

	<p>XX SNPTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA</p>	<p>Versão 1.0 22 a 25 Novembro de 2009 Recife - PE</p>
---	--	--

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO-GLT

METODOLOGIA DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA DE CABOS CONDUTORES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO

**Marcos José Mannala
LACTEC**

**Oswaldo Honorato de Souza Jr.
LACTEC/UTFPR**

RESUMO

Este trabalho descreve metodologia de ensaio para levantamento do coeficiente de dilatação térmica em cabos condutores destinados a linhas de transmissão e distribuição. É apresentada a concepção de uma bancada de ensaios em cabos condutores com a explanação breve da construção e automação do equipamento.

A metodologia de ensaio é detalhada culminando com uma aplicação prática de um ensaio em cabo condutor de alumínio com alma de aço (CAA). São apresentados resultados através de gráficos e uma tabela que apresenta dezenas de valores de coeficiente de dilatação térmica com as respectivas temperaturas.

PALAVRAS-CHAVE

Coeficiente de dilatação térmica, cabo de alumínio nu, metodologia de ensaio, ensaio em cabos.

1.0 - INTRODUÇÃO

As empresas e concessionárias de energia elétrica têm exigido cada vez mais ensaio em cabos e acessórios para linhas de transmissão de energia elétrica. Alguns ensaios não são normalizados, como o ensaio de determinação do coeficiente de dilatação térmica linear de condutores, destinado para cabos tais como CAA, CA (condutor de alumínio com e sem alma de aço), TCAA (condutor de alumínio com alma de aço com liga termoresistente), CALA (Cabo de alumínio com liga de alumínio), entre outros.

Outros institutos já trabalhavam desde a década de oitenta com a medição do coeficiente de dilatação térmica de condutores (3), utilizando-se de fonte e aplicação de corrente contínua, o que segundo esses pesquisadores, desta forma conseguia-se maior homogeneidade na distribuição de temperatura dos condutores. Porém, o LACTEC optou por fonte de corrente alternada, por se tratar de uma condição mais próxima do real com relação aos efeitos de distribuição de corrente e temperatura, além do que seria uma alternativa de menor custo.

Com a metodologia estabelecida procurou-se uma determinação mais precisa do coeficiente de dilatação térmica tendo em vista a aplicação deste parâmetro na determinação das flechas do cabo condutor durante sua operação em altas temperaturas, às quais estão associadas às distâncias mínimas cabo-solo. Para tal, foi estabelecida como premissas a obtenção deste parâmetro simultaneamente à aplicação da corrente elétrica que ocasiona o aumento da temperatura do condutor, sendo simultaneamente aplicada a tração de trabalho do cabo.

Embora o nome do ensaio seja Determinação do Coeficiente de Dilatação Linear, constatou-se que o comportamento do condutor não é linear em toda a faixa de temperatura de utilização apresentando variações

para cada faixa de temperatura analisada. Existem diferenças entre considerar separadamente cada material utilizado na amostra para o cálculo do coeficiente e a utilização real, onde os fios que compõe a amostra são tracionados. Com a inserção da tração também se agregam outras variáveis como o alongamento diferenciado para cada coroa que constitui o cabo condutor.

Neste artigo serão apresentados os resultados de uma aplicação da metodologia, utilizando-se um cabo convencional (CAA-954MCM-Rail).

2.0 - DESCRIÇÃO DA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DO LEVANTAMENTO DO COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA

O desenvolvimento da metodologia do ensaio do coeficiente de dilatação térmica foi iniciado no ano de 1998, período em que outros ensaios na área de cabos estavam sendo desenvolvidos. Estes ensaios estavam em estudos, paralelamente com o desenvolvimento da bancada de testes em cabos condutores.

A bancada foi construída dentro do laboratório de ensaios mecânicos do LACTEC, no campus da Universidade Federal do Paraná, em uma área total de 80 m² e comprimento total de 17 m.

2.1 Descrição da bancada de cabos condutores

A bancada de ensaio em cabos condutores (Foto 1) é composta pelas seguintes partes: sistema de tração, sistema de aquecimento por corrente elétrica e por aquecimento através de resistências blindadas, sistema de condicionamento de temperatura ambiente, sistema de medição de deslocamento, força e temperatura. O vão útil onde o cabo fica alojado é de 12 m de comprimento por 0,30 m de largura e mesma altura. As paredes são constituídas de lâ de vidro cobertas por alumínio para facilitar a homogeneização do gradiente de temperatura. Para efetuar o condicionamento da amostra de cabo condutor no interior da bancada de aquecimento e proteção contra rompimento são utilizadas doze tampas com isolamento térmico, cada uma com 1 m de comprimento.



Foto 1 - Bancada de ensaios para dilatação térmica

Um computador (do tipo *desktop*) efetua o controle de todas as partes por meio de algoritmos de controle digital. Um periférico é destinado à aquisição e envio de sinais de 16 bits com 15 canais. Externamente ao microcomputador, existe um condicionador de sinais com placas de recepção de sinais dos sete termopares, 8 relés NA/NF, 8 canais de leitura de tensão/corrente, 6 canais de envio de tensão +/- 10V ou corrente 4 a 20 mA. Para o sistema de controle de temperatura são utilizados sete canais de leitura de temperatura e envio de tensão para quatro controladores de potência, sendo três monofásicos e um trifásico. A potência total demandada é de 10 kW, distribuídas em 14 resistências (10 resistências de 600 W e quatro resistências de 1000 W).

O sistema de ar condicionado também é controlado pelo mesmo sistema, onde em ensaios com o condutor a temperatura ambiente, o sistema mantém a temperatura da amostra com baixa variação oscilatória.

Para o aquecimento do condutor com corrente, usa-se um transformador de corrente com capacidade máxima de 3.000 A. Juntamente com este transformador utiliza-se um controlador de potencia para o controle da temperatura do aquecimento que trabalha através do princípio da modulação por largura de pulso. A malha de controle deste sistema é fechada através dos sete termopares (Figura 1).

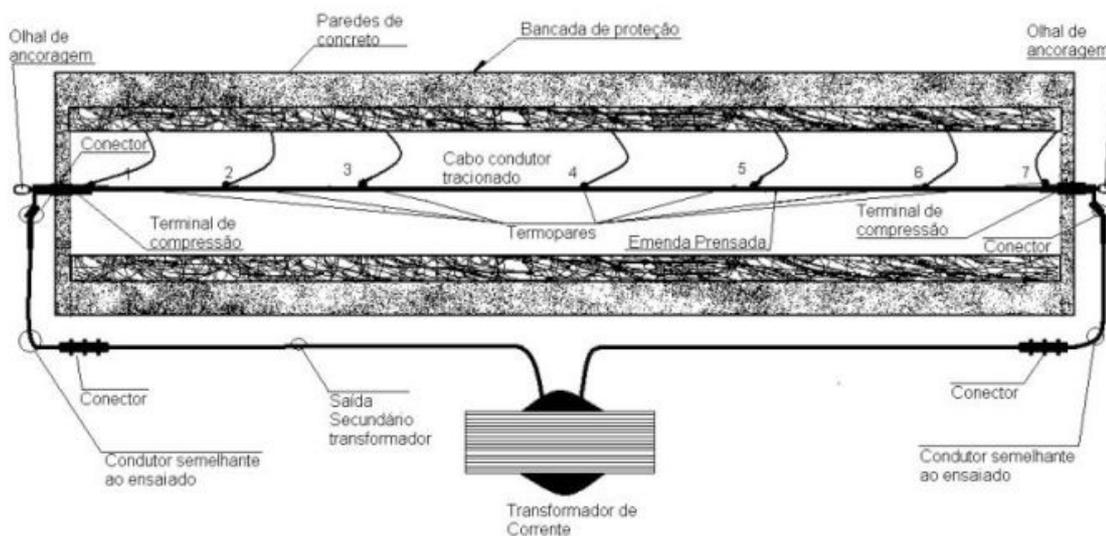


Figura 1 – Bancada de ensaio de cabos – sistema de aquecimento de cabos condutores por corrente.

2.2 Preparação do ensaio

Esta etapa do ensaio é realizada por dois homens. A amostra de cabo tem as terminações preparadas em um ambiente separado, obedecendo à norma NBR 7273(1). Após a finalização das terminações, o cabo é instalado na bancada de ensaios, tendo as terminações presas em cada um dos terminais de ancoragem. O condutor então é pré-tracionado com tração de 5 % da RMC (Resistência Máxima Calculada) para viabilizar a instalação dos acessórios como transdutores de deslocamento e termopares.

Em seguida a amostra é tracionada com valor 5 % superior a da tração de ensaio, com a finalidade de que o cabo tenha acomodação geométrica entre outros alongamentos que venham comprometer o resultado do ensaio. Esta tração é mantida durante pelo menos 24 horas.

2.3 Execução do ensaio

A tração do condutor adotada é a do projeto da linha. Quando a carga fica estabilizada, o ensaio é iniciado injetando-se corrente gradativamente, pois correntes elevadas geram concentração de calor nos terminais de corrente, prejudicando a homogeneização da temperatura da amostra. O sistema deve manter estabilizado o valor de carga, que sofre variações devido à dilatação térmica. As leituras da deformação, carga e temperatura do condutor devem ser obtidas simultaneamente.

Etapa automatizada do ensaio: Após o tempo de acomodação da amostra retorna-se a tração de pré-carga de ensaio. O programa pede informação da temperatura máxima de ensaio. O condutor então é tracionado suavemente e sem trancos até a carga de ensaio. No instante que a carga é atingida, o sistema detecta a temperatura inicial do cabo e inicia-se a aquisição dos dados através dos transdutores em μm . A taxa de aquisição é de 120 amostras por minuto para cada grandeza medida (tempo, tração, alongamento e temperatura).

Quando a temperatura de ensaio alcançar a estipulada, o sistema é desligado e assim se finda a aquisição de dados dos sensores. O sistema descarrega automaticamente a tração até 4 % do valor da carga de ruptura.

2.4 Análise dos resultados

Após o descarregamento da amostra até a pré-carga, o programa fornece dois gráficos principais que resumem todo comportamento do ensaio. O primeiro gráfico é do alongamento (μm) versus temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (Figura 2), que caracteriza o levantamento do coeficiente de dilatação térmica do condutor. Este gráfico é composto por duas

curvas, uma curva é a referência do coeficiente de dilatação térmica teórico e o outro a curva real levantada no ensaio. A rampa de subida de temperatura tem a duração de 50 a 60 minutos, tempo este definido pelo incremento de temperatura que é gradativo e uniforme através da corrente fornecida pelo controlador.

O segundo gráfico é o gráfico de tração (kN) x tempo (h) (figura 3), onde se registra o comportamento da tração do condutor durante o ensaio. Este controle é importante, pois com a dilatação do condutor tem-se a variação de carga na amostra ensaiada e isso influencia diretamente o resultado do coeficiente a ser levantado.

Apresenta-se ao final, uma tabela resumo com diversos coeficientes de dilatação térmica. A coluna vertical apresenta os valores da temperatura inicial e a coluna horizontal apresenta os valores da temperatura final espaçados de cinco em cinco graus Celsius. Assim é possível levantar o coeficiente de dilatação térmica na faixa desejada.

3.0 - ANÁLISE DE RESULTADOS DE ENSAIOS DO LEVANTAMENTO DE DILATAÇÃO TÉRMICA ATRAVÉS DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA PELO LACTEC

Neste capítulo é apresentado um exemplo de ensaio de levantamento do coeficiente de dilatação térmica através do método LACTEC. O ensaio determina o comportamento do coeficiente de dilatação de um cabo CAA até a temperatura máxima de serviço do condutor.

3.1 Ensaio do levantamento do coeficiente de dilatação térmica em cabo CAA Rail – 954 MCM

A tração do ensaio de levantamento do coeficiente de dilatação térmica no cabo 954 MCM – Rail, foi de 20 % do valor de tração de ruptura do condutor, de 22,508 kN. Durante o período de ensaio a tração deve ser mantida o mais próximo possível da programada. O coeficiente de dilatação térmico teórico é de $20,9 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$, conforme ABNT NBR 7270(3).

A temperatura inicial do ensaio foi de $22,5^\circ\text{C}$, e a partir deste ponto o sistema injeta corrente na amostra gradualmente obedecendo a uma rampa, para que em uma hora se atinja a temperatura final de 100°C . Neste ínterim são adquiridos 120 dados por minuto, totalizando 7.200 aquisições. Os dados adquiridos são de tempo, tração, alongamento e temperatura. A temperatura medida é valor médio da leitura de sete termopares tipo E.

Durante o ensaio, o gráfico de dilatação térmica e o gráfico de tração são atualizados a cada nova aquisição de dados. O gráfico de dilatação térmica é composto por duas curvas, uma em vermelho, que representa o coeficiente teórico e a preta, que representa o coeficiente real levantado durante o ensaio (Figura 2).

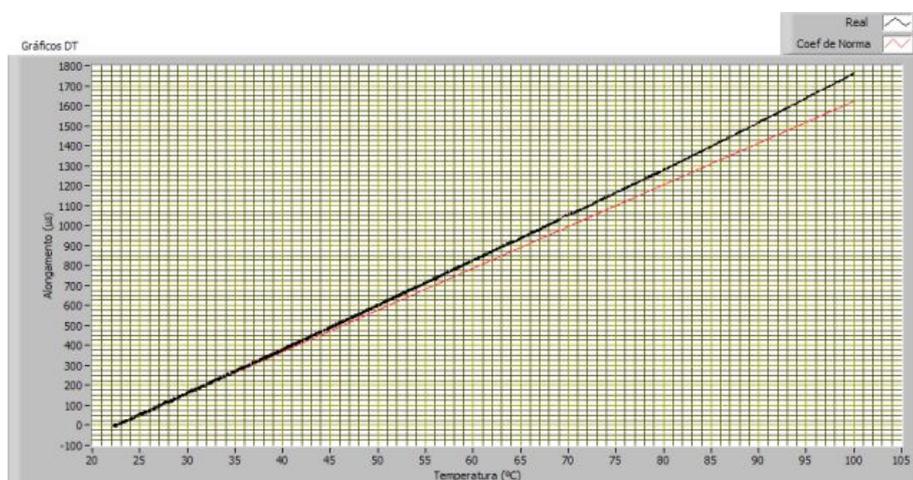


Figura 2 – Gráfico da curva do levantamento de dilatação térmica.

O gráfico de tração abaixo apresenta a variação da tração durante o ensaio. Como o cabo se alonga durante todo o ensaio fazendo que a tração sempre tenda a ser reduzida, é importante averiguar o comportamento da tração no decorrer de todo o processo (Figura 3).

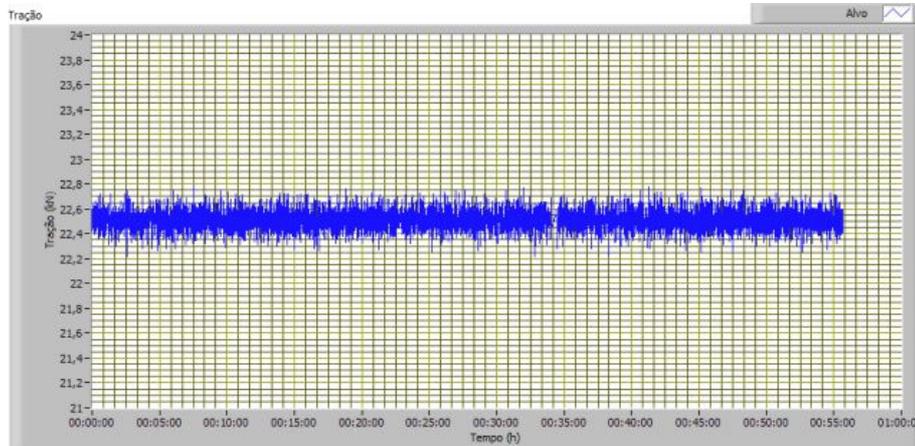


Figura 3 – Gráfico da curva de tração aplicada no cabo condutor.

Após o término do ensaio, uma tabela resumo é apresentada com diversos coeficientes de dilatação térmica. A coluna vertical apresenta os valores da temperatura inicial e a coluna horizontal apresenta os valores da temperatura final espaçados de cinco em cinco graus Celsius. Com a tabela gerada pelo programa para a faixa de 25 a 100 °C é possível analisar o coeficiente de dilatação térmica para 127 faixas distintas, ao invés de apenas um coeficiente (Tabela 1).

Tabela de Coeficientes de Dilatação Térmica Linear

	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
25	21,574	21,650	21,683	21,765	21,846	21,945	22,030	22,096	22,140	22,199	22,255	22,325	22,414	22,528	22,653
30	0,000	21,161	21,585	21,768	21,879	21,998	22,090	22,154	22,195	22,252	22,307	22,379	22,472	22,591	22,723
35	0,000	0,000	21,304	21,843	21,966	22,099	22,188	22,241	22,271	22,323	22,374	22,447	22,545	22,672	22,811
40	0,000	0,000	0,000	21,985	22,044	22,203	22,284	22,318	22,335	22,383	22,431	22,508	22,614	22,751	22,900
45	0,000	0,000	0,000	0,000	21,865	22,282	22,365	22,374	22,378	22,427	22,477	22,561	22,679	22,830	22,991
50	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	22,086	22,387	22,376	22,383	22,448	22,507	22,608	22,744	22,913	23,090
55	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	22,666	22,378	22,393	22,484	22,550	22,669	22,826	23,016	23,208
60	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	21,979	22,388	22,542	22,613	22,756	22,938	23,150	23,356
65	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	23,259	22,782	22,747	22,899	23,101	23,330	23,544
70	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	22,863	22,754	23,007	23,255	23,510	23,730
75	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	22,751	23,250	23,504	23,758	23,964
80	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	23,706	23,769	24,003	24,184
85	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	23,816	24,194	24,360
90	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	24,285	24,475
95	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	24,392

Tabela 1 – Coeficientes de dilatação térmica.

3.2 Resultados do ensaio realizado

O gráfico da figura 2 mostrou-se revelador com respeito ao comportamento do coeficiente de dilatação térmica do condutor. A reta em vermelho representando o coeficiente teórico ($20,9 \mu\text{m}/^\circ\text{C}^{-1}$) e a outra curva em preto representando o comportamento real do coeficiente de dilatação térmica. Nota-se que o coeficiente real no início do ensaio acompanha o teórico, no entanto, com o incremento da temperatura a curva do coeficiente real se afasta do teórico. Essa tendência amplia quando se atinge temperatura elevada como pode ser observado a seguir nos valores retirados da tabela 1:

- Determinação do coeficiente para faixa de temperaturas baixas: de 25 a 45 °C, valor de $21,765 \mu\text{m}/^\circ\text{C}^{-1}$;

- Determinação do coeficiente para faixa de temperaturas médias: de 45 a 75 °C, valor de 23,427 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}^{-1}$;
- Determinação do coeficiente para faixa de temperaturas altas: de 75 a 100 °C, valor de 23,964 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}^{-1}$;

A diferença em relação ao coeficiente teórico de 20,9 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}^{-1}$ encontrado em norma são os seguintes: no primeiro caso, 4,14 %, no segundo 12,09 % e no terceiro 14,66 %. Essas diferenças ocorrem em parte devido ao comportamento do módulo de elasticidade do alumínio, pois quanto maior a temperatura do condutor menor o valor do módulo do alumínio, permitindo um maior alongamento (4).

3.3 Investigação do vão de 400 m LT 138 kV Areia – Segredo

O trabalho intitulado “Investigação dos parâmetros mecânicos de cabos CAA em temperaturas elevadas”, apresentado no XVIII SNPTEE, em 2005, um caso prático da LT 138 kV Areia – Segredo, concluiu através de simulações realizadas no PLSCAD, que não houve variações significativas em flecha de um vão de 400 m até a temperatura de 80 °C, quando da utilização no projeto do coeficiente de dilatação térmica usualmente considerado ($18,9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}^{-1}$) para o cabo adotado naquela linha de transmissão. Acima de 80 °C, porém, houve um acréscimo de 0,29 m na flecha a 100 °C, e de 0,63 m a 120 °C (4).

Os acréscimos de flecha devem-se principalmente às variações nas curvas levantadas no ensaio de Tensão-Deformação medidas em altas temperaturas e que no entender dos autores, também se confirma através desse ensaio de levantamento do coeficiente de dilatação térmica do cabo apresentado.

4.0 - CONCLUSÃO

O método do ensaio de levantamento do coeficiente de dilatação térmica desenvolvido pelo LACTEC já está consolidado juntos aos clientes no mercado brasileiro e de outros países. Este estágio atual foi atingido e estará sempre em melhoramentos, devido ao esforço contínuo da equipe nos últimos nove anos.

A metodologia não somente fornece um coeficiente a uma dada temperatura, mas apresenta diversas combinações em diferentes faixas de temperaturas e visa subsidiar os clientes para sua utilização dependendo do projeto ou da linha a ser analisada.

O espectro de coeficientes calculados mostra o comportamento não linear do coeficiente de dilatação térmica da amostra analisada, portanto, ao invés de utilizar-se de coeficientes de dilatação térmica tabelados ou calculados teoricamente, os mesmos podem ser obtidos com maior precisão em ensaios de laboratório.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Condutor elétrico de alumínio – Retirada e preparo de corpo de prova para ensaio de tipo - NBR 7273. Brasil.
- (2) CAVALCANTI, Evandro Sérgio Camêlo; TORRES, Marcio Sanglard; - Medição do coeficiente de dilatação térmica de condutores de alumínio com alma de aço, II SEMEL, Curitiba 1990.
- (3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cabos de alumínio com alma de aço para linhas aéreas - NBR 7270. Brasil.
- (4) MANNALA, Marcos José; SOUZA JR, Oswaldo Honorato; HOFFMANN, João Nelson; – Investigação dos parâmetros mecânicos de cabos CAA em temperaturas elevadas, XVII SNPTEE, Curitiba-PR, 16 a 21 de Outubro de 2005.