



Um Estudo Numérico dos Efeitos Térmicos Provocados Pelo Calor de Hidratação do Cimento em Barragens

Coelho, Nailde de Amorim (1); Pedroso, Lineu José (2); Rêgo, João Henrique da Silva (3); Nepomuceno, Antonio Alberto (4).

(1) *Doutoranda em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília – UnB;*
(2), (3) e (4) *Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – UnB;*
naildea@yahoo.com.br

Resumo

No Brasil grandes projetos de barragens estão previstos e em curso, principalmente no norte do país, fato que torna os estudos dessas estruturas um aspecto importante e estratégico no desenvolvimento técnico nacional.

Dentre os tipos de barragens de interesse estão as barragens de concreto gravidade, que são constituídas por grandes maciços de concreto (concreto massa). Este concreto apresenta características diferenciadas do concreto convencional, visto que sua resistência está associada à própria massa do material.

Dentre muitos problemas existentes nesse tipo de barragem, temos os efeitos térmicos que levam as fissurações devido o surgimento de tensões ocasionadas pelas variações de temperaturas internas e externas ao volume do concreto.

A análise do gradiente térmico antes da construção dessas estruturas é primordial para que se possa efetuar uma prevenção das fissuras, utilizando-se métodos de redução da temperatura. Esse diagnóstico pode ser realizado por diversos procedimentos, em particular, com o auxílio de uma análise numérica baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF), que permite uma avaliação da temperatura para diferentes propriedades, métodos construtivos, condições iniciais e de contorno no concreto.

Neste trabalho, para um perfil típico de barragem brasileira, submetido as diversas condições de uso corrente na execução dessas obras, é feito uma análise térmica numérica pelo MEF com o uso do software ANSYS.

O estudo dos efeitos térmicos oriundos do calor produzido na massa de concreto é tratado dentro de uma ampla gama de fatores intervenientes, de forma a se evidenciar a importância e natureza dos parâmetros que influenciam no fenômeno analisado.

Com o uso dessa ferramenta computacional o mapeamento das temperaturas pode ser analisado, verificando-se os gradientes térmicos e, buscando-se formas de reduzir os efeitos da temperatura. Os resultados mostram que as variações de temperaturas na análise de uma barragem de gravidade construída em camadas, para intervalos de lançamento entre as camadas de dois dias. Dessa forma, observa-se diferentes temperaturas alcançadas, assim como se pode avaliar os pontos críticos de temperatura nocivos à estrutura.

Palavra-Chave: Barragem de gravidade, temperatura, efeito térmico, construção em camadas.

1 Introdução

Com os problemas de aquecimento global e de aumento da população do planeta é necessário que haja uma preocupação com a diminuição do consumo e com a retenção

de água doce. Apesar da Terra ser parcialmente coberta por água, apenas 2,5% corresponde à água doce, dentre os quais 0,3% são armazenados em rios, 30,8% no lençol freático e 68,9% estão em geleiras ou coberturas de neve (Comitê Internacional de Grandes Barragens - CBDB, 2008).

Barragens são barreiras ou estruturas que cruzam córregos, rios ou canais para confinar e assim controlar o fluxo da água. Podem variar de pequenos maciços de terra a enormes estruturas de concreto, geralmente usadas para fornecimento de água, energia hidrelétrica e irrigação (CBDB, 2008).

Pedroso (2002), também afirma que uma das formas mais tradicionais de armazenar água é a construção de barreiras em rios que apresentem potencial hidráulico, ou seja, vazão adequada que permita a acumulação de água, e essas barreiras são conhecidas como barragens.

Várias são as definições de barragens, no entanto, elas se resumem a dizer que uma barragem é uma estrutura criada para reter água, podendo esta ser consumida ou utilizada por um período de tempo prolongado.

As barragens de gravidade são os tipos mais comuns e que requerem a menor manutenção, se adaptam em qualquer localidade, mas tem limitações de altura com relação à base e à fundação (Creager, 1964). A figura 1 mostra a barragem de Tucuruí que é do tipo gravidade.



Figura 1 – Barragem de Tucuruí do tipo gravidade.
(FONTE: <http://www2.transportes.gov.br/bit/hidroviabarragens/tucuru.htm>)

A Eletrobrás (2000) diz que este tipo de barragem é capaz de resistir, com seu peso próprio, à pressão da água do reservatório e à subpressão das águas que se infiltram pelas fundações.

Segundo Fairbairn et al. (2003) grandes estruturas de concreto, tais como barragens, blocos de fundação e lajes de pontes, podem estar sujeitas a fissurações em idades precoces devido às tensões térmicas e a indução da retração autógena. Do ponto de vista da engenharia, estas tensões podem ser evitadas com algumas medidas preventivas que tentam reduzir os efeitos térmicos. Entre elas pode-se citar:

- Escolha de um material capaz de reduzir a reação de hidratação do cimento e as tensões de retração autógena;
- Controlar a espessura das camadas e o intervalo de tempo entre as camadas para permitir a dissipação do calor;
- Redução da temperatura de lançamento do concreto ou fazer uso dos tubos de resfriamento.



As obras que utilizam concreto massa apresentam, normalmente, um elevado custo e podem causar grandes desastres em caso de ruptura. Por isso, torna-se importante uma análise a fim de prevenir as possíveis falhas na estrutura.

O concreto massa é qualquer volume de concreto com dimensões grandes o suficiente que requeiram medidas a serem tomadas para superar a geração de calor de hidratação do cimento reduzindo a mudança de volume para minimizar a fissuração (American Concrete Institute - ACI, 2005). O aspecto fundamental do concreto massa é o comportamento térmico. O projeto desse tipo de estrutura busca evitar o aparecimento ou controlar a abertura e espaçamento das fissuras.

Segundo o International Commission on Large Dams (2009) o concreto massa difere do concreto estrutural na medida em que é colocado em seções de espessura onde o calor de hidratação dissipa lentamente e o gradiente térmico pode induzir aberturas no concreto.

Um dos fatores observados na construção convencional é que as grandes massas de concreto possuem grandes gradientes de temperatura devido às condições de contorno e à geração de calor de hidratação do cimento. Os gradientes de temperatura geram deformações que não devem ser desprezadas numa análise estrutural (Kawamura, 2005). As fissuras no concreto massa são prejudiciais e são causadas principalmente por tensões de tração desenvolvidas em resposta à retração térmica em combinação com restrição de mudança de volume do concreto. O gradiente de temperatura pode ser reduzido proporcionando a diminuição do pico da temperatura do concreto e utilizando um concreto com baixas propriedades de contração térmica. A temperatura máxima é dependente da temperatura de lançamento do concreto, do calor de hidratação e da perda ou ganho de calor pelo ambiente.

2 As barragens de gravidade e as fissurações

As barragens de gravidade são formadas por grandes maciços de concreto. Para grandes volumes de concreto, dá-se o nome de concreto massa. O concreto massa apresenta características diferenciadas do concreto convencional, visto que sua resistência está mais associada à própria massa do concreto.

Dentre os problemas existentes nesse tipo de barragem, uma das grandes preocupações das empresas construtoras é com o efeito térmico que levam às fissurações. As tensões de origem térmica podem ser devidas a variações de temperaturas atmosféricas ou temperaturas internas (Coelho, 2012).

Em projetos e construções de barragens de concreto, é reconhecida a importância da elevação da temperatura do concreto devido ao calor de hidratação e à subsequente retração e fissuração que ocorre no resfriamento. A fissuração de origem térmica pode ser uma das responsáveis pelo comprometimento da estanqueidade e estabilidade estrutural da barragem.

As variações de temperatura no concreto endurecido originam mudanças de forma e volume. Se tais mudanças são impedidas pela vinculação da estrutura da obra, resultam tensões que podem produzir a fissuração do concreto. Se as alterações de volume ou de

forma não se podem fazer livremente, aparecem tensões e talvez fissuras (Castro e Martins, 2006).

O estudo do calor de hidratação é uma forma de entender o que acontece dentro de uma estrutura de concreto massa. A evolução térmica pode levar a um gradiente de temperatura que ocasiona fissuras destrutivas para as barragens. Ressalta-se que o estudo do calor de hidratação em concreto massa é aplicável em qualquer estrutura que faça o uso desse material durante a construção.

3 Efeitos térmicos em barragens

Em uma barragem de concreto o efeito da hidratação do cimento produz uma reação exotérmica com uma elevação significativa da temperatura desse material. Além do calor de hidratação existem outros fenômenos térmicos que atuam diretamente em uma barragem: a radiação solar, a condução e a convecção. A figura 2 representa o fluxo de calor que ocorre em uma barragem.

A barragem gera calor nos primeiros tempos de sua existência, conduz calor através de sua massa; recebe, emite e reflete calor através de suas faces e, após certo tempo, atinge sua temperatura de equilíbrio. Esta temperatura só pode ser atingida depois de dissipado o calor de hidratação do cimento, quando o calor absorvido em épocas quentes é igual ao perdido durante épocas frias. Nessa altura, a temperatura de cada ponto no interior da barragem, embora sofrendo variações, mantém um valor médio ao longo do tempo, que é a temperatura de equilíbrio (Silveira, 1961).

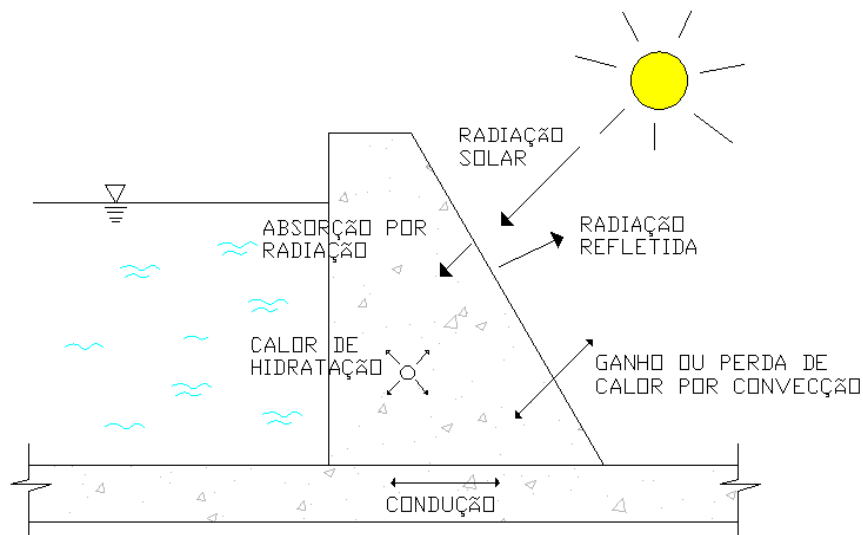


Figura 2 – Fluxo de calor em barragem.

As variações de temperatura dão origem a variações de forma e volume de um material que podem produzir tensões. No caso do concreto, quando essas tensões são de tração em uma barragem, são extremamente inconvenientes, uma vez que podem fissurar a barragem causando danos à estrutura.

Para um maior entendimento das transmissões de calor em barragem, a seguir são estudados separadamente cada um desses processos, de forma que possa ficar mais claro a influência de cada um deles na alteração da temperatura e nos métodos de transferência de calor.

- **Radiação** - de acordo com Silveira (1961), radiação térmica é o processo de emissão, por um corpo, de energia radiante cuja quantidade depende da temperatura do corpo. O conhecimento da radiação solar é indispensável para determinar as temperaturas das superfícies da barragem, ou melhor, a elevação da temperatura dessas superfícies em relação à temperatura do ar. De acordo com Incropera et al (2008) e Silva (2003), a equação que governa o fenômeno da energia de calorífica transmitida pelo corpo negro com temperatura maior que o zero absoluto é dada pela equação 1:

$$Q_r = \sigma * A * T^4 \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

- ✓ Q_r é a quantidade de calor obtida por radiação;
- ✓ A é a área da superfície;
- ✓ T é a temperatura;
- ✓ σ é a constante de Stefan-Boltzmann, sendo:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Os corpos reais emitem radiação inferior a dos corpos negros e o calor transferido por radiação de T_1 para o corpo negro que esteja em T_2 será:

$$Q_r = \sigma * A * \varepsilon * (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que:

- ✓ ε é a emissividade da superfície;
 - ✓ T_1 é a temperatura do corpo 1;
 - ✓ T_2 é a temperatura do corpo 2.
- **Convecção** - é a troca de calor através do movimento de um fluido. A quantidade de calor que passa de um sólido para um fluido ou que um fluido cede a um sólido é diretamente proporcional ao gradiente térmico da superfície do sólido. Para que ocorra a convecção é necessário que ocorra uma diferença de temperatura entre o fluido e o corpo. O fenômeno também é influenciado pela velocidade de deslocamento do fluido, pela densidade, viscosidade, calor específico e

condutividade térmica do fluido, e ainda da natureza, forma, rugosidade, dimensões e orientação do corpo (Silveira, 1961).

De acordo com Santos (2004), a Lei de Newton diz que, supondo um corpo sólido mergulhado num fluido, em que T_s é a temperatura da superfície e $T_{f,\infty}$ é a temperatura do fluido perturbado distante da superfície transmissora de calor, A é a área da superfície, e h_c é o coeficiente de convecção, a quantidade de calor transmitida no tempo, Q_c , é dada pela equação 3:

$$Q_c = h_c * A * (T_s - T_{f,\infty}) \quad \text{(Equação 3)}$$

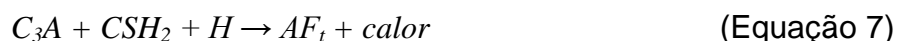
- **Condução** - o processo de condução de calor ocorre através de um material, geralmente em sólido, podendo ocorrer também em fluidos. De acordo com Santos (2004), o calor transferido unicamente por condução é muito pequeno e difícil de quantificar, sendo comum admitir que a transferência de calor por convecção e por condução seja analisada conjuntamente, assumindo um único coeficiente de transferência de calor. Assim, admite-se que os diferentes mecanismos de transferência de calor podem se agrupar assumindo um coeficiente de transmissão global, h , conforme a equação 4:

$$h = h_c + h_r \quad \text{(Equação 4)}$$

- **Calor de hidratação** - o cimento, na reação de hidratação, é responsável por uma grande liberação de calor, que muda de acordo com a idade do concreto, o chamado calor de hidratação, medido em calorias 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).

Carvalho (2002) declara que a reatividade dos compostos do cimento com a água varia consideravelmente, sendo possível modificar as características de desenvolvimento de resistência, e por consequência o desenvolvimento de calor de hidratação, alterando-se as quantidades dos compostos do cimento. Dessa forma, podem-se produzir cimentos com características diferentes, como os de alta resistência inicial, de baixo calor de hidratação, alta resistência a sulfatos, etc.

Faria (2004), afirma que a reação de hidratação é na realidade a composição de diversas reações de hidratação, podendo ser apresentadas, esquematicamente, sob a forma das equações 5 a 8 abaixo:



onde o H representa a água; o $C-S-H$ os hidratos de silicato de cálcio hidratado; o CH , o hidróxido de cálcio ou Portlandita; e o AF_t simboliza a etringita.

A figura 3 mostra a quantidade de calor desenvolvida por cada componente do cimento segundo estudos de Choktaweekarn e Tangtermsirikul (2010);

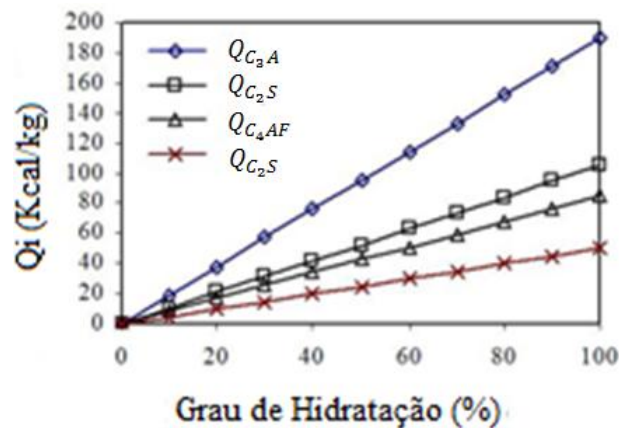


Figura 3 – Calor desenvolvido por cada componente de cimento (Choktaweekarn e Tangtermsirikul, 2010).

4 Fundamentos Teóricos

O problema da transferência de calor no concreto é conduzido pela equação de Fourier, desenvolvida a partir do fenômeno que estabelece que a quantidade de calor que passa através de um meio, uma área A , por unidade de tempo.

Um dos principais objetivos da condução de calor é determinar o campo de temperatura em um meio resultante das condições impostas em suas fronteiras. Ou seja, deseja-se conhecer a distribuição de temperaturas, que representa como a temperatura varia com a posição no meio. Uma vez conhecida essa distribuição, o fluxo de calor por condução em qualquer ponto do meio ou na sua superfície pode ser determinado através da lei de Fourier (Incropera, 2008).

Seja c o calor específico do material, k a condutividade térmica, ρ sua massa específica, $\nabla^2 T$ o gradiente térmico. Um elemento de volume sofrerá, na unidade de tempo, uma elevação de temperatura em função do tempo, $\frac{dT}{dt}$, e chega-se a equação de Fourier mostrada na equação 9:

$$k\nabla^2 T = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{(Equação 9)}$$

Se o corpo desenvolver calor, como é o caso do concreto, há a influência de um outro termo na Equação de Fourier que é a representação da quantidade de calor desenvolvido, dado por \dot{q} . Assim, a Equação Geral da Condução de Calor, considerando a Equação de Fourier e a geração de calor interno, (calor de hidratação), é dada pela equação 10:

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{c\rho}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{(Equação 10)}$$

Liu et al., (2010) afirma que o calor desenvolvido pela hidratação do cimento pode ser representado pela equação 11, obtida por meio de dados experimentais levando em consideração a temperatura adiabática em diferentes idades do concreto.

$$\dot{q} = q_i (1 - e^{-\alpha t^\beta}) \quad (\text{Equação 11})$$

Em que:

\dot{q} = calor de hidratação;

q_i, α, β = constantes obtidas experimentalmente, depende da composição do cimento; sendo que q_i é o calor inicial do concreto.

5 Barragem de Gravidade construída em Camadas

Este exemplo mostra a análise de um perfil de barragem, o qual é baseado em uma seção típica de barragem real. No entanto, utilizou-se altura da barragem de 10 m e as demais medidas proporcionais a essa altura, uma vez que a simulação pode ser reproduzida para qualquer dimensão. Para esse estudo, admitiu-se a estrutura maciça e a construção em camadas de 1 m, como mostra a figura 4. Para a análise, admitiu-se também um intervalo de concretagem das camadas de dois dias. Dessa forma, quando a terceira camada é lançada, a segunda camada está com dois dias e a primeira com quatro dias de concretagem. Foram empregadas para as propriedades do concreto condutividade térmica de 2,27 W/m°C, calor específico de 1063 J/g°C e massa específica de 2295 kg/m³. Esses valores são baseados em valores experimentais, de acordo com Andrade (1997).

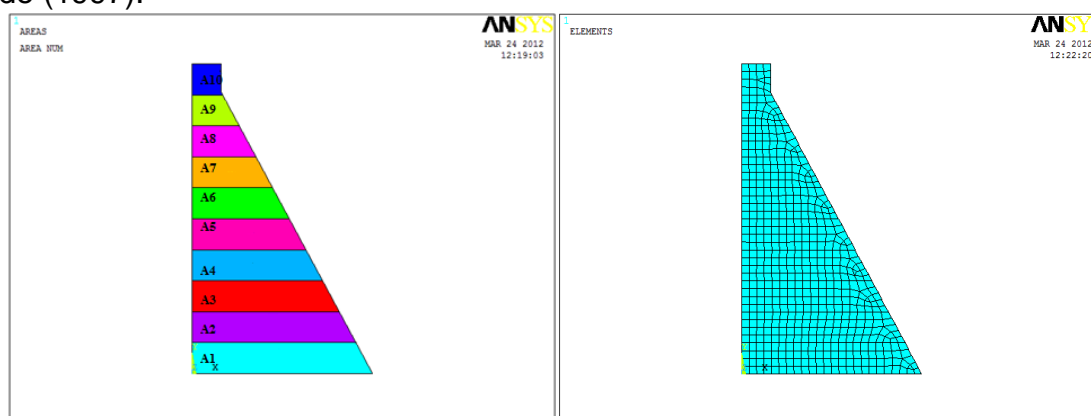


Figura 4 – Subdivisão da estrutura em áreas e malha de elementos finitos utilizada.

Para análise do fenômeno da transferência e geração de calor no concreto, foi utilizado o programa ANSYS, que faz uso do método dos elementos finitos na resolução dos problemas, por meio do elemento PLANE55 que tem capacidade de condução térmica em duas dimensões, 2D. O comando *Birth and Death* no ANSYS foi empregada para a análise em camadas. Sua função é de ativar e desativar os elementos conforme vai prosseguindo a análise.

A simulação bidimensional instável das várias etapas da sequência de construção pode ser realizada com o *Birth and Death* do software, que é usado para ativar e desativar

elementos. Desta forma, a análise pode ser feita com uma única malha computacional em vez de várias, uma para cada fase de construção (Krüger et al, 2003).

Marques Filho (2005) afirma que em barragens utilizando o concreto massa convencional a espessura da camada varia, em geral, entre 2,0 m e 2,5 m, enquanto utilizando o método construtivo de Concreto Compactado com Rolo (CCR) esses valores estão entre 0,25 m e 0,50 m. No entanto, Bastos (2011), afirma que para concretos não refrigerados as camadas possuem no máximo 1 m de espessura.

A figura 5 mostra a evolução das isotermas de temperatura para a concretagem da primeira e segunda camada da barragem. Ressalta-se que as demais camadas estão desativadas, portanto, os resultados dessas camadas não são de interesse no momento.

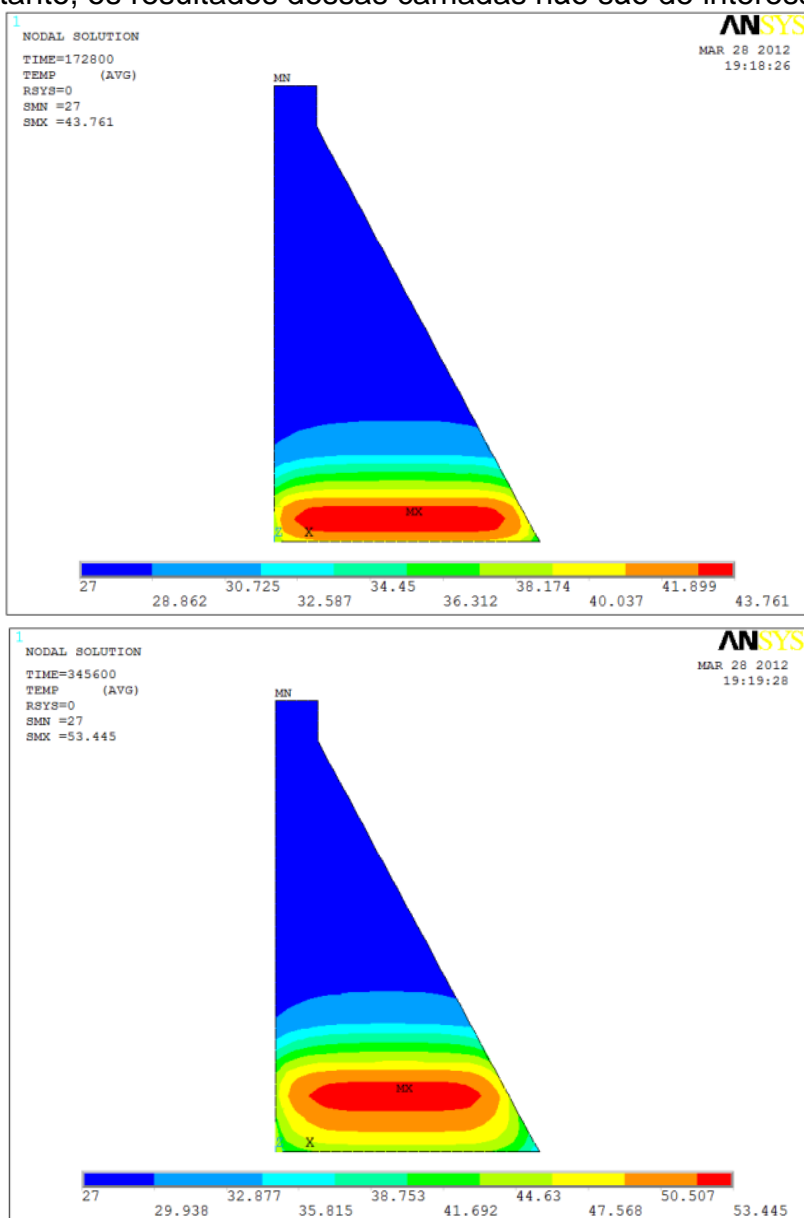


Figura 5 – Isotermas de temperatura após dois dias de concretagem para a 1ª e 2ª camada de concretagem.

A figura 6 apresenta a evolução térmica quando se concretiza a terceira e quarta camada. Nota-se na terceira camada que a temperatura máxima encontra-se no centro das camadas já concretadas e na lateral tem-se uma temperatura em torno de 40°C. Na quarta camada, embora a temperatura máxima permaneça no centro, nas laterais tem-se menores temperaturas, o que aumenta o gradiente térmico.

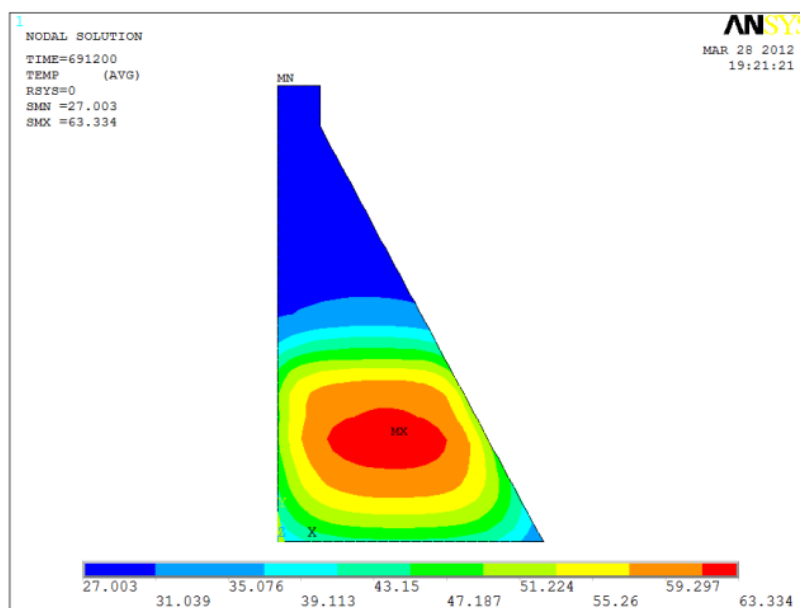
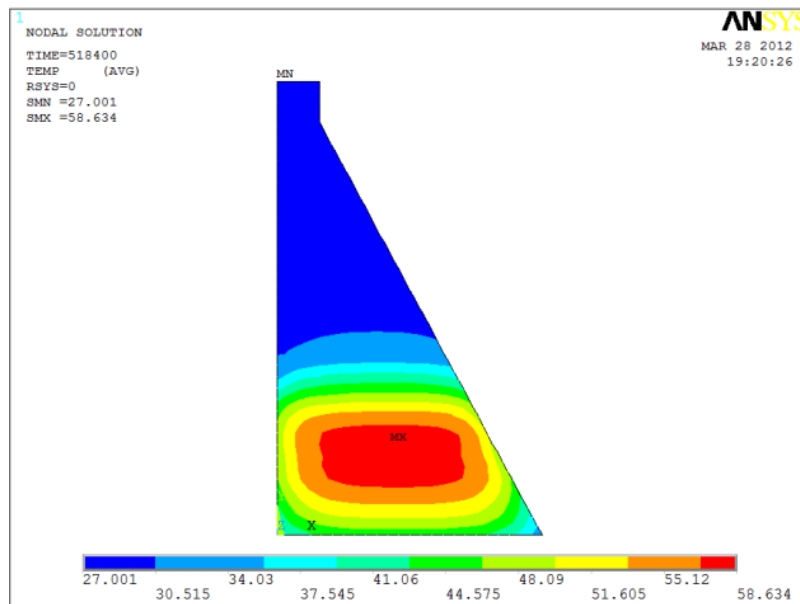


Figura 6 – Isotermas de temperatura após dois dias de concretagem para a 3ª e 4ª camada de concretagem.

Na figura 7, têm-se os resultados para a concretagem da quinta e sexta camada. A máxima temperatura atingida permanece no núcleo da estrutura e as camadas concretadas inicialmente começam a reduzir a temperatura, ou seja, começa a haver um resfriamento dessas camadas.

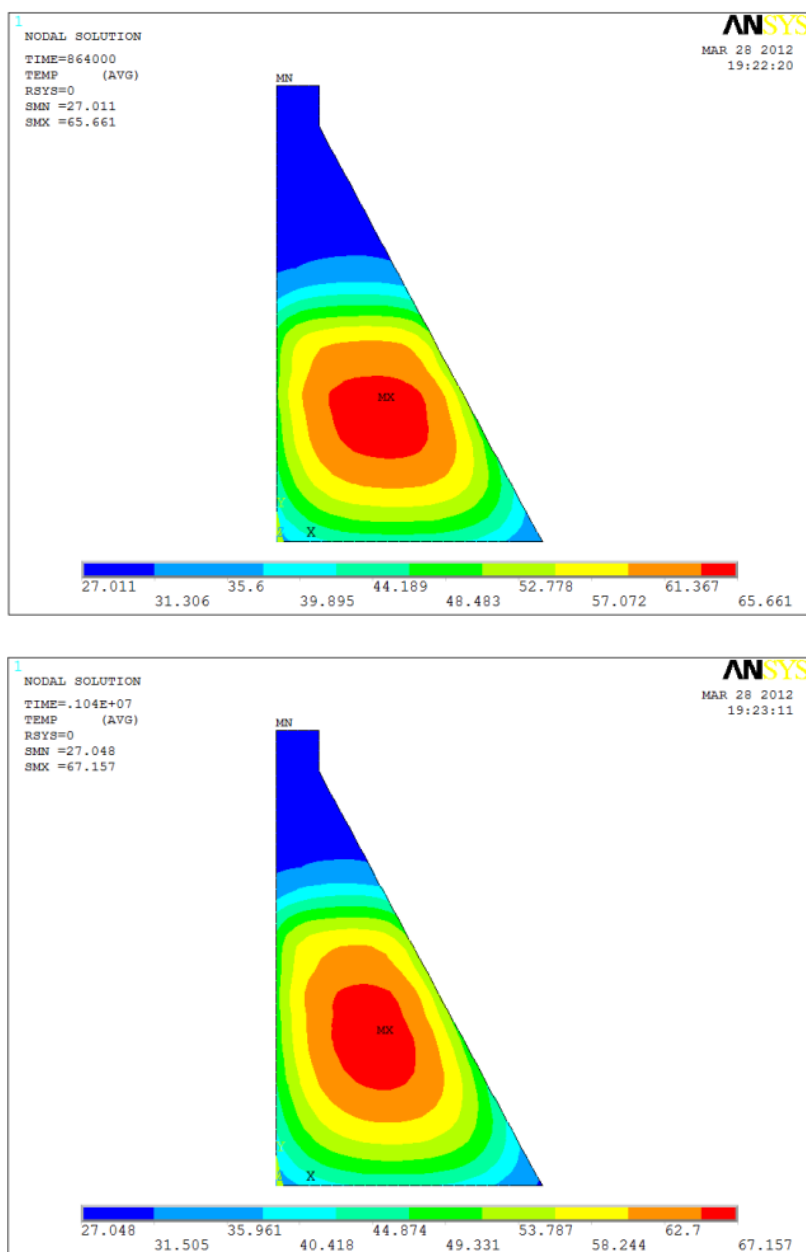


Figura 7 – Isothermas de temperatura após dois dias de concretagem para a 5ª e 6ª camada de concretagem.

Na sétima e oitava camada, figura 8, o fenômeno descrito anteriormente se repete, no entanto a temperatura máxima atingida começa a diminuir, isso devido ao tempo de concretagem. Neste caso, 14 e 16 dias do início da construção.

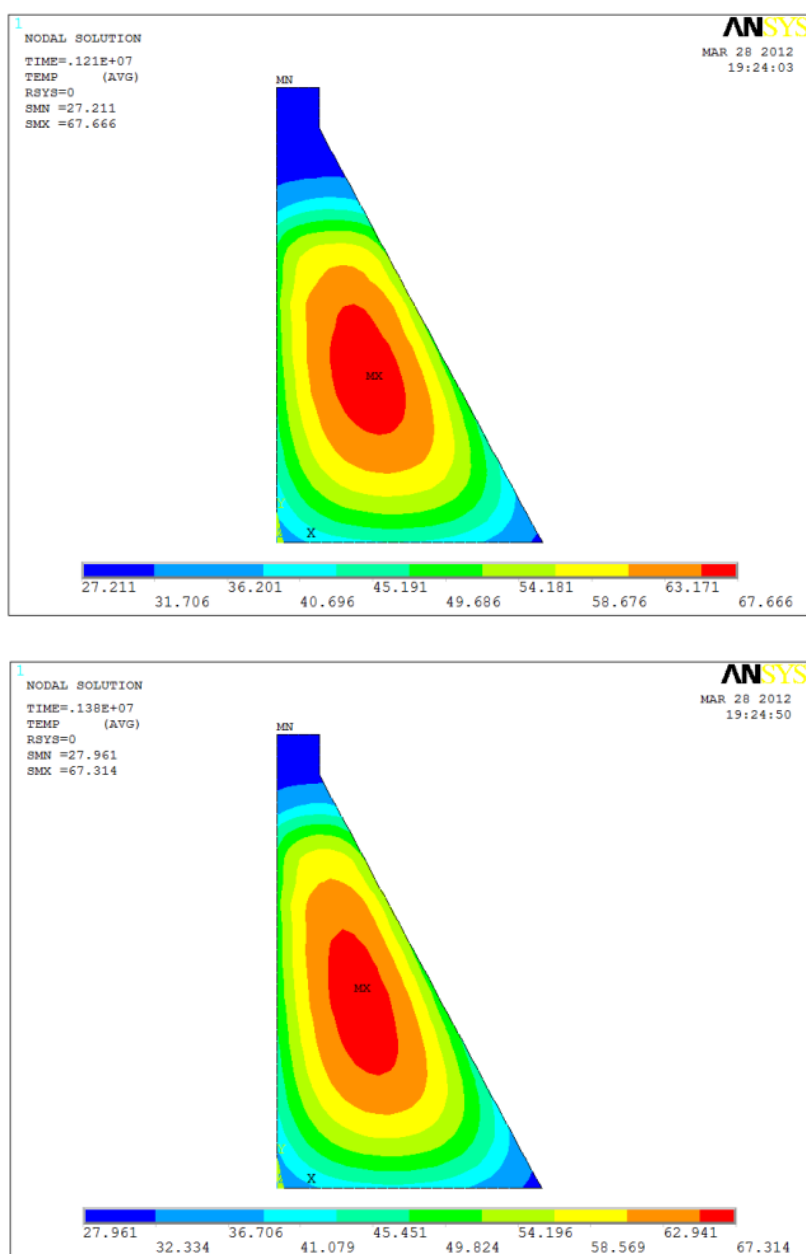


Figura 8 – Isotermas de temperatura após dois dias de concretagem para a 7ª e 8ª camada de concretagem.

As camadas nove e dez, as últimas dessa construção são mostradas na figura 9. Observa-se que há uma redução da temperatura máxima atingida e também da temperatura no contorno. O valor de temperatura máxima permanece no centro da estrutura, mas há um valor alto do gradiente térmico, diferença entre a temperatura máxima e mínima, que pode provocar a fissuração da estrutura.

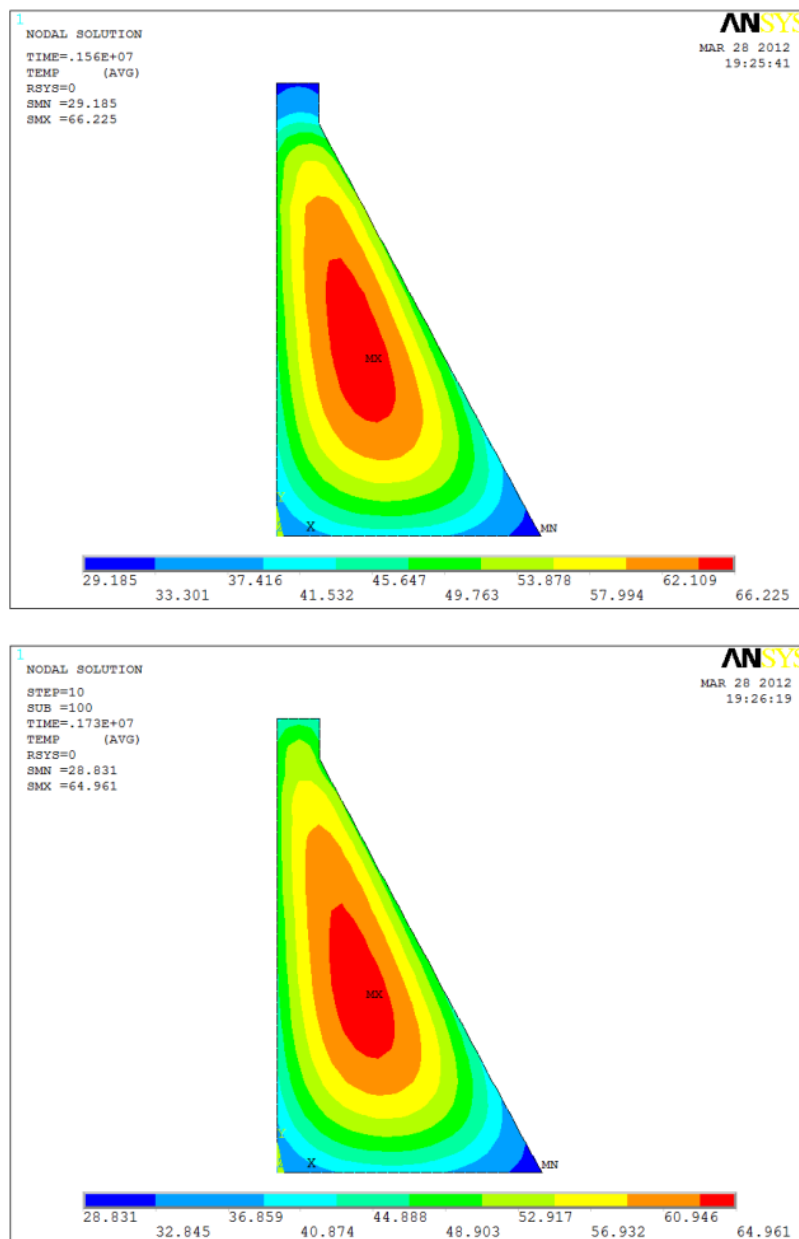


Figura 9 – Isotermas de temperatura após dois dias de concretagem para a 9ª e 10ª camada de concretagem.



6 Conclusões

O concreto massa devido a suas características de grande volume e grandes dimensões apresenta comportamento diferenciado do concreto convencional. Há uma maior preocupação com as possíveis fissuras que venham a surgir nessas estruturas, pois geralmente este material é utilizado em obras de grande porte. Os casos mais comuns de utilização são em obras de barragens, pontes e fundações. Qualquer dano que venha a ocorrer nessas estruturas pode ocasionar grandes acidentes colocando em risco muitas vidas humanas afetando também a economia local.

O estudo do concreto massa ou qualquer outra estrutura antes da execução é fundamental na prevenção dos riscos. O conhecimento detalhado da obra que se deseja construir é essencial para que futuros problemas possam ser evitados. A temperatura no interior do concreto é um exemplo disso, pois quando apresenta valores acima do desejável, provoca tensões no concreto podendo levá-lo ao rompimento.

No estudo de caso pode-se verificar que o software ANSYS é um meio rápido e prático de se obter as isotermas de temperatura para uma estrutura. Isso implica que as estruturas podem ser analisadas antes mesmo da construção, viabilizando assim estratégias de redução de tensões devido aos efeitos térmicos.

De forma geral, pode-se concluir que o ANSYS responde bem aos problemas térmicos, fornecendo respostas mais rápidas que análises de campo ou experimentais, podendo ser utilizado como meio de prevenção de riscos.

7 Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Cement and Concrete Terminology**. ACI 318 Farmington Hills, 2005.

ANDRADE, W. P. (Ed.); **Concretos: Massa, estrutural, projetado e compactado com rolo**. São Paulo: Pini, 1997. 1 v.

BASTOS, P. S. S.; **Concretos especiais**. Notas de aula. Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru, 2011.

CARVALHO, A. G.; **Energia de Ativação dos Concretos: Experimentação e Modelagem**. 144 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro: 2002.

CASTRO, J.; MARTINS, J. G. **Reabilitação: Patologia do Betão Reparação e Reforço de Estruturas**. 1ª ed. Porto, Universidade do Porto: 2006.



CHOKTAWEEKARN, P.; TANGTERMSIRIKUL, S.; **Effect of aggregate type, casting, thickness, and curing condition on restrained strain of mass concrete.** Songklanakarin J. Sci. Technol. Thailand: 2010.

COELHO, N. A.; **Um estudo numérico do efeito térmico em concreto massa.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília – UnB. Brasília: 2012.

COMITÊ INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. **Barragens e a Água no Mundo.** Paraná: Texto Faz Comunicação S/S Ltda, 2008. Título original: Dams & The World's Water.

CREAGER, William Pitcher; HINDS, Julian; JUSTIN, Joel de Witt. **Engineering for Dams.** New York: J Wiley 1964. 3 v.

ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras S.A.; **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas.** Ministério de Minas e Energia; Brasília: 2000.

FAIRBAIRN, E. M. R.; SILVOSO, M. M.; FILHO, R. D. T.; ALVES, J. L. D.; EBECKEN, N. F. F.; **Optimization of mass concrete construction using genetic algorithms.** Rio de Janeiro. Elsevier: 2003.

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.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa.** 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS; **The Specification and Quality Control of Concrete for Dams.** Paris: 2009.

KAVAMURA, E. E.; **Estudo do comportamento termo-estrutural bidimensional de barragens de concreto utilizando o Método dos Elementos Finitos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba: 2005.

KRÜGER, D. A. V.; KAVAMURA, E. E.; CARVALHO, N. F.; HECKE, M. B.; MACHADO, R. D.; LACERDA, L. A.. **Thermo-mechanical analysis of Roller Compacted Concrete Dams.** Roller Compacted Concrete Dams. Holanda, p. 625-632. 2003.

LIU, J.; QIAO, L; LI, P.; DAI, C.; **Laboratory Test and Numerical Simulation of Time-Dependent Thermomechanical Behavior of the Three-Gorges Dam;** Journal of Materials in Civil Engineering. February, 2010.



MARQUES FILHO, J. M.; **Maciços experimentais de laboratório de concreto compactado com rolo aplicado às barragens**. 278 f. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre: 2005.

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.

SANTOS, S. B. **Uma Contribuição ao Estudo do Comportamento Termomecânico de Estruturas Maciças de Concreto**. Modelagem Viscoelástica Linear e Aplicações. 287 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória: 2004.

SILVA, M. T. Q. S.; **Análise térmica transiente e de tensões em estruturas executadas em camadas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba: 2003.

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