

**BANCADA DE ENSAIOS MECÂNICOS DE CABOS**

**CONDUTORES A ALTAS TEMPERATURAS**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA

BANCADA DE ENSAIOS MECÂNICOS DE CABOS  
CONDUTORES A ALTAS TEMPERATURAS

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA  
CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

OSVALDO HEREK

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 1997

## BIOGRAFIA DO AUTOR

Osvaldo Herek nasceu em Londrina no estado do Paraná em 15 de Fevereiro de 1940. Formou-se em Engenharia Mecânica em 19 de Dezembro de 1965 pela Universidade Federal do Paraná. Trabalhou como engenheiro mecânico na REFRIPAR S/A por três anos, Na COPEL - Companhia Paranaense de Energia por 26 anos, onde participou da construção das usinas hidrelétricas: Governador Parigot de Souza, Governador Bento Munhoz da Rocha Neto, Salto Osório e Segredo. Trabalhou ainda, a partir de 1990, como pesquisador no LAC - Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento. Foi também professor de Servomecanismos do Curso de Engenheiros mecânicos da Universidade Federal do Paraná desde março de 1966. Defendeu a dissertação de Mestrado em 16 de Setembro de 1994 e a presente tese de Doutorado em 15 de Dezembro de 1997. Osvaldo Herek é casado com Dórian Herek, possui três filhos e reside em Curitiba, capital do estado do Paraná, na rua João Evangelista Espíndola, 810 (Jardim Social), CEP: 62530 060, fone/fax: (041) 2627382, Email: oherek@virtualnet.net.

BANCADA DE ENSAIOS MECÂNICOS DE CABOS CONDUTORES A  
ALTAS TEMPERATURAS

Oswaldo Herek

ESTA TESE FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

DOUTOR EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL  
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



CARLOS ALBERTO MARTIN  
ORIENTADOR



ABELARDO ALVES DE QUEIROZ  
COORDENADOR DO CPGEM



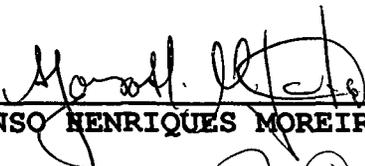
NELSON BACK  
PRESIDENTE



ARMANDO ALBERTAZZI GONÇALVES



RENÉ ROBERT



AFONSO HENRIQUES MOREIRA SANTOS



NILSON BARBIERI

## BANCA EXAMINADORA

A tese foi defendida em 15 de Dezembro de 1997, em Florianópolis, na Universidade Federal de Santa Catarina, nas instalações da Fundação CERTI.

A banca examinadora da defesa de tese foi constituída pelos seguintes professores:

CARLOS ALBERTO MARTIN, Dr. Ing., Orientador

NILSON BARBIERI, Dr. Prof.

ARMANDO ALBERTAZZI GONÇALVES, Dr.Prof.

NELSON BACK, Ph.D.

RENÊ ROBERT, Dr.Prof.

AFFONSO HENRIQUES MOREIRA SANTOS, Dr. Prof.

Na foto abaixo vemos os professores citados, a partir da esquerda superior, na ordem de citação. A Segunda pessoa que aparece nessa ordem é o doutorando.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha esposa Dórian a compreensão e o carinho com que me distinguiu e que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Deixo também aqui registrados os agradecimentos ao meu orientador Professor Doutor Carlos Alberto Martin, pelas suas valiosas contribuições ao conteúdo deste trabalho, que permitiram enriquecê-lo de forma acentuada.

Estendo meus agradecimentos ao LAC - Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento, patrocinador que viabilizou financeiramente o desenvolvimento da Bancada e que, através de seus competentes técnicos, deu apoio inestimável e decisivo para a realização do empreendimento. Em especial cito os engenheiros Dr. Barbieri, Piazza, e os técnicos Mannala, Rony e Atalício que participaram mais diretamente do empreendimento.

Meus agradecimentos também à CAPES - Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão de uma bolsa, sem a qual teria sido muito difícil realizar o trabalho ora apresentado.

Agradeço também à Universidade Federal do Paraná pela concessão de afastamento para a obtenção dos créditos junto à UFSC. Agradeço ainda a todos que, de forma direta ou indireta, colaboraram para a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho de Tese descreve o desenvolvimento de uma Bancada de ensaios mecânicos automatizados de cabos condutores de alta tensão a altas temperaturas, a qual foi instalada no Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento, no Centro Politécnico da UFPR em Curitiba. O "software" correspondente à automatização da mesma também está sendo apresentado.

É apresentada na seqüência, tendo em vista que até o momento os ensaios de fluência a altas temperaturas não foram ainda normalizados, uma metodologia de ensaio de fluência a altas temperaturas que busca relacionar adequadamente os resultados dos ensaios com a otimização do projeto de linhas de transmissão. Está sendo igualmente incluído no trabalho um "software" simplificado, desenvolvido para o projeto de um lance de cabo, incluindo um exemplo de aplicação, com o objetivo de melhor justificar a metodologia desenvolvida.

Estão também descritos os trabalhos de calibração e compensação dos erros sistemáticos dos instrumentos.

## **ABSTRACT**

The present Thesis work describes the development of a test apparatus for mechanical automated tests at high temperatures of overhead line conductors, which was erected in the "Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento", in the Politechnical Center of the UFPR, in the city of Curitiba. The software related to the automation of the apparatus is also presented.

It is presented in the following sections, considering that the creep test at high temperatures were not normalized yet, a method of test for long time tensile creep that try to find the relationship between the tests and the design of overhead transmission lines conductors. It is also included a simplified software for one suspended cable span with example in order to better justify the developed method.

It has been described the instrument calibration and instrument systematic errors compensation works.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	TENSÃO MECÂNICA	1
1.2	FLECHAS	2
1.3	FLUÊNCIA	2
1.4	VIBRAÇÕES MECÂNICAS	4
1.5	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	4
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>HISTÓRICO</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>A BANCADA DE ENSAIOS</b>	<b>26</b>
5.1	ESPECIFICAÇÕES DA BANCADA DE ENSAIOS	26
5.2	DISPOSIÇÃO FÍSICA DA BANCADA	30
5.2.1	Esquema Físico	30
5.2.2	Fotos da Bancada	31
5.3	CONCEPÇÃO E EXECUÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS	35
5.3.1	Mecanismo Esticador	35
5.3.2	Sistema de Contrapesos	36
5.3.3	Sistema de Aquecimento	37
5.3.4	Suporte da Célula de Carga	38
5.3.5	Medição do Deslocamento	39
5.3.6	Automatização da Bancada	40
5.3.7	Fonte de Energia de Emergência (“No Break”)	43
5.4	PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA [26]	44
5.5	MODOS DE OPERAÇÃO	44
5.5.1	Ensaio de Fluência	46
5.6	CALIBRAÇÃO DA BANCADA	50
5.6.1	Calibração dos transdutores indutivos de deslocamento	51
5.6.2	Calibração dos Termopares	54
5.6.3	Calibração da Célula de Carga	58
5.6.4	Relação de Transmissão entre o contrapeso e o cabo em teste	59
5.7	CONTROLES	60
5.7.1	Sistema de controle da força no cabo	61
5.7.2	Controle da Temperatura	63

<b>6</b>	<b>RELAÇÃO ENTRE O PROJETO E OS ENSAIOS DE FLUÊNCIA</b>	<b>66</b>
<b>6.1</b>	<b>PROJETO DA LINHA DE TRANSMISSÃO</b>	<b>66</b>
6.1.1	Determinação do Comprimento dos Cabos Entre Torres	67
6.1.2	Determinação da força horizontal necessária para instalação do cabo.	75
6.1.3	Determinação da flecha máxima que poderá ocorrer	76
6.1.4	Exemplo de Cálculo	78
6.1.5	Comentários	79
<b>6.2</b>	<b>RESULTADOS DOS ENSAIOS</b>	<b>81</b>
6.2.1	Incidentes ocorridos ao longo do ensaio:	81
6.2.2	Avaliação dos resultados obtidos	83
<b>6.3</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RECURSOS DA BANCADA DE ENSAIO</b>	<b>99</b>
<b>6.4</b>	<b>CONCLUSÕES DESTE CAPÍTULO</b>	<b>101</b>
<b>7</b>	<b>METODOLOGIA PARA ENSAIOS DE FLUÊNCIA A ALTAS TEMPERATURAS</b>	<b>104</b>
<b>7.1</b>	<b>ESCOPO</b>	<b>104</b>
<b>7.2</b>	<b>PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO</b>	<b>105</b>
<b>7.3</b>	<b>BANCADA DE ENSAIOS</b>	<b>105</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>113</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>118</b>
<b>10</b>	<b>APÊNDICE 1 - PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA O SISTEMA GERENCIADOR</b>	<b>133</b>
<b>11</b>	<b>APÊNDICE 2 - PROGRAMA COMPUTACIONAL SIMPLIFICADO PARA O PROJETO DE UM VÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO</b>	<b>150</b>
<b>12</b>	<b>APÊNDICE 3 - PROCEDIMENTOS DE ENSAIO</b>	<b>159</b>
12.1	Ensaio de Dilatação Térmica	159
12.2	Ensaio de Tensão-deformação [18][25][116]	161
12.3	Ensaio de Amortecimento [56,60]	165

## SIMBOLOGIA

A	Vão entre duas torres [m]
$a_1$	amplitude de vibração nos nós da onda estacionária
$\alpha$	Coeficiente de dilatação térmica linear do material do cabo considerado
$\alpha_a$	Coeficiente de dilatação térmica linear do alumínio
$\alpha_s$	Coeficiente de dilatação térmica linear do aço
B	Desnível entre os pontos de suspensão [m]
$\beta$	Constante aerodinâmica típica do cabo
C	Parâmetro função do tipo do cabo condutor e da tensão de teste ou Constante da catenária (Real)
$C_0$	Constante da catenária (ideal)
$C_f$	Constante da catenária à temperatura máxima com a fluência e a força do vento
D	Diâmetro do cabo condutor [m]
$d_a$	Diâmetro dos fios de alumínio
$d_s$	Diâmetro dos fios de aço
E	Módulo de elasticidade equivalente [N/mm <sup>2</sup> ]
$E_a$	Módulo de elasticidade do alumínio [N/mm <sup>2</sup> ]
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_r$	Força de ruptura do cabo [N]
F	Força realmente aplicada às extremidades do cabo [N]

$F_m$	Força média no cabo [N]
$f$	Frequência [Hz]
$H$	Força horizontal aplicada ao cabo, no ponto de suspensão.
$H_f$	A força horizontal no cabo à temperatura máxima, já incorporando o efeito da fluência, e com vento máximo
$k$	Coefficiente de segurança
$k_{flu}$	Coefficiente de fluência
$L_0$	Comprimento do cabo, suposto ideal
$m$	Massa do cabo condutor por unidade de comprimento [kg/m].
$m, n$	Expoentes experimentais
$n_a$	Número de fios de alumínio
$n_s$	Número de fios de aço
$p$	Peso total por unidade de comprimento do cabo a 293 K [N/m]
$p_a$	Peso por unidade de comprimento do alumínio, a 293 K [N/m]
$p_s$	Peso por unidade de comprimento do aço, a 293 K [N/m]
$p_{ea}$	Peso específico do alumínio [N/dm <sup>3</sup> ]
$p_{es}$	Peso específico do aço [N/dm <sup>3</sup> ]
$p_{a0}$	Peso por unidade de comprimento do alumínio à temperatura mínima [N/m]
$p_{s0}$	Peso por unidade de comprimento do aço à temperatura mínima [N/m]
$p_0$	Peso por unidade de comprimento do cabo completo à temperatura mínima [N/m]

$P_v$	Força do vento por unidade de comprimento do cabo [N/m]
$P_{v0}$	Peso virtual que corresponde à força total devida ao peso e ao vento [N/m]
$P_{tfv}$	Peso virtual devido ao vento
RMC	Resistência mecânica calculada
S	Número de Strouhal
$S_{ca}$	Área da seção transversal em alumínio [mm <sup>2</sup> ]
$S_{cs}$	Área da seção transversal em aço [mm <sup>2</sup> ]
$S_c$	Área da seção transversal total [mm <sup>2</sup> ]
St e St <sub>0</sub>	Respectivamente, os comprimentos do cabo tracionado e não tracionado ou Comprimento do cabo, equivalente em repouso, à temperatura mínima e à temperatura de 293K
St <sub>tinset</sub>	Comprimento do cabo já determinado na temperatura em que ocorrerá a instalação
St <sub>f</sub>	Comprimento do cabo à temperatura máxima
T	Tensão no cabo condutor [N/m <sup>2</sup> ] ou transmissão teórica total
T0	Redução do redutor principal
T1	Transmissão entre o tambor e a polia de saída do redutor
T2	Transmissão do cabo 3/16" para o contrapeso
T3	Transmissão da alavanca
t <sub>i</sub>	Temperatura mínima [K]
t <sub>inset</sub>	Temperatura de instalação do cabo [K]
t <sub>m</sub>	Temperatura máxima [K]
t <sub>f</sub>	Temperatura do cabo em repouso [K]

$v$	Velocidade do vento [m/s] ou velocidade no ventre para uma amplitude simples [m/s]
$x$	Abcissa da catenária
$x_2$	Abcissa correspondente a um desnível $B/2$
$x_1$	Abcissa correspondente a um desnível $-B/2$
$Y_0$	Amplitude nos ventres [m]
$Y$	Amplitude no ventre da onda estacionária [m]
$Y_f$	A curva descrita pela catenária correspondente
$Y_{fm}$	A flecha máxima

## 1 INTRODUÇÃO

De uma forma bem resumida pode-se dizer que uma linha de transmissão de alta tensão é constituída de torres, ao longo do caminho por onde se deseja transportar energia elétrica, espaçadas entre si de uma distância compatível de forma a sustentar, através das cadeias de isoladores, os cabos condutores de alumínio com ou sem alma de aço.

### **1.1 TENSÃO MECÂNICA**

Para um cabo esticado entre dois pontos ocorrerá sempre uma flecha devida ao peso, a qual, fixando-se os demais parâmetros, será tanto menor quanto maior for a tensão mecânica no mesmo.

A tensão mecânica no cabo deve, naturalmente, respeitar os limites de tensão admissíveis, tendo-se em conta que se trata de linhas de transmissão de alta tensão e que, portanto, merecem especial cuidado, principalmente no que se refere à segurança das pessoas nas regiões abrangidas por essas linhas.

Quanto menor for a tensão mecânica nos cabos, maiores serão as flechas e, portanto, mais altas deverão ser as torres, com estruturas mais complexas, com maior risco de serem atingidas por raios e, conseqüentemente, com custo mais alto.

Por outro lado, quanto maior for a tensão mecânica no cabo maiores serão as solicitações nas estruturas das torres e nos

isoladores, bem como maiores serão os danos causados por vibrações mecânicas.

## **1.2 FLECHAS**

As flechas também crescem com a distância entre torres. Por razões de segurança é normalmente especificada a altura mínima que os cabos devem manter em relação ao solo; a partir desse limite devem ser estabelecidas as demais medidas para cada vão entre duas torres.

Trata-se portanto, de um problema de otimização entre características técnicas, econômicas e de segurança.

O projeto da linha de transmissão deverá tanto considerar cada vão independentemente bem como também as suas influências recíprocas. Uma das condições essenciais para um bom projeto é prever a flecha máxima que ocorrerá durante a vida da linha. Quanto mais segura for essa previsão tanto menores serão os custos de construção e de manutenção correspondentes.

## **1.3 FLUÊNCIA**

Sabe-se que os cabos ao serem solicitados apresentam deformações que serão tanto maiores quanto maiores forem as tensões mecânicas de solicitação, deformações essas que deverão, naturalmente, ser consideradas no correspondente projeto.

Da mesma forma deverão ser tratadas as deformações que possam ocorrer devidas à dilatação do material dos cabos com o aumento da temperatura.

O problema crucial, no entanto, se refere às deformações de caráter permanente, ocorridas no cabo, ao longo da vida da linha de transmissão, em função de tensões mecânicas abaixo da tensão limite de escoamento do material e em especial da temperatura, em consequência do fenômeno denominado de fluência. Harvey [08] mostra que um cabo de alumínio (SAC - Stranded Aluminum Conductor) teria em 30 horas de ensaio, com 398 K de temperatura e tracionado com 15% de sua resistência mecânica máxima, a mesma fluência que o mesmo condutor em 10 anos de uso, na temperatura ambiente (293 K) e com tensão de 20% de sua resistência mecânica máxima. Esse mesmo condutor, na primeira condição, apresentaria em 100000 horas de uso, uma fluência da ordem de 10 mm/m que corresponderia a um aumento na flecha, para uma vão de 400 metros, de aproximadamente 12 m. Chama-se a atenção para o fato de que o nome fluência neste contexto tem um significado diferente daquele tradicional em metalurgia, pois nas deformações permanentes de cabos estão incluídas, além das deformações devidas à fluência propriamente dita, as deformações devidas à acomodação geométrica dos fios que formam o cabo, e a outros efeitos menos significativos tais como o comportamento das cadeias de isoladores e dos grampos de fixação dos cabos, que também sofrem acomodação. É importante considerar ainda que normalmente o cabo poderá ser constituído

por tentos de materiais diferentes (aço e alumínio, por exemplo).

#### **1.4 VIBRAÇÕES MECÂNICAS**

No projeto deverão ainda ser considerados os efeitos conseqüentes da ação dos ventos em forma de vibrações mecânicas e que podem causar rompimento dos cabos por fadiga ou no caso de frequências baixas de vibração e grandes amplitudes, até curto circuitos entre fases.

#### **1.5 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO**

Ao longo do texto, serão apresentados, inicialmente, o objetivo do trabalho (capítulo 2), uma justificativa da importância do tema (capítulo 3), e a seguir um histórico (capítulo 4), procurando mostrar os principais acontecimentos técnicos ocorridos na área.

No capítulo 5 será apresentada uma descrição funcional, conceitual do protótipo construído. Nessa descrição serão abordados detalhes da concepção e da execução do projeto da Bancada para cada um dos principais mecanismos utilizados, os modos de operação para cada tipo de ensaio previsto, a calibração dos sistemas de medição utilizados, os controles previstos de força e temperatura e o programa computacional de automação da Bancada.

No capítulo 6 será apresentada a relação entre o projeto da linha de transmissão e os ensaios de fluência. São abordados aspectos relativos ao projeto de uma linha de transmissão, ao programa computacional elaborado para o cálculo dos valores necessários para o projeto com exemplo de aplicação, aos recursos da Bancada, e aos testes realizados com a mesma.

No capítulo 7 é apresentada a metodologia proposta para ensaios de fluência a altas temperaturas.

No capítulo 8 são apresentadas as conclusões e recomendações ao presente trabalho e finalmente no capítulo 9 é relacionada a bibliografia pertinente.

A Bancada foi construída no Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento - LAC, dentro do Campus Universitário do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná em Curitiba no Estado do Paraná.

Os custos referentes à Bancada foram financiados pela COPEL - Companhia Paranaense de Energia através do Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento - LAC.

O autor do presente trabalho foi contemplado com uma bolsa PICDT da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

## 2 OBJETIVO

Os objetivos do trabalho realizado foram o de desenvolver uma metodologia para ensaios de fluência ("creep") em cabos condutores de alta tensão, em altas temperaturas (até 473 K) e o de construir uma Bancada que permita realizar ensaios de fluência, dilatação térmica, tensão-deformação e amortecimento, nesses cabos condutores de alta tensão (incluindo-se acessórios, especialmente a altas temperaturas, de forma a se obter as informações necessárias para o controle de qualidade de cabos e acessórios para linhas de transmissão e para otimização do projeto e ou reprojeto dessas linhas, em especial, as que possam operar a altas temperaturas e, conseqüentemente, que possam transportar maiores quantidades de energia.

### 3 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de um país exige a disponibilidade de energia em quantidade suficiente para permitir o crescimento de sua indústria e atender o número sempre crescente de seus consumidores. A energia elétrica, por sua vez, freqüentemente não pode ser produzida em local próximo às regiões de consumo, e independentemente de sua origem, hidráulica ou térmica, necessita ser transportada.

Quando se consideram a extensão do território brasileiro e os abundantes recursos de energia hidráulica distantes dos centros de consumo, torna-se clara a importância para o país, das linhas de transmissão, ficando também evidente a necessidade de investimentos nacionais em P&D, face à pouca oferta de tecnologia externa nesta área, já que o problema é muito específico de países, tais como Canada, USA, URSS, China, que apresentam as citadas características.

Nos projetos de linhas de transmissão, um dos fatores limitantes é a distância mínima entre os condutores e o solo. Uma vez definido este fator, são estudados os demais fatores de forma a se conseguir uma boa equação econômica.

O vão entre as torres, suas alturas e respectivas flechas devem ser determinados visando atender os requisitos técnicos próprios da linha em projeto, considerando as características

dos materiais disponíveis no mercado e principalmente otimizando o custo global.

É portanto imprescindível considerar, além da problemática de manutenção e a da vida útil da linha de transmissão, as alterações de suas características e dos critérios que nortearam o seu projeto, que possam ocorrer ao longo do tempo. Por exemplo: os cabos condutores sofrem, por ocasião de sua instalação, deformações elásticas que, entre outras conseqüências, conduzem a um aumento de comprimento. Tais deformações dependem de fatores como, principalmente, temperatura e tensão de tração. Estes cabos condutores sofrem também deformações permanentes e progressivas ao longo do tempo em função da temperatura e da tensão de tração que por sua vez variam em função do clima, da ação dos ventos e da potência conduzida, como conseqüência do fenômeno de fluência.

Tais fatos tornam fundamental, para um projeto adequado, um completo conhecimento das características dos condutores.

Justamente um dos problemas com que se defrontam as empresas do setor elétrico, é o da insuficiência de dados sobre o comportamento mecânico de cabos condutores. A situação entre outros aspectos, tem inibido a utilização dos novos produtos (SSAC [14] por exemplo) e alternativas (repotencialização de linhas existentes por exemplo), que poderiam representar, caso viáveis, a otimização de investimentos e maior confiabilidade operacional.

Para uma referência dos valores envolvidos, considera-se que os cabos condutores representam cerca de 25% do custo de uma linha de transmissão.

Face ao exposto podem ser destacados os seguintes benefícios diretos advindos da metodologia de ensaios ora proposta bem como da utilização da Bancada construída:

- Possibilidade de avaliar os cabos disponíveis no mercado, tais como os em liga de alumínio, com alma de aço galvanizado (ACSR - Aluminium Conductor Steel Reinforced) e os de "alumoweld", bem como os que venham a ser lançados para comercialização e, conseqüentemente, a conveniência de sua utilização no setor elétrico, em particular pelas concessionárias de energia elétrica. Como exemplo pode ser citada a possibilidade de utilização de cabos tipo SSAC (Steel Supported Aluminum Conductors)[14], especificamente como uma alternativa nacional, similar ao produto inicialmente desenvolvido nos EUA. Trata-se de um tipo de condutor previsto para operar em altas temperaturas (até 423 Kelvin), que possibilita aumentar a potência em uma linha de transmissão de 30 a 60% em relação aos condutores convencionais.

- Possibilidade de determinação dos valores reais dos parâmetros mecânicos das linhas existentes e sua comparação com os valores adotados nos projetos. Tais dados poderão permitir a utilização dos condutores em condições diferentes das normais, como por exemplo, no caso de reisolamento de linhas de 69 kV em 138 kV, com custo de aproximadamente 25% de uma nova linha, nas

atividades de correção da distância mínima entre condutores e o solo, e quando houver necessidade de operar com temperaturas acima dos valores previstos no projeto original.

- Possibilidade de controle de qualidade de cada lote produzido de forma a permitir, inclusive, os ajustes nas linhas de transmissão, minimizando a ocorrência de abaixamento excessivo dos condutores ao longo dos anos, bem como a seleção dos mesmos de forma a evitar assimetrias nas linhas, assimetrias essas que poderiam causar, em especial em linhas com feixes de cabos, uma severa torção nos cabos, em consequência da variação diferente da flecha com o tempo, em função da fluência diferenciada entre os mesmos [06].

- Possibilidade de otimização do projeto de cabos sob o ponto de vista do fabricante.

A gama de aplicações da Bancada e sua característica de fornecer informações para subsidiar decisões técnicas, com significativos impactos, principalmente na redução do custo de novas obras e serviços de manutenção, torna-a atrativa em especial, para as empresas concessionárias do setor de energia elétrica. Para as empresas fabricantes de cabos, sua principal utilização está associada ao desenvolvimento de novos produtos e ao controle de qualidade de sua produção.

O interesse de uma concessionária, no desenvolvimento da metodologia aqui proposta, bem como da Bancada propriamente dita, surgiu em razão da possibilidade de utilização de cabos

condutores de alumínio com alto recozimento, capazes de transmitir quantidades de energia pelo menos 30% maiores. Inicialmente foram contatados fabricantes nacionais, interessados em desenvolver o cabo no país. Nesse sentido o LAC desenvolveu protótipos para ensaios de comportamento e caracterização mecânica.

Os estudos necessários foram divididos em duas partes. A primeira, com o objetivo de verificar o comportamento elétrico do cabo e das respectivas conexões frente a situações de trabalho em altas temperaturas, já foi realizada, estando disponíveis os respectivos resultados. A segunda parte, referente à determinação das características mecânicas do condutor, ficava dependente do desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho, bem como do correspondente desenvolvimento de uma bancada de testes adequada para execução dos respectivos ensaios, agora concretizada.

O projeto da Bancada, por apresentar uma interação de sistemas de medição e controle, envolveu as áreas de servomecanismos, vibrações mecânicas e sistemas de medição; por ser uma máquina mecânica que envolve vários processos tecnológicos abrange também a área de tecnologia mecânica, principalmente pelo fato de envolver aspectos relativos ao projeto e fabricação de componentes mecânicos e em conseqüência envolve também a área de projeto e construção de máquinas.

Além desses aspectos, a existência de um protótipo de bancada abre campo extremamente fértil para o desenvolvimento de novos

cabos condutores, inclusive com a participação de fabricantes nacionais, permitindo também o desenvolvimento de trabalhos acadêmicos, tais como dissertações e/ou teses sobre comportamento mecânico, comparativos de desempenho, técnicas de avaliação, medições de grandezas mecânicas e outros assuntos referentes aos cabos condutores ou mesmo ao protótipo da Bancada em si. A propósito, já foram realizados, na bancada, ensaios para fabricantes e concessionárias de energia elétrica tais como: ensaios de um cabo termoresistente fabricado no Brasil; teste de fluência para repotencialização de linhas de transmissão; testes de dilatação térmica; testes de tensão/deformação.

## 4 HISTÓRICO

Um método gráfico de cálculo "Flecha-Tensão" foi desenvolvido por Rodee em 1926 .

A partir de 1930, a ALCOA passou a utilizar esse método, incorporando dados, relativos às deformações permanentes devidas à fluência, obtidos em laboratório [03].

A deformação devida à fluência, para um determinado cabo, depende da tensão mecânica aplicada a esse cabo, da temperatura a que está submetido, do tempo em que a tensão e/ou a temperatura perdurem, do material ou materiais constituintes do cabo, do processo de produção dos tentos (trefilação, laminação, etc) com o equipamento do fabricante e também do processo de fabricação do cabo. A fluência pode, inclusive ser diferente para diferentes partidas do mesmo cabo.

A curva correspondente, para temperatura constante, se assemelha ao ramo positivo de uma parábola com vértice na origem e simétrica em relação ao eixo x; por essa razão os resultados dos testes de fluência são apresentados como retas, em gráficos com escalas logarítmicas.

Harvey e Larson [12] mostraram, através de testes realizados nos laboratórios da ALCOA, que quando um condutor é submetido por algum tempo, a uma determinada tensão e depois essa tensão é reduzida, o condutor cessará temporariamente de fluir até que

tenha decorrido o tempo correspondente para se obter o mesmo grau de fluência com a tensão reduzida. A partir desse ponto a deformação passará a aumentar como se tivesse sido aplicada a tensão reduzida desde o início. Por outro lado, ficou também demonstrado que a deformação por fluência aumenta com a temperatura, da mesma forma que com a tensão, isto é, podemos determinar pares de tensão e temperatura, diferentes entre si, que produzem o mesmo grau de fluência. Também é válida, com relação à temperatura, a experiência relatada no início deste parágrafo, isto é, quando um condutor é submetido por algum tempo a uma temperatura, mantida a tensão mecânica constante, e depois essa temperatura é reduzida, o condutor cessará temporariamente de fluir até que tenha decorrido o tempo correspondente para se obter o mesmo grau de fluência que seria obtido com a temperatura reduzida.

Vários pesquisadores trabalharam no assunto, visando encontrar um método seguro, que permitisse prever os efeitos da fluência, de forma a otimizar as linhas de transmissão desde a etapa de projeto.

Foram sugeridos vários equacionamentos teóricos devidamente embasados em experimentos realizados, conforme se pode avaliar pelas referências bibliográficas citadas [01] a [32] e [112] a [115].

Entre as várias soluções parciais encontradas e que ainda perduram válidas cita-se:

Wood [11] propôs pré-tensionar os cabos por um prazo determinado, a uma tensão bem superior à tensão de trabalho, antes da sua instalação, desta forma uma boa parte do efeito da fluência seria eliminado antes da instalação.

A Reynolds Metals Co. publicou em setembro de 1973 um trabalho sobre o cabo SSAC - Steel Supported Aluminium Conductors [14], lançado por ela no mercado. O então novo cabo apresentava as seguintes características: Os fios de alumínio eram completamente recozidos na fábrica, antes de montar o cabo, a uma temperatura de 673 K, desta forma o alumínio tornava-se bem mais dúctil. Como este alumínio não possuía quase nenhuma resistência, ao se tensionar o cabo, a totalidade da força era absorvida pela alma de aço. Como o aço apresenta uma deformação por fluência muito menor do que a do alumínio, este tipo de cabo pode operar continuamente a temperaturas relativamente altas (perto de 473 K) sem nenhum detrimento das propriedades mecânicas, pois o perigo apresentado pelos outros cabos (recozimento do alumínio em operação), já não existe. A flecha para altas temperaturas será bem menor e não será afetada pelo problema de fluência do alumínio. Além disso, pelo fato do alumínio se tornar mais dúctil o amortecimento é aumentado, diminuindo as oscilações mecânicas e vibrações causadas pelo vento e, conseqüentemente, fazendo com que o cabo fique menos sujeito à fadiga. O alumínio recozido apresenta melhor condutividade elétrica e, como suporta temperaturas mais altas, poderá transportar uma quantidade de energia bem maior (até 100%). Como desvantagens tem-se o fato de ser necessário utilizar um aço de melhor qualidade para a alma, a necessidade

de cuidados adicionais nos grampos de fixação, para evitar amassamentos nos tentos em função da maior ductilidade do alumínio recozido e pela mesma razão também são necessários cuidados adicionais para manuseio do cabo.

O problema de prever as deformações plásticas dos cabos assumiu papel tão importante que foi nomeado um grupo de trabalho, (CIGRE - International Committee on Large High Voltage Electric Systems), presidido por V. Bourgsdorf, para finalmente resolver o assunto. O relatório do grupo foi publicado em Paris, em março de 1981, na revista ELECTRA[19]. O grupo fez uma avaliação completa de todos os fatores que atuam no fenômeno da fluência, desde os processos metalúrgicos, processos de fabricação dos fios de alumínio, processos de construção dos cabos, efeitos de acomodação geométrica dos fios de alumínio sobre a alma de aço, efeitos da temperatura, efeitos da tensão mecânica, efeitos do clima (umidade, ventos, etc.), efeitos da energia sendo transportada e outros. Foram realizados vários testes além da avaliação das experiências anteriores e proposta uma série de tabelas, gráficos e fórmulas para realizar a previsão das deformações permanentes adaptadas a cada caso. O trabalho apresentado pelo grupo deixou muito clara a enorme complexidade do assunto. Hoje já é consenso que, para um bom projeto, não podem ser dispensados os resultados experimentais obtidos em testes de fluência. O assunto é tão sério, que existem recomendações expressas, de que não se deve usar no mesmo vão de uma linha de transmissão, cabos de partidas diferentes, sob pena de se criar assimetrias perigosas [06][75].

Outro problema que inspira cuidados é a ocorrência de vibrações mecânicas nos cabos de alta tensão, produzidas pelo vento. Há dois tipos básicos de vibrações dessa natureza. Um deles ocorre normalmente sempre que houver vento e a consequência de sua ação é o aparecimento de fadiga nos fios de alumínio, no ponto imediatamente anterior às suas inserções nos suportes. A CIGRE[92] subdivide esse primeiro tipo de vibrações em dois subtipos: as que ocorrem em fios ou cabos com ventos fracos a moderados, chamadas de vibrações eólicas (frequência acima de 3 Hz) e as que ocorrem apenas em feixes de cabos, com ventos médios a fortes, chamadas de vibrações de sub-vão ou oscilações induzidas "por esteira" (0,15 a 10 Hz) [44] [54] [58] [93] [95] [98] [100]. O outro tipo básico acontece nas regiões frias, para ventos de médios a fortes, em função do gelo acumulado nos cabos, que torna o perfil de sua seção transversal assimétrico, provocando um comportamento aerodinâmico imprevisível. As consequências neste caso podem ser muito graves, tendo já originado a destruição praticamente total de algumas linhas de transmissão. Esse fenômeno é denominado de "galloping" e felizmente não é registrado no Brasil [46] [64] [65] [70] [79] [83] [86].

O problema que se apresenta no caso de vibrações eólicas é o de determinar o movimento correspondente a essas vibrações [66] [68] [69] [73] [85] [87] [94] [96] [97] [99] [105], o de conhecer os fatores que contribuem para o seu aparecimento e o de atuar sobre as mesmas de forma a evitar os danos por elas causado. Para tal é necessário determinar as contribuições do

vento, a capacidade de auto-amortecimento dos cabos [80] [104] [106] e a capacidade de amortecimento dos dispositivos amortecedores em suas várias combinações [41] [42] [43] [45] [48] [50] [52] [57] [61] [63] [74] [81] [82] [84] [89] [90] [91] [101] [102] [103], bem como, conseqüentemente, pré-determinar o movimento real dos cabos condutores [38] [39] [47] [53] [55] [59] [62] [71], o qual por sua vez poderá ser relacionado à fadiga desses cabos condutores [49] [51] [67] [72], permitindo estabelecer um procedimento para a determinação segura dos amortecedores adequados.

A faixa de freqüência das vibrações eólicas é de 3 a 120 Hz e é dada aproximadamente pela fórmula de Strouhal [36] [44]:

$$f = S \frac{V}{D} \quad (\text{eq. 4.1})$$

onde V é a velocidade do vento [m/s],

D é o diâmetro do cabo condutor [m] e

S é o número de Strouhal (0.18 a 0.22 dependendo da superfície externa do cabo. Para um cilindro liso  $S \approx 0,19$ )

f é a freqüência [Hz]

A título de exemplo, para um cabo "wood Duck" da ALCAN e para uma velocidade de 36 km/h (10 m/s) a freqüência seria de aproximadamente 79 Hz.

As amplitudes pico-a-pico dessas vibrações podem ultrapassar o diâmetro do cabo condutor. São encontrados vários modos de

vibração com distâncias entre nós que variam de menos de 1 metro a 30 metros.

O nível de vibração pode ser quantificado pela amplitude nos ventres, ou pelo ângulo entre a posição máxima e mínima do cabo em vibração, na sua inserção com o suporte, para um determinado vão, ou pela amplitude da flexão medida (por convenção) a 89 mm (3,5 polegadas) do primeiro ponto de contato do cabo com a sua fixação, ou pela deformação na altura da fixação, ou ainda pela tensão mecânica nessa região [35]. Essas grandezas podem ser convertidas entre si por cálculo[92].

Para o projeto de linhas de transmissão é muito importante prever as vibrações que possam ocorrer durante a sua vida [77]. Essa previsão pode ser feita com restrições a partir de um enfoque determinístico ou aleatório [76]. No enfoque determinístico a previsão é realizada através do balanço de energia entre a energia fornecida pelo vento ao cabo condutor e a energia dissipada pelo cabo condutor e pelos demais elementos da linha de transmissão.

A energia fornecida pelo vento  $P_w$  pode ser obtida pela relação seguinte [34] [40] [92]:

$$\frac{P_w}{f^3 D^4} = \text{func}\left(\frac{Y_0}{D}\right) \quad (\text{eq. 4.2})$$

Onde:  $f$  é a frequência [Hz],  $D$  é o diâmetro do cabo [m] e  $Y_0$  é a amplitude nos ventres [m].

Essa relação foi determinada experimentalmente por vários laboratórios [92], no entanto, as diferenças entre os laboratórios podem chegar a 30%, o que caracteriza a urgente necessidade de um aperfeiçoamento na metodologia e na normalização dos ensaios.

Por outro lado, o valor de auto-amortecimento dos condutores pode ser obtido em laboratório, estando já disponível para vários tipos comuns de cabos condutores.

A energia dissipada no cabo condutor (ou o fator de auto amortecimento) pode ser medida por vários métodos dentro de dois grupos principais, quais sejam: O método das vibrações livres e o método das vibrações forçadas.

No método das vibrações livres o cabo condutor é excitado no seu modo fundamental e num determinado momento é retirada a excitação. Tão logo sejam atenuadas as vibrações em outros modos, poder-se-á medir a energia dissipada pelo decremento da vibração no modo fundamental. Os resultados podem ser fortemente influenciados pela técnica utilizada para a retirada da força motriz; além disso, para cabos condutores o decremento é muito pequeno. Por essas razões o método das vibrações livres não tem sido muito utilizado.

O método das vibrações forçadas por sua vez pode ser subdividido em dois. O primeiro destes é o método da potência dissipada. Neste método se faz vibrar senoidalmente o cabo

condutor, nas suas frequências de ressonância, por meio de um excitador eletrodinâmico. A potência gerada é calculada diretamente pelo produto da força excitadora pela velocidade correspondente no ponto de aplicação da força, Essa potência representa a potência dissipada pelo condutor. Esse método impõe que se meçam outras dissipações de energia, tais como resistência do ar, impedância do excitador, atrito no medidor de deslocamento, etc., que são da mesma ordem que as perdas no cabo, em especial, para vão de teste curto (da ordem de 30 m). Por isso, para este método é importante que o vão de teste seja longo. Para se obter resultados confiáveis é recomendável um vão da ordem de 50 metros[56]. Nas linhas de transmissão os vão são definidos de forma a otimizar os custos, sendo comuns vãos de 400 m. No entanto, dificuldades geográficas podem levar à adoção de vãos muito longos. Citamos como exemplo, o vão de 1500 m, construído imediatamente após a subestação da Usina Hidrelétrica de Churchill Falls no Canada, para atravessar em um único lance o canal de fuga da usina. O segundo método em vibrações forçadas é o método da onda estacionária, no qual a potência transferida pelo excitador para as extremidades do vão de teste num determinado modo é deduzida do inverso da relação da onda estacionária, ou seja, a relação de amplitudes nos nós e nos ventres, e é dada [56] pela relação:

$$P_1 = \sqrt{Tm} \frac{V^2}{2} \left( \frac{a_1}{Y} \right) \quad (\text{eq. 4.3})$$

onde:

$\sqrt{Tm}$  é a impedância da onda ou impedância característica (em frequências muito altas deverá ser modificada para tomar em consideração a influência da rigidez do cabo condutor);

$\frac{Y}{a_1}$  é a relação de onda estacionária [m/m];

V é a velocidade no ventre para uma amplitude simples [m/s];

T é a tensão no cabo condutor [N/m<sup>2</sup>] e

m é a massa do cabo condutor por unidade de comprimento [kg/m].

Nesse caso, a potência dissipada entre os nós 1 e 2 é dada simplesmente por:

$$P=P_1-P_2$$

O primeiro método (método da potência dissipada) é mais simples, mais rápido e requer instrumentos menos complicados. Ele é satisfatório quando as perdas nas extremidades são pequenas. Essas perdas nas extremidades por sua vez podem ser determinadas por comparação das potências alimentadas para dois vãos diferentes porém com terminações exatamente iguais.

Quando se torna difícil modificar o vão deve-se utilizar o método da onda estacionária (segundo método), que apesar de ser demorado tem a preferência de muitos pesquisadores. Esse método exige, no entanto, precauções especiais para medir as amplitudes nos nós que normalmente são bem pequenas, para se assegurar que se está medindo apenas a componente da frequência de excitação.

Com base em medições experimentais a potência de auto-amortecimento por unidade de comprimento do cabo ( $P_c$ ) é dada [92] pela expressão:

$$P_c = C f^n Y_0^m \quad (\text{eq. 4.4})$$

O parâmetro C é uma função do tipo do cabo condutor e da tensão de teste.

f é a frequência [Hz],

$Y_0$  é a amplitude da onda [m],

Os expoentes n e m, para as condições normalmente encontradas nas linhas de transmissão, variam entre 3 e 3,5 e entre 2 e 2,5, respectivamente.

Vale também para este caso a observação quanto às diferenças entre os dados fornecidos pelos laboratórios.

Para determinar o nível de vibração pode ser utilizado o princípio da conservação da energia. Esse princípio baseia-se no fato de que, para que se tenha oscilações auto-sustentáveis do condutor, a energia introduzida pelo vento seja toda dissipada através de seu amortecimento próprio ou de outros mecanismos dissipativos que eventualmente existam na linha. Isto significa que

$$P_w = P_c.$$

Esta equação pode ser resolvida através de métodos gráficos ou iterativos obtendo-se como resultado a amplitude de deslocamento do ventre em função da frequência, para uma dada força de tração no cabo condutor.

Conforme já mencionado, a amplitude de deslocamento poderá ser convertida, por cálculo, no ângulo entre a posição máxima e mínima do cabo em vibração, na sua inserção com o suporte, ou em tensão, ou ainda em deformação nos terminais.

Para controlar as vibrações na linha de transmissão podem-se aplicar amortecedores, cujos efeitos são de reduzir as amplitudes da vibração ou de produzir uma alteração da forma de onda entre o amortecedor e a extremidade do vão.

Se um amortecedor ou um sistema de amortecedores atua satisfatoriamente, ele reduz a deformação em todas as posições ao longo do vão a um valor abaixo do valor crítico[109], para uma determinada faixa de frequência. Contudo, se ele é inadequadamente escolhido, ou está mal localizado, a distorção da forma de onda pode levar a um aumento da deformação do condutor na junção com o grampo de suspensão ou na extremidade do vão.

O desempenho de um amortecedor sobre dado condutor, incluindo o estudo de sua localização, pode ser investigado através de ensaios e usando-se o princípio da conservação da energia, tendo-se em conta o conjunto do cabo condutor e amortecedor.

Normalmente esses ensaios são feitos em bancadas especificamente projetadas para essa finalidade [117].

O nível de vibração de uma dada linha de transmissão pode ser relacionado à duração dessa vibração, permitindo ao projetista estimar o tempo de vida útil dos cabos dessa linha [78] [107] [108].

## 5 A BANCADA DE ENSAIOS

Os ensaios deverão ser executados, tanto quanto possível, de acordo com normas ou recomendações existentes, como por exemplo, as recomendações da Aluminium Association [18], Normas Brasileiras [24 a 26], etc., e o objetivo é o de conseguir resultados suficientemente confiáveis para que se possa, efetivamente, realizar projetos de linhas de transmissão mais econômicos, mais seguros e mais eficientes.

No projeto da Bancada procurou-se utilizar, tanto quanto possível, o que já está estabelecido para ensaios à temperatura ambiente (entre 293 e 303 K) e desenvolveu-se o que foi necessário em função da alta temperatura de ensaio.

O projeto da Bancada de testes, por sua vez, foi desenvolvido de forma a permitir uma ampla gama de ensaios, em especial, além dos ensaios de fluência, os ensaios de dilatação térmica, de tensão-deformação, e de amortecimento próprio.

### **5.1 ESPECIFICAÇÕES DA BANCADA DE ENSAIOS**

Foram estabelecidas as seguintes necessidades para serem atendidas pela Bancada[110]:

- Permitir que se fixe uma das extremidades da amostra de ensaio e que se tensione a outra extremidade através de um dispositivo adequado, capaz de manter constante,

automaticamente, dentro de  $\pm 2\%$ , conforme recomendado[10], a força de tração escolhida;

- Permitir que se aqueça e/ou que se mantenha constante, automaticamente, dentro de  $\pm 2$  K, a temperatura da amostra de teste no valor escolhido (entre a temperatura ambiente e 473 K, para os testes de fluência). A tolerância recomendada [10] para testes à temperatura ambiente seria de  $\pm 1,4$  K;

- Permitir que se possa medir, automaticamente, o aumento do comprimento a intervalos de tempo previamente especificados, de forma a se detectar as deformações elásticas e plásticas ocorridas, com um grau de precisão compatível com a extrapolação dos resultados para a vida da linha de transmissão (30 a 50 anos). É recomendada uma resolução (a incerteza não é citada) de 10 mm em 1 km ( $10^{-5}$ m/m ou 0,001%)[24];

- As operações para realização dos testes devem ser automatizadas. Os relatórios finais devem ser elaborados automaticamente pelo sistema gerenciador, acoplado à Bancada;

- A Bancada deverá também ser utilizada para prestação de serviços a terceiros, o que impõe a necessidade de serem certificáveis as incertezas das medidas;

- Deverá ser possível atender às necessidades de testes de uma companhia subsidiária de eletricidade (teste de fluência, dilatação térmica, tensão-deformação, amortecimento, etc) ou de uma indústria fabricante de cabos condutores de alta tensão

(praticamente os mesmos testes, porém voltados para o desenvolvimento de novos cabos);

- Os testes devem poder ser conduzidos de forma a obter os resultados dentro das condições normalizadas ou recomendadas quando da ausência de normas, qualquer que seja o tipo de cabo condutor de alta tensão (de alumínio, alumínio com alma de aço) ou do tipo que também tem a função de comunicação (fibra ótica);

- A Bancada deve demandar o mínimo de energia e seu custo deve ser o menor possível, sem no entanto, por em risco a sua funcionalidade;

- A Bancada deve permanecer operando mesmo durante os períodos de falta de energia elétrica;

- Deverá ser possível tracionar os cabos com até 200 kN;

- O vão de teste para ensaios de dilatação térmica e de fluência deve ser superior a 8 m, sendo desejável um vão da ordem de 12 metros, conforme recomendado em [10]. Vãos bem menores da ordem de 2,5 m com terminações especiais tem sido usados com sucesso, no entanto, considerando-se que a resolução recomendada na medida de comprimento é relativa, a utilização de um vão maior permite que se atinja essa resolução mais facilmente;

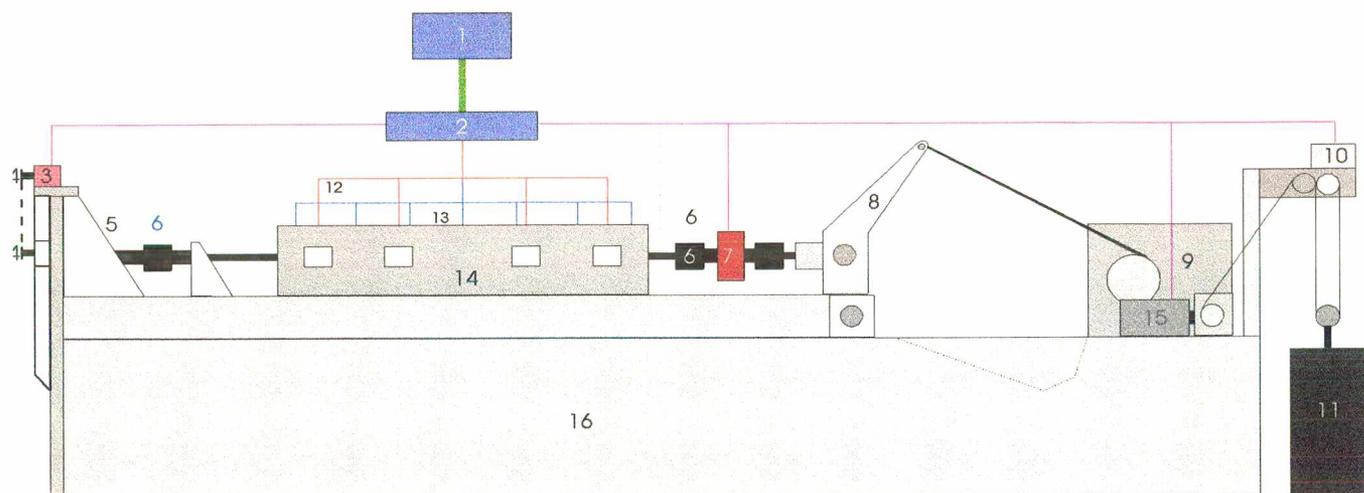
- O vão de teste para ensaios de vibrações mecânicas deve ser da ordem de cinco vezes o comprimento de onda da mais longa onda utilizada. É recomendado um vão de 50 m [56], embora se possa obter resultados satisfatórios com vãos de 30m. Foi estabelecido, como necessidade para o projeto, o vão de 60 metros que é perfeitamente factível em função do local onde a Bancada teria de ser construída;
- O ambiente de trabalho na Bancada deve ser limpo, ventilado e organizado;
- A Bancada deve ser facilmente operável, e as operações normalmente manuais que exigem emprego de força devem ser, tanto quanto possível, automatizadas e/ou facilitadas;
- Poucas unidades da Bancada serão fabricadas;
- Para testes de dilatação térmica, o aquecimento deverá ser rápido até cerca de 423 K, para que o fenômeno da fluência não altere os resultados. Foi estabelecido para o presente caso o tempo de 15 minutos sendo que se deverá pretensionar o cabo imediatamente antes do ensaio conforme descrito em 5.5.2;
- Para os testes de fluência o aquecimento não precisa ser rápido (algumas horas), porém, uma vez atingida a temperatura especificada, será feito o tracionamento e a partir de então o aquecimento precisa ser controlado de forma a manter a temperatura constante;

- Os testes de fluência deverão ter duração da ordem de 1000 horas conforme recomendação [10].

## 5.2 DISPOSIÇÃO FÍSICA DA BANCADA

### 5.2.1 Esquema Físico

A figura 5.1 a seguir apresenta um esquema físico simplificado da Bancada construída:



- |  |  |
|--|--|
| 1 - Microcomputador  | 9 - Redutor de carga                     |
| 2 - Interface Inteligente                                      | 10 - Motoreductor do contrapeso          |
| 3 - Motoreductor do Sistema Esticador                          | 11 - Contrapeso                          |
| 4 - Sistema de transmissão por corrente                        | 12 - Sensores de medição de deslocamento |
| 5 - Sistema esticador  | 13 - Sensores de medição de temperatura  |
| 6 - Bloco de ancoragem do cabo com terminação cônica em resina | 14 - Ambiente de temperatura controlada  |
| 7 - Célula de carga  | 15 - Servomecanismo de controle          |
| 8 - Sistema de alavanca  | 16 - Estrutura de concreto               |

figura 5.1

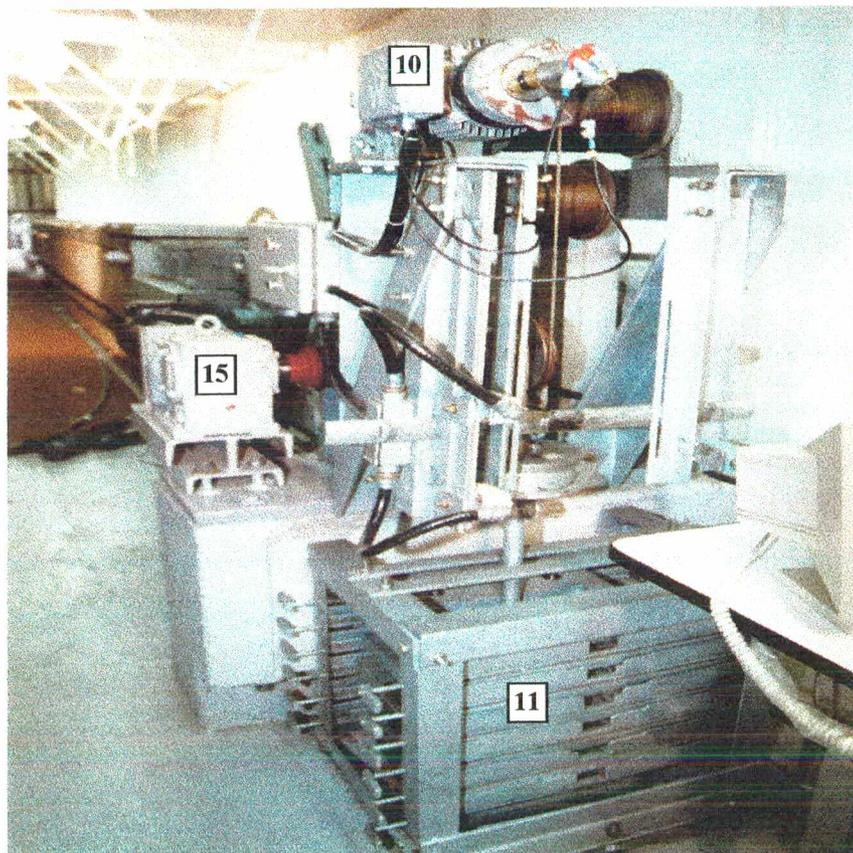
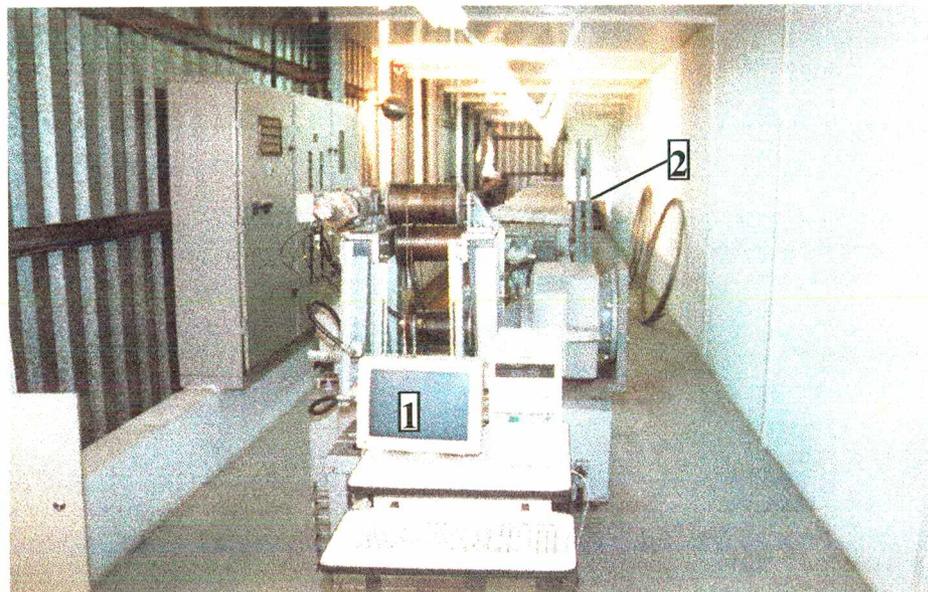
## **5.2.2 Fotos da Bancada**

Os mecanismos foram instalados sobre uma viga de concreto especialmente projetada de forma a atender os requisitos especificados.

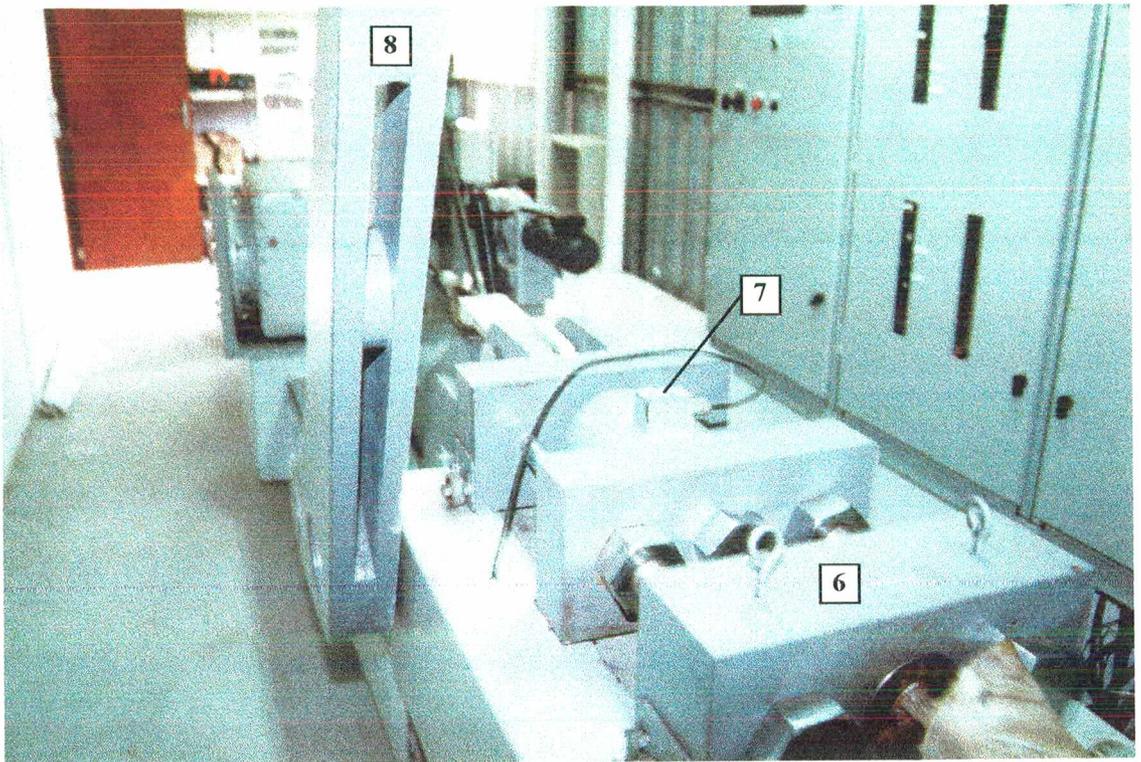
As fotos a seguir mostram os principais mecanismos da Bancada, os quais estão sendo explanados com mais detalhes em 5.3:—

## FOTOS DA BANCADA

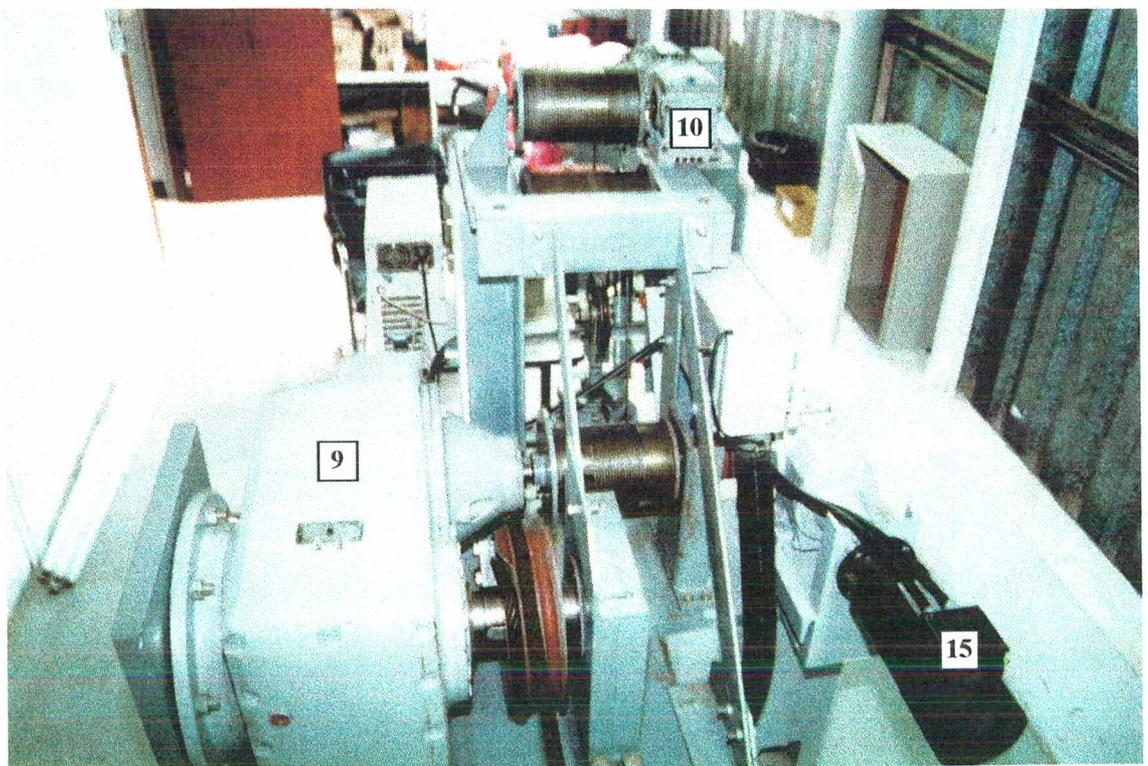
### VISTA GERAL DA BANCADA



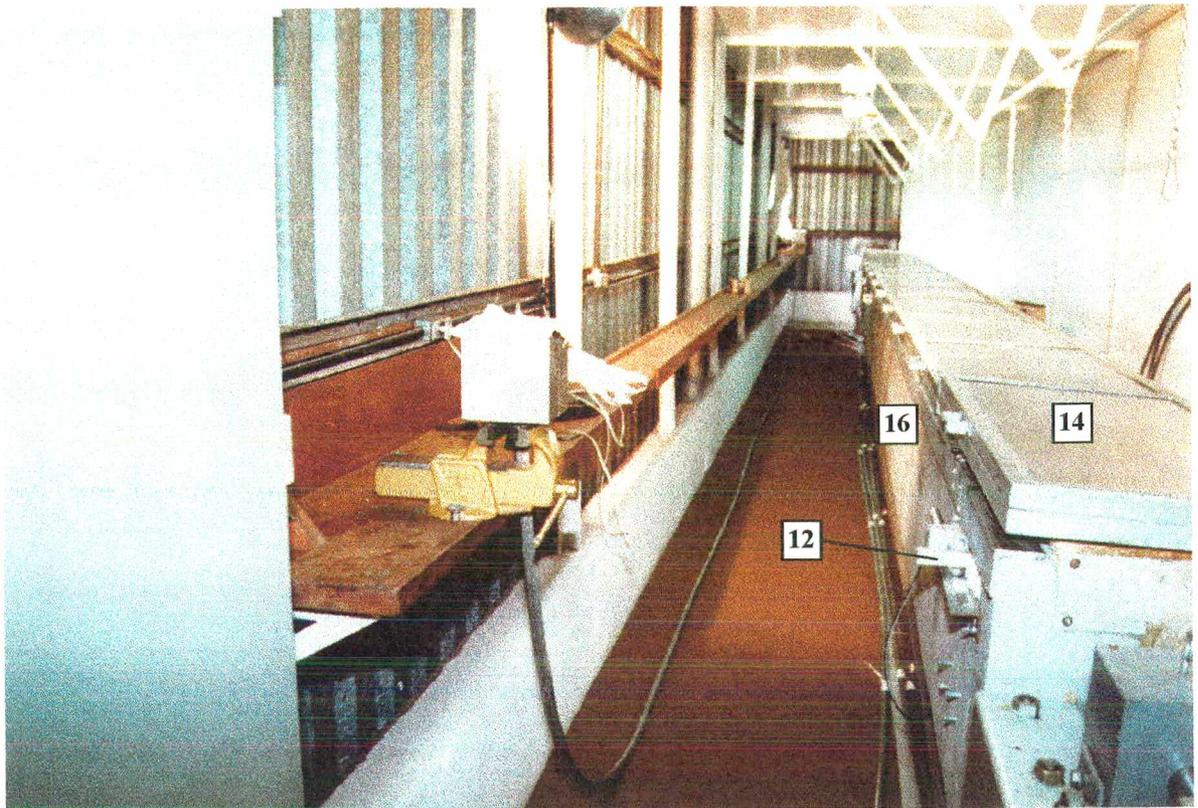
SISTEMA DE CONTRA-PESO



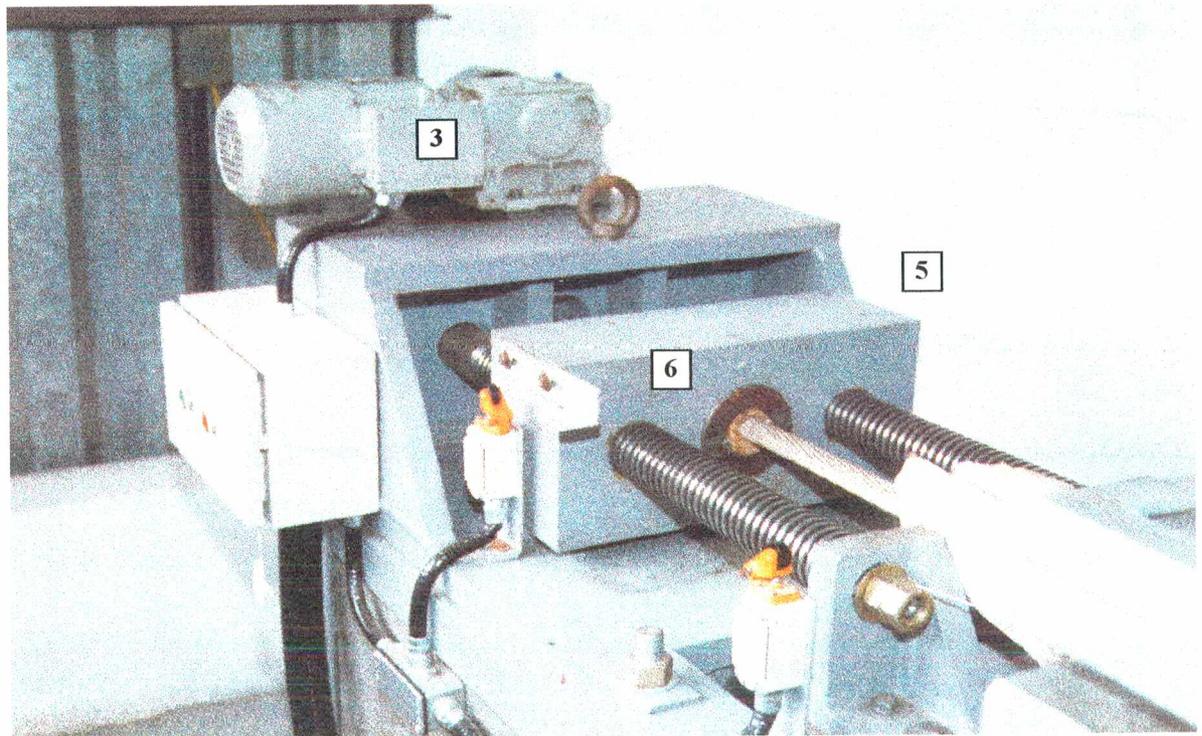
CELULA DE CARGA



REDUTOR E SISTEMA DE CONTRA-PESO



VISTA DA BANCADA DE MADEIRA PARA PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E DO RESCINTO COM TEMPERATURA CONTROLADA



MECANISMO ESTICADOR

## **5.3 CONCEPÇÃO E EXECUÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS**

Para atender às necessidades, mencionadas em 5.1, foram adotados os seguintes dispositivos ou mecanismos para a Bancada:

### **5.3.1 Mecanismo Esticador**

As extremidades da amostra de teste são previamente moldadas em forma de cone com resina epoxi e para que se possa instalar essa amostra e também para que se possa nela instalar os sensores dos instrumentos, foi construído um mecanismo esticador, ao qual, através de um sistema de semicones, é fixada uma das extremidades da amostra. As funções desse mecanismo são primeiramente de assimilar as diferenças de comprimento das amostras utilizadas e a seguir a de esticar a amostra em teste para permitir que os instrumentos sejam nela instalados, exercendo nessa operação uma força de até no máximo 5% da tensão de ruptura do cabo, conforme permitido nas normas técnicas. Basicamente o seu funcionamento pode ser descrito como segue: após a instalação da amostra comanda-se através do sistema gerenciador o início do teste, cuja primeira operação é justamente ligar o motoredutor que atua o bloco de ancoragem da extremidade da amostra. O motoredutor, que possui uma potência de 150 watts, desmultiplica a rotação do motor por um fator de 43,35 e aciona, através de corrente, duas rodas dentadas rigidamente acopladas a dois parafusos de 2,25 polegadas de diâmetro, de rosca quadrada, com passo de 11,29 mm, que fazem

acionar sincronizadamente, por sua vez, o bloco de ancoragem. O curso do bloco de ancoragem é de 0,5 metros.

### **5.3.2 Sistema de Contrapesos**

Para atender a necessidade de baixo consumo de energia, a outra extremidade da amostra de ensaio é tensionada por um sistema de contrapesos. A função do sistema de contrapesos é tensionar a amostra de teste com até 200 kN para os testes de fluência e 40 kN para os testes de vibrações mecânicas, mantendo a força especificada constante dentro de  $\pm 200$  N. Para compensar os atritos introduzidos pelos mecanismos propostos adiante e para atender à tolerância de carga foi utilizado um servomotor elétrico comandado automaticamente por uma célula de carga e pelo sistema gerenciador. Este controle faz permanecer constante a força aplicada pelo contrapeso, com o mínimo dispêndio de energia. Para que o equipamento seja compacto, foi utilizado um redutor de engrenagens com redução de 84,51:1, que permite que, com a redução adicional da alavanca utilizada e ainda considerando-se os diâmetros da polia do eixo de alto torque e do tambor acoplado ao eixo de baixo torque do redutor, um contrapeso de menos de 2 kN seja suficiente para produzir os 200 kN. Esses 2 kN podem ser obtidos de pesos menores de forma a se conseguir uma boa escala de pesos para ajuste do sistema. A fim de contemplar tanto o vão necessário para os testes de vibrações mecânicas, quanto para os demais testes, a Bancada apresenta um vão útil mínimo de 12 m para os testes de fluência e de aproximadamente 60 m para os testes de vibrações

mecânicas. Para obtenção dos dois vãos de teste necessários (12m e 60 m) foi instalada uma alavanca que pode ou não ser ativada e deixada uma passagem livre no mecanismo esticador, para o cabo, que neste caso é ancorado em um ponto externo ao ambiente da Bancada. Desta forma, através do sistema de contrapesos e do redutor e com a alavanca fora de ação, poder-se-ia exercer uma força de 40 kN, porém com um curso maior coerente com o vão de 60 metros. Com o vão de 60 m não será possível controlar a temperatura, no entanto esse fato não prejudica os testes de vibrações mecânicas que em geral demandam pouco tempo para sua realização. Por outro lado com a alavanca em operação, cuja relação de transmissão aumenta a força na amostra em teste de 5 vezes, poder-se-ia tracionar o cabo com um curso 5 vezes menor, porém com a força necessária de 200 kN. O conjunto de pesos foi instalado em uma estrutura com mecanismos que possibilitam o seu acionamento automático, através do sistema gerenciador, de forma que o sistema como um todo seja facilmente operável e automático. Para o seu acionamento foi previsto um sistema de motoredutor com tambor com respectivos contatos elétricos limitadores que, para qualquer curso possível do cabo correspondente, mantém o contrapeso sempre ativo. O sistema de contrapesos permite também a operação contínua mesmo com falta de energia elétrica.

### **5.3.3 Sistema de Aquecimento**

Para permitir que se aqueça e/ou que se mantenha constante, automaticamente, dentro de  $\pm 2$  K, a temperatura da amostra de

teste no valor escolhido (entre a temperatura ambiente e 473 K, para os testes de fluência), foi construído um recinto fechado e isolado termicamente e dentro desse recinto, instaladas 12 resistências elétricas com 15 ohm e 1 kW de potência cada uma, ligadas duas a duas em série formando seis conjuntos em paralelo, portanto com uma resistência total de 5 ohm, que alimentados com 220 V poderão fornecer até 9680 W. A tensão fornecida às resistências é regulada por um regulador de tensão (SIVOLT) em função da diferença de temperatura entre a temperatura especificada e a média das temperaturas medidas por sete termopares instalados ao longo do cabo em teste, de forma a aquecer e manter constante a temperatura no recinto.

Para testes de dilatação térmica, o aquecimento até cerca de 423 K deverá ser realizado em 15 minutos, para que o fenômeno da fluência não altere os resultados. Foi construída para esse caso uma fonte de corrente que fará circular por um trecho do condutor em teste, uma corrente de cerca de 3000 A. A medição dos deslocamentos, nesse caso, será feita num trecho de aproximadamente 2 metros de comprimento.

#### **5.3.4 Suporte da Célula de Carga**

Para a medição da força no cabo foi desenvolvido um suporte que comporta a célula de carga que mede até 200 kN. O suporte (ver foto da célula de carga na página 33) é constituído do bloco de ancoragem do cabo, o qual é acoplado através de dois parafusos ao bloco ligado a uma das extremidades da célula. Os dois

parafusos são passantes e apresentam nas suas extremidades diâmetros rebaixados que servem de guia para o bloco ligado à outra extremidade da célula que é tracionada pelo contrapeso. O parafuso que liga esse bloco à célula apresenta uma região usinada, que pode deslizar no furo do bloco que lhe serve de guia. No caso de um rompimento do cabo a célula ficará protegida do impacto, pois o bloco livre devido ao rompimento se desloca livremente ao longo do pescoço do parafuso da célula e ao longo dos rebaixos usinados dos parafusos, porém antes que se choque contra a célula atingirá o fim dos rebaixos e em consequência terá seu movimento impedido. Esse tipo de construção evita também que a célula de carga sofra esforços de torção.

### **5.3.5 Medição do Deslocamento**

Para medir automaticamente o aumento do comprimento, a intervalos de tempo previamente especificados, de forma a se detectar as deformações elásticas e permanentes ocorridas, com um grau de precisão compatível com a extrapolação dos resultados para a vida da linha de transmissão (30 a 50 anos), é recomendada, conforme já mencionado, uma resolução de 10 mm em 1 km ( $10^{-5}$ m/m ou 0,001%)[24]. Para isto foram instalados dois transdutores diferenciais indutivos de deslocamento, fornecidos pela HBM (Alemanha), nas extremidades do compartimento com temperatura controlada (cerca de 12 m). O deslocamento efetivo é dado pela diferença entre os dois deslocamentos medidos e a resolução recomendada, para esse vão de 12 m, é portanto, de 0,12 mm. A tensão máxima do transdutor

será  $\pm 80$  mV/V vezes a tensão da fonte (3 V), portanto  $\pm 240$  mV, que corresponde ao curso máximo do transdutor. O sinal do transdutor é digitalizado com um conversor analógico digital de 12 bits para  $\pm 400$  mV. Portanto, para o transdutor 1 (com curso de  $\pm 20$  mm), ter-se-á, aproximadamente, uma resolução de 0,0167 mm. Para o transdutor 2 (com curso de  $\pm 50$  mm), ter-se-á aproximadamente uma resolução de 0,042 mm. Pode-se portanto concluir que do ponto de vista da resolução, a recomendação normalizada é plenamente atendida.

### **5.3.6 Automatização da Bancada**

Com o desenvolvimento cada vez mais acentuado da tecnologia digital, os processos onde as grandezas necessitam ser monitoradas ou controladas, passaram a sê-los automaticamente, quer por razões de segurança, custos, ou precisão. Embora a automatização, em função dos multiplexadores e conversores analógico-digitais introduza erros adicionais, pode-se, com um projeto adequado e com alguns cuidados, reduzir as incertezas do processo como um todo.

Segundo a tendência atual em automatização da medição utilizam-se módulos de aquisição, processamento, interfaceamento e outros acessórios, gerenciados por um micro computador, o qual por sua vez gerência todo o processo, monitorando ou controlando todas as grandezas envolvidas.

Os fabricantes oferecem módulos padronizados, facilmente instaláveis em barramentos também padronizados, por exemplo o

barramento VXI, que permite a mesclagem de módulos de fabricantes diferentes, bem como a utilização de "softwares" comerciais padronizados.

Idealmente um sistema de medição apresenta sempre uma unidade de transdução, que permite detectar as variações de uma determinada grandeza e convertê-la em sinal elétrico (corrente ou tensão), uma unidade de aquisição e tratamento do sinal fornecido pelo transdutor e finalmente, uma unidade de apresentação do resultado.

No caso da automatização utilizando técnicas digitais, as medidas efetuadas devem ser processadas em seqüência, fato esse que impõe a utilização de um multiplexador, o qual, através de chaves, de uma forma controlada e sincronizada, liga, a seu tempo, cada um dos transdutores à unidade de tratamento de sinais, que os entrega na mesma seqüência, já tratados para o processamento, isto é, para a elaboração de relatórios, controle das grandezas do próprio processo, etc. A unidade de tratamento de sinais inclui em geral as demais funções necessárias, tais como: filtros, amplificadores, conversores A/D, sample/hold, fontes de tensão para os transdutores, complementos de ponte, etc. Por uma questão de economia, a operação de multiplexação é realizada antes da amplificação dos sinais, de forma a permitir o uso de apenas um amplificador. Esse fato no entanto, torna crítica a operação de chaveamento, que passa a exigir cuidados adicionais, para que se possa garantir as incertezas de medição especificadas.

Em instrumentação de medição pode-se utilizar as chaves tipo relê eletromecânico ou eletromagnético e as chaves semicondutoras. Estas últimas apresentam, como vantagens: grande velocidade, baixo custo, longa vida, pequeno tamanho e baixo consumo e como desvantagens: resistência ôhmica alta ( $40 \Omega$  a  $1 \text{ k}\Omega$ ), o que inviabiliza sua utilização em braços de ponte e em circuitos de alimentação de ponte e a torna crítica nos casos em que a resistência do transdutor é alta (para termistores por exemplo), e limitação da tensão (a tensão chaveada não deve ultrapassar a tensão de alimentação, esse fato torna as chaves semicondutoras críticas para os casos onde a tensão de modo comum possa estar presente no transdutor, como no caso de termopares instalados em banhos).

As chaves do tipo relê apresentam características opostas às chaves semicondutoras, isto é, são mais caras, duram menos, são maiores, são lentas e consomem mais, no entanto, face à sua resistência ôhmica baixa (inferior a  $1\Omega$ ), tornam-se imprescindíveis quando se necessita de incertezas de medição menores.

Conforme já mencionado, podemos dispor de módulos individuais para cada operação, inclusive de fabricantes diferentes, que podem ser montados em uma única unidade e que constituem um sistema de aquisição de sinais.

A automatização da Bancada foi obtida através de um multiprogramador STD-85MP, de um sistema gerenciador e do

correspondente "software" que lê as informações dos instrumentos e comanda as ações necessárias para a manutenção da temperatura do recinto do cabo em teste e da força de tração no mesmo, bem como imprime os relatórios correspondentes. O multiprogramador é uma unidade gerenciadora de cartões funcionais destinada ao controle e aquisição de dados analógicos ou digitais. Devido à sua estrutura modular e a sua flexibilidade de configuração, o STD-85MP é uma poderosa ferramenta na integração de sistemas de controle de processos e instrumentação automática. Possui gerenciamento interno controlado por microprocessador, programável via GPIB.

### **5.3.7 Fonte de Energia de Emergência ("No Break")**

Tendo em vista a duração dos testes de Fluência (cerca de 1000 horas) seria desejável que a Bancada continuasse operando mesmo no caso de falta de energia elétrica na rede, no entanto o correspondente custo aumentaria significativamente. Foi julgado mais adequado instalar um "no-break", que pode fornecer energia para os instrumentos e para o sistema gerenciador por pelo menos 2 horas adicionais. Essa providência permite apenas que se continuem as medições e que se detecte os efeitos da interrupção de energia, permitindo avaliar se os testes realizados com estas interrupções podem ser ou não validados. No caso de interrupção de energia não é possível manter o aquecimento do cabo em teste na temperatura estabelecida nem corrigir eventuais variações na força de tração da amostra de teste.

## **5.4 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA [26]**

Os corpos de prova devem ser retirados, preferencialmente, das bobinas ou rolos de expedição, desprezando sempre o comprimento relativo à primeira espira.

Durante as operações de retirada dos corpos de prova deve-se evitar torções e dobramentos com raios de curvatura inferiores aos mínimos admissíveis, bem como qualquer contato com o meio circundante.

A operação de corte deve ser feita com uso de serra, executando-se preliminarmente a amarração do cabo nas fronteiras do corte, mediante abraçadeiras ou qualquer outro dispositivo adequado para que não desfie.

Nas duas extremidades de cada corpo de prova devem ser aplicados conectores terminais de fixação, que vinculem rigidamente entre si todos os fios.

Para o caso da Bancada foram adotadas terminações cônicas moldadas com epoxi, conforme orientação contida em [10].

## **5.5 MODO DE OPERAÇÃO**

Conforme já exposto a Bancada permite a realização de ensaios de fluência, dilatação térmica, vibrações mecânicas e tração-deformação. Nos ensaios de fluência é necessário manter

constante a força na amostra de teste, bem como a temperatura no recinto fechado da amostra. Esse fato exige que além da medição da força e da temperatura seja necessário ainda controlar, a partir dessas medidas, os sistemas que irão atuar sobre as mesmas. Nos ensaios de dilatação térmica é necessário medir e controlar a força na amostra em teste e a temperatura precisa apenas ser medida. Em ambos os ensaios deve-se medir com bastante precisão os deslocamentos ou deformações ocorridos. Nos ensaios de tração-deformação, é necessário controlar a temperatura e medir a força e os deslocamentos ou deformações.

Foi necessário, portanto, desenvolver um "software" para cada tipo de ensaio de forma que o sistema gerenciador pudesse atuar adequadamente.

O procedimento conversacional entre o sistema gerenciador e o operador é o seguinte:

Após a instalação da amostra de teste escolhe-se o programa do ensaio que se pretende executar. Ao executar o programa, o sistema gerenciador oferecerá as seguintes opções: Cabo conhecido ou Cabo tipo novo. Escolhido "Cabo conhecido", o sistema gerenciador solicitará o nome do cabo, o qual digitado propiciará, graças a um banco de dados, o aparecimento de uma tela com todos os valores das características do mesmo, de acordo com informações dos fabricantes correspondentes. Escolhido "Cabo tipo Novo" o sistema gerenciador oferecerá os campos adequados para preenchimento das características

respectivas, bem como do nome dado ao mesmo, dados esses que serão incorporados ao banco de dados, para referência posterior.

Em 5.5.1 a seguir é apresentada a seqüência correspondente ao ensaio de fluência. As demais seqüências para os ensaios de: dilatação térmica, tensão-deformação e amortecimento das vibrações mecânicas, estão contidas no apêndice 3.

### **5.5.1. Ensaio de Fluência**

Para ensaio de fluência, o "software" correspondente se encontra no apêndice 1, o sistema gerenciador oferecerá uma tela onde se poderá digitar os percentuais da RMC (resistência mecânica calculada) para o tracionamento inicial e para o ensaio, o valor da temperatura de teste e o nome do arquivo para o correspondente relatório. Os ensaios de fluência devem ser realizados em uma temperatura constante, escolhida desde a temperatura do ambiente até 473 K, dentro de uma estabilidade no tempo de  $\pm 2$  K, com a amostra de teste tracionada com uma força mantida constante por um servomecanismo, que deverá ser de 15, 20, 25 ou 30% da RMC (resistência mecânica do cabo calculada).

Logo após a digitação mencionada, o sistema gerenciador apresentará mensagens orientando e indicando os comandos a serem executados a cada operação. Inicialmente, mediante comando, iniciar-se-á a tração da amostra até o limite de percentual da RMC digitado para tração inicial, através do

mecanismo esticador, que será controlado pela célula de carga e pelo sistema gerenciador. Desta forma será possível instalar os instrumentos (termopares e sensores de deslocamento indutivo) correspondentes. Uma nova ordem de prosseguimento fará acionar o sistema de aquecimento por resistências elétricas, instalado no recinto no qual se encontra a amostra, até que a temperatura atinja o valor especificado. A temperatura uma vez atingida, será mantida constante por um regulador automático e pelo sistema gerenciador. Nessa ocasião o sistema gerenciador indicará as providências necessárias, para que sejam preparados o sistema de contrapesos e o servomotor destinados a produzir e a manter a força na amostra de teste constante. Essas providências são as seguintes: indicação da posição do fim-de-curso do contrapeso, que definirá o número de massas de 25 kg que o contrapeso deverá incorporar automaticamente e o valor do peso complementar que deverá ser colocado manualmente no ajuste fino do peso. Após uma nova ordem será iniciada a tração do cabo (amostra), pelo acionamento do motoredutor do sistema de contrapeso. O curso do contrapeso será regulado pelo fim-de-curso variável, conforme já mencionado. Quando a força atingir 50% do valor especificado entrará em operação o servomecanismo, que a manterá constante, dentro de  $\pm 200$  N, ao longo do ensaio.

Caso ocorra o rompimento do cabo, a força na amostra anular-se-á. Quando o valor dessa força se tornar inferior a 50% da força de teste especificada o servomecanismo será desativado. Está também prevista, caso se configure a necessidade, a instalação

de um freio, que atue nesses casos, mesmo na falta de energia elétrica, para evitar acidentes.

Por ocasião do início da tração do cabo serão iniciadas também as leituras dos valores medidos, os quais serão registrados no relatório do teste.

As leituras serão indicadas no monitor em tempo real e as médias dos valores instantâneos das leituras a cada intervalo de interesse serão registrados no relatório. Portanto, no monitor poderão ser visualizadas apenas as leituras instantâneas de força, temperatura e deslocamento, bem como as médias do ciclo anterior que foram registradas no relatório. No relatório serão registrados, para cada ciclo, os valores médios de temperatura de cada termopar e das médias de cada leitura, a média das forças no cabo e a média dos deslocamentos.

Os intervalos de interesse propostos são os seguintes:

- a cada 10 segundos, nos primeiros 2 minutos do início da tração da amostra;
- a cada 20 segundos nos 2 minutos subseqüentes;
- a cada 40 segundos nos 4 minutos subseqüentes;
- a cada minuto nos 8 minutos subseqüentes;
- a cada 5 minutos até completar 1 hora de teste;

- a cada 10 minutos até completar 5 horas de teste;
- a cada 30 minutos até completar 10 horas de teste;
- a partir de 10 horas de teste os registros serão efetuados a cada hora.

O sistema gerenciador supervisionará a tensão de alimentação da rede. Se houver falta de energia, esse fato será sinalizado, a amostragem tornar-se-á freqüente (medições a cada 10 segundos) no período em que permanecer a falta de energia e, no caso da interrupção propiciar a elevação de 3% da RMC na força de tração, em consequência do esfriamento da amostra, o computador atuará, através da bateria do "no break", um pequeno motor, que fará descer o contrapeso, aliviando a tração no cabo para 90% da RMC. Tão logo cesse a interrupção de energia o computador atuará o motoredutor do contrapeso, o conversor do servomotor e o conversor do aquecimento, restabelecendo os valores de ensaio de forma que, desse momento em diante, o ensaio continue normalmente.

- Para esse ensaio deverão ser registrados os seguintes dados:

- Os valores das grandezas fixas (RMC, percentuais de tracionamento, valor teórico de tracionamento em N, temperatura de ensaio, tipo do cabo e outros dados julgados necessários).

- A data, a hora e o tempo de cada registro a partir do início do teste;
- As médias das temperaturas instantâneas dos termopares no período, a correspondente média das médias instantâneas, os valores máximo e mínimo da temperatura média no período, o valor da temperatura da junta fria;
- Os valores de referência e das médias de cada período dos transdutores de deslocamento e os valores das médias dos deslocamentos efetivos no período;
- A média das forças de teste instantâneas medidas pela célula de carga no período;
- O número de amostras do período;

Além disso o sistema gerenciador registrará também, na coluna de observações, os eventuais acontecimentos, tais como: falta de energia, excesso de tração e outras informações que forem julgadas necessárias.

## **5.6 CALIBRAÇÃO DA BANCADA**

De acordo com as normas, recomendações pertinentes [10][18][24][25][26], e as decisões tomadas em 5.1 a temperatura deve ser controlada dentro de  $\pm 2$  K, a força dentro de  $\pm 2\%$  e a resolução das medidas de deslocamentos deve ser da ordem de 10 mm em um km.

Os instrumentos deverão, portanto, ser calibrados a partir de padrões rastreados e devidamente corrigidos para que a

incerteza da medição desses instrumentos seja compatível com as exigências das normas.

### **5.6.1 Calibração dos transdutores indutivos de deslocamento**

As calibrações dos transdutores foram feitas pela Fundação CERTI da UFSC( Florianópolis).

Os testes foram conduzidos efetuando-se medições em várias temperaturas (recinto controlado até 423 K), com os transdutores montados nos seus respectivos locais de funcionamento, de forma a se observar as influências destas nos valores medidos. Os valores encontrados demonstram a pouca influência da temperatura no recinto da amostra nos resultados obtidos. Observou-se também, principalmente para o transdutor 1, que os valores entre as leituras correspondentes dos cinco ciclos efetuados, variaram de apenas uma vez a resolução do conversor A/D, o que demonstra uma grande tendência de diminuir o erro aleatório ao se aumentar o número de ciclos de medição com conseqüente diminuição do fator de Student, além disso para o transdutor 1 a resolução é menor em função do seu menor curso.

A não linearidade do sistema causa um significativo erro sistemático que, no entanto, pode ser compensado por "software". Essa não linearidade já era esperada em função do protocolo de ensaio fornecido pelo fabricante. O fabricante

garante para o transdutor um desvio máximo de linearidade de 0.2%.

A compensação foi feita obtendo-se para o transdutor 1 uma incerteza máxima de medição de  $\pm 0,1$  mm, nas temperaturas de 298, 348 e 423 K e com restrição de faixa (-16 a +20 mm) na temperatura de 385 K.

Para o transdutor 2 a incerteza da medição máxima será de  $\pm 0,19$  mm.

Para os ensaios de fluência, que iniciam com os deslocamentos zerados após se atingir e estabilizar o cabo na temperatura especificada e, portanto, sem considerar os deslocamentos devidos à dilatação térmica do cabo em teste, pode-se utilizar, para otimizar o sistema, o transdutor 1, que tem menor incerteza e curso menor no lado que apresenta o maior deslocamento (próximo à célula de carga) e o transdutor 2 com maior incerteza e maior curso no lado que apresenta menor deslocamento (próximo ao mecanismo esticador) e ainda selecionar a faixa com maior incerteza para medir os deslocamentos elásticos e a faixa com menor incerteza para os deslocamentos devidos à fluência, desta forma o transdutor 2 poderá registrar um deslocamento máximo da ordem de um milímetro, que corresponde a uma variação no erro sistemático inferior a 0,01 mm. Em consequência do acima exposto pode-se garantir uma incerteza total de medida da ordem de 0,12 mm.

Pode-se ainda melhorar a resolução e, conseqüentemente, a incerteza das medições, amplificando os sinais gerados pelos

transdutores, pois conforme observou-se pelo relatório de calibração, um deslocamento de 41 mm no transdutor 2 produz um sinal de 261,8 mV, isto é, 6,385 mm/mV. Para o deslocamento máximo de 50 mm teremos 319,27 mV. O conversor A/D pode digitalizar um sinal de até 409,6 mV, portanto, uma amplificação de 1,28 foi aplicada e obteve-se como consequência 8,192 mV/mm, que considerando a resolução do conversor A/D que é de 0,2 mV, corresponde a uma resolução de 0,0244 mm. Aplicando o mesmo raciocínio para o transdutor 1, obteve-se uma amplificação de 1,8 e uma resolução de 0,0098 mm.

Deve-se lembrar ainda que a resolução recomendada é relativa, o que torna importante saber com razoável certeza a distância entre os dois transdutores.

Com esse objetivo foram instaladas escalas junto aos transdutores e foram medidas as distâncias entre os mesmos valores dessas escalas.

As medidas foram executadas pelo departamento de Geociências da UFPR, e o valor encontrado foi de 12,032m  $\pm$ 1mm. Esse fato mostra que a incerteza encontrada é praticamente igual à resolução especificada pela norma e não muda com a incerteza de medida da distância entre os transdutores.

Também foi medida a variação da distância entre dois pontos da viga de concreto próximos aos transdutores, com o LASER interferométrico, para uma variação da temperatura de ensaio de 130 K (423 K a 293 K). A variação foi de 0,07 mm. Considerando

que nos ensaios de fluência a temperatura se mantém constante, podemos afirmar, que essa distância não varia durante o ensaio.

### **5.6.2 Calibração dos Termopares**

Os ensaios de tensão-deformação, amortecimento e fadiga, não requerem um controle acurado de temperatura. Os testes são feitos à temperatura ambiente e basta que se anote a temperatura no momento do teste.

Os ensaios de dilatação térmica são realizados em tempos relativamente curtos (cerca de 15 minutos), enquanto o cabo em teste é aquecido desde a temperatura ambiente até cerca de 423 K, sendo nesse intervalo anotadas as temperaturas e as deformações correspondentes, de forma a se poder estabelecer, com precisão suficiente, o aumento do comprimento com a temperatura. Para esse caso se torna necessário medir a temperatura rápida e simultaneamente à medição da deformação no cabo. Deve-se, portanto, tomar especial cuidado com relação à dinâmica do ensaio, bem como com o contato entre os termopares e o cabo em teste.

Para os ensaios de fluência deve-se não apenas medir a temperatura, que poderá ser escolhida desde a temperatura ambiente até 473 K, mas também controlá-la, pois trata-se de ensaios de longa duração, 1000 horas, e durante a sua execução a temperatura deverá ser mantida constante ( $\pm 2$  K) conforme 5.1. Essa exigência impõe que a temperatura seja medida com

maior rigor, devendo a incerteza da medida ser coerente com a tolerância de manutenção da mesma em função do sistema de aquecimento.

Nesse caso, a dinâmica da variação da temperatura não é tão importante uma vez que todas as condições devem ser mantidas, tanto quanto possível, constantes e que as medições podem ser feitas com intervalos relativamente longos, desde que sejam sempre feitas simultaneamente com as medições de deslocamento. Não pode ser esquecido no entanto, que as medições de temperatura, por terem função de controle, precisam ser amostradas com frequência suficiente para que a temperatura seja mantida dentro da tolerância.

O tipo de multiplexador deve ser cuidadosamente definido, tendo-se em conta que os testes são de grande duração, pois seria lamentável interromper os ensaios em função de problemas com as chaves. Por outro lado a amostragem escolhida deverá também contemplar as necessidades para cumprimento adequado das outras funções gerenciadas pelo sistema gerenciador tais como: efetuar medidas de força para controle da tensão mecânica no cabo em teste e efetuar medições de deslocamento. Como exemplo pode ser lembrado que uma amostragem que corresponda nas chaves a 1 ciclo por segundo, ao longo do ensaio, produziria  $3,6 \times 10^6$  ciclos que é praticamente igual à vida da chave do tipo relê "dry reed" ou do tipo relê eletromecânico.

Por questões práticas o chaveamento escolhido foi o tipo semiconductor, principalmente em função da longa vida que este tipo oferece e apesar da maior resistência de contato fechado.

Foram adotados termopares em função de seu baixo custo, de sua versatilidade e do fato de serem transdutores ativos. Para a faixa de temperatura de interesse (ambiente até 473 K) foi escolhido o termopar tipo J (ferro/constantan). Foram instalados sete termopares (N=7), o sistema de controle da temperatura é contínuo e considerando que o cabo em teste será confinado em um ambiente de 12500 mm x 220 mm x 160 mm, que será isolado termicamente, reservou-se uma tolerância de temperatura de  $\pm 0,5$  K, para atuação do sistema de controle.

Para a compensação dos erros gerados pelo sistema de medição adotado, foi escolhido um sistema de aquisição de sinais adequado para a medição de temperatura e se fez um levantamento do característico de resposta dos transdutores, de forma que as suas não linearidades foram incorporadas ao "software", para serem devidamente compensadas.

O multiprogramador utilizado possui oito canais destinados à medição da temperatura por termopar, com junta fria. O sistema permite que se escolha ou a medição direta em mV para outros fins ou diretamente em Kelvin para a medição de temperatura. No primeiro caso seria necessário levar em conta as diferenças de tensão entre os termopares e a junta fria e implicaria também em uma calibração total. No segundo caso, o sistema possui um

"software" interno que já faz essa comparação e lineariza os termopares.

A calibração consistiu portanto, em se fazer uma segunda linearização dos valores obtidos em três ciclos de medição.

A calibração foi realizada utilizando-se o padrão existente no LAC que é rastreado com incerteza de 0,2 K (termômetro de platina), suficiente portanto para o presente caso onde a incerteza requerida é da ordem de  $\pm 1,5$  K.

Para a calibração, os termopares foram colocados em um bloco de alumínio padronizado, juntamente com a resistência de platina do termômetro padrão, isolados eletricamente entre si e imersos em óleo de silicone. O bloco de alumínio foi então colocado no interior de um forno cuja temperatura máxima era de 473 K. As medições foram efetuadas a várias temperaturas com o próprio sistema de medição da Bancada, isto é, a calibração já levou em consideração todos os erros do sistema de medição da Bancada. Os dados obtidos foram trabalhados em computador (Excel) de forma a se obter polinômios para serem implantados no "software" com o objetivo de efetuar as correções ainda necessárias no erro sistemático.

As incertezas máximas obtidas foram as seguintes:

Termopar 1:  $\pm 1,23$  K; Termopar 2:  $\pm 1,25$  K; Termopar 3:  $\pm 1,21$  K;

Termopar 4:  $\pm 1,12$  K; Termopar 5:  $\pm 1,27$  K; Termopar 6:  $\pm 1,30$  K;

Termopar 7:  $\pm 1,12$  K.

### 5.6.3 Calibração da Célula de Carga

A célula tem uma capacidade de 196200 N, o modelo é 20K, nº 2AG-2980, alimentada por 10 V de corrente contínua fornecida pelo multiprogramador STD-85MP. A célula de carga possui extensômetros colados na sua parte ativa que mudam a sua resistência em função da deformação ocorrida e portanto proporcionalmente à força aplicada. Esses extensômetros estão ligados de forma a constituir uma ponte de Wheatstone que é alimentada pela tensão mencionada de corrente contínua de 10 V fornecida pelo multiprogramador STD-85MP. O sinal gerado em função da variação das resistências dos extensômetros, causadas pelo alongamento dos fios e diminuição da área da seção dos mesmos e de acordo com o módulo de Poisson do material dos mesmos, é muito pequeno (zero a 21,55 mV para 196 kN). Esse sinal é digitalizado pela placa A/D de 20 mV e 12 bits do multiprogramador STD-85MP, portanto pode-se medir até 182093 N e considerando um bit de sinal temos uma resolução de 88,957 N ou 0,00977 mV.

Foi ajustado o valor da tensão de saída da célula para fazer corresponder exatamente 196200 N a 20 mV; bastou para isso mudarmos a tensão de alimentação para 9,281 V, nesse caso a resolução passou a ser de 95,844 N.

A célula de carga foi adquirida com certificado de calibração. Os ensaios de calibração foram feitos em 18/08/92 na UNICAMP em Campinas. O LAC solicitou que os ensaios fossem refeitos na UFPR (LAPEC), o que foi feito em 03/11/92. Ambos os ensaios

revelaram que a célula de carga era praticamente linear para a aplicação em pauta. Posteriormente, após a montagem da célula na Bancada, a mesma apresentou um defeito nas ligações elétricas e em função disso foi enviada ao fabricante (Interface Instrumentação Científica e Industrial Ltda) para reparos e nova calibração.

A incerteza da medida determinada foi de  $\pm 88$  N para toda a faixa, porém para os ensaios de fluência, cuja força aplicada será certamente inferior a 50000 N, a incerteza se reduz para  $\pm 55$  N.

#### **5.6.4 Relação de Transmissão entre o contrapeso e o cabo em teste**

A relação de transmissão entre o contrapeso e o cabo em teste não apresenta grande importância, uma vez que o controle da força é feito pela célula de carga que está diretamente ligada ao cabo em teste. Pode-se, no entanto, determinar aproximadamente essa relação de transmissão, a qual é composta das seguintes transmissões:

Redução do redutor SEW FAF 100:  $T_0 = 84,51:1$ ;

Transmissão entre o tambor (diâmetro  $(0,14+0,00476)$  m) e a polia de saída do redutor (diâmetro  $(0,265+0,019)$  m):  $T_1 = 1,961868$ ;

Transmissão do cabo 3/16" para o contrapeso:  $T_2 = 2$ ;

Transmissão da alavanca:  $T_3 = 0,2$ .

Portanto a transmissão teórica total é de aproximadamente  $T = T_0.T_1.T_2.T_3 = 0,00928$  ou sem a alavanca de aproximadamente 0,04643; como reduções tem-se então respectivamente: 107,6 e 21,5.

Foi tentado obter experimentalmente o valor dessas transmissões da seguinte forma: foi instalado um transdutor de deslocamento com resolução de 1 micrômetro entre a mesa da Bancada e o bloco de ancoragem do cabo junto à célula de carga e do lado do contrapeso a medição foi feita pela leitura do paquímetro solidário à polia do contrapeso em relação à régua de referência solidária à estrutura. Procedeu-se ao aquecimento da amostra de teste já deformada por fluência e as leituras de ambos os deslocamentos no cabo em teste e no contrapeso foram sendo efetuados a cada vez que o regulador da força desligava, isto é, conservando a mesma força de tração a cada leitura. Os testes foram feitos com e sem a alavanca.

Os resultados aproximados foram: 110:1 com a alavanca e 22:1 sem a alavanca.

## **5.7 CONTROLES**

Para os ensaios de fluência, conforme já mencionado, é necessário manter constantes a temperatura no recinto da amostra de teste e a força na amostra. Torna-se necessário um sistema de controle para cada uma dessas grandezas.

### 5.7.1 Sistema de controle da força no cabo

Conforme já descrito, a força no cabo (amostra em teste) é causada pelo peso do contrapeso, no entanto, face aos atritos existentes nos mecanismos utilizados (redutores, alavancas, polias, cabos, mancais, etc.) é necessário criar uma força adicional para vencê-los. Essa força adicional é provida por meio de um servomotor elétrico de corrente contínua e de um servoconversor. O servomotor foi inicialmente instalado atuando diretamente no eixo do tambor do cabo de 3/16" que é também o eixo de torque baixo do redutor; posteriormente, em função do excesso de atrito encontrado, em especial com o sistema trabalhando sem a alavanca, foi incluído um redutor SEW com redução de 19:1 para facilitar o trabalho do servomotor. O torque de rotor bloqueado do motor é de 5,2 Nm (9,5 A de corrente e constante de torque de 0,55 Nm), o diâmetro do tambor é de 0,15 m e em consequência, sem o novo redutor, resultaria uma força no cabo de 3/16" de 66,67 N. O contrapeso é sustentado por duas pernas do cabo, portanto a força máxima do motor corresponderia a 133,34 N no contrapeso. Considerando a relação de transmissão entre o contrapeso e a amostra em teste, da ordem de 110:1, tem-se uma força no cabo em teste da ordem de 15000 N. Com o novo redutor, porém reduzindo a corrente de rotor bloqueado ao mínimo, pode-se aumentar essa força para cerca de 90000 N.

Inicialmente foi previsto um controle proporcional, que detectaria a diferença entre a força desejada e a força medida pela célula de carga, convertida para tensão elétrica e, proporcionalmente a esse valor seria fornecida uma tensão entre 0 e  $\pm 10$  V ao servomotor que corrigiria a força no cabo do valor necessário para zerar a diferença. Ao longo dos ensaios verificou-se no entanto, ser mais prático fazê-lo descontínuo, aproveitando o grande atrito que se verificou existir conforme mencionado. Desta forma a diferença referida atua o motor com torque suficiente, ajustado pelo "software", até que se anule, desligando o servomotor quando isso ocorrer. O servomotor voltará a ser ligado somente quando a força na célula de carga sair fora de uma faixa de tolerância determinada. Esse procedimento, extremamente fácil de implantar no "software", permite que o sistema fique desligado por longo tempo e portanto trabalhe frio, devido à estabilidade considerável criada pelo atrito.

Considerando-se que a resolução do conversor A/D é de 95,84 N, pode-se adotar como faixa de tolerância o intervalo de  $\pm 2$  resoluções, ou seja o motor volta a ser ligado quando a força for 191,69 N maior ou menor do que a força desejada, o que considerando a tolerância de norma ( $\pm 2\%$ ), define 9585 N como sendo a menor força a ser usada. Para forças menores dever-se-á utilizar uma nova célula de carga (50000 N) que permitirá melhorar a resolução para um valor 4 vezes menor.

## 5.7.2 Controle da Temperatura

Não existe ainda uma norma que regulamente os ensaios a altas temperaturas. Para temperaturas ambientes (entre 293 e 303 K ) é estabelecida uma tolerância de  $\pm 2$  K. Tendo em vista a influência da temperatura nos deslocamentos medidos, foi decidido, como primeira tentativa, adotar essa mesma tolerância também para as altas temperaturas.

Foram instalados sete termopares uniformemente distribuídos ao longo do recinto fechado da Bancada. O computador lê os valores de temperatura, digitaliza, calcula a correspondente média e compara com o valor especificado de temperatura. Proporcionalmente à essa diferença o computador atua, depois de reconverter o sinal para analógico, um regulador de tensão, o qual então, permite o aquecimento das resistências.

A dificuldade que surge com esse tipo de controle é que à medida que a diferença de temperaturas entre a temperatura especificada e a média verificada decresce, decresce também a potência fornecida às resistências, a qual, a partir de um determinado momento se torna inferior à potência perdida pelas paredes do recinto controlado, estabelecendo então um erro estacionário que se agrava à medida que cresce a temperatura especificada. Para contornar esse problema, uma das hipóteses seria a de introduzir um parcela a cada amostragem que produziria um valor acumulado, somado ao valor proporcional

acima mencionado, que cresceria enquanto a temperatura especificada não fosse atingida e passaria a decrescer tão logo o fosse, após um determinado tempo o valor acumulado se estabilisaria no valor necessário para equilibrar as perdas, mantendo a temperatura no valor especificado. Esse procedimento eqüivale a um circuito integrador analógico e o principal problema que apresenta é a oscilação inicial até que se estabilize. O sistema de controle adotado para compensar o erro estacionário foi estabelecido a partir da observação experimental e consiste no seguinte: somar à tensão proporcional enviada ao regulador de tensão, uma parcela proporcional à diferença entre a temperatura especificada e a temperatura da junta fria. A constante de proporcionalidade foi estabelecida em função das diferenças reais verificadas. Tratando-se de uma parcela constante, poderia ocorrer um superdimensionamento que fizesse a temperatura crescer continuamente, por isso foi estabelecida no "software" a condição de que se a temperatura sobrepassasse 1,005 da temperatura especificada, a tensão enviada ao regulador de tensão seria zerada. Com esse procedimento a temperatura sobe rapidamente em função da parcela fixa adicionada e esbabiliza sem sobrepassagens. O programa computacional prevê o registro dos valores máximo e mínimo ocorridos, que definem a tolerância com que a temperatura foi mantida constante, que é da ordem de  $\pm 0,1$  K, quando excluídos os acidentes de percurso. No entanto, para se evitar que erros eventuais de leitura que podem ocorrer em sistemas digitais e que poderiam comprometer os resultados,

os valores são calculados a partir das medias registradas em períodos de cerca de 30 amostras.

## 6 RELAÇÃO ENTRE O PROJETO E OS ENSAIOS DE FLUÊNCIA

Para propor uma metodologia para ensaios de fluência a altas temperaturas se torna necessário o conhecimento dos problemas relativos ao projeto de uma linha de transmissão, dos recursos passíveis de serem oferecidos pela Bancada de testes e naturalmente dos resultados obtidos nesses testes.

Conforme já mencionado é necessário que os resultados obtidos possam ser extrapolados para a vida da linha de transmissão de forma a poder subsidiar e otimizar de fato o seu projeto.

### **6.1 PROJETO DA LINHA DE TRANSMISSÃO**

Para o projeto de uma linha de transmissão, o tipo do cabo a ser utilizado deverá ser escolhido em função de um desempenho especificado, de forma a otimizar os custos, tendo-se em conta entre outros fatores, a potência máxima a ser transportada pela linha, o regime de utilização da mesma, a tensão elétrica escolhida, a distância de transporte, as vibrações mecânicas e curto circuitos entre fase e terra e entre fase e fase.

### 6.1.1 Determinação do Comprimento dos Cabos Entre Torres

A partir da escolha do cabo tem-se à disposição os seguintes dados correspondentes aos cabos e ao vão entre torres considerado:

$n_a$  = Número de fios de alumínio;

$n_s$  = Número de fios de aço;

$d_a$  = Diâmetro dos fios de alumínio;

$d_s$  = Diâmetro dos fios de aço;

$p_{ea}$  = Peso específico do alumínio [N/dm<sup>3</sup>];

$p_{es}$  = Peso específico do aço [N/dm<sup>3</sup>];

$E_a$  = Módulo de elasticidade do alumínio [N/mm<sup>2</sup>];

$E_s$  = Módulo de elasticidade do aço [N/mm<sup>2</sup>];

$F_r$  = Força de ruptura do cabo [N];

$k$  = Coeficiente de segurança;

$t_i$  = Temperatura mínima em Kelvin;

$t_{inst}$  = Temperatura de instalação do cabo;

$t_m$  = Temperatura máxima em Kelvin;

$\alpha_a$  = Coeficiente de dilatação térmica linear do alumínio [K<sup>-1</sup>];

$\alpha_s$  = Coeficiente de dilatação térmica linear do aço [K<sup>-1</sup>];

$k_{flu}$  = Coeficiente de fluência. A fluência esperada ao longo da vida da linha de transmissão é dada em função de ensaios de laboratório, por exemplo na Bancada construída no LAC;

$v$  = Velocidade máxima esperada do vento [km/h];

$\beta$  = Constante aerodinâmica típica do cabo;

A = Vão entre as duas torres [m];

B = Desnível entre os pontos de suspensão [m].

A partir desses dados pode-se calcular os seguintes valores:

Área da seção transversal em alumínio  $S_{ca}$  [mm<sup>2</sup>]

$$S_{ca} = \pi \cdot n_a \cdot d_a^2 / 4 \quad (\text{eq. 6.1})$$

Área da seção transversal em aço  $S_{cs}$  [mm<sup>2</sup>]

$$S_{cs} = \pi \cdot n_s \cdot d_s^2 / 4 \quad (\text{eq. 6.2})$$

Área da seção transversal total  $S_c$  [mm<sup>2</sup>]

$$S_c = S_{ca} + S_{cs} \quad (\text{eq. 6.3})$$

Peso por unidade de comprimento do alumínio, a 293 K [N/m]

$$p_a = S_{ca} \cdot p_{ea} \cdot 10^{-3} \quad (\text{eq. 6.4})$$

Peso por unidade de comprimento do aço, a 293 K [N/m]

$$p_s = S_{cs} \cdot p_{es} \cdot 10^{-3} \quad (\text{eq. 6.5})$$

Peso total por unidade de comprimento do cabo a 293 K [N/m]

$$p = p_a + p_s \quad (\text{eq. 6.6})$$

O efeito da temperatura pode ser considerado multiplicando-se o comprimento obtido por  $(1+\alpha\Delta t)$  onde  $\Delta t=t_f-t_i$  sendo  $t_f$  a temperatura do cabo em repouso e  $t_i$  a temperatura mais fria em que se supõe que o cabo vá trabalhar (ocasião em que a tensão no cabo será máxima) e  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação térmica linear do material do cabo considerado.

Peso por unidade de comprimento do alumínio à temperatura mínima [N/m]

$$p_{a0} = p_a(1+\alpha_a(t_i-293)) \quad (\text{eq. 6.7})$$

Peso por unidade de comprimento do aço à temperatura mínima [N/m]

$$p_{s0} = p_s(1+\alpha_s(t_i-293)) \quad (\text{eq. 6.8})$$

Peso por unidade de comprimento do cabo completo à temperatura mínima [N/m]

$$p_0 = p_{a0}+p_{s0} \quad (\text{eq. 6.9})$$

Diâmetro do cabo  $d$  [mm]

$$d = 1,1494 [4(S_{ca} + S_{cs}) / \pi]^{0,5} \quad (\text{eq. 6.10})$$

Força do vento por unidade de comprimento do cabo [N/m]. O efeito do vento pode ser incluído como se fosse peso unitário, utilizando-se o conceito de peso virtual [30].

$$p_v = 0,0000045\beta dv^2 \quad (\text{eq. 6.11})$$

O peso virtual será dado por:

$$p_{v0} = (p_v^2 + p_0^2)^{0,5} \quad (\text{eq. 6.12})$$

que corresponde à força total devida ao peso e ao vento [N/m]

Pode-se calcular o comprimento  $L_0$  do cabo, suposto ideal, isto é, sem deformação, pela expressão a seguir, obtida considerando-se que o cabo suspenso se posicionará conforme uma catenária [30] [60]:

$$L_0 = 2C_0 \sinh\left(\frac{A}{2C_0}\right) \quad (\text{eq. 6.13})$$

$C_0$  é a constante da catenária, dada por:

$$C_0 = \frac{H}{p_{v0}} \quad (\text{eq. 6.14})$$

H é a força horizontal aplicada ao cabo, no ponto de suspensão.

A é o vão entre os apoios das extremidades do cabo, consideradas no mesmo nível.

A força **F** realmente aplicada às extremidades do cabo é a resultante entre a força horizontal **H**, a força devida ao peso próprio do cabo que se exerce verticalmente e a força devida ao vento.

$$F = \sqrt{\left(\frac{L_0 p_{v0}}{2}\right)^2 + H^2} \quad (\text{eq. 6.15})$$

Essa força deverá ser igual à força admissível estabelecida.

$$F = F_r / k \quad (\text{eq. 6.16})$$

Onde  $k$  é o coeficiente de segurança.

A partir das expressões: (6.13), (6.14) e (6.15) obtém-se:

$$C_0 = \frac{F}{p_{v0} \cosh\left(\frac{A}{2C_0}\right)} \quad (\text{eq. 6.17})$$

Calcula-se  $C_0$  iterativamente dando-se valores para  $C_0$  no segundo membro da expressão (6.17), até que o valor de  $C_0$  obtido seja o mesmo.

Caso se tenha um desnível **B** entre as torres (veja figura 6.1) dispõe-se das seguintes expressões:

$$K_1 = C_0 \cosh\left(\frac{A_1}{2C_0}\right) = \frac{F_1}{p_{v0}} \quad (\text{eq. 6.18})$$

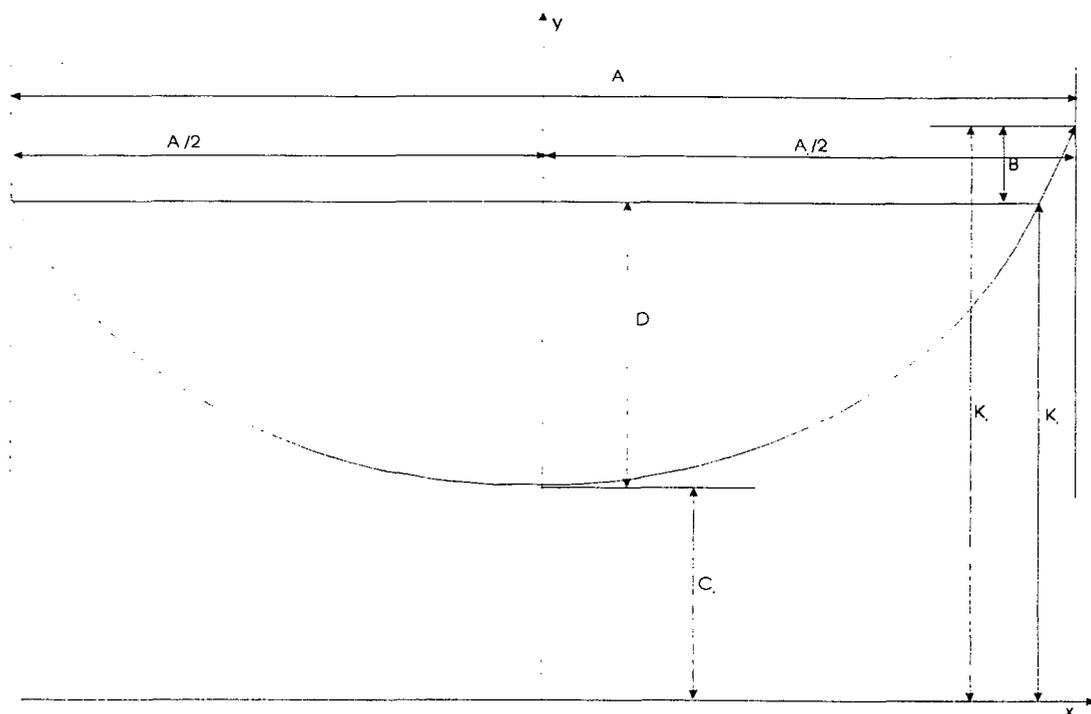
$$K_2 = C_0 \cosh\left(\frac{A_2}{2C_0}\right) = \frac{F_2}{p_{v0}} \quad (\text{eq. 6.19})$$

$$B = K_2 - K_1 \quad (\text{eq. 6.20})$$

A partir dessas expressões pode-se fazer na expressão (6.17) a seguinte aproximação:

$$F = F_2 - \frac{Bp_{v0}}{2} \quad (\text{eq. 6.21})$$

o que equivale aproximadamente a considerar a mesma catenária para o vão  $A_0$  sem desnível.



**Figura 6.1 - Configuração do vão com desnível**

A seguir pode-se calcular  $C_0$  conforme já indicado e, conseqüentemente o valor de  $H$ .

Conforme inicialmente suposto o valor de  $C_0$  calculado é a constante da catenária para um cabo ideal.

Para um cabo real se deverá levar em conta a deformação ocorrida no mesmo. Pode-se escrever:

$$\frac{St - St_0}{St_0} = \frac{F_m}{S_c E} \quad (\text{eq. 6.22})$$

Onde  $F_m$  é a força média no cabo;

St e St<sub>0</sub> são, respectivamente, os comprimentos do cabo tracionado e não tracionado;

E é o módulo de elasticidade equivalente:

$$E = (S_{ca} \cdot E_a + S_{cs} \cdot E_s) / S_c \quad (\text{eq. 6.23})$$

Após a deformação o peso total do cabo não muda, mas o seu peso por metro p passa a ser menor do que p<sub>0</sub> e a força horizontal diminui.

$$St \cdot p = St_0 \cdot p_0 \quad \text{ou} \quad p = p_0 \cdot St_0 / St \quad (\text{eq. 6.24})$$

Pode-se neste caso recuperar a força horizontal esticando mais o cabo. A nova constante da catenária C será:

$$C = H / (p^2 + p_v^2)^{0,5} \quad (\text{eq. 6.25})$$

Portanto maior. Pode-se calcular C a partir de C<sub>0</sub>, iterativamente, pela fórmula seguinte obtida em [30]:

$$C(C - C_0) = \frac{C_0 H \left[ A + C \sinh\left(\frac{A}{C}\right) + \frac{B^2}{C} \cot gh\left(\frac{A}{2C}\right) \right]}{4 S c E \sqrt{\sinh^2\left(\frac{A}{2C}\right) + \left(\frac{B}{2C}\right)^2}} \quad (\text{eq. 6.26})$$

Na seqüência pode-se determinar o comprimento do cabo St<sub>0</sub>, equivalente em repouso, à temperatura mínima, pela expressão a seguir também dada em [30]:

$$St_0 = C_0 \sqrt{4 \sinh^2\left(\frac{A}{2C}\right) + \left(\frac{B}{C}\right)^2} \quad (\text{eq. 6.27})$$

Pode-se também determinar o comprimento do cabo  $St$ , em repouso à temperatura de 293 K, que será de  $St_0 \cdot p_0/p$ .

A partir das considerações acima poder-se-á determinar o comprimento de cabo necessário para linha de transmissão.

### 6.1.2 Determinação da força horizontal necessária para instalação do cabo.

É necessário conhecer qual a força horizontal que deverá ser aplicada nos cabos durante a instalação. Para isso calcula-se o comprimento do cabo já determinado na temperatura em que ocorrerá a instalação, da mesma forma que já foi feito para a temperatura de 293 K:

$$P_{tinst} = P_{atinst} + P_{stinst} \quad (\text{eq. 6.28})$$

$$St_{tinst} = \text{peso} / P_{tinst} \quad (\text{eq. 6.29})$$

A seguir calcula-se a nova constante da catenária dada pela expressão a seguir também obtida em [30]:

$$\left(2 * C * \sinh\left(\frac{A}{2 * C}\right)\right)^2 + B^2 = \frac{St_{tinst}^2 * P_{tinst} * \left(A + C * \sinh\left(\frac{A}{C}\right) + \frac{B^2}{C} * \cot \operatorname{gh}\left(\frac{A}{2 * C}\right)\right)}{4 * sc * E * \sqrt{\left(\sinh\left(\frac{A}{2 * C}\right)\right)^2 + \left(\frac{B}{2 * C}\right)^2}} + St_0 * \sqrt{\left(2 * C * \sinh\left(\frac{A}{2 * C}\right)\right)^2 + B^2}$$

$$(\text{eq. 6.30})$$

A força horizontal para instalação será dada então por:

$$H_{tinst} = C \cdot p_{tinst} \quad (\text{eq. 6.31})$$

### 6.1.3 Determinação da flecha máxima que poderá ocorrer

Para o projeto das torres de transmissão torna-se necessário determinar a flecha máxima que poderá ocorrer num determinado vão.

Semelhantemente ao que já foi exposto, pode-se calcular os valores necessários na temperatura máxima, assim:

$$p_{af} = p_a (1 + \alpha_a (-t_m + 293)) \quad (\text{eq. 6.32})$$

$$p_{sf} = p_s (1 + \alpha_s (-t_m + 293)) \quad (\text{eq. 6.33})$$

$$p_{tf} = p_{af} + p_{sf} \quad (\text{eq. 6.34})$$

Assim o comprimento do cabo à temperatura máxima será:

$$St_f = \text{peso} / p_{tf} \quad (\text{eq. 6.35})$$

considerando neste caso também o peso virtual devido ao vento temos:

$$p_{tfv} = (p_{tf}^2 + p_v^2)^{.5} \quad (\text{eq. 6.36})$$

Finalmente pode-se considerar o efeito da fluência ao longo da vida da linha de transmissão, simplesmente aplicando o coeficiente obtido nos testes de fluência realizados:

$$st_{ff} = st_f k_{flu} \quad (\text{eq. 6.37})$$

Calcula-se a seguir a constante da catenária  $C_f$  à temperatura máxima com a fluência e a força do vento devidamente consideradas utilizando a mesma expressão (6.30) conforme [30].

A força horizontal no cabo à temperatura máxima, já incorporando o efeito da fluência, e com vento máximo será:

$$H_f = p_{tfv} \cdot C_f \quad (\text{eq. 6.38})$$

A curva descrita pela catenária correspondente, sem considerar o desnível, será dada por:

$$y_f = C_f \cdot \text{Cosh}[x_f/C_f] - C_f \quad (\text{eq. 6.39})$$

A flecha máxima será dada por:

$$y_{fm} = C_f \cdot \text{Cosh}[A/2C_f] - C_f \quad (\text{eq. 6.40})$$

Para considerar o desnível pode-se deslocar os pontos de suspensão sobre o traçado da catenária até que se verifique uma diferença entre as correspondentes ordenadas igual ao desnível existente.

A abcissa da catenária pode ser dada pela expressão:

$$x = C_0 \cdot \arccos\left(\frac{y + C_0}{C_0}\right) \quad (\text{eq. 6.41})$$

Para  $y_2 = y_{\text{máx}} + B/2$  tem-se a abcissa correspondente a um desnível  $B/2$

$$x_2 = C_0 \cdot \arccos\left(\frac{y_2 + C_0}{C_0}\right) \quad (\text{eq. 6.42})$$

Da mesma forma para  $y_1 = y_{\text{máx}} - B/2$  tem-se a abcissa correspondente a um desnível  $-B/2$

$$x_1 = C_0 \cdot \arccos\left(\frac{y_1 + C_0}{C_0}\right) \quad (\text{eq. 6.43})$$

#### 6.1.4 Exemplo de Cálculo

Foi elaborado um programa computacional, utilizando-se o "software" MATHEMATICA (versão 2.2), para o cálculo dos valores das grandezas referentes a este capítulo.

Esse software foi aplicado ao caso de um vão entre torres de transmissão de 400 m, com desnível de 10 m, onde foi aplicado um cabo com 26 fios de alumínio com diâmetro de 4,45 mm e 7 fios de aço na alma com diâmetro de 3,45 mm. A temperatura mínima esperada é de 273 K, a temperatura máxima esperada é de

423 K, a temperatura de instalação é de 303 K e a velocidade máxima do vento prevista é de 100 km/h.

O "software", os cálculos e resultados correspondentes estão apresentados no apêndice 2.

### **6.1.5 Comentários**

Resumem-se abaixo os resultados do exemplo apresentado em 6.1.4 e apêndice 2:

Inicialmente, em função da tensão admissível e considerando os esforços devidos ao vento e ao peso próprio, foi calculado o comprimento de cabo necessário para um vão dado que pode ou não apresentar um desnível, à temperatura mínima esperada. A seguir, em função da dilatação térmica, foram calculados os comprimentos do cabo à 293 Kelvin para auxiliar a sua especificação e à temperatura de instalação do cabo para a determinação da força horizontal a ser utilizada na instalação do mesmo. Finalmente foram calculados o comprimento do cabo à temperatura máxima, adicionando-se inclusive o efeito da fluência, a força horizontal mínima que será a menor força atuante no cabo e as flechas que poderão ocorrer. Esses valores permitirão otimizar o projeto das torres de transmissão. Os valores são os seguintes:

Comprimento do cabo em repouso a 273 K: 401,065 m;

Comprimento do cabo em repouso a 293 K p/ facilitar a especificação: 401,215 m;

Comprimento do cabo em repouso na temperatura da instalação: 401,29 m;

A flecha máxima na temperatura mínima com ventos: 13,858 m;

A flecha máxima na temperatura da instalação, s/ventos: 14,673 m;

A força horizontal que deverá ser aplicada na instalação: 21457 N;

Comprimento do cabo em repouso na temperatura máxima: 402,191 m;

Comprimento do cabo em repouso na temperatura máxima considerando a fluência: 402,473 m;

Força horizontal à temperatura máxima, s/vento, c/fluência. Essa força será a menor à qual o cabo será submetido: 16063 N;

Flecha máxima, com temperatura máxima, com ventos e com fluência: 19,7817 m;

Flecha máxima, com temperatura máxima, com ventos e sem fluência: 18,7054 m;

## **6.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS**

A Bancada foi concluída em setembro de 1995, tendo sido nessa ocasião iniciadas as primeiras tentativas de realização de um ensaio de fluência completo. Foi detectada a partir desse momento, a necessidade de vários ajustes, tanto nos mecanismos da Bancada propriamente dita quanto no "software".

No início de maio de 1996, finalmente, a Bancada foi considerada adequada para um ensaio de longa duração e no dia 23 de maio de 1996 foi iniciado um ensaio de fluência com uma amostra de um cabo termoresistente fornecido por um fabricante de cabos. O teste foi interrompido com 44 horas devido à falta de energia elétrica no local por várias horas. Em consequência disso foram realizados novos ajustes no sistema para que em tais casos, pelo menos fosse preservada a amostra de ensaio. Somente a partir de 16 de julho de 1996 foi realizado um ensaio de 1000 horas, cujos resultados são analisados a seguir.

### **6.2.1 Incidentes ocorridos ao longo do ensaio:**

Com 4 horas e 30 minutos após o início do teste (às 22horas), o conversor do servomotor que mantém constante a carga de teste desabilitou o servomotor. O fato só foi percebido às 8 horas do dia seguinte, portanto 10 horas depois, quando foi restabelecida a habilitação do mesmo.

Com 44 horas e 24 minutos após o início do teste, foram registradas leituras irregulares da junta fria. Este fato por

si só não causa inconvenientes tendo em vista as proteções introduzidas no "software", no entanto a mesma causa provocou também, pelo menos, três leituras consecutivas de força erradas, indicando excesso de tração, atuando a proteção do sistema de contrapeso, fazendo com que fosse aliviada a carga. O sistema retomou a seguir a carga e em menos de 3 minutos já se apresentava normalizado.

Com 261 horas e 11 minutos decorridos após o início do teste faltou energia elétrica. Cerca de 9 minutos após a temperatura média caiu 4,5 K e conseqüentemente em função da contração do cabo, a força cresceu para 35096 N (acréscimo de 3% da carga teórica tolerado pelas normas técnicas), atuando a proteção de sobrecarga e fazendo descer o contrapeso (atuação com a bateria do motor de cc acoplado ao motoredutor). Na seqüência devido à queda na temperatura média, a proteção de sobrecarga voltou a atuar mais duas vezes. 30 minutos depois a energia voltou por apenas alguns instantes (menos de 1 minuto) e voltou a faltar. Somente com 262 horas e 20 minutos a energia voltou para permitir a recuperação das condições normais de teste. Com 264 horas e 3 minutos a energia voltou a faltar por 1,5 minutos, sem no entanto afetar os resultados.

Com 381 horas e 1 minuto decorridos após o início do teste ocorreram erros de leitura da junta fria e da carga de teste, fazendo atuar a proteção de sobrecarga do sistema de contrapeso. O sistema retomou a carga em seguida e em menos de 2 minutos já se apresentava normalizado.

■ Com 689 horas e 16 minutos decorridos após o início do teste faltou energia por poucos instantes, sem no entanto afetar o ensaio.

Com 881 horas e 48 minutos decorridos após o início do teste, faltou novamente energia por cerca de 9 minutos. O sistema de proteção de sobrecarga voltou a atuar.

### **6.2.2 Avaliação dos resultados obtidos**

A figura 6.2 apresenta os resultados do ensaio de uma forma geral com escala logarítmica para a abcissa (tempo) e escala linear para as demais variáveis representadas em ordenada. Para adequar a escala da ordenada os valores das temperaturas foram divididas por 10 e os valores de força foram divididos por 1000.

- A figura 6.3 caracteriza as variações ocorridas no período em que o servoconversor foi desabilitado. A fluência não se manifesta como deslocamento, que aliás se mantém constante, mas sim como diminuição na força de tração. Ao reabilitar o motor a fluência recomeça como se tivesse havido uma pausa na sua ação. Pode-se observar nitidamente na figura 6.4 que é possível traçar duas retas paralelas características das tendências do fenômeno da fluência, uma antes da desabilitação e outra depois. Esse fato comprova de certa maneira as afirmações de Harvey e Larson [12] já citadas no capítulo 4 e justifica o procedimento nos ensaios de dilatação térmica de tensionar a amostra de ensaio, imediatamente antes do teste, acima da tensão de teste por 30

minutos para em seguida relaxar para a tensão de teste, evitando-se assim de ter-se uma parcela de deslocamento devida à fluência nos resultados.

- O comportamento das variáveis durante a falta de energia ocorrida, pode ser observado na figura 6.5. Uma observação interessante a se fazer a partir dos dados da figura é quanto à correlação entre as variações da temperatura, da força e do deslocamento. Por exemplo: Considerando-se o início do teste observa-se que: nos primeiros 10 minutos a carga varia de 6798 N (693 kgf) para 33923 N (3458 kgf) e produz um alongamento de 20,08 mm, nos 10 minutos subseqüentes com a tensão constante o alongamento aumenta por fluência 0,5 mm. Subtraindo-se esse alongamento por fluência do alongamento dos 10 primeiros minutos pode-se estimar o alongamento elástico que será de 0,00708 mm/9,81N. Considerando-se agora que por ocasião da falta de energia, com o esfriamento da temperatura média de 4,5 K a força no cabo aumentou de 1087 N (110,77 kgf) e o deslocamento diminuiu de 0,08 mm (correspondente a 111 N (11,3 kgf) de acordo com o alongamento elástico calculado), tem-se 266 N/K (27,13 kgf/K) e conseqüentemente 0,192 mm/K para 12 m de vão ou  $16 \cdot 10^{-6}$  m/m/K que seria o coeficiente de dilatação linear do cabo. Esse exemplo procura apenas salientar as correlações mencionadas. Para se determinar o valor correto do coeficiente de dilatação linear deverão ser realizados na Bancada testes específicos para isso, conforme apêndice 3.

Ensaio de Fluência - FURUK7 - Geral  
Escala Logarítmica

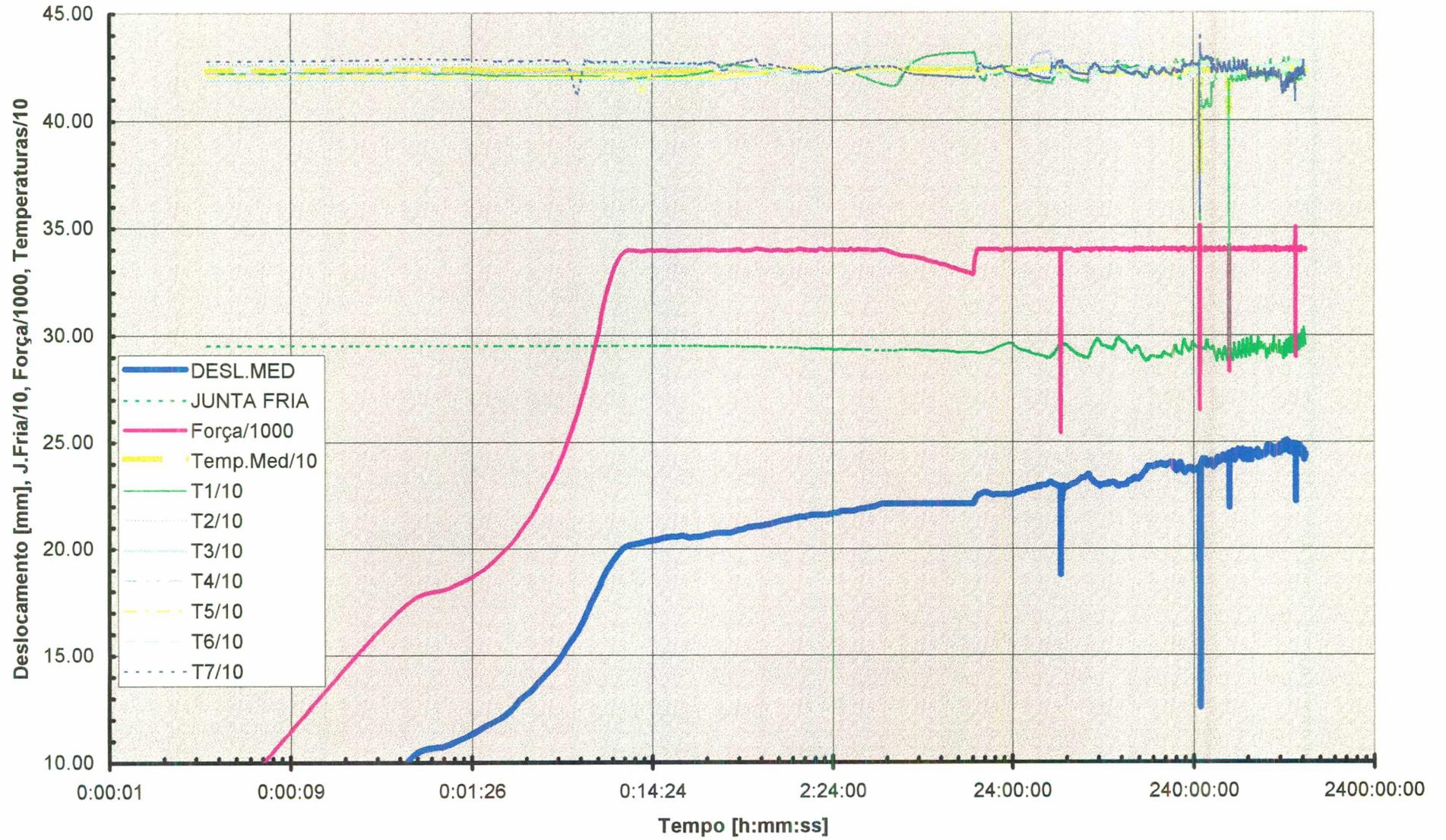
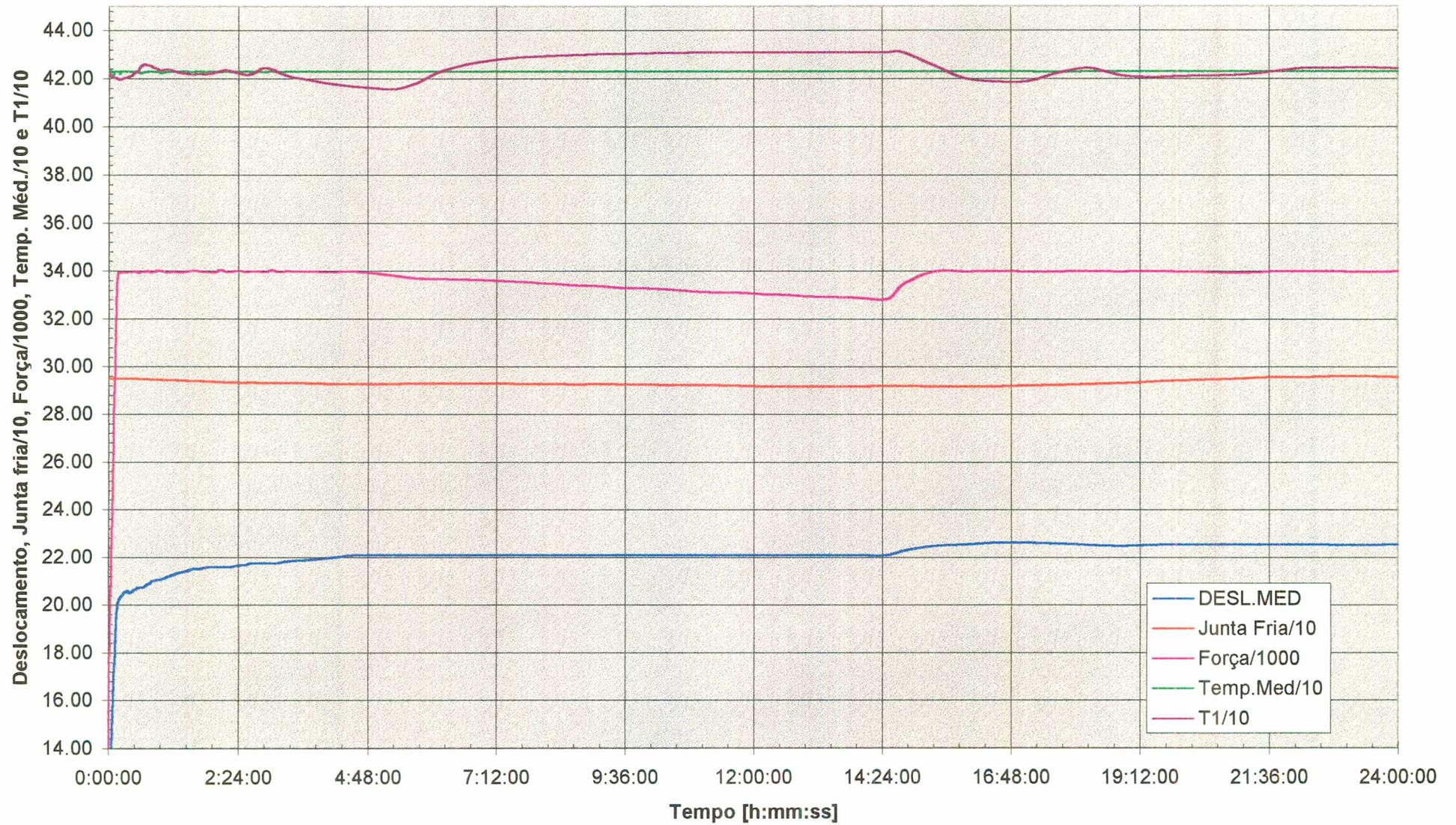
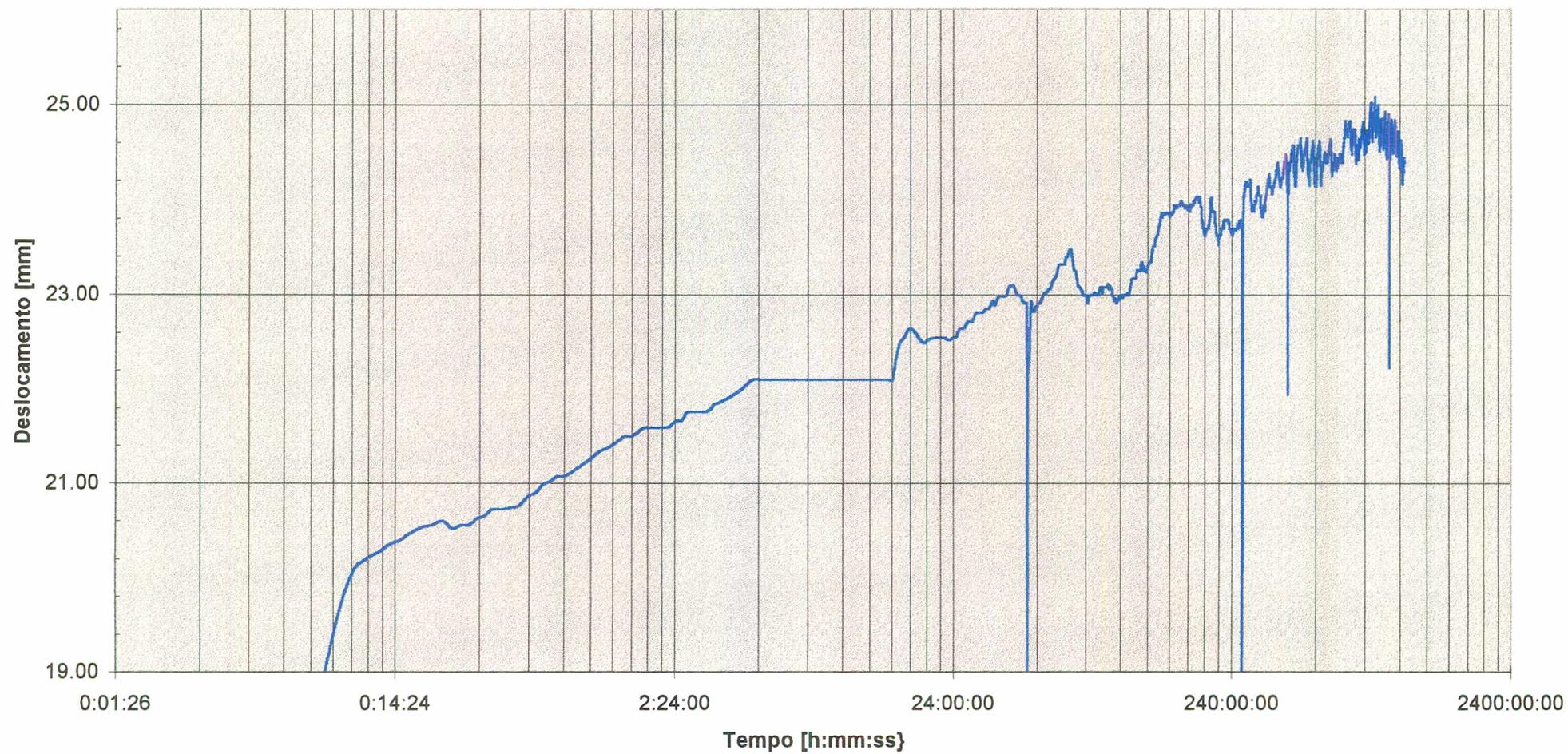


Figura 6.2

### Ensaio de Fluência - FURUK7 - Primeiras 24 horas Desabilitação do Servomotor



**Ensaio de Fluência - FURUK7 - Deslocamento  
1000 horas - esc. logarítmica**



Ensaio de Fluência - FURUK7 - Deslocamento, J.Fria/10, Força/1000, Temp.Média/10 e T1/10 Durante a falta de energia

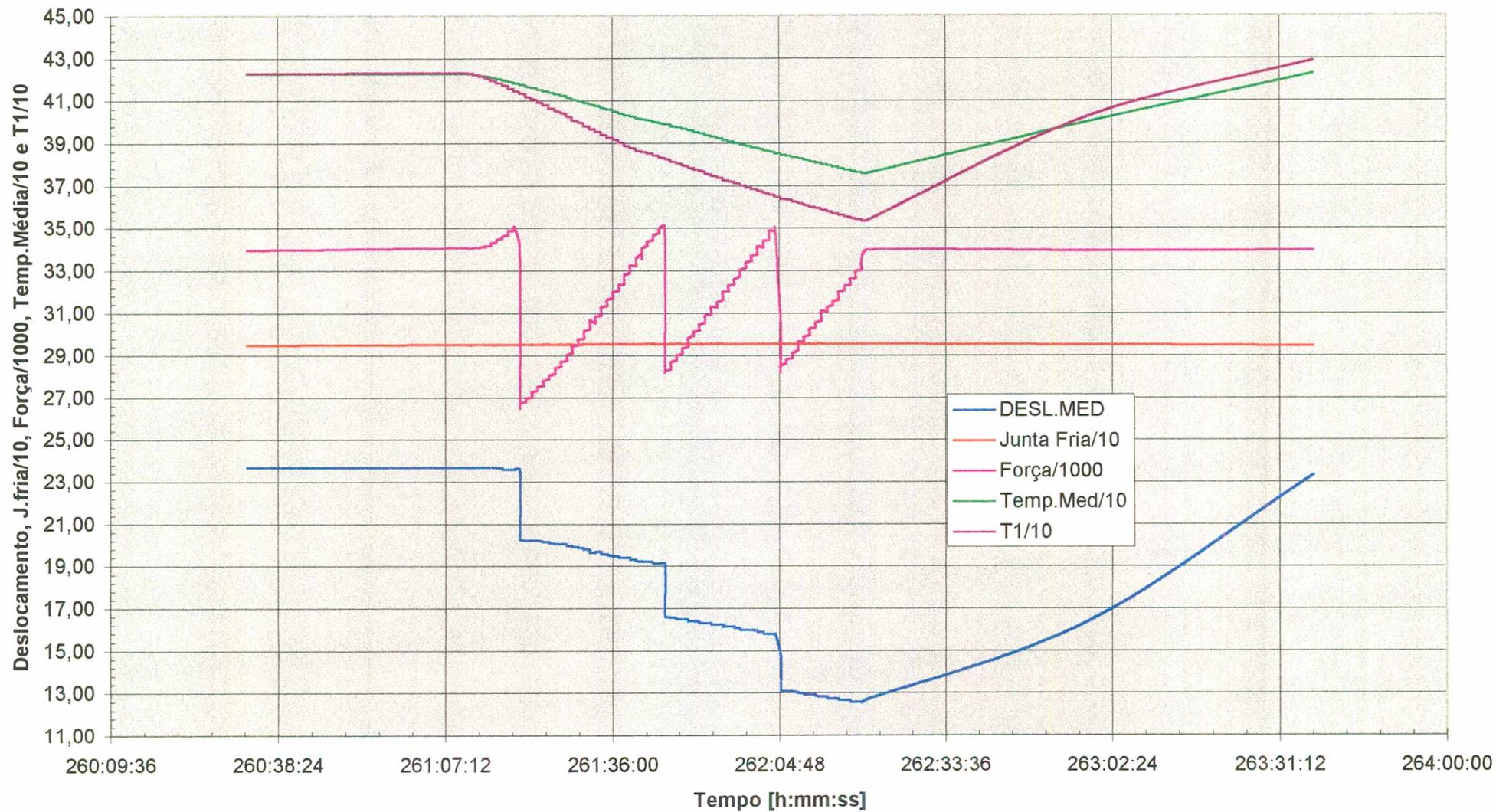
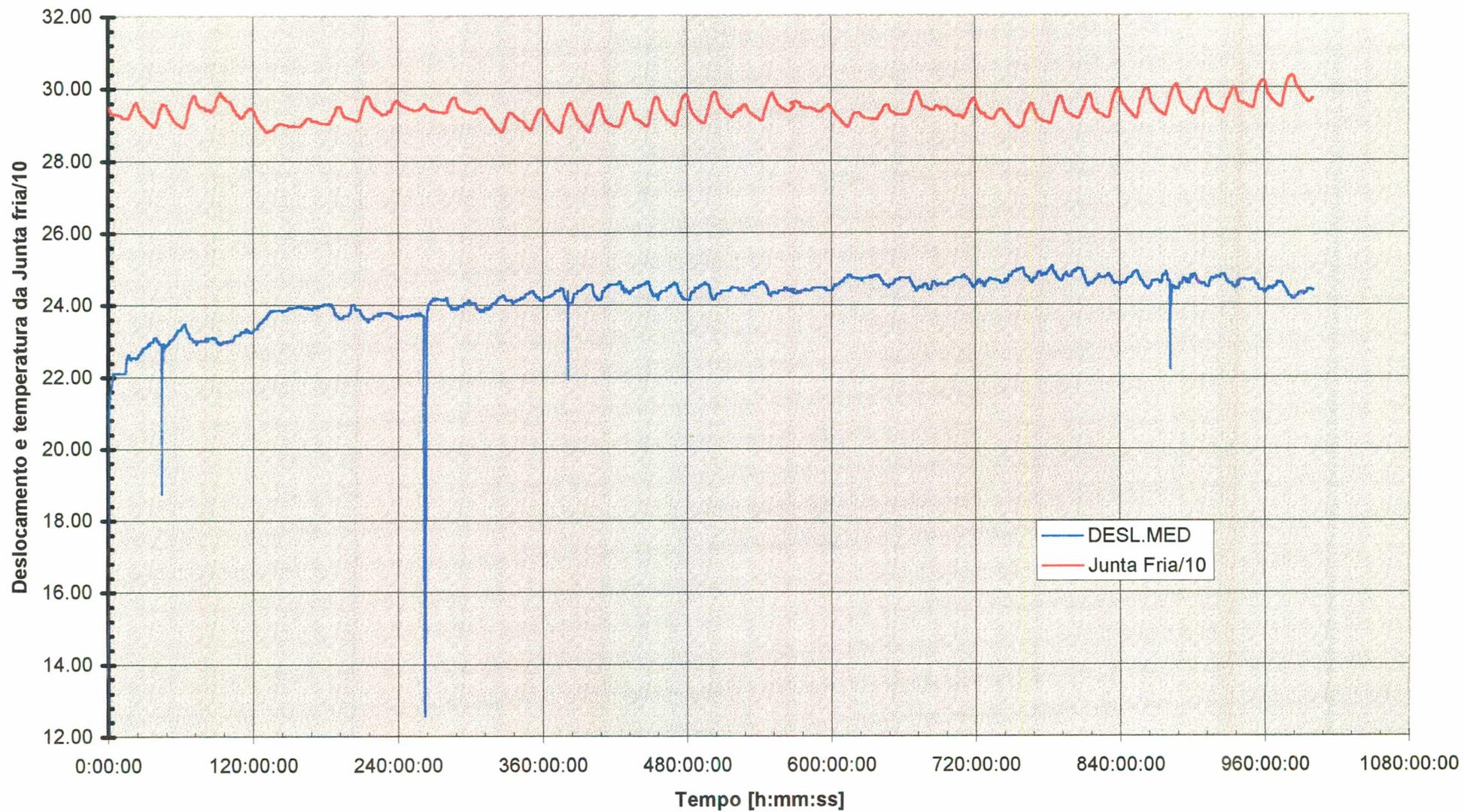


Figura 6.5

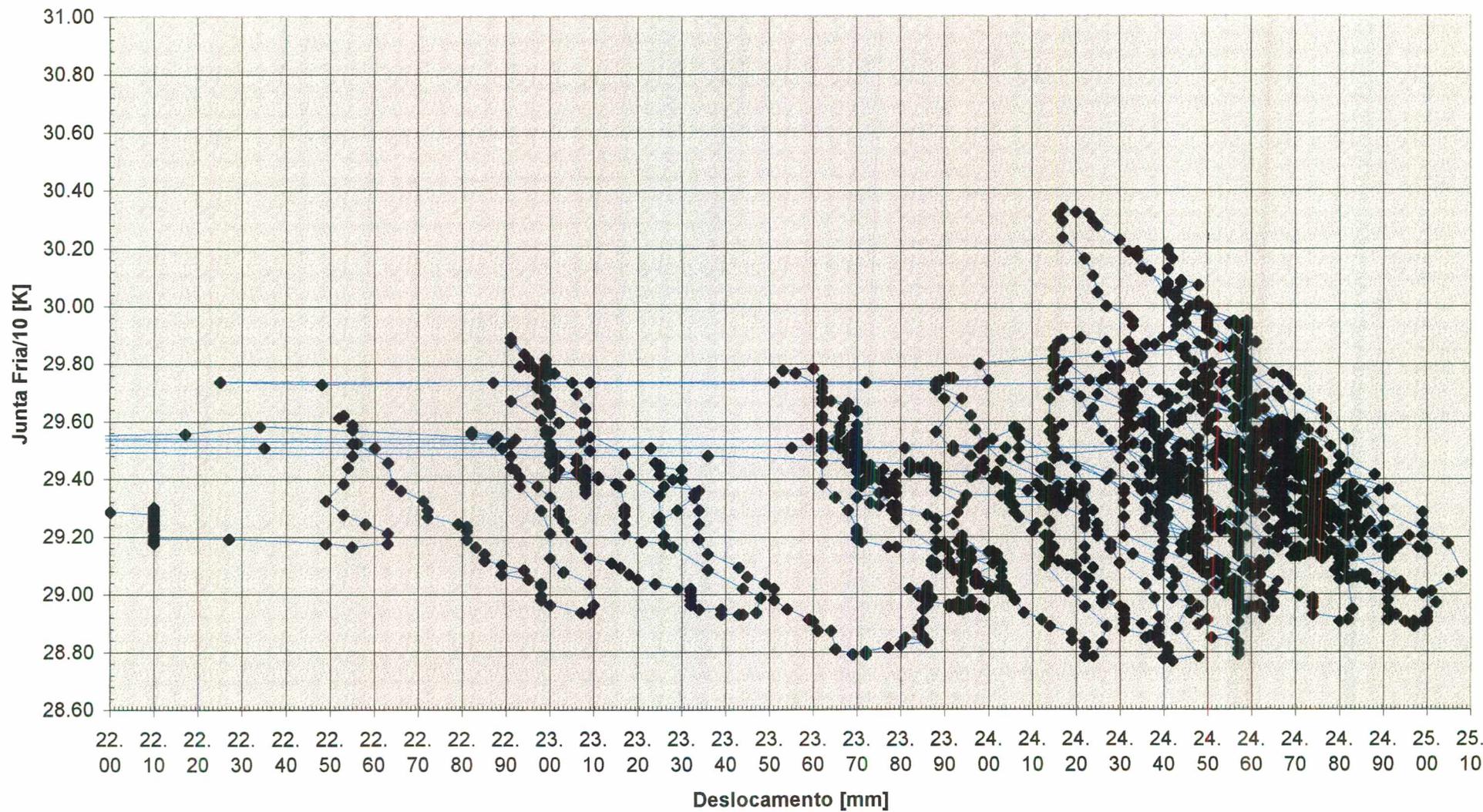
- Conforme pode-se observar na figura 6.6, o deslocamento varia em função da variação da temperatura da junta fria. Na figura 6.7 traça-se a correlação entre essas duas variáveis mostrando claramente essa influência. Na figura 6.8 apresenta a mesma variação ocorrida nas primeiras 100 horas de ensaio. Este fato se deve à configuração dos termopares. O regulador da temperatura age de forma muito precisa em função da média das temperaturas medidas pelos termopares, essa média é mantida constante com tolerância inferior a um décimo de Kelvin. Ao variar a temperatura ambiente, que em última análise é a temperatura da junta fria, os termopares situados próximos às extremidades variam também devido à condução de calor pelo cabo para fora do recinto controlado que depende da diferença de temperatura com o ambiente; pode-se observar esse fato na figura 6.9. Assim, por exemplo, se a temperatura da junta fria diminuir, diminuirão também as temperaturas medidas pelos termopares situados próximos às extremidades do ambiente controlado e para que a temperatura média não varie, o regulador fornecerá mais calor, aumentando as temperaturas dos termopares situados longe das extremidades, modificando desta forma, em função da configuração dos termopares, o valor da dilatação térmica total sofrida pela amostra de teste. A figura 6.10 mostra a relação verificada entre as temperaturas e as figuras 6.11 e 6.12 mostram a relação do deslocamento com a temperatura da junta fria em escala logarítmica, para as primeiras 100 horas e para o ensaio completo respectivamente.

- Outro fato já esperado é que o valor da fluência foi bastante pequeno, pois o cabo testado tem uma alma de aço. Com a elevação da temperatura o alumínio dilata-se mais que o aço (o coeficiente de dilatação do alumínio é cerca de duas vezes maior que o do aço), portanto a uma dada temperatura o esforço antes suportado pelo alumínio passará a sê-lo pelo aço e a fluência medida passará a ser predominantemente a fluência do aço que é pequena.
- A figura 6.13 mostra a variação da fluência na primeira hora de ensaio.

Ensaio de Fluência - FURUK7 - Relação de sensibilidade do deslocamento com a junta fria - 1000 horas - escala linear



Ensaio de Fluência - FURUK7 - Correlação entre Junta Fria e Deslocamento  
Período de 0 a 1000 horas



Ensaio de Fluência - FURUK7 - Deslocamento, J.F., força e Temp.média  
100 horas - esc. linear

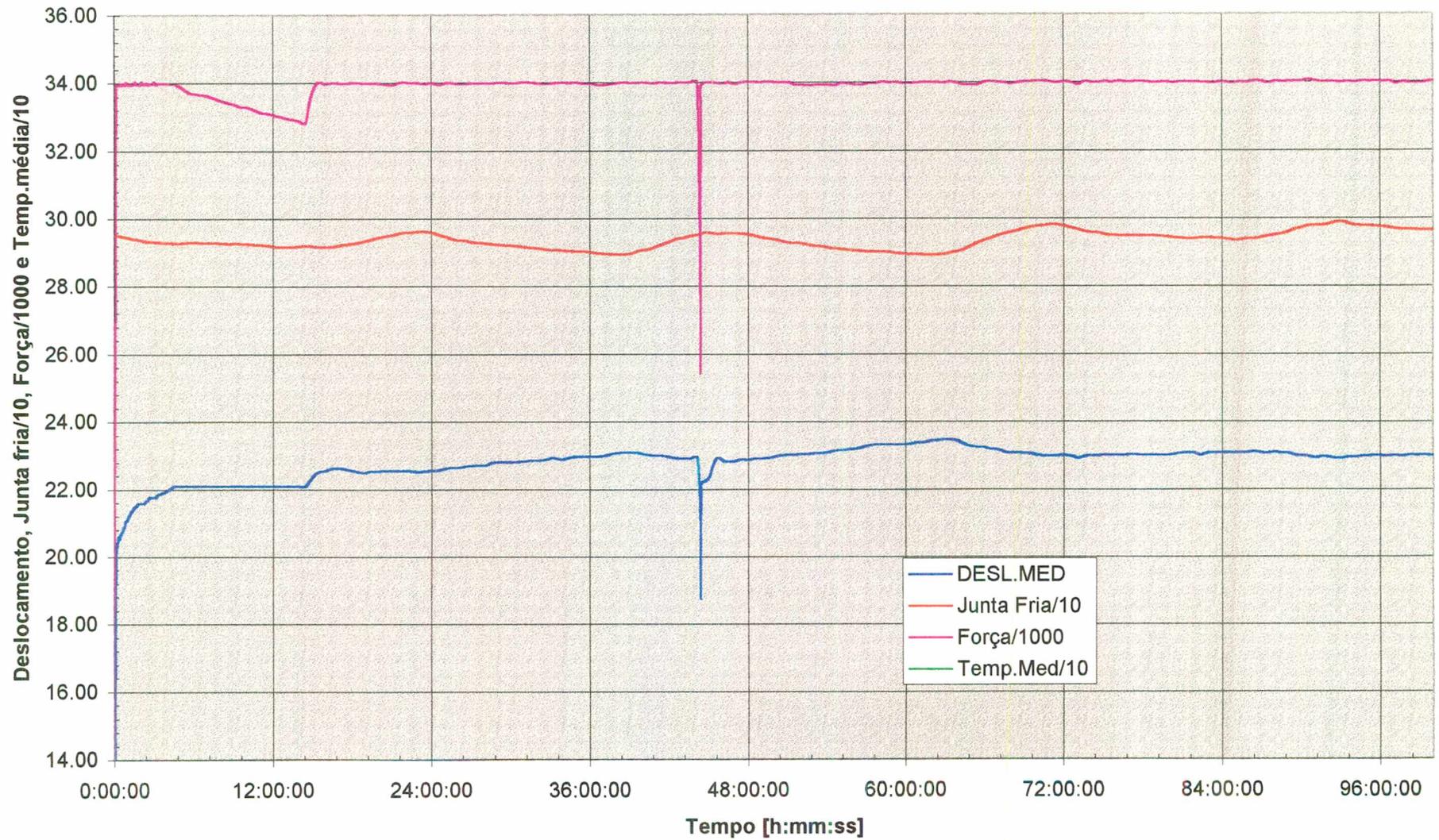


Figura 6.8

### Ensaio de Fluência - FURUK7 - Relação da sensibilidade das temperaturas com a junta fria

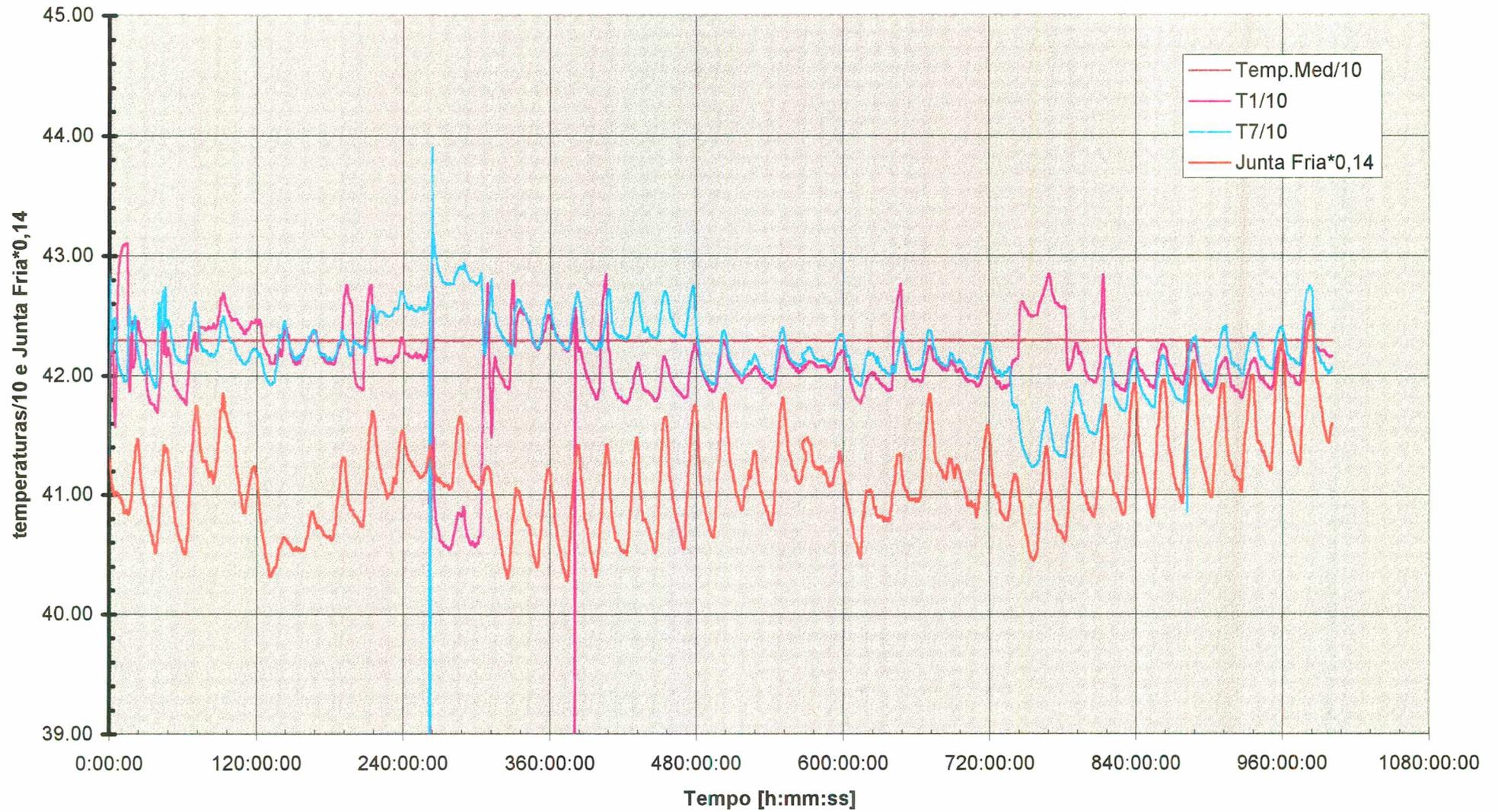
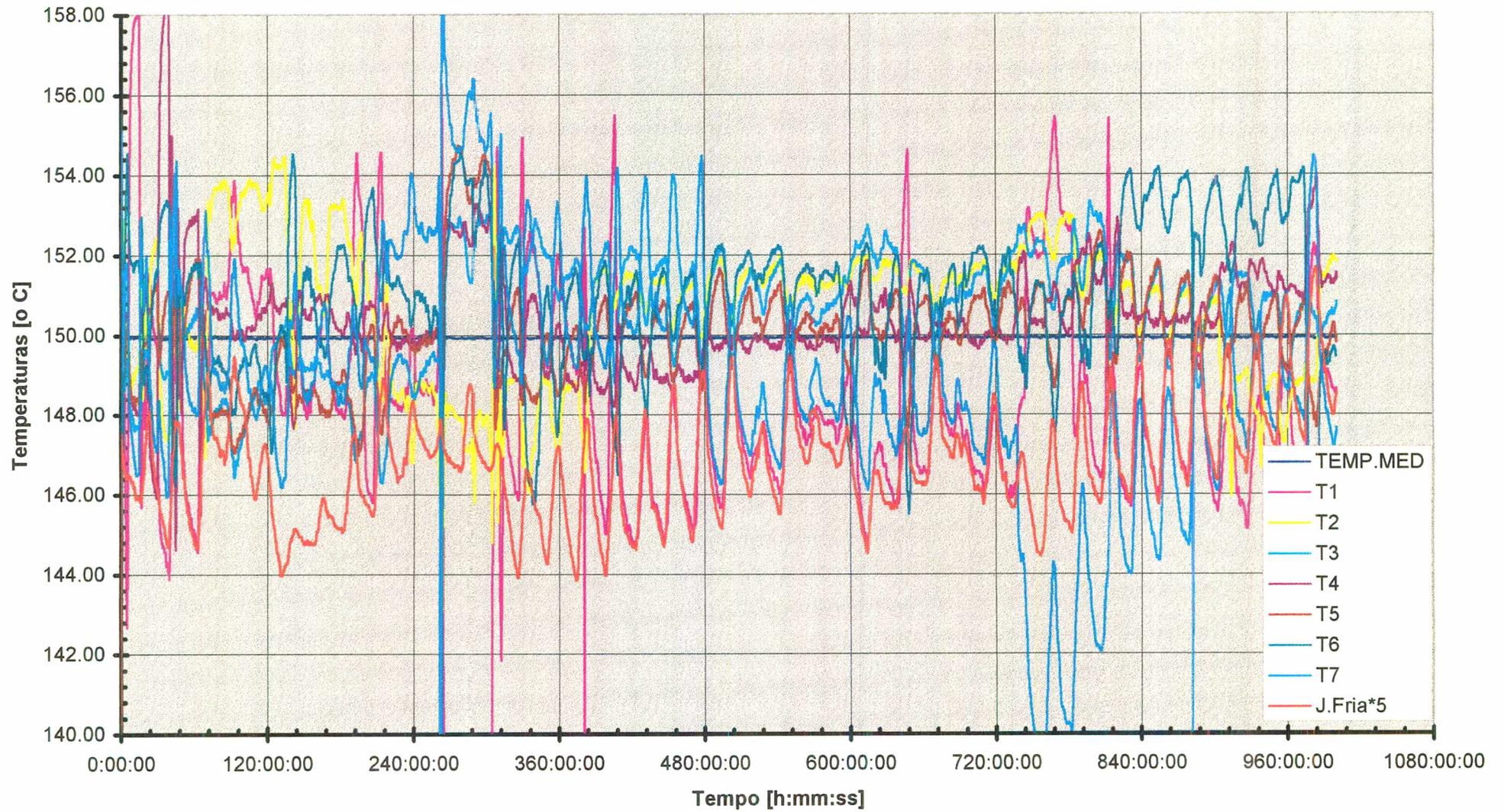
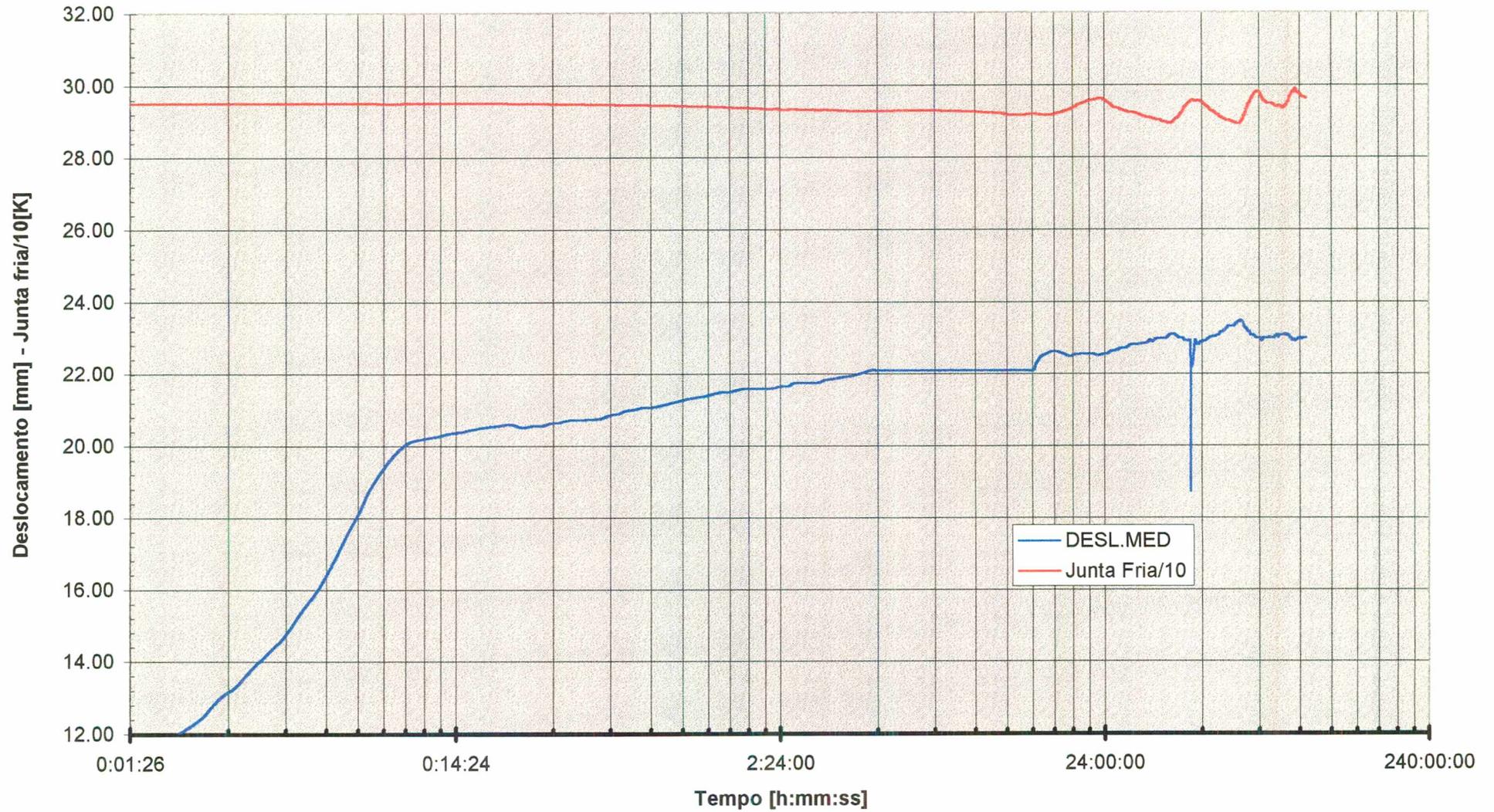


Figura 6.9

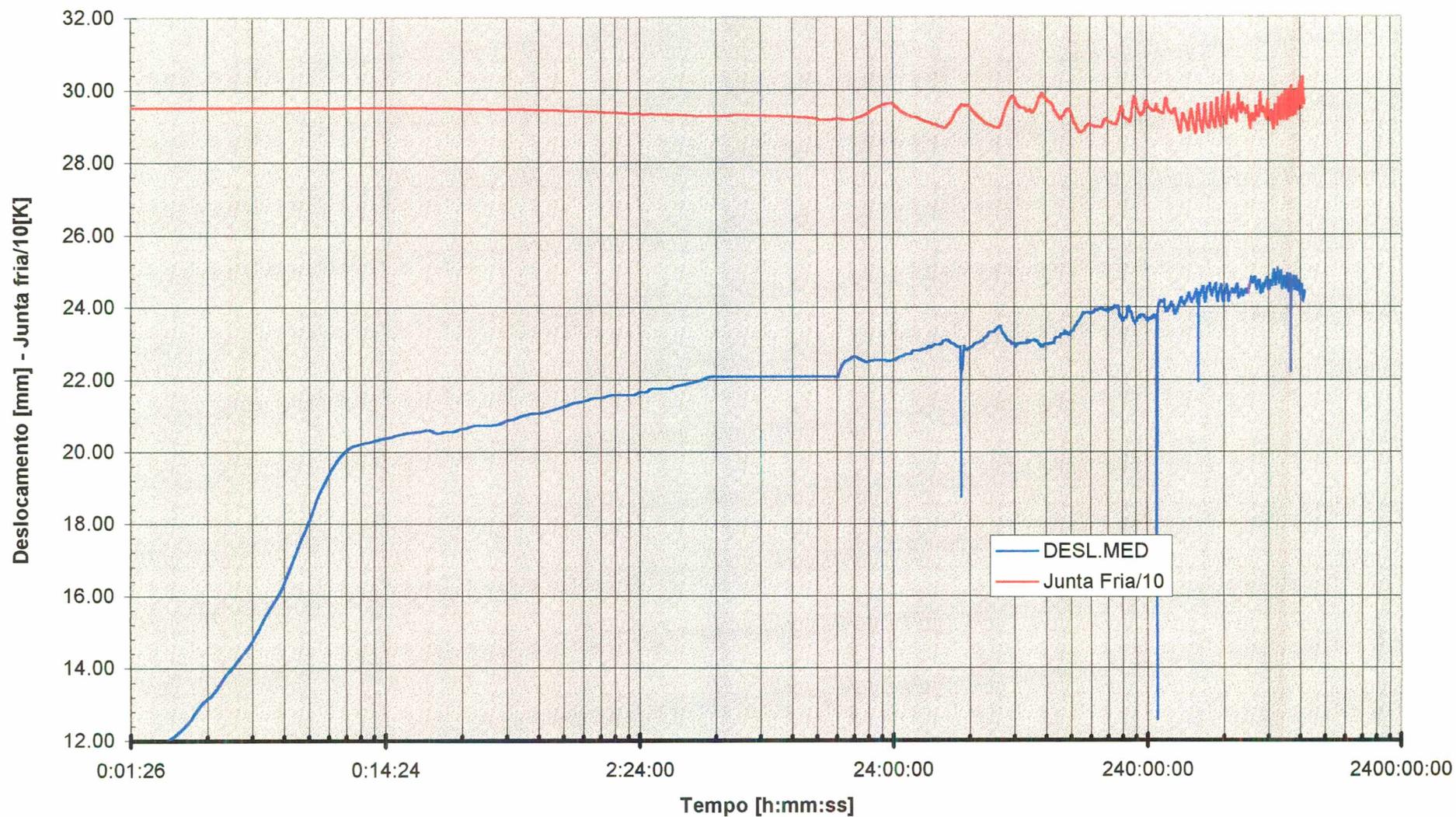
Ensaio de Fluência - FURUK7 - Temperaturas [grau Celsius]  
Escala Linear



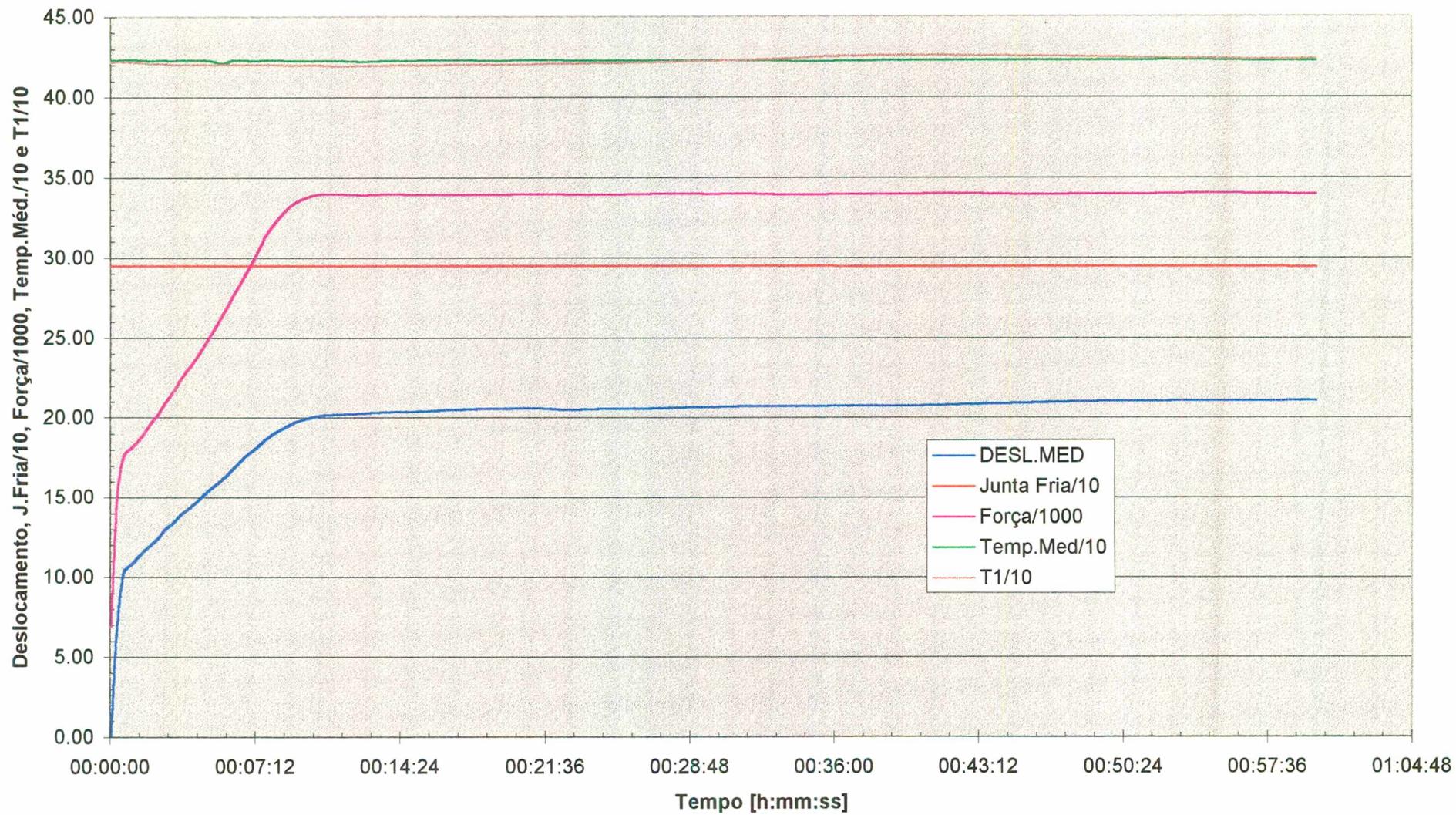
### Ensaio de Fluência - FURUK7 - Deslocamento 100 horas - logarítmica



### Ensaio de Fluência - FURUK7 - Deslocamento - 1000 horas - logarítmica



### Ensaio de Fluência - FURUK7 - Primeira hora



### 6.3 DISCUSSÃO DOS RECURSOS DA BANCADA DE ENSAIO

Conforme exposto em 5.7.1, a Bancada permite que se mantenha a amostra de teste tensionada com uma força constante dentro de uma tolerância absoluta de  $\pm 191,69$  N.

O sistema de medição de forças se revelou muito estável e sensível às variações ocorridas. O servomecanismo de correção da força igualmente apresenta um funcionamento estável e preciso.

Para o ensaio realizado a força teórica a ser mantida era de 34008 N (3466,68 kgf), o que corresponde para a tolerância absoluta mencionada  $\pm 0,564\%$ , portanto plenamente satisfatória já que se permite variações de até  $\pm 2\%$ .

Para uma força teórica de 9584 N (977 kgf) a tolerância de  $\pm 191,69$  N representará  $\pm 2\%$ . Para forças de tração ainda menores tem-se que diminuir a tolerância absoluta.

Na Bancada construída, sem modificações dos seus componentes, isto somente poderá ser feito mudando-se no "software" os limites para atuação do servomotor para  $\pm 1$  resolução do valor digitalizado da força medida, o que corresponderia a dividir a tolerância por dois.

Pode-se também tornar menor essa tolerância utilizando-se uma nova célula de carga de menor capacidade conforme já assinalado em 5.7.1.

Foi decidido então adquirir uma nova célula de carga com faixa de 0 a 50000 N(4 vezes menor). Portanto com a nova célula e com a mudança apontada no "software" ter-se-á uma tolerância 8 vezes menor ( $\pm 24$  N) e poder-se-á ensaiar cabos com força teórica igual ou acima de 1200 N.

O servoconversor foi desabilitado uma vez durante o ensaio devido a uma suposta sobrecarga ou sub-tensão. O fabricante do servomotor foi consultado a respeito e informou que a desabilitação ocorrida se deve a uma sensibilidade exagerada do conversor a surtos normais na rede elétrica. Disse ainda que esse defeito já foi corrigido nas novas unidades e colocou-se à disposição para corrigi-lo também no servoconversor da Bancada.

Foi decidido também adquirir um novo conversor do fabricante que além de contornar esse problema, permitirá manter um conversor sobressalente.

Pode-se constatar também a grande sensibilidade dos transdutores de deslocamento. No item 5.6.1 viu-se que a resolução destes transdutores era bem melhor que o valor mínimo recomendável. Essa resolução ficou ainda melhor face ao fato de se considerar as médias dos valores medidos.

Para solucionar o problema apontado em 6.2.2 que se refere à sensibilidade das medidas de deslocamento com a junta fria, foram instalados para os próximos ensaios pelo menos mais dois reguladores de potências menores (3 a 4 kW) fazendo-os atuar

por região (dois reguladores controlarão as extremidades que consomem maior potência e o terceiro controlará a região interna).

Adicionalmente será necessário controlar o ambiente onde se encontra a Bancada (ar condicionado). A instalação de ar condicionado será importante também no verão quando a temperatura do ambiente cresce em consequência das perdas de calor produzidas no aquecimento do cabo, pondo em risco o desempenho dos equipamentos para automação da medição.

Foi decidida também a compra de cartões eletrônicos sobressalentes e outros componentes para garantir a continuidade dos ensaios.

#### **6.4 CONCLUSÕES DESTE CAPÍTULO**

Conforme se pode observar neste capítulo a deformação resultante do cabo durante os testes de fluência, após a fase transitória inicial, se compõe de uma deformação elástica variável proporcional à variação da força de tracionamento ( $\pm 191,69$  N), de uma deformação variável proporcional à variação da temperatura ( $\pm 2$  K) em consequência da dilatação térmica, dependendo inclusive da distribuição das temperaturas ao longo do cabo em teste e de uma deformação plástica proporcional à força de tração média, à temperatura média e ao tempo como consequência do fenômeno da fluência.

Sabe-se também que, na prática, os cabos nas linhas de transmissão de energia em alta tensão sofrem tensões e temperaturas extremamente variáveis e que, portanto, não são comparáveis aos valores mantidos constantes em teste.

Em contrapartida observa-se pelos resultados obtidos e analisados em 6.2 e também pela literatura pertinente [12] que, a fluência é cumulativa e apresenta um efeito de memória, conforme já relatado no capítulo 4, tanto com relação à força de tração quanto com relação à temperatura. Este fato faz com que a deformação devida à fluência acabe por ser proporcional à temperatura média e à força média ocorridas durante a vida da linha e ao tempo correspondente a essa vida. Em qualquer caso podemos dizer que os valores de fluência obtidos nos testes e extrapolados para a vida da linha são perfeitamente possíveis de ocorrer desde que se espere o tempo suficiente para isso, o qual, provavelmente, será maior do que a vida estimada.

Considerando-se os resultados do ensaio, as incertezas de medida de deslocamento, força e temperatura obtidas e as tolerâncias de controle de força e temperatura e ainda as providências adicionais sugeridas, que já estão em fase final de implantação, pode-se estimar, a partir do "software" desenvolvido em 6.1.1, que a variação da flecha de uma linha de transmissão de 400 m de vão é da ordem de 100 mm. Fica desta forma caracterizado que os resultados obtidos com a Bancada,

são coerentes e possuem incerteza suficiente para permitir a otimização do projeto.

## 7 METODOLOGIA PARA ENSAIOS DE FLUÊNCIA A ALTAS TEMPERATURAS

A partir das observações efetuadas no capítulo 6, desde que sejam corrigidas as falhas mencionadas e tendo-se em conta os resultados do ensaio realizado e o projeto dos vãos entre torres de linhas de transmissão, podemos estabelecer uma metodologia de ensaios de fluência a altas temperaturas (até 473 K), que até o presente ainda não foram normalizados, a qual passamos a descrever.

### **7.1 ESCOPO**

A metodologia aqui proposta descreve os procedimentos para determinação, através de ensaios em Bancada, da fluência a altas temperaturas de condutores utilizados em linhas de transmissão de alta tensão, com suficiente precisão para que os resultados possam ser extrapolados para o tempo de vida útil da linha de transmissão, com o objetivo de otimizar o projeto dessas linhas.

Os resultados dos ensaios deverão ser obtidos em condições mantidas constantes durante a realização dos mesmos, e portanto, devem ser compreendidos como aproximações dos valores reais que ocorrem em condições extremamente variáveis, em cabos que, devido a variações nas condições de fabricação, são diferentes das amostras testadas e que são, por essas razões, imprevisíveis.

## **7.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO**

As amostras deverão ser preparadas conforme descrito em 5.4 levando-se em conta a norma pertinente[26]

## **7.3 BANCADA DE ENSAIOS**

Conforme exposto em 5.2.6, considera-se importante que a Bancada de ensaios seja automatizada. A vantagem do sistema automatizado é que as medições de uma amostragem são efetuadas dentro de um tempo bastante reduzido que é o próprio período de amostragem, sendo que todos os valores medidos poderão ser considerados registrando-se as suas respectivas médias a cada intervalo de medição. Esse fato torna os valores medidos excepcionalmente consistentes, reduzindo-se consideravelmente a dispersão da medição. Por outro lado o sistema automatizado permite que se faça a correção por "software" do erro sistemático. Em consequência desses fatores é possível se determinar a linha de tendência da fluência, que é uma reta quando o tempo é representado em escala logarítmica, com testes de menor duração. Com a automatização do ensaio a duração do ensaio de fluência poderá ser reduzida de 1000 horas para 100 horas.

A Bancada deverá possuir um vão útil de pelo menos 12 m e ser adequada à instalação de amostras dos vários tipos de cabos normalmente utilizados, permitindo que se fixe uma das

extremidades da amostra e que se tensione a outra extremidade através de um dispositivo adequado, capaz de manter constante, automaticamente, dentro de  $\pm 2\%$ , a força de tração especificada entre 15 e 30% da RMC dos cabos normalmente utilizados. Esse objetivo pode ser alcançado com um sistema de contrapeso, alavancas, redutores, polias, etc. e um servomecanismo (célula de carga para medição da força e atuador) para regular a força na amostra. Sugere-se que o servomecanismo seja descontínuo, aproveitando o grande atrito que se verifica existir nos sistemas com redutores conforme exposto em 5.7.1.

A amostra deverá ser instalada dentro de um recinto isolado termicamente equipado com reguladores de temperatura de tal forma que se possa aquecer e manter constante uma temperatura especificada entre a temperatura do ambiente e 473 K com uma tolerância de  $\pm 1,5$  K. É importante considerar que se deve não apenas medir a temperatura, mas também controlá-la, pois trata-se de ensaios de longa duração e durante a sua execução a temperatura deverá ser mantida constante. Essa exigência impõe que a temperatura seja medida com maior rigor, devendo a incerteza da medida ser coerente com a tolerância de manutenção da mesma em função do sistema de aquecimento. Para compensar o erro estacionário característico do controle de temperatura contínuo, pode ser estabelecido no "software", a partir da observação experimental, o procedimento adotado para a Bancada e já exposto em 5.7.2.

Conforme já exposto em 5.6.2.4 para os ensaios de fluência a dinâmica da variação da temperatura não é tão importante uma vez que todas as condições devem ser mantidas constantes tanto quanto possível e que as medições podem ser feitas com intervalos relativamente longos, desde que sejam sempre feitas simultaneamente com as medições de deslocamento. Não pode ser esquecido no entanto, que as medições de temperatura, por terem função de controle, precisam ser amostradas com frequência suficiente para que a temperatura seja mantida dentro da tolerância.

Por outro lado a amostragem escolhida deverá também contemplar as necessidades para cumprimento adequado das outras funções gerenciadas pelo sistema gerenciador tais como: efetuar medidas de força para controle da tensão mecânica no cabo em teste e efetuar medições de deslocamento.

Por questões práticas o chaveamento deve ser do tipo semicondutor, principalmente em função da longa vida que este tipo oferece e apesar da maior resistência de contato fechado.

Especial cuidado deverá ser tomado para evitar a sensibilidade das extremidades da amostra às variações da temperatura do ambiente (manter a temperatura do ambiente controlada e instalar reguladores específicos para as extremidades). Conforme já assinalado, para os testes de fluência o aquecimento não precisa ser rápido, porém precisa ser controlado de forma a manter constante a temperatura de teste especificada. Pode-se portanto, para o aquecimento, utilizar

resistências elétricas distribuídas convenientemente ao longo do recinto controlado.

A Bancada deverá permitir que se possa medir, automaticamente, o aumento do comprimento a intervalos de tempo previamente especificados, de forma a se detectar as deformações elásticas e permanentes ocorridas, com um grau de precisão compatível com a extrapolação dos resultados para a vida da linha de transmissão (30 a 50 anos). É recomendada uma incerteza de medição de 10 mm em 1 km ( $10^{-5}$ m/m ou 0,001%);

Os sensores de deslocamento deverão ser instalados nas extremidades do vão de ensaio, fora do recinto da amostra e atuados por hastes firmemente fixadas na amostra para diminuir a influência da temperatura alta na medição. O deslocamento medido será a diferença entre as leituras dos dois sensores.

Os instrumentos deverão ser calibrados a partir de padrões rastreados e devidamente corrigidos para que a incerteza da medição desses instrumentos seja compatível com as exigências das normas.

Devemos ainda lembrar que a resolução recomendada é relativa, o que torna importante saber com razoável certeza a distância entre os dois transdutores.

Com esse objetivo devem ser instaladas réguas junto aos transdutores e devem ser medidas as distâncias entre os mesmos valores das réguas com instrumentos adequados.

Os testes devem poder ser conduzidos de forma a obter os resultados dentro das condições normalizadas ou recomendadas, quando da ausência de normas, qualquer que seja o tipo de cabo condutor de alta tensão (de alumínio, alumínio com alma de aço) ou do tipo que também tem a função de comunicação (fibra ótica);

Tendo em vista a longa duração dos ensaios de fluência seria desejável que a Bancada permanecesse operando mesmo durante eventuais períodos de falta de energia elétrica, no entanto o correspondente custo aumentaria significativamente. Nas regiões onde haja a possibilidade de interrupção no fornecimento de energia elétrica se deverá instalar um "no-break", que poderá fornecer energia para os instrumentos, para o controlador programável e para o sistema gerenciador por pelo menos 2 horas adicionais. Essa providência permite apenas que se continuem as medições e que se detecte os efeitos da interrupção de energia, permitindo avaliar se os testes realizados com estas interrupções podem ser ou não validados. No caso de interrupção de energia não será possível manter o aquecimento do cabo em teste na temperatura estabelecida nem corrigir eventuais variações na força de tração da amostra de teste. No caso de ensaios com temperaturas acima da temperatura ambiente a falta de energia elétrica provocará o esfriamento do cabo e conseqüentemente, dependendo da solução construtiva adotada, em

função do atrito o cabo contrairá e fará aumentar a força de tração. Para não invalidar o ensaio deverá ser prevista uma proteção de sobrecarga que fará descer o contrapeso por ação de um motor de corrente contínua acoplado ao motoredutor, atuado pela bateria do "no break".

A Bancada deve ser facilmente operável, e as operações que exigem emprego de força devem ser automatizadas e/ou facilitadas;

Durante a instalação da amostra de ensaio se poderá tracionar, através do sistema gerenciador, a amostra com uma tensão no máximo igual a 5% da RMC, para que seja possível a instalação dos termopares e sensores de deslocamento.

O teste será iniciado, através de comando específico, quando a temperatura de ensaio especificada tiver estabilizado. A amostra passará a ser tracionada nessa ocasião. A força na amostra deverá ser aplicada sem choques e sem sobrepassagem o mais uniformemente e rápido possível, para minimizar a fluência causada por outras forças que não a especificada. A partir do momento de atuação do comando para iniciar o ensaio, será iniciada também a leitura dos transdutores de deslocamento, de forma a se registrar inclusive a fase transitória até a aplicação plena da carga.

Os valores medidos serão portanto, registrados automaticamente a intervalos regulares inicialmente pequenos e progressivamente crescentes ao longo do ensaio. Os intervalos serão definidos em

função do número de amostras de medição escolhido e os valores registrados representarão a média dos valores medidos no intervalo. Todos os acontecimentos anormais ocorridos durante os ensaios deverão igualmente ser registrados. Os relatórios finais devem ser elaborados automaticamente pelo sistema gerenciador.

Para esse ensaio deverão ser registrados os seguintes dados:

- Os valores das grandezas fixas (RMC, percentuais de tracionamento, valor teórico de tracionamento em N, temperatura de ensaio, tipo do cabo e outros dados julgados necessários).
- A data, a hora e o tempo de cada registro a partir do início do teste;
- As médias das temperaturas instantâneas dos termopares no período, a correspondente média das médias instantâneas, os valores máximo e mínimo da temperatura média no período, o valor da temperatura da junta fria;
- Os valores de referência e das médias de cada período dos transdutores de deslocamento e os valores das médias dos deslocamentos efetivos no período;
- A média das forças de teste instantâneas medidas pela célula de carga no período;

- O número de amostras do período;

Além disso o sistema gerenciador registrará também, na coluna de observações, os eventuais acontecimentos, tais como: falta de energia, excesso de tração e outras informações que forem julgadas necessárias.

Os valores dos deslocamentos ocorridos ao longo do ensaio serão plotados em um gráfico com escala logarítmica, de forma a se estabelecer a linha de tendência do deslocamento causado pela fluência. Para isso poderão ser observadas as três primeiras décadas a partir de 6 minutos de ensaio (6 min - 1 h - 10 h - 100 h). Uma vez obtida a fluência por década, pode-se extrapolá-la para 6,6355 décadas que correspondem 50 anos de vida da linha de transmissão.

## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os objetivos básicos do trabalho ora apresentado foram o de desenvolver uma Bancada de ensaios a altas temperaturas, para cabos condutores de energia elétrica em alta tensão e desenvolver uma metodologia para ensaios de fluência a altas temperaturas.

A Bancada desenvolvida foi totalmente automatizada e os instrumentos utilizados foram devidamente calibrados, obtendo-se incertezas adequadas ao desenvolvimento dos ensaios.

Foi realizado um ensaio de fluência de 1000 horas a 423 K com o objetivo de comprovar a adequação da Bancada à realização desse tipo de ensaios. Os resultados foram discutidos em 6.2. Conforme pode-se observar pelos gráficos apresentados, ocorreram alguns incidentes que, graças à sensibilidade dos instrumentos, permitiram enriquecer o conhecimento sobre a Bancada e em conseqüência propor as correções necessárias para que o seu desempenho fosse doravante satisfatório.

A Bancada já se encontra em operação e realiza no momento uma série de ensaios solicitados, com o objetivo de otimizar o projeto de repotencialização de uma linha de transmissão antiga de 66 kV.

Vários clientes, entre fabricantes de cabos e de acessórios e subsidiárias de energia elétrica, tem demonstrado interesse na

realização de ensaios na Bancada, o que demonstra o acerto da decisão de desenvolvê-la.

A metodologia proposta pelo presente trabalho está exposta no capítulo 7. Um dos pontos interessantes aventados (vide 7.3) é que graças à automatização da Bancada se torna possível chegar a uma conclusão bastante clara sobre os efeitos da fluência considerando-se apenas duas décadas da escala logarítmica.

Porém levando-se em conta que a escala logarítmica é infinita e que na prática não seria possível aplicá-la para os instantes iniciais do ensaio, mesmo porque também Ter-se-ia a variação transitória inicial devido ao deslocamento elástico, pode-se considerar como ponto inicial da primeira década o tempo de 6 minutos e chega-se multiplicando esse valor por  $4,32 \times 10^6$  a 432000 horas (50 anos). Como exemplo, observa-se que, a partir do gráfico da figura 6.4, pode-se estimar uma fluência de 1,33 mm/déc, que ao longo das 6,6355 décadas correspondentes (em segmento) daria cerca de 8,83 mm de fluência, desprezada a fluência inicial nos primeiros 6 minutos. É necessário lembrar ainda que por ocasião da instalação de um cabo a fluência inicial da primeira hora ocorreria antes de ser terminada a instalação e conseqüentemente não apresenta grande valor prático. Pode-se portanto determinar o valor da fluência por década considerando 3 décadas, inclusive a primeira que vai de 6 minutos a 1 hora, mesmo que ela venha a ser desprezada posteriormente para efeitos práticos, e extrapolar para 6,6355 décadas que corresponderia 50 anos.

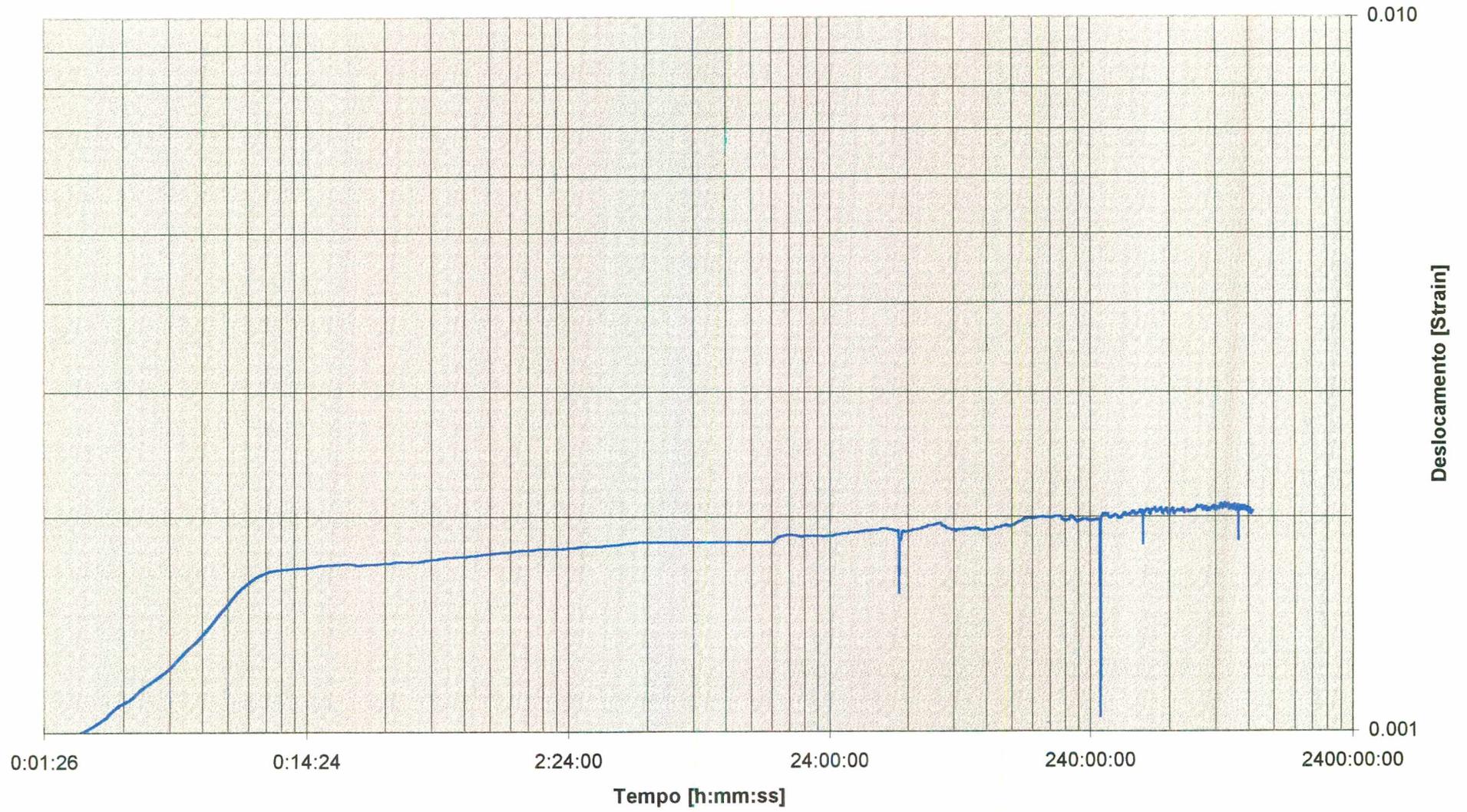
Em conseqüência do exposto pode-se reduzir o tempo de ensaio recomendado de 1000 horas para 100 horas, reduzindo-se assim por um fator de 10 o tempo necessário para os ensaios e ainda face ao contido em 7.3, com maior qualidade.

A figura 8.1 apresenta o mesmo gráfico da figura 6.4, porém com ambas as escalas logarítmicas e com o deslocamento representado em microstrain (micrômetro/m), como recomendado pela literatura. No entanto face à pequena fluência obtida (cabo com alma de aço) a escala bilogarítmica para o deslocamento não se revelou interessante.

Considerando-se por outro lado a inexistência de normas para ensaios de fluência a altas temperaturas, sugere-se nesse trabalho que se produza uma norma brasileira pertinente. O trabalho ora apresentado limitou-se aos ensaios de fluência. A Bancada no entanto, possibilita outros ensaios conforme exposto no capítulo 5, em especial os ensaios de vibrações mecânicas comentados no capítulo 4.

Tendo em vista a importância crucial do amortecimento nas linhas de transmissão com o objetivo de se evitar a fadiga dos tentos de alumínio causada por vibrações eólicas, recomenda-se que seja feito um novo trabalho nesse sentido. O trabalho consistiria na determinação de um modelo matemático da dinâmica do cabo, o qual seria em seguida ajustado e confirmado em função dos ensaios realizados com a Bancada e posteriormente

### Ensaio de Fluência - FURUK7 - Deslocamento - Bilog



extrapolado para as condições reais de linha viva, com o objetivo de determinar quanto de amortecimento e como introduzi-lo nos vãos das linhas de transmissão afim de se otimizar o correspondente projeto em termos de custo e de vida útil da linha.

A Bancada deverá ainda apoiar o desenvolvimento de outros trabalhos, em especial na área de materiais, onde os mesmos ensaios poderão ser realizados com materiais diversos propiciando os subsídios necessários. O curso de doutorado na área de materiais acaba de ser implantado na UFPR.

O custo total da Bancada foi de aproximadamente R\$ 400.000,00 já incluído os custos de aquisição dos instrumentos de última geração para medição de vibrações mecânicas.

O retorno financeiro não pode ser avaliado somente em função da contabilização de horas apontadas durante os ensaios e cobradas dos clientes. O principal fator que justificou a construção da Bancada foi o de permitir a otimização dos projetos de linhas de transmissão, cujo custo, para uma linha de transmissão de 230 kV, é da ordem de R\$ 80.000,00 por km. Estima-se que a economia propiciada pela Bancada, para o projeto de repotencialização de uma linha antiga de 66 kV ora em execução deverá superar várias vezes o custo da Bancada.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] Fullman, R. L., Carreker Jr., R. P., Fisher, J. C., **Simple Devices for Approximating Constant Stress During Tensile Creep Tests**, Transactions AIME, Journal of Metals, 1953;
- [02] Wintergerst, S., Aepfelbacher, M., **Das Kriechverhalten von Aluminiumdrähten und -Seilen**, Aluminium, 1957;
- [03] Alcoa, **Graphic Method for Sag Tension Calculations for ACSR and Other Conductors**, Aluminum Company of America (Alcoa), 1961;
- [04] Comellini, E. - **L'assestamento dei conduttori delle linee elettriche aeree**, Energia Elétrica n°7 - 1964.
- [05] Conway, J. B., **A Least-Squares Technique for Calculating Andrade Creep-Equation Constants**, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1965;
- [06] Atman, J. W., Larsen, R. E., **EHV Bundle Creep Will Vary If Subconductors Are Not Identical**, Aluminum Company Of América, Transmission & Distribution, 1968;
- [07] Bradbury, J., Vaughan, D.W. - **Creep of Steel-Cored Aluminum Conductors**, Conference on Progress in Overhead Lines and Cables for 220 kV and Above, IEE Conf. publ. 44 - 1968.

[08] Harvey, J.R., **Creep of Transmission Line Conductors**, IEE Transaction on Power Apparatus and Systems n°4 - 1969.

[09] Roest, C.A., **Creep Studies of Aluminum Conductors Alloys**, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, n°11, 1969.

[10] The Aluminum Association, **A Method of Stress-Strain Testing of Aluminum Conductor and ACSR and A Test Method for Determining the Long Time Tensile Creep of Aluminum Conductors in Overhead Lines**, The Aluminum Association, 1971;

[11] Wood, A.B., **Une méthode pratique de détermination du fluage des conducteurs**, ELECTRA n°24, CIGRÉ, Paris, 1972.

[12] Harvey, J. R., Larson, R. E., **Creep Equations of Conductors for Sag-Tension Calculations**, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1972;

[13] Harvey, J. R., **Effect of Elevated Temperature Operation on the Strength of Aluminum Conductors**, IEEE, 1972;

[14] Reynolds Metals Company, **Steel Supported Aluminum Conductors (SSAC), A New Concept For A Composite Aluminum-Steel Conductor For Overhead Transmission Lines**, 1973.

[15] Adams. H. W., **Steel Supported Aluminum Conductors (SSAC) for Overhead Transmission Lines**, IEEE, 1974;

- [16] Roussel, P., **Numerical Solution of Static and Dynamic Equations of Cables**, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1976;
- [17] CEMIG, **Estudo de Fluência (Creep) em Condutores CAA**, CEMIG, 1978
- [18] The Aluminum Association - **Basic Mechanical Properties, Stress-Strain Graphs, Effect of Creep**, Aluminum Association.
- [19] Bourgsdorf, V., **Allongements inélastiques des conducteurs - Équations prévisionnelles et méthodes d'évaluation**, Electra n°75, CIGRÉ, Paris, mar. 1981.
- [20] Ripper Neto, A. P., **Ensaio em Componentes de Linhas de Transmissão**, CEPEL, 1981;
- [21] Nigol, O., Barret, J. S., **Characteristics of ACSR Conductors at High Temperatures and Stresses**, IEEE, 1981;
- [22] Roosenburg, N.F.M., Dorst, K., **Some Guidelines for the Development of Performance Specifications in Product Design**, ICED 93, Vol.II, pp 359-366 (especificações de projeto)
- [23] Alcan, **Características dos Condutores da Alcan** - catálogo
- [24] ABNT, NBR 7303 - **Fluência em Condutores Elétricos de alumínio - Método de ensaio**, 1982.

[25] ABNT, NBR 7302 - **Tensão-Deformação em Condutores de Alumínio**, método de ensaio, 1982.

[26] ABNT, NBR 7273 - **Condutor Elétrico de Alumínio, Retirada e Preparo de Corpo de Prova Para Ensaio de Tipo**, Procedimento, 1982;

[27] Tadeu de Almeida, M., Fuchs, R. D., **Cálculo Prático dos Alongamentos Permanentes em Cabos de Linhas de Transmissão**, EFEI, Revista Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico, 1987;

[28] Menezes Jr., A. A., et alli, **Monitoração da Temperatura Superficial de Condutores Aéreos**, Mundo Elétrico, Dez. 1987;

[29] CEMIG, **Comparação de Métodos de Estimativa do Efeito de Fluência (Creep) em Condutores CAA**, CEMIG, 1988;

[30] Santos, A. H. M., Tadeu de Almeida, M., **Determinação e Análise das Equações que Regem um Cabo Suspenso; Considerando o Efeito Distribuído da Elasticidade**, Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico, 1988;

[31] Cavalcanti, E.S.C, Torres, M.S.- **Medição do Coeficiente de Dilatação Térmica de Condutores de Alumínio com Alma de Aço** - CEPEL - Rio de Janeiro, II SEMEL, 1990;

[32] Cavalcanti, E.S.C., Massarani, P.M., Torres, M.S. - **Avaliação da Fluência de Condutores**, CEPEL - Rio de Janeiro, II SEMEL, 1990;

[33] Hondalus, B., **Comparative Vibration Fatigue Tests 84/19 ACSR "Chukar" Versus 61-Strand 5005**, IEEE, 1964;

[34] Hard, A. R., Holben, R. D., **Application of the Vibration Decay Test to Transmission Line Conductors**, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1967;

[35] Buckner, W., Kerner, H., Philipps, W., **Stresses in Transmission Line Conductors Near the Suspension Clamp**, CIGRE, 23-07, 1968;

[36] Diana, G., **Sulla eccitazione per effetto del vento delle vibrazioni dei conduttori tesi**, L'Energia Elettrica n° 10, 1968;

[37] Komenda, R. A., Swart, R. L., **Interpretation of Field Vibration Data**, IEEE Transaction On Power Apparatus and Systems n° 4, 1968;

[38] Claren, R., Diana, G., **Mathematical Analysis of Transmission Line Vibration**, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems n° 12, 1969;

[39] CIGRE, **Aeolian Vibration on Overhead Lines**, CIGRE Commitee n° 22, 1970;

- [40] Seppa, T. O., **Self-Damping Measurements and Energy Balance of ACSR "Drake"**, Reynolds Metals Company, IEEE, 1970;
- [41] Evans, O. D., **Preventing Conductor Vibration Breaks**, Transmission and Distribution, 1972;
- [42] Furukawa Electric Co., Ltd., **"Vibless" Vibration Damper**, 1973;
- [43] Allnutt, J. G., Rowbottom, M. D., **Damping of Aeolian Vibration on Overhead Lines by Vibration Dampers**, PROC.IEE, Vol. 121, n° 10, 1974;
- [44] Claren, R., Diana, G., Nicolini, P., **Vibrations In Multiple Conductors Bundles**, CIGRE, 1974;
- [45] Bauer, F. M., Thompson, H. A., **Transmission Line Vibration Indicator**, Transmission and Distribution, 1975;
- [46] Bradbury, J., **Discussion on Effects of Mechanical and Aerodynamical Damping on the Galloping of Overhead Lines and Damping of Aeolian vibration on Overhead Lines by Vibration Dampers**, PROC. IEE, vol. 122, n° 8, 1975;
- [47] West, H. H., Geschwindner, L. F., Suhoski, J. E., **Natural Vibrations of Suspension Cables**, Journal of the Structural Division, ASCE, 1975;

- [48] Silva, M., Ramey, E., **Vibration Tests Prove Damper Benefit**, Transmission and Distribution, 1976;
- [49] Hanson, J. W., **Line-Vibration Damage Spurs Remedies**, Transmission and Distribution, 1976;
- [50] Kirkpatrick, L. A., **Customized Line Dampers Reduce Aeolian Vibration**, Transmission and Distribution, 1976;
- [51] Tuton, J. C., Revilla, C. G. Z., Fernandez, A. A., Pintado Fé, J. M., **Studies Carried Out in Spain on Aeolian Vibration of Overhead Conductors**, CIGRE, Committee n° 22, 1976;
- [52] Kirkpatrick, L. A., **Aeolian Vibration Control Through Improved Damper Design and Application**, Pacific Coast Electrical Association (PCEA), 1977;
- [53] Henghold, W. M., Russel, J. J., Morgan, J. D., **Free Vibrations of Cable in Three Dimensions**, Journal of the Structural Division, 1977;
- [54] Mohajery, M., Harvey, J. R., **Bundle Conductor Transmission Line Motions**, Transmission and Distribution, 1977;
- [55] Irvine, H. M., **Free Vibrations of Inclined Cables**, Journal of the Structural Division ASCE, 1978;
- [56] CIGRE, **Guide Pour Les Mesures D'Auto-Amortissement des Conducteurs**, Electra n° 62;

[57] Dhotarad, M. S., Ganesan, N., Rao, B. V. A., **Transmission Line Vibrations**, Journal of Sound and Vibrations, 1978;

[58] Moore, E., **Measuring Aeolian Vibration on Bundled Transmission Lines**, Electrical Review International, vol.202, n° 17, 1978;

[59] Tsui, Y. T., **Dynamic Behavior of a Pylône à Chaînette Line, Part I, Theoretical Studies**, Electric Power Systems Research, 1978;

[60] Gilbert/ Commonwealth, **Transmission Line Reference Book - Wind-Induced Conductor Motion**, Electrical Power Research Institute, 1979;

[61] CIGRE, **Guide sur la méthode de mesure des performances des amortisseurs de vibrations éoliennes pour conducteur simple**, Electra n° 76;

[62] Simmons, J. M., Cleary, P. M. G., **Measurement of Aerodynamic Power Associated with Vortex-Induced Vibration of Electrical Transmission Lines**, IEEE, 1980;

[63] Sathikh, S., Chari, R. T., **Acceptance Curve - a Practical Means for EHV Transmission Line Damper Performance Evaluation**, Electric Power Systems Research, 1980;

[64] Hagedorn, P., **Ein einfaches Rechenmodell zur Berechnung winderregter Schwingungen an Hochspannungsleitungen mit Dämpfern**, Ingenieur-Archiv 49, 1980;

[65] Nigol, O., Buchan, P. G., **Conductor Galloping Part 1 - Den Hartog Mechanism, Part II - Torsional Mechanism**, IEEE, 1981;

[66] Broglio, S., Scaramelli, F., Tavano, F., **Misure di vibrazioni eoliche su conduttori per linee a.t.: analisi dei risultati di alcune campagne di prova**, L'Energia Elettrica n° 8, 1981;

[67] Ramey, G. E., Townsend, J. S., **Effects of Clamps on Fatigue of ACSR Conductors**, Journal of the Energy Division ASCE, 1981;

[68] Luongo, A., Rega, G., Vestroni, F., **Monofrequent Oscillations of a Non-Linear Model of a Suspended Cable**, Journal of Sound and Vibration, 1982;

[69] Tsui, Y. T., **Recent Advances in Engineering Science as Applied to Aeolian Vibration: An Alternative Approach**, Electric Power Systems Research, 1982;

[70] Hagedorn, P., **On the Computation Of Damped Wind-Excited Vibrations Of Overhead Transmission Lines**, Journal of Sound and Vibration, Academic Press Inc. Limited, London, 1982;

[71] Diana, G., Gasparetto, M., Tavano, F., Cosmai, U., **Field Measurement and Field Data Processing on Conductor Vibration**, CIGRE, 1982;

[72] Buckner, W. et alii, **Field Measurements and Laboratory Tests as Base for an Endurance Assesment of Transmission Line Conductors Exposed to Aeolian Vibration**, CIGRE, 1983;

[73] Rawlins, C. B., **Wind Tunnel Measurements of the Power Imparted to a Model of a Vibrating Conductor**, IEEE, 1983;

[74] Ed Ramey, G., Silva, J. M., **Overhead Lines With Broken Strands Can Be Saved by Dampers**, Transmission & Distribution, 1984;

[75] Alt, K. et alii, **Dynamic Effects on Transmission Lines**, Federal Republic of Germany, 1984;

[76] Krishnasamy, S. G., **Assesment of Weather Induced Transmission Line Loads on a Probabilistic Basis**, IEEE, 1985;

[77] Nigol, O., Houston, H. J., **Aeolian Vibration of Single Conductors and its Control**, IEEE, 1985;

[78] IREQ, **Report for the Canadian Electrical Association - Fatigue Life of Aluminum Wires in All Aluminum and ACSR Conductors**, Hydro-Québec Reaserch Institute - IREQ, 1986;

**Linhas de Transmissão**, IX- Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1987;

[86] Hagedorn, P., **Mechanisch-dynamische Vorgänge in Freileitungen**, 1987;

[87] Tsui, Y. T., **Modern Developments in Aeolian Vibration**, Electric Power Systems Research, 1988;

[88] Jamaledine, A., Rousselet, J., **Dynamic Response of a Two-Conductor Bundle to Aeolian Excitation**, Electric Power Systems Research, 1988;

[89] Rawlins, C. B., **Research on Vibration of Overhead Ground Wires**, IEEE Transaction on Power Delivery, vol.3, n°2, 1988;

[90] Rawlins, C. B., **An Efficient Method for Measuring Dissipation By Dampers in Laboratory Spans**, Transaction on Power Delivery, vol.3, n° 3, 1988;

[91] Cloutier, L., Hardy, C., **Effect of Suspension Clamp Design on Conductor Fatigue Life**, Report for the Canadian Electrical Association, 1988;

[92] CIGRE, Commitee 22, **Rapport sur les vibrations éoliennes**, Electra n° 124, 1989;

[93] Oliveira, A. R. E., **Revisão das Metodologias Usadas Na Previsão de Vibrações em Linhas de Transmissão**, V Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1989;

[94] Wallaschek, J., **Ermittlung praxisbezogener Windeingangsleistungen durch Schwingungsmessungen an elektrischen Freileitungen - Beschreibung eines laufenden Versuchs**, Elektrizitäts wirtschaft, 1989;

[95] Richardson, A. S., **Vibration of Bundled and Single Conductors: A Comparative Case Study**, Electric Power Systems Reaserch, 1990;

[96] Hagedorn, P., **Leiteseilschwingungen In Theorie und Praxis: Ein Überblick**, Offenbach, Berlin, 1990.

[97] Tsui, Y. T., **Modern Developments en Cable Dynamics**, Electric Power Systems Reaserch, 1990;

[98] Simpson, A., Salmon, N. J., Taylor, C. N., **Computational comparison of efficacies of aeolian vibration damping devices for multiconductor overhead power lines**, IEE Proceedings, vol.137, n° 3, 1990;

[99] Ammann, M., de Weck, P., Papailiou, K. O., **Two Years Vibration Measurements and Their Evaluation for an Optical Ground Wire (OPGM) Installed on a 400 kV Transmission Line**, CIGRE, 1990;

[100] Diana, G., Cheli, F., Manenti, A., Nicolini, P., Tavano, F., **Oscillation of Bundle Conductors in Overhead Lines Due to Turbulent Wind**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.5, n° 4, 1990;

[101] Feldmann, D., **Essais de Matériel aux Vibrations éoliennes**, Electricité de France, 1990;

[102] Curami, A., Beretta, A., **Normative de collaudo di ammortizzatori di campata per linee aeree - Un confronto teorico e sperimentale**, L'Energia Elettrica - n° 7/8, 1991;

[103] Bückner, W. F., **Improved Diagnostic Techniques For Vibration Dampers**, Transmission & Distribution International, 1991;

[104] Claren, R., Diana, G., Tavano, F., **Proposal for calculating, on the basis of experimental results, the conductors self-damping**, CIGRE, 1991;

[105] Bückner, W. F., **Safety Determination Of Transmission Conductors During Aeolian Vibrations**, Transmission & Distribution International, June 1992;

[106] Noiseux, D. U., **Similarity Laws of the Internal Damping of Stranded Cables in Transverse Vibrations**, IEEE Transaction on Power Delivery, vol.7, July 1992;

[107] CIGRÉ - **Recommendations for the Evaluation of the Lifetime of Transmission Line Conductors**, Electra n° 63, pp. 103-145;

[108] CIGRÉ - **Endurance Capability of Conductors**, Final report, julho de 1988;

[109] IEEE - **Standardization of conductor vibration measurements**, IEEE Transaction PAS 85 1966, p.10.

[110] Back, N., **Metodologia de Projetos de Produtos Industriais**, Guanabara Dois, 1983.

[111] Camarano, D., das M., **Procedimentos aplicáveis à garantia da qualidade metrológica dos resultados na termometria automatizada com termopar e sensores resistivos**, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 1993

[112] Aluminium Laboratories Limited, **Tensile Creep Testing of Stranded Conductors at Room or Elevated Temperature**, Kingston, 1966.

[113] Harvey, J. R., Larson, R. E., **Use of Elevated Temperature Creep Data in Sag-Tension Calculations**, IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems, 1970.

[114] Cahil, T., **Development of a Low-Creep ACSR Conductor**, Wire Journal, 1973.

[115] Bradbury, J., Dey, P., Orawski, G., Pickup, K. H., **Long-Term-Creep Assesment for Overhead-Line Conductors**, PROC.IEE, Vol. 122, no. 10, 1975.

[116] Utting, W. S., Jones, N., **Tensile Testing of a Wire Rope Strand**, Journal of Strain Analysis, vol 20 no 3, 1985.

[117] Torres, M. S., Midão, F. de S., Ripper Neto, A. P., **Medição de Amortecimento Próprio em Cabos de Linhas Aéreas de Transmissão Utilizando Ondas Progressivas**, IV SEMEL, Curitiba, 1994.

[118] Lemme, H., **Sensoren in der Praxis**, Franzis-Verlag GmbH, München, 1990.

[119] Barczak, C. L., **Controle Digital de Sistemas Dinâmicos**, Editora Edgard Blücher Ltda, Florianópolis, 1995.

[120] Wright, C. P., **Applied Measurement Engineering**, Prentice Hall PTR, New Jersey, 1995.

[121] Beckwith, T. G., Marangoni, R. D., Lienhard V, J. H., **Mechanical Measurements**, 5 ed., Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1993.

10 APÊNDICE 1 - PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA O SISTEMA  
GERENCIADOR

```

DECLARE SUB celulacarga (CELLLA!)
DECLARE SUB CALCULO ()
DECLARE SUB TRACIONAMENTO (porcentagem%, modo%)
DECLARE SUB ARQUIVO ()
DECLARE SUB elongamento ()
DECLARE SUB DADOS ()
DECLARE SUB GPIBERRO ()
DECLARE SUB CARGANOM ()
DECLARE SUB motor ()
DECLARE SUB TEMPO ()
DECLARE SUB LIMPATELA (Linha1%, Coluna1%, Linha2%, Coluna2%)
DEFINT A-Z

```

```

TYPE FileDirType
  OperatorName AS STRING * 15
  FileName AS STRING * 25
  FileDes AS STRING * 35
END TYPE

```

```

TYPE Regtypex
  ax AS INTEGER
  bx AS INTEGER
  cx AS INTEGER
  dx AS INTEGER
  bp AS INTEGER
  si AS INTEGER
  di AS INTEGER
  flags AS INTEGER
  Ds AS INTEGER
  es AS INTEGER

```

```

END TYPE

```

```

'***** DEFINICAO DAS ESTRUTURAS DE ARQUIVO*****

```

```

DIM SHARED OpName AS STRING * 18
COMMON SHARED media AS SINGLE
COMMON SHARED HM AS LONG
COMMON SHARED HS AS LONG
COMMON SHARED arq AS STRING * 10
COMMON SHARED REF1!, REF2!, VALOR1#, VALOR2#
COMMON SHARED Q!, r1!, x1!, hmin&, pa!, HA&
COMMON SHARED MIN$, HDIFE&, DFCARGA!, dif!, TEA5!
COMMON SHARED CELULA!, R5!
DIM SHARED dstd AS INTEGER
DIM SHARED WRT AS STRING

```

```

COMMON SHARED File AS STRING

```

```

DIM SHARED InRegs AS Regtypex
DIM SHARED OutRegs AS Regtypex

```

```

TYPE MouseInfo
  Exists AS INTEGER      * > 0 se mouse existe
  CursorOn AS INTEGER   * 1 se cursor ativo, 0 desligado
  BtnStatus AS INTEGER  * status do botao ativo
  BtnClicks AS INTEGER  * vezes que o botao ativo foi apertado
  Column AS INTEGER     * coluna do mouse
  Row AS INTEGER        * linha do mouse
  HMovement AS INTEGER  * deslocamento horizontal do mouse
  VMovement AS INTEGER  * deslocamento vertical do mouse

```

```

END TYPE

```

```

REM $INCLUDE: 'toolbox.bi'

```

```

REM $INCLUDE: 'qbdecl4.bas'

```

```

DIM SHARED Mes$(19)

```

```

DIM SHARED tip$(19)
DIM SHARED DADS(29)
COMMON SHARED HINI&
COMMON SHARED Hdia&
'*****
REM MENU PRINCIPAL - CHAMADA DOS MODULOS
'*****
.
CALL FIDir(Units$, Dir$)
.
'*****
.
' INICIO DO PROGRAMA PRINCIPAL
TIMER ON
IBSTA = 0: IBCNT = 0: IBERR = 0      ' definicao das variaveis que serao

BDNAMES = "GPIB0"
CALL IBFIND(BDNAMES$, GPIB0%)
CALL IBSIC(GPIB0%)
BDNAMES$ = "DSTD"
CALL IBFIND(BDNAMES$, dstd%)
CALL IBCLR(dstd%)
'*****
' INICIALIZACAO DO CONTROLADOR

WRTS = "O0TO3060T"  'palavra de controle para incializar o CLP
GOSUB Manda:

WRTS = "Y" + MKIS(&H1E00) + MKIS(&H600) + MKIS(&H402) + MKIS(&H401) + MKIS(&H400
) + MKIS(&H0) + STRING$(18, 0)
GOSUB Manda:

'***** INICIALIZACAO DOS CARTOES *****
.
' CARTAO DE RELES - STD-8002
dado = 0
WRTS = "@00T"      'desligar todos os reles
GOSUB Manda:
.
' CARTAO DE D/A - STD-8503
FOR k = 0 TO 3
    WRTS = "A" + HEX$(k * 4096) + "T"      'zerar as quatro saidas analogicas
    GOSUB Manda:
NEXT k
.
.
REM MENU PRINCIPAL - CHAMADA DOS MODULOS
DIM SHARED Opcao$(3, 2)
Opcao$(1, 1) = "DADOS"
Opcao$(1, 2) = "Entrada dos dados do cabo."
Opcao$(2, 1) = "ENSAIO"
Opcao$(2, 2) = "Inicia ensaio de Fluencia."
Opcao$(3, 1) = "XFIM"
Opcao$(3, 2) = "Final do ensaio."
Escolha = 1
.
CLS
Mes$ = "COPEL - LAC - CNME"
CALL Saymes(4, 0, 2, Mes$)
Mes$ = "ENSAIO DE FLUENCIA"
CALL Saymes(8, 0, 2, Mes$)
CALL Getmes(12, 0, 2, "NOME DO OPERADOR : ", OpName$)
CLS
DO WHILE Escolha <> 0
    CALL celulacarga(CELULA!)
    ON ERROR GOTO Roterro

```

```

COLOR 14, 9, 1
CALL LIMPATELA(1, 1, 4, 79)
Mess$ = "ENSAIO DE FLUENCIA "
CALL Saymes(2, 0, 2, Mess$)
CALL Borda(6, 1, 20, 80, 1)
CALL Borda(21, 1, 23, 80, 1)
Mess$ = " Operador:" + UCASE$(RTRIM$(LTRIM$(OpName$))) + " "
CALL Saymes(23, 78 - LEN(Mess$), 0, Mess$)
Escolha = Menu(4, 1, Opcao$())
SELECT CASE Escolha
CASE 1                                'menu DADOS
    CALL DADOS
CASE 2                                'menu TENSAO/DEFORMACAO
    VALOR1# = 0
    VALOR2# = 0
    CALL CALCULO
CASE 3                                'menu XFIM
    REDIM SHARED Op$(2)
    Op$(1) = " SIM "
    Op$(2) = " NAO "
    menux = Achoice%(7, 72, Op$())
    IF menux = 1 THEN
        DO WHILE INKEY$ <> "F"
            CALL LIMPATELA(22, 3, 22, 76)
            LOCATE 22, 5
            PRINT "SOLTAR TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO E APdS PRESSI
ONAR A TECLA F"
            IF INKEY$ = "F" THEN
                CALL IBCLR(dstd%)
                CALL IBLOC(dstd%)
                FOR k = 0 TO 3
                    WRT$ = "A" + HEX$(k * 4096) + "T" 'ze
                rar as quatro saidas analogicas
                GOSUB Manda:
                NEXT k
                WRT$ = "@0T"
                CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
                EXIT DO
            END IF
        LOOP
    END IF
EXIT DO
END SELECT
LOOP
CHDIR Dir$
COLOR 14, 9, 1
CLS
END
'*****
' SUBROTINA PARA MANDAR wrt$ PARA O CONTROLADOR
Manda:
    CALL IBWRT(dstd%, WRT$) ' envia p/ o multiprogramador
    IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
    RETURN
'*****
' SUBROTINA DE ERRO
Roterro:
    CALL Roterror(Ferro)
    RESUME NEXT
'*****
' FINAL DO PROGRAMA PRINCIPAL

```

```

SUB ARQUIVO
  OPEN File$ FOR APPEND AS #1
  PRINT #1, DAD$(0), DAD$(15), DAD$(1), DAD$(16), DAD$(17), DAD$(18), DAD$
(4), DAD$(2), DAD$(3), DAD$(5), DAD$(6), DAD$(7), DAD$(8), DAD$(9), DAD$(10), DA
D$(11), DAD$(12), DAD$(13), DAD$(14), DAD$(19), DAD$(20), DAD$(21), DAD$(22)
  CLOSE #1
END SUB

```

```

DEFINT A-Z
SUB CALCULO

```

'SUBROTINA PARA CALCULO DOS CANAIS DE TERMOPARES 100mV

```

HA& = 0
Hdia& = 0
PB! = 0
R0! = 0
pa! = 0
TEMPERS = tip$(4)          'TEMP ESPECIFICADA
volt! = 0
pp! = 0
ry! = 0
rk! = 0
r1! = 0
MIN! = VAL(tip$(4))
MAX! = 0
R3! = 0
R4! = 0
R5! = 0
XR! = 0
TEA5! = 1
x1! = 0
x2! = 0
x3! = 0
LOCATE 7, 49: PRINT "TEMP.(CELS.)"

```

```

LOCATE 9, 49: PRINT "CANAL 1 : "
LOCATE 10, 49: PRINT "CANAL 2 : "
LOCATE 11, 49: PRINT "CANAL 3 : "
LOCATE 12, 49: PRINT "CANAL 4 : "
LOCATE 13, 49: PRINT "CANAL 5 : "
LOCATE 14, 49: PRINT "CANAL 6 : "
LOCATE 15, 49: PRINT "CANAL 7 : "
LOCATE 19, 48: PRINT "max : "
LOCATE 19, 63: PRINT "min : "

```

```

  N = 3
DO WHILE INKEY$ <> "F"
  Q! = 0
  QQ! = 0
  SP1! = 0
  SP2! = 0
  SP3! = 0
  SP4! = 0
  SP5! = 0
  SP6! = 0
  SP7! = 0
  RX! = 0
  DAD$(19) = " "
  DAD$(20) = " "
  DAD$(21) = " "
  DAD$(22) = " "
  FOR J = 1 TO N
    IF INKEY$ = "O" THEN
      N = 3
      PB! = 0
      RX! = 1
    
```

```

        CALL LIMPATELA(16, 31, 16, 49)
        EXIT FOR
    END IF
    IF TEA5! = 0 AND XR! = 0 THEN
        N = 3
        PB! = 0
        XR! = 1
        RX! = 1
        CALL LIMPATELA(16, 31, 16, 49)
        EXIT FOR
    END IF
    IF TEA5! = 1 AND XR! = 1 AND x1! = 0 THEN
        x2! = 1
        XR! = 0
    END IF
    IF x1! = 1 AND XR! = 0 THEN
        N = 3
        PB! = 0
        x2! = 1
        XR! = 1
        RX! = 1
        CALL LIMPATELA(16, 31, 16, 49)
        EXIT FOR
    END IF

    IF x1! = 1 AND TEA5! = 1 AND XR! = 1 AND x2! = 0 THEN
        x2! = 1
        CALL CARGANOM
    END IF
    IF x1! = 0 AND x2! = 1 THEN
        PB! = 1
        x2! = 0
        XR! = 0
    END IF

    LOCATE 17, 48: PRINT "T media : "
    LOCATE 18, 48: PRINT "T alvo  : ": TEMPER

    LOCATE 7, 65: PRINT "MED.PER.ODO"
    LOCATE 16, 32: PRINT "AMOST:"
    LOCATE 16, 38: PRINT J
    LOCATE 16, 43: PRINT "/"
    DO WHILE X3! = 0
        WRT$ = "DC000TDX"           ' leitura da tensao da junta fria
        CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
        RD$ = SPACES(6)
        CALL IBRD(dstd%, RD$)      ' busca o dado lido
        IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
        WRT$ = "DA000TDX"
        CALL IBWRT(dstd%, WRT$)   ' envia p/ o multiprogramador
        IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
        JRDS = SPACES(6)
        CALL IBRD(dstd%, JRDS)    ' busca o dado lido
        IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
        JUNTA = CVI(LEFT$(JRDS, 4)) ' converte de hexadecimal p/ inteiro
        JUNTA! = JUNTA / 100      ' converte p/ temperatura
        IF JUNTA! > 0 AND JUNTA! < 45 THEN
            VALO! = JUNTA!
            X3! = 1
        END IF
    END IF

LOOP

    WRT$ = "DC000TDX"           ' leitura da tensao da junta fria
    CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
    RD$ = SPACES(6)
    CALL IBRD(dstd%, RD$)      ' busca o dado lido
    IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
    WRT$ = "DA000TDX"

```

```

CALL IBWRT(dstd%, WRTS)          ' envia p/ o multiprogramador
IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
JRDS = SPACES(6)
CALL IBRD(dstd%, JRDS)          ' busca o dado lido
IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
JUNTA = CVI(LEFTS(JRDS, 4))      ' converte de hexadecimal p/ inteiro
JUNTAAA! = JUNTA / 100          ' converte p/ temperatura
IF JUNTAAA! < 2 OR JUNTAAA! > 45 THEN
    LOCATE 22, 58
    PRINT "J.F.IRREGULAR"
    DADS(21) = "J.F.IRREGULAR"
ELSE
    CALL LIMPATELA(22, 58, 22, 68)
END IF
IF JUNTAAA! < 2 OR JUNTAAA! > 45 THEN
    JUNTAA! = VALO!
    DTE! = JUNTAA! - JUNTAAA! + 2
ELSE
    JUNTAA! = JUNTAAA!
    DTE! = 0
END IF

```

```

LOCATE 8, 49: PRINT "JUNTA F : "

```

```

LOCATE 8, 57

```

```

PRINT JUNTAA!

```

```

DADS(12) = STRS(JUNTAA!)

```

```

VALO! = JUNTAA!

```

```

sm! = 0

```

```

FOR i = 1 TO 7

```

```

    WRTS = "D" + HEXS(&HA300 + i) + "TDX" ' formata o comando de leitura

```

```

    CALL IBWRT(dstd%, WRTS)          ' envia p/ o multiprogramador

```

```

    IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO

```

```

    RDS = SPACES(6)

```

```

    CALL IBRD(dstd%, RDS)          ' busca o dado lido

```

```

    IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO

```

```

    dado = CVI(LEFTS(RDS, 4))      ' converte de hexadecimal p/ inteiro

```

```

    IF i = 1 THEN valor! = INT(100 * (.98696 * (dado / 100 + DTE!) - .54274)
) / 100      ' converte p/ temperatura

```

```

    IF i = 2 THEN valor! = INT(100 * (.97723 * (dado / 100 + DTE!) - .57486)
) / 100

```

```

    IF i = 3 THEN valor! = INT(100 * (.9786 * (dado / 100 + DTE!) - .58405)
) / 100

```

```

    IF i = 4 THEN valor! = INT(100 * (.98382 * (dado / 100 + DTE!) - .60537)
) / 100

```

```

    IF i = 5 THEN valor! = INT(100 * (.98045 * (dado / 100 + DTE!) - .54415)
) / 100

```

```

    IF i = 6 THEN valor! = INT(100 * (.98085 * (dado / 100 + DTE!) - .6527)
) / 100

```

```

    IF i = 7 THEN valor! = INT(100 * (.98438 * (dado / 100 + DTE!) - .84524)
) / 100

```

```

sm! = valor! + sm!

```

```

LOCATE 8 + i, 57

```

```

PRINT valor!

```

```

IF i = 1 THEN SP1! = SP1! + valor!

```

```

IF i = 2 THEN SP2! = SP2! + valor!

```

```

IF i = 3 THEN SP3! = SP3! + valor!

```

```

IF i = 4 THEN SP4! = SP4! + valor!

```

```

IF i = 5 THEN SP5! = SP5! + valor!

```

```

IF i = 6 THEN SP6! = SP6! + valor!

```

```

IF i = 7 THEN SP7! = SP7! + valor!

```

```

IF rl! > 1 THEN

```

```

    CALL celulacarga(CELULA!)

```

```

    dif! = DFCARGA! - CELULA!

```

```

    IF R5! = 0 THEN CALL motor

```

```

END IF

```

```

NEXT i

media! = sm! / 7
LOCATE 17, 57
tmed! = INT(media! * 100) / 100
PRINT tmed!

IF media! < VAL(TEMPERS) THEN
  IF pp! = 1 THEN
    IF mediaa! > VAL(TEMPERS) / 2 AND mediaa! < MIN! THEN MIN! = m
ediaaa!
  END IF
END IF
IF INKEYS = "L" THEN
  MAX! = VAL(TEMPERS)
  MIN! = VAL(TEMPERS)
END IF

IF mediaa! > MAX! THEN
  MAX! = mediaa!
END IF

IF INKEYS = "Q" OR ry! = 1 THEN
  IF Q1! = 0 THEN
    CALL LIMPATELA(22, 3, 22, 67)
    LOCATE 22, 3
    IF TEA5! = 0 THEN
      PRINT "FALTANDO ENERGIA"
      DADS(19) = "FALTANDO ENERGIA"
    ELSE
      PRINT "EM AQUECIMENTO. AGUARDE"
    END IF
    pp! = 0
  END IF
  setp! = 340
  dt! = VAL(TEMPERS) - media!
  cte! = 30
  IF dt! < 0 THEN dt! = 0
  volt! = INT(ABS(dt!) * cte! + setp! + ((VAL(TEMPERS) - JUNTA!)
* .175 * cte! - 1.25))
  IF volt! > 2047 THEN volt! = 2047
  IF media! > VAL(TEMPERS) THEN volt! = 0
  IF media! >= VAL(TEMPERS) THEN
    IF pp! <> 1 THEN
      FC! = INT((DFCARGA! / 22 - 32) / 25)
      PC! = ((DFCARGA! / 22 - 32) / 25 - INT((DFCARGA!
/ 22 - 32) / 25)) * 25
      CALL LIMPATELA(22, 3, 22, 67)
      LOCATE 22, 3: PRINT "TEMP.ATING. -POS.TRANS.DESL
.-F.C.POS: "; FC!; PC!; "KG"
      pp! = 1
      Q1! = 1
    END IF
  END IF
  END IF
  pulso$ = HEX$(volt!)
  IF volt! < 256 THEN pulso$ = "0" + pulso$
  IF volt! < 16 THEN pulso$ = "0" + pulso$
  WRT$ = "A" + HEX$(3) + pulso$ + "T"
  CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
  ry! = 1
  tens! = (volt! / 2047) * 10.24
  CALL LIMPATELA(23, 2, 23, 25)
  LOCATE 23, 2: PRINT volt!; " - "; pulso$; " - "; tens!
END IF
LOCATE 19, 53: PRINT MAX!
LOCATE 19, 68: PRINT MIN!

```

```

DAD$(13) = STR$(MAX!)
DAD$(14) = STR$(MIN!)
IF R0! = 0 THEN
    LOCATE 22, 2
    PRINT "SOLTE TRANSD.DESL.-INST.AMOST- B P/EST. A P/PARAR"
END IF

IF INKEYS = "F" THEN EXIT SUB

IF INKEYS = "T" AND pa! = 0 THEN
    IF pp! = 1 THEN
        CALL CARGANOM
        pa! = 1
        HINI& = TIMER
        MAX! = VAL(TEMPERS)
        MIN! = VAL(TEMPERS)
    END IF
END IF

IF pa! = 1 THEN
    CALL elongamento
    rk! = 0
END IF

IF pa! = 1 AND r1! = 0 THEN
    CALL LIMPATELA(22, 3, 22, 67)
    LOCATE 22, 3: PRINT "motorreductor acionado, R p/ativ.servo"
END IF

IF INKEYS = "B" THEN
    CALL TRACIONAMENTO(VAL(tip$(5)), 0)
    R0! = 1
    CALL LIMPATELA(23, 3, 23, 78)
    CALL Saymes(22, 4, 0, "O CABO JA FOI ESTICADO - INST.TERMOPARES
- Q/AQUEC.")
END IF

IF INKEYS = "E" OR rk! = 1 THEN
    CALL elongamento
    rk! = 1
END IF

LOCATE 20, 1: PRINT TIMES

CALL celulacarga(CELULA!)
IF R0! = 1 AND CELULA! < .03 * VAL(tip$(2)) THEN
    CALL TRACIONAMENTO(VAL(tip$(5)), 0)
END IF
QQ! = QQ! + CELULA!
DFCARGA! = (VAL(tip$(6)) / 100) * VAL(tip$(2))
dif! = DFCARGA! - CELULA!
LOCATE 15, 3: PRINT "Carga Teorica:": DFCARGA!
IF CELULA! > 1.15 * DFCARGA! THEN CELULA! = DFCARGA!
IF CELULA! > 1.03 * DFCARGA! AND R4! = 1 AND R3! = 1 THEN
    x1! = 1
    R5! = 1
    CALL LIMPATELA(22, 3, 22, 30)
    LOCATE 22, 30
    PRINT "EXCESSO DE TRACAO"
    DAD$(20) = "EXCESSO DE TRACAO"
    WRT$ = "@44T"
    CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
ELSE
    R4! = 0
END IF

IF CELULA! > 1.03 * DFCARGA! AND R3! = 1 THEN
    R4! = 1
ELSE
    R3! = 0
END IF

IF CELULA! > 1.03 * DFCARGA! THEN

```

```

                R3! = 1
END IF
IF CELULA! < .9 * DFCARGA! AND R5! = 1 THEN
    WRTS = "@0T"
    CALL IBWRT(dstd%, WRTS)
    IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
    R5! = 0
    CALL CARGANOM
    CALL LIMPATELA(22, 30, 22, 50)
END IF
IF INKEYS = "R" OR r1! = 1 AND R5! = 0 THEN
    CALL motor
    r1! = 1
    CALL LIMPATELA(22, 3, 22, 30)
    LOCATE 22, 3
    IF TEA5! = 0 THEN
        PRINT "FALTANDO ENERGIA"
        DADS(19) = "FALTANDO ENERGIA"
    ELSE
        PRINT "ENSAIO EM ANDAMENTO"
    END IF
END IF
END IF
DADS(0) = DATES
DADS(15) = TIMES
NEXT J
IF RX! = 0 THEN
    CALL LIMPATELA(7, 65, 15, 71)
    LOCATE 9, 65
    PRINT INT(SP1! * 100 / N) / 100
    LOCATE 10, 65
    PRINT INT(SP2! * 100 / N) / 100
    LOCATE 11, 65
    PRINT INT(SP3! * 100 / N) / 100
    LOCATE 12, 65
    PRINT INT(SP4! * 100 / N) / 100
    LOCATE 13, 65
    PRINT INT(SP5! * 100 / N) / 100
    LOCATE 14, 65
    PRINT INT(SP6! * 100 / N) / 100
    LOCATE 15, 65
    PRINT INT(SP7! * 100 / N) / 100

    DADS(5) = STR$(INT(SP1! * 100 / N) / 100)
    DADS(6) = STR$(INT(SP2! * 100 / N) / 100)
    DADS(7) = STR$(INT(SP3! * 100 / N) / 100)
    DADS(8) = STR$(INT(SP4! * 100 / N) / 100)
    DADS(9) = STR$(INT(SP5! * 100 / N) / 100)
    DADS(10) = STR$(INT(SP6! * 100 / N) / 100)
    DADS(11) = STR$(INT(SP7! * 100 / N) / 100)

    mediaa! = INT((SP1! + SP2! + SP3! + SP4! + SP5! + SP6! + SP7!) * 100 / N
/ 7) / 100
    LOCATE 17, 65
    PRINT mediaa!
    DADS(3) = STR$(mediaa!)
    CALL LIMPATELA(14, 31, 14, 49)
    LOCATE 14, 31
    PRINT " MED.DESL: "; INT(Q! * 100 / N) / 100
    DADS(4) = STR$(INT(Q! * 100 / N) / 100)

    LOCATE 20, 45

    LOCATE 16, 3
    PRINT "CARGA MEDIA  : "; INT(QQ! * 100 / N) / 100
    DADS(2) = STR$(INT(QQ! * 100 / N) / 100)
    IF pa! = 1 THEN
        CALL LIMPATELA(21, 50, 21, 60)

```

```

CALL ARQUIVO
LOCATE 21, 50
PRINT "GRAV. ENSAIO"
  rj! = 0
END IF

```

```

IF INKEY$ = "W" OR rj! = 1 THEN
  CALL ARQUIVO
  LOCATE 21, 50
  PRINT "GRAVANDO"
  rj! = 1
END IF

```

```

IF INKEY$ = "Z" THEN
  rj! = 0
  CALL LIMPATELA(21, 50, 21, 60)
END IF

```

```

IF INKEY$ = "P" OR PB! = 1 THEN
  IF HDIFE& >= 4 THEN N = 5
  IF HDIFE& >= 8 THEN N = 10
  IF HDIFE& >= 16 THEN N = 15
  IF HDIFE& >= 36 THEN N = 25
  IF HDIFE& >= 60 THEN N = 50
  IF HDIFE& >= 200 THEN N = 200
  IF HDIFE& >= 800 THEN N = 300
  IF HDIFE& >= 2800 THEN N = 400
  IF HDIFE& >= 6000 THEN N = 500
  PB! = 1
END IF

```

```

DADS(16) = STR$(N)
LOCATE 16, 44
PRINT N

```

```

END IF
LOOP
WRT$ = "@0T"
CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
SLEEP 1
END SUB

```

```

DEFINT A-Z
SUB CARGANOM
WRT$ = "@1T"
CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
SLEEP 1

```

```

WRT$ = "@0T"
CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
SLEEP 1
END SUB

```

```

DEFINT A-Z
SUB celulacarga (CELULA!)
  WRT$ = "B1TBX"
  CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
  IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
  WRT$ = "B" + HEX$(1) + "TBX"
  CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
  RD$ = SPACES(6)
  CALL IBRD(dstd%, RD$)

```

```

' formata o comando de leitura
' envia p/ o multiprogramador

```

```

IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
TEA4 = VAL("&H" + RD$)
IF (TEA4 AND &H800) <> 0 THEN
    TEA4 = TEA4 OR &HF800
ELSE
    TEA4 = TEA4 AND &H7FFF
END IF
TEA4! = TEA4
CELULA! = INT(.992 * (930.6 * (TEA4! / 100) + 1661.36) * 100) / 100
CALL LIMPATELA(17, 20, 19, 35)
CALL Saymes(18, 4, 2, "CARGA NO CABO :" + STR$(CELULA!) + " kg")

```

END SUB

DEFINT A-Z  
SUB DADOS

```

Mes$(1) = " Tipo           :"
Mes$(2) = " RMC           :"
Mes$(3) = " Comp. Inicial:"
Mes$(4) = " Temp. Espec.  :"
Mes$(5) = " % carga inic.  :"
Mes$(6) = " % carga teste:"
Mes$(7) = " Unid:\arq.flu:"

```

```

LOCATE 7, 2
PRINT "LAC - CNME "

```

FOR i = 1 TO 7

```

    LOCATE i + 7, 2: PRINT Mes$(i)

```

NEXT i

```

CALL LIMPATELA(8, 17, 14, 29)

```

```

LOCATE 8, 17: INPUT " ", dado$

```

```

IF dado$ <> "" THEN tip$(1) = dado$ 'tipo

```

```

LOCATE 9, 17: INPUT " ", dado$

```

```

IF dado$ <> "" THEN tip$(2) = dado$ 'rmc

```

```

LOCATE 10, 17: INPUT " ", dado$

```

```

IF dado$ <> "" THEN tip$(3) = dado$ 'comp ini

```

```

LOCATE 11, 17: INPUT " ", dado$

```

```

IF dado$ <> "" THEN tip$(4) = dado$ 'temp espec

```

```

LOCATE 12, 17: INPUT " ", dado$

```

```

IF dado$ <> "" THEN tip$(5) = dado$ '% carga ini

```

```

LOCATE 13, 17: INPUT " ", dado$

```

```

IF dado$ <> "" THEN tip$(6) = dado$ '% carga teste

```

```

LOCATE 14, 17: INPUT " ", dado$

```

```

IF dado$ <> "" THEN

```

```

    File$ = dado$ 'unid:\arquivo.flu

```

```

    OPEN File$ FOR APPEND AS #1

```

```

        PRINT #1, "LABORATORIO CENTRAL DE ELETROTÉCNICA E ELETRFNICA - L

```

AC - CNME",

```

        PRINT #1, "ENSAIO DE FLU,NCIA", ""

```

```

        PRINT #1, "CABO:", (tip$(1)), "RMC:", (tip$(2)), " COMPRIM.AMOS

```

TRA:", (tip\$(3))

```

        PRINT #1, "TEMPERATURA ESPECIFICADA:", (tip$(4)), "%CARGA INICIA

```

L:", (tip\$(5))

```

        PRINT #1, "CARGA DE TESTE(%RMC):", (tip$(6)), "CARGA DE TESTE:",

```

```

        (VAL(tip$(6)) / 100) * VAL(tip$(2)), "KGF"

```

```

        PRINT #1, "DATA

```

HORA

TEMPO

AMOST

T.DESL.1

T.DESL.2

DESL.MED

CARGA MED

TEMP.MED

T1

T2

T3

T4

T5

T6

T

7

JUNTA

FRIA

MAX

MIN "

CLOSE #1

END IF

END SUB

DEFINT A-Z

SUB elongamento

'SUBROTINA PARA LEITURA DE CANAIS ANALOGICOS 400mV

```
FOR i = 1 TO 3
  WRT$ = "C" + HEX$(i) + "TCX"           ' formata o comando de leitura
  CALL IBWRT(dstd%, WRT$)                 ' envia p/ o multiprogramador
  IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
  RD$ = SPACES(6)
  CALL IBRD(dstd%, RD$)                   ' busca o dado lido
  IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
  dado = VAL("&H" + RD$)                   ' converte de hexadecimal p/ inteiro

  IF (dado AND &H800) <> 0 THEN           ' faz a conversao do sinal
    dado = dado OR &HF800                 ' se for negativo
  ELSE
    dado = dado AND &H7FFF               ' se for positivo
  END IF
  IF i = 1 THEN
    dado = .2 * dado / 1.6
    C1! = INT(1000 * (-9.441E-11 * dado ^ 4 + 3.4114E-08 * dado ^ 3
- 2.601E-07 * dado ^ 2 + .085144 * dado - .036619)) / 1000
  END IF
  IF i = 2 THEN
    dado = .2 * dado / 1.22
    IF dado > 0 THEN
      C2! = INT(1000 * (-4.434E-10 * dado ^ 4 + 2.821E-07 * da
do ^ 3 - 4.8171E-05 * dado ^ 2 + .15743 * dado + .096253)) / 1000
    ELSE
      C2! = INT(1000 * (-1.14496E-10 * dado ^ 4 - 5.85824E-08
* dado ^ 3 - 9.35166E-06 * dado ^ 2 + .15546 * dado + .097445)) / 1000
    END IF
  END IF
  IF pa! = 1 THEN
    IF i = 1 THEN
      IF VALOR1# = 0 THEN REF1! = C1!
      VALOR1# = -REF1! - 9.441E-11 * dado ^ 4 + 3.4114E-08 * d
ado ^ 3 - 2.601E-07 * dado ^ 2 + .085144 * dado - .036619
    END IF
    IF i = 2 THEN
      IF dado > 0 THEN
        IF VALOR2# = 0 THEN REF2! = C2!
        VALOR2# = -REF2! - 4.434E-10 * dado ^ 4 + 2.821E
-07 * dado ^ 3 - 4.8171E-05 * dado ^ 2 + .15743 * dado + .096253
      ELSE
        IF VALOR2# = 0 THEN REF2! = C2!
        VALOR2# = -REF2! - 1.14496E-10 * dado ^ 4 - 5.85
824E-08 * dado ^ 3 - 9.35166E-06 * dado ^ 2 + .15546 * dado + .097445
      END IF
    END IF
  END IF
  IF i = 3 THEN
    IF dado < 0 THEN
      TEA5! = 0
    ELSE
      TEA5! = 1
    END IF
  END IF
  IF r1! > 1 THEN
    CALL celulacarga(CELULA!)
    dif! = DFCARGA! - CELULA!
    IF R5! = 0 THEN CALL motor
  END IF
```

```

NEXT i
    SLEEP 1
    CALL LIMPATELA(7, 32, 12, 49)
    LOCATE 11, 32
    PRINT "C1"; "   "; C1!
    DAD$(17) = STR$(C1!)
    LOCATE 12, 32
    PRINT "C2"; "   "; C2!
    DAD$(18) = STR$(C2!)

    IF pa! = 1 THEN
        CALL TEMPO
        LOCATE 7, 32: PRINT "DESL.(MM)"
        LOCATE 9, 32
        PRINT "ref1"; "   "; REF1!
        LOCATE 10, 32
        PRINT "ref2"; "   "; REF2!
        valor# = VALOR2# - VALOR1#
        valor# = INT(valor# * 1000) / 1000
        LOCATE 8, 32
        PRINT "Desl"; "   "; valor#
        Q! = Q! + valor#
        CALL LIMPATELA(22, 3, 22, 78)
    END IF
END SUB

DEFINT A-Z
SUB GPIBERRO
:
:       subrotina que indica que houve erro durante
:       a comunicacao atraves da interface GPIB
:
BEEP

CALL LIMPATELA(22, 3, 22, 78)
LOCATE 22, 3
PRINT "Codigo = "; IBERR; "   Status = "; HEX$(IBSTA); "H"

END SUB

SUB LIMPATELA (Linhal%, Colunal%, Linha2%, Coluna2%)
Tamanho = Coluna2% - Colunal%
FOR l = Linhal% TO Linha2%
    LOCATE l, Colunal%: PRINT SPACES(Tamanho)
NEXT l
END SUB

DEFINT A-Z
SUB motor
    IF dif! > 1 THEN motpuls$ = HEX$(10)
        IF dif! < 256 THEN motpuls$ = "0" + motpuls$
        IF dif! < 16 THEN motpuls$ = "0" + motpuls$

    IF dif! < -1 THEN motpuls$ = HEX$(4095 - 10)

    IF dif! > -9 AND dif! < 9 THEN

        WRT$ = "@0T"
        CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
        x1! = 0
    END IF
    CALL LIMPATELA(23, 35, 23, 57)
    LOCATE 23, 35: PRINT "MOTOR"; dif!; " - "; motpuls$
    WRT$ = "A" + HEX$(0) + motpuls$ + "T"
    CALL IBWRT(dstd%, WRT$)

```

```

IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
IF CELULA! >= .5 * DFCARGA! AND CELULA! < .995 * DFCARGA! THEN
    WRT$ = "@8T"
    CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
    IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
END IF
IF CELULA! < .5 * DFCARGA! THEN
    WRT$ = "@0T"
    CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
    IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
    LOCATE 22, 40
    PRINT "CELULA < 0,5*CARGA NOMINAL"
    DAD$(22) = "CELULA < 0,5*CARGA NOMINAL"
END IF
IF CELULA! > 1.005 * DFCARGA! AND CELULA! < 1.03 * DFCARGA! THEN
    WRT$ = "@8T"
    CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
    IF IBSTA < 0 THEN CALL GPIBERRO
END IF
END SUB

```

```

DEFINT A-Z
SUB TEMPO

```

```

HATUAL& = TIMER
IF HATUAL& < HA& THEN
    Hdia& = Hdia& + 1
END IF
hdif& = INT(HATUAL& - HINI& + Hdia& * 86400)
LOCATE 23, 30
HDIFE& = hdif& / 60
Hhor& = INT(hdif& / 3600)
hdif& = hdif& - (Hhor& * 3600)
hmin& = INT(hdif& / 60)
Hseg& = hdif& - (hmin& * 60)
hor$ = STR$(Hhor&)
IF Hhor& < 10 THEN hor$ = RIGHT$(hor$, 1): hor$ = "0" + hor$
MIN$ = STR$(hmin&)
MIN$ = MID$(MIN$, 2, 2)
IF hmin& < 10 THEN MIN$ = "0" + MIN$
seg$ = STR$(Hseg&)
seg$ = MID$(seg$, 2, 2)
IF Hseg& < 10 THEN seg$ = "0" + seg$
HA& = HATUAL&

```

```

LOCATE 21, 1: PRINT hor$: ":"; MIN$: ":"; seg$
DAD$(1) = hor$ + ":" + MIN$ + ":" + seg$

```

```

END SUB

```

```

DEFINT A-Z
SUB TRACIONAMENTO (porcentagem%, modo%)
CARGA! = porcentaje% * VAL(tip$(2)) / 100
CALL celulacarga(CELULA!)
IF CELULA! >= CARGA! THEN
    CALL Saymes(22, 0, 4, "CABO JA ESTA ESTICADO-INST.TERMOPARES- Q P/AQUEC.
")
    EXIT SUB

```

```

END IF
DO WHILE CELULA! < CARGA!
    CALL celulacarga(CELULA!)
    WRT$ = "@20T" 'aciona rele 6 - esticador
    CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
    CALL Saymes(22, 4, 0, "ESTICADOR ACIONADO")
    IF CELULA! >= CARGA! THEN
        WRT$ = "A00T"
    
```

```
        CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
        WRT$ = "@OT"
        CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
        BEEP
        EXIT DO
END IF
IF INKEY$ = "A" THEN
    WRT$ = "A00T"
    CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
    WRT$ = "@OT"
    CALL IBWRT(dstd%, WRT$)
    CALL LIMPATELA(22, 3, 22, 78)
    CALL Saymes(22, 4, 0, "ESTICADOR DESACIONADO")
    EXIT DO
END IF
LOOP
END SUB
```

## 11 APÊNDICE 2 - PROGRAMA COMPUTACIONAL SIMPLIFICADO PARA O PROJETO DE UM VÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO

Em função da potência máxima a ser transportada pela linha, do regime de utilização, da tensão elétrica escolhida, da distância de transporte, da variação da temperatura ao longo do tempo, das velocidades dos ventos na região, etc., será escolhido o tipo de cabo que permitirá otimizar os custos para um determinado desempenho especificado.

O programa que apresentaremos a seguir procura, a partir dos dados relativos ao cabo escolhido, determinar a quantidade de cabo necessária para a linha de transmissão, a força horizontal com que o mesmo deverá ser tracionado para que, mesmo nas condições mais adversas, as tensões admissíveis não sejam ultrapassadas e a flecha máxima para permitir o projeto das torres de transmissão.

Os dados devem ser digitados em substituição aos valores constantes em função da utilização anterior do programa, conforme a seguir:

O cabo será constituído de "na" fios de alumínio e "ns" fios de aço:

na=26

26

ns=7

7

O diâmetro dos fios de alumínio [mm] é de:

da=4.45

4.45

E o dos fios de aço:

ds=3.45

3.45

O peso específico do alumínio [N/dm<sup>3</sup>] é de:

pea=26.516

26.516

E o peso específico do aço é de:

pes=76.322

76.322

Ea = Módulo de elasticidade do alumínio; Es = módulo de elasticidade do aço [N/mm<sup>2</sup>], cujos valores são;

ea=49203

49203

es=186390

186390

A força de ruptura do cabo [N] é de:

fr=136035

136035

O coeficiente de segurança é de:

k=5

5

A fluência esperada ao longo da vida da linha de transmissão é dada em função de ensaios de laboratório, por exemplo na bancada construída no LAC, o coeficiente correspondente à fluência deve ser digitado em substituição ao valor anterior:

kflu=1.0007011

1.0007011

A temperatura mínima em Kelvin que se espera no cabo ao longo de sua vida é de:

ti=273

273

E a máxima é de:

tm=423

423

A temperatura de instalação será de:

tinst=303

303

O coeficiente de dilatação térmica do alumínio por Kelvin é de:

aa=22 10<sup>-6</sup>

11

-----

500000

E o do aço é de:

as=11.5 10<sup>-6</sup>

0.0000115

Devemos ainda considerar a força do vento. A velocidade do vento máxima esperada [km/h] é de:

v=100

100

O coeficiente próprio do cabo é:

bet=0.8

0.8

O vão "a" e o desnível "b" entre os pontos de suspensão do cabo [m] tem os seguintes valores:

$$a=400$$

$$400$$

$$b=10$$

$$10$$

A partir deste ponto com os dados informados inicia-se a execução dos cálculos.

Sendo  $S_{ca}$  = Área da seção transversal em alumínio ;  $S_{cs}$  = Área da seção transversal em aço [mm<sup>2</sup>], temos:

$$sca=3.1416 \text{ na da}^{2/4}$$

$$404.375$$

$$scs=3.1416 \text{ ns ds}^{2/4}$$

$$65.4376$$

$$sc=sca+scs$$

$$469.813$$

O Peso por unidade de comprimento [N/m] do alumínio, a 293 K será:

$$pa=sca \text{ pea } 10^{-3}$$

$$10.7224$$

e o do aço:

$$ps=scs \text{ pes } 10^{-3}$$

$$4.99433$$

$$p=ps+pa$$

$$15.7167$$

A tensão no cabo será máxima quando a temperatura for mínima, devemos portanto, considerar os pesos por unidade de comprimento para a temperatura mínima:

$$pa_0=pa (1+aa (293-t_i))$$

$$10.7271$$

$$ps_0=ps (1+as (293-t_i))$$

$$4.99547$$

$$p_0=pa_0+ps_0$$

$$15.7226$$

O diâmetro do cabo pode ser dado por:

$$d=((sca+scs) 4/\text{Pi})^{0.5}/0.87$$

$$28.1124$$

A força do vento por unidade de comprimento do cabo [N/m] é dada pela expressão:

$$pv=9.81 4.5 10^{-6} \text{ bet } d v^2$$

$$9.92818$$

E o peso virtual total por unidade de comprimento será:

$$p_0v=(p_0^2+pv^2)^{0.5}$$

$$18.5949$$

$$e=(sca \text{ ea}+scs \text{ es})/sc$$

$$68311.$$

Inicialmente podemos calcular o comprimento L do cabo, supondo cabo ideal, isto é, sem deformação.

Para isso podemos utilizar as fórmulas deduzidas para a Catenária.

A força admissível será:

$$fa=fr/k$$

27207

A força para a definição da catenária será dada por:

$$f=fa-b p_0v/2$$

27114.

A constante da catenária do cabo ideal será calculada iterativamente na célula seguinte:

```
(c=a;  
c0=.9 a;  
Label[cat];  
If[c0<0.99999 c,c=c0];  
If[c0>1.00001 c,c=c0];  
c0= f/(p0v Cosh[a/(2 c)]);  
If[c0<0.99999 c,Goto[cat]];  
If[c0>1.00001 c,Goto[cat]];  
Print[c0])
```

1444.28

c0

1444.28

A força horizontal "h0" seria:

$$h_0=c_0 p_0v$$

26856.1

A constante da catenária do cabo com deformação é calculada iterativamente a seguir:

```
(c=.9 c0;  
c4=c0;  
Label[nota];  
If[c4<0.99999 c,c=c4];  
If[c4>1.00001 c,c=c4];  
c2=Solve[c1^2-c0 c1-c0 h0 (a+c Sinh[a/c]+  
b^2/c Coth[a/(2 c)])/(4 sc e ((Sinh[a/(2 c)])^2+  
(b/(2 c))^2)^0.5)==0,c1];mt=Table[c2];c3=c1/.mt;  
c5=Cases[c3,c1_/;c1>0];c4=Product[c5[[i]],{i,1,1}];  
If[c4<0.99999 c,Goto[nota]];  
If[c4>1.00001 c,Goto[nota]];  
Print[c4])
```

1445.49

c4

1445.49

O comprimento do cabo em repouso à 273 K será:

$$st_0=c_0 ((2 \text{ Sinh}[a/(2 c_4)])^2+(b/c_4)^2)^{.5}$$

401.065

O peso do cabo será:

$$pesot=p_0 st_0$$

6305.79

A equação da catenária correspondente será:

$$y=c_4 \text{ Cosh}[x/c_4]-c_4$$
$$-1445.49 + 1445.49 \text{ Cosh}[0.000691807 x]$$

A flecha máxima será dada por:

$$y_m=c_4 \text{ Cosh}[a/(2 c_4)]-c_4$$

13.8582

Os limites do gráfico tomando em consideração o desnível serão:

$$x_{01}=-c_4 \text{ ArcCosh}[(y_m-b/2+c_4)/c_4]$$

-159.946

$$x_{02}=c_4 \text{ ArcCosh}[(y_m+b/2+c_4)/c_4]$$

233.239

O gráfico a seguir descreve a catenária:

```
Plot[y, {x,x01,x02},  
Frame->True,GridLines->Automatic,  
FrameLabel->{"vão[m]", "flecha[m]"},PlotLabel->  
"Figura 1 -Catenária à temperatura mínima,  
com ventos", AspectRatio->0.4]  
-Graphics-
```

O comprimento do cabo à 293 K será:

```
st20g=pesot/p  
401.215
```

O peso do cabo (alumínio) por metro na temperatura de instalação será:

```
painst=pa (1+aa (-tinst+293))  
10.72
```

E o peso do cabo de aço por metro na temperatura de instalação será:

```
psinst=ps (1+as (-tinst+293))  
4.99375
```

O peso total do cabo por metro será:

```
pinst=painst+psinst  
15.7138
```

O comprimento do cabo em repouso e na temperatura de instalação será dado como segue:

```
stt=pesot/pinst  
401.29
```

A seguir calculamos a constante da catenária para a condição de instalação:

```
(cx=c4;  
c5x=-2;  
Label[joge];  
If[c5x<-.05 a,cx=cx-1];  
If[c5x>.05 a,cx=cx+1];  
c5x=cx^2-(stt^2 pinst (a+cx Sinh[a/cx]+  
b^2/cx Coth[a/(2 cx)])/(4 sc e ((Sinh[a/(2 cx)]))^2+  
(b/(2 cx))^2)^.5)+stt ((2 cx Sinh[a/(2 cx)]))^2+  
b^2)^.5-b^2)/(2 Sinh[a/(2 cx)]))^2;  
If[c5x<-.05 a,Goto[joge]];  
If[c5x>.05 a,Goto[joge]];  
Print[cx])  
1365.49
```

cx

1365.49

A equação da catenária correspondente à condição de instalação será:

```
y1=cx Cosh[x/cx]-cx  
-1365.49 + 1365.49 Cosh[0.000732338 x]
```

A flecha máxima será dada por:

```
ylm=cx Cosh[a/(2 cx)]-cx  
14.673
```

Os limites do gráfico tomando em consideração o desnível serão:

```
x1=-cx ArcCosh[(ylm-b/2+cx)/cx]  
-162.436
```

```
x2=cx ArcCosh[(ylm+b/2+cx)/cx]  
231.512
```

O gráfico a seguir descreve a catenária:

```

Plot[y1, {x, x1, x2},
Frame->True, GridLines->Automatic,
FrameLabel->{"vão[m]", "flecha[m]"}, PlotLabel->
"Figura 1 -Catenária na instalação",
AspectRatio->0.4]
-Graphics-

```

A força horizontal com a qual deverá ser instalado o cabo será:  
 hinst=pinst cx  
 21457.

Semelhantemente podemos calcular os valores necessários na temperatura máxima, assim:

```

paf=pa (1+aa (-tm+293))
10.6917

```

```

psf=ps (1+as (-tm+293))
4.98686

```

```

ptf=paf+psf
15.6786

```

O comprimento do cabo em repouso na temperatura máxima será:

```

stf=pesot/ptf
402.191

```

considerando neste caso também o peso virtual devido ao vento temos:

```

ptfv=(ptf^2+pv^2)^.5
18.5577

```

Finalmente podemos considerar o efeito da fluência ao longo da vida da linha de transmissão:

```

stff=stf kflu
402.473

```

Calculamos a seguir a constante da catenária à temperatura máxima com a fluência

e a força do vento devidamente consideradas:

```

(cy=cx;
c5y=-2;
Label[big];
If[c5y<-.05 a,cy=cy-1];
If[c5y>.05 a,cy=cy+1];
c5y=cy^2-((stff^2 ptfv (a+cy Sinh[a/cy]+
b^2/cy Coth[a/(2 cy)]))/(4 sc e ((Sinh[a/(2 cy)]))^2+
(b/(2 cy))^2)^.5)+stff ((2 cy Sinh[a/(2 cy)]))^2+
b^2)^.5-b^2)/(2 Sinh[a/(2 cy)]))^2;
If[c5y<-.05 a,Goto[big]];
If[c5y>.05 a,Goto[big]];
Print[cy])
1017.49

```

A constante da catenária à temperatura máxima, porém sem considerar o vento, mas considerando a fluência será:

```

(cyl=cx;
c5y=-2;
Label[big];
If[c5y<-.05 a,cyl=cyl-1];
If[c5y>.05 a,cyl=cyl+1];
c5y=cyl^2-(((stf kflu)^2 ptf (a+cyl Sinh[a/cyl]+
b^2/cyl Coth[a/(2 cyl)]))/(4 sc e ((Sinh[a/(2 cyl)]))^2+
(b/(2 cyl))^2)^.5)+stf kflu ((2 cyl Sinh[a/
(2 cyl)]))^2+b^2)^.5-b^2)/(2 Sinh[a/(2 cyl)]))^2;

```

```

If[c5y<-.05 a,Goto[big]];
If[c5y>.05 a,Goto[big]];
Print[cy1])
1024.49

```

A constante da catenária à temperatura máxima, porém sem considerar a fluência, mas considerando o vento será:

```

(cy2=cx;
c5y=-2;
Label[big];
If[c5y<-.05 a,cy2=cy2-1];
If[c5y>.05 a,cy2=cy2+1];
c5y=cy2^2-(stf^2 ptfv (a+cy2 Sinh[a/cy2]+
b^2/cy2 Coth[a/(2 cy2)]))/(4 sc e ((Sinh[a/(2 cy2)]))
^2+(b/(2 cy2))^2)^.5)+stf ((2 cy2 Sinh[a/(2 cy2)])^
2+b^2)^.5-b^2)/(2 Sinh[a/(2 cy2)])^2;
If[c5y<-.05 a,Goto[big]];
If[c5y>.05 a,Goto[big]];
Print[cy2])
1074.49

```

A força horizontal no cabo à temperatura máxima, já incorporando o efeito da fluência, e com vento máximo será:

```

hf=ptfv cy
18882.2

```

e sem considerar o vento, o que equivale à menor força no cabo durante a vida da linha, será:

```

hf1=ptf cy1
16062.6

```

A catenária correspondente à situação de temperatura máxima, considerando vento e fluência, será dada pela equação a seguir e a sua curva pela figura adiante:

```

yf=cy Cosh[xf/cy]-cy
-1017.49 + 1017.49 Cosh[0.000982812 xf]

```

A flecha máxima será dada por:

```

yfm=cy Cosh[a/(2 cy)]-cy
19.7196

```

Os limites do gráfico tomando em consideração o desnível serão:

```

xf1=-cy ArcCosh[(yfm-b/2+cy)/cy]
-172.864

```

```

xf2=cy ArcCosh[(yfm+b/2+cy)/cy]
223.834

```

```

Plot[yf,{xf,xf1,xf2},
Frame->True,GridLines->Automatic,
FrameLabel->{"vão[m]","flecha[m]"},PlotLabel->
"Figura 2 -Catenária à temperatura máxima,
inclusive vento e fluência",
AspectRatio->0.4]
-Graphics-

```

A catenária correspondente à situação de temperatura máxima, considerando vento e não considerando a fluência, será dada pela equação a seguir e a sua curva pela figura adiante:

```

yf2=cy2 Cosh[xf/cy2]-cy2
-1074.49 + 1074.49 Cosh[0.000930675 xf]

```

A flecha máxima será dada por:

```

yfm2=cy2 Cosh[a/(2 cy2)]-cy2
18.6673

```

Os limites do gráfico tomando em consideração o desnível serão:

```
xf12=-cy2 ArcCosh[(yfm2-b/2+cy2)/cy2]
```

```
-171.198
```

```
xf22=cy2 ArcCosh[(yfm2+b/2+cy2)/cy2]
```

```
225.111
```

```
Plot[yf2,{xf,xf12,xf22},
```

```
Frame->True,GridLines->Automatic,
```

```
FrameLabel->{"vão[m]","flecha[m]"},PlotLabel->
```

```
"Figura 2 -Catenária à temperatura máxima, inclusive
```

```
vento s/fluência",
```

```
AspectRatio->0.4]
```

```
-Graphics-
```

Resumo:

Inicialmente, em função da tensão admissível e considerando os esforços devidos

ao vento e ao peso próprio, foi calculado o comprimento de cabo necessário para

um vão dado que pode ou não apresentar um desnível, à temperatura mínima esperada. A seguir, em função da dilatação térmica, foram calculados os comprimentos do cabo à 293 K para auxiliar a sua especificação e à temperatura

de instalação do cabo para a determinação da força horizontal a ser utilizada na instalação do mesmo. Finalmente foram calculados o comprimento do cabo à temperatura máxima, adicionando-se inclusive o efeito da fluência, a força horizontal

tal mínima que será a menor força atuante no cabo e as flechas que poderão ocorrer. Esses valores permitirão otimizar o projeto das torres de transmissão. Os valores são os seguintes:

Comprimento do cabo em repouso a 273 K

st0

401.065

Comprimento do cabo em repouso a 293 K p/ facilitar a especificação

st20g

401.215

Comprimento do cabo em repouso na temperatura da instalação

stt

401.29

A flecha máxima na temperatura mínima com ventos

ym

13.8582

A flecha máxima na temperatura da instalação, s/ventos

y1m

14.673

A força horizontal que deverá ser aplicada na instalação

hinst

21457.

Comprimento do cabo em repouso na temperatura máxima

stf

402.191

Comprimento do cabo em repouso na temperatura máxima considerando a fluência

stff

402.473

Força horizontal à temperatura máxima, s/vento, c/fluência.

Essa força será a menor

à qual o cabo será submetido

hf1

16062.6

Flecha máxima, com temperatura máxima, com ventos e com  
fluência

yfm

19.7196

Flecha máxima, com temperatura máxima, com ventos e sem  
fluência

yfm2

18.6673

## 12 APÊNDICE 3 - PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

### **12.1 Ensaio de Dilatação Térmica**

Para o ensaio de dilatação térmica, o sistema gerenciador solicitará a força de ensaio, a força de pré-tensão e a temperatura máxima a ser atingida.

O comportamento térmico dos cabos condutores pode ser analisado através de três parâmetros: O coeficiente de dilatação térmica do condutor completo, o coeficiente de dilatação térmica da alma de aço e a temperatura de engaiolamento. A determinação experimental destes parâmetros pode ser feita a partir da medição do alongamento do cabo condutor em função da temperatura no cabo para uma carga constante.

Conforme já estabelecido, neste ensaio o aquecimento do cabo condutor deverá ser feito em 15 minutos para evitar os efeitos da fluência. Isto será feito através da passagem de alta corrente a baixa tensão, para um vão de 6 metros, conforme recomendado. O comprimento considerado para as medições é de dois metros para evitar os efeitos de extremidades (variações de temperatura).

A medição do alongamento térmico do cabo condutor em função da temperatura é feita a partir da temperatura ambiente, após submeter o cabo a uma carga mecânica de pré-tensionamento específica por trinta minutos, também para evitar os efeitos de

fluência, e relaxar para a carga de ensaio, na seguinte seqüência:

- Logo após o fornecimento dos dados solicitados haverá uma mensagem pedindo que seja instalada a amostra de teste.

- após a instalação da amostra o sistema gerenciador, mediante comando, iniciará a tração da mesma até o limite de 5% da RMC, através do mecanismo esticador, que será controlado pela célula de carga e pelo sistema gerenciador. Desta forma será possível instalar os instrumentos (termopares e medidores de deslocamento) correspondentes. Os sete termopares serão distribuídos ao longo dos dois metros de cabo.

- Mediante nova ordem, a amostra passará a ser tensionada até atingir a força de pré-tensão determinada para cada caso, a qual será mantida por trinta minutos e em seguida relaxada para a força de ensaio.

- Deverá então ser dada nova ordem ao sistema gerenciador, que acionará o sistema de aquecimento e iniciará simultaneamente as leituras das grandezas envolvidas (tempo, temperaturas, deslocamentos e forças).

As leituras serão indicadas no monitor em tempo real e os valores instantâneos das leituras, a cada intervalo correspondente à variação de 3 K, serão registradas no relatório, portanto, no monitor poderão ser visualizadas as

leituras instantâneas e os valores do último registro no relatório.

- Ao atingir a temperatura máxima especificada, o sistema de aquecimento será desligado, a força de tração no cabo será aliviada e o teste será encerrado.

## **12.2 Ensaio de Tensão-deformação [18][25][116]**

- Para o ensaio de tensão-deformação, o sistema gerenciador solicitará o valor da temperatura de teste;

Os ensaios de tensão-deformação devem ser realizados em uma temperatura constante, dentro de uma tolerância de  $\pm 2$  K, escolhida desde a temperatura ambiente até 473 K, com a amostra de teste tracionada com uma força (carga) mantida constante pelo servomecanismo, que deverá ser inicialmente de até 5% da RMC. Com essa carga mede-se o comprimento útil do corpo de prova. Entende-se por comprimento útil, o comprimento sobre o qual são feitas as medidas do alongamento do corpo de prova.

- Logo após o fornecimento da temperatura de teste, haverá uma mensagem pedindo que seja instalada a amostra de teste;

- após a instalação da amostra o sistema gerenciador, mediante comando, iniciará a tração da mesma até o limite inicial mencionado, através do mecanismo esticador, que será controlado a partir da célula de carga e do sistema gerenciador. Desta forma será possível instalar os instrumentos (termômetros e

medidores de deslocamento) correspondentes. Uma nova ordem de prosseguimento fará acionar o sistema de aquecimento, instalado no recinto no qual se encontra a amostra, até que a temperatura atinja o valor especificado. A temperatura será mantida constante pelo regulador automático supervisionado pelo sistema gerenciador. Nessa ocasião o sistema gerenciador indicará as providências necessárias, para que seja preparado o mecanismo de manutenção da força. Após uma nova ordem será iniciada a tração do cabo (amostra), por meio do mecanismo de contrapeso, até a carga de 30% da RMC. Quando a força atingir 50% do valor especificado, entrará em operação o servomecanismo que a manterá constante, pelo período de 30 minutos. Após esse prazo a carga será retirada suavemente até o valor inicial. Após nova ordem, o cabo em teste será novamente tracionado até 50% da RMC, mantendo-se dessa vez a carga constante durante uma hora. Após esse prazo a carga será retirada suavemente até o valor inicial. Após nova ordem o mesmo procedimento será repetido, porém, até 70% da RMC por uma hora e durante o retorno à carga inicial se deverá medir os alongamentos decrescentes. Após nova ordem será elevada a carga até que ocorra a ruptura do cabo. Anotar apenas a carga de ruptura e a sua localização.

Por ocasião da tração inicial do cabo serão iniciadas também as leituras dos valores medidos, os quais serão registrados no relatório do teste.

As leituras serão indicadas no monitor em tempo real (on line) e os valores instantâneos das leituras a cada intervalo de 10(dez) segundos serão registrados no relatório, portanto, no

monitor poderão ser visualizadas as leituras instantâneas e o último valor registrado no relatório.

O sistema gerenciador supervisionará a tensão de alimentação da rede e registrará esse fato. O sistema gerenciador também deverá apresentar mensagem a respeito quando houver falta de energia elétrica.

- Os valores a serem registrados são os seguintes:

- Data, hora e o tempo a partir do início do teste.
- As temperaturas médias dos termômetros no período, a correspondente média das médias e o valor especificado da temperatura de teste.
- Os deslocamentos registrados pelos respectivos medidores e a diferença entre eles.
- A força de teste, calculada pelo sistema gerenciador em função do cabo em teste e do percentual escolhido, bem como o valor medido pelo sensor de carga.

Além disso o sistema gerenciador registrará também:

- Providências necessárias a serem tomadas para otimização dos servomecanismos.

- Os eventuais acontecimentos, tais como: Falta de energia, queda da tensão de alimentação, variações superiores a 2% na força de teste, variações superiores a 2% na temperatura de teste, e outras informações que forem julgadas necessárias.

- A seguir se fará o ensaio da alma de aço do condutor, de forma análoga à realizada com o condutor completo, porém, carregando a amostra até que se produzam os alongamentos verificados no condutor completo para as cargas utilizadas.

A tensão inicial na alma de aço é calculada pela fórmula:

$$T_c = E_c \frac{T}{E}$$

Onde:  $T_c$  = Tensão inicial na alma de aço.

$T$  = Tensão inicial no condutor completo.

$E_c$  = Módulo de elasticidade da alma.

$E$  = Módulo de elasticidade do condutor completo, determinado pelo ensaio tensão-deformação do condutor completo.

Com o valor de  $T_c$  determina-se a carga inicial a ser aplicada, utilizando-se a área da seção nominal da alma.

Obs.: Para o cálculo de  $T$ , considerar a área da seção nominal do cabo completo (aluminio + aço).

Os resultados deverão ser apresentados em um gráfico cartesiano onde são mostradas as curvas tensão-deformação do condutor completo, da alma de aço e da sua diferença correspondente ao alumínio.

### **12.3 Ensaio de Amortecimento [56,60]**

Para esse ensaio serão necessários um excitador e um analisador de vibrações mecânicas.

- Escolhida a opção "amortecimento", o sistema gerenciador oferecerá as opções: 15%, 20%, 25%, 30% ou 40%;

Os ensaios de amortecimento devem ser realizados em uma temperatura constante, dentro de uma tolerância de  $\pm 2$  K, com a amostra de teste tracionada com uma força mantida constante por um servomecanismo, que deverá ser preferencialmente de 15, 20, 25, 30 ou 40% da RMC (resistência mecânica calculada).

- Logo após o fornecimento dos dados solicitados haverá um mensagem, pedindo que seja instalada a amostra de teste. A amostra deverá ser instalada sem a alavanca e o ponto de ancoragem será o ponto distante que permite um vão de teste de 60 metros.

- após a instalação da amostra o operador comandará a tração da mesma até o limite de 5% da RMC, através do mecanismo esticador, que neste caso será controlado manualmente com o auxílio do sensor de carga. Desta forma será possível instalar os instrumentos (termômetros, medidores de deslocamento,

acelerômetros, etc.) e excitador correspondentes. Nessa ocasião o sistema gerenciador indicará as providências necessárias, para que seja preparado o mecanismo de manutenção da força;

- Após uma nova ordem será iniciada a tração do cabo (amostra) por meio do mecanismo do sistema de contrapeso. Quando a força atingir 50% do valor especificado poderá ser atuado o servomecanismo, que doravante a manterá constante, dentro da tolerância normalizada de  $\pm 2\%$ , ao longo do ensaio.

Caso ocorra o rompimento do cabo, a força na amostra desaparecerá. Quando o valor dessa força se tornar inferior a 50% da força de teste especificada o servomecanismo será desativado.

- O cabo será então colocado em vibração pelo excitador nas suas freqüências naturais, pelo menos 5, cujos comprimentos de onda correspondam a freqüências que possam ocorrer para velocidade do vento de 3 a 30 km/h, considerando o diâmetro do condutor, incluindo o valor máximo e mínimo.

A relação entre a velocidade do vento, a freqüência e o diâmetro do condutor é dada pela fórmula de Strouhal conforme já mencionado:

$$f = S \frac{V}{D}$$

- Serão então efetuadas a cada 10 minutos as leituras dos valores medidos de temperatura e força de tração, os quais serão registrados no relatório do teste.

- As vibrações serão registradas pelo analisador a cada nova condição, logo que esta se apresente estável.

O sistema gerenciador supervisionará a tensão de alimentação da rede e registrará esse fato, bem como passará a registrar os valores medidos periodicamente a cada minuto, enquanto durar a anormalidade.

- Os valores a serem registrados, além das medições das vibrações feitas pelo analisador, são os seguintes:

- O tempo a partir do início do teste.
- As temperaturas dos termômetros.
- A força de teste, determinada pelo sistema gerenciador em função do cabo em teste e do percentual de teste escolhido, bem como o valor medido pelo sensor de carga.
- Providências necessárias a serem tomadas para otimização do servomecanismo.
- Os eventuais acontecimentos, tais como: falta de energia, variações superiores a 2% na força de teste, variações

superiores a 2% na temperatura de teste, e outras informações que forem julgadas necessárias.