

# Avaliação e Monitoramento de Trincas em Barragens de Concreto

## Estudo de Caso UHE Mascarenhas

E. A. G. Orlowski, LACTEC e L. A. Lacerda, LACTEC

### RESUMO

O presente artigo resume as investigações levadas a efeito pelos pesquisadores do LACTEC sobre as fissuras e trincas presentes na casa de força da UHE Mascarenhas, da Espírito Centais Centrais Elétricas S.A. – ESCELSA. As principais fissuras e as juntas entre blocos foram monitoradas em 2001, num período de 4 meses. Foram procedidas análises das leituras e um modelo numérico simplificado foi aplicado à estrutura da casa de força com o intuito de confirmar a manifestação da reação álcali-agregado -RAA. Os resultados obtidos apresentam indícios de que esse fenômeno expansivo pode estar associado a algumas fissuras da estrutura.

### PALAVRAS-CHAVE

Trincas, Barragens de Concreto, Instrumentação, RAA, Modelagem Numérica

## I. INTRODUÇÃO

A UHE Mascarenhas, da ESCELSA, está situada no município de Baixo Guandu-ES, no rio Doce. Tem uma potência instalada de 141 MW e está em operação desde 1974.

Em dois períodos distintos, 1991 e 2000, foram detectadas pela equipe técnica da ESCELSA trincas e fissuras na casa de força. Realizaram-se mapeamentos e instalaram-se lâminas de vidro para controlar a movimentação das mesmas. No entanto, não foram efetuadas medições para determinar a sua evolução ao longo do tempo.

A equipe LACTEC propôs a adoção de metodologias de avaliação das trincas, as quais consistem basicamente do monitoramento por meio da instalação de protótipos de medidores de fissuras de leitura manual desenvolvidos pelo próprio instituto, da utilização de instrumento automatizado de fissuras e da utilização de modelagem matemática para os estudos das causas das patologias.

## II. INSTRUMENTAÇÃO

O processo de implantação da instrumentação, após a seleção da barragem-piloto, como estabelecido no projeto de pesquisa, foi conduzido através das fases de inspeção das estruturas de concreto, seleção dos pontos a serem instrumentos, desenvolvimento dos medidores de fissuras e de juntas, instalação dos equipamentos, leituras e análise dos dados coletados.

A seleção dos pontos teve como diretrizes preliminares a determinação de que todo instrumento deveria res-

ponder questões específicas [1]. A adoção dos dois tipos de instrumentos de medição – o manual e o automatizado, leva em conta as experiências com a barragem de Salto Caxias [2,3]. Ao se utilizar os dois tipos de instrumentos está-se aliando a rapidez e precisão do automatizado com a simplicidade do manual, além deste permitir que haja sempre a inspeção visual das estruturas ao serem estas percorridas quando estão sendo realizadas as leituras.

Foram instalados 8 medidores triortogonais nas juntas entre os blocos da casa de força e 8 medidores nas fissuras mais importantes da estrutura. Além dos medidores, foram posicionados termômetros de mercúrio em 4 pontos selecionados da casa de força, para a obtenção das temperaturas das áreas do ambiente interno e verificar sua influência sobre as estruturas. O medidor de fissuras automatizado foi instalado paralelamente a um dos medidores triortogonais, na direção da abertura da junta.

Os medidores triortogonais destinam-se a medição dos movimentos relativos entre os blocos em três direções: abertura/fechamento da junta, recalque diferencial e deslizamento horizontal. Os medidores de fissuras medem somente abertura e fechamento das mesmas.

O dispositivo de leitura dos medidores consiste de um apalpador mecânico acoplado a um relógio comparador. A distância base dos instrumentos é de 100 mm. Foram realizadas leituras sobre uma média aritmética de três medições para cada eixo a ser lido. A frequência de leituras variou de diária, passando por semanal e mantendo-se em três vezes por semana.

As Tabelas 1 a 3 a seguir mostram um resumo das leituras no período de 26/07/01 a 12/12/01:

TABELA 1

### Deslocamentos medidos – medidores triortogonais

Medidor	Abertura (mm)(*)	Recalque(mm)	Deslizamento(mm)
MT-1	-0,04	-0,15	0,03
MT-2	0,01	0,02	0,00
MT-3	0,06	-0,08	0,00
MT-4	-0,06	0,00	0,05
MT-5	0,03	0,04	0,05
MT-6	0,03	0,01	0,03
MT-7	0,00	-0,02	0,03
MT-8	-0,01	0,00	0,03

(\*) Convenção sinais: (+) abertura (-) fechamento

TABELA 2

## Deslocamentos medidos – medidores de fissuras

Medidor de fissura	Abertura/fechamento (mm)
MF-1	0,01
MF-2	0,00
MF-3	0,02
MF-4	0,00
MF-5	0,00
MF-6	0,02
MF-7	0,00
MF-8	0,02

Convenção sinais: (+) abertura (-) fechamento

TABELA 3

## Deslocamento máximos obtidos

MOVIMENTO	MÁXIMOS(mm)
fechamento de junta	0,06
recalque diferencial	0,15
DESLIZAMENTO HORIZONTAL	0,05

A variação de temperaturas medidas nos ambientes da casa de força estiverem entre 25 °C e 31 °C.

A análise dos resultados dos deslocamentos dos medidores triortogonais revela que devido à ocorrência de deslizamento horizontais e recalques diferenciais é possível que esteja ocorrendo RAA nas estruturas. A confirmação deste fato dependerá de se dar continuidade com as leituras, obtendo-se um período maior de dados. O recalque máximo do medidor MT-1 é relativamente alto, superando o encontrado em outras barragens em que se comprovou a ocorrência de RAA, como por exemplo Moxotó. Um atenção especial deve ser dispensada aos medidores MT-4 e MT-5, pois revelaram valores altos de recalque diferencial e deslizamento.

Os medidores de fissuras não apresentaram valores maiores que 0,02 mm, o que denota, aparentemente, que não está havendo tendência de propagação das fissuras.

A fase final do projeto consistiu da seleção, instalação e acompanhamento do medidor de fissuras automatizado. O objetivo deste instrumento foi permitir a avaliação deste tipo de sistema na medição de fissuras, comparando-se seus resultados e desempenho com aqueles obtidos pelo sistema de medidores manuais previamente instalados na casa de força da UHE Mascarenhas.

O aparelho selecionado é um crackmeter (medidor de fissuras) de corda vibrante, dotado de dois tipos de sensores: o de abertura/fechamento da fissura e o de temperatura, para correção dos efeitos térmicos sobre a medição principal. Conecta-se a ele um datalogger (processador/conversor de sinais) o qual converte o sinal do instrumento em dados unidades de engenharia e os transmite para o microcomputador, para serem processados por um software.

O instrumento foi instalado em paralelo a medidor de

junta MT-3, na direção de abertura/fechamento da junta.

As leituras foram realizadas de 28/11/01 a 06/12/01, diariamente em três horários: 9:00 h, 13:30 h e 17:00 h. A variação térmica registrada ficou entre 27,8 °C e 30,5°C. Os resultados preliminares dão conta que a abertura máxima observada foi de 0,00765 mm, o que está dentro do limite de precisão e de acordo com a leitura obtida pelo MT-3 no período, o qual não acusava movimentação.

### III. MODELAGEM NUMÉRICA SIMPLIFICADA

Um estudo ideal deveria ser direcionado à modelagem da RAA, utilizando-se dados de monitoramento da estrutura e técnicas de otimização [4,5], cujos objetivos, além de explicar a atual situação de campo, seriam o de prever a evolução das taxas de expansão do concreto e o de auxiliar na tomada de decisões corretivas. Entretanto, a instrumentação instalada não é adequada para esta finalidade, e portanto, optou-se por realizar um estudo numérico simplificado, simulando-se o comportamento estrutural da casa de força como elástico linear e sob efeitos de cargas térmicas equivalentes a uma possível expansão provocada pela RAA. Tendo-se em vista o modelo físico adotado, esta análise deverá produzir resultados meramente qualitativos, mas que permitam identificar zonas com tendência à fissuração.

Na última parte desse trabalho, investiga-se a possível presença da RAA na estrutura da casa de força através de simulações com o método dos elementos finitos (ANSYS®), procurando-se correlacionar ao fenômeno da RAA algumas das fissuras mais importantes detectadas na estrutura da casa de força.

Para esta simulação da RAA, definem-se dois instantes na história da estrutura: o referencial, tomado como alguns anos após o início das operações de geração, e o atual, correspondendo a um intervalo de vinte e cinco anos, aproximadamente. Assume-se que no instante de referência os poros do concreto estão preenchidos com o gel expansivo e que todas as reações químicas a partir deste instante tendem a dilatar o concreto. A superposição dos efeitos da RAA durante esse período, com o estado de tensões da estrutura no instante referencial, corresponde ao campo de esforços que pretende-se correlacionar às fissuras existentes.

#### A. Modelo Geométrico

A casa de força é composta por cinco blocos: quatro unidades geradoras e uma unidade de montagem. Em vista dos objetivos almejados e do quadro de deterioração verificado na estrutura, optou-se por restringir esta análise preliminar a uma única unidade geradora da casa de força. Ainda sobre essa unidade típica, adotou-se um plano de simetria, reduzindo-se o volume do problema em 50%, aproximadamente (ver figura 1).

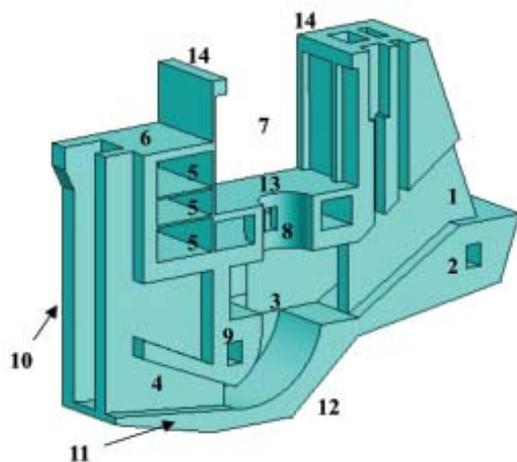


FIGURA 1 - Metade simétrica de um dos blocos da casa de força. Regiões do bloco: 1) Tomada d'água; 2) Galeria de drenagem; 3) Caixa espiral; 4) Tubo de sucção; 5) Cômodos; 6) Convés de transformadores; 7) Sala do gerador; 8) Octógono; 9) Galeria de inspeção; 10) Junta de contração; 11) Plano de simetria; 12) Interface concreto/rocha; 13) Laje do gerador; 14) Apoios do telhado da casa de força.

Essa redução geométrica também constitui uma aproximação uma vez que o eixo dos equipamentos de geração não se encontra exatamente sobre o plano vertical de simetria. Entretanto, as fissuras verificadas em todos os blocos apresentam um certo padrão de simetria e como, à princípio, as vibrações das máquinas não serão consideradas, o uso de tal simplificação é razoável em vista do objetivo dessa análise. Diversos fatores contribuem para o estado de tensões da estrutura no instante de referência. Apenas três destes são incorporados ao modelo simplificado: as deformações de origem térmica, o peso-próprio e o empuxo d'água.

#### Análise Termo-Mecânica

O fenômeno da transferência de calor é bastante complexo, em virtude do regime transiente de troca de calor, que teve seu início durante a primeira etapa de concretagem. Entre o início da construção dos blocos e o instante referencial adotado vários fatores influenciaram na distribuição de temperaturas no bloco de concreto. Infelizmente, a inexistência e/ou indisponibilidade de diversos dados construtivos impossibilita a execução de uma rigorosa análise transiente. Simplificadamente, as tensões de origem térmica no instante referencial são calculadas aplicando-se um regime permanente de troca de calor, considerando-se uma temperatura inicial de 22 °C e estimando-se temperaturas anuais médias para os ambientes vizinhos ao bloco de concreto no instante referencial.

O campo de temperaturas no modelo geométrico no instante referencial foi calculado considerando-se troca de calor por convecção e radiação entre o bloco da casa de força e os meios ao seu redor. Nesta análise considerou-se o reservatório em seu nível máximo e nível d'água à jusante de 39.0m, aproximadamente. A condutividade térmica para o concreto foi assumida como sendo isotrópica com o valor de  $K = 2.37 \text{Kcal/mh}^\circ\text{C}$  (agregados de granito).

Devido à semelhança entre blocos adjacentes (distribuição de calor semelhantes), impôs-se fluxo térmico igual a zero aos planos verticais de simetria e da junta de contração, embora tenha sido verificada a abertura das juntas em algumas regiões. Nas interfaces concreto/ar, concreto/água e concreto/rocha, coeficientes de transmissão por convecção apropriados foram adotados.

Após a análise de transferência de calor, a distribuição de temperaturas no bloco é empregada em uma análise termo-mecânica, para a obtenção de um estado aproximado de tensões no instante referencial. Nesta análise termo-mecânica, assume-se o comportamento elástico-linear e isotrópico para o concreto e desprezam-se as cargas dinâmicas, cujos efeitos podem ser estudados separadamente.

Portanto, em conjunto com a carga térmica, apenas o peso próprio e as forças hidrostáticas são introduzidas, onde as seguintes propriedades são adotadas para o concreto: densidade  $\rho = 2500 \text{Kg/m}^3$ , coeficiente de Poisson  $\nu = 0.17$  e módulo de elasticidade longitudinal  $E = 20000 \text{MPa}$ . Os empuxos d'água à montante e à jusante são calculados a partir dos mesmos níveis utilizados na análise de transferência de calor.

Os resultados de tensões e deformações obtidos desta análise termo-mecânica correspondem ao instante referencial e sobre estes valores são impostos variações térmicas com o intuito de simular a expansão devido a RAA.

#### B. Modelo Simplificado para Simulação da RAA

Extensômetros de hastes múltiplas são aparelhos bastante adequados para medir-se a taxa de expansão do concreto, i.e., a intensidade das reações álcali-agregado. Em barragens do tipo gravidade é comum que estas taxas oscilem entre 20 e 80 microdeformações por ano ( $\mu\epsilon/\text{ano}$ ), dependendo da intensidade das reações. Nesta análise, adota-se uma taxa de expansão média de  $40\mu\epsilon/\text{ano}$ , que para um concreto com coeficiente de dilatação térmica  $\alpha = 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , equivale a uma expansão térmica total de 100 °C em um período de 25 anos.

Na prática, a expansão não ocorre de maneira uniforme no interior da estrutura. A quantidade de reagentes disponíveis para o processo químico expansivo influi na variação das taxas de expansão ao longo do tempo. Arelada a este fator, encontra-se a temperatura local que age como um catalisador da reação, acelerando-a, ou mesmo inibindo-a. Estes efeitos, e outros não mencionados, sugerem um zoneamento da estrutura, de forma que taxas diferenciadas de expansão possam ser aplicadas. Por ora, adota-se a expansão térmica equivalente de 100 °C para todas as regiões em contato ou muito próximas da água. Ao restante da estrutura nenhuma expansão foi imposta. Com este campo de variação térmica é natural que as maiores tensões de compressão no sentido longitudinal estejam nas regiões onde a carga térmica equivalente foi imposta. Na prática, observaram-se aberturas nas juntas de contração na parede de jusante da sala do gerador, as quais podem ser explicadas pelo alívio das tensões longitudinais em função da quarta unidade de geração ainda não ter sido instalada.

O confinamento do concreto tem um papel fundamental no desenvolvimento da RAA. Em geral, as expansões na direção vertical tendem a ser maiores, em função da ausência de restrições nesse sentido. Portanto, considera-se a expansão térmica equivalente como sendo ortotrópica, onde as taxas de dilatação nas direções longitudinal e transversal correspondem a 80% daquela na direção vertical. Normalmente, a taxa na direção longitudinal é considerada como sendo ainda menor, porém, a ausência da quarta unidade de geração contribui para o alívio das tensões nesse sentido.

A mesma malha de elementos finitos utilizada para o cálculo do estado de tensões no instante de referência é empregada para essa simulação da RAA. A inclusão das temperaturas equivalentes é efetuada da mesma forma como foi realizada na análise termo-mecânica.

Comparando-se os resultados de deslocamento transversal com os do instante de referência, observou-se que os apoios do telhado da casa de força tendem a se afastar com a inserção do modelo simplificado de RAA. Nestes apoios, ou paralelos a estes, encontram-se os trilhos da ponte rolante. O afastamento dos mesmos é um típico sintoma da manifestação da RAA. Confirma-se portanto, que este modelo, apesar de bastante aproximado, é capaz de reproduzir sintomas típicos da manifestação da RAA, mesmo em uma estrutura complexa como esta.

A Figura 2 apresenta os resultados mais interessantes desta simulação. O campo de tensões longitudinais de tração ( $S_x$ ) nas três paredes de montante do bloco da casa de força pode ser observado, onde é nítida a tendência a formação de trincas na direção vertical na metade superior da parede (as tensões principais de tração acompanham este sentido). Tal comportamento correlaciona-se ao estado atual das fissuras existentes na parede de montante da estrutura. Observa-se também que o campo tracionado nas paredes das extremidades estão mais próximos aos pilares centrais sugerindo a formação de trincas mais próximas a esses pilares, o que de fato ocorreu na prática. Uma vez mais, deve-se ressaltar que a presença e disposição de armaduras nestas paredes, o que certamente afetaria os resultados, não foram consideradas. Além disso, condições de contorno que indiquem o movimento do bloco em direção à quarta unidade também não foram inseridas.

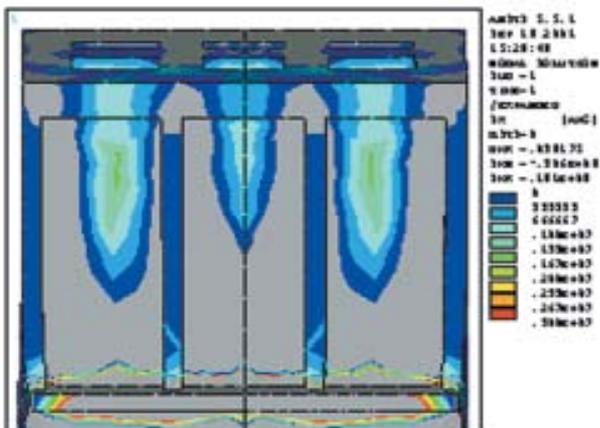


FIGURA 2 - Campo de tensões longitudinais nas paredes de montante do bloco da casa de força.

Os resultados na parte inferior destas paredes são sensíveis à forma de apoio da laje do gerador com o maciço de montante, além dos reforços com armaduras. Para este modelo simplificado, é portanto, inviável tirar quaisquer conclusões com relação à distribuição e níveis de tensão verificados nesta região.

Estes resultados apresentados parecem confirmar a manifestação da RAA na estrutura da casa de força. Contudo, o modelo empregado para esta análise contém um número acentuado de simplificações, impossibilitando a retirada de dados conclusivos. Para isso, é prudente a utilização de um modelo numérico mais aprimorado e de dados de um monitoramento adequado para estes fins.

#### IV. CONCLUSÕES

A instrumentação implantada demonstrou sua eficácia, porém precisar acompanhada por um período maior, recebendo ainda as complementações da automação e de instrumentos adequados para acompanhar a RAA, como por exemplo o extensômetro múltiplo.

A análise com o modelo numérico simplificado mostrou indícios de que a RAA pode estar provocando a expansão do concreto e causando alguns dos danos verificados na casa de força da UHE de Mascarenhas. Convém mencionar mais uma vez que este modelo inicial é bastante incipiente e não permite retirar conclusões quantitativas sobre a atual situação da estrutura e muito menos sobre futuros comportamentos.

A implementação de uma metodologia mais refinada é fundamental para uma avaliação segura do estágio de evolução no qual as expansões devido à RAA se encontram, auxiliando a tomada de medidas corretivas e preventivas.

#### V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Dunclicliff, *Geotechnical Instrumentation for Field Monitoring Performance*, John Wiley and Sons, 1993.
- [2] M. A. Soares, E. A. G. Orlowski, P. Levis, "Instrumentação da Barragem da UHE Salto Caxias", COPEL, Relatórios Técnicos 1 e 2. Maio 1998, abril 1999
- [3] E. A. G. Orlowski, P. Levis, M. A. Soares, A. Calcina. "Instrumentação da Barragem de Salto Caxias – Aspectos Relacionados à Automação" in *Proc. 1999 XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens*.
- [4] P. Léger, P. Côté and R. Tinawi, "Finite element analysis of concrete swelling due to alkali-aggregate reactions in dams", *Computers & Structures*, vol. 60, pp. 601-611, 1996.
- [5] Pappalardo JR., "Uma metodologia para a modelagem matemática de barragens de concreto afetadas pela reação álcali-agregado", Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.