



## ANÁLISE TERMOMECÂNICA EM BARRAGEM DE GRAVIDADE CONSTRUIDA EM CAMADAS

**Nailde de Amorim Coelho**

nailde.coelho@univasf.edu.br

Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF

**Lineu José Pedroso**

lineu@unb.br

Universidade de Brasília - UnB

Universidade Federal do Vale do São Francisco – Campus de Juazeiro-BA - Colegiado de Engenharia Civil - Avenida Antonio Carlos Magalhães, nº. 510 Country Club CEP: 48.902-300 - Juazeiro/BA, Brasil.

**Resumo.** *As estruturas de concreto massa requerem cuidado especial devido à geração de calor interno no processo de hidratação dos materiais cimentícios, o chamado calor de hidratação. Após o aquecimento há o resfriamento do material, que normalmente acontece de forma lenta, e, conseqüentemente, surgem as tensões térmicas. Quando as solicitações mecânicas são maiores que a capacidade resistiva do concreto, ocorrem fissurações indesejáveis comprometendo a integridade da estrutura. Existem alguns artifícios para a redução das temperaturas internas no concreto, entre elas, a adoção de cimento de baixa geração de calor de hidratação, utilização de agregados grandes e resfriados, bem como, água gelada ou gelo, a construção em camadas, entre outros. Outra consideração importante a ser observada é a relação entre o comprimento e a altura da construção, quanto maior essa razão, maior as tensões obtidas. Como forma de prevenção de problemas, as simulações numéricas mostram-se como ferramentas poderosas, pois permitem a visualização das temperaturas no decorrer do tempo dos projetos, uma alternativa é a utilização do Método dos Elementos Finitos – MEF com a utilização de um programa, como é o caso do Ansys. Com a evolução térmica, pode-se estimar as tensões termomecânicas analiticamente com a utilização de curvas de fluência, por um dos métodos existentes, como o método do United States Department of the Interior Bureau of Reclamation - USBR. Dessa forma, uma avaliação crítica pode ser realizada na fase de concepção, evitando que possíveis danos possam ocorrer. A utilização do MEF para obtenção das temperaturas com a solução analítica para encontrar as tensões a partir das variações térmicas, mostraram-se eficientes na aquisição dos resultados, permitindo uma ampla visualização dos fenômenos envolvidos numa etapa anterior à construção.*

**Palavras-chave:** *Tensões termomecânicas, Temperatura, Concreto Massa, Barragem de Gravidade.*

---

CILAMCE 2017

Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering  
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil,  
November 5-8, 2017.

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto massa requerem uma atenção especial por parte dos pesquisadores e construtores devido a característica de produzir calor internamente, o qual é chamado de calor de hidratação. Este pode colaborar para que o concreto atinja temperaturas bastante elevadas, estando a superfície exposta a uma temperatura mais baixa, igual ou aproximadamente igual a ambiente, surge então um gradiente térmico, que dependendo das proporções tenciona o concreto levando ao aparecimento de fissuras.

O concreto massa é definido como um amplo volume de concreto que apresenta dimensões grandes o suficiente para que algumas medidas sejam tomadas para reduzir a temperatura interna dessa estrutura, ou melhor, para reduzir o gradiente térmico entre as partes interna e externa do concreto (American Concrete Institute – ACI, 2005).

As duas principais causas de mudança de volume no concreto massa são a geração e dissipação de calor do cimento e ciclos periódicos da temperatura ambiente. Consequentemente, as medidas para a redução da variação do volume em concreto massa inclui a redução de calor gerado na hidratação do cimento e a redução da temperatura de lançamento do concreto. A tensão de tração pode ser reduzida se a temperatura inicial do concreto ficar abaixo da temperatura de estabilização do concreto, no entanto, isto é possível em locais de clima quente (ACI, 2005).

O aumento da temperatura modifica o módulo de elasticidade inicial de concreto. A taxa de fluência também aumenta com a temperatura mais elevada e a tensão de fluência é ampliada. Portanto, essas propriedades sofrem variações locais diferenciadas dentro das estruturas de concreto massa em uma função da temperatura e que, por sua vez, é uma função do tempo (Wu e Luna, 2001).

O concreto, quando submetido a solicitações de longa duração, sofre uma deformação imediata, seguida de uma deformação lenta, devido ao efeito de fluência, que se desenvolve ao longo do tempo. Deste modo, mesmo sob tensões constantes, as deformações ocorridas no concreto aumentam no decorrer do tempo (Aurich, 2008).

Existem algumas técnicas de redução da geração de calor do concreto massa, assim como existem técnicas de pós-resfriamento e de construção que visam minimizar os efeitos térmicos nas estruturas. Entre eles, o método de construção em camadas, o método rampado, o processo de pré-resfriamento, pela redução da temperatura de lançamento do concreto e pós-resfriamento através da implementação de tubos no concreto massa por onde circula um fluido com uma temperatura inferior.

Uma das construções que utilizam o concreto massa são as barragens de gravidade, os tipos mais comuns de barragens e que requerem a menor manutenção, se adaptam em qualquer localidade, mas tem limitações de altura com relação à base e à fundação (Creager *et al* 1964). Pedroso (2002), afirma que as barragens é uma das formas mais tradicionais de armazenar água, em que barreiras são construídas em rios que apresentem potencial hidráulico, ou seja, vazão adequada que permita a acumulação de água.

Ao construir estruturas usando concreto massa, tensões térmicas produzidas devido ao calor de hidratação do cimento podem representar um problema grave para a integridade das estruturas. Portanto, a estimativa das tensões térmicas e das fissurações térmicas nessas

estruturas torna-se inevitável (Kim *et al* 2002). Uma forma de fazer isso é com o uso do Método do Elementos Finitos – MEF.

Segundo Moaveni (1999), o MEF utiliza a formulação integral criando sistemas de equações algébricas e proporcionando uma solução aproximada em cada elemento. A solução completa é dada com o somatório dos resultados individuais para cada elemento.

Dessa forma, este trabalho apresenta uma investigação termomecânica em uma estrutura de barragem, observando as tendências à fissuração a partir das características empregadas. Outras abordagens da mesma temática podem ser observados em Almeida *et al* (2017), Coelho (2012, 2016), Coelho *et al* (2014, 2016).

## 2 PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS

As propriedades do concreto são de fundamental importância nas análises termomecânicas do concreto. As propriedades térmicas são de interesse por diversas razões, entre elas: a condutividade e a difusividade térmica são relevantes para o desenvolvimento de gradientes de temperatura, deformações térmicas, empenamento e fissuração nas idades iniciais do concreto, como para o isolamento térmico do concreto em serviço; a dilatação térmica é necessária para o dimensionamento de juntas de dilatação e contração (COELHO, 2016). A variação na unidade de comprimento por variação na unidade de temperatura é influenciada pelo coeficiente de dilatação térmica massa (Mehta e Monteiro, 2016).

Além dessas propriedades, o cimento Portland, na reação de hidratação, é responsável por uma liberação de calor, que muda de acordo com a idade do concreto, medido em calorías por grama. A quantidade de calor desenvolvida depende dos diferentes componentes do cimento e de outros fatores: a finura do cimento, a relação água/cimento, a temperatura inicial (Silveira, 1961).

As propriedades mecânicas do concreto devem ser analisadas a fim de examinar o seu comportamento, e poder ser verificado até que ponto ele pode resistir as solicitações empregadas. O concreto apresenta boa resistência à compressão e baixa resistência à tração, esta possui valor numérico em torno de 10% da resistência à compressão do concreto. O coeficiente de Poisson é um parâmetro utilizado para caracterizar a deformação do concreto.

O módulo de elasticidade é uma medida da resistência à deformação elástica do material, seu conhecimento é fundamental na análise das deformações elásticas ou viscoelásticas das estruturas de concreto, uma vez que o seu valor muda com a variação da temperatura.

São também essenciais os conceitos de maturidade e idade equivalente. Um concreto com a mesma composição na mesma maturidade tem aproximadamente a mesma resistência em qualquer combinação de temperatura e idade (Bagheri-Zadeh *et al* 2007).

O fenômeno do aumento gradual da deformação ao longo do tempo sob um dado tipo de tensão constante é chamado de fluência. Esta é uma ação permanente indireta que cresce ao longo do tempo, devido a um certo nível de tensão, tendendo a um valor limite final constante. Evidentemente, quanto maior a tensão, maior a deformação para um certo tempo (Teixeira *et al* 2006).

Emborg (1998a) mostra através de gráficos, Fig. 1, o comportamento elástico e viscoelástico, fluência, para o concreto em diferentes idades. Observa-se que no

comportamento elástico (Fig. 1a) as tensões são iguais em todas as idades, enquanto na fluência (Fig. 1b), quanto maior a idade, menor a deformação, confirmando os princípios enunciados. No entanto, o autor ressalta que, quando se trata de idades mais recentes do concreto, menor que cinco dias, ou de um a dois dias, os dados de deformação no tempo tornam-se escassos.

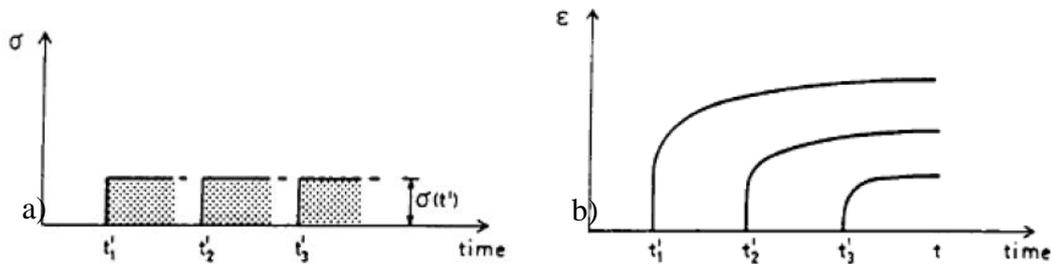


Figura 1 - a) Comportamento elástico e b) viscoelástico (Emborg, 1998a).

As tensões térmicas são influenciadas pelas restrições externas e internas que apresentam. As restrições externas são levadas em consideração nos cálculos através de um coeficiente que relaciona a posição do ponto de análise com relação à largura e a altura da estrutura.

A Fig. 2 mostra uma adaptação aos ábacos presente no *United States Department of the Interior Bureau of Reclamation - USBR* (1981) para determinação do coeficiente de restrição. No eixo das abscissas obtêm-se os coeficientes de restrição,  $k_r$ , em função da altura do ponto analisado com relação a altura total do corpo, representado pelo eixo das ordenadas, para as diferentes relações entre o comprimento do corpo e sua altura, curvas de  $L/H$ . O ponto de cruzamento entre essas curvas, determina o coeficiente de restrição nas abscissas.

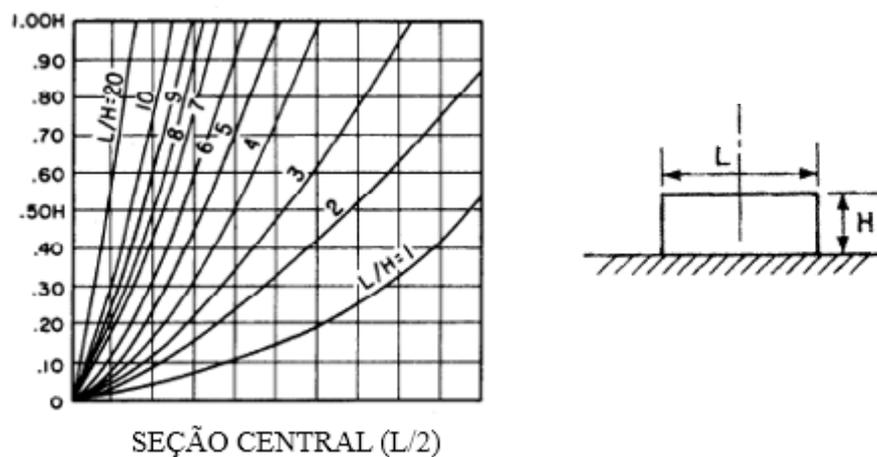


Figura 2 – Coeficiente de restrição segundo o USBR (1981).

Neville (2016) afirma ainda que, em concreto massa, a fluência pode ser a causa de fissuração quando uma massa de concreto restringida sofre um ciclo de variação de temperatura devido à liberação de calor de hidratação e ao subsequente resfriamento. É induzida, então, uma tensão de compressão em função da rápida elevação da temperatura no interior do concreto, essa tensão é baixa em função do baixo módulo de elasticidade. A resistência desse concreto novo também é muito baixa, de forma que sua fluência é elevada. Isso causa um alívio de

tensões de compressão, que vai desaparecendo à medida que o concreto resfria. Com a continuidade do resfriamento, são desenvolvidas tensões de tração, e, devido à velocidade de fluência ser reduzida com a idade, pode ocorrer fissuração mesmo antes da temperatura ter diminuído até o valor inicial no lançamento, Fig. 3. Por essa razão, a elevação da temperatura em concreto massa deve ser controlada.

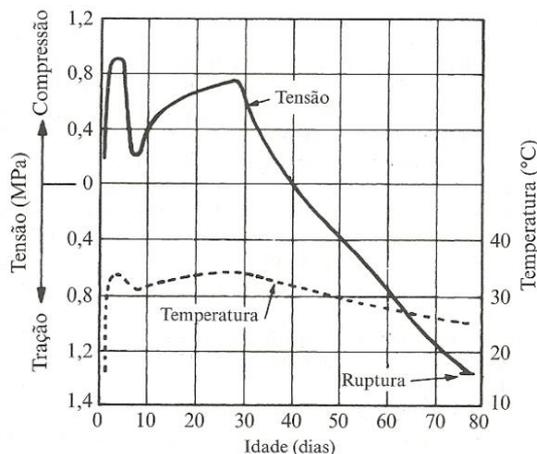


Figura 3 – Curva de tensão de um concreto (Neville, 2016).

De forma geral, Emborg (1998b) traz como a lei da viscoelasticidade, a deformação total, como a integral da Eq. 1:

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t, \tau) d\sigma(\tau) + \varepsilon^0(t) \quad (1)$$

Sendo:

$J(t, \tau)$  = É a função de fluência no tempo  $t$  para a idade de carregamento  $z$ .

$d\sigma(\tau)$  = Incremento de tensão na idade  $z$ .

$\varepsilon^0(t)$  = É a tensão independente do tempo, retração.

### 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 3.1 Equação do Calor

A dedução apresentada a seguir é baseada em Azenha (2009), Rao (1999), Çengel e Ghajar (2012).

A equação de equilíbrio de energias em coordenadas cartesianas pode ser mostrada com relação a um volume infinitesimal elementar de matéria como representado na Fig. 4, em que  $qx$ ,  $qy$ ,  $qz$  representam o calor que entra e  $qx+dx$ ,  $qy+dy$ ,  $qz+dz$  o calor que sai nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ ;  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ , as variações dimensionais em  $x$ ,  $y$  e  $z$ ;  $E_g$  e  $E_{st}$  a energia gerada e que sai do corpo.

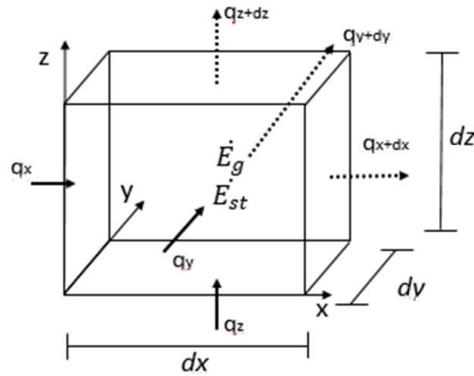


Figura 4 – Volume infinitesimal elementar de matéria.

Na presença de gradientes de temperatura haverá condução de calor através das faces da partícula infinitesimal, em direções perpendiculares às correspondentes superfícies. Nas três das faces da partícula os fluxos de calor podem ser identificados por  $q_x$ ,  $q_y$  e  $q_z$ . Nas faces opostas, os fluxos de calor podem ser representados em expansão de série de Taylor, ignorando termos de ordem superior, como mostra a Eq. 2:

$$q_{x+\partial x} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad q_{y+\partial y} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad q_{z+\partial z} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (2)$$

A Equação do balanço energético com base na Figura 4.1 pode ser dado conforme o esquema da Figura 4.3.

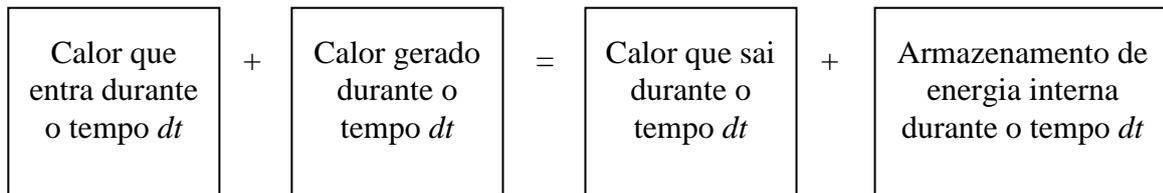


Figura 5 – Volume infinitesimal elementar de matéria.

Para os casos em que a condutividade térmica é constante,  $k$ , durante o período de análise, do equilíbrio das equações no volume infinitesimal deduz-se as Eq. 3 e 4:

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Ou:

$$k \nabla^2 T + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

(Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.)

Sendo  $\rho$  a massa específica e  $c$  a condutividade térmica do material.

### 3.2 Calor de Hidratação

Sendo a equação do calor mostrada na Eq. 5, no ensaio adiabático, o termo  $k \nabla^2 T$  é igual a zero, ou seja, não existe variação de temperatura nas direções  $x$ ,  $y$ ,  $z$  do espaço, caso em que

todo o calor gerado internamente é armazenado pelo próprio material. Uma vez que a taxa de geração interna de calor cessa após certo tempo, a temperatura aumenta continuamente enquanto existe geração de calor, até se estabilizar em um patamar constante. Dessa forma, tem-se que:

$$\dot{q} = \rho c (\Delta \dot{T}^{ad}) \quad (5)$$

Em que:

$\rho, c$  – são a massa específica e o calor específico, respectivamente, são em geral consideradas constantes do material e independentes da temperatura.

$T$  e  $\dot{T}$  – temperatura no ponto e taxa de variação da temperatura, respectivamente.

$\dot{q}$  – taxa de variação interna de calor no ponto.

Faria (2004) identificou uma função capaz de ajustar dados experimentais capaz de descaracterizar as curvas de elevação adiabática da temperatura através de três parâmetros, a qual pode ser vista na Eq.6, chamada de função Hill.

$$T^{ad}(t) = T_{max} \frac{t^n}{a^n + t^n} \quad (6)$$

Em que:

$T_{máx}$  – máxima temperatura atingida durante o ensaio, em °C;

$a$  – representa o atraso devido ao calor latente, grandeza adimensional;

$n$  – é o coeficiente de aceleração para o período assintótico, grandeza adimensional.

Sendo que  $a$  e  $n$  são obtidos por meio do ajuste da curva experimental.

### 3.3 Condições iniciais e de contorno

As Condições de Contorno C.C. influenciam diretamente nos resultados obtidos. Nos problemas termomecânicos, que trabalham de forma acoplada, tem-se as C.C. para as análises térmicas e as C.C. para as análises mecânicas.

Para os problemas térmicos utilizados neste trabalho, as C.C. são impostas como:

- Temperatura prescrita:  $T(x, y, z, t) = T$
- Perfeito isolamento:  $k \frac{\partial T}{\partial n} = 0$

As condições iniciais representam as temperaturas impostas no início da análise.

### 3.4 Cálculo das tensões no concreto massa

As tensões são calculadas segundo Gomes (2011), Gambale *et al* (2011a), Gambale *et al* (2011b), Gambale *et al* (2011c), Gambale *et al* (2011d), Gambale e Carmo (2002).

Temos que a matriz deformação,  $[\Delta \varepsilon]$ , é dada pela multiplicação da matriz de fluência,  $[J]$ , pela matriz de variação de tensões térmicas,  $[\Delta \sigma]$ , devido a cada variação térmica,  $\Delta T$  ( $\Delta T = T_i(t) - T_0 =$  temperatura pontual no instante de tempo menos a temperatura inicial), Eq. 7:

$$[\Delta \varepsilon] = [J][\Delta \sigma] \quad (7)$$

A matriz de deformação é dada pela multiplicação do coeficiente de restrição,  $K_r$ , pelo coeficiente de dilatação térmica,  $\alpha$ , pela variação térmica, como a Equação 8.

$$[\Delta\varepsilon] = [-K_r\alpha(T(t) - T_0)] \quad (8)$$

Conhecendo  $\Delta T$ ,  $\alpha$ , e  $K_r$ , encontra-se  $[\Delta\varepsilon]$ . Com a função de fluência escolhida e aplicada encontra-se a matriz de fluência,  $[J]$ . Com esses dados encontra-se a matriz  $[\Delta\sigma]$  e a partir dela é possível encontrar a matriz de tensão  $[\sigma]$ , sabendo-se que:

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta\sigma_i \quad (9)$$

Assim uma tensão em um determinado tempo  $t_n$  é dado pelo somatório de todos os incrementos de tensão como a Eq. 10:

$$\sigma(t_n) = \sum \Delta\sigma_i \quad (10)$$

Bofang (2014) chama o método de soma das tensões individuais, Eq. 10, de método explícito, o qual pode ser representado graficamente como a Fig. 6, em que com o passar do tempo há incrementos de tensões, os quais são somados e, desse modo, encontra-se a curva da tensão em função do tempo.

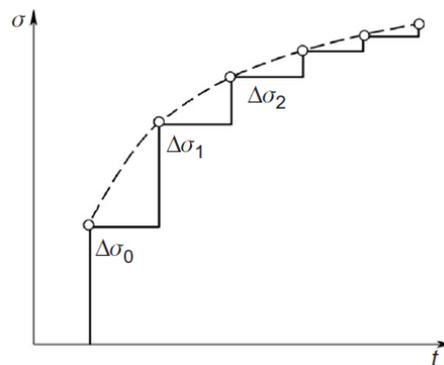


Figura 6 – Representação da curva de tensão pela soma das tensões individuais (Bofang, 2014).

### 3.5 Modelos de predição de fluência

O modelos para a previsão de fluência em função do tempo utilizado foi o *Bureau Reclamation – USBR (1992)*, em que é utilizada uma expressão logarítmica que aproxima o comportamento normal de fluência com precisão para o período de um ano. A função  $J$  é dada pela Eq. 11:

$$J(t, \tau) = \frac{1}{E(\tau)} + \phi(z)\log(t - \tau + 1) \quad (11)$$

Sendo:

$$\phi(z) = a + \frac{b}{z} \quad (12)$$

- $J$  = função de fluência, dada em função do módulo de elasticidade  $E$  (Mpa), e do coeficiente de fluência  $\phi$  ( $1/10^{-6}$  Mpa), em  $1/10^{-6}$  Mpa.
- $t$  = tempo, dias.

- $\tau$  = idade, dias
- a e b coeficientes de ajuste.

## 4 METODOLOGIA

A solução final é obtida por um método híbrido, em que parte da solução é extraída do MEF e parte é calculada analiticamente, como mostra o esquema da Fig. 7. Após as modelagens térmicas efetuadas, foram extraídos dos programas as temperaturas em cada intervalo de tempo correspondente para alguns pontos, os quais foram utilizados para obtenção analítica das tensões.

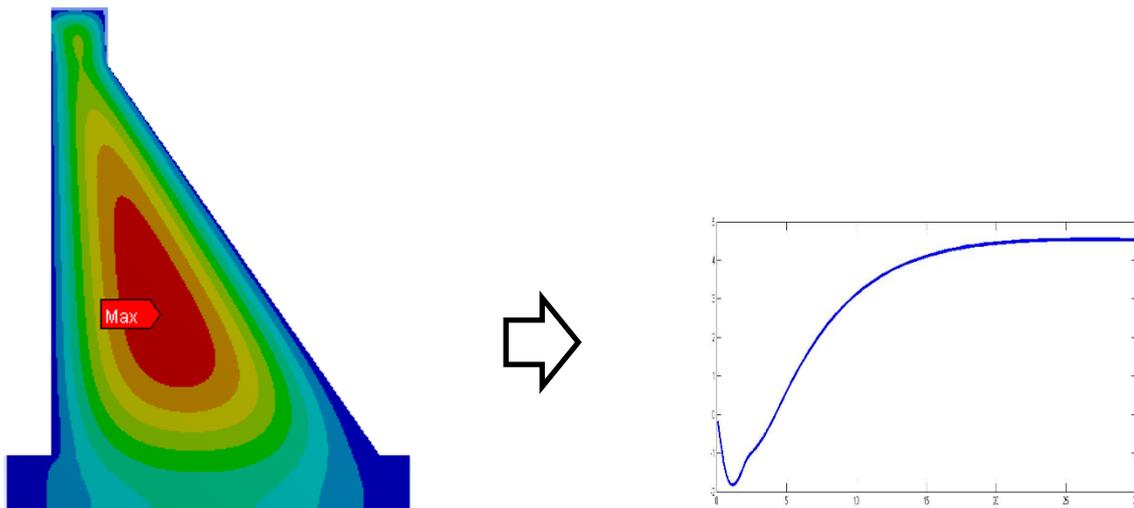


Figura 7 - Método de solução do problema.

Essas tensões foram calculadas pelas fórmulas analíticas implementadas em códigos computacionais no MATLAB, para resolução das matrizes e geração da curva de tensões térmicas.

## 5 RESULTADOS

Foi realizada a análise termomecânica em uma barragem de gravidade hipotética com 20 camadas de 0,50 m, conforme mostra a Fig. 8a. A modelagem foi feita com o ANSYS Workbench, que utilizou o elemento SOLID90, por default. A malha foi refinada com elementos de 0,10 m, gerando um total de 89683 nós e 42600 elementos, Fig. 8b. A construção foi simulada com lançamento das camadas a cada 24 h.

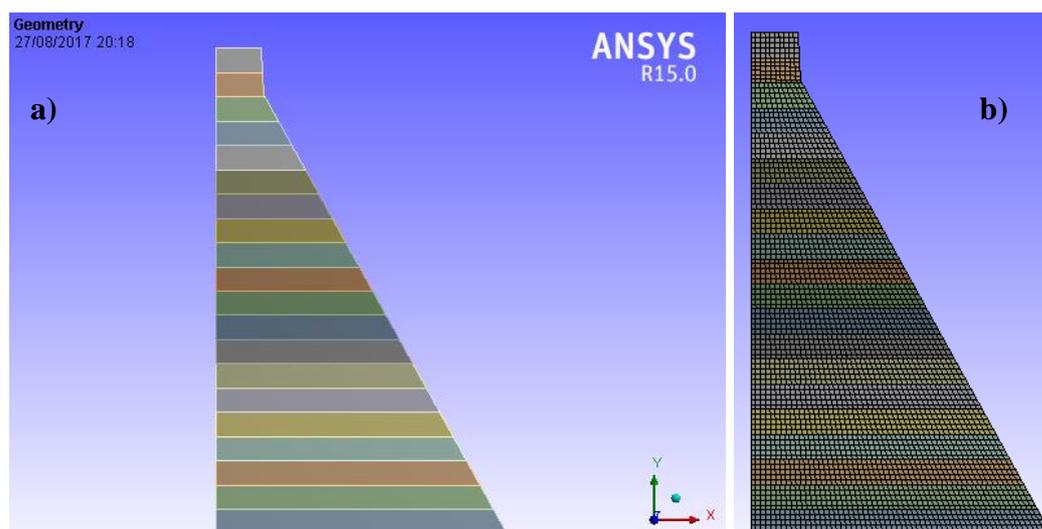


Figura 8 – a) Camadas da barragem analisada; b) Malha utilizada.

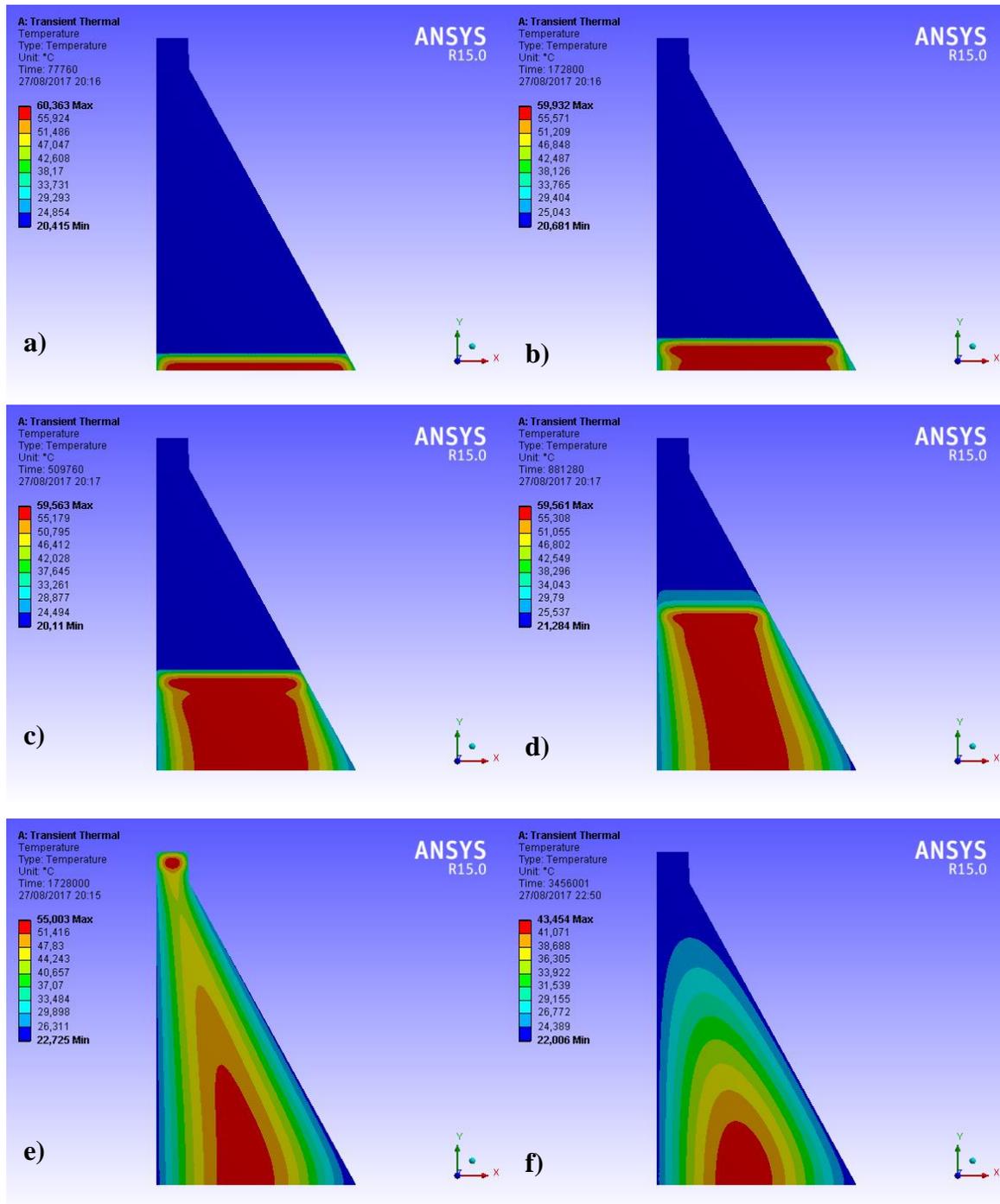
As propriedades utilizadas na simulação são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades térmicas da barragem.

Propriedade	Valor	Unidade
Massa específica ( $\rho$ )	2393,0	Kg/m <sup>3</sup>
Calor específico (c)	898,5	J/kg°C
Condutividade térmica (k)	2,6	W/m°C
Coefficiente de convecção da fundação – $h_2$	5,0	W/m <sup>2</sup> °C
Coefficiente de convecção do muro – $h_1$	3,1	W/m <sup>2</sup> °C
Temperatura ambiente e temperatura inicial do concreto	22	°C
Temperatura adiabática do concreto ( $T_{ad}$ )	$T_{ad} = 59,44 \cdot \frac{t^{2,831}}{13,62^{2,831} + t^{2,831}}$	°C

Foram estudadas as temperaturas e tensões das camadas 01, 02, 06, 10 e 20, chamadas respectivamente de C1, C2, C6, C10, C20. As camadas foram escolhidas em virtude das condições impostas e temperaturas encontradas. A camada 01, por estar sobre a fundação apresenta maior restrição, as demais, sobre outra camada de concreto que tem maior capacidade de deformação, tem o coeficiente de restrição reduzido em 50% conforme explicado por Coelho (2016).

Observa-se nas Fig. 9 a, b, c, d, e, as isotermas de temperatura após a concretagem das camadas analisadas e na Fig. 9 f, as isotermas no final da análise, ao final dos 40 dias. Nota-se que no interior, próximo ao núcleo as temperaturas permanecem maiores por mais tempo, justificando a escolha das camadas.

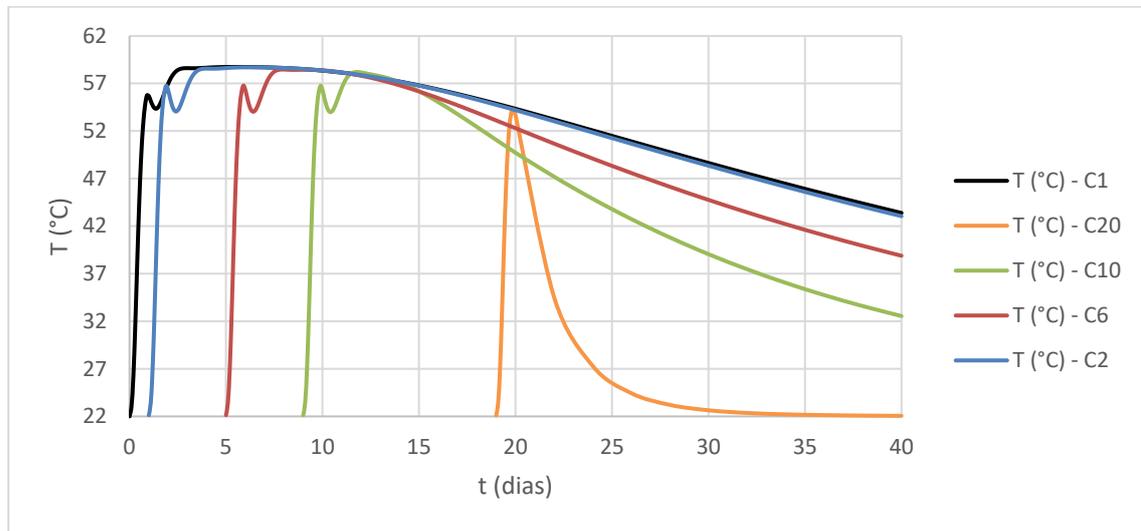


**Figura 9 – Isotermas de temperaturas ao final de: a) 1 dia; b) 2 dias; c) 6 dias; d) 10 dias; e) 20 dias; f) 40 dias.**

A fim de visualizar o processo de resfriamento das camadas indicadas, a Fig. 10 apresenta o comportamento térmico para os pontos centrais das camadas em investigação.

Percebe-se que em C1, C2, C6 e C10 a temperatura sobe, em um determinado tempo desce e depois volta a subir. Este fenômeno pode ser explicado pelo lançamento da camada seguinte a uma temperatura mais baixa que reduz a momentaneamente a temperatura da camada inferior,

e com o passar do tempo volta a se aquecer, o que não ocorre em C20, por não haver uma camada superior.



**Figura 10 – Temperaturas nos pontos centrais das camadas analisadas.**

Verifica-se também que quanto mais interna a camada, mais lento é o processo de resfriamento, sendo justificado pela condição semelhante ao processo adiabático, sem troca de calor, diferente do que acontece em C20 que está em contato com a temperatura ambiente.

Para análise mecânica foram utilizados os parâmetros mostrados na Tabela 2 para utilização da curva de fluência pelo método do USBR.

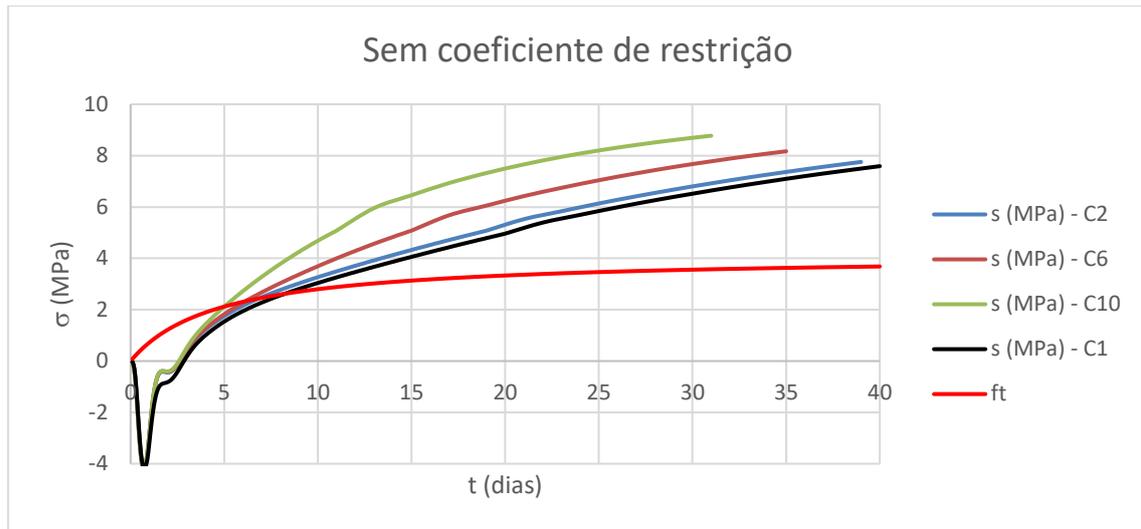
**Tabela 2 – Propriedades mecânicas para a barragem.**

Propriedade	Método USBR
Módulo de elasticidade - E (MPa)	$E = 29420 \frac{t^{2,0007}}{0,375^{2,0007} + t^{2,0007}}$
Parâmetros da curva de fluência	a = 14,36 b = 30,32

Considerando a resistência à compressão do concreto de 35 MPa e sua resistência à tração correspondente a 10% desse valor, a curva em vermelho nos gráficos das Fig. 11, 12, 13, mostram os limites para que o concreto não fissure, ou seja, a medida que a resistência da camada cruza o limite de tração, há fissuração.

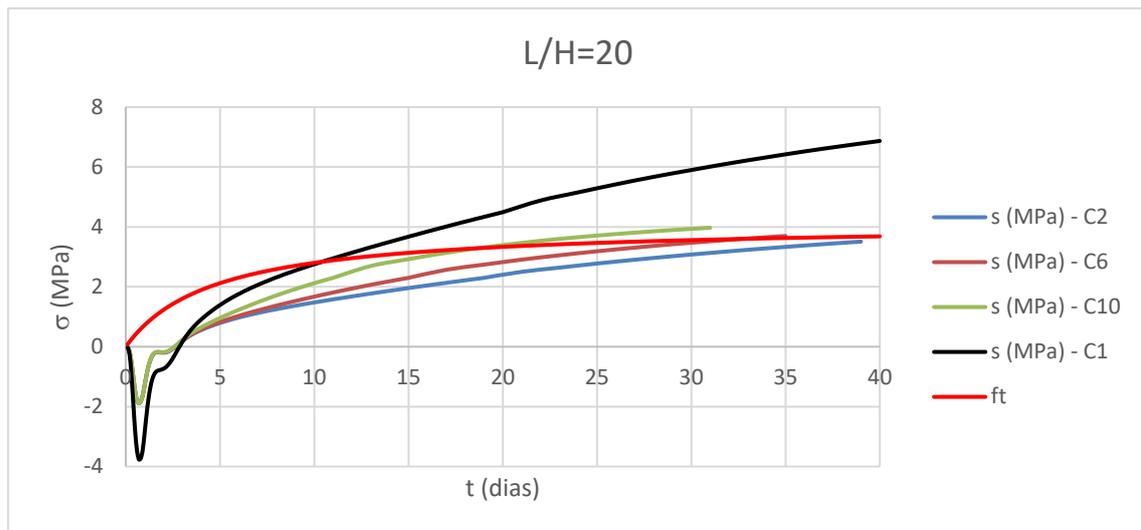
A Fig. 11, apresenta as tensões para todas as camadas sem levar em consideração o coeficiente de restrição. Neste caso, haveria fissuração de todas as camadas, havendo diferença apenas na idade de ocorrência. No entanto, há necessidade de verificação das restrições impostas.

Como relatado na metodologia, a partir dos resultados térmicos obtidos pelo MEF, foram calculadas as tensões analiticamente, com auxílio do MATLAB, fazendo-se uso de um método híbrido. Após encontrar as tensões foram aplicados os referidos coeficientes de restrição.



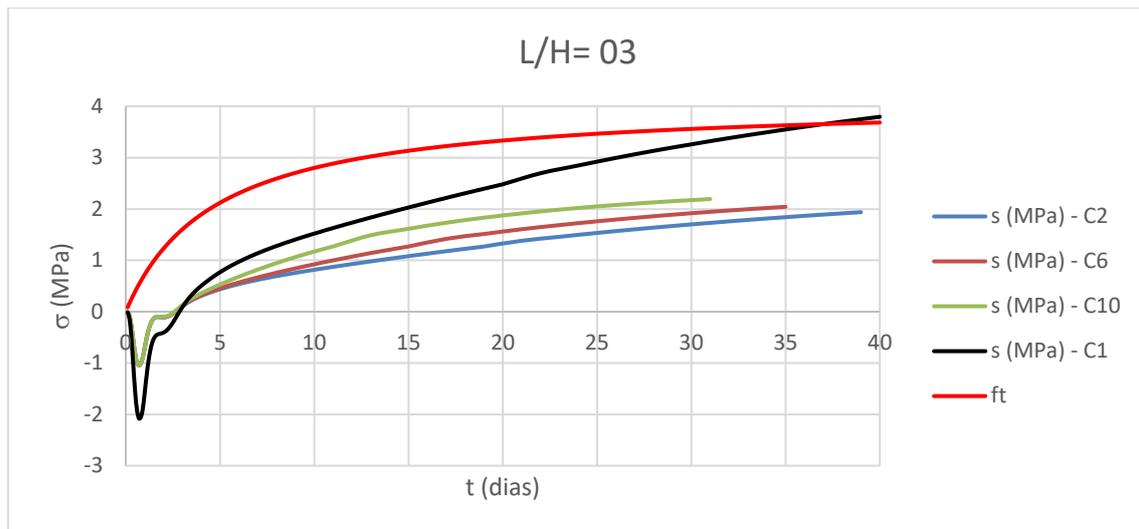
**Figura 11 – Tensões para as camadas sem o coeficiente de restrição.**

Primeiramente, admitiu-se que o comprimento longitudinal da barragem 20 vezes maior que a altura, submetidas a um coeficiente de restrição de 0,905, Fig. 12. As camadas C2, C6 e C10, por estarem sobre outra camada de concreto tem redução de 50% da restrição, diferente da primeira que está sobre a fundação. Neste caso, verifica-se que apenas C2 ainda não fissurou, mas pela tendência, também não suportaria a carga térmica imposta.



**Figura 12 – Tensões para L/H=20.**

Reduzindo o comprimento da estrutura para três vezes a altura com coeficiente de restrição 0,50, Fig. 13, percebe-se que apenas a primeira camada ainda teve problema, as demais não tem tendência à fissuração.



**Figura 13 – Tensões para L/H=20.**

Verifica-se, analisando os gráficos mostrados, que a redução do comprimento na concretagem pode evitar os problemas de fissuração e que quando a base a que está imposta a camada é mais flexível, tem-se uma maior segurança construtiva.

O problema de fissuração da primeira camada, talvez possa ser contornado com a redução da espessura da camada, com a construção de uma base mais flexível, com a redução da temperatura de lançamento ou outra alternativa que possibilite redução das tensões, e evite a fissuração do concreto.

## 6 CONCLUSÕES

Com a imposição das restrições às estruturas juntamente com o gradiente térmico proveniente das diferenças de temperatura ocasionadas com a geração de calor, podem ocorrer fissuras no corpo danificando sua capacidade de resistir aos esforços. Logo, é interessante verificar as probabilidades desses fenômenos ocorrerem antes da construção por meio de simulação.

Examinou-se o resfriamento das camadas e posterior aquecimento devido a influência térmica da camada sobrepostas, formando ondulações que também são acompanhadas pelas curvas de tensões.

As tensões são modificadas com a posição das camadas e podem ser reduzidas com a redução da relação L/H. Estando sobre uma fundação flexível tem menor probabilidade de fissuração. Portanto, alteração do comprimento e construir a primeira camada com uma altura menor podem ser medidas eficientes para evitar deterioração das estruturas. E deve-se considerar que nas camadas sobrepostas em outras camadas de concreto, que funcionam como uma fundação flexível, há redução das tensões de tração em aproximadamente 50%, associados ao coeficiente de fundação dado pelo ACI 207-2R (2007).

De forma geral, nas análises por MEF simulando o efeito de camadas, deve-se ter cuidado para simular corretamente o fenômeno, visto que as condições de contorno podem falsear os resultados se a malha não estiver bem discretizada.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Universidade Federal do Vale do São Francisco – Univasf, à Universidade de Brasília – UnB, ao CNPq e a Flavio Mamede de Furnas pelo apoio e incentivo.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G.; COELHO, N.; ALKMIM, N.. *Comparative analysis of a transient heat flow and thermal stresses by analytical and numerical methods*. In: VII International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering Grécia: 2017

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Cement and Concrete Terminology*. ACI 116R. Farmington Hills, 2005.

AURICH, M., *Simulação Computacional do Comportamento do Concreto nas Primeiras Idades*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, POLI, USP, 2008.

AZENHA, M. A. D.; *Numerical Simulation of The Structural Behaviour of Concrete Since Its Early Ages*. 379 f. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP. Porto: 2009.

BAGHERI-ZADEH, S.; KIM, H.; HOUNSELL, S.; WOOD, H. S.; KING, M.. *Field Study of Concrete Maturity Methodology in Cold Weather*. Journal of Construction Engineering and Management. Novembro, 2007. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:11(827).

BOFANG, Z.; *Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete*. 1 ed. Elsevier: 2014.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J.; *Transferência de Calor e Massa - Uma Abordagem Prática*. 4ª Ed. MCGRAW-HILL: 2012.

Coelho, N. A.; *Métodos Analíticos e Numéricos para o Estudo dos Efeitos Termomecânicos no Concreto Massa Orientados às Barragens de Gravidade*. Tese de doutorado. Universidade de Brasília – UnB. Brasília: 2016.

COELHO, N. A.. *Um Estudo Numérico do Efeito Térmico em Concreto Massa*. 152 f. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília – UnB. Brasília: 2012.

COELHO, N. A.; SILVA, D. A.; PEDROSO, L. J.; *Efeito térmico provocado pelo calor de hidratação em barragem de gravidade construída em camadas*. In: XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. Brasília: 2016.

COELHO, N. A.; NEPOMUCENO, A. A.; PEDROSO, L. J.; *O concreto massa e seus efeitos térmicos*. Novas Edições Acadêmicas. Saarbrücken: 2014.

CREAGER, W.; HINDS, J.; JUSTIN, J. W.. *Engineering for Dams*. New York: J Wiley 1964. 3 v. :

- EMBORG, M.. *Development of Mechanical Behaviour at Early Ages*. In: SPRINGENSCHMID R. (Ed.); *Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*. RILEM Report 15. Londres: 1998a. P. 76 – 148.
- \_\_\_\_\_. *Models and Methods for Computation of Thermal Stresses*. In: SPRINGENSCHMID R. (Ed.); *Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*. RILEM Report 15. Londres: 1998b. P. 178 – 230.
- FARIA, E. F.; *Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados*. 145 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio De Janeiro – COOPE/UFRJ. Rio de Janeiro: 2004.
- GAMBALE, E. A.; CARMO, J. B. M.. *Análise de Temperatura do Concreto Utilizado nas Estruturas da 3ª Ponte do Lago Sul de Brasília-DF*. In: *Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural*, Brasília: 2002.
- GAMBALE, E. A.; LUZ, M. P.; SANTANA, W. G.; BARBIN, A. S.. *Estudo do Plano de Lançamento do Concreto a Partir de Análises Bidirecionais Térmicas e Tensionais da Estrutura da Ogiva do Vertedouro Principal da Usina Hidroelétrica de Santo Antônio*. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto. Brasília: Florianópolis: 2011a.
- \_\_\_\_\_. *Estudos Bidirecionais Térmicos e Tensionais como Forma de Orientar Condições Executivas em Estruturas de Tubos de Sucção Aplicados à Usina Hidroelétrica de Santo Antônio*. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto. Brasília: Florianópolis: 2011b.
- \_\_\_\_\_. *Análise de plano de lançamento de concreto a partir de estudo térmico bidirecional da estrutura stay column da Usina Hidroelétrica de Santo Antônio*. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto. Brasília: Florianópolis: 2011c.
- \_\_\_\_\_. *Estudos Bidirecionais Térmicos e Tensionais em Viga Munhão Aplicados à Usina Hidroelétrica de Santo Antônio*. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto. Brasília: Florianópolis: 2011d.
- GOMES, F. M. P.; *Concreto nas primeiras idades: propriedades e modelagem termomecânica simplificada*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás. Goiânia: 2011.
- KIM, K.; JEON, S.; KIM, J.; YANG, S.; *An experimental study on thermal conductivity of concrete*. *Cement and Concrete Research*: 2002
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2016.
- MOAVENI, S. *Finite Element Analyses: Theory and Application with ANSYS*. New Jersey: Editora Prentice-Hall, 1999.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 5. ed. São Paulo: Pini, 2016. 888 p.
- PEDROSO, J. L. *Barragens de Concreto: Aspectos Gerais e Fundamentos do Cálculo de Tensões e da Estabilidade Baseado no Método de Gravidade*. Apostila do Curso de Barragens de Concreto. Universidade de Brasília - UnB, Brasília, 2002.
- RAO, S. S.; *The Finite Element Method in Engineering*. 3ª ed. United States of America: Butterworth-Heinemann: 1999.

SILVEIRA, A. F.; *As variações de temperatura nas barragens*. Lisboa: Lab Nac Eng Civ, 1961. 437 p.

TEIXEIRA, R. R.; MACHADO, R. D.; HECKE, M. B.. *Modelagem por elementos finitos para análise de tensões e Deformações por fluência no concreto compactado com rolo*. 2006

UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION. *Concrete Manual: Part 2*. 9 ed. U.S. Departamento of the interior. 1992.

\_\_\_\_\_ *Control of Cracking in Mass Concrete Structures. Engineering Monograph N. 34*. U.S. Government Printing Office: Denver, 1981.

WU, Y.; LUNA, R.. *Numerical implementation of temperature and creep in mass concrete. Finite Elements in Analysis and Design*. Elsevier: 2001.