

# Simulação em Laboratório de Extensômetro Horizontal de Múltiplas Hastes e de Células Hidrostáticas de Recalque

Taylor C. Oliveira., FURNAS Centrais Elétricas S.A.

**Resumo**—Em barragens geotécnicas são utilizados diferentes tipos de instrumentos com o objetivo de monitorar o comportamento das estruturas. A maioria desses instrumentos, por ficarem embutidos no aterro, não podem mais ser calibrados ou inspecionados para se comprovar o bom funcionamento. Este trabalho tem por objetivo apresentar resultados de uma pesquisa que buscou simular o funcionamento, comprovar a eficiência e identificar possibilidades de aprimoramento de dois dos principais tipos de medidores de deslocamento internos em maciços de barragens, que são os extensômetros horizontais de hastes múltiplas e as células hidrostáticas de re-calque tipo caixa sueca.

A pesquisa constituiu-se na montagem de protótipos dos referidos sistemas de instrumentos, em escala natural, compatível com as dimensões de grandes barragens, de modo a efetuar as simulações de funcionamento dos mesmos.

**Palavras-chave**—Instrumentação. Barragem. Instrumento. Extensômetro Horizontal. Célula de Recalque. Caixa Sueca.

## I. INTRODUÇÃO

Diferentes tipos e modelos de instrumentos têm sido desenvolvidos e utilizados para a medição de deslocamentos em aterros e barragens. Pouco se tem publicado a respeito do desempenho, funcionamento e confiabilidade de instrumentos, com base em pesquisas direcionadas para este objetivo.

Este trabalho resume os resultados obtidos de um projeto de pesquisa desenvolvido na área de Instrumentação e Auscultação para a Segurança de Barragens, do Laboratório de Solos de FURNAS em Aparecida de Goiânia-GO, com o objetivo de simular o funcionamento, comprovar a eficiência e identificar possibilidades de aprimoramento de dois dos principais tipos de medidores de deslocamento internos em maciços de barragens, que são os extensômetros horizontais de hastes múltiplas e as células hidrostáticas de recalque, estas conhecidas no meio técnico brasileiro pelo nome de caixas suecas.

A pesquisa constituiu-se na montagem de protótipos dos referidos sistemas de instrumentos, em escala natural, compatível com as dimensões de grandes barragens.

Este trabalho foi apoiado financeiramente pelo Programa Anual de P&D de FURNAS Centrais Elétricas S.A. sob a gestão da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

Taylor C. Oliveira, engenheiro civil, trabalha no Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS (e-mail: taylor@furnas.com.br).

## II. EXTENSÔMETRO HORIZONTAL DE MÚLTIPLAS HASTES

O extensômetro horizontal que foi montado em laboratório é similar ao modelo adotado nas barragens de enrocamento de Xingó, Machadinho, Itá e Itapebi, constituído por um feixe de hastes paralelas, que são ordenadas através dos furos existentes nos discos espaçadores. Estes discos são posicionados a cada 1,65 m no interior de um tubo de aço galvanizado com emendas telescópaveis. Cada haste tem uma extremidade fixada à placa correspondente e a outra extremidade fica livre no terminal de leitura. Deste modo, o movimento horizontal da placa é transmitido pela haste ao terminal. A figura 1 mostra um perfil esquemático do extensômetro horizontal de múltiplas hastes.

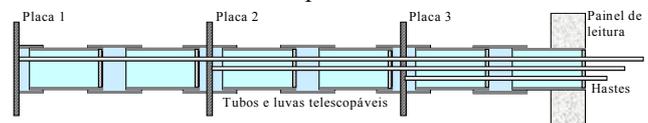


Figura 1. Perfil esquemático do extensômetro horizontal de múltiplas hastes.

O deslocamento horizontal de cada placa é obtido pela diferença entre as leituras atual e inicial, medidas em uma escala milimetrada, acrescido do deslocamento horizontal do painel de leitura, obtido por topografia de precisão.

Este modelo de instrumento foi instalado pela primeira vez na barragem de Xingó, na década de 90 e vem sendo adotado na maioria das barragens de enrocamento com face de concreto, BEFC, construídas no Brasil nos últimos 10 anos. Sua concepção foi inspirada no medidor de recalque de hastes tipo KM, de uso consagrado em barragens de terra, com algumas modificações para sua utilização na posição horizontal.

### A. Montagem do Protótipo do Extensômetro de Hastes

Um protótipo de extensômetro horizontal de múltiplas hastes, em escala natural, foi montado em uma faixa de terreno com cerca de 1,20 m de largura por 160,00 m de extensão, regularizada com um forro de pedrisco, como ilustrado na foto 1.



Foto 1. Vista do protótipo de extensômetro horizontal.

A montagem foi feita com 6 placas igualmente espaçadas de 24,70 m, aproximadamente. Os comprimentos das hastes foram: H1 = 148,81 m, H2 = 123,96 m, H3 = 99,26 m, H4 = 74,42 m, H5 = 49,56 m e H6 = 24,84 m. Na foto 2 pode-se ver a disposição das hastes no terminal de leituras.



Foto 2. Terminal de leitura do extensômetro horizontal

Para possibilitar a movimentação de cada placa foram desenvolvidos e montados no local 6 dispositivos mecânicos simuladores de deslocamento horizontal, como mostra a foto 3.

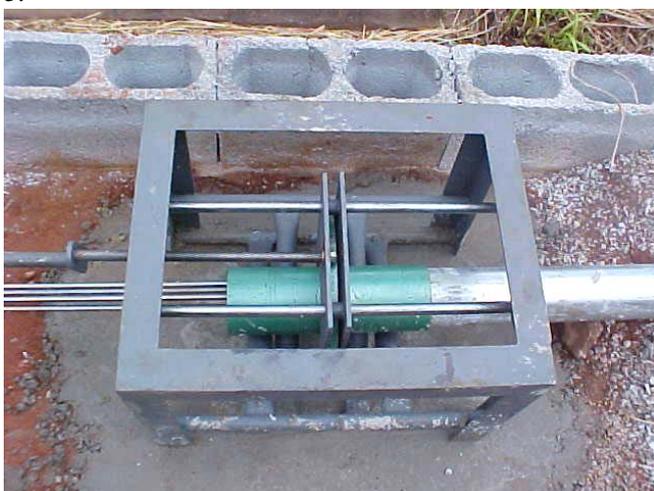


Foto 3. Simulador de deslocamento horizontal com placa montada.

### B. Simulações Efetuadas no Extensômetro de Hastes

As simulações efetuadas foram:

- Montagem do protótipo em laboratório, buscando reproduzir as condições básicas de campo;
- Movimentação das placas e respectivas hastes com o auxílio dos simuladores de deslocamento;
- Comparação dos deslocamentos lidos no terminal de leituras com o deslocamento imposto às hastes.

A montagem do extensômetro horizontal procedeu-se no sentido do painel de leituras para as placas. Nesse sentido de montagem observou-se uma dificuldade em manter as hastes separadas e distribuídas paralelamente, chegando-se a constatar o entrelaçamento de duas hastes no espaço compreendido entre dois discos espaçadores, dificultando a livre movimentação das hastes. Para sanar esta dificuldade foi desenvolvido um dispositivo simples para servir de guia até a colocação do disco espaçador, garantindo assim o posicionamento correto das hastes no interior do tubo. A foto 4 mostra o referido dispositivo.



Foto 4. Dispositivo guia para a montagem das hastes.

Com as hastes corretamente posicionadas e alinhadas paralelamente, o sistema apresentou um bom desempenho no que se refere à facilidade de movimentação manual das hastes em ambos os sentidos de deslocamento horizontal.

Os valores do deslocamento imposto às placas foram determinados pela média dos deslocamentos de dois relógios comparadores, com leituras em centésimo de milímetro, posicionados um de cada lado da placa. O deslocamento das hastes associadas a cada uma das placas foi obtido através da variação das leituras do movimento da extremidade de cada haste em uma escala milimetrada fixada no painel de leitura do protótipo. A figura 2 apresenta um gráfico típico do comportamento da placa EH-06.

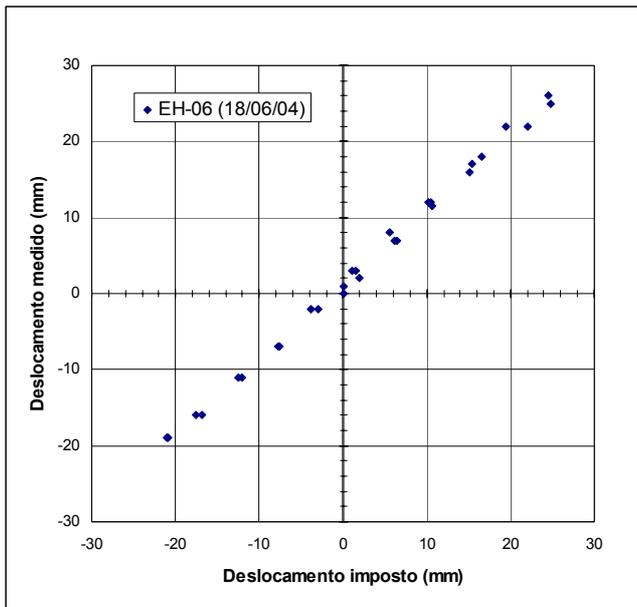


Figura 2. Deslocamento imposto x deslocamento medido na placa EH-06

As simulações efetuadas mostraram uma boa compatibilidade entre os deslocamentos impostos às placas e os deslocamentos observados no terminal de leitura. Como a montagem do protótipo foi na superfície do terreno, com exposição direta ao sol, observou-se uma significativa dilatação térmica das hastes.

Na situação real de campo essa influência é mínima, já que o extensômetro fica embutido no aterro, onde a variação térmica é de pouca significância, sendo normalmente desconsiderada para efeito de correção das leituras.

Devido a atrasos no desenvolvimento e montagem do projeto, não houve tempo para a realização de outras simulações de situações hipotéticas de campo, o que será feito posteriormente com recursos próprios de FURNAS, uma vez que os protótipos continuam montados com o objetivo de dar continuidade às pesquisas e para treinamento do pessoal técnico da empresa e de terceiros, que é um dos subprodutos do projeto.

### III. CÉLULAS HIDROSTÁTICAS DE RECALQUE

O sistema conhecido no meio técnico brasileiro por caixa sueca é o instrumento mais utilizado para medir deslocamentos verticais (recalque) nas barragens de enrocamento construídas nos últimos anos. Seu princípio de funcionamento é hidrostático. Constitui-se de uma célula de recalque, embutida em um determinado ponto da barragem, cujo deslocamento vertical é medido ao longo do tempo em relação à data de instalação.

O recalque do maciço abaixo da célula é determinado pela medição da componente vertical do deslocamento em relação à cota de instalação. A figura 3 ilustra o esquema de funcionamento deste instrumento.

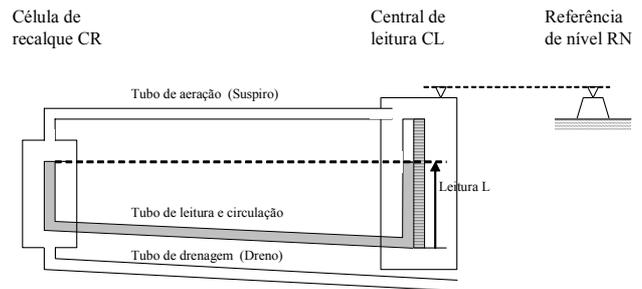


Figura 3. Esquema de funcionamento do medidor hidrostático de recalque.

O sistema possibilita determinar a elevação da célula de recalque através da leitura do nível d'água no seu interior. Isto é feito por meio de uma tubulação cheia de água que interconecta a célula de recalque a um ponto situado no exterior do aterro. A elevação do nível da água no tubo é determinada a partir de um nivelamento topográfico de precisão. O recalque é a diferença entre as elevações, inicial e atual, do nível da água na tubulação de leitura.

A leitura é efetuada adicionando-se água no interior da tubulação, até ocorrer o transbordamento no interior da célula. O excesso de água é escoado através do tubo de drenagem para o maciço de enrocamento. O nível d'água estabilizado na tubulação, no terminal de leitura, equivale ao nível da outra extremidade do tubo, na célula de recalque. Esta correspondência é garantida pelo princípio dos vasos comunicantes, desde que a pressão atmosférica seja mantida no interior da célula de recalque por meio do tubo de ar (suspiro). Outra condição para o funcionamento adequado da caixa sueca é garantir a ausência de bolhas de ar que interferem na circulação e no equilíbrio da coluna de água na tubulação de leitura.

#### A. Montagem dos Protótipos das Caixas Suecas

Os protótipos das caixas suecas foram montados em uma tenda de lona plástica, com 5,5 m de pé-direito, em uma área anexa aos laboratórios de FURNAS em Goiânia. Para a distribuição dos tubos das células de recalque montou-se uma estrutura metálica leve, com 5 m de altura e perímetro de 10 m, feita com perfis de metalon, como se pode ver na foto 5.



Foto 5. Estrutura suporte dos tubos das células de recalque.

Foram fabricadas duas dessas estruturas, cada uma com

capacidade para simular células de recalque com até 400 m de tubulação distribuída ao longo do perímetro da estrutura, com uma declividade de 1,0 %, permitindo a utilização de 4 tubos por célula (2 tubos de leitura, 1 para circulação de ar e 1 de drenagem). A fixação dos tubos na estrutura é feita por meio de suportes apropriados para o encaixe dos tubos.

Para permitir a movimentação e os ajustes na posição das células de recalque desenvolveu-se o projeto de uma estrutura para elevação das células através de cabo de aço e roldana.

O painel de leituras montado ao lado da estrutura para elevação das células foi fabricado com chapa de alumínio, trenas milimetradas, mangueiras transparentes, registros de duas vias e conexões apropriadas. A foto 6 mostra o painel de leituras e a estrutura para elevação das células.



Foto 6. Estrutura suporte dos tubos das células de recalque.

Para circulação da água destilada e deaerada utilizou-se um conjunto de saturação usual constituído por um compressor de ar, duas câmaras cilíndricas de acrílico, manômetro, vacuômetro e registros de controle, interligado com o tanque de deaeração da água. Uma das câmaras tem em seu interior um balão de borracha que ao ser inflado faz com que a água circule através do tubo de leitura da célula, promovendo a saturação completa da tubulação.

### B. Materiais e Equipamentos das Caixas Suecas

Na primeira estrutura suporte foram simuladas duas células de recalque, sendo uma com os quatro tubos de 6,4 mm de diâmetro interno (3/8 de polegada nominal), simulando a situação de instalação em que os tubos de ar e drenagem são conduzidos até a cabine de leitura e outra com dois tubos de leitura de 4,3 mm de diâmetro interno (1/4 de polegada nominal) sem os tubos de ar e de drenagem. Ambas as células com aproximadamente 380 metros de extensão dos tubos.

Na segunda estrutura suporte foram montados dois tubos de leitura com aproximadamente 50 metros de extensão, sendo um com 4,3 mm e o outro com 6,4 mm de diâmetro interno.

Foram utilizados tubos de polietileno semitransparentes fornecidos em rolos de 60 metros pelo fabricante, que ainda forneceu os registros e conexões para a montagem das caixas suecas com os respectivos painéis de leitura.

As células de recalque foram fabricadas com base em de-

senhos de projeto de instrumentação de obras, procurando-se manter a semelhança dos protótipos com a prática usual nas barragens, de modo que os resultados obtidos possam ser comparáveis.

A água destilada foi deaerada em um tanque apropriado.

### C. Simulações Efetuadas nas Células de Recalque

Na série de testes efetuados foi feita a injeção da água com a mangueira de abastecimento conectada na extremidade superior do tubo posicionada verticalmente no painel de leitura.

A condição de exposição dos protótipos das caixas suecas a grande variação de temperatura causou significativa oscilação no nível da água, nas extremidades dos tubos de leitura, devido à dilatação e retração do material dos tubos. O gráfico apresentado na figura 4 ilustra esse efeito. Observou-se que após o acréscimo de uma coluna de água no tubo de leitura ocorreu o retorno do nível d'água até a posição equivalente à extremidade do tubo na célula, mas, após um certo tempo de aparente estabilização a coluna de água continuou rebaixando, até cerca de 150 mm abaixo dessa posição, enquanto a temperatura (até então não era registrada) encontrava-se em elevação. Em seguida observou-se a elevação do nível d'água em consequência da queda da temperatura no interior da tenda dos protótipos. Nos testes seguintes passou-se a registrar as temperaturas.

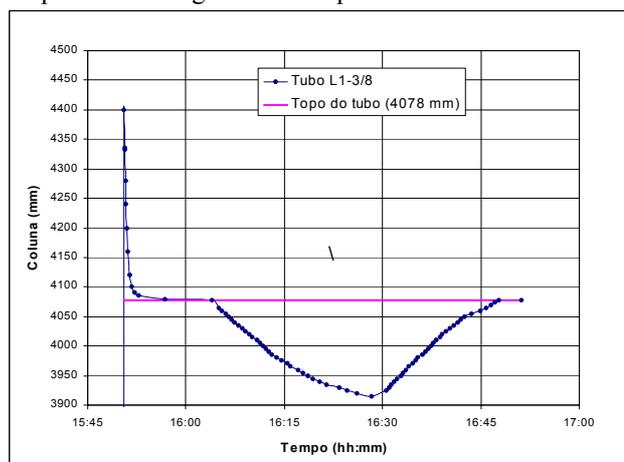


Figura 4. Variação na leitura por dilatação térmica dos tubos

Para reduzir este efeito ao mínimo compatível com a situação de campo, onde os tubos embutidos no aterro sofrem pouca variação térmica, recomenda-se a montagem dos protótipos em um ambiente onde não ocorram grandes oscilações de temperatura.

Da série de testes de circulação de água e das leituras efetuados constatou-se que o tempo de estabilização da leitura, após o acréscimo de uma coluna d'água da ordem de 30 a 40 centímetros, foi em média de 3 minutos para os tubos de 6,4mm de diâmetro interno e de 5 minutos para os tubos de 4,3mm de diâmetro interno, como se pode ver na figura 5.

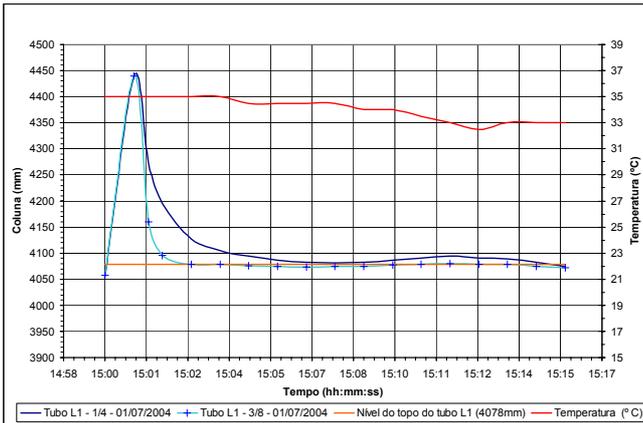


Figura 5. Tempos de estabilização para tubos de 6,4 e de 4,3 mm

Para tempo de observação maior constatou-se o rebaixamento do nível da água nas duas extremidades da tubulação, ficando abaixo do topo do tubo no interior da célula de recalque.

Na célula com tubo de drenagem de comprimento igual ao dos tubos de leitura foram efetuados repetidos testes de circulação de água, à pressão constante de 98 kPa, com o objetivo de verificar a eficiência da drenagem. Nesses testes foram injetados 14 litros de água no tubo de leitura, em 5 etapas consecutivas devido à limitação do reservatório de água da câmara de saturação. Constatou-se que, com o tubo de drenagem previamente esgotado o tempo de retorno do volume total acrescentado foi da ordem de 125 minutos, enquanto que, com o dreno saturado esse tempo de retorno reduziu-se para 90 minutos, em média, como se pode ver na figura 6.

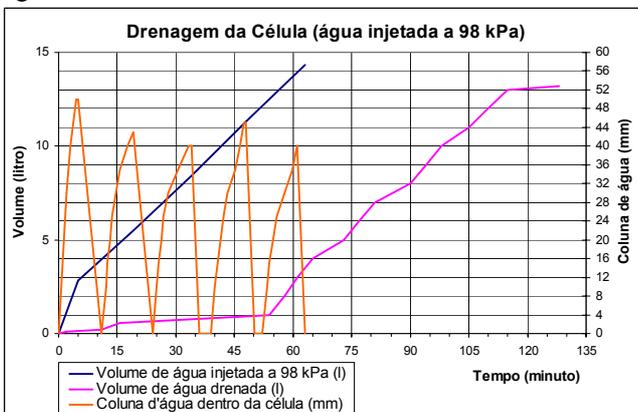


Figura 6. Teste da eficiência do tubo de drenagem

Em cada etapa dos testes de eficiência da drenagem, após cerca de 5 minutos do início da circulação formou-se uma coluna d'água de 4 a 5 centímetros no interior da célula. Em seguida ocorreu o rebaixamento até o esgotamento total da célula em um intervalo de tempo equivalente.

Os gráficos apresentados nas figuras 7, 8 e 9 mostram a recuperação do nível d'água em tubo de leitura com 6,4 mm de diâmetro interno. Os gráficos das figuras 10, 11 e 12 mostram a recuperação do nível d'água em tubo de leitura com 4,3 mm de diâmetro interno. Em ambos os casos, acrescentou-se uma coluna de água com aproximadamente 35 cm, com repetições sucessivas a cada 15 minutos.

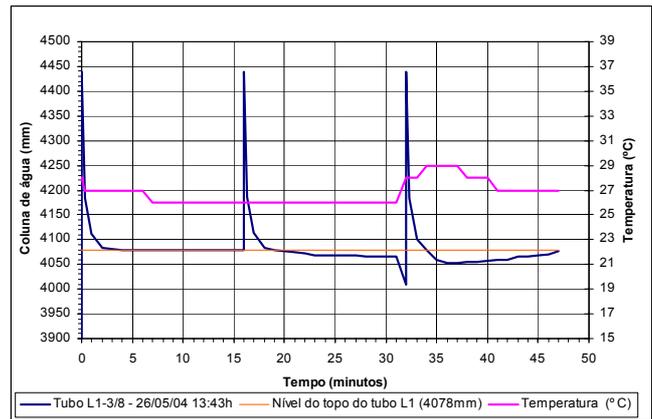


Figura 7. Teste de estabilização do nível d'água em tubo com DI = 6,4 mm

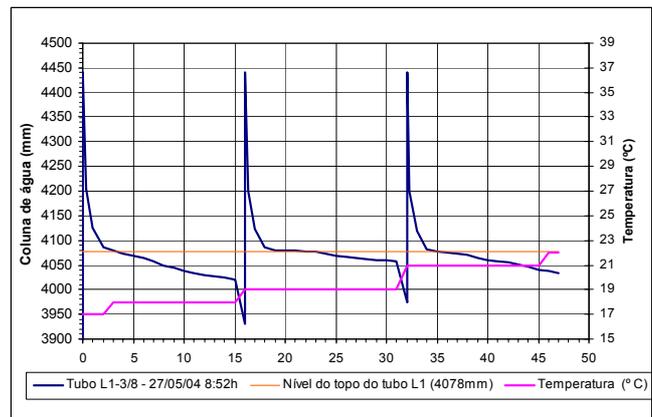


Figura 8. Teste de estabilização do nível d'água em tubo com DI = 6,4 mm

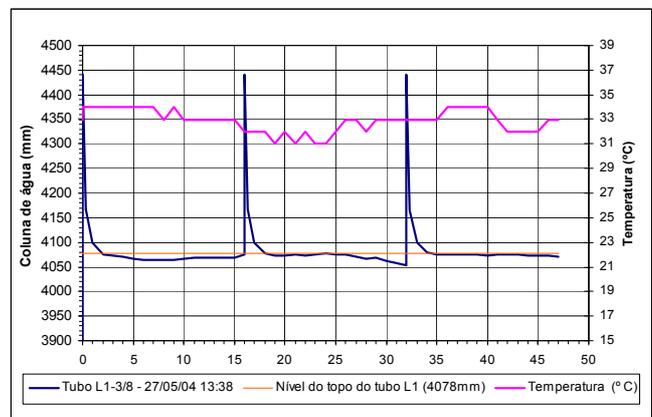


Figura 9. Teste de estabilização do nível d'água em tubo com DI = 6,4 mm

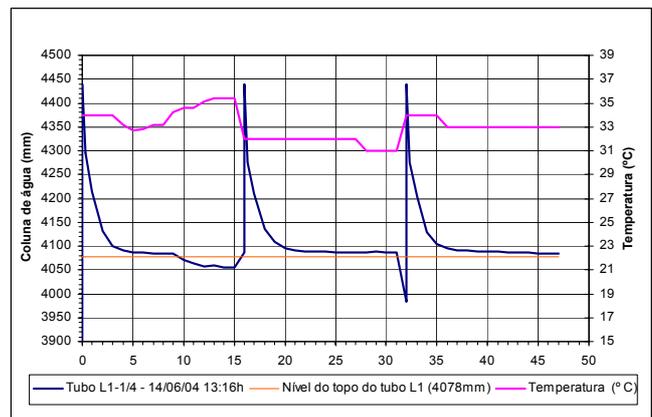


Figura 10. Teste de estabilização do nível d'água em tubo com DI = 4,3 mm

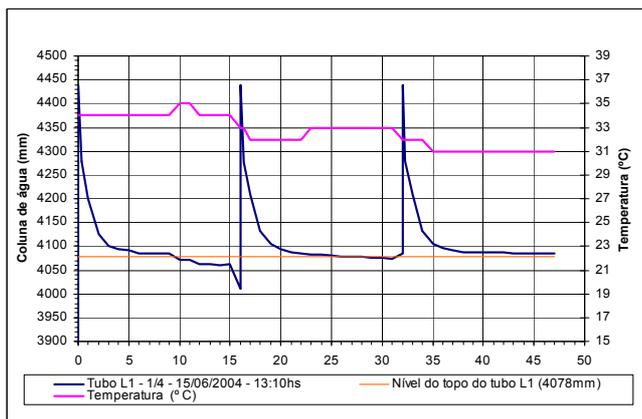


Figura 11. Teste de estabilização do nível d'água em tubo com DI = 4,3 mm

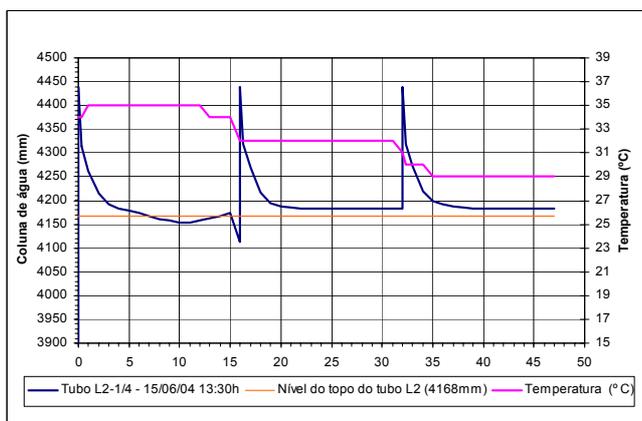


Figura 12. Teste de estabilização do nível d'água em tubo com DI = 4,3 mm

Os testes mostraram que a estabilização das leituras ocorre em intervalos de tempo inferiores a 15 minutos, para ambos os diâmetros ensaiados, sendo até inferior a 5 minutos para os tubos de 6,4 mm de diâmetro interno.

Os resultados obtidos até o final do prazo estipulado para a pesquisa mostraram-se promissores, atestando o bom funcionamento dos protótipos testados e o desempenho dos instrumentos, entretanto para que se chegue a conclusões mais consistentes será necessário dar continuidade aos testes, repetindo-se as simulações efetuadas e criando-se outras simulações através da imposição de possíveis causas de mau funcionamento para que se possa avaliar melhor a resposta dos instrumentos.

A análise dos resultados apresentados nos testes efetuados nos protótipos, tanto do extensômetros horizontal quanto das células de recalque tipo caixa sueca mostra que ambos respondem satisfatoriamente, quando corretamente montados e operados. No caso das células de recalque este comentário é válido para os dois diâmetros de tubo de leitura testados, de 6,4 mm e 4,3 mm internos, com comprimentos da tubulação, da ordem de 380 m e de 50 m.

#### IV. AGRADECIMENTOS

O autor agradece às gerências do Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS e do Laboratório de Solos, pelo incentivo à atividade de pesquisa e em especial à equipe técnica do setor de Instrumentação deste departamento pela imprescindível contribuição durante a montagem e na

execução dos testes.

#### V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

##### Periódicos:

- [1] The Swiss National Committee on Large Dams, "Measuring installations for dam monitoring". Special issue to the 17th International Congress on Large Dams, Vienna 1991, ZURICH: Wasser, energie, luft, 83, 1991.

##### Livros:

- [2] J. Dunicliff and G. E. Green., *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*, New York: John Wiley & Sons, 1988, 557p

##### Artigos em Anais de Conferências (Publicados):

- [3] T. C. Oliveira, "Considerações sobre Medidores de Deslocamento em Barragens de Enrocamento com Face de Concreto," Anais do XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Tema 4, Fortaleza, CBDB, 2001
- [4] T. C. Oliveira e A. S. F. J. Sayão, "Experiência Brasileira na Medição de Deformações em Barragens de Enrocamento," Anais do II Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Sessão 4, Aveiro, Portugal, ABMS-SPG, 2004.