

Análise Termo-Mecânica de Barragens de Concreto Compactado com Rolo

L. A. Lacerda, LACTEC; E. A. G. Orłowski, LACTEC; D. A. V. Krüger, COPEL; M. A. Soares, COPEL; E. E. Kavamura, UFPR/LACTEC; N. F. Carvalho, UFPR/LACTEC; R. D. Machado, UFPR/PUC-PR; M. B. Hecke, UFPR.

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados preliminares referente ao primeiro ciclo 2001/2002 do projeto Aplicação de Métodos Numéricos para o Estudo do Comportamento Termo-Estrutural de Barragens de Concreto e Conjugação com Instrumentação realizado pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC apresentado a Companhia Paranaense de Energia – COPEL/GER. Está sendo desenvolvida uma metodologia para análise termo-mecânica de estruturas construídas em camadas, que permita a verificação dos campos de temperaturas e tensões em cada etapa da construção. O procedimento está sendo implementado com a linguagem APDL do programa comercial ANSYS[®]. Um módulo de elasticidade variável com o tempo foi incorporado ao modelo de análise. Um exemplo baseado em uma das fases construtivas da barragem de Salto Caxias foi utilizado para comparar a técnica já desenvolvida com um método tradicional de análise. Ao final deste artigo, uma descrição sucinta da instrumentação existente e da instrumentação complementar proposta é apresentada.

PALAVRAS-CHAVE

Análise Termo-Mecânica, Barragem, Concreto Compactado com Rolo, Método dos Elementos Finitos.

I. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é apresentar os primeiros resultados da aplicação uma metodologia de análise termo-mecânica em uma estrutura construída em camadas. A técnica desenvolvida permite a determinação dos campos de temperaturas e de tensões em cada etapa do processo construtivo, levando-se em consideração a influência térmica de cada camada sobre as outras vizinhas e a variabilidade do módulo de elasticidade do material de cada camada.

O programa ANSYS[®] [1], baseado no método dos elementos finitos, foi empregado para as análises, tendo sido necessário o desenvolvimento de uma rotina com a linguagem APDL para a implementação da metodologia proposta, que está direcionada para a análise de barragens tipo CCR.

No exemplo apresentado, compara-se a metodologia proposta com uma técnica numérica simplificada tradicionalmente utilizada para esse tipo de análise.

Apesar da ausência de fatores importantes como a deformação lenta e o dano [2,3], que ainda deverão ser considerados, a técnica de análise já é capaz de fornecer uma boa visão sobre importância de cada parâmetro de projeto. É importante salientar que a metodologia em desenvolvimento tem por meta principal a melhor elaboração

dos cronogramas construtivos, a redução dos custos e o aumento da segurança e durabilidade das estruturas.

II. DADOS PARA AS ANÁLISES

As propriedades térmicas do concreto foram analisadas no laboratório de FURNAS, em Goiânia [4]. Várias amostras foram moldadas com o concreto da obra e testadas para determinar as principais características térmicas e mecânicas. A tabela 1 apresenta um resumo das propriedades utilizadas nesse estudo. A elevação adiabática da temperatura é mostrada na tabela 2.

TABELA 1

Propriedades termo-mecânicas do concreto compactado com rolo.

Densidade	2388 kg/m ³
Calor específico	1105 J/kg°C
Condutividade térmica	6445.93 J/mh°C
Coefficiente de dilatação térmica	7.07e-6/°C
Coefficiente de convecção concreto/ar	50232 J/m ² h°C
Coefficiente de Poisson	0.2
Módulo de Elasticidade (Te in dias)	Te/(2.12e-3+Te*0.162e-3) * 1e6 Pa
Resistência característica do concreto	10.2 MPa

TABELA 2

Elevação adiabática da temperatura e curva de geração de calor

Tempo		T	Q
(dias)	(horas)	(°C)	J/(m ³ h)
0	0	0.00	1,125,084
1	24	8.06	647,776
2	48	11.78	170,467
3	72	13.57	150,260
5	120	15.30	64,089
7	168	16.15	34,614
10	240	16.82	17,410
14	336	17.30	8,893
20	480	17.67	4,287
28	672	17.92	2,128

Nos testes numéricos considerou-se um modelo bi-dimensional da barragem com a geometria definida pelas fases 1 e 2 da construção dos blocos 5 a 11. A elevação máxima nessa configuração atingiu a cota de 280.6 m acima do nível médio do mar, com a fundação locada à 262.0 m acima do nível médio do mar. Para esses testes iniciais a

galeria de drenagem foi ignorada e as camadas foram lançadas continuamente, independentemente da irregularidade da geometria das duas fases [4].

O modelo computacional da barragem compreendeu 60 camadas, com 30 cm cada, e um total de 10650 elementos quadriláteros, planos e de interpolação quadrática com oito nós (total de 32485 nós). Por simplicidade a fundação não foi modelada e o fluxo térmico foi imposto como sendo nulo na base da barragem.

Dois tipos de elementos foram empregados: PLANE77 para as análises térmicas e SOLID82 para as análises estruturais. Uma malha mapeada de elementos finitos foi empregada na discretização onde a dimensão máxima dos elementos foi limitada a 22.5 cm nas direções vertical e horizontal.

A simulação cobriu a construção da barragem até que a elevação 280.6 m fosse atingida, dentro de um período de 2600 horas. Adotaram-se passos de tempo de 5 horas e um máximo de 2 subintervalos em cada passo de tempo na análise transiente.

Para efeito de comparação uma análise termo-mecânica da estrutura integral foi executada sem levar em consideração a construção em camadas (bloco único – método tradicional). Todo o concreto foi depositado em um único lançamento, considerando-se uma temperatura média do ar de 23.7 °C e temperatura de lançamento do concreto de 24.4 °C. Um módulo de elasticidade equivalente ao de um concreto com 90 dias foi empregado, de acordo com a equação experimental apresentada na tabela I. É importante salientar que essa situação hipotética, até recentemente, constituía-se num método tradicional de análise de barragens. A razão em não se tomar um módulo de elasticidade (E) variável para essa análise, além da prática comum, está no fato dos resultados para o concreto novo, quando E ainda é muito pequeno, não serem representativos.

Procurou-se na análise em camadas reproduzir o cronograma de lançamento do concreto adotado durante o processo construtivo da barragem [5].

O registro das temperaturas ambientais e das temperaturas de lançamento do concreto é mostrado na figura 4.

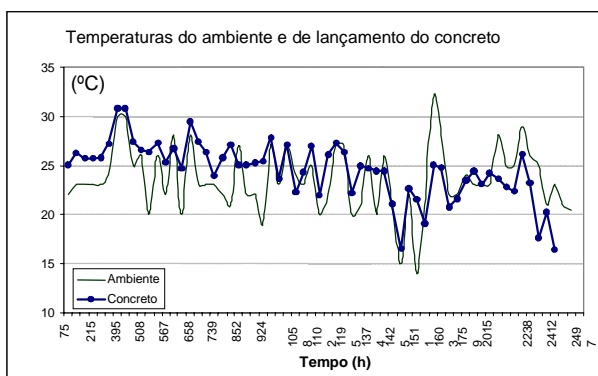


FIGURA 4 - Temperaturas medidas do ar e do concreto lançado durante a construção.

Os valores ambientais correspondem às médias dos valores monitorados da temperatura do ar entre os lançamentos das camadas. As propriedades termo-mecânicas empregadas nessa situação são aquelas listadas nas tabelas I e II.

A geometria analisada de parte do bloco está ilustrada na figura 5. Seis pontos são indicados onde temperaturas e tensões são calculadas durante todo o período de análise. Três desses pontos estão na face de montante (A, B, C), enquanto que os outros três estão em uma linha vertical no interior da barragem (D, E, F).

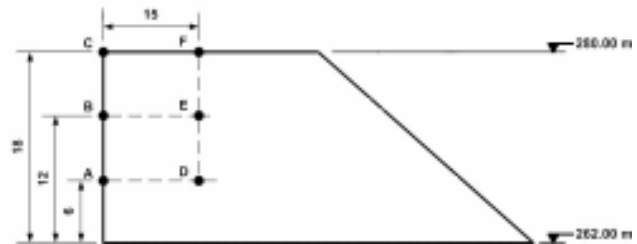


FIGURA 5 - Geometria analisada e localização dos pontos em estudo.

III. RESULTADOS PRELIMINARES

O primeiro grupo de resultados compreende os resultados da análise térmica para os dois casos: bloco único e bloco em camadas. As figuras 6 e 7 apresentam a distribuição dos campos térmicos para o tempo de 2600 horas, para o bloco único e para o bloco em camadas, respectivamente.



Figura 6 - Análise com bloco único – temperaturas em 2600 horas.

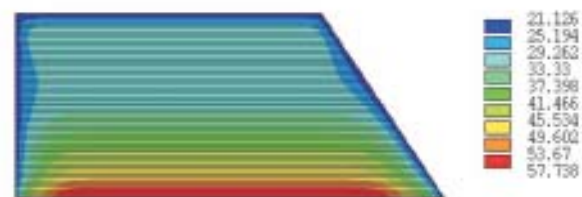


Figura 7 - Análise em camadas – temperaturas em 2600 horas.

Está claro que as temperaturas no interior do bloco em camadas são menos homogêneas. Pode ser visto na análise em camadas que temperaturas mais altas são retidas na base inferior, enquanto que temperaturas mais baixas estão presentes na parte superior interna.

Deve-se salientar que as temperaturas de lançamento do concreto e do ar não foram iguais nas duas análises, dado que o objetivo principal é a comparação das duas técnicas de análise, utilizando-se valores usuais de cada método.

As figuras 8 - 9 apresentam os valores de temperatura ao longo do tempo nos pontos A a F, apresentados na figura 5, para os dois tipos de análise: bloco único e bloco em camadas.

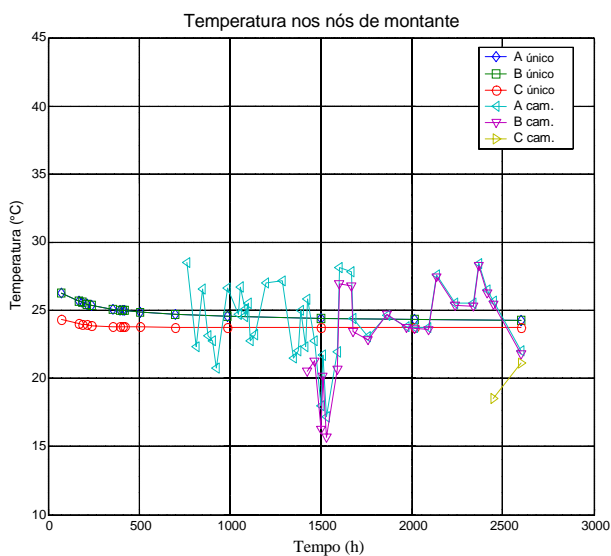


FIGURA 8 - Temperaturas nos pontos A, B e C.

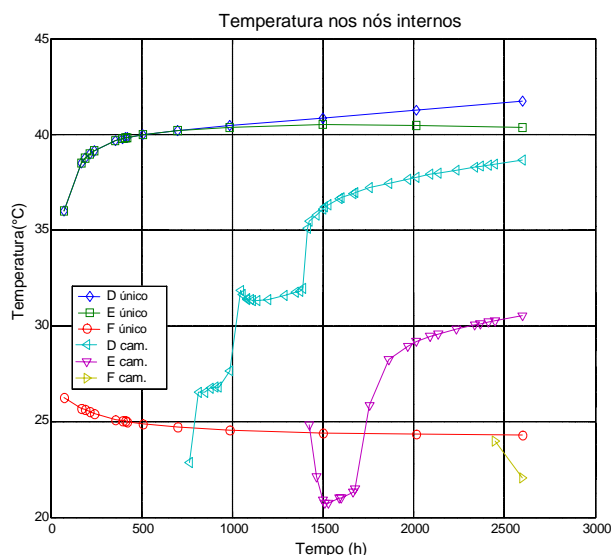


FIGURA 9 - Temperaturas nos pontos D, E e F.

A primeira característica, comum aos dois gráficos, é a suavidade dos resultados da análise com o bloco único. Este comportamento era esperado, dado que não foram impostas variações nas temperaturas do ar e de/ lançamento do concreto.

Observa-se que os resultados da análise em camadas iniciam-se em concordância com o cronograma de lançamento. Oscilações da temperatura nos pontos A e B durante a análise em camadas é normal, uma vez que esses pontos estão na interface concreto/ar, que é fortemente influenciada pelas mudanças da temperatura ambiental. Os resultados nos pontos D e E são menos afetados pelas oscilações das temperaturas externas, pois são pontos do interior da barragem. As temperaturas finais nos pontos da camada superior, C e F, estão de acordo com a última temperatura ambiental registrada, em cada tipo de análise.

A figura 10 mostra os valores das tensões horizontais ao longo do tempo nos pontos D, E e F, para os dois tipos de análise.

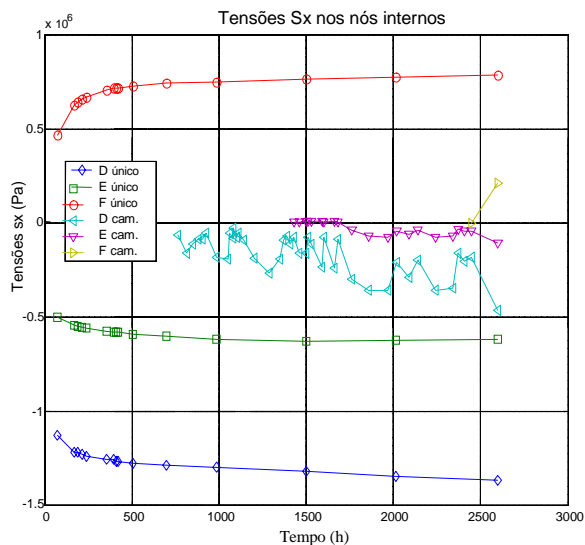


FIGURA 10 - Tensões Sx nos pontos D, E e F.

Na face de montante, os valores de Sx não foram significativos. Nos pontos internos (D, E e F) os resultados foram divergentes. Na análise com bloco único a magnitude de Sx foi bastante expressiva no ponto F, enquanto que na análise em camadas os resultados não foram tão relevantes.

As figuras 11 e 12 mostram os valores das tensões verticais ao longo do tempo nos pontos A a F, para os dois tipos de análise. Nota-se que a análise em bloco único apresentou tensões verticais de tração bem significativas nos pontos da face de montante. Esses valores foram bem maiores do que os da análise em camadas. Em geral, as tensões verticais na análise em camadas foram insignificantes, sugerindo um equilíbrio entre os efeitos térmico e gravitacional.

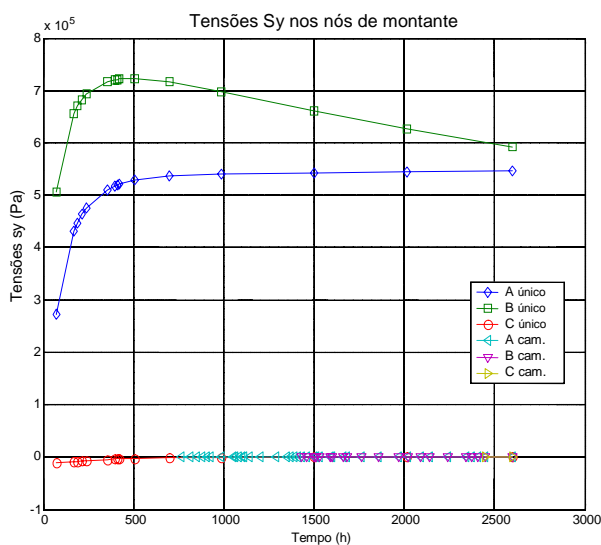


FIGURA 11 - Tensões Sy nos pontos A, B e C.

A dissipação do calor de hidratação do concreto no interior da barragem fez com que as tensões S_y nos pontos D e E diminuíssem ao longo do tempo, mostrando a crescente influência do peso-próprio da estrutura. Na análise em bloco único, as tensões S_y no ponto D alteraram-se mais rapidamente, uma vez que o ponto encontra-se numa elevação inferior em relação ao ponto E (maior efeito do peso próprio).

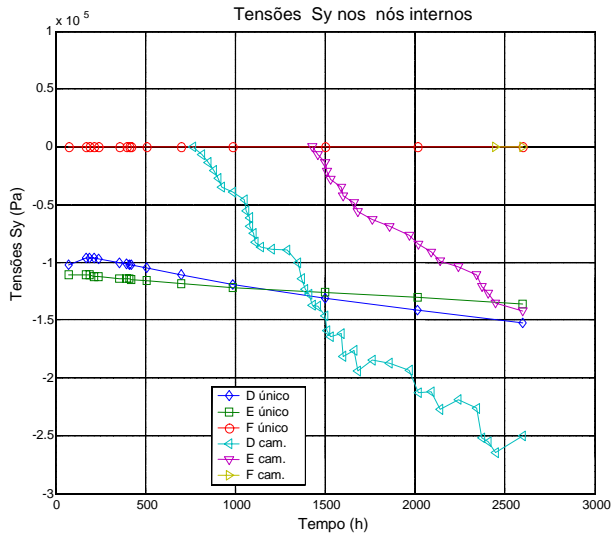


FIGURA 12 - Tensões S_y nos pontos D, E e F.

As figuras 13 e 14 mostram os valores da tensão principal S_1 ao longo do tempo, nos pontos A a F, para os dois tipos de análise. No ponto superior interno F, a tensão principal S_1 foi de tração e significativa para a análise em bloco único. O valor foi mais influenciado por S_x , exclusivamente devido às variações térmicas, e muito próximo à resistência limite de projeto da barragem de Salto Caxias (~0.8 MPa). Na análise em camadas as tensões no mesmo ponto foram menores com um pico de aproximadamente 0.2 MPa.

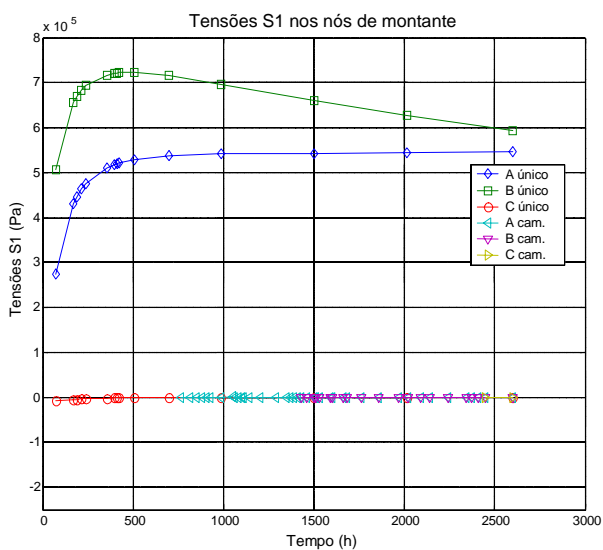


FIGURA 13 - Tensão principal S_1 nos pontos A, B e C.

Nos pontos A e B da face de montante, os valores de S_1 também foram altos na análise em bloco único, sendo

influenciadas por S_y , principalmente. As mesmas tensões não foram expressivas na análise em camadas.

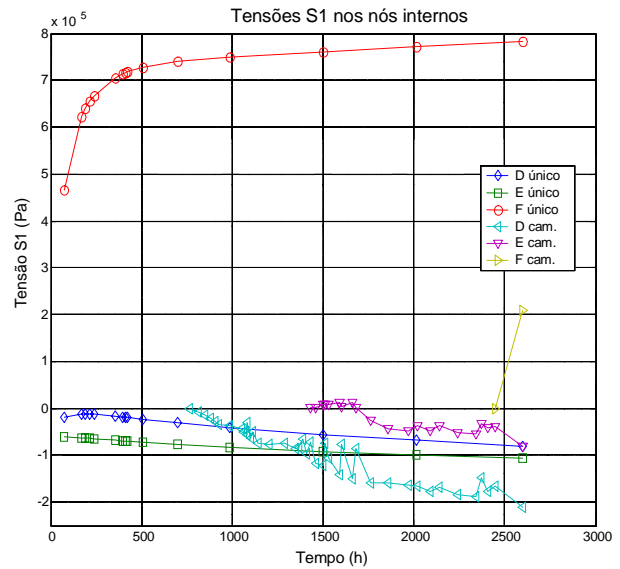


FIGURA 14 - Tensão principal S_1 nos pontos D, E e F.

IV. INSTRUMENTAÇÃO

Neste projeto de pesquisa, os estudos relacionados com a instrumentação estão focados em dois segmentos:

- 1) Análise de dados de instrumentação. A barragem de Salto Caxias possui um grande volume de dados de instrumentação, razão pela qual torna-se necessário utilizar recursos estatísticos para consistência e validação dos mesmos; e
- 2) Projeto de monitoramento complementar. A ocorrência de fissuras na barragem e a necessidade de obtenção de dados de temperatura motivaram a elaboração de um plano de instrumentação para complementar as informações disponíveis de modo sistemático e confiável.

A. Instrumentação existente

A barragem de Salto Caxias, figura 15, possui 9 diferentes tipos de instrumentos e dispositivos de monitoramento, automatizados e não automatizados, em 192 pontos de auscultação [7].



Figura 15 - Vista de jusante da barragem de Salto Caxias.

Destacam-se os instrumentos utilizados para monitorar o comportamento do CCR: termômetros, piezômetros de maciço, medidores de junta e extensômetros múltiplo. Complementam o conjunto os piezômetros de fundação, os medidores de vazão, os medidores triortogonais de juntas, os pêndulos diretos e os marcos superficiais.

Cerca de 167 instrumentos são automatizados, com tecnologia de corda vibrante, envolvendo piezômetros de fundação, piezômetros de maciço, extensômetros de junta, medidores de vazão e termômetros. O tipo de instrumento utilizado possui, em cada unidade, um transdutor de corda vibrante, para a medição principal e um termistor, sensor de resistência elétrica para medição de temperaturas, que permite a correção das leituras do transdutor de corda vibrante.

Há três seções principais instrumentadas, contemplando as três geometrias básicas da estrutura: seção de vertedouro com adufas, seção de vertedouro sem adufas e seção de barragem, (figura 16).

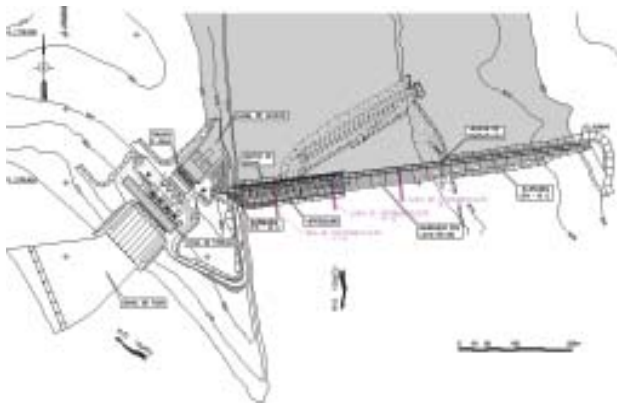


FIGURA 16 - Localização das seções instrumentadas.

A seção instrumentada da barragem, no bloco 8, figura 17, possui 41 termômetros, 10 extensômetros de junta, 8 piezômetros de maciço, 6 piezômetros de maciço e 1 pêndulo direto.



FIGURA 17 - Seção instrumentada do Bloco B-8

O sistema de monitoramento é controlado por 3 unidades automáticas de aquisição de leituras automática, localizadas na galeria inferior.

B. Instrumentação complementar

A instrumentação complementar tem como objetivo obter dados adicionais para subsidiar o plano de segurança, bem como futuras análises computacionais, através da instalação de dispositivos para o monitoramento das juntas e das 3 fissuras transversais da barragem. O plano de monitoramento prevê os seguintes dispositivos:

- 1) Movimentação das fissuras transversais: medidores automatizados tipo corda vibrante, a serem instalados nas fissuras nas galerias superior e inferior, totalizando 6 sensores, figura 18.



FIGURA 18 - Medidor de fissuras de corda vibrante

- 2) Movimentação das juntas: medidores de leitura manual a serem instalados nas juntas plenas e induzidas da barragem (figura 19). Serão instaladas nas paredes de montante ou jusante nas galerias superior e inferior. Estes dispositivos auxiliarão no controle dos deslocamentos das juntas, proporcionando leituras mais confiáveis em relação às campanhas que têm sido executadas com a utilização de lupas graduadas [9].

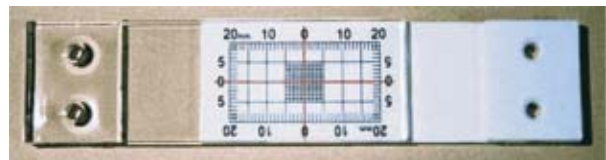


Figura 19 - Medidor de fissuras de leitura visual

- 3) Temperaturas: termômetros tipo corda vibrante a serem instalados nos seguintes pontos: paramento de montante, submerso no reservatório (temperatura do reservatório); crista da barragem (temperatura ambiente na crista); paramento de jusante (temperatura ambiente de jusante); galeria inferior (temperatura ambiente da galeria inferior) e galeria superior (temperatura ambiente da galeria superior).

V. CONCLUSÕES

Como pode ser visto no teste numérico realizado, a definição dos carregamentos, as propriedades dos materiais e a técnica de análise têm grande influência no comportamento estrutural. Nesta análise bi-dimensional da seção transversal de um dos blocos da barragem de Salto Caxias ficou evidente a diferença entre as duas técnicas de análise, especialmente nos resultados de tensões.

A metodologia desenvolvida permite acompanhar a sequência construtiva, adaptando o modelo e as propriedades dos materiais conforme as mudanças durante a construção. Desta forma, o método de análise constitui uma ferramenta de grande valor no processo de tomada de decisões quando modificações de projetos são necessárias.

A realização de testes paramétricos, variando-se a espessura das camadas, intervalo de lançamento das camadas, propriedades do concreto, sequência construtiva e tempo total de análise, constitui a próxima fase do trabalho numérico.

O monitoramento proporcionado pela instrumentação adicional permitirá acompanhar mais detidamente o comportamento da barragem em termos de deformações nas juntas e fissuras, bem como serão úteis a futuras modelagens os dados de temperatura em pontos das regiões de contorno do maciço de CCR.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ansys[®]/Multiphysics, ANSYS Inc. Company, 1998.
- [2] W. P. Andrade, (ed.), “*Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo - Ensaios e propriedades*”. Equipe de FURNAS – Laboratório de Concreto. Ed. Pini, 1997.
- [3] Y. Wu and R. Luna, “Numerical implementation of temperature and creep in mass concrete”, *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 37, pp. 97-106, 2001.
- [4] D. A. V. Krüger, “*Análise térmica transiente de estruturas de concreto executadas por camadas*”, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brazil, 2001.
- [5] D. A. V. Krüger, R. D. Machado and M. A. Marino, “Thermal analysis of layered concrete dams”, *ICOLD*, Montreal, Canadá, 2003.
- [6] D. E. Moser, E. A. G. Orlowski, E. E. Kavamura, L. A. Lacerda, M. B. Hecke, N. F. Carvalho, R. D. Machado; “Aplicação de Métodos Numéricos para o Estudo do Comportamento Termo-Estrutural de Barragens de Concreto e Conjugação com Instrumentação”, LACTEC, Curitiba, PR, Relatório Técnico. RT LAME 4.016.2003-R0, Julho, 2003.
- [7] P. Levis, M. A. Soares, E. A. G. Orlowski e A. M. Calcina, “Instrumentação da barragem de Salto Caxias – Aspectos relacionados ao sistema de automação”. *XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens*, Belo Horizonte, 1999.
- [8] Catálogo de Produtos: “Crackmeter”, GEOKON, Geokon, Inc. U.S.A.
- [9] Catálogo de Produtos: “Crack Monitor”, AVONGARD, Avongard Products, U.S.A., Ltd.