
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM BARRAGENS DE CONCRETO

Alfonso Pappalardo Jr.*

Ruy M. O. Pauletti**

Paulo M. Pimenta**

Resumo

Os problemas estruturais provocados pela Reação Álcali-Agregado (RAA) estão ligados a expansões excessivas impostas pela RAA ao concreto e à conseqüente degradação das propriedades mecânicas, por conta da fissuração intensa do meio.

O controle da segurança de barragens afetadas pela RAA pode ser verificado pela metodologia apresentada neste trabalho, que permite a detecção de possíveis impedimentos operacionais, em tempo hábil, e escolha da medida preventiva ou reabilitadora mais adequada.

A metodologia proposta foi implementada por meio do programa comercial *ANSYS®*, *Multiphysics* e aplicada na Barragem Reguladora Billings-Pedras, cujo estado de deterioração por RAA é avançado. Técnicas de programação matemática são empregadas, de modo a ajustar as deformações volumétricas devidas à RAA, aplicadas no modelo de elementos finitos, àquelas registradas pelo sistema de monitoração, instalado na estrutura.

* Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.
E-mail: alfonso@mackenzie.com.br.

** Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. E-mail: pauletti@usp.br, ppimenta@usp.br.

Abstract

Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concrete may induce excessive expansion and degradation of mechanical properties due to intensive cracking.

This work presents a procedure for the finite element modeling of massive concrete structures affected by AAR. It is also believed that this methodology can bring relevant contributions for the safety's control and rehabilitation of structures affected by AAR.

The procedure was implemented in the ANSYS®, Multiphysics finite element code and employed to simulate the structural behavior of a Brazilian concrete dam, which is currently presenting advanced degradation due to AAR. Mathematical programming techniques were used to fit the calculated AAR induced swelling deformations to the data collected in field. It is expected that a projection of the evolution of AAR in the dam may thus follow the calibrated mathematical model.

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno da Reação Álcali-Agregado (RAA), envolvendo íons alcalinos, presentes no cimento Portland, e silicatos, contidos em alguns agregados, quando detectado poderá levar a sintomas típicos, tais como expansões excessivas, fissuração do tipo casco de tartaruga, exsudação de um fluido viscoso e degradação das propriedades mecânicas. Muitas ocorrências deste fenômeno foram registradas em todo o mundo, na maioria dos casos envolvendo estruturas localizadas em ambientes úmidos, como barragens, reservatórios e fundações de pontes. Nota-se, ultimamente, um número crescente de estruturas que vêm apresentando essa patologia, especialmente as barragens de concreto, levando à instauração de um programa de acompanhamento e reabilitação estrutural. O desenvolvimento de um modelo matemático, capaz de descrever a evolução desse fenômeno por modelagem matemática, utilizando o Método dos Elementos Finitos, torna-se indispensável na previsão do comportamento estrutural e, conseqüentemente, na tomada de decisões de medidas preventivas ou reabilitadoras da estrutura.

A metodologia proposta neste trabalho permite a detecção de possíveis impedimentos operacionais em tempo hábil de ser tomada uma decisão quanto à medida preventiva ou recuperadora mais viável. A contribuição deste trabalho, inserido no tema de controle da segurança de barragens afetadas pela RAA, facilita escolher locais estratégicos para a instalação da instrumentação, avaliar o efeito causado pela impermeabilização do paramento a montante, analisar a redução do campo de tensões provocada pelo corte de juntas e avaliar o efeito de protensões locais em zonas danificadas. As técnicas anteriormente citadas são largamente utilizadas na recuperação de estruturas afetadas pela RAA. Devido aos altos custos envolvidos na recuperação de grandes estruturas de concreto, é muito importante prognosticar a eficiência da técnica de recuperação adotada.

A tecnologia dos multiprocessadores associada aos códigos paralelizados, disponibilizada em computadores pessoais a partir desta década, tem sido indispensável para o desenvolvimento de ferramentas computacionais de retroanálise. Para modelagem matemática do fenômeno da RAA deve-se considerar um problema com acoplamento de campos que conduz a um sistema de equações diferenciais não-lineares. A equação constitutiva proposta, utilizada para a simulação da RAA, considera os principais fatores que afetam a taxa de deformação por RAA:¹ umidade, temperatura, porosidade e tensões confinantes. Será proposta, também, uma equação constitutiva do fenômeno da fluência do concreto afetado pela RAA.

Esta metodologia foi empregada na simulação do comportamento estrutural da Barragem Reguladora Billings-Pedras, próxima à cidade de São Paulo, que apresenta um estado de degradação avançado devido à RAA. Técnicas de programação matemática são utilizadas para a calibração das deformações registradas em campo, pelo sistema de monitoração, com aquelas calculadas pelo modelo de elementos finitos.

2 MONITORAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DEVIDAS À RAA

A barragem selecionada para este estudo é a Barragem Reguladora Billings-Pedras (Figura 1), construída no período de 1926-1936, que desempenhou um papel importante na industrialização do Estado de São Paulo. Em 1992, durante a elaboração de estudos para a implantação da motorização da barragem, verificaram-se os sintomas típicos da RAA. A partir daí, um meticuloso programa de investigação foi instaurado,² envolvendo a extração de testemunhos de concreto, exames petrográficos, ensaios de resistência, monitoração da estrutura e elaboração de um modelo matemático capaz de representar qualitativamente as expansões observadas. Contudo, em linhas gerais, pode-se classificá-la como uma estrutura segura, sem a necessidade imediata de obras de reparo.

O sistema de auscultação instalado, a partir de 1995, na estrutura afetada tem como objetivo verificar as taxas de expansão em diversas regiões dela e observar como elas variam com o tempo. Os principais equipamentos de monitoração são os extensômetros múltiplos de haste e as bases de convergência. A locação desses equipamentos no corpo da barragem pode ser vista, esquematicamente, nas Figuras 2 e 3. A instrumentação também inclui medidores triortogonais de junta, marcos superficiais e estação topográfica.³

Em 1997, após um ciclo anual de leituras, foram estimadas as taxas de expansão por RAA e, conseqüentemente, utilizadas como parâmetros de calibração do modelo matemático.

A Tabela 1 apresenta as taxas de deformação por RAA obtidas a partir da interpretação das leituras dos extensômetros múltiplos. Devido ao grande comprimento das hastes, as deformações serão representativas para descrever o comportamento global médio da estrutura.

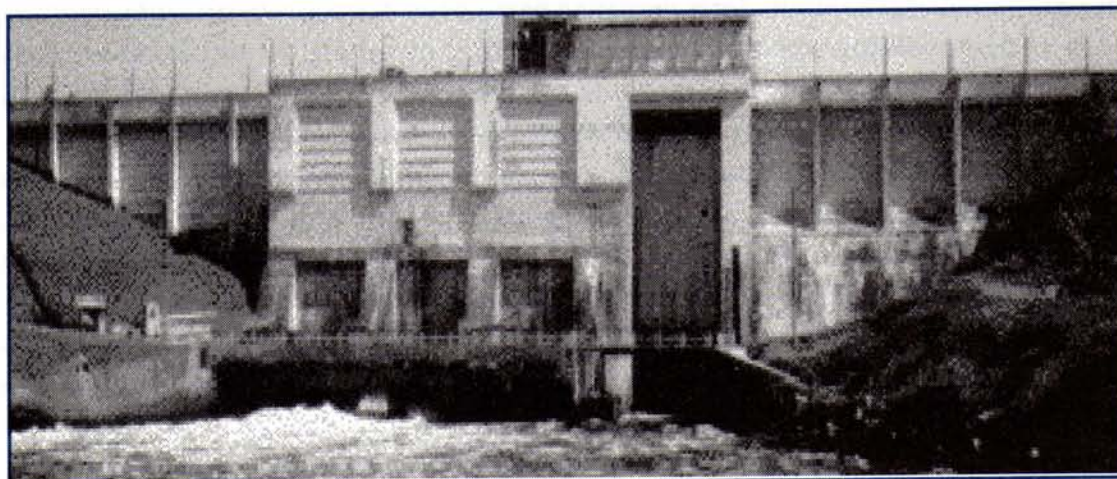


Figura 1 Vista a jusante da Barragem Reguladora Billings-Pedras

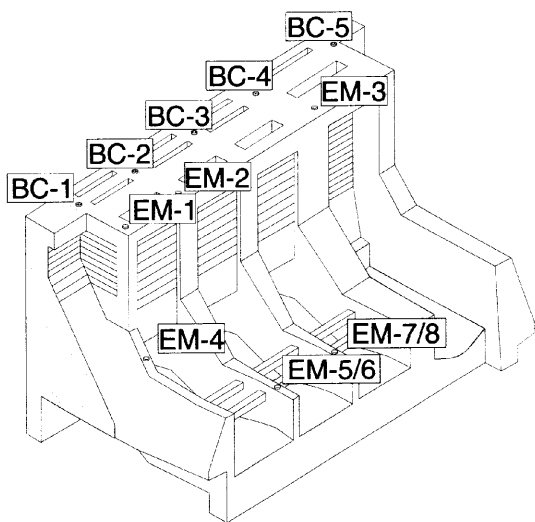


Figura 2 Arranjo geral dos extensômetros múltiplos e bases de convergência da Barragem Billings-Pedras

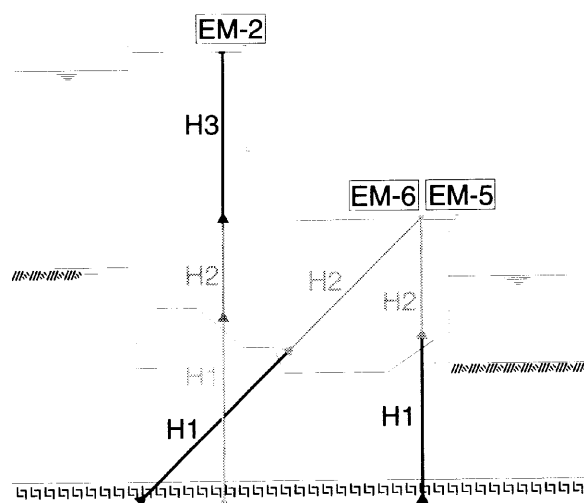


Figura 3 Seção vertical da Barragem Billings-Pedras, indicando a disposição dos extensômetros múltiplos EM-2, EM-5 e EM-6

TABELA 1

Taxa de expansão anual no período de 1996/97³

Extensômetro/haste	Taxa anual*
EM-1/H-2	30 µε /ano
EM-1/H-3	25 µε /ano
EM-2/H-2	35 µε /ano
EM-2/H-3	35 µε /ano
EM-3/H-2	20 µε /ano
EM-3/H-3	20 µε /ano
EM-5/H-2	15 µε /ano
EM-6/H-2	10 µε /ano
EM-7/H-2	8 µε /ano
EM-8/H-2	10 µε /ano

* Microdeformação específica = 10⁻⁶ m/m

3 CAMPOS INTERVENIENTES E SEUS ACOPLAMENTOS

Diversas metodologias de simulação numérica dos efeitos estruturais da RAA foram propostas durante a última década, baseadas, principalmente, na imposição de deformações térmicas equivalentes em modelos tridimensionais de elementos finitos.

Uma outra abordagem, apresentada neste trabalho, baseia-se na utilização de equações constitutivas para representar os fenômenos da fluência e da expansão devida à RAA. Um modelo numérico adequado é capaz de reproduzir e explicar o comportamento estrutural observado, assim como de projetar as deformações ao longo do tempo e avaliar a eficiência das medidas reparadoras de reabilitação da estrutura.

3.1 Fatores de influência da expansão por RAA

Este trabalho considera um grupo reduzido de fatores de influência da RAA, ou seja, a reatividade dos constituintes do concreto, a distribuição de temperatura do concreto, a quantidade de água absorvida pela estrutura, a porosidade do agregado e o confinamento estrutural. A quantidade dos reagentes apresenta uma distribuição espacial muito complexa, sendo influenciada principalmente pelo tamanho e tipo de agregado, variabilidade do cimento utilizado, agregados oriundos de diversos depósitos, redes de percolação no interior da estrutura e fontes externas de abastecimento de álcalis, dentre outros.¹ Devido à grande dispersão de reagentes, a metodologia apresentada considera a composição química do concreto uniforme em toda a estrutura. A temperatura exerce influência sobre a velocidade da reação. A quantidade de água retida nos poros do concreto afeta a expansão por RAA, devido à absorção de água por osmose pelo gel produzido pela reação. Uma avaliação rigorosa da quantidade de água presente na estrutura é complexa, especialmente se o concreto é afetado pela RAA. Léger¹ discute os diversos mecanismos de transporte de água. A porosidade inicial dos agregados do concreto interfere no início do processo expansivo devido à RAA, que ocorre quando os poros do concreto são completamente preenchidos pelo gel higroscópico. Finalmente, o confinamento estrutural tende a inibir a expansão do concreto devida à RAA. Por exemplo, nas barragens em arco afetadas pela RAA podem-se notar taxas de expansão por RAA pequenas, comparadas às das barragens de gravidade, devido à presença de tensões confinantes.⁴ Segundo a literatura,^{5, 6} as expansões provocadas pela RAA são consideradas anisotrópicas. A metodologia proposta, cuja equação constitutiva do fenômeno é apresentada a seguir, assume um campo escalar de deformação por RAA, baseado no conceito de tensão média.

3.2 Lei constitutiva considerando o acoplamento de Campos

A taxa de deformação volumétrica por RAA, em cada ponto da barragem, é dada pela seguinte expressão:⁷

$$\dot{\epsilon}^{\text{raa}} = \frac{\epsilon_{\text{vol}}^{\text{máx}} \cdot (A_2 g_T)}{[A_2 g_T + (t - t_p g_p)]^2} \cdot \sqrt{g_U g_C}$$

onde: ϵ_{vol}^{max} está relacionado à quantidade total de reagentes no concreto; A_2 indica o tempo de estabilização do processo expansivo; g_T , g_U e g_C são os fatores de influência devidos à temperatura, umidade e confinamento, a serem comentados na próxima seção; $t_p g_p$ é o tempo requerido para o preenchimento total dos poros do concreto e, portanto, início do processo expansivo para um determinado ponto. Logo, o termo $(t - t_p g_p)$ indica o tempo de análise decorrido, contado a partir do início do processo expansivo em cada ponto do modelo matemático.

O início do processo expansivo é função do potencial expansivo, para cada ponto da estrutura, regulado a partir da temperatura e umidade. Por exemplo, os pontos da estrutura em contato permanente com a água estão mais propensos à produção do gel higroscópico. A equação (1) tem apresentado desempenho satisfatório na modelagem de problemas relacionados à RAA, constatada a partir dos dados empíricos.⁸

3.3 Conversão de campos em fatores de influência

A dependência dos campos de temperatura, umidade e confinamento estrutural é representada, em cada idade da estrutura, pelos fatores g_T , g_U e g_C . Segundo Léger,¹ adotam-se leis de correlação lineares (mostradas na Figura 4) para a conversão de cada campo interveniente com o respectivo fator de influência.

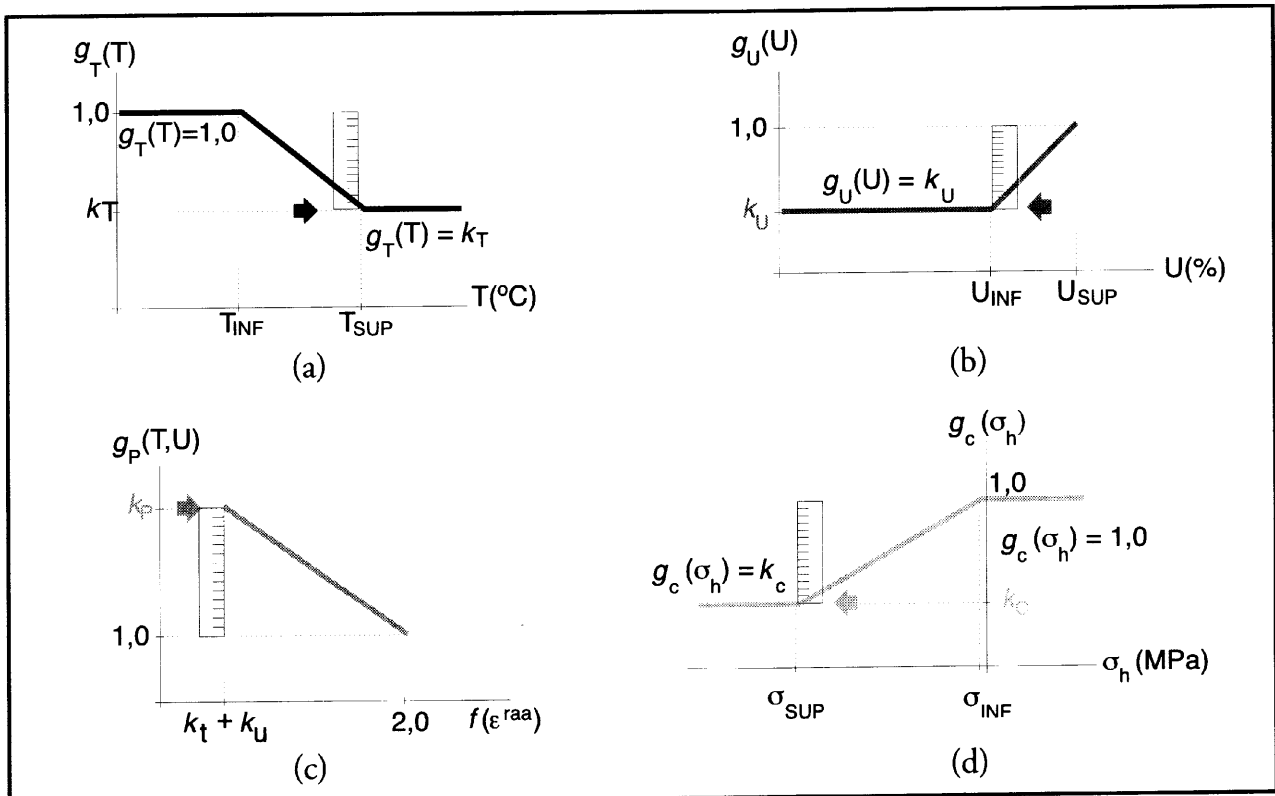


Figura 4 Fatores de influência g_T , g_U , g_p e g_c (adaptados de Léger) e variáveis de calibração k_T , k_U , k_p e k_c devidos a a) temperatura; b) umidade; c) preenchimento dos poros e d) confinamento

4 COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DO CONCRETO AFETADO

A fluência do concreto deve sempre ser considerada em projetos de estruturas de concreto massa. O efeito da relaxação das tensões ao longo do tempo pode muitas vezes ser benéfico, como é o caso das tensões de origem térmica devidas ao resfriamento do concreto. Mas, no caso particular do ataque da RAA, o processo de relaxação de tensão interage a favor do aumento da taxa de expansão do concreto devida à RAA, por conta do alívio de tensões.⁶

Muitas expressões matemáticas foram sugeridas para a representação do comportamento viscoelástico do concreto. Neste trabalho, considera-se o *modelo sólido padrão*,⁹ cujo comportamento uniaxial do concreto será representado pela associação em série de uma mola Hookeana, e um elemento de Kelvin (mola/amortecedor). Segundo o modelo sólido padrão, a deformação é proporcional à tensão σ_0 , variando

da deformação instantânea $\frac{\sigma_0}{E_0}$, no instante $t = 0$, até a deformação assintótica $\frac{\sigma_0}{E_\infty}$,

$t = \infty$. Para o concreto não contaminado, o módulo assintótico é usualmente representado por

$$E_\infty = \frac{E_0}{(1 + \phi)},$$

onde: ϕ é conhecido como coeficiente de fluência, variando tipicamente entre 1,0 e 1,5.

Por outro lado, observações experimentais indicam que a RAA intensifica a fluência do concreto, com coeficiente de fluência ϕ sendo de duas a quatro vezes maior do que aquele referido ao concreto não danificado pela RAA.⁵ Para o caso da Barragem Reguladora Billings-Pedras, assumiu-se o valor $\phi = 2,5$.¹⁰ Não parece, porém, razoável o procedimento de se assumir a distribuição uniforme do coeficiente de fluência do concreto afetado pela RAA para toda estrutura, pois sabe-se que a deterioração causada pela RAA não é uniforme. Neste trabalho, assume-se, como primeira aproximação, uma correlação linear entre o coeficiente de fluência e o estado de danificação de um ponto devido à RAA: enquanto o processo de expansão devido à RAA é inócua, assume-se o valor $\phi = 1,0$; por outro lado, se o concreto apresentar um quadro de deterioração por RAA intenso, assume-se o valor limite $\phi = 2,5$.⁷ A umidade e o confinamento de um ponto são considerados os fatores mais significativos para representar o grau de deterioração devido à RAA. O envelhecimento do concreto também é considerado, por conta da degradação das propriedades viscoelásticas do material.

5 MODELAGEM DA RAA POR ELEMENTOS FINITOS

As leis que governam a expansão química e a fluência do concreto foram incorporadas ao código original do programa ANSYS Multiphysics®, utilizando-se a linguagem de programação FORTRAN 90. O módulo de otimização, acessado para o ajuste do modelo matemático aos dados coletados pelo sistema de auscultação (apresentados no item 2), deve ser descrito com a linguagem paramétrica *APDL*® – *ANSYS Parametric Design Language*.

Inicialmente, determinam-se os campos de temperatura e umidade em toda a estrutura de concreto. Tais quantidades, consideradas invariáveis no decorrer do tempo, são utilizadas nas iterações não-lineares executadas nos ciclos de otimização.⁷ Existe, também, uma grande dependência entre os campos de tensão e os de expansão por RAA.

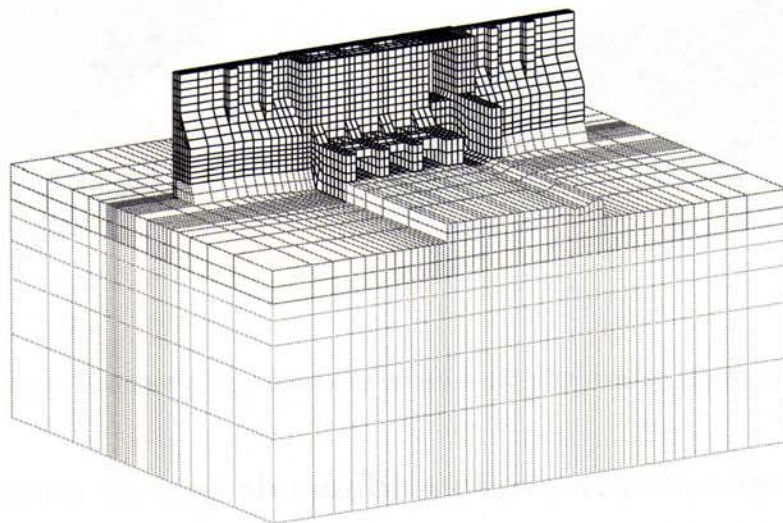


Figura 5 Modelo de elementos finitos da Barragem Reguladora Billings-Pedras, incluindo duas camadas de solo de fundação de comportamento ortotrópico

5.1 Análise térmica

Para a análise térmica em regime transiente, varrendo o período de sessenta anos, considera-se que as propriedades térmicas permaneçam constantes e uniformes em toda a estrutura e solo de fundação. Além do transporte de calor por condução, o modelo inclui também um mecanismo de troca de calor por convecção entre as superfícies da estrutura em contato com o ar, o reservatório a montante e os aterros a jusante. A convecção também foi empregada ficticiamente para incorporar o efeito da radiação solar por meio de um coeficiente de transmissão de calor por convecção equivalente.

A variação anual da temperatura ambiente é assumida como linear, oscilando entre um valor máximo e um mínimo, registrado pelos termômetros instalados em diversos pontos da estrutura. Variações bruscas das condições de contorno, associadas ao enchimento do lago a montante após quinze meses do término da construção da estrutura, não foram incluídas nesta simulação. Tais mudanças não alteram significativamente a estimativa a longo prazo das expansões provocadas pela RAA. Despreza-se, nesta simulação, a elevação adiabática da temperatura do concreto na fase de construção da barragem, devido à evolução das expansões por RAA estar relacionada a uma escala de tempo muito maior do que daquela associada à geração interna de calor. Assim, o calor gerado internamente será totalmente dissipado quando se iniciarem as expansões por RAA.

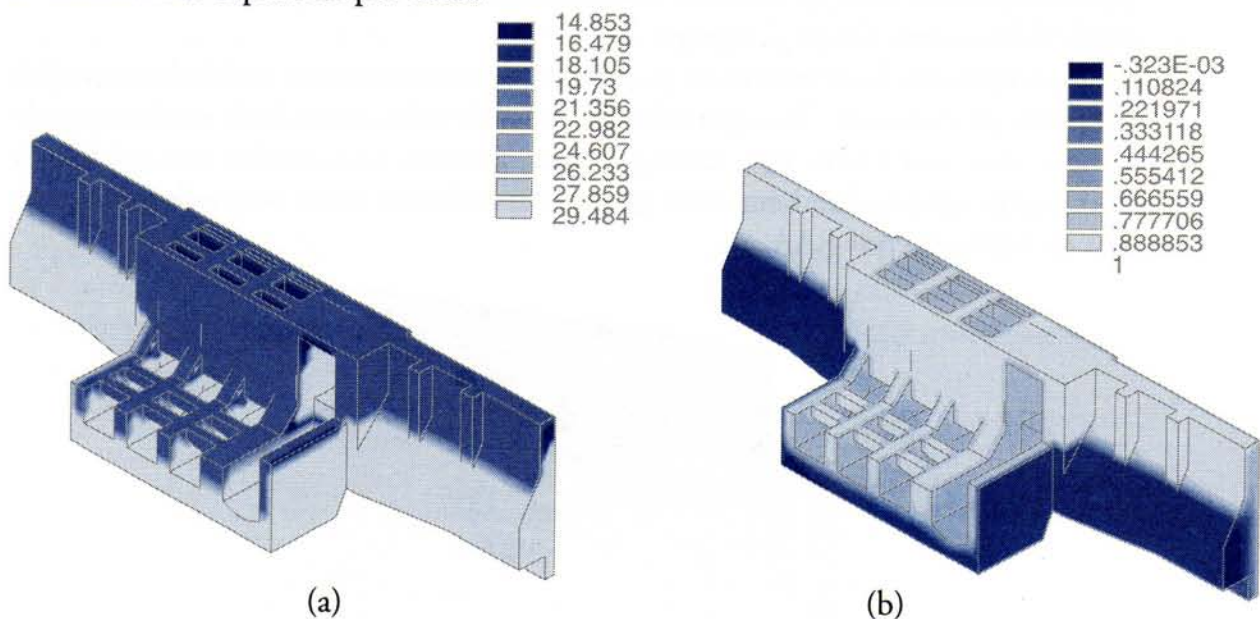


Figura 6 Campos (a) de temperatura e (b) de umidade na Barragem Billings-Pedras

5.2 Análise da percolação e difusão de água no concreto

Quanto maior a permeabilidade do concreto, maior é o risco de degradação por RAA, pois o gel álcali-silicoso requer o abastecimento permanente de água. Serão considerados os principais mecanismos de transporte de água em regime permanente. O modelo de percolação em meios porosos indeformáveis é capaz de determinar a superfície livre (pressão neutra nula) entre as porções saturadas e semi-saturadas. A partir deste ponto, definem-se as condições de contorno iniciais do modelo de difusão não-linear.¹¹ A não-linearidade é oriunda do coeficiente de difusão, que é fortemente influenciado pela umidade relativa, determinada no modelo precedente. O transporte de água por percolação, em meios saturados, é predominante sobre os mecanismos de transporte por vaporização e capilaridade. Bazant¹² sugere esta preponderância a partir de 75% de umidade relativa.

5.3 Análise viscoelástica do concreto afetado pela RAA

Considera-se, para manter a consistência entre os campos acoplados, que o problema estrutural preserve a mesma discretização por elementos finitos dos modelos térmico e higrométrico. O peso próprio da estrutura e empuxos de água e terra são considerados, assim como a expansão por RAA. O modelo estrutural também inclui o efeito do confinamento dos taludes a montante e a jusante e muros de abraço, por meio de coeficientes de fundação elástica apropriados,¹³ pois considera-se que a evolução das expansões por RAA é influenciada pela presença destas restrições.

O cálculo da expansão devida à RAA requer a determinação do estado de tensão em todos os pontos da estrutura. Como as tensões principais apresentam magnitudes distintas em cada ponto da estrutura, as expansões por RAA são anisotrópicas. Entretanto, a implementação de sub-rotinas (definidas pelo usuário) incorporadas ao código original do programa ANSYS®¹⁴ é limitada à aplicação de expansões volumétricas. Logo, a lei de expansão proposta, apresentada em (1), é função das tensões hidrostáticas (ou esféricas), de acordo com o modelo proposto por Pietruszczak.⁸

O comportamento viscoelástico do concreto afeta significativamente as deformações devidas à RAA, pois o estado de tensão da estrutura será alterado permanentemente por efeito da relaxação de tensões. Além disso, a consideração do comportamento inelástico do concreto leva à alteração do estado de tensão, em alguns pontos da estrutura em que a resistência à tração é excedida, principalmente nas regiões em que a armadura é inexistente.

6 CALIBRAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Técnicas de programação matemática são empregadas para a calibração dos parâmetros que afetam substancialmente as expansões por RAA. O ajuste dos parâmetros do problema é baseado nos dados de instrumentação apresentados no item 2, que estarão representados pela função objetivo, expressa em termos dos erros relativos entre os dados empíricos e os calculados pelo modelo de elementos finitos. A função objetivo corresponde ao valor a ser minimizado durante os ciclos de otimização. Será definida como

$$3 \quad \frac{1}{\sum_{i=1}^n K_i} \left\{ K_1 \left[1 + \text{ABS} \left(\frac{M_1 - C_1}{M_1} \right) \right] + K_2 \left[1 + \text{ABS} \left(\frac{M_2 - C_2}{M_2} \right) \right] + \dots + K_n \left[1 + \text{ABS} \left(\frac{M_n - C_n}{M_n} \right) \right] \right\}$$

que depende das taxas de expansão acusadas pelas hastes dos extensômetros múltiplos, cujos valores foram apresentados na Tabela 1, e daquelas correspondentes à resposta do modelo matemático, para o mesmo período de observação. Nesta expressão, n é o número de equipamentos considerados; M_i é a deformação Medida em microdeformações, no período de 1996-1997, no equipamento i ; C_i equivale à deformação Calculada pelo modelo matemático, na barra sem rigidez correspondente ao equipamento i , em microdeformações, entre os tempos de análise 60 a 61 anos; e K_i refere-se ao coeficiente de ponderação adotado para o equipamento i .

A função objetivo (3) baseia-se na soma dos erros percentuais entre os dados de instrumentação e os numéricos, ponderados pelo coeficiente K_i . Cada equipamento prescreve um peso K_i , de modo que equipamentos em que se quer um ajuste mais preciso, devido a um erro percentual grande, recebem maior peso. Inicialmente todos os pesos assumem o valor unitário. Outros dois grupos de parâmetros escalares são definidos a seguir: as *variáveis de calibração e de estado*.

As *variáveis de calibração* são variáveis independentes, cujos intervalos de validade são impostos pelas restrições laterais, que definem para cada conjunto de valores assumidos uma nova *configuração de projeto*. São identificados quatro grupos de variáveis de calibração, segundo a metodologia proposta.

As *variáveis de calibração da modelagem da RAA*, presentes na equação constitutiva (1), ϵ_{vol}^{max} , A_2 e t_p , são responsáveis pela adequação do modelo ao tipo de RAA detectada. As *variáveis de calibração da instrumentação* k_T , k_U , k_p e k_C (Figura 4) controlam a ponderação dos campos intervenientes (temperatura, umidade e confinamento) para a calibração do modelo matemático a partir dos dados de instrumentação. Diante desses fatores, a consideração de um dado campo pode, inclusive, ser cancelada caso sejam atribuídas condições de contorno mal-estabelecidas, que desviem para uma outra configuração que não seja aquela apontada pelo sistema de monitoração. As *variáveis de calibração dos dados experimentais* T_{INF} , T_{SUP} , U_{INF} , U_{SUP} , σ_{INF} e σ_{SUP} (Figura 4) revelam as características e mecanismos de cada material, a partir de ensaios com ênfase na RAA.

Finalmente, as *variáveis de calibração dos parâmetros físicos do problema estrutural* devem ser consideradas para aferir a) a deformação lenta do concreto, dada por meio do índice de fluência do concreto θ ; b) as resistências à tração e compressão do concreto por meio da coesão c e ângulo de atrito interno ϕ do concreto (critério de Drucker-Prager); c) os coeficientes de fundação elástica para aterros a montante e a jusante e muros laterais esquerdo e direito; d) os módulos de elasticidade do solo de fundação estratificado.

A Tabela 27 apresenta as principais variáveis de calibração, consideradas no problema de otimização de campo. Um aumento no número de variáveis de projeto leva a um mal condicionamento numérico do método de minimização adotado. A experiência recomenda que não se ultrapassem mais de dez variáveis de projeto, levando as demais a valores constantes durante o processo de minimização.

TABELA 2

Variáveis de calibração consideradas no problema de otimização de campos

Variável de calibração	Intervalo de validade	Significado prático
A_2	$0 < A_2 < \text{tempo de análise}$	Define o tempo necessário para que o processo expansivo da RAA se estabilize.
$\varepsilon_{\text{vol}}^{\text{máx}}$	Depende do tipo de RAA moderada: 30.000 μe severa: 150.000 μe	Máxima deformação volumétrica esperada num ensaio livre de tensões.
t_p	Depende do tipo de RAA moderada $20 < t_p < 50$ anos severa $3 < t_p < 10$ anos	Tempo de preenchimento dos poros pelo gel expansivo produzido pela RAA.
k_p	$1,0 < k_p < \text{tempo de análise}/t_p$	Aciona o início do mecanismo expansivo da RAA, dependendo do grau de encharcamento de um ponto da estrutura, no mínimo a partir de t_p .
k_T	$0,0 < k_T < 1,0$	Acelera a velocidade das expansões por RAA, baseado na temperatura em que um ponto se encontra.
k_U	$0,0 < k_U < 1,0$	Regula a importância da umidade no processo expansivo; quanto maior o intervalo de variação, maior será a influência da umidade; o limite superior deste parâmetro é fixo e igual a 1,0.
k_C	$0,0 < k_C < 1,0$	Regula a importância das tensões confinantes no processo expansivo; quanto maior o intervalo de variação, maior será a influência do confinamento; o limite superior deste parâmetro é fixo e igual a 1,0.

O desconhecimento de alguns destes fatores não implica a ineficiência do modelo matemático. Pode-se arbitrar um grupo reduzido de parâmetros e, com isso, buscar uma minimização local. Em seguida, deve-se fazer uma análise crítica dos resultados fornecidos pelas várias soluções factíveis obtidas, cada uma delas associadas a um grupo de fatores, descartando-se aquelas incompatíveis com a realidade do problema físico. Sabe-se que quanto mais fiéis forem as hipóteses assumidas pelas análises, como, por exemplo, propriedades e comportamento dos materiais, condições de contorno aplicadas aos problemas, descontinuidades físicas, mecanismos e características dos campos acoplados envolvidos, mais fidedigno será o modelo matemático.

As variáveis de estado são variáveis dependentes que representam as quantidades calculadas a partir de certa configuração de projeto. Essas variáveis definem o espaço das soluções. Para a calibração do modelo matemático da Barragem Reguladora Billings-Pedras, as variáveis de estado foram representadas pelas tensões na direção normal ao plano das fissuras principal e secundárias (Figura 7) e por alteamentos da crista, apresentando valores entre 0,5 e 0,7mm por ano.³

A Figura 8 mostra, esquematicamente, a metodologia adotada para o ajuste dos parâmetros de calibração.¹⁵ Supondo que as variações observadas dos campos térmico e higrométrico tenham uma influência muito pequena na resposta mecânica da estrutura, eles serão mantidos constantes no decorrer de todo o processo de otimização.

Inicialmente, arbitram-se valores aleatórios para um grupo restrito de variáveis de calibração, indicadas na Tabela 3.

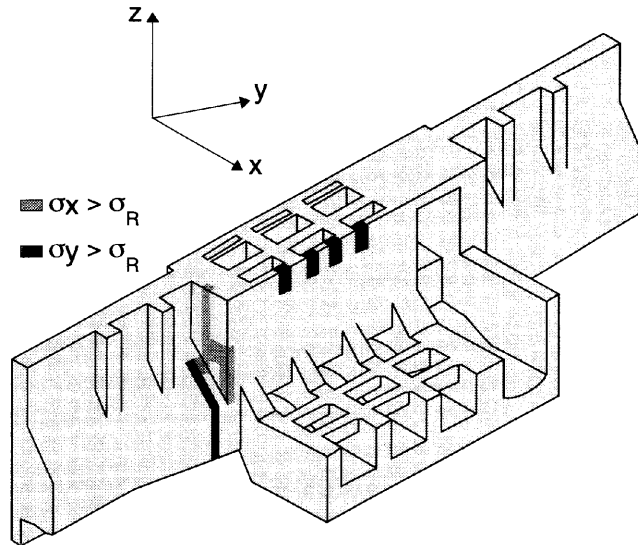


Figura 7 Variáveis de estado do problema de otimização

Em seguida, procede-se com uma série de análises estruturais incrementais, de modo que se possam avaliar as expansões por RAA ao longo do tempo, incluindo-se os acoplamentos térmico, higrométrico e mecânico. Em cada ciclo de otimização, serão calculadas as taxas de expansão devidas à RAA nas barras fictícias (locadas nas posições dos extensômetros) no intervalo de simulação de 60 a 61 anos, justamente a idade da estrutura no período de instrumentação (1996-1997). As novas configurações de projetos são criadas aleatoriamente até que um número mínimo de soluções factíveis seja retido e, com isto, se inicie o processo iterativo para a minimização de um subproblema. As estratégias de busca envolvem diversos métodos clássicos de minimização (direções conjugadas, direções viáveis e gradientes).

TABELA 3

Intervalos iniciais e valores convergidos das variáveis de calibração do problema RAA

Variável de calibração	Intervalo de variação	Valor convergido
t_p	$800 < t_p < 1300Ms$	$t_p = 1227,4Ms$
k_p	$1,0 < k_p < 3,0$	$k_p = 1,004$
k_T	$0,0 < k_T < 0,5$	$k_T = 0,237$
k_U	$0,0 < k_U < 0,5$	$k_U = 0,163$
k_C	$0,0 < k_C < 0,5$	$k_C = 0,214$
h_{SUP}	$1,0 < h_{SUP} < 3,0$	$h_{SUP} = 2,176$

Interpretando os valores após convergência (Tabela 3), pode-se notar que o tempo necessário para que o primeiro ponto do modelo estrutural apresente deformações deletérias devidas à RAA é de $t_p = 1227,4Ms^*$ (aproximadamente 40 anos). Este valor corresponde ao tempo de manifestação da reação álcali-silicato, que é o tipo de reação que foi identificado na barragem em estudo.

Devido à natureza tridimensional e não-linear do modelo de elementos finitos a ser otimizado, recomenda-se a utilização de recursos computacionais de alto desempenho.

A Figura 9 mostra os valores calculados das taxas de expansão por RAA, nos pontos correspondentes aos extensômetros EM-5 e EM-6, durante onze ciclos de otimização. Pode-se observar que o problema converge rapidamente para as taxas de deformação observadas. A mesma aderência de resultados é observada para os demais aparelhos de auscultação.

As Figuras 10(a) e 10(b) mostram a deformação volumétrica devida à RAA, resultante da imposição dos valores convergidos das variáveis de calibração.

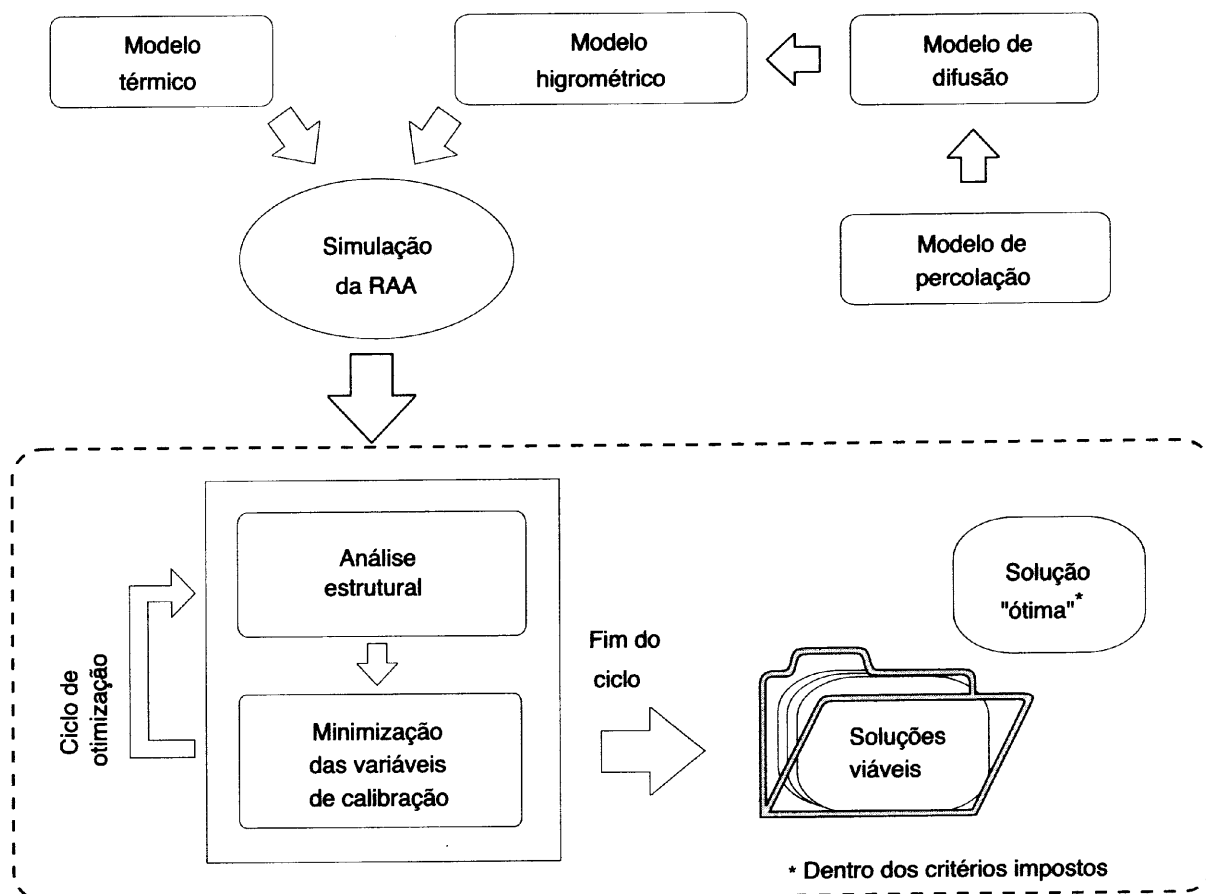


Figura 8 Metodologia proposta para a simulação do comportamento mecânico de estruturas afetadas pela RAA

* 1Ms = 1 Megassegundo = 10^6 segundos \approx 11,5 dias.

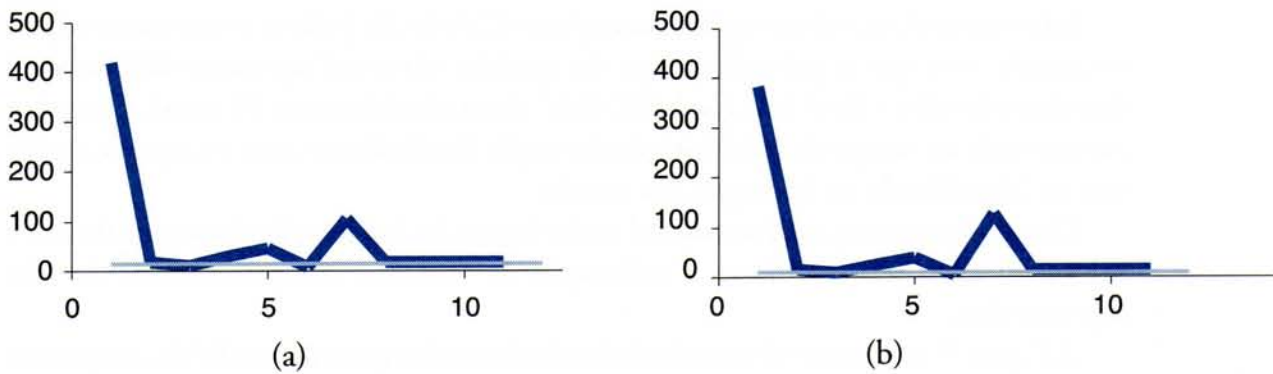


Figura 9 Variação da taxa de deformação devida à RAA durante os ciclos de otimização para a (a) segunda haste do extensômetro múltiplo EM-5 (15µε/ano) e para a (b) segunda haste do extensômetro múltiplo EM-6 (10µε/ano)

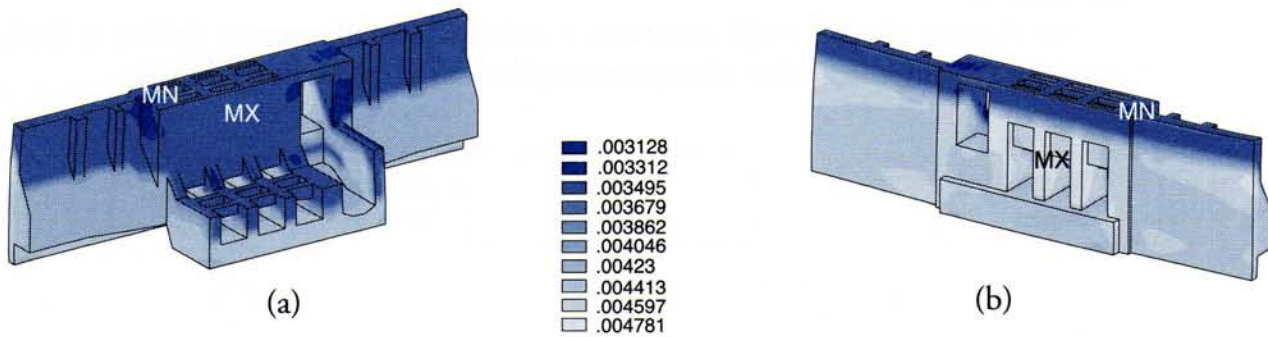


Figura 10 Deformação por RAA acumulada em 60 anos: (a) vista a montante; (b) vista a jusante

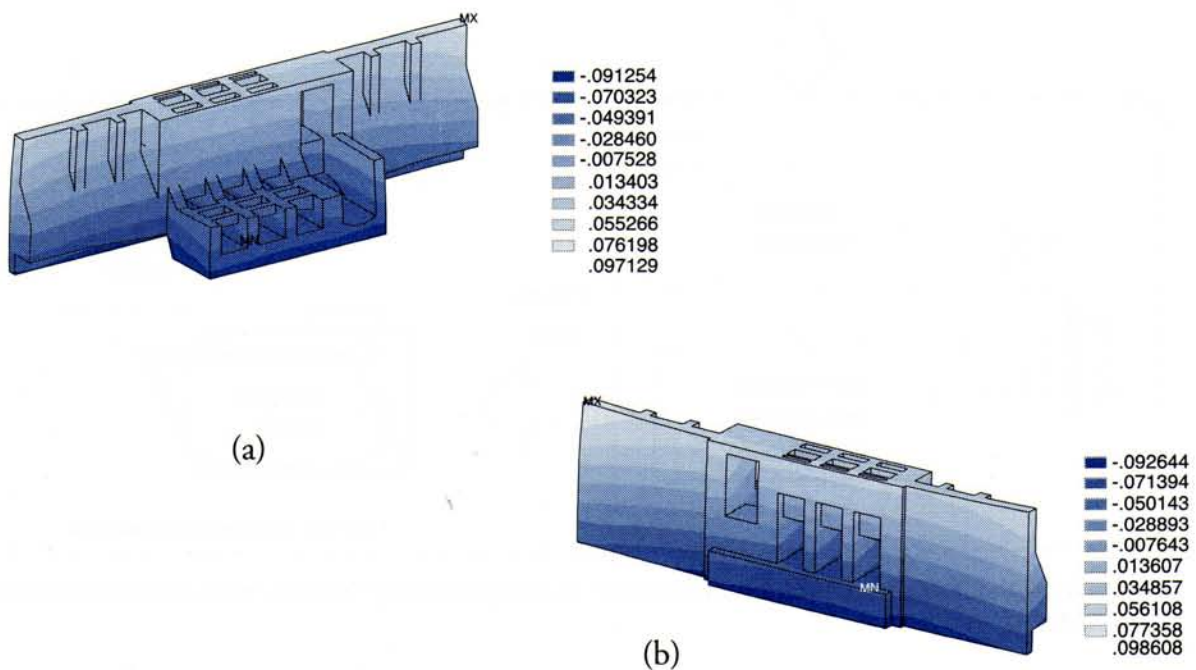


Figura 11 Deslocamentos verticais acumulados para os períodos de (a) 60 anos (vista a jusante) e (b) 61 anos (vista a montante)

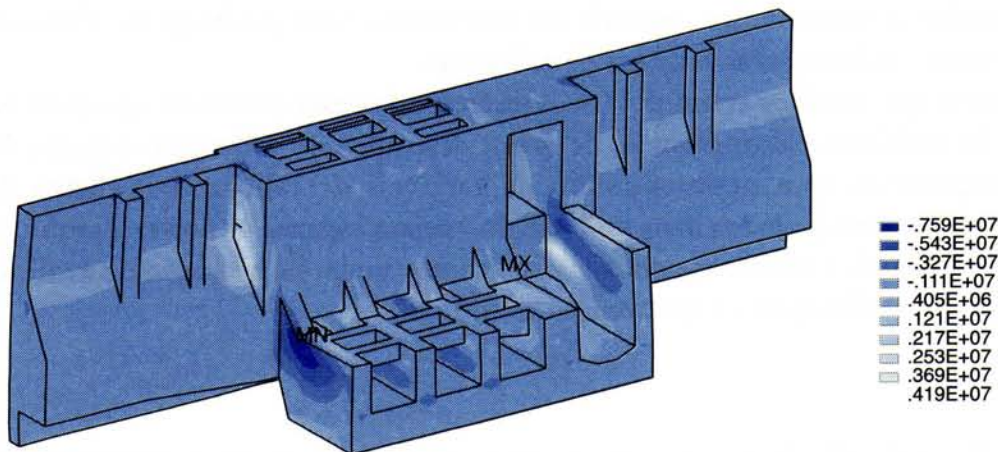


Figura 12 Tensões normais transversais horizontais após 61 anos (vista a jusante) [em N/m²]

Analisando-se os resultados apresentados nas Figuras 11(a) e 11(b), pode-se avaliar a variação média do deslocamento vertical na crista da barragem. O valor calculado de 0,842mm (0,056108-0,055266m) é muito próximo do valor imposto de 0,6mm, por meio das *variáveis de estado* em cinco nós do modelo matemático (correspondentes aos pontos das bases de convergência, conforme Figura 2).

A Figura 12 apresenta o campo de tensão transversal para o modelo matemático da Barragem Billings-Pedras. Nota-se, na mesma figura, que no encontro entre o muro direito e a tomada de água 1 a tensão atinge a resistência à tração do concreto, estipulada em 3,1pMPa. sO valor apresentado é superior ao limite imposto devido ao estado triplu de tensões considerado no critério de resistência. Deve-se observar que esta região corresponde à região de interesse, onde está instalada a fissura principal. De alguma forma pode-se explicar a existência desta fissura devido ao acúmulo de deformações deletérias devidas à RAA. Porém, a imposição de que esta região apresente tensões tração acima das tensões limites, por meio das variáveis de estado, não teve êxito. Para se ter uma resposta mais realista deve-se aumentar o número de elementos finitos nas regiões de interesse.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora tenha se considerado um número reduzido de variáveis de calibração e um período de observações muito curto, considera-se, como prova de princípio, que a metodologia apresentada para a avaliação a longo prazo dos efeitos estruturais da RAA é promissora. No sentido de se poder explicar melhor o comportamento estrutural observado pela Barragem Reguladora Billings-Pedras, deve-se incorporar ao modelo

dados gerados a partir de um período de observação mais prolongado. Deve-se, paralelamente, incluir outras variáveis de calibração.

Espera-se que modelos avançados (mais discretizados para aumentar a precisão na resposta do problema elasto-plástico, de maior desempenho, utilizando recursos de supercomputação; com maior número de variáveis de calibração e dados de instrumentação para períodos mais prolongados) sejam capazes de prever a evolução da RAA relacionada à estrutura estudada e, portanto, ajudar na avaliação de medidas profiláticas e reabilitadoras de intervenção estrutural.

8 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração e o apoio da Figueiredo Ferraz Consultoria e Engenharia de Projetos Ltda., principal empresa consultora envolvida no Projeto de Motorização da Barragem Billings-Pedras, e da SMARTtech Serviços e Sistemas Ltda., distribuidora exclusiva do programa ANSYS, Multiphysics, no Brasil e na América Latina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LÉGER, P., TINAWI, R., MOUNZER, N. Numerical simulation of concrete expansion in concrete dams affected by alkali-aggregate reaction: state-of-the-art. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.22, p.692-713, 1995.
2. DANAY, A. Structural mechanics methodology in diagnosing and assessing long-term effects of alkali-aggregate reactivity in reinforced concrete structures. *ACI Materials Journal*, v.91, n.1, p.54-62, 1994.
3. GUERRA, M.O. et al. Simpósio sobre reatividade álcali-agregado em estruturas de concreto, 1, 1997, Goiânia. *Anais Plano de investigação e auscultação da reatividade álcali-agregado na Barragem Reguladora de Billings-Pedras*. Goiânia, CBGB/FURNAS, p.265-75, 1997.
4. SILVEIRA, J.F.A. Simpósio sobre reatividade álcali-agregado em estruturas de concreto, 1, 1997, Goiânia. *Anais A expansão do concreto em barragens afetadas pela RAA e a importância das tensões confinantes*. Goiânia, CBGB/FURNAS, p.285-91, 1997.
5. CLARK, L.A. Modeling the structural effects of alkali-aggregate reactions on reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, v.88, n.3, p.271-77, 1991.

6. COURTIER, R.H. The Assessment of ASR-affected structures. *Cement and Concrete Composites*, v.12, p.191-201, 1990.
7. PAPPALARDO JR., A. *Uma metodologia para a modelagem matemática de barragens de concreto afetadas pela reação álcali-agregado*. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1998. (Doutorado em Engenharia de Estruturas).
8. PIETRUSZCZAK, S. On the mechanical behaviour of concrete subjected to alkali-aggregate reaction. *Computers and Structures*, v. 58, n. 6, p. 1093-97, 1996.
9. MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: PINI, 1994.
10. CHARLWOOD, R.G. A review of alkali-aggregate reaction in hydro plants and dams. *Hydropower and Dams*, v.1, n.3, p.73-80, 1994.
11. PAPPALARDO JR., A., PAULETTI, R.M.O., PIMENTA, P.M. Seminário de elementos finitos e encontro de usuários do programa ANSYS, 8, 1996, São Paulo. *Anais* Implicações estruturais da reação álcali-agregado em barragens de concreto. Efeito do acoplamento termo-higrométrico-mecânico. São Paulo, SMI, 1996.
12. BAZANT, Z.P., NAJJAR, L.J. Drying of concrete and non-linear diffusion problems. *Cement and Concrete Research*, v.1, n.5, p.461-73, 1971.
13. PAULETTI, R.M.O., PIMENTA, P.M., PAPPALARDO JR., A. Seminário de elementos finitos e encontro de usuários do programa ANSYS, 6, 1994, São Paulo. *Anais* Análise de tensões provocadas por reação álcali-agregado em uma barragem de concreto. São Paulo: SMI, 1994.
14. PAULETTI, R.M.O., PIMENTA, P.M., PAPPALARDO JR., A. A procedure for the long term evaluation of structural effects due to alkali-aggregate reaction. International ANSYS, Conference and Exhibition, 8, 1998, Pittsburgh. *Proceedings*. 1998, Canonsburg, ANSYS, p.551-61.
15. PIMENTA, P.M., PAULETTI, R.M.O., PAPPALARDO JR., A. Simpósio sobre reatividade álcali-agregado em estruturas de concreto, 1, 1997, Goiânia. *Anais* Uma proposta de metodologia de acompanhamento por modelagem matemática de barragens de concreto afetadas por reação álcali-agregado. Goiânia, CBGB/FURNAS, p.329-35, 1997.