



**XX SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO - I**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**DESLOCAMENTOS DA BEFC MEDIDOS APÓS O ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO DA UHE XINGÓ**

**Ricardo José Barbosa de Souza (\*)  
Aurélio Alves de Vasconcelos**

**Alberto Jorge C.Tavares Cavalcanti  
Ângela Cristina Bezerra Rodrigues**

**COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO - CHESF**

**RESUMO**

O trabalho apresenta resultados dos deslocamentos da barragem de enrocamento com face de concreto (BEFC) da UHE Xingó e análises correlacionando trincas observadas na laje de montante com as variações da vazão de percolação e aceleração da velocidade dos recalques.

Após o enchimento do reservatório, observou-se uma intensificação dos deslocamentos e os valores dos recalques específicos atuais continuam altos para o tempo de operação não apresentando ainda uma tendência de estabilização.

O acompanhamento através da instrumentação da barragem foi muito importante para detecção e correção dos problemas de trincas e continua fundamental para avaliação da segurança da barragem.

**PALAVRAS-CHAVE**

Xingó, Enrocamento, Face de Concreto, Instrumentação, Segurança de Barragem

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O aproveitamento hidrelétrico de Xingó pertence à Companhia Hidroelétrica do São Francisco - CHESF e está situado no rio São Francisco, entre os estados de Alagoas e Sergipe. A usina tem uma potência instalada de 3.162 MW e a barragem principal é do tipo enrocamento com face de concreto (BEFC), com altura máxima de 150 m, comprimento de 850 m e volume de 12.900.000 m<sup>3</sup>. O projeto do empreendimento foi desenvolvido pela Promon Engenharia Ltda.

A fundação da barragem é constituída de rochas gnaissicas, com estrutura ora xistosa, ora granítica. Nas ombreiras, o enrocamento foi lançado sobre a rocha alterada sendo removida uma camada de 1,0 m a 1,50 m de solo superficial da fundação. No leito do rio, existia uma camada de aluvião que foi removida parcialmente à jusante da laje, assim como no pé do talude de jusante, sendo incorporado à barragem no trecho restante.

O plinto foi construído com a espessura de 0,5 m, largura variando de 4,0 m a 7,7 m e ancorado em rocha sã através de chumbadores com diâmetro de 32 mm, a cada 1,7 m<sup>2</sup>. O tratamento de fundação evidenciou um maciço de baixa permeabilidade sendo que 93% dos trechos injetados consumiram menos de 50 kg/furo e somente 1% dos trechos consumiram mais de 300 kg/m. A laje de concreto à montante tem a espessura variando entre 0,30 m e 0,70 m e juntas de contração verticais a cada 16,0 m. A laje foi executada em duas etapas, a primeira até El. 70 m e a segunda da El. 70 m até El. 138 m.

(\*) Rua Delmiro Gouveia, n° 333 – sala C 235 - Bloco C – CEP 50.761-901 Recife, PE, – Brasil  
Tel: (+55 81) 3229-3008 – Fax: (+55 81) 3229-3011 – E-mail: ricardob@chesf.gov.br

Para a execução do enrocamento foi utilizado o material granítico-gnáissico proveniente das escavações obrigatórias das estruturas, não sendo requerida exploração de pedreiras. A construção da barragem terminou no primeiro semestre de 1994 e o enchimento do reservatório ocorreu entre 10/06/94 e 15/11/94. A Figura 1 mostra a geometria da barragem e o zoneamento do enrocamento.

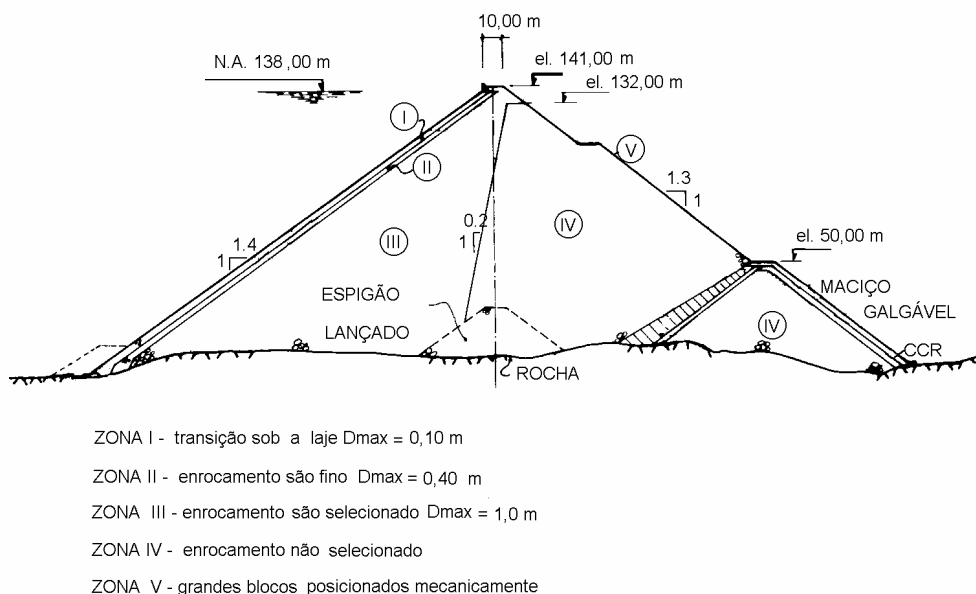


FIGURA 1: Seção Típica Mostrando as Diversas Zonas de Enrocamento da Barragem.

A instrumentação de auscultação da barragem foi planejada para efetuar medições de deslocamentos do maciço de enrocamento e registrar as movimentações das juntas na laje de concreto da face de montante. Os dados fornecidos pela instrumentação possibilitaram, durante o período construtivo, a realização de análises com utilização de modelos matemáticos e foram muito importantes para otimização do projeto e para previsões do desempenho da barragem. Na fase atual de operação, as medições dos deslocamentos e vazões de percolação fornecem parâmetros que orientam as etapas de inspeções subaquáticas e tratamentos das trincas ocorridas na laje de montante e permitem um acompanhamento da segurança da barragem.

## 2.0 - PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação do maciço da barragem foi projetada para a seção de maior altura, no leito do rio, e duas seções nas ombreiras. No projeto de instrumentação foi considerada a influência do efeito tridimensional da forma do vale, que apresenta ombreiras bastante íngremes, com declives da ordem de  $45^\circ$  e topografia da fundação com queda acentuada para jusante na ombreira esquerda.

Cada seção instrumentada é dotada de células de recalque, baseadas no princípio de vasos comunicantes, e extensômetros múltiplos horizontais tipo "KM", instalados nas elevações 55 m, 85 m e 110 m. Os deslocamentos do maciço são acompanhados também através de colimações topográficas, utilizando marcos superficial instalados na crista e ao longo do talude de jusante da barragem.

Na seção do leito do rio foram instalados dois medidores magnéticos de recalque, cujo princípio de funcionamento é a indução de um sinal de rádio, quando o torpedo de leitura passa pelo campo eletromagnético gerado no centro de um anel imantado permanentemente. A face da barragem foi instrumentada com medidores elétricos de junta, com campos de leituras de até 100 mm, localizados ao longo da junta perimetral do plinto, e entre painéis da laje nas ombreiras. Para observações de tensões na laje, foram instaladas rosetas de deformímetros, constituídas de três deformímetros cada uma, embutidas no concreto. Para acompanhamento das evoluções térmicas, durante a fase de hidratação do concreto e posteriormente, acompanhar a temperatura da água do reservatório, foram instalados termômetros, ao longo da laje.

Para monitoramento dos deslocamentos verticais e horizontais do maciço de enrocamento foram escolhidas três seções "chaves" representativas da ombreira direita, seção de maior altura no leito do rio e ombreira esquerda, localizadas respectivamente nas Estacas 40+00, 49+00 e 62+00. Também foram instalados instrumentos em alguns locais considerados críticos principalmente na ombreira esquerda, onde foram instalados 10 eletrônicos

sobre a face de concreto. Posteriormente ao enchimento do reservatório foi instalada uma instrumentação adicional para acompanhamento de deslocamentos e abertura de juntas na região onde se observou o aparecimento de trincas na laje.

Os recalques do maciço de enrocamento, durante os 14 anos de operação, estão sendo monitorados através de células hidráulicas de recalque, tipo caixa sueca baseadas no princípio de vasos comunicantes, associadas a medições topográficas das cabines de leitura localizadas no talude de jusante. Os deslocamentos horizontais são medidos nas mesmas posições das células de recalque, através de extensômetros múltiplos de hastes horizontais tipo "KM". Os deslocamentos de placas embutidas no aterro, junto das células de recalque, são medidos na extremidade livre das hastes nas cabines de leitura a jusante. Foram instaladas placas dos extensômetros "KM" e células de recalque "CR" bem próximas da laje de concreto para possibilitar o registro dos deslocamentos da laje de concreto. Foram instaladas no total 23 células de recalque, 08 extensômetros múltiplos horizontais, 24 marcos nos taludes e crista e 11 marcos em cabines de leituras. As vazões de infiltração são obtidas através de um medidor de vazão triangular, instalado na enseadeira de jusante, efetuando-se assim um controle global das infiltrações e drenagem da barragem e fundação.

Superficialmente, os deslocamentos horizontais e verticais estão sendo medidos através de nivelamentos topográficos de precisão nos marcos instalados no topo da laje, na parte superior do talude de montante e na superfície do talude de jusante, incluindo as cabines de leitura da instrumentação.

As Figuras 2 a 4 apresentam o posicionamento da instrumentação nas seções instrumentadas correspondentes as estacas 40, 49 e 62. A seção da estaca 62, na ombreira esquerda, com 98 metros de altura, embora não seja a de maior altura foi aquela que apresentou os maiores problemas devido à conformação desfavorável de sua fundação. O declive da fundação para jusante foi causa do aparecimento de recalques diferenciais que provocaram ainda durante a construção o aparecimento de trincas na zona de apoio da laje e posteriormente contribuiu para as trincas observadas na laje de concreto.

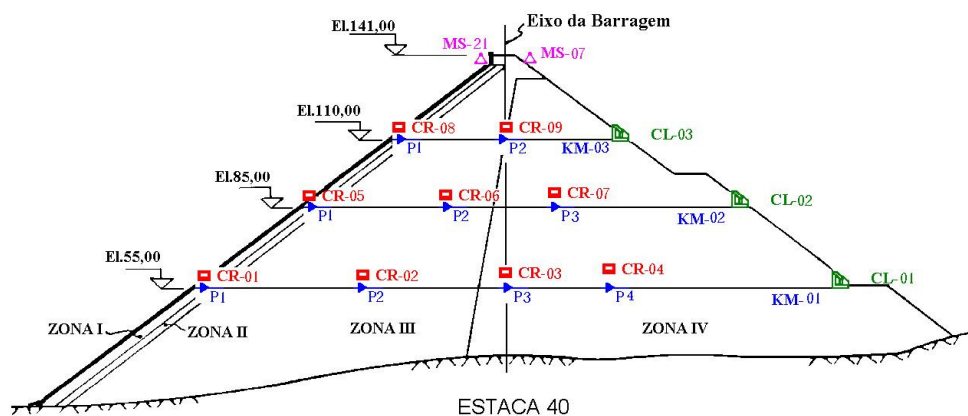


FIGURA 2: Instrumentação da Seção Chave da Estaca 40

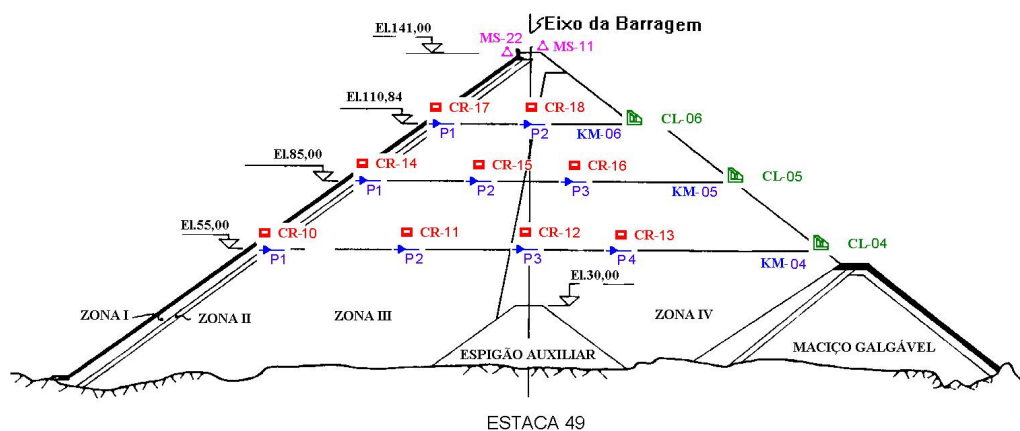


FIGURA 3: Instrumentação da Seção Chave da Estaca 49

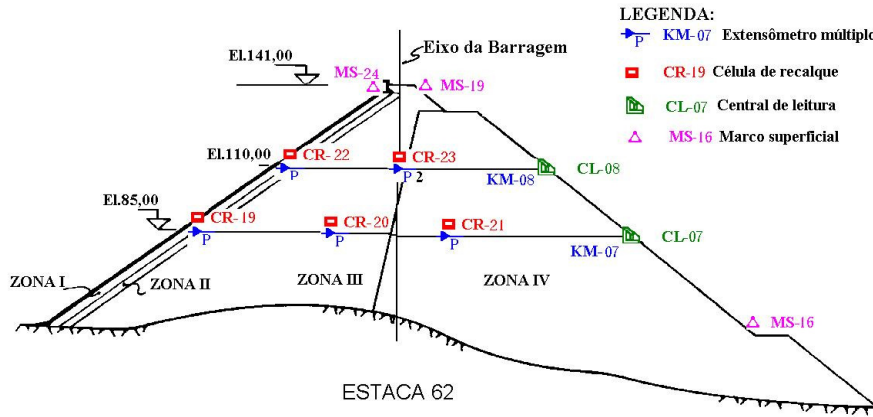


FIGURA 4: Instrumentação da Seção Chave da Estaca 62

### 3.0 - DESEMPENHO DA BARRAGEM EM OPERAÇÃO

#### 3.1 Deslocamentos Horizontais

Os deslocamentos horizontais medidos durante 14 anos após o enchimento do reservatório estão apresentados nas Figuras 5 a 7, correspondentes às medições dos marcos superficiais (MS e CL) e aos extensômetros (KM).

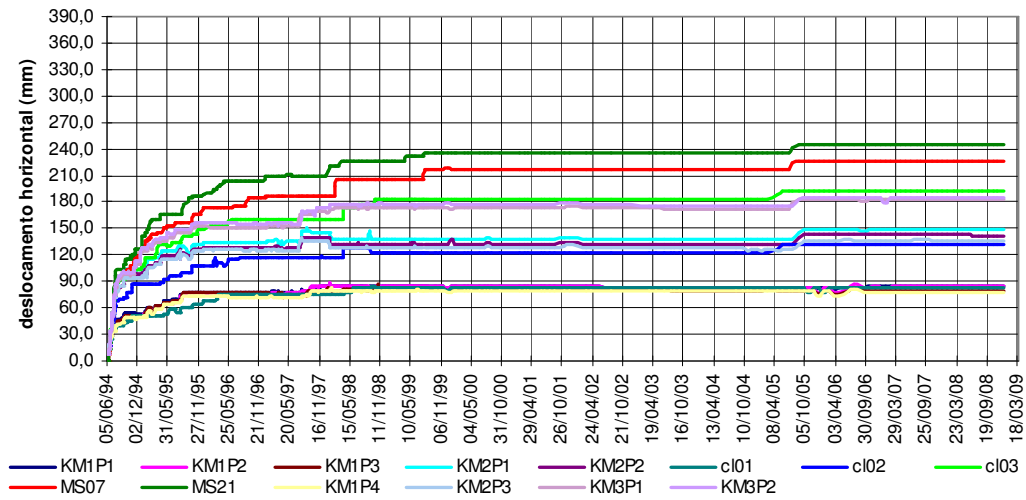


FIGURA 5: Deslocamentos Horizontais Medidos na Seção da Estaca 40

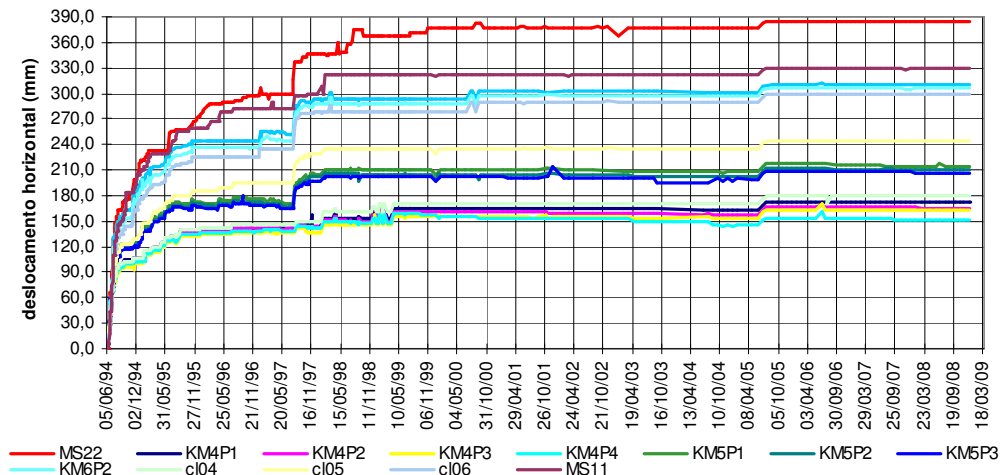


FIGURA 6: Deslocamentos Horizontais Medidos na Seção da Estaca 49

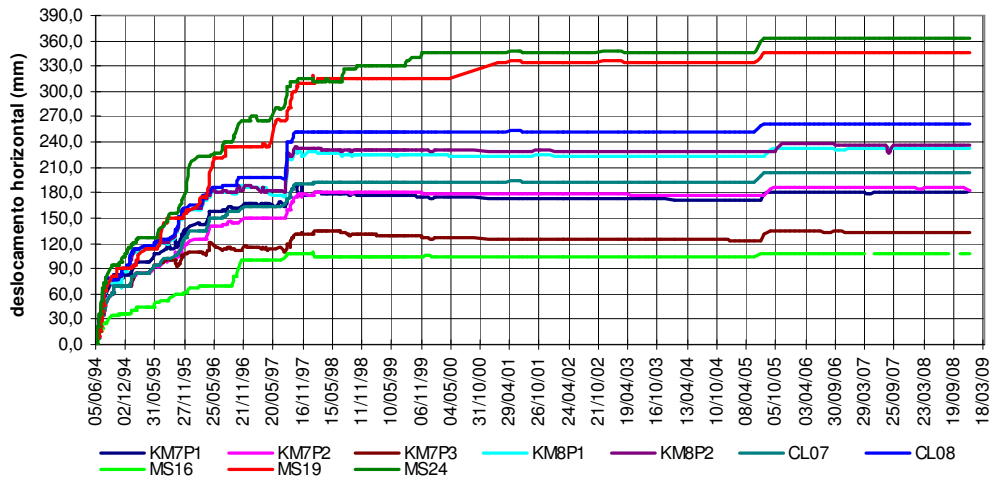


FIGURA 7: Deslocamentos Horizontais Medidos na Seção da Estaca 62

### 3.2 Deslocamentos Verticais

Os deslocamentos verticais medidos durante 14 anos após o enchimento do reservatório estão apresentados nas Figuras 8 a 10, correspondentes às medições das células de recalque (CR) e aos marcos superficiais (MS e CL).

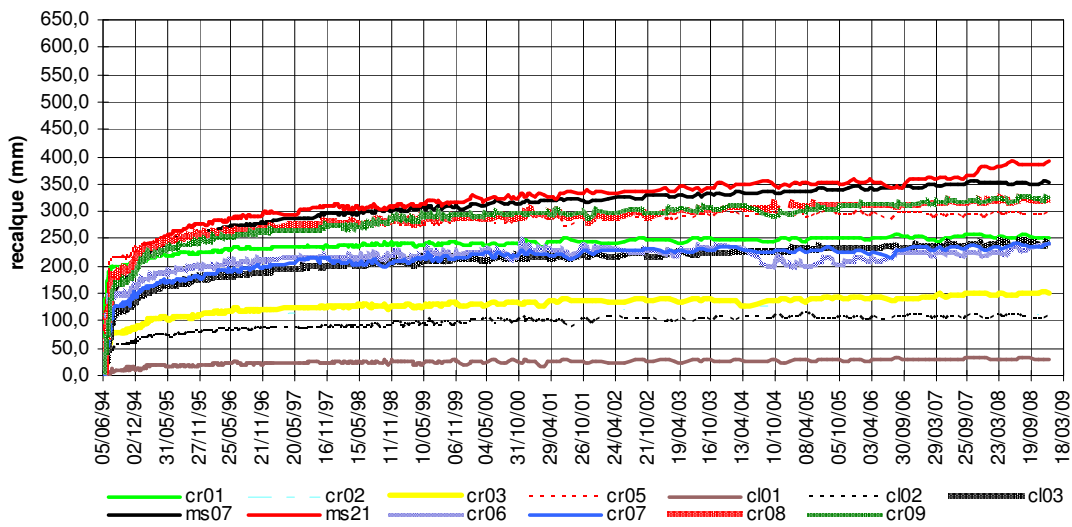


FIGURA 8: Deslocamentos Verticais Medidos na Seção da Estaca 40

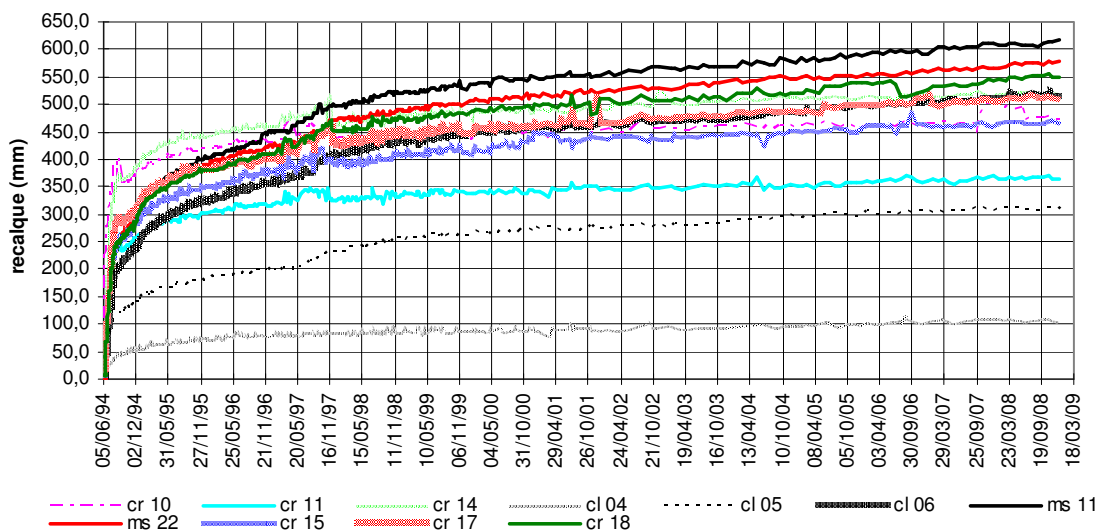


FIGURA 9: Deslocamentos Verticais Medidos na Seção da Estaca 49

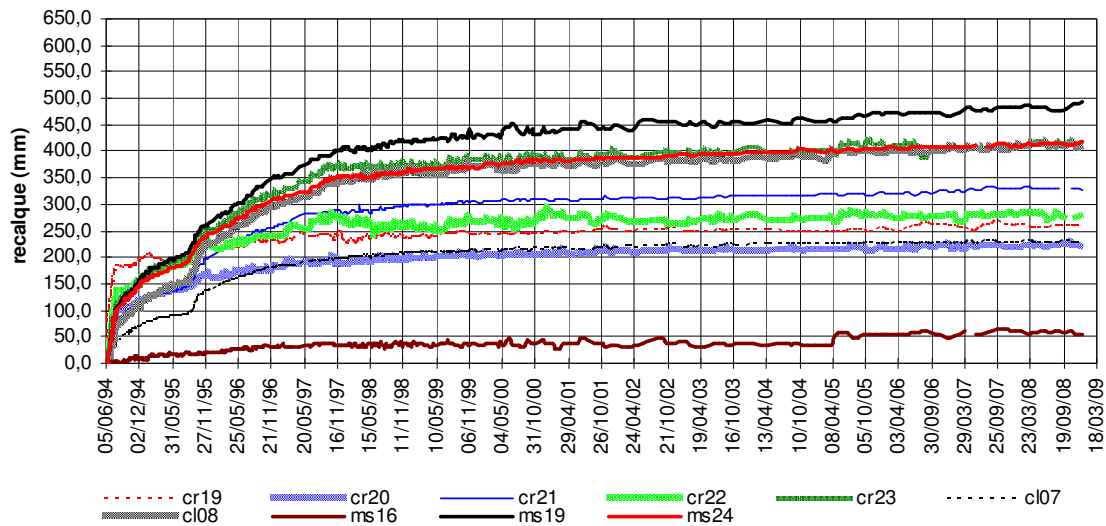


FIGURA 10: Deslocamentos Verticais Medidos na Seção da Estaca 62

### 3.3 Principais Ocorrências

Durante os quatorze primeiros anos de operação da barragem, as principais ocorrências com relação ao comportamento do maciço de enrocamento e laje de concreto foram:

- Aumento da vazão de infiltração e intensificação dos recalques, 01 ano após o enchimento do reservatório, atribuído à abertura de juntas e fissuras na laje de concreto na região da ombreira esquerda e a maior deformabilidade do enrocamento devido à molhagem causada pela infiltração na região;
- Quebra de fragmento na extremidade inferior da laje L5, na interseção da junta perimetral com a junta L4/L5, faltando pedaço do concreto e trinca na mesma região, com cerca de 90 cm de comprimento e 2,0 cm de abertura.
- Aparecimento de trincas subparalelas na laje L6, a 25 m de profundidade, com abertura de até 35 mm, atingindo a largura total da laje.
- No topo da laje L13 na região emersa e em profundidade nas proximidades da junta L12/L13 foram constatados esmagamentos e afundamentos do concreto, sem sucção, atribuídos a forte compressão da laje neste local. A Figura 11 mostra a localização dos danos observados na laje montante da BEFC;

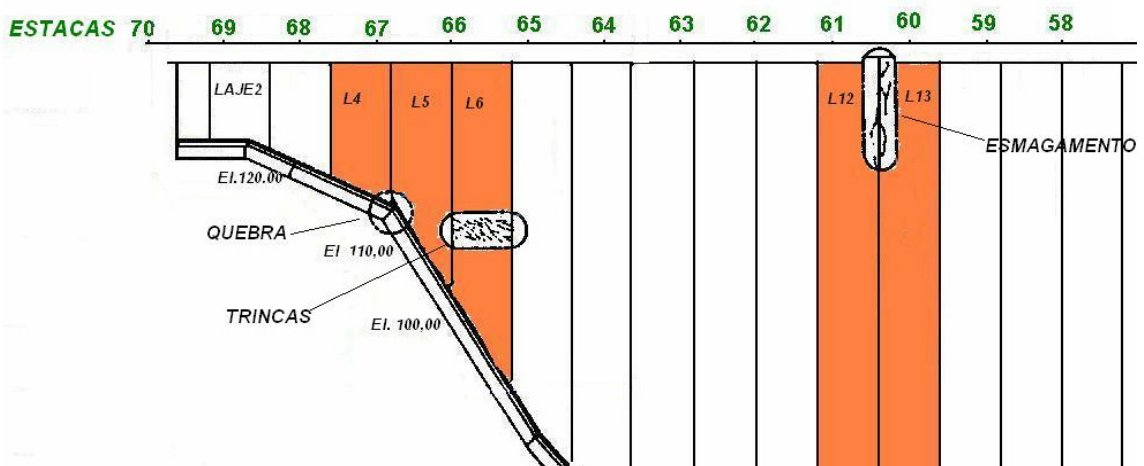


FIGURA 11: Localização dos Danos na Laje de Montante na Ombreira Esquerda

- Realização de inspeções subaquáticas periódicas, com mergulhadores e através de veículo dotado de câmara de TV com controle remoto (robô) sendo constatados diversos pontos de forte sucção nas trincas da laje. Os locais de sucção foram tratados com o lançamento de areia fina siltosa aplicada em de sacos com 30 kg de peso com o auxílio de mergulhadores. A areia foi lançada diretamente sobre as trincas até a colmatagem e paralisação da sucção. A Figura 12 mostra a evolução da vazão e da quantidade de sacos lançados nas lajes L5 e L6 nas três etapas de tratamento.

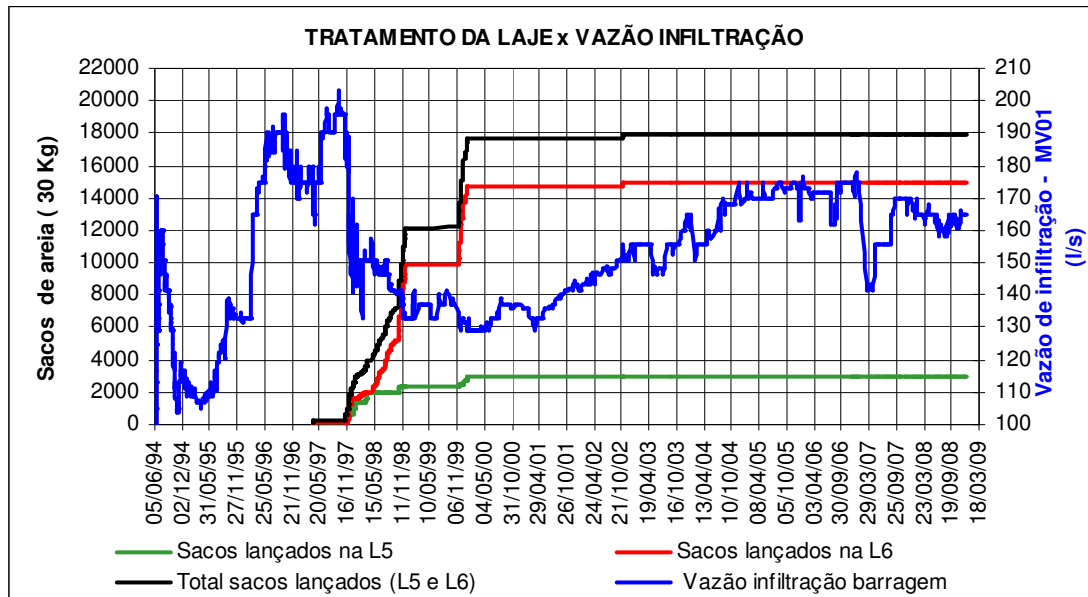


FIGURA 12: Sacos de Areia Lançados Diretamente nos Locais de Sucção por Mergulhadores

#### 4.0 - DISCUSSÃO

Da análise das medições de deslocamento da BEFC, durante os 14 anos de operação após o enchimento do reservatório, seguem as seguintes observações principais:

- Os maiores recalques ocorreram na seção central da barragem, tendo atingido na superfície 62 cm medidos no MS11 na crista e 52 cm no marco da cabine de leitura CL-6, na El. 110 m. No interior do maciço o máximo recalque foi de 56 cm na CR18 na El. 110 m. Na zona I sob a laje o recalque máximo foi 52 cm sendo medido pelas células CR14 na El. 85 m e CR17 na El. 110 m;
- Os máximos deslocamentos horizontais, medidos pelos marcos topográficos, atingiram 38 cm no MS22 na crista e 30 cm no marco da CL4 na El. 110 m, na seção central da barragem. O máximo deslocamento horizontal interno ao maciço atingiu 31 cm sendo medido no KM6P1 também na seção central da BEFC na El. 110 m, junto à laje de montante;
- Entre setembro e novembro de 1995, os instrumentos instalados na Estaca 62 registraram uma rápida intensificação dos recalques, com aumento de velocidades de até dez vezes as anteriormente observadas. O aumento da velocidade dos recalques coincide com o aumento da vazão de infiltração e com a observação do aparecimento de trinca na laje L5 e família de trincas paralelas na L6, nas proximidades da Estaca 65. A intensificação das vazões na parte alta da ombreira esquerda teria implicado em escoamento da água em direção à calha do rio e para jusante, devido à conformação da ombreira esquerda nesta região, provocando a molhagem do enrocamento e o acréscimo brusco dos recalques;
- Após o aparecimento das trincas na laje, os instrumentos da estaca 62, apresentaram acelerações bruscas nos deslocamentos internos do enrocamento seguido de bruscas desacelerações, em consequência do lançamento de areia e redução na vazão de infiltração.
- Os recalques específicos, registrados pelos marcos superficiais, eram praticamente iguais nas três seções instrumentadas em Novembro de 1995, um ano após o enchimento do reservatório. Em Novembro de 2008 o acréscimo dos deslocamentos verticais em relação a Novembro de 1995 foi de 40% na estaca 40, 49% na estaca 49 e 90% na estaca 62, ver Tabela 1. Estes valores indicam a influência da molhagem do enrocamento pela vazão de infiltração da ombreira esquerda que chegou a afetar inclusive a seção central da barragem.

Estaca.	Altura (m)	Recalque 1995 (mm)	Recalque 2008 (mm)	Recalque Específico 1995 (%)	Recalque Específico 2008 (%)	VARIAÇÃO 2008/1995 (%)
40	113	277	388	0,2451	0,3434	40,07
49	150	385	575	0,2567	0,3833	49,35
62	86	257	489	0,2988	0,5686	90,27

TABELA 1 – Recalques Específicos 1 Ano e 14 Anos Após o Enchimento



- O tratamento com lançamento de areia diretamente nos pontos de sucção da laje foi eficaz na redução das vazões durante os anos de 1998 e 1999, em consequência observou-se uma redução nas velocidades dos deslocamentos medidos na ombreira esquerda. A partir de 2001 houve um aumento progressivo na vazão de infiltração que estabilizou com um novo lançamento de areia em 2002, retomando o crescimento em 2003 com estabilização em 2005 em 175 l/s. Em 2008, foi efetuada mais uma inspeção com mergulhadores, não sendo detectados novos locais de danos na laje.

## 5.0 - CONCLUSÕES

As principais conclusões referentes ao desempenho da barragem de enrocamento com face de concreto, são as seguintes:

- A intensificação dos recalques na ombreira esquerda, observada a partir de Setembro de 95, foi causada pelas infiltrações que passaram a ocorrer através das trincas das lajes L4, L5 e L6, particularmente, causando a molhagem do enrocamento da Zona IV da barragem.
- A barragem de Xingó apresentou valores de recalque específico entre 0,34 % e 0,56 % em Novembro de 2008, ainda sem tendência de estabilização. A deformação lenta do maciço de enrocamento variou entre 40% e 90% em relação a Novembro de 1995. Esse comportamento provavelmente deve se prolongar por vários anos até que ocorra a estabilização dos recalques.
- As fissuras nas lajes da ombreira esquerda ocorreram na mesma região onde havia as fissuras na superfície da Zona I, ao final do período construtivo, cujas causas estão associadas essencialmente à conformação da fundação que apresenta um acentuado desnível entre as regiões das Zonas III e IV da barragem.
- O lançamento de areia siltosa se revelou eficiente em termos de redução das vazões de infiltração, tendo-se conseguido uma redução da ordem de 195 l/s para 135 l/s após o primeiro tratamento de 1998.
- O acompanhamento através da instrumentação da barragem tem sido de fundamental importância para detecção e correção dos problemas devido aos deslocamentos diferenciais observados e para avaliações periódicas da segurança da barragem.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VASCONCELOS, A.A., EIGENHEER, L.P, SOUZA, R.J.B. (1991) – “Concepção da barragem de Xingó”.I Simpósio Sobre Barragens de Enrocamento com Face de Concreto, CBDB, UHE Segredo - SC.
- [2] CAVALCANTI, A.J.C.T., SOUZA, R.J.B., ROCHA, P., SABOYA, F.A., (1994) - “Utilização de eletrônicos na monitoração da barragem de Xingó”, XXI Seminário Nacional de Grandes Barragens, CBDB, Rio de Janeiro.
- [3] SOUZA, R.J.B., CAVALCANTI, A.J.C.T., SILVEIRA, J.F.A., CASARIN, C., (1995) - “Monitoramento e desempenho da barragem de Xingó durante as fases de construção e enchimento do reservatório”, XIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis.
- [4] SOUZA, R.J.B., CAVALCANTI, A.J.C.T., SILVEIRA, J.F.A. (1996) - “Comportamento da BEFC de Xingó durante o período construtivo e fase de enchimento do reservatório”, II Simpósio Sobre Instrumentação de Barragens. CBDB, Belo Horizonte.
- [5] SOUZA, R.J.B., CAVALCANTI, A.J.C.T., SILVEIRA, J.F.A., (1996) – “Comportamento da BEFC de Xingó durante o período construtivo e fase de enchimento do reservatório”, II Simpósio Sobre Instrumentação de Barragens .CBDB, Belo Horizonte.
- [6] SILVA, S.A, CASARIN, C., SOUZA R.J.B, (1999).- “Utilização de transição semipermeável sob a face de concreto da barragem de Xingó”, II Simpósio Sobre Barragens de Enrocamento com Face de Concreto, CBDB, Florianópolis.
- [7] CAVALCANTI, A.J.C.T., SOUZA, R.J.B., SILVA, S.A, SILVEIRA, J.F.A., (1999) - “Barragem de enrocamento com face de concreto de Xingó - comportamento peculiar na região da ombreira esquerda”, II Simpósio Sobre Barragens de Enrocamento com Face de Concreto, CBDB, Florianópolis.
- [8] SOUZA, R.J.B., CAVALCANTI, A.J.C.T., VASCONCELOS, A.A., SILVA, P.N., (2007) – “Desempenho da BEFC de Xingó durante 12 anos de operação”, XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, CBDB, Belém.