dilatação térmica usualmente considerado ($18,9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) para este cabo. Acima de 80°C , há um acréscimo de 0,29 m na flecha a 100°C , e de 0,63 m a 120°C . Portanto, estes acréscimos de flecha devem-se exclusivamente à variação nas curvas Tensão-Deformação medidas em altas temperaturas.

Nas medições efetuadas constatou-se um valor inesperado para o coeficiente de dilatação térmica ($21 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) em altas temperaturas, o que pode ser peculiar à amostra analisada. Para este caso específico, a situação seria ainda mais crítica pois já a 60°C percebe-se uma diferença de 0,20 m na flecha, sendo que em 120°C a diferença seria de 1,03 m. Este fato sugere ser importante proceder medições do coeficiente de dilatação térmica dos cabos, visto que em muitos casos apenas são apresentados cálculos demonstrando o atendimento ao valor especificado, observando ainda que o ensaio não encontra-se padronizado em Normas Técnicas.

Estas considerações e curvas Tensão-Deformação foram utilizadas no projeto de recapacitação da LT 138 kV acima citada.

3.3 Estimativa de Perda de Vida Útil do Cabo Condutor

Em estudos de recapacitação é comum deparar-se com o problema de estimativa de perda de vida útil dos condutores que operam em temperaturas elevadas (acima de 75°C), sendo o assunto tratado em diversas referências (3),(4). Em (5), é apresentada uma metodologia simplificada para esta estimativa, não tomando em conta possíveis efeitos sobre as emendas e conexões de condutores, que podem ter importância significativa. Esta metodologia é brevemente descrita abaixo, seguindo-se um exemplo de aplicação.

Para cabos CAA, pode-se considerar as seguintes equações:

$$R\% = (SR_E * R_{AL} + 109 * R_{AÇO}) / R_{CABO}, \text{ onde:}$$

$R\%$ = carga de ruptura final do cabo, em termos percentuais da carga de ruptura inicial;

R_{AL} = tração nos fios de alumínio, em kgf;

$R_{AÇO}$ = tração nos fios de aço, em kgf;

R_{CABO} = carga de ruptura inicial do cabo condutor.

$$SR_E = (134 - 0,24 \times T) t^{\frac{0,241 - 0,00254 * T}{d}}, \text{ onde}$$

T = temperatura do condutor, em $^{\circ}\text{C}$;

t = tempo de operação na temperatura T , em horas;

d = diâmetro do fio do condutor, em mm, sujeito ainda às seguintes condições:

($134 - 0,24 \times T$) deve ser maior que 100. Caso contrário, considerar igual a 100.

$(0,241 - 0,00254 \times T)$ deve ser menor que 0. Caso contrário, considerar igual a 0 .

Exemplo:

Para o cabo CAA 266 kCM Partridge da LT 138 kV Areia – Socorro, com diâmetro do fio de Alumínio igual a 2,57 mm, na hipótese de operação com o ciclo de altas temperaturas: 10000 horas em 100 °C, 100 horas em 110 °C e 10 horas em 120 °C, a carga de ruptura final é determinada como segue, considerando o efeito cumulativo da perda de vida útil:

Cálculo de SR_E :

- 10000 horas em 100 °C corresponde a $SR_E = (100) \times 10.000^{**} (0,241-0,00254 \times 100)/2,57 = 95,4\%$ em 100 °C
- Usando a mesma expressão de SR_E , 95,4% em 100 °C são equivalentes a 23,4 horas em 110 °C
- 100 + 23,4 horas em 110 °C resulta em $SR_E = (100) \times 123,4^{**} (0,241-0,00254 \times 110)/2,57 = 93 \%$ em 110 °C
- 93% em 110 °C são equivalentes a 18,6 horas em 120 °C
- 10 + 18,6 horas em 120 °C resulta em $SR_E = (100) \times 28,6^{**} (0,241-0,00254 \times 120)/2,57 = 92 \%$ em 120 °C.

Então, utilizando dados dos fios do cabo CAA 266 kCM, conforme (6),(7), a carga remanescente do cabo fica:

$$R\% = (92 \times 170 \times 135,16 + 109 \times 1310 \times 22)/(9,8 \times 5550) = 96,7 \%$$

Indicando uma perda de 3,3% na carga de ruptura do cabo CAA 266 kCM, operando no ciclo de alta temperatura acima descrito. Conforme (8), sugere-se que podem ser aceitáveis perdas na carga de ruptura de até 5 a 10 % .

4.0 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para os parâmetros mecânicos dos cabos em altas temperaturas permitirão uma avaliação mais precisa das distâncias de segurança em projetos de recapacitação de linhas de transmissão. Os valores obtidos em laboratório e depois considerados em simulações do projeto eletromecânico da linha de transmissão com cabo CAA 266 kCM indicaram um acréscimo considerável na flecha do condutor, para temperaturas acima de 80 °C.

Verifica-se com este trabalho que, ao invés de utilizarmos parâmetros tabelados (módulo de elasticidade e coeficiente de dilatação térmica), os mesmos já podem ser obtidos com maior precisão no laboratório.

Como consequência, a obtenção mais precisa destes parâmetros, em conjunto com a estimativa de perda de vida útil dos condutores, permitirá a determinação da capacidade de transmissão com maior nível de confiabilidade, de forma a assegurar o desempenho esperado para os cabos e sem violação das distâncias de segurança.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) “Ensaio Mecânicos em Cabos Condutores de Linhas de Transmissão” – Oswaldo Honorato de Souza Jr., Nilson Barbieri Walter, A. Kapp – XV SNPTEE, 1999
- (2) “Otimização de Projetos de Linhas de Transmissão em Ambiente Computacional com Interface Amigável (Software PIs-cadd) - João N. Hoffmann – XIV SNPTEE, 1997
- (3) “The Loss in Tensile Strength of Hard-Drawn Conductors by Annealing in Service”, V. T. Morgan, IEEE PAS-98, Maio/Junho 1979
- (4) “Effect of Elevated Temperature Operation on the Strength of Aluminum Conductors”, J. R. Harvey, IEEE paper 80-314.2
- (5) “Loss of Strength of Overhead Electrical Conductors Caused by Elevated Temperature Operation” – Cigré Study Committee 22, 1995
- (6) ABNT NBR 6756 – Fio de Aço Zincado para Cabo de Alumínio, 1981
- (7) ABNT NBR 5118 – Fios de Alumínio Nus de Seção Circular para Fins Elétricos, 1985
- (8) “The Effect of Temperature on the Loss of Tensile Strength of Overhead Conductors”, V. T. Morgan, CSIRO Division of Applied Physics, Sydney, Australia