

# Metodologia Computacional para o Estudo dos Efeitos da Reação Álcali-Agregado na UHE Mascarenhas

M. Raeder Filho, R. Carrazedo, UFPR/LACTEC; P. H. Pedrozo, L. A. Lacerda, LACTEC; J. A. Sava, ENERGEST

**Resumo** - Este trabalho apresenta parte dos estudos referentes ao segundo ciclo 2002/2003 do projeto Diagnóstico de Previsão da Degradação de Estruturas de Concreto Devido à Reação Álcali-Agregado realizado pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, apresentado a Espírito Santo Centrais Elétricas S. A. – ESCELSA. O presente trabalho abrange uma síntese da metodologia de análise desenvolvida e uma análise das informações disponíveis para a aplicação da metodologia computacional ao estudo de um bloco típico da casa de força da UHE de Mascarenhas.

**Palavras-chave**— Barragem, Modelagem Matemática, Reação álcali-agregado.

## I. INTRODUÇÃO

A expansão causada pela reação álcali-agregado é objeto de estudo e desenvolvimento de diversos modelos matemáticos que tentam representar seus efeitos no concreto. Basicamente, o desenvolvimento do modelo matemático de análise requer informações nos três níveis apresentados a seguir:

- Dados de laboratório – onde são definidas as propriedades do concreto, incluindo a agressividade da reação álcali-agregado e a expansibilidade do concreto;
- Dados de campo – obtidos através de instrumentação instalada e de inspeções visuais;
- Dados de projeto – incluem desenhos, carregamentos, resistências de projeto, dosagens, entre outros.

Este artigo apresenta, além da metodologia numérica desenvolvida, análises das informações obtidas nos três níveis mencionados disponíveis para aplicação de metodologia computacional desenvolvida ao estudo de um bloco de uma barragem de concreto, sujeita aos efeitos decorrentes da reação álcali- agregado.

## II. METODOLOGIA

A metodologia de análise numérica consiste em obter a distribuição espacial dos diversos fatores que influenciam a

reação álcali-agregado, normalizá-los e depois utilizar uma equação constitutiva para combiná-los e obter a taxa de deformação volumétrica devida à RAA. Devido à complexidade do problema físico e ao elevado custo computacional para sua solução, algumas simplificações são necessárias.

Assume-se que os comportamentos térmico e higrométrico da estrutura são estacionários, independentes entre si e da evolução do estado de tensões do maciço com o desenvolvimento da patologia.

Para que o modelo represente as medições realizadas em campo, técnicas de otimização são utilizadas sobre as leis de normalização dos campos, determinando assim a influência de cada parâmetro sobre a expansão. Todo este processo pode ser visto na figura 1.

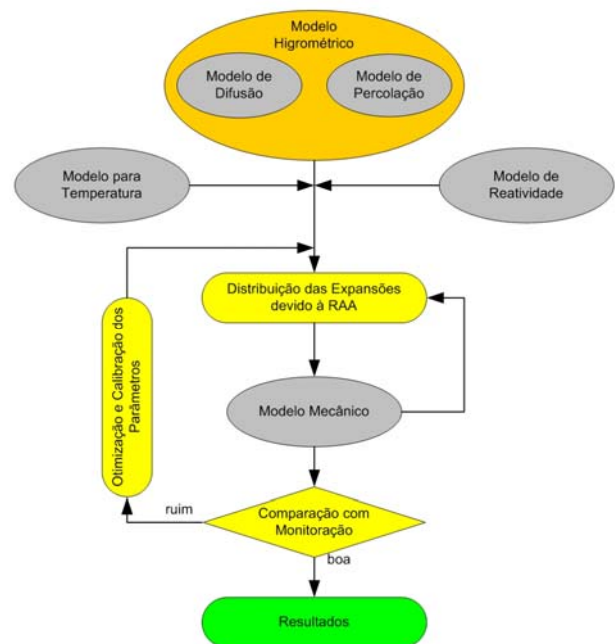


Figura 1. Metodologia para análise de estruturas sob efeito da RAA.

A temperatura e a umidade são obtidas em análises separadas, pois são consideradas independentes da reação álcali-agregado. Ou seja, causam influência na formação do gel, porém não são influenciadas pelas alterações estruturais que o gel velho provocar.

A reatividade dos constituintes, devido a sua distribuição desconhecida e heterogênea, é em geral considerada constante ao longo da estrutura. Porém é possível considerar regiões submetidas a diferentes índices de reatividade,

quando houver o conhecimento do uso de diferentes agregados ou cimentos.

Já as tensões são alteradas pelas deformações causadas pelo gel. Assim, além da consideração dos esforços principais a que a estrutura está submetida, é considerado um ajuste nas tensões devido à influência do gel.

### A. Campos Normalizados

Após a determinação dos campos de influência, estes são normalizados em fatores de influência através de leis lineares, apresentados na figura 2. Cada lei de conversão foi determinada para representar o efeito correspondente pelo respectivo campo no processo expansivo [1].

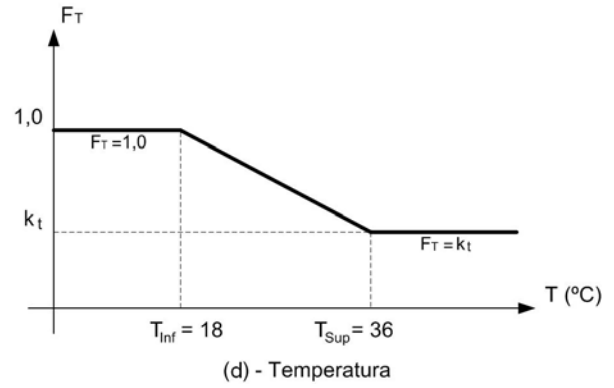
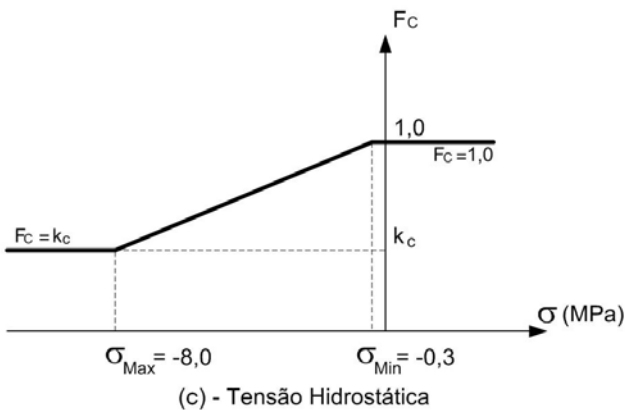
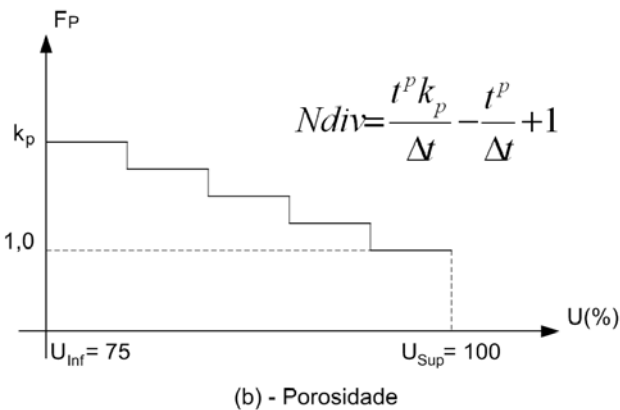
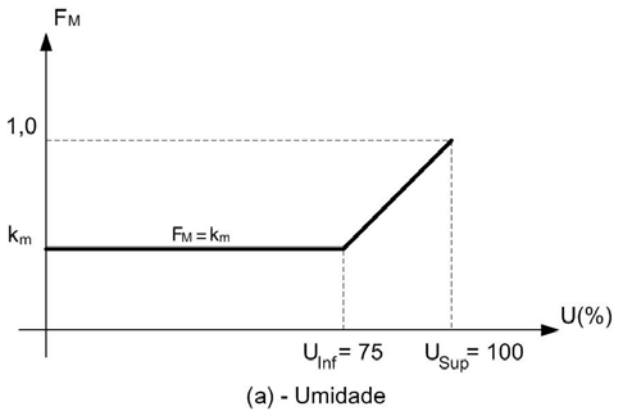


Fig 2. Normalização dos campos de influência: a) Umidade; b) Porosidade; c) Confinamento; d) Temperatura (Fonte das figuras a), c) e d) PAPPALARDO Jr. [2]).

Percebe-se na figura 2 que as leis de conversão são regidas pelos valores  $k_p$ ,  $k_c$ ,  $k_m$  e  $k_t$ . Estas variáveis recebem valores iniciais, porém serão alteradas no processo de otimização, para que a parcela de cada fator na taxa de expansão possa ser ajustada.

### B. Equação da expansão

A equação constitutiva a seguir combina os efeitos dos fatores de influência normalizados, fornecendo a taxa de expansão volumétrica devida à RAA.

$$\dot{\varepsilon}_{RAA} = H(t - t^p F_P) \frac{\varepsilon^{\max} A_1 F_T}{(A_1 F_T + (t - t^p F_P))^2} \sqrt{F_C F_M}$$

onde  $\dot{\varepsilon}_{RAA}$  é a taxa de deformação devida à RAA,  $H$  é a função Heaviside,  $\varepsilon^{\max}$  é o valor assintótico de deformação volumétrica livre por RAA,  $A_1$  é um índice de reatividade,  $F_T$ ,  $F_P$ ,  $F_C$ ,  $F_M$  são os fatores normalizados de influência devido à temperatura, porosidade, tensões e umidade, respectivamente e  $t^p$  é a idade quando ocorreu o preenchimento dos poros do concreto com o gel formado pela reação. Decorre do uso da função Heaviside que não ocorrerão expansões devida à RAA antes do tempo de preenchimento dos poros. Em consequência disso, dependendo do passo de tempo adotado, um erro poderá estar sendo incluso na análise. Este erro pode ser minimizado com o refinamento da discretização temporal.

### C. Otimização

Um processo de otimização é essencial para ajustar os resultados da análise às medições de campo. O processo consiste na minimização de uma função objetivo, ajustando as variáveis de calibração,  $k_p$ ,  $k_c$ ,  $k_m$ ,  $k_t$ ,  $A_1$ ,  $\varepsilon^{\max}$  e  $t^p$ .

A função objetivo corresponde ao somatório das distâncias entre pontos das curvas que formam a deformação ao longo do tempo, para a deformação medida em campo e para a deformação calculada, nos pontos de aferição.

Valores limites devem ser fornecidos às variáveis de calibração para restringir o espaço de possíveis soluções e acelerar o processo de convergência.

Toda a metodologia desenvolvida foi implementada dentro de um programa comercial de análise numérica [3]. O método foi discutido e verificado com uma análise da expansão de um corpo de prova prismático em um ensaio acelerado de expansão devido à RAA [4].

### III. ANÁLISE DOS DADOS DA UHE DE MASCARENHAS

#### A. Dados de laboratório

Foram realizados ensaios para análise das propriedades mecânicas segundo as normas NBR 5739/94, NBR 8522/84, e ensaio acelerado (ASTM C-1260/1994), que identificaram reações deletérias no concreto.

A avaliação da expansão volumétrica total que o concreto livre de restrições pode atingir através de ensaios laboratoriais é complexa, pois os resultados são, em geral, qualitativos. Tendo em vista os resultados obtidos, considerou-se a reação álcali-agregado como sendo do tipo moderada para o modelo numérico de análise. Em termos numéricos tal avaliação equivale a uma expansão livre máxima  $\varepsilon^{\max}$  próxima de  $30000\mu\varepsilon$ .

Em relação ao índice de reatividade, tal parâmetro define o tempo necessário para que o concreto se expanda livremente a um valor próximo do limite  $\varepsilon^{\max}$ . Para a análise do bloco da casa de força, consideram-se os seguintes limites para esse índice:  $0 < A_I < (T - t^p)$ , onde  $T$  é o tempo total de análise e  $t^p$  o tempo para preenchimento dos poros.

#### B. Dados de campo

Tais dados são importantes ao estabelecerem variáveis de estado para o controle do processo de otimização, e foram obtidos através de inspeção visual e extensômetros múltiplos. A inspeção visual permitiu estimar um período provável para o tempo de início da expansão do concreto, ou seja, o tempo de preenchimento dos poros  $t^p$ . A reação álcali-agregado foi classificada como do tipo moderada, e assumidos os seguintes limites para a busca do tempo mais representativo de preenchimento dos poros:  $12 \text{ anos} < t^p < 22 \text{ anos}$ . Uma outra variável de estado empregada foi presença de fissuras verticais presentes nos três painéis das paredes de montante da sala do gerador.

Quatro conjuntos de hastes múltiplas foram instalados na casa de força, um conjunto em cada bloco, e todos na direção vertical desde a galeria de inspeção até a fundação.

Sendo demasiadamente pequeno o período de leituras que se dispõe (cerca de sete meses), ainda não é possível separar os efeitos térmicos sazonais e aquilo que poderá vir a ser a expansão do concreto pela reação álcali-agregado. A continuidade dessas leituras fornecerá, possivelmente, o conjunto de informações de maior relevância para a calibração do modelo computacional.

#### C. Dados de projeto

Os seguintes dados foram extraídos dos critérios de projeto para a casa de força da UHE de Mascarenhas:

- Temperatura média do ar e água  $-27,5$  e  $22,5$  °C;
- Nível máximo do reservatório  $- 63,0$  m;
- Nível médio a jusante  $- 40,0$  m;
- Cargas Permanentes:  
*Peso-próprio concreto e água - 2350 e 1000kg/m<sup>3</sup>;*  
*Turbina e Gerador - 200.000 e 225.000 kg*  
*Comportas dos tubos de sucção - 15.900 kg*  
*Comportas da tomada d'água, cada - 41.000 kg*  
*Stoplogs de tomada d'água, cada - 14.500 kg*
- Tensão máxima de compressão e tração do concreto  $- 95$  e  $0$  kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente;
- Coeficiente de Poisson  $- 0,20$ .

Já os dados que caracterizam as propriedades térmicas e higroscópicas do concreto são valores médios e foram obtidos da literatura. As propriedades mecânicas da rocha de fundação podem ser estimadas com os seguintes valores:

- Massa-específica  $- 2500$  kg/m<sup>3</sup>;
- Módulo de elasticidade (isotrópico)  $- 0,5$  Gpa;
- Coeficiente de Poisson  $- 0,30$ .

#### D. Modelo de um Bloco da casa de força

Para execução das análises de elementos finitos foram realizadas simplificações geométricas para o bloco da casa de força, além disso, por não se dispor de todos os desenhos de projeto, o que dificultou a criação de um modelo geométrico para a estrutura, alguns parâmetros foram adotados:

- Estrutura de fundo da casa de força substituída por carregamento vertical equivalente;
- O “caracol” foi considerado simétrico;
- Não se preocupou com a modelagem das armaduras do concreto.

As aproximações são essenciais para que o tamanho das malhas a serem geradas a partir desse modelo geométrico seja compatível com os recursos computacionais existentes. Tais simplificações são extremamente localizadas (pequenos volumes) e não alteram significativamente o comportamento global da estrutura.

O pacote computacional ANSYS® [3] foi utilizado na geração do modelo geométrico apresentado nas figuras 1 e 2. A malha de elementos finitos foi gerada automaticamente, para a realização das análises higrométrica, de transferência de calor e, posteriormente, de tensões em virtude da expansão devido à RAA.

Para as análises estacionárias higrométricas e de transferência de calor, elementos finitos tetraédricos de 10 nós, SOLID87, foram utilizados na representação do modelo geométrico. Para a análise transiente de tensões, foi utilizada a mesma malha, apenas substituindo-se o elemento SOLID87 pelo elemento SOLID92, que possui mesma geometria e número de nós.

#### IV. ANÁLISES ESTACIONÁRIAS

##### A. Análise Higrométrica

Considera-se que a quantidade de água inicial do concreto fresco é suficiente para manter o interior da estrutura completamente saturado. Portanto, as análises de percolação d'água e difusão da umidade tornam-se desnecessárias, e  $U = 100\%$  é aplicado a todo o bloco. Deste modo o campo de fatores influentes relativos à umidade ( $F_M$ ) para expressão de expansão por reação álcali-agregado será homogêneo e igual à unidade.

Um arquivo com a numeração de todos os nós da malha de elementos finitos, com valores unitários associados a cada nó, deve ser construído. Esse arquivo deverá ser lido durante a análise transiente para o cálculo das deformações devido à reação álcali-agregado.

##### B. Análise Térmica

Na análise térmica considera-se que a troca de calor entre o bloco da casa de força e os meios ao seu redor ocorrem através de convecção e radiação. A troca por convecção ocorre na interface entre o concreto e o ar, água e fundação, e pode ser expressa da seguinte forma:

$$q_{cv} = S_{cv}(T_{me} - T)$$

Nesse caso,  $q_{cv}$  é o fluxo térmico por convecção por unidade de área ( $W/m^2$ ),  $S_{cv}$  é o coeficiente de transmissão superficial ( $W/m^2\text{°C}$ ), que depende dos meios que compõem a interface,  $T_{me}$  é a temperatura do meio envolvente e  $T$  é a temperatura na superfície da estrutura.

Já a troca por radiação solar é regida pela lei de Stefan-Boltzmann, que é fortemente não-linear. Sua expressão é dada por:

$$q_{rs} = \sigma \varepsilon (T_{me}^4 - T^4)$$

onde  $q_{rs}$  é o fluxo térmico por radiação por unidade de área ( $W/m^2$ ),  $\sigma = 5.67e-8 \text{ W/m}^2\text{K}^4$  é a constante de Stefan-Boltzmann e  $\varepsilon = 0.88$  é o coeficiente adimensional de absorção de calor para a superfície do concreto.

Assumindo-se que a perda de calor por radiação entre o concreto e o ar não seja significativa, pode-se evitar a não-linearidade desta condição de contorno substituindo-se parte da expressão acima por um coeficiente de transmissão superficial equivalente ( $S_{rs}$ ), dependente da temperatura:

$$S_{rs} = \sigma \varepsilon (T_{me} + T)(T_{me}^2 + T^2)$$

Este coeficiente de transmissão deve ser somado ao coeficiente relativo à troca por convecção, resultando num coeficiente de película final,

$$S = S_{rs} + S_{cv}$$

Para esta análise pode-se considerar que reservatório está em seu nível médio a montante e o nível d'água a jusante correspondente a vazão média anual. A condutividade térmica para o concreto pode ser aproximada como isotrópica com o valor de  $K = 2.367 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C}$  (agregados de granito) e calor específico de  $C = 0.23 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{C}$ .

Para a rocha de fundação os seguintes valores podem ser adotados:

- Condutividade térmica isotrópica  $K = 2.700 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C}$ ;
- Calor específico  $C = 0.20 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{C}$ ;
- Temperatura média anual  $-24,0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A tabela 1 apresenta os coeficientes de transmissão para todas as superfícies do bloco da casa de força e as temperaturas nos meios adjacentes ao concreto. As trocas em todas as superfícies são consideradas como convectivas.

TABELA I  
COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO

Área	'
Junta de contração e plano de simetria	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$
Superfícies externas	$S_{cv} = 19.5 \text{ W/m}^2$ ; $T_{me} = 27,5^\circ\text{C}$
Galerias longitudinais	$S_{cv} = 5.6 \text{ W/m}^2$ ; $T_{me} = 22^\circ\text{C}$
Sala de geração	$S_{cv} = 5.6 \text{ W/m}^2$ ; $T_{me} = 28^\circ\text{C}$
Sala do octógono	$S_{cv} = 5.6 \text{ W/m}^2$ ; $T_{me} = 30^\circ\text{C}$
Interior do octógono	$S_{cv} = 5.6 \text{ W/m}^2$ ; $T_{me} = 50^\circ\text{C}$
Superfícies imersas	$S_{cv} = 350 \text{ W/m}^2$ ; $T_{me} = 22,5^\circ\text{C}$

Devido à semelhança entre blocos adjacentes, assume-se que o campo de temperaturas dos mesmos deve ser parecido e, portanto, aos planos verticais da junta de contração impõe-se que não há de troca de calor (fluxo térmico igual a zero), embora tenha sido verificada a abertura das juntas em alguns locais.

Nas interfaces concreto/ar externas, o coeficiente de transmissão é superior ao das interfaces internas em função da velocidade do fluido. Já nas interfaces concreto/água, por falta de dados experimentais, adotou-se um valor bastante elevado para o coeficiente de transmissão.

Os valores médios constantes para todas as temperaturas dos meios envolventes foram estimados.

Com a execução da análise térmica, utilizando-se os dados da tabela 1, obtém-se a distribuição de temperaturas em todo o maciço de concreto. Esta distribuição deve ser empregada para a definição de um campo de fatores térmicos ( $F_T$ ) influentes para expressão de expansão por reação álcali-agregado.

Um arquivo com a numeração de todos os nós da malha de elementos finitos com valores de  $F_T$  associados a cada nó resulta da aplicação do modelo desenvolvido. Esse arquivo deverá ser lido durante a análise transiente para o cálculo das deformações devido à reação álcali-agregado.

## V. ANÁLISE TRANSIENTE

### A. Análise de Tensões

Para a análise termo-mecânica transiente é assumido o comportamento elástico-linear e isotrópico para o concreto, desprezando-se as cargas dinâmicas cujos efeitos podem ser estudados separadamente. A princípio são considerados apenas os carregamentos estáticos: peso próprio da estrutura e equipamentos, e carga hidrostática. Os empuxos médios de água a montante e a jusante são obtidos a partir dos níveis utilizados na análise de transferência de calor.

O instante inicial adotado para a análise em questão é o ano de 1977, portanto, o período de análise compreende 27 anos, aproximadamente. Nesse instante assume-se que o calor gerado pela hidratação do cimento no concreto já tenha se dissipado. O passo tempo empregado na análise dependerá dos recursos computacionais disponíveis. Ao se atingir o tempo de preenchimentos dos poros o concreto passa a se expandir dependentemente de todos os campos intervenientes – temperatura, umidade, confinamento, porosidade e propriedades dos minerais reagentes. Essa expansão é regida por uma das expressões já apresentadas.

### B. Ciclo de Otimização e variáveis de projeto

O processo de otimização é utilizado para ajuste do modelo numérico através da definição de uma função objetivo que corresponde ao erro entre a deformação medida, em campo, e a deformação calculada, ao longo da análise, nas hastes dos extensômetros. Por exemplo,

$$FO = \left[ 1 + \sum_{i=1}^3 ABS \left( \frac{\varepsilon_i^{campo} - \varepsilon_i^{calculado}}{\varepsilon_i^{campo}} \right) \right]$$

As variáveis desconhecidas de projeto (ou de calibração) são as variáveis independentes do sistema, modificadas pelo processo de otimização com o intuito de minimizar a função objetivo. Para o modelo do bloco da casa de força, essas variáveis são apresentadas na tabela 2:

TABELA II  
VARIÁVEIS DE PROJETO OU CALIBRAÇÃO

Variável	Intervalo
$A_1$ ou $A_2$	$0 < A_1$ ou $A_2 < (T - t^p)$
$\varepsilon^{\max}$	20000 $\mu\epsilon$ a 40000 $\mu\epsilon$
$t^p$	12 anos < $t^p$ < 22 anos
$k_t$	Definida na metodologia. Modifica a velocidade da expansão
$k_c$	Definida na metodologia. Modifica a importância do estado de confinamento do concreto.

Após realizar-se a primeira iteração no cálculo, com valores iniciais atribuídos aleatoriamente para as variáveis de projeto, deve-se avaliar a função objetivo e as variáveis de estado.

### C. Variáveis de Estado

As variáveis de estado são as restrições do problema, que são dependentes das variáveis de projeto. A elas são impos-

tas condições que funcionam como limites de variação. Para a análise do bloco da casa de força poderiam ser utilizadas como variáveis de estado as deformações registradas em campo, ao longo da análise e a localização e orientação das fissuras nos painéis a montante da sala de geração.

Durante o ciclo de otimização, se não forem respeitadas as condições impostas tanto pela função objetivo quanto pelas variáveis de estado, é feita uma nova tentativa de minimizar a função objetivo, alterando as variáveis de projeto e, conseqüentemente, as variáveis de estado.

## VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o passar do tempo e acúmulo das leituras dos instrumentos instalados na casa de força da UHE de Mascarenhas, será possível aplicar a metodologia descrita para o estudo do comportamento estrutural dos blocos da casa de força. Cabe salientar que a metodologia desenvolvida e apresentada pode ser melhorada. Do ponto de vista da modelagem matemática, os principais aspectos a serem estudados e implementados seriam os fenômenos reológicos do concreto, retração e fluência, e o comportamento anisotrópico da evolução da reação álcali-agregado, já verificado em diversas barragens.

## VII. AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Chamecki pelo incentivo, apoio e amizade durante os melhores e piores momentos. Ao apoio da Escelsa, do Lactec e da ANEEL que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

## VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CARRAZEDO, R.; LACERDA, L. A.; SAVA, J. A. Discussão dos Fatores de Influência da Expansão do Concreto Causada pela Reação Álcali-Agregado Utilizados em um Modelo Paramétrico. In: CONGRESSO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA, 2004, Lisboa.
- [2] PAPPALARDO Jr, A. Uma metodologia para a modelagem matemática de barragens de concreto afetadas pela reação álcali-agregado. São Paulo, 1998. 180p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.
- [3] ANSYS® Engineering Analysis System, *Theory Reference*, 7.ed., ANSYS, Pittsburgh, 1996.
- [4] CARRAZEDO, R. Modelagem numérica do comportamento estrutural de uma barragem sob efeitos da reação álcali-agregado. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná.
- [5] CHATTERJI, S.; CHRISTENSEN, P. – Studies of alkali-silica reaction. part 7: Modelling of expansion. *Cement and Concrete Research*, v. 20, n. 2, p. 285–290, Março 1990.
- [6] ESCELSA – “UHE Mascarenhas – Mapeamento de Fissuras”, Desenhos diversos sobre o mapeamento de fissuras realizado em 1991, 2000.