

	<p>XX SNTPEE 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

**NOVA METODOLOGIA PARA ENSAIO DE FLUÊNCIA EM CABOS CONDUTORES
COM TEMPO REDUZIDO E CONFIABILIDADE DE RESULTADOS**

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

**Marcos José Mannala
LACTEC**

RESUMO

Os procedimentos de ensaio de *Fluência (Creep)* não têm acompanhado as mais recentes inovações em aquisição e controle. O LACTEC adota aquisição e controle muito acima do requerido pela norma, com o objetivo de melhorar o grau de confiabilidade do ensaio. Com o constante aprimoramento observou-se ao longo de anos, que nos resultados de ensaios com menor duração, obtém-se coeficientes próximos na reta extrapolada de fluência para ensaios de maior duração. Portanto, verifica-se que ensaios com horas reduzidas tem a mesma confiabilidade do que com horas mais elevadas, reduzindo assim o custo do ensaio. Os ensaios automatizados são acompanhados por gráficos e extrapolação dos índices podendo-se assim avaliar constantemente a qualidade do ensaio em tempo real.

PALAVRAS-CHAVE

Fluência em cabos, metodologia de ensaio, automação de ensaio,

1.0 - INTRODUÇÃO

O projeto da bancada de ensaio em cabos e acessórios teve início na década de 90. A COPEL (Companhia Paranaense de Energia) foi quem patrocinou o projeto. Na área de estudos da COPEL/TRANSMISSÃO tinha-se em mente executar ensaios com carga mantida (*Creep*) em cabos condutores para Linhas de Transmissão. A idéia foi aceita pelo então laboratório do LAC (Laboratório Central de Eletrotécnica e Eletrônica), onde o professor Osvaldo Herek propôs desenvolver tese de doutorado (1) em um equipamento automático de ensaios. O projeto que inicialmente apresentava-se bastante simples passou a partir de então, a contar com um aparato bem mais complexo e projetado pelo referido professor. Além de toda a parte mecânica para o tracionamento do condutor, foi introduzido no projeto um Controlador Lógico Programável (CLP). A bancada não só tracionava condutores, como também tornou possível realizar ensaios com controle de outras variáveis como aquecimento através de resistência e com corrente elétrica.

A partir de 1998 o laboratório de cabos passou a realizar ensaios inicialmente para a COPEL, sendo o ensaio de fluência o primeiro de muitos que viriam a ser desenvolvidos. Com constante aprimoramento e após dezenas de ensaios realizados, observou-se que as normas que tratam do assunto poderiam ser aprimoradas para se obter resultados mais rápidos e precisos. A tecnologia adotada fez com que o ensaio, após a instalação da amostra no equipamento, seja conduzido de forma totalmente automática, sem a interferência contínua do operador.

Neste trabalho é apresentado um ensaio de longa duração em cabo condutor com alma de aço CAA, com ênfase

(*) Centro Politécnico da UFPR – caixa postal 19067 Curitiba, PR – Brasil
Tel: (+55 41) 3361-6253 – Fax: (+55 41) 3361-6259 – Email: oswaldo@lactec.org.br

na duração e procedimentos de realização deste ensaio.

2.0 - REALIZAÇÃO DO ENSAIO FRENTE ÀS DIVERSAS NORMAS

O objetivo do ensaio é de determinar o comportamento do alongamento do cabo condutor a longo termo, aplicando-se uma tração constante durante um período de solicitação determinada em norma. O alongamento, tração e temperatura da amostra são registradas a uma frequência que varia com a duração do ensaio para fins de avaliação na conclusão do ensaio. As normas que nortearam o desenvolvimento desta metodologia de ensaio foram a NBR 7303 (2) e a IEC 61395 (3).

2.1 Preparação da amostra

A preparação do cabo deve contemplar a sua integridade, obedecendo aos procedimentos da NBR 7273 (4). Não deve haver afrouxamento dos fios que compõe amostra assim como avarias como arranhões ou dobramento dos elementos do cabo.

2.2 Instalação da amostra e início do ensaio

Quando instalada no equipamento de ensaio, as primeiras providências devem ser feitas com respeito ao equilíbrio térmico da amostra com a temperatura do laboratório. A temperatura da amostra deve estar estabilizada para evitar o incremento desnecessário de alongamento inserido pelo efeito da dilatação. A temperatura recomendada pela norma é de 20 a 30°C, com variação de +/-2°C em torno da temperatura de ensaio.

A carga inicial de tração é de até 4% da carga de ruptura, que depois de atingida, deve-se instalar os transdutores de deslocamentos LVDT para medição do alongamento em fluência. Os preparativos para o ensaio devem durar o mínimo possível após o cabo ser pré-carregado para que não se comprometa o ensaio. Apesar da tração ser reduzida o cabo pode fluir, ainda que pouco, a partir da pré-carga inicial.

O carregamento não poderá exceder o valor de tração requerida, ocasionada por sobrepassagens e erro de sintonia de controladores, por exemplo. Não podem ocorrer interrupções no meio do carregamento, ou parada em valores intermediários. Os valores de carregamento variam de 15 a 30% do valor de RMC, conforme NBR 7303 (2), porém, utilizam-se valores de carregamento da amostra conforme requerido pelo projeto.

2.3 Execução do ensaio

Com o cabo carregado na pré-carga, a medição do comprimento inicial do condutor deve ser realizada e informada ao programa. O cabo então é tracionado da pré-carga até a tração de ensaio, sendo que ao final do carregamento mede-se o alongamento ou deformação devido à variação de carga. Este alongamento é somado ao comprimento obtido na medição da pré-carga. Após o carregamento da amostra na tração de ensaio, estabelece-se a cota zero do ensaio, o que a partir desta seguirão as medições de alongamento que se constituem em acomodação geométrica, variação devido ao controle de temperatura ambiente e na fluência do condutor. O gráfico de fluência (1) é constituído de duas curvas e de uma reta de interpolação, sendo que uma representa a fluência real e outra a fluência corrigida devido às variações de temperatura. A reta é a interpolação da curva corrigida com extrapolação prevista e comentada adiante.

As deformações obtidas na primeira hora servirão para definir o ponto inicial da curva de fluência. A partir da primeira hora de ensaio serão realizadas as medições do alongamento que compõem em definitivo as curvas reais e corrigidas da fluência do condutor.

A duração mínima e máxima do ensaio é de respectivamente 100 a 1000 horas segundo a NBR 7303(2) e de 1000 h segundo a IEC 61395(3), bem como pela "Aluminium Association". Conforme a norma e o tipo de condutor, como por exemplo, os cabos de liga de alumínio, o ensaio poderá se estender até 2.000 horas. As quantidades mínimas de medidas do alongamento são as seguintes: pela norma brasileira a primeira hora de ensaio as leituras são feitas de 10 em 10 minutos. Depois da primeira hora de ensaio as leituras são realizadas de hora em hora e depois da décima hora são realizadas de 10 em 10 horas. Completadas 100 horas, as leituras passarão de 100 em 100 horas até findar às 1000 horas. A precisão mínima exigida das medições de alongamento é de 0,001 %.

Pela norma IEC 61395(3), a aquisição segue a fórmula a seguir:

$$t = 10^n \quad (1)$$

sendo:

t- tempo em horas;

n- é uma seqüência de números com incrementos constantes $n_{m+1} = n_m + \Delta$.

Através da equação (1) se obtém uma distribuição uniforme de dados no gráfico log-log da fluência, o que não ocorre na NBR 7303.

2.4 Apresentação dos resultados

A apresentação dos resultados inclui um gráfico onde é mostrado o alongamento (fluência) *versus* tempo. Este gráfico deverá ser apresentado com os eixos das abscissas (tempo) e as ordenadas (deformação) na forma logarítmica. Neste gráfico deve conter extrapolação até 100.000 horas (11 anos e 7 meses aproximadamente) baseada na equação:

$$y = mx + b \quad (2)$$

Passando-se a ordenada e abscissa para log tem-se:

$$\log(y) = m \log(x) + b \quad (3)$$

$$y = 10^{(m \log(x) + b)} \quad (4)$$

onde:

m – coeficiente angular da reta;

b – ponto de intersecção com as ordenadas;

x – tempo em horas; e

y – alongamento do condutor (μm).

3.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os dados levantados neste ensaio são úteis para a execução de projetos de linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, assim como para verificação dos cálculos de catenárias e determinação das manutenções periódicas destas linhas, como a periodicidade do retensionamento dos condutores.

3.1 Metodologia da realização do ensaio

No capítulo anterior verificou-se que, as normas praticamente orientam a realização do ensaio de forma manual o que requer o acompanhamento do ensaio por uma equipe do começo ao fim. O ensaio automatizado, realizado no LACTEC, na sua etapa inicial exige também o acompanhamento e execução de tarefas de poucos técnicos, porém, no decorrer do tempo que se segue o mesmo é totalmente controlado pelo aparato e software desenvolvidos no laboratório e que requerem somente observações eventuais na tela do computador visando avaliar seu transcorrer.

3.2 Descrição Técnica da Bancada

A bancada de ensaio em cabos condutores 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 lã 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(um) m de comprimento.



Foto 1 - Foto da bancada de ensaios.

Um computador (do tipo *desktop*) efetua o controle de todas as partes por meio de algoritmos de controle digital. Um condicionador de sinais que é destinado à aquisição e envio de sinais de 16 bits com 15 canais, com placas de recepção de sinais dos 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.

3.3 Metodologia de realização de ensaio de fluência adotada no LACTEC

3.3.1 Pré-montagem do ensaio: Esta etapa do ensaio é manual, realizada por dois homens. A amostra de cabo tem as terminações preparadas em um ambiente separado, obedecendo à norma NBR 7273 (2). 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 é pré-tensionado com 4 % da tração de ruptura da amostra e então são instalados os acessórios como transdutores de deslocamento e termopares. O tempo da instalação dos acessórios deve ser menor que 5 minutos para evitar um alongamento inicial. No caso do ensaio ser a temperatura acima da ambiente, o sistema controla a temperatura até a sua estabilização com a amostra solta, sem tração;

3.3.2 Parte automática do ensaio: Após a instalação dos acessórios, o programa grava a temperatura do condutor ensaiado e o adota como padrão, desde que a temperatura se encontre entre 20 a 30 °C. No LACTEC também são realizados ensaios de fluência a temperaturas elevadas de projeto do condutor. O condutor então é tracionado suavemente e sem trancos até a carga de ensaio, com taxa de carregamento programado, conforme a norma adotada, sem que haja sobrepassagem. No instante que a carga é atingida, é reiniciada a medição dos transdutores, passando a medir a partir deste ponto em (μm). Após os primeiros 6 minutos passa-se a adquirir os dados de tração, alongamento e temperatura, até o fim do ensaio. A taxa de aquisição é de 500 amostras por década para cada grandeza medida.

3.3.3 Análise gráfica on-line do ensaio: O programa permite acompanhamento gráfico em tempo real após 1 hora de ensaio, fornecendo a princípio quatro gráficos para acompanhamento, dentre eles o de fluência dado pelo alongamento (μm) x tempo(h) real e corrigido (Figura 1), apresentando os dados da reta extrapolada para 100.000 horas disponível a cada aquisição de dados, além do controle de tração, controle de temperatura, e um quarto após 10 horas de ensaio, um quarto gráfico se torna disponível apresentando de hora em hora a tendência do alongamento extrapolado para 100.000 horas (Figura 2). Este gráfico é um dos mais importantes na avaliação proposta, visando a redução do tempo do ensaio com confiabilidade, o que está descrito com mais detalhes no capítulo 4.

3.3.4 Acompanhamento do ensaio via WEB: Todo o controle e gráficos podem ser acompanhados a distância. O ensaio pode ser operado remotamente, através de um *laptop* do aeroporto, por exemplo, ou de onde existir acesso via internet. Os interessados pelo ensaio não precisam se deslocar até o laboratório a fim de acompanhar

o andamento do ensaio ou a permanência pode ser abreviada após o início e acompanhada a distância. Para evitar perigos de invasores ou *hackers*, o sistema é protegido por uma senha renovável para cada ensaio.

4.0 - ESTUDO DE CASOS - ANÁLISE DE FLUÊNCIAS DE LONGA DURAÇÃO COM APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Na seqüência será apresentado um estudo de caso, fruto dos anos de experiência no ensaio de fluência do LACTEC em dezenas de configurações. O estudo trata-se de um ensaio de fluência com duração de 1.000 horas, onde os coeficientes "b" e "m" da fórmula (4) são analisados a partir da décima hora de ensaio (Figura 2) e assim de hora em hora até a milésima. O objetivo é analisar a tendência do alongamento para 100.000 horas, auxiliando na decisão da continuidade ou não do ensaio de longa duração. Na medida em que a tendência se estabiliza, significa que os resultados estão convergindo para o valor final da fluência extrapolada para 100.000 horas.

4.1 Descrição do ensaio realizado com duração de 1000 horas em cabo CAA

Neste estudo de caso, é analisado o ensaio de fluência realizado para um fabricante nacional em cabo ACSR Rail – 954 MCM, 45 fios alumínio e 7 fios de aço. O ensaio foi realizado no período de 01/12/2005 a 12/01/2006, com duração de 1.000 horas. O objetivo foi o de analisar períodos de tempo menores, ao invés de 1.000 horas, sem perda da qualidade do ensaio, poupando tempo e recursos para o fabricante e cliente.

Entre as ferramentas disponíveis do software de fluência, pode-se selecionar o filtro de temperatura. Este recurso permite que apenas determinada faixa de dados seja contemplada na análise, dentro de uma temperatura mínima e máxima selecionada.

Como o efeito da dilatação térmica influencia muito no valor do alongamento, pode-se optar por uma faixa de dados com temperaturas bem próximas da prevista para o ensaio, na casa de +/- 0,1 °C, por exemplo. Isto é possível devido à aquisição elevada de pontos (em torno de 500 dados por década).

Quando o ensaio de fluência é realizado a temperatura ambiente, o sistema de ar condicionado controla diretamente a temperatura no condutor ensaiado. Isto é possível devido a instalação de sete termopares, presos na primeira coroa da amostra do condutor ensaiado.

4.2 Ensaio de fluência em cabo CAA Rail – 954 MCM

A tração do ensaio de fluência no cabo 954 MCM – Rail, foi de 20 % do valor de tração de ruptura do condutor, 22,508 kN. Durante o período de ensaio a tração não poderia variar dentro da faixa de +/- 2%. O coeficiente de correção do alongamento devido ao efeito da dilatação térmica adotado foi de 20,7 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$, conforme NBR 7270(5).

A temperatura do ensaio variou entre 23,39 e 23,61 °C, uma variação de +/- 0,11 °C, muito menor que a exigida por norma, +/- 2 °C. Com o recurso de filtro de temperatura, a faixa de aquisição de todos os dados (tempo, tração, temperatura e alongamento), foi adotada de 23,45 a 23,55 °C, isto é, uma variação na temperatura de apenas +/- 0,05 °C, com média dos pontos de temperatura em 23,501 °C.

Dos 1.622 pontos de adquirido durante o ensaio, com a adoção do filtro de temperatura, restaram 820, 50,55% dos pontos totais adquiridos. Esse valor é muito superior aos 30 pontos pedidos pela norma NBR 7303(2), mais precisamente 27,33 vezes a mais, isto após a adoção do filtro de dados. O resultado pode ser visto na figura 1 a seguir:

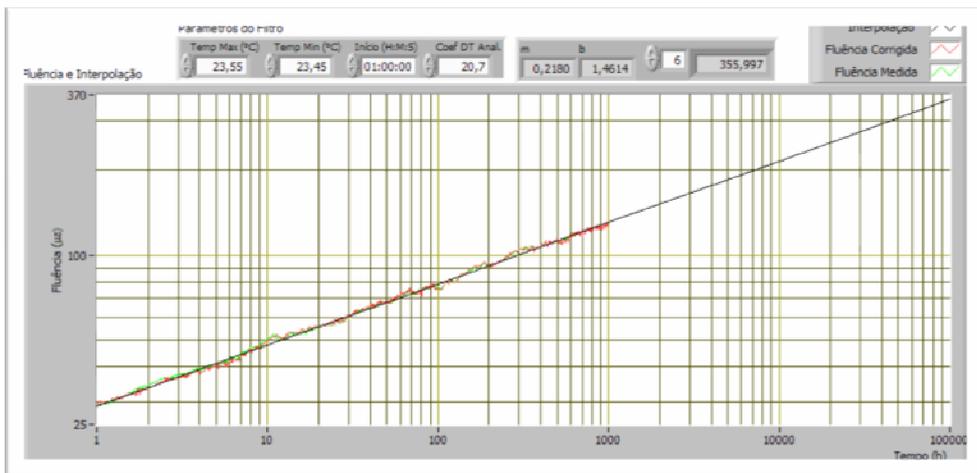


Figura 1 – Gráfico da fluência do CAA cabo 954 MCM – Rail após 1.000 h com extrapolação para 100.000 horas.

Os resultados do ensaio tiveram os valores para os coeficientes m e b de 0,2180 e 1,4614 que quando inseridos na equação (3) chega-se ao valor de 356 $\mu\text{m}/\text{m}$ ou uma fluência de 0,356 mm/km de vão no período de 100.000 horas.

4.3 Análise off line da tendência para 100.000 h

Durante o ensaio de fluência, foram analisados os dados gravados durante as 1.000 horas. Para isso foi desenvolvida uma rotina no ensaio de fluência que faz uma análise do arquivo de dados, fazendo o cálculo do alongamento da deformação e seu registro de hora em hora a partir de 10 até 1.000 horas. Obtém-se um gráfico com 990 pontos (Figura 2). Para isso são observados os coeficientes da equação (4) e a tendência da curva extrapolada para 100.000 horas. O ponto inicial de 10 horas foi escolhido, pois a partir deste ponto se inicia a segunda década do gráfico log-log das cinco que compõe o gráfico de fluência.

Na seqüência é apresentada a curva dessa tendência de hora em hora para o alongamento de 100.000 h.

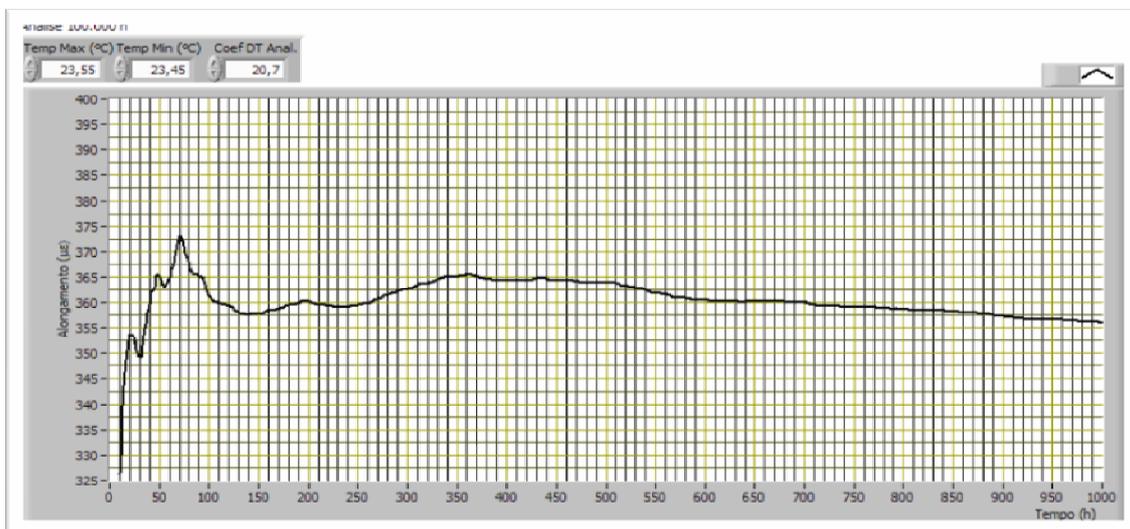


Figura 2 – Gráfico da tendência do alongamento para 100.000 horas no decorrer do ensaio de fluência.

Com o emprego do programa de tendência do alongamento para 100.000 horas rodando em tempo real, é possível antecipar a interrupção do teste muito antes das 1.000 horas como se pode observar a seguir:

- ao final do ensaio de 1.000 horas obtivemos um alongamento de 356 mm/km , sendo que de 10 até 1000 horas o gráfico registra variações de 327 a 373 mm/km ;
- se o ensaio fosse interrompido na hora 85, o valor extrapolado para 100.000 horas é de 365,5 mm/km e deste ponto em diante a oscilação foi de apenas ± 5 mm/km , isto é, 1,4 % da variação do resultado final

de 1.000 horas;

- o ensaio poderia ser interrompido com apenas um décimo do tempo total, sem que se perdesse qualidade nos resultados. Para 100 horas de ensaio, temos um valor extrapolado para 100.000 horas de 360,9 mm/km. A diferença é menor que 5 mm/km de fluência em relação ao ensaio de 1.000 horas.

4.4 Futuros trabalhos

A potencialidade das bancadas do laboratório do LACTEC/LECA permite uma extensa variação de ensaios de fluência em cabos. Uma delas é a aplicação de corrente no condutor para conduzir a uma real situação que será empregada na linha de distribuição ou transmissão.

Outra opção seria utilizar o aquecimento do condutor por resistência, que desde a construção desta bancada já estão disponíveis. Aliás, este foi o primeiro trabalho realizado nesta bancada em 1996, porém, não com os recursos eletrônicos atualmente disponíveis.

Com a adoção de cabos de diferentes ligas de alumínio e materiais, como a fibra de carbono no lugar do aço, por exemplo, podem-se repetir tais procedimentos e verificar a sua extensão de aplicação.

5.0 - CONCLUSÃO

Com a metodologia adotada pelo LACTEC, onde se supera os padrões adotados por normas brasileiras e internacionais, os ensaios de fluência ou *creep* apresentam notável melhora na qualidade de resultados e em menor tempo de ensaio.

Com o caso de estudo apresentado, é possível vislumbrar um tempo bem menor na fase de ensaios da parte mecânica do condutor tendo em vista que o ensaio de fluência é relativamente longo. Isto também passa por uma questão cultural e de quebra de paradigmas, no sentido de adequar e melhorar cada vez mais a qualidade e a redução de custos para os ensaios previstos por normas. Neste sentido, também o acompanhamento de ensaios via WEB, disponibilizado para os clientes, pode contribuir na redução desses custos.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Herek, O., "Bancada de ensaios mecânicos de cabos condutores a altas temperaturas", tese de doutorado, UFSC, 1997;
- (2) NBR 7303 – Condutores Elétricos de Alumínio. Fluência em condutores de alumínio;
- (3) IEC 61395 - Overhead electrical conductors - Creep test procedures for stranded conductors;
- (4) NBR 7273 – Condutor Elétrico de Alumínio – retirada e preparo de corpo de provas para ensaio de tipo;
- (5) NBR 7270 – Cabos de Alumínio com alma de aço para linhas aéreas.
- (6) Souza Jr., O.H., " Ensaios Mecânicos de fluência em cabos condutores de linhas de transmissão – Modelos de predição e resultados experimentais", trabalho de disciplina, Unicamp, 1998;
- (7) Aluminum Association, "A Method of Stress-Strain Testing of Aluminum Conductor and ACSR and A Test Method for Determining the Long Time Creep of Aluminum Conductor in Overhead Lines", Prepared by the Technical Committee on Electrical Conductor, 1971;
- (8) Almeida, M.T., "Cálculo Prático dos alongamentos permanentes em cabos de Linhas de Transmissão.", Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico, Vol, 13 no. 3, pp. 20-28, 1987;
- (9) Cemig, "Comparação de Métodos de Estimativa de Efeito da Fluência em Cabos CAA", 1988;
- (10) Harvey, J.R., "Effect of Elevated Temperature Operation on the Strength of Aluminum Conductors", IEEE, pp. 1769-1772, 1972;
- (11) Morgan, V.T., "Effect of Elevated Temperature Operation on the Tensile Strength of Overhead Conductors", IEEE, Vol. 11, no. 1, 1996;