Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

BARRAGENS DE CONCRETO SUBMETIDAS À AÇÃO TÉRMICA AMBIENTAL. ANÁLISE DA BARRAGEM LLOSA DEL CAVALL

A. MOREIRA
Engenheira Civil
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
Espírito Santo; Brasil
drimoreira@gmail.com

J. L. CALMON
Professor Titular
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
Espírito Santo; Brasil
calmonbarcelona@gmail.com; joao.gama@ufes.br

RESUMO

O estudo realizado é motivado pelo interesse em se avaliar a resposta térmica e tensional em barragens de concreto, devido às ações térmicas ambientais na etapa de operação. Um modelo bidimensional da barragem *de Llosa delCavall*, localizada na Espanha, é realizado no programa *Ansys*, que utiliza o método dos elementos finitos para resolução da equação de Fourier. Apropriadas condições de contorno determinadas pelas transferências de calor são definidas, a fim de representar a realidade da temperatura da água do reservatório e da temperatura do ambiente exterior. Uma abordagem simplificada da radiação solar é considerada. As temperaturas encontradas na análise térmica são dados de entrada para uma análise tensional simplificada. O desempenho térmico e tensional para dois níveis distintos do reservatório de água é examinado. As ações ambientais acarretam efeitos térmicos significativos em determinadas horas do dia que causam tensões de tração maiores que a resistência de tração do concreto. Finalmente, resultados de tensões de tração evidenciam a possível ocorrência de fissuras de origem térmica à jusante da barragem, podendo comprometer a durabilidade do concreto.
Palavras-chave: análise térmica e tensional, método dos elementos finitos, ações térmicas ambientais, durabilidade.

ABSTRACT

The study is mainly motivated by the interest in evaluating thermal and stress response in concrete dams at advanced ages, due to environmental thermal actions during service. A two-dimensional mode of *Llosa de Cavall* dam, located in Spain, is performed by software Ansys, which uses the finite element method to solve Fourier's equation. Appropriate heat transfer boundary conditions are used in the dam body in order to represent the reality of the reservoir temperature and air temperature. A simplified approach of solar radiation is defined. The thermal performance of two distinct reservoir level is considered. Thermal analysis is input to a simplified thermal stress analysis. Environmental loads have significant effects that cause tensile stresses greater than tensile strength of the concrete.Tensile stresses results show the probable occurrence of thermal cracks in downstream face for both models, which may compromiseconcrete durability.
Key words: thermal analysis, thermal stress, finite element method, environmental loads, structural deterioration.

1. INTRODUÇÃO

As ações ambientais influenciam o comportamento de barragens de concreto tanto na fase de construção comona sua fase de operação. O caráter permanente no tempo que caracteriza a ação térmica ambiental e seu comportamento cíclico no tempo faz com que as consequências derivadas de sua atuação durante o período de vida útil da barragem, podem ser significativas para a durabilidade do concreto [1]. Os efeitos da temperatura na barragem de concreto devem ser considerados para evitar a deterioração prematura da estrutura. A distribuição de temperaturas na barragem resultante

das ações externas contribui para tensões de tração na estrutura que podem sobrepor à resistência de tração do concreto, originando fissuras na mesma.

A temperatura encontrada na estrutura da barragem depende das propriedades térmicas do concreto, das características físicas da barragem e das condições térmicas ambientais, definidas pela temperatura da água do reservatório, temperatura ambiente e radiação solar [2]. O processo de transferência de calor que ocorre entre a estrutura da barragem e o ambiente exterior depende dos mecanismos de condução, convecção e radiação. Esses mecanismos são definidos no sistema através de confiáveis condições de contorno.

Neste artigo, um modelo bidimensional da barragem de *Llosa de Cavall*, localizada naregião de Catalunya, na Espanha, é desenvolvido. A temperatura da água e a temperatura ambiente são definidas através de confiáveis formulações analíticas. A radiação solar é considerada de maneira aproximada no modelo. A troca de calor por condução é definida entre a fundação e a barragem de concreto. Por fim, dois níveis de água no reservatório são verificados para a barragem em questão.

Na figura1 destaca-se um procedimento para o cálculo das tensões térmicas na estrutura. Inicialmente é realizada uma análise térmica para encontrar a distribuição de temperatura na barragem e, após, é realizada a análise tensional a partir dos dados da primeira etapa. Esse procedimento caracteriza um modelo desacoplado de resolução.



Figura 1: Representação global do método desacoplado de resolução das tensões térmicas (adaptada de Calmon [2])

Inicialmente, é realizado uma análise térmica com o uso do programa de computador Ansys 14.0 [3] por meio da linguagem de programação paramétrica *AnsysParametric Design Language (APDL).* O programa utiliza implementação computacional do método dos elementos finitos para resolver uma grande diversidade de problemas. A partir dos resultados de distribuição de temperatura em diferentes seções, uma análise tensional aproximada é realizada a fim de obter os resultados de tensões de tração para asseções selecionadas da barragem.

2. PROCESSO DE TRANSMISSÃO DE CALOR

O fluxo de calor em um sólido é governado pela equação 1para o caso bidimensional.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k(x)\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k(y)\frac{\partial T}{\partial y}\right)+Q=\rho\, c\,.\,\frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Onde ρ é a densidade do material (kg/m³), c é o calor específico do material (J/kg°C), k é a condutividade do material (W/m°C), T é a temperatura (°C) e Q é a geração interna de calor devido à hidratação por unidade de volume e tempo (W/m³). Para uma barragem na etapa de operação, a geração interna de calor devido à hidratação do cimento será considerada nula. Para a utilização dessa formulação algumas hipóteses são definidas: meio contínuo e homogêneo, isotropia térmica, homogeneidade térmica e permanência térmica [1].

As barragens de concreto estão sujeitas a distintos mecanismos de transferência de calor que podem ocorrer entre a sua estrutura e com o ambiente ao seu entorno. Essas transferências variam em função das características do ambiente exterior e estão presentes em toda a vida útil da estrutura. As transferências de calor para o caso de uma barragem possuem três formas básicas que interagem entre si: convecção, condução e radiação. Assim, a resolução da equação

diferencial requer a definição de condições de contorno, que definem a troca de calor do problema.As condições sujeitas são definidas pela condição de *Dirichlet*(equação 2) e a condição de *Neumann* (equação 3).

$$T_s(x,y,t) = T_1(x,y,t) \tag{2}$$

$$\left(k(x)\frac{\partial T}{\partial x}\right) n_x + \left(k(y)\frac{\partial T}{\partial y}\right) n_y = q\,(x,y,t) \tag{3}$$

Onde T_sé a temperatura da superfície (°C), T_1é a temperatura conhecida no instante t (°C), n_x e n_y são os cossenos diretores do vetor normal unitário à superfície do contorno e q(x,y,t) é o fluxo de calor representado pela soma dos mecanismos de transferência de calor por convecção e radiação.

O fluxo de calor por convecção é proporcional a diferença de temperatura do ar com a temperatura da superfície em contato. Esse fluxo é definido pela Lei de Esfriamento de Newton (equação 4), que pode ser expressa como:

$$q_c(x,y,t) = h_c \cdot [T(x,y,t) - T_a(t)] \tag{4}$$

Onde q_c representa o fluxo de convecção, T(x,y,t) a temperatura da superfície da estrutura de concreto, T_a a temperatura do ar em contato com a superfície e h_c é o coeficiente de transmissão de calor por convecção. Esse último parâmetro depende principalmente da velocidade do vento. Neste artigo, $h_c$será calculado pela expressão de Kehlbeckapresentada em [1] (equação 5).

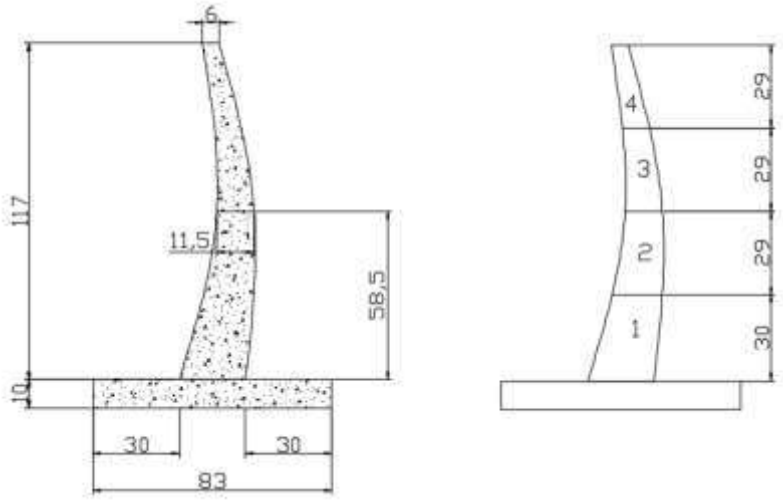
$$h_c = 3{,}83\ v + 4{,}7 \tag{5}$$

Onde hc é o coeficiente de transmissão de calor por convecção (W/m²°C) e v é a velocidade do vento no local de estudo (m/s).

3. ANÁLISE TÉRMICA

3.1 Barragem de Llosa de Cavall

A barragem de Llosa de Cavall está localizada no rio Cardoner, aproximadamente 12 km ao norte da cidade de Olius, província de Lérida (Catalunya) na Espanha. A Llosa de Cavall é uma barragem em abóboda com dupla curvatura com altura máxima de 122,3 m. Os dados da barragem são fornecidos por Calmon [2]. A seção utilizada para a realização do modelo bidimensional é um corte no comprimento da barragem, gerando uma seção transversal com altura de 117 m, largura máxima na base de 23 m e largura no topo de 6 m. A fundação da barragem é representada no modelo por um bloco de altura 10 m por 83 m de largura. A figura 2 indica a seção transversal utilizada para representar a barragem.



a) b)

Figura 2: a) Representação da seção da barragem.b) Seções para análise da barragem. (Medidas em metros)

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

3.2 Parâmetros ambientais

As condições de contorno entre a barragem de concreto e seu entorno devem ser consideradas como dependentes do tempo. Essas ações externas podem ser representadas no modelo por condições definidas nos contornos da barragem. À jusante da barragem, a transferência de calor é influenciada pela troca entre a temperatura ambiente e o concreto, representando os fenômenos de convecção e condução nessa região. Além disso, a radiação solar incide sobre essa região, influenciando a troca de calor. O reservatório é definido à montante da barragem, no contato concreto com a água, podendo estar completo ou não.

A variação da temperatura da água foi estudada por Ardito, Maier e Massalongo [4]. Os autores sugerem uma formulação matemática baseada na formulação de Bofang [5], que reproduz a variação da temperatura em função do tempo definido pelo usuário e da altura no ponto considerado do reservatório.A temperatura é submetida a uma variação do topo a base do reservatório, dependendo das temperaturas definidas nessas regiões. A temperatura da água $T_a$na altura y_ae no tempo t, é definida na seguinte expressão:

$$T_a(y_a,t)=T_{bas}(t).\left(\frac{1-e^{-\phi y_a}}{1-e^{-\phi H}}\right)+\frac{T_{top}(t).e^{-\phi y_a}}{1-e^{-\phi H}} \quad (6)$$

Onde $T_{bas}(t)$ é a temperatura na base do reservatório, em $y_a = H$, $T_{top}(t)$ é a temperatura no topo do reservatório, em $y_a= 0$, ϕ representa um parâmetro que depende da barragem analisada, no caso $\phi = 0{,}04$ [4].

Assim, a temperatura da barragem em contato com a água do reservatório é assumida igual a temperatura obtida na equação 6, considerando a altura para cada ponto. Os dados iniciais, temperatura da base e temperatura do topo do reservatório são obtidas pelo estudo desenvolvido por Agullo[1] para a barragem de Baserca, que possui aproximadamente as mesmas características climáticas da barragem de Llosa de Cavall.

O contorno da barragem que não se encontra em contato com a água é influenciado pela temperatura do ar no local e da radiação solar incidente. Define-seuma expressão senoidal para representar a temperatura ambienteno local [1]:

$$T = A\ \mathrm{sen}\left(2\pi.\frac{t-b_1}{2b_2}\right)+B$$

$$T = A\ \mathrm{sen}\left(2\pi.\frac{t+12-b_1-b_2}{2\,(24-b_2)}\right)+B$$

$$A=\frac{T_{max}-T_{min}}{2}$$

$$B=\frac{T_{max}+T_{min}}{2}$$

$$b_1=\frac{h_{max}+h_{min}}{2}$$

$$b_2=h_{max}-h_{min} \quad (7)$$

OndeT_{max} é a temperatura máxima alcançada,T_{min} é a temperatura mínima alcançada no dia,h_{max} é a hora do dia que a temperatura máxima é obtida eh_{min} é a hora do dia que a temperatura mínima é obtida. Os dados da temperatura máxima e mínima mensais são obtidos de Agullo [1].

Para considerar os efeitos devido à radiação solar no local, o modelo proposto utiliza uma maneira aproximada citada no estudo de Agullo [1]. O calor devido à radiação solar pode ser simplificadamente considerado como um incremento na temperatura ambiente, esse conceito foi utilizado nos artigos de Ardito [4] e Yu[6].Assim, com o objetivo de acrescentar as diferenças causadas pela exposição da radiação solar, nesse artigo, desenvolve-se uma interpolação linear dos valores iniciais dado no estudo de Stucky e Derron [7] citado em Agullo[1]. Os autores estabeleceram que para um

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

calor devido a radiação de 1100 kcal/m² por dia no inverno e de 3000 kcal/m² no verão, a temperatura ambiente apresenta um incremento de 2°C no inverno e 5°C no verão, se adotar um concreto com 60% de absortividade térmica. Esse incremento é obtido para cada respectivo valor de radiação solar mensal do local.Na formulação matemática, o incremento é somado à equação da temperatura ambiente considerando a diferença de cada mês.

A condição de contorno entre a barragem de concreto e sua respectiva fundação deve contemplar o efeito de condução que envolve o contato entre dois materiais. Esse fluxo é dependente da condutividade térmica de cada material.

3.3 Propriedades térmicas e físicas

Os valores das propriedades térmicas e físicas do concreto e da rocha de fundação utilizadas para o modelo da barragem de Llosa de Cavall podem ser verificados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores das propriedades utilizadas na análise térmica da barragem

Propriedades	Valores
Condutividade térmica do concreto (W/m°C)	2,5
Calor específico do concreto (J/ Kg °C)	1000
Densidade do concreto (Kg/m³)	2500
Condutividade térmica da rocha (W/m °C)	0,95
Calor específico da rocha (J/ Kg°C)	1600
Densidade da rocha (Kg/m³)	2600
Temperatura média anual (°C)	7,5
Coeficiente de transferência de calor (W/m² °C)	20,63

3.4 Resultados da análise térmica

A análise térmica é desenvolvida no programa ANSYS [3], através da definição do modelo, características dos materiais e tipo de análise desejada. Para representar o modelo foi utilizado o elemento tipo Plane77, que é adequado para modelos bidimensionais com contornos curvilíneos, possui um grau de liberdade, a temperatura em cada nó, sendo quadrático de 8 nós.A malha do método dos elementos finitos pode ser visualizada na figura 3. Esta consiste de 9292 nós e 3035 elementos, sendo 8567 nós e 2759 elementos apenas para a barragem de concreto. A malha fina localizada apenas na barragem de concreto deve-se a necessidade de diminuir o trabalho computacional para a resolução do problema e obter as temperaturas na estrutura de concreto.

Dois modelos foram desenvolvidos a fim de analisar a distribuição de temperaturas na estrutura. O modelo 1 é definido por apresentar o reservatório de água completamente cheio, preenchendo toda a altura da seção da barragem. Em contrapartida, o modelo 2 é representado pelo reservatório de água preenchido até a cota de 30 m da altura da seção da barragem (figuras 3b e 3c).

Na análise térmica transiente utiliza-se o *time step* de uma hora, a temperatura inicial no tempo zero para todos os nós foi considerada igual a temperatura média anual da região (7,5 °C). A condição inicial é apenas um valor inicial de temperatura do concreto e não irá interferir nos valores. No entanto, se iniciasse a análise a uma temperatura muito baixa ou muito alta, o sistema térmico levaria mais tempo para encontrar seu equilíbrio ou convergência.

O estudo desenvolvido por Sheibany e Ghaemian [8] considerou o conceito de convergência como sendo obtida quando a temperatura média do concreto em janeiro não varie mais do que 1% de ano para ano, para diferentes seções da barragem. Seguindo o estudo, para a definição da convergência e para o estudo de demais resultados, a barragem de concreto é dividida nas seções 1, 2, 3 e 4, com 30 m de altura para a primeira seção e altura de 29 m para as demais (figura 2b). Para os dois modelos desenvolvidos nesse artigo, a convergência é obtida após 5 anos de análise. A convergência é mostrada na figura 4 para o modelo 1 e figura 5 para o modelo 2. Assim, o último ano de análise é usado para representar o comportamento térmico anual da barragem.

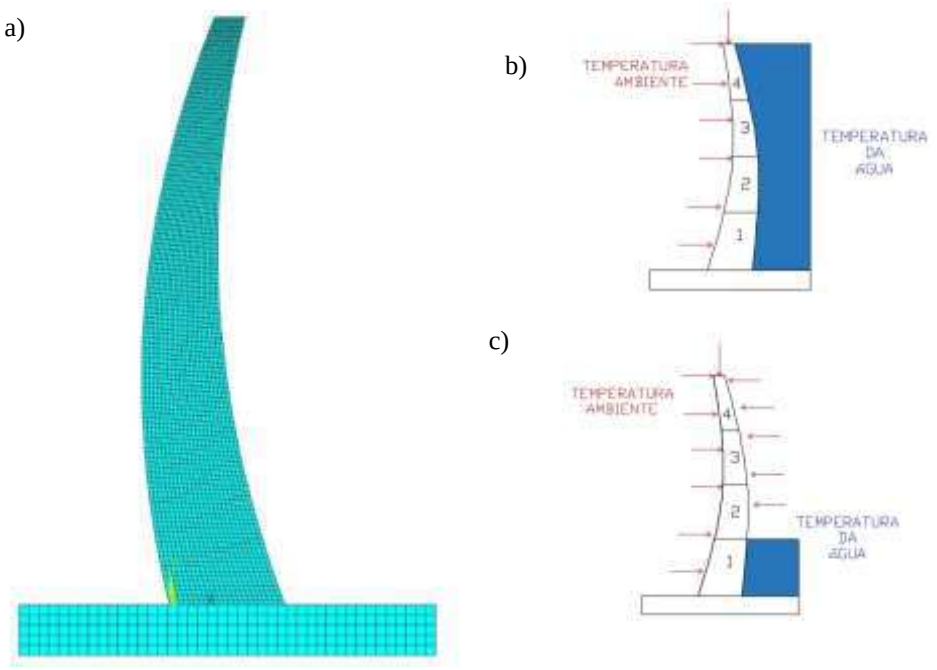


Figura 3: a) Malha do método dos elementos finitos para o modelo. b) Representação do modelo 1. c) Representação do modelo 2

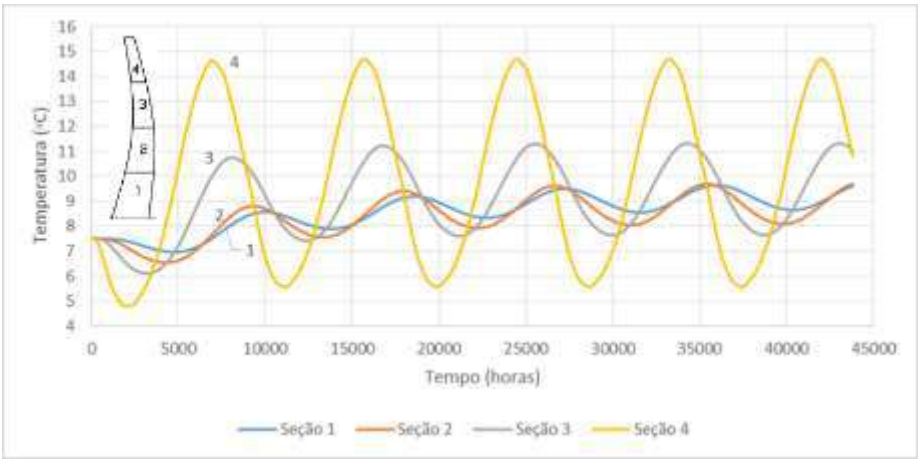


Figura 4: Convergência do método para o modelo 1

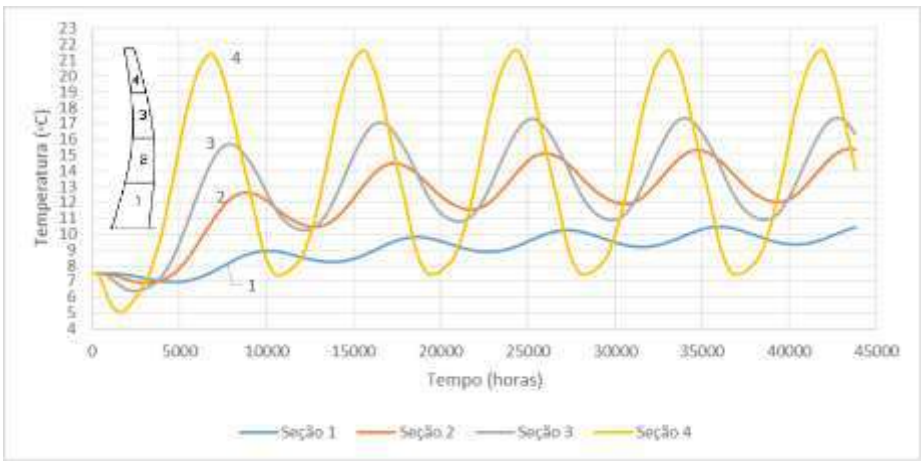
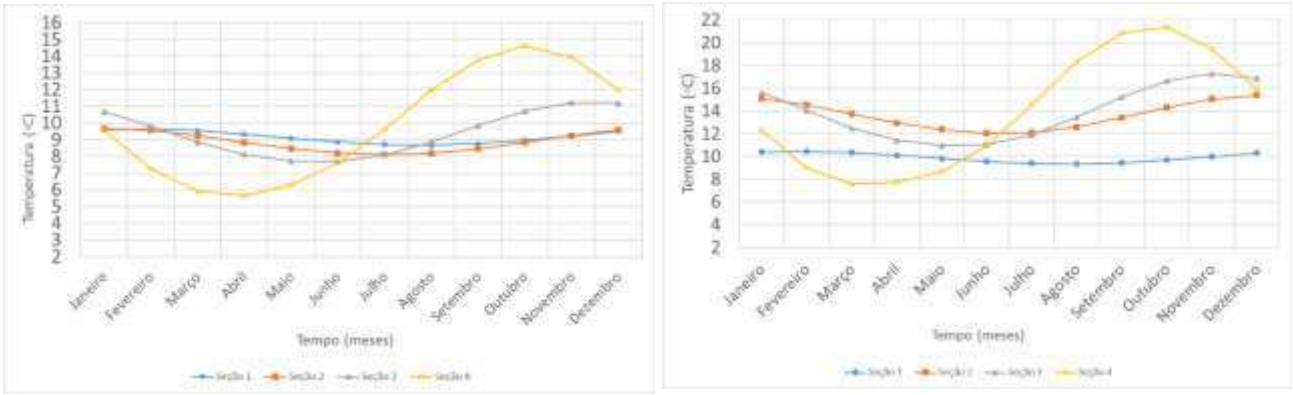


Figura 5: Convergência do método para o modelo 2

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

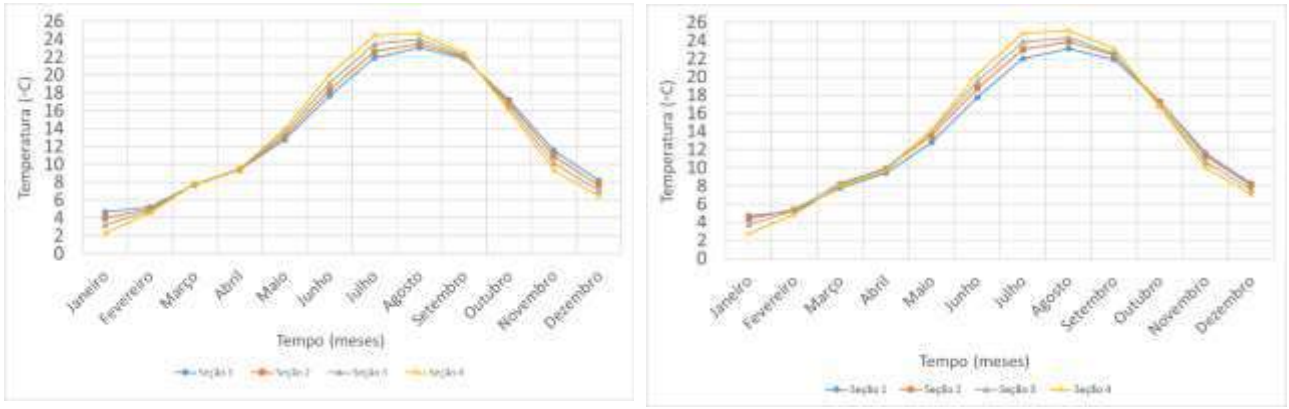
A variação da temperatura para nós internos da barragem pode ser verificada na figura 6para pontos no meio de cada seção para o modelo 1 e modelo 2. A figura 7 e a figura 8 representam a variação da temperatura na barragem para nós à jusante e nós à montante da barragem para pontos medianos de cada seção, respectivamente. Os resultados evidenciam que as máximas temperaturas obtidas ocorrem à jusante da barragem. Isto ocorre devido à alta transferência de calor dada pela temperatura ambiente, juntamente com a inclusão da radiação solar.O mês que ocorre a temperatura máxima ambiente coincide com o mês da temperatura máxima à jusante da barragem. Sendo assim, as máximas temperaturas que serão obtidas na barragem de concreto dependem da temperatura ambiente do local. Essa observação retrata as temperaturas mais baixas do lado oposto da barragem, à montante, que se encontra em contato com a temperatura do reservatório.

Um tempo de 52 dias é observado entre o dia que ocorre a máxima temperatura no interior da barragem de concreto e o dia em que ocorre a máxima temperatura ambiente, evidenciando a baixa dissipação do calor na massa de concreto.



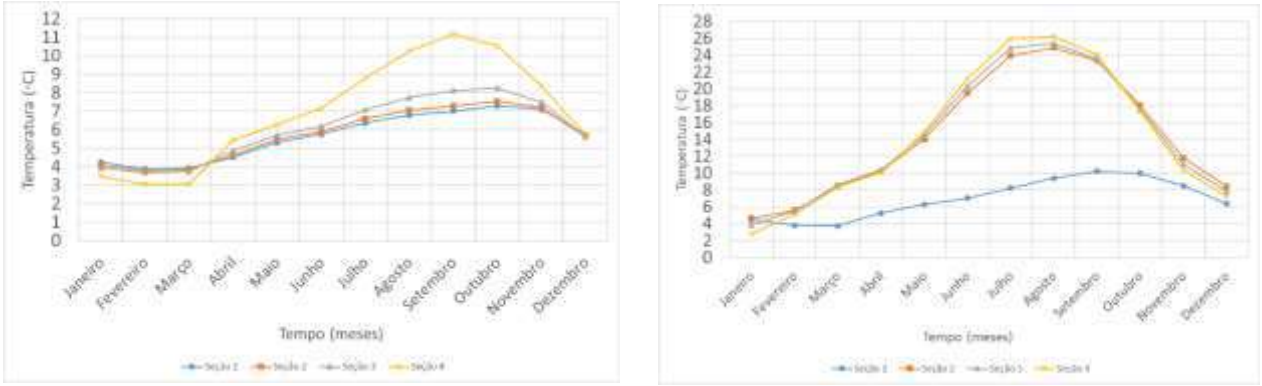
a) b)

Figura 6: Variação da temperatura com o tempo para nós internos. (a) Modelo 1. (b) Modelo 2.



a) b)

Figura 7: Variação da temperatura com o tempo para nós à jusante da barragem. (a) Modelo 1. (b) Modelo 2.

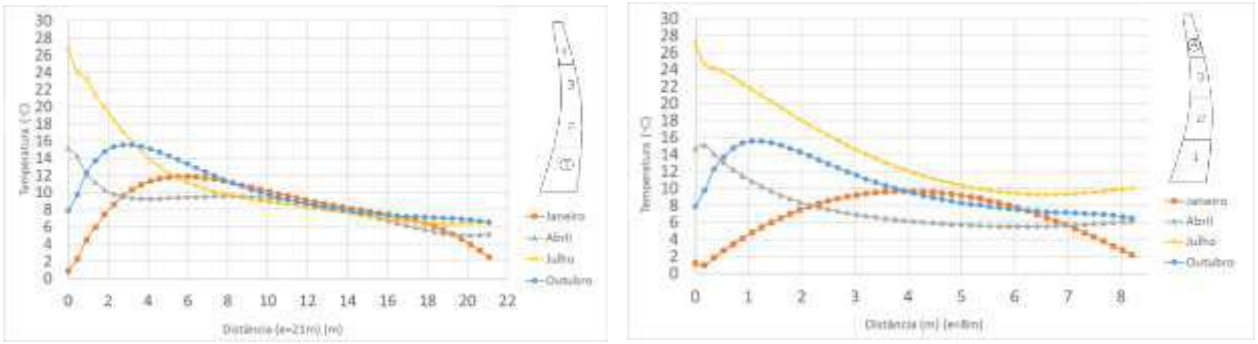


a) b)

Figura 8: Variação da temperatura com o tempo para nós à montante da barragem. (a) Modelo 1. (b) Modelo 2.

Verifica-se a similaridade entre a variação de temperatura para o modelo 1 e modelo 2. No entanto, o comportamento térmico à montante é diferenciado (figura 8), já que a seção 1 no modelo 2 é a única em contato com a temperatura da água do reservatório. As outras seções desse modelo apresentam o comportamento idêntico das áreas à jusante. Na proximidade da ação térmica da temperatura da água, o comportamento térmico do concreto é consideravelmente influenciado pela condição imposta para tal parâmetro. Para os meses mais quentes, verificam-se as baixas temperaturas no contato água com o concreto na seção 1, se comparada às outras seções.A diferença de temperatura entre seções ressalta a importância da espessura de cada seção. A seção 4, localizada no topo da barragem, com menor espessura, apresenta as maiores e menores temperaturas em todas as situações verificadas, à jusante, montante ou nos nós internos tanto para o modelo 1 quanto para o modelo 2.

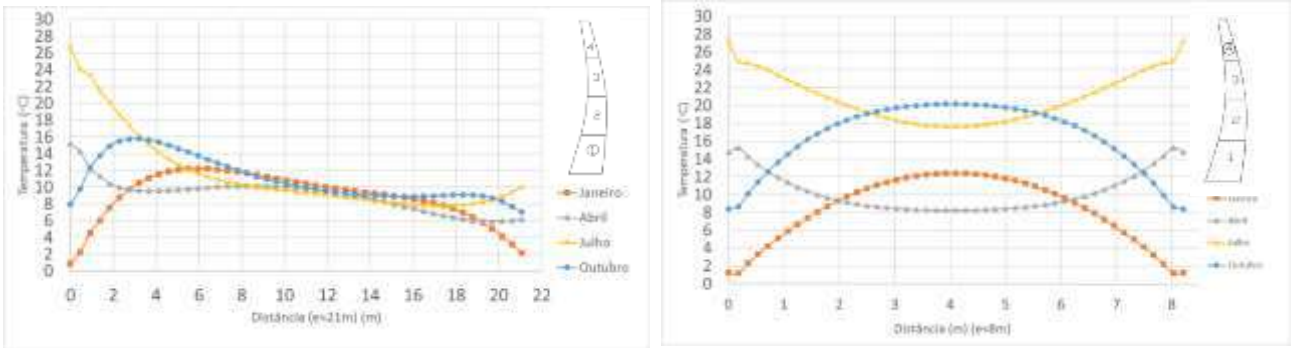
A figura 9representa a distribuição de temperaturas ao longo da espessura na altura média de cada seção, aproximadamente 21m e 8m para a seção 1 e a seção 4, respectivamente. Confirma-se que as maiores temperaturas são encontradas no contorno da barragem onde atua a temperatura ambiente. Para o mês de verão, julho, a distribuição de temperaturas é máxima no contorno da barragem e, gradativamente, ocorre uma diminuição desse valor ao longo da seção. Em contrapartida, no mês de inverno, janeiro, as máximas temperaturas ocorrem no interior da barragem, enquanto as mínimas são obtidas no contorno.



a) b)

Figura 9: Variação da temperatura em função do mês do ano para uma determinada espessura para o modelo 1. (a) Resultados para a seção 1 com espessura de aproximadamente 21m. (b) Resultados para a seção 2 com espessura de aproximadamente 8 m.

Para o modelo 2, o comportamento anual do efeito térmico apresenta uma conduta similar ao modelo 1 para a seção 1 (figura 10). A seção 4 expressa um desempenho térmico diferenciado. A temperatura ambiente que governa o comportamento térmico nos extremos das seções causa a mesma temperatura para ambos os lados da barragem, gerando um comportamento aproximadamente hiperbólico para todos os meses para a seção 4. Para os meses mais quentes, as temperaturas máximas ocorrem nos extremos e temperaturas mínimas no meio das seções e, para os meses mais frios, o inverso é verificado.

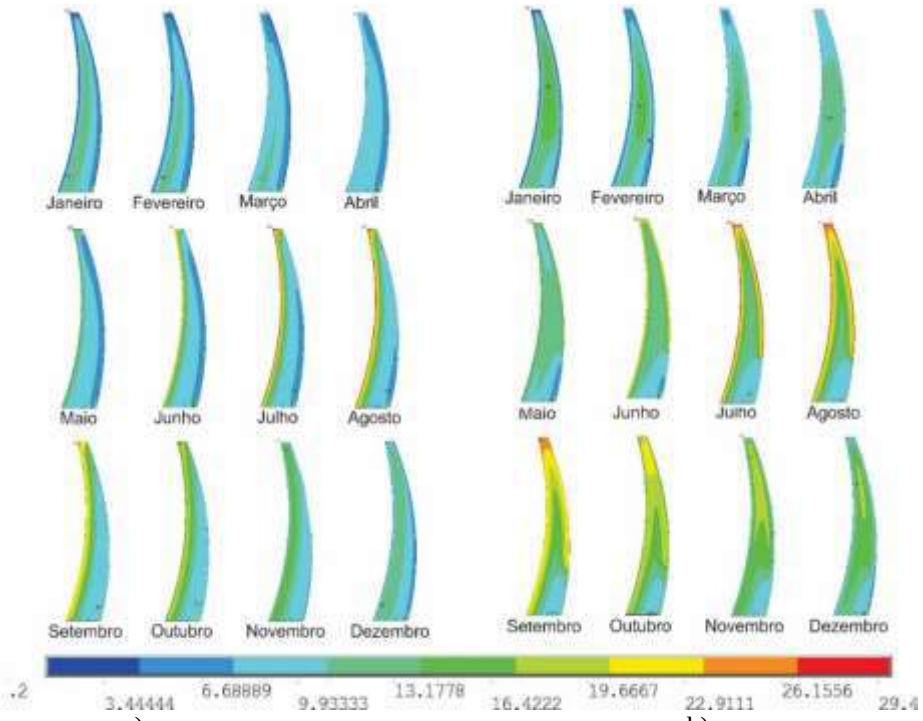


a) b)

Figura 10: Variação da temperatura em função do mês do ano para uma determinada espessura para o modelo 2. (a) Resultados para a seção 1 com espessura de aproximadamente 21m. (b) Resultados para a seção 2 com espessura de aproximadamente 8 m.

Essas distribuições comprovam que a temperatura da água no reservatório não acompanha o aumento da temperatura ambiente, gerando essa diferença de temperatura entre extremos da barragem.

A figura 11 evidencia a distribuição de temperatura ao longo de toda a seção transversal da barragem e seu comportamento durante o ano. As máximas temperaturas claramente obtidas no contorno do concreto em contato com o ar, se limitando a essas regiões.A partir disso, verifica-se que a temperatura da água é mais eficaz na distribuição de temperatura ao longo da seção da barragem de concreto.



a) b)

Figura 11: Variação da temperatura em função do mês do ano para a seção transversal da barragem (a) Resultados para o modelo 1. (b) Resultados para o modelo 2.

4. ANÁLISE TENSIONAL SIMPLIFICADA

4.1 Método aproximado

A análise tensional desenvolvida neste artigo é baseada no método apresentado no documento UPC [9], que apresenta dados da construção da barragem de Llosa de Cavall. Esse método encontra os valores de tensão associadas a uma dada distribuição de temperatura, não considerando a influência de cargas mecânicas. Sendo assim, para obter as respostas tensionais associadas a uma distribuição de temperatura, é preciso obter os planos equivalentes de temperatura para cada caso. Isso permitirá obter um plano de tensões auto equilibradas induzidas pela linearidade do campo térmico.

Esse método foi apresentado para o cálculo das tensões térmicas para um bloco de determinada altura, considerado na construção da barragem. Neste artigo, o método em questão é modificado para distribuição de temperaturas através de uma determinada espessura da barragem. Inicialmente, para o uso do método é necessário obter o valor de temperatura média uniforme para uma determinada distribuição de temperatura. O valor da temperatura médiaT_mé dada pela integral apresentada a seguir:

$$T_m = \frac{1}{e} \cdot \int^{e} T(x).\, dx \qquad (8)$$

Onde T(x)é a distribuição de temperatura para uma dada espessura e.

Os resultados obtidos na análise térmica, que foi desenvolvida nesse artigo no ANSYS, são os dados de entrada para o cálculo da temperatura média para cada distribuição de temperatura. De maneira similar, o gradiente térmico linear

equivalente de temperaturas∇T, devido a uma determinada distribuição de temperatura em cada espessura, pode ser calculado na expressão:

$$\nabla T = \frac{e}{I_x} \cdot \int^{e} T(x).x.dx \quad (9)$$

A partir do gradiente de temperatura e da temperatura média, é possível obter o plano linear equivalente de temperaturas definido para uma específica distribuição térmica. Por fim a tensão originada em cada ponto pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$\sigma = \alpha_L . E_L . (T_{nl} - T_l) \quad (10)$$

Onde σ é tensão (MPa), α_L é o coeficiente de expansão térmica do concreto ($9{,}5 \times 10^{-6}$°C), E_L é o módulo de elasticidade linear do concreto (MPa), T_{nl} é a temperatura obtida no plano equivalente (°C) e T_lé a temperatura do concreto (°C).

Os valores das propriedades mecânicas utilizadas para o cálculo das tensões térmicas são apresentados na tabela2. A resistência de compressão do concreto foi calculada seguindo a formulação obtida por Calmon [2] para a barragem de Llosa de Cavall. Através de ensaios de resistência, o autor definiu formulações para o cálculo da resistência à compressão do concreto da barragem para a época de verão e inverno. Neste artigo, o menor valor de resistência à compressão de concreto será utilizado para eventuais cálculos. Ainda segundo o autor, a resistência de tração do concreto é calculada a partir da resistência à compressão, através da expressão seguinte:

$$f_t = 0{,}11 . f_c^{0{,}97} \quad (11)$$

Onde f_t é a resistência de tração do concreto (MPa) e f_c é a resistência de compressão do concreto (MPa).

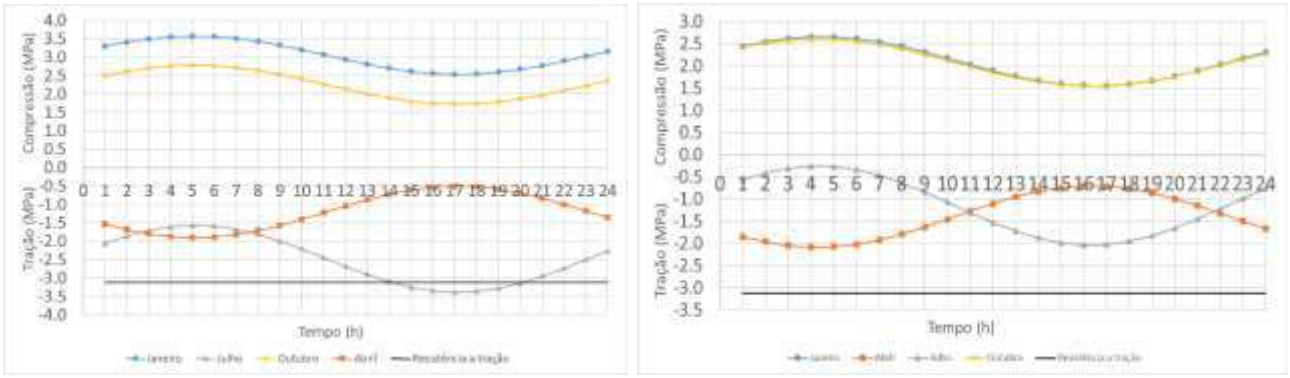
Tabela 2 – Valores das propriedades mecânicas do concreto para a barragem de Llosa de Cavall

Propriedade	Valor
Módulo de Elasticidade	32852 MPa
Resistência a compressão	34,4 MPa
Resistência a tração	3,2 MPa

4.2 Resultados

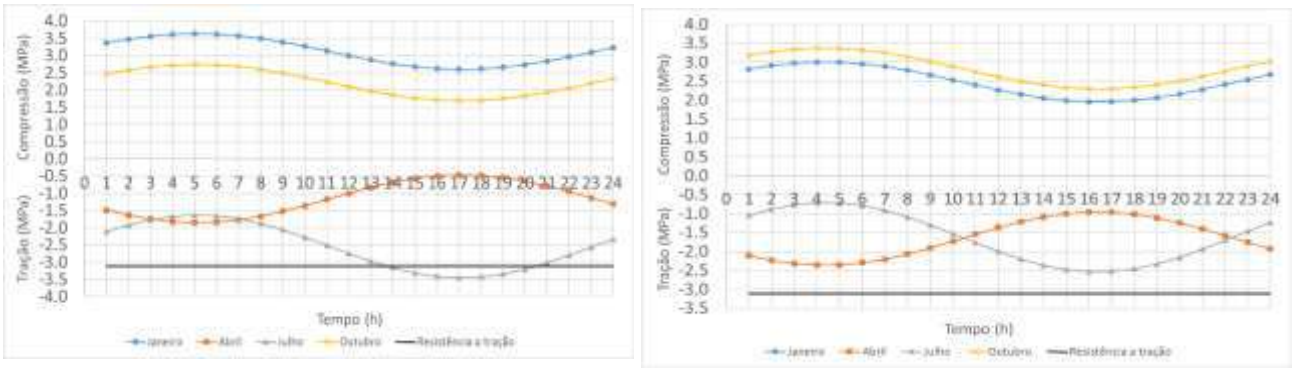
Os resultados obtidos na seção anterior são dados de entrada para obter as tensões na barragem, causadas devido apenas às ações térmicas.

A figura 12representaas tensões térmicas geradas para nós localizados à jusante da barragem no meio de cada seção, para a seção 1 e 4 no período de um dia. Os meses que representam cada estação do ano podem ser verificados, assim como o valor da resistência de tração do concreto. Os resultados são representados para os dias medianos de cada mês. As maiores tensões de tração ocorrem no mês de julho, que ultrapassam a resistência de tração do concreto. Assim, é possível determinar as regiões que possivelmente podem sofrer a formação de fissuras na estrutura de concreto. Dessa forma, a seção 1 é a área mais crítica. Seguindo o mesmo critério do modelo 1, a figura 13representa as tensões térmicas para o modelo 2.



a) b)

Figura 12: Variação diária da tensão à jusante da barragem para o modelo 1. (a) Seção 1. (b) Seção 4



a) b)

Figura 13: Variação diária da tensão à jusante da barragem para o modelo 2. (a) Seção 1. (b) Seção 4.

Através dos modelos, conclui-se que o mês de julho é o mês crítico para as tensões de tração, apresentando, aproximadamente, 5% a menos na máxima temperatura ambiente do o mês de agosto, porém, possui 21% a mais de calor de radiação solar. Assim, é possível que o efeito da radiação solar, dado pelo incremento na temperatura ambiente, seja um fator considerável para a ocorrência de fissuras à jusante da barragem. Para a seção 4, as tensões de tração foram menores para o modelo 1. Visualizando os dados da análise térmica, as distribuições de temperatura ao longo da espessura, que resultam em diferenças de temperatura entre os extremos da barragem, influenciam no alto valor encontrado de tração para a seção 1.

Na tabela 3 encontram-se os valores máximos e mínimos das tensões, o sinal negativo representa as tensões de tração. Para o mês de julho, verão, as tensões de tração na seção 1, para ambos os modelos, superam a resistência de tração do concreto. Portanto, há possibilidade de fissuras na região.

Tabela 3 – Resumo das tensões máximas e mínimas para os modelos desenvolvidos

MODELO 1	**Inverno - Compressão**		**Verão - Tração**	
Tensões (Mpa)	**Seção 1 (e = 21m)**	**Seção 4 (e = 8 m)**	**Seção 1 (e = 21m)**	**Seção 4 (e = 8 m)**
σmax	3,57	2,65	-1,57	-2,56
σmin	2,53	1,56	-3,38	-2,03

MODELO 2	**Inverno - Compressão**		**Verão - Tração**	
Tensões (Mpa)	**Seção 1 (e = 21m)**	**Seção 4 (e = 8 m)**	**Seção 1 (e = 21m)**	**Seção 4 (e = 8 m)**
σmax	3,63	3,00	-1,63	-0,72
σmin	1,67	1,95	-3,44	-2,53

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta um modelo para se obter as temperaturas resultantes em uma barragem de concreto submetidas às ações térmicas ambientais. Os resultados da análise térmica fornecem os dados de entrada para o cálculo das tensões térmicas, a partir disso, torna-se possível prever a formação de fissuras na estrutura de concreto. Baseado nesse estudo verifica-se que a superfície da barragem em contato com o ar apresentamaiores temperaturas para os dois modelos desenvolvidos. No entanto, a temperatura da água é mais eficiente na distribuição da temperatura ao longo da seção da barragem. Nos contornos da barragem de concreto, seu efeito térmico depende majoritariamente da condição imposta na superfície. A baixa dissipação de calor no concreto é evidenciada ao verificar a temperatura máxima no interior do concreto.

A distribuição da temperatura em relação a uma espessura da barragem é função da estação do ano, apresentando comportamentos diferentes para determinado mês. Para meses mais quentes, a distribuição apresenta uma gradativa diminuição de temperatura entre os contornos da barragem. A existência do reservatório de água causa a variação de temperatura encontrada nos extremos, já que a temperatura da água não acompanha o aumento da temperatura ambiente. O comportamento térmico na espessura aproximadamente hiperbólico é verificado para os meses mais frios ou para o caso da mesma temperatura ambiente nos contornos.

A região propicia ao aparecimento de fissuras é a região à jusante da barragem, no qual a resistência à tração do concreto é superada pelas tensões de tração. A seção 1 da barragem definida neste artigo é susceptível a sofrer danos estruturais por fissuração, que podem a vir a comprometer a durabilidade da estrutura.O conhecimento do comportamento térmico do concreto para as diferentes estações do ano é essencial para compreender as tensões térmicas geradas no concreto. Para diferentes meses do ano, as tensões encontradas apresentam valores distintos, devido principalmente ao seu comportamento térmico na espessura.Esse comportamento influencia o resultado dos meses de verão para a barragem de Llosa de Cavall, que contribuem para os maiores valores de tração. Por consequência dos altos valores de radiação solar, que influenciam o aumento da temperatura ambiente, o mês de julho é o mês mais crítico. A variação do nível do reservatório causa mudanças nas tensões, verificada pela diferença de comportamento do modelo 1 e modelo 2. No entanto, a máxima tensão não apresentou uma diferença significativa entre os modelos.

A implementação computacional no ANSYS proposta neste artigo e o método simplificado do cálculo das tensões pode ser empregado satisfatoriamente em outras localidades e barragens, a fim de projetar e verificar o desempenho da estrutura maciça. A análise térmica e tensional das ações térmicas ambientais é imprescindível paraprever e investigar as possíveis causas de fissuras no concreto das estruturas maciças submetidas à ação ambiental.

6. AGRADECIMENTOS

Expressamos nossos agradecimentos à FAPES – Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo pelo fomento da bolsa de pesquisador capixaba.

7. REFERÊNCIAS

[1] Agullo, L. *Estudiotermicoen presas de hormigon frente a laaccionтermica ambiental*. Tese de Doutorado. Universidade Politécnica de Catalunya (UPC), Barcelona, 1991.
[2] Calmon, J. L. *Estudiotermico y tensional enestructurasmasivas de hormigon*: *Aplicacion a las presas durante la etapa de contrucción*. 1995. Tese de Doutorado. Universidade Politécnica de Catalunya (UPC), Barcelona, 1995.
[3] ANSYS, *Finiteelementprogramuser´smanuals*, Versão 14.0, ANSYS, Inc., Crononsburg, Estados Unidos, 2011.
[4] Ardito, R. *et al*. "Diagnostic analysis of concrete dams based on seasonal hydrostatic loading", *Engineering Structures*, v. 30, 2008, pp. 3176-3185.
[5] Bofang Z;Zhanmei L. "Thermal Stress".LaginhaSerafim J. Clough RW, *Arch Dams*. Roterdã, 1990, pp. 25-217.
[6] Yu, H. et al. "Study on temperature distribution due to freezing and thawing at the Fengman concrete gravity dam".*Thermal Science*, v. 15, 2011, pp. S27-S32.
[7] Stucky, A.; Derron, M. "Problemesthermiques poses par la construction des barrages-réservoires". EscolaPolitécnica da Universidade de Lausanne, v. 38.
[8] Sheibany, F.; Ghaemian, M. "Effects of environmental on thermal stress analysis of Karaj concrete arch dam".*Journal of Engineering Mechanics*, v. 132, 2006, pp. 532-544.
[9]UPC: UniversitatPolitécnica de Catalunya. Informe Seguimento: Actividades realizadas desde 19-II-92 a 31-III-92. Construção da presa Llosa de Cavall.Barcelona, 1992.