



## ESTUDO NUMÉRICO ATRAVÉS DO MEF PARA UMA ESTRUTURA DE CONCRETO MASSA CONSTRUÍDA EM CAMADAS E COM DIFERENTES PROPRIEDADES FÍSICAS

Nailde de Amorim Coelho

naildea@yahoo.com.br

Universidade de Brasília (UnB) e Instituto Federal do Sertão Pernambucano – (IFSertao-PE)

Lineu José Pedroso

lineu@unb.br

João Henrique da Silva Rêgo

jhenriquerego@ig.com.br

Universidade de Brasília – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental- Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil - Grupo de Dinâmica e Fluido-Estrutura. Caixa Postal 04492, Campus Darcy Ribeiro, CEP 70919-9700, Brasília-DF.

**Resumo.** *O efeito térmico em estruturas de concreto massa é observado em grandes volumes de concreto. Além das variações de temperatura ao longo de sua vida útil através dos processos de radiação, condução e convecção, essas estruturas apresentam também o calor de hidratação, que é a liberação de calor no processo de hidratação do cimento. O gradiente de temperatura, pode ocasionar a fissuração, característica indesejável nessas estruturas. O concreto massa está presente em grandes estruturas, como é o caso de barragens e blocos de fundações, fato que exige uma investigação antes do processo construtivo a fim de se tentar evitar o processo de fissuração. Isso é possível de forma rápida, dinâmica e econômica, quando comparado com os procedimentos experimentais, através do uso de softwares baseados no MEF. Alguns dos fatores que proporcionam aumento de temperatura no concreto são o tipo de cimento utilizado, as composições do concreto e o processo construtivo. Neste artigo buscou-se estudar a geração de calor e o campo de temperatura numa barragem construída em camadas, através do programa ANSYS. O programa permite que as temperaturas sejam verificadas para diferentes idades do concreto, propriedades e processos construtivos. Assim, pôde-se avaliar as temperaturas obtidas e os fatores que influenciam nos resultados em um curto período de tempo e a um baixo custo. Com o auxílio do programa é possível se verificar as temperaturas para diferentes propriedades do concreto, analisando-as em diferentes dias de concretagem. Dessa forma, foi possível constatar que as propriedades do concreto influenciam diretamente no fenômeno da evolução da temperatura.*

**Palavras-chave:** *Equação de Fourier, Temperatura, Calor.*

## **1 INTRODUÇÃO**

De acordo com o American Concrete Institute - ACI (2005), o concreto massa é definido como um grande volume de concreto que apresenta expressivas dimensões 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.

Esse tipo de concreto é utilizado em obras de grandes dimensões e que demandam grandes solicitações estruturais, tais como, blocos de fundações e barragens. Assim, a preocupação com o desempenho da obra antes mesmo da execução é fundamental, pois são obras de alto investimento financeiro e que, em caso de surgimento de patologias, podem vir a provocar grandes desastres. Esse material desenvolve um aquecimento interno durante o processo de hidratação, sendo imprescindível o estudo o comportamento térmico.

Essas características influenciam para o aumento da temperatura no interior do concreto devido à liberação de calor no processo de hidratação dos produtos cimentícios, esse processo é chamado de calor de hidratação.

Junto com o calor de hidratação, os efeitos de condução, radiação e convecção, assim como as condições iniciais e de contorno do concreto também influenciam na elevação da temperatura do material. No entanto, a principal causa de preocupação nesse tipo de problema é o gradiente térmico atingido, ou seja, a diferença entre as temperaturas máxima e mínima que o concreto está sujeito. Pois, quanto maior o gradiente térmico, maior a probabilidade de surgimento de tensões térmicas que provocam as fissurações.

As características e propriedades do concreto utilizado também influenciam diretamente nos efeitos térmicos. A variação térmica depende também do tipo de cimento utilizado e suas proporções, à medida que há uma mudança na dosagem ou tipo de cimento, há uma variação nas propriedades térmicas do concreto, as quais são afetadas também pelo aumento ou diminuição da temperatura.

Alguns recursos, como a utilização de softwares, podem prever e avaliar a temperatura interna no concreto massa. Este processo permite a identificação das maiores temperaturas atingidas, do tempo de evolução do calor e dos locais de temperatura crítica na estrutura. Com esses dados é possível buscar soluções para melhor adequação ao problema (Coelho, 2012).

Um exemplo de software que pode ser utilizado nesses problemas é o ANSYS, uma ferramenta poderosa que utiliza o método dos elementos finitos para solução de vários problemas de engenharia, como estruturais, dinâmicos, térmicos, entre outros. O que proporciona uma análise rápida e econômica quando comparada com ensaios experimentais.

Assim, este trabalho busca estudar a evolução térmica do concreto massa em uma estrutura de barragem utilizando o programa ANSYS para avaliar algumas características, como temperatura de lançamento do concreto, temperatura ambiente, e propriedades térmicas. Os resultados são mostrados por meio de gráficos comparativos, nos quais é possível observar as diferenças apresentadas para cada caso. Os modelos estudados também são elaborados para a construção em camadas, outro método que busca diminuir o gradiente de temperatura em estruturas de concreto massa.

Os resultados podem ser utilizados para identificação das situações mais críticas e, conseqüentemente, contribuirão para uma busca pelas melhores soluções. Vale ressaltar ainda que o estudo pode ser aplicado para qualquer tipo de estrutura em concreto massa. Com isso, procura-se conhecer esse material, avaliando os fatores que influenciam no processo térmico.

## 2 CONCRETO MASSA

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 fissuras no concreto.

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.

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).

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 na reação de hidratação do cimento. 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.

Albuquerque (2009) afirma que outra tecnologia utilizada para redução de temperatura é o concreto compactado com rolo (CCR). Esse se diferencia do concreto massa convencional por apresentar consistência seca, consumo de cimento muito baixo e, conseqüentemente, menor elevação da temperatura, com a vantagem de resultar num custo de transporte e compactação mais baixo.

Segundo Krüger (2001), durante as fases de construção, a medição e acompanhamento da evolução da temperatura em pontos estratégicos possibilita a comparação com as estimativas efetuadas durante a fase de projeto. Ocorrendo discrepância entre os valores previstos e medidos, que possam vir a causar danos à estrutura, a análise dos resultados permite a definição de medidas mitigadoras e de controles para que a variação térmica não seja prejudicial.

Para se acompanhar um processo é necessário eleger quais os parâmetros a serem monitorados e seus respectivos valores ou tendências, levando-se em conta o grau de influência de cada um deles nos resultados desejados. Não há registro histórico na literatura do acompanhamento das estruturas construídas; e somente em algumas estruturas modernas há casos isolados de um acompanhamento técnico de monitoramento tanto nas fases construtivas como operacionais das barragens. É neste cenário que surge então a importância de se criar modelos estruturais para o concreto em suas várias idades e ter os valores das propriedades que o caracterizem instantânea, precisa e exatamente (Kavamura, 2005).

Para tentar reduzir a geração de calor interno do concreto algumas medidas ou artifícios podem ser adotados (Coelho *et al.*, 2012):

- Escolher um cimento Portland com uma composição química que resulte um desprendimento lento de calor.
- O uso de agregado com um tamanho máximo grande e com baixa expansibilidade térmica.
- O isolamento superficial.
- Utilização dos processos de pré-resfriamento do concreto e/ou pós-resfriamento do concreto.

### **3 PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO**

O estudo das propriedades térmicas do concreto, massa e calor específico, condutividade e difusividade térmica, são importantes para o desenvolvimento de gradientes de temperatura, deformações térmicas, empenamento e fissuração nas primeiras idades do concreto e também para a isolamento térmica proporcionada pelo serviço do concreto. As definições de cada uma delas são mostradas a seguir (Coelho, 2013):

- Massa específica ( $d$ ) – é a relação entre a massa de um corpo sobre o volume que esse mesmo corpo ocupa;
- Condutividade térmica ( $k$ ) – é a capacidade do material conduzir calor, definido como a relação entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura;
- Calor Específico ( $c$ ) - é um parâmetro físico que expressa à capacidade de um material armazenar calor;
- Difusividade térmica ( $\delta$ ) - representa a velocidade à qual a temperatura varia no interior de uma massa, sendo, portanto um índice da facilidade com a qual o

concreto pode sofrer variações de temperatura. A difusividade térmica é calculada de acordo com a Equação 1.

$$\delta = \frac{k}{cd} \quad (1)$$

Silveira (1961) falando de uma estrutura de concreto massa, afirmou que uma 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.

#### **4 EFEITOS TÉRMICOS EM CONCRETO MASSA**

Em uma estrutura de concreto massa 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.

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. Dependendo do material do corpo, a radiação solar recebida pode ser parte refletida e outra parte absorvida, o que aumenta sua temperatura. Quanto mais escura uma superfície maior será a absorção por ela adquirida sendo que a cor preta absorve totalmente a radiação imposta. Também influencia na quantidade de calor absorvido a inclinação dos raios solares.

Analisando o concreto, como também outras estruturas expostas ao ambiente, durante as horas diurnas existe um ganho de energia calorífica. Tal fato é resultado da radiação solar incidente sobre as superfícies da mesma, a qual absorve parte desta energia. Contrariamente, no período noturno, ocorre uma perda de energia calorífica armazenada pela estrutura, devido, em parte, a re-radiação emitida por esta ao ambiente (Calmon, 1995 apud Santos, 2004).

O autor também ressalta que as temperaturas não muito altas dos efeitos da radiação térmica não são muito significativas e podem ser desprezados na modelação do fenômeno físico.

A 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.

A condução é 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, o qual dependerá

das variáveis que intervêm no fenômeno da convecção: velocidade do vento, temperatura na superfície e temperatura ambiente do ar.

O calor de hidratação apresenta grande teor significativo no desenvolvimento das temperaturas do concreto, portanto será dada uma maior ênfase ao assunto no próximo tópico.

## 4.1 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 conseqüência o desenvolvimento de calor de hidratação, alterando-se as quantidades dos compostos do cimento; sendo o  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$  os componentes mais importantes 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 2 a 5 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  $AFt$  simboliza a etringita.

Com a introdução da água, os componentes do cimento começam a se hidratar. Os produtos formados em sua maioria são os silicatos de cálcio hidratado (CSH). A medida em que se desenvolvem mais CSH a mistura ganha resistência. Imediatamente após a introdução da água na mistura de cimento, um pequeno período de intensa atividade química ocorre. Esta atividade química corresponde à dissolução dos íons, reação da água com o  $C_3A$ , na qual ocorre a liberação de uma grande quantidade de calor (Carvalho, 2002).

Atkins (1998) *apud* Carvalho (2002) relaciona ainda o calor de hidratação com a energia de ativação: a energia de ativação provém da ideia de que as moléculas devem possuir uma quantidade mínima de energia cinética para reagir. Esta energia é aquela necessária para transformar os reagentes em produtos. Nas reações do tipo exotérmicas (caso da hidratação do cimento), os reagentes estão em um estado de energia maior do que o estado dos produtos (Fig. 1). Assim sendo, a energia de ativação é a diferença entre a energia necessária para ativar a reação e o nível de energia dos reagentes, sendo que o calor total gerado na reação é a diferença entre o nível de energia dos reagentes e o nível de energia dos produtos.

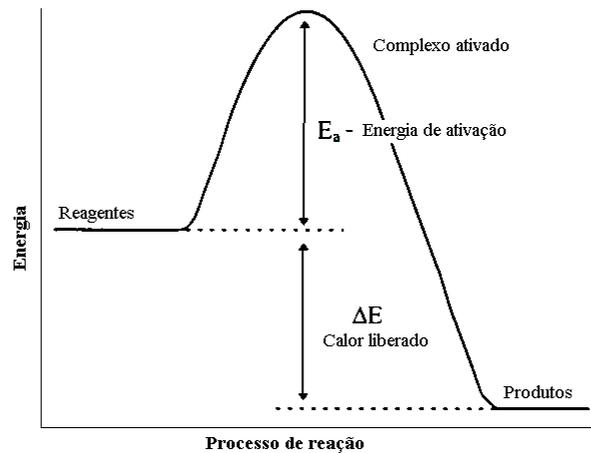


Figura 1 - Perfil de energia durante as reações (Brown et al., 1991 apud Carvalho, 2002)

O grau de dependência entre as reações dos minerais de clínquer ainda deixa muitos fatos inexplicados e, até agora, é difícil avaliar quantitativamente as possíveis causas e seus graus de influência. Apesar disso, é de consenso que concretos com cimentos de altos teores de C3S e C3A terão alta resistência inicial somada a uma grande liberação de calor durante a sua hidratação. Por outro lado, um concreto com alto teor de C2S irá promover uma baixa resistência inicial, alta resistência a longo prazo e, ainda, baixa liberação de calor (Maekawa, 1999 apud Faria, 2004). A Figura 2 mostra a quantidade de calor desenvolvida por cada componente do cimento segundo estudos de Choktaweekarn e Tangtermsirikul (2010);

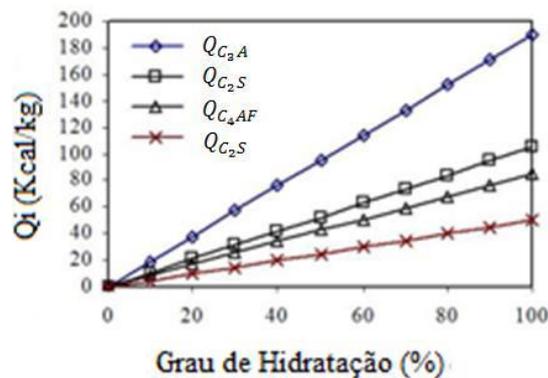


Figura 2 - Calor desenvolvido por cada componente de cimento (Choktaweekarn e Tangtermsirikul, 2010).

Conforme Silveira (1961) outros fatores afetam diretamente o estado térmico de uma barragem. Entre esses fatores podem citar-se os fatores climáticos que, de uma forma geral, influenciam as condições nos limites, as propriedades dos materiais que atuam sobre a difusão do calor na barragem e os métodos de construção que atuam, principalmente, sobre as condições iniciais. Dentre os fatores climáticos que interessa considerar tem-se a temperatura do ar, temperatura da água, velocidade do vento, ritmo de concretagem.

As leis de transferência de calor demonstram que em sistemas com fonte interna de calor, este pode fluir de um corpo, inversamente ao quadrado de sua menor dimensão. Considerando algumas paredes feitas com concreto normal e exposta ao ar em ambas as faces, temos que: para uma parede de 15 cm de espessura 95% do calor no concreto será perdido para o ar em 1h e 30 min. Para uma parede de 1,5 m de espessura, esta mesma proporção de calor seria perdida em uma semana. Para uma parede de 15 m de espessura, que poderia representar a espessura de uma barragem tipo arco, levaria 2 anos para dissipar 95% do calor armazenado, enquanto que para uma barragem de 152 m de espessura levaria 200 anos (Inoue, 1986).

## 5 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Um dos principais objetivos da análise térmica é determinar o campo de temperatura em um domínio, resultante das condições impostas em suas fronteiras, ou fontes de calor geradas no interior desse domínio. Ou seja, deseja-se conhecer a distribuição final de temperaturas, ao longo do tempo e da posição de um ponto dentro desse domínio. 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.

### 5.1 Equação geral da condução de calor

A dedução da equação do calor baseada em Azenha (2009) e Rao (1999) é dada pela equação de taxa de condução em sólidos é conhecida como a Lei de Fourier, e é expresso por uma dimensão como a Eq. 1.

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (6)$$

Onde:

$q_x$  é o fluxo de calor (W) através de uma área  $A$  ( $m^2$ );  $k$  é a condutividade térmica ( $\frac{W}{mK}$ );

$T$  é a temperatura (K);  $x$  é a coordenada espacial (m).

A equação de equilíbrio de energias em coordenadas cartesianas pode ser mostrado com relação a um volume infinitesimal elementar de matéria como representado na Fig. 3.

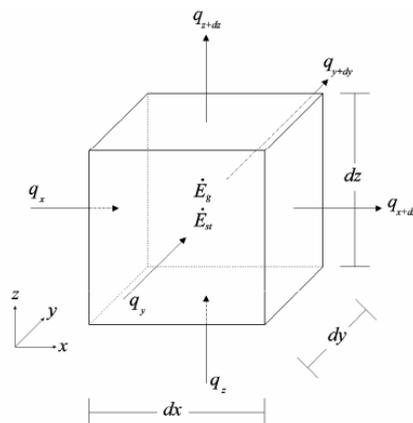
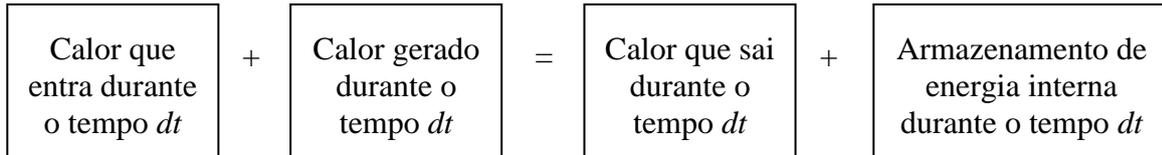


Figura 3 – Volume infinitesimal elementar de matéria (Azenha, 2009)

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):

$$q_{x+\partial x} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \partial x \quad q_{y+\partial y} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} \partial y \quad q_{z+\partial z} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} \partial z \quad (7)$$

A equação do balanço energético com base na Fig. 3 é:



Ou ainda:

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g = \dot{E}_{out} + \dot{E}_{st} \quad (8)$$

Denotando por  $\dot{q}$  ( $\frac{W}{m^3}$ ), a taxa de geração de calor interno (devido à hidratação do cimento) por unidade de volume, a taxa de geração de energia no interior do volume é expresso por:

$$\dot{E}_g = \dot{q} \partial_x \partial_y \partial_z \quad (9)$$

A taxa de acumulação de energia no interior do volume,  $\dot{E}_{st}$  (W), pode ser expressa como uma função da derivada da temperatura em relação ao tempo  $\frac{\partial T}{\partial t}$ , do calor específico do material  $c$  ( $\frac{J}{kg K}$ ) e da massa específica  $\rho$  ( $\frac{kg}{m^3}$ ):

$$\dot{E}_g = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \partial_x \partial_y \partial_z \quad (10)$$

Trabalhando as equações acima com o balanço energético chega-se a Equação 11.

$$k \nabla T^2 + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

A equação 11 é a equação diferencial que rege a condução de calor de um corpo sólido isotrópico. Sendo as condutividades térmicas nas direções  $x$ ,  $y$ ,  $z$  assumidas como  $k_x = k_y = k_z = k = \text{constante}$ . Esta também pode ser escrita como:

$$\nabla T^2 + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

Em que  $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ , que é chamado termo de difusividade. Se não houver geração de calor interna a Eq. 12 se reduz à Eq. 13:

$$\nabla T^2 = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (13)$$

## **5.2 Aspectos computacionais**

A maior parte dos problemas práticos de engenharia envolvem problemas complexos que não apresentam solução analítica. O nível de dificuldade está relacionado com a complexidade da geometria envolvida, as equações que descrevem o fenômeno físico, ou a variação das grandezas envolvidas.

Para a solução numérica/computacional envolvendo a parte térmica utilizou-se o programa ANSYS baseado no método dos elementos finitos (MEF). A escolha foi motivada por se tratar de uma programa de análise versátil com uma boa aceitação e utilização nas aplicações de engenharia. É uma ferramenta que permite uma interação entre temperatura e tensão, e também possui recursos que permitem visualizar os resultados através de uma excelente interface software-usuário.

O domínio do problema é subdividido em pequenas regiões discretas (elementos finitos). Estes elementos são definidos pela geometria, por nós e funções de interpolação. As equações são escritas para cada elemento, estes elementos são montados e geram uma matriz global. Carregamentos e restrições são aplicados e a solução é então determinada.

A quantidade de elementos a ser utilizado foi estudada para cada caso, e buscou-se sempre a convergência. Para um caso de solução conhecida da literatura, inicialmente fez-se a discretização de uma malha e analisou-se seus resultados, posteriormente, refinou-se a malha e observou-se se os valores estão próximos aos encontrados anteriormente. Caso isso aconteça, então a primeira malha utilizada é suficiente para a análise dos resultados. Convém observar também que quanto mais refinada a malha, maior será o tempo de processamento do programa. Os resultados mostrados neste artigo utilizam malhas testadas anteriormente em (Coelho, 2012).

O objetivo dessa análise é simular matematicamente o comportamento térmico do concreto massa num problema real. Isto é possível a partir da criação de um modelo que represente a situação pretendida. Então, este modelo dispõe de todos os nós, elementos, propriedades dos materiais, constantes reais, condições de limite e outras características que são utilizados para representar o sistema físico de interesse.

Para a análise dos efeitos térmicos nesse trabalho foi utilizado o elemento PLANE55 do ANSYS 11.0 que tem capacidade de condução térmica em duas dimensões, 2D. O elemento tem quatro nós e um único grau de liberdade por nó (a temperatura). O elemento é mostrado na Fig. 4 (biblioteca do ANSYS).

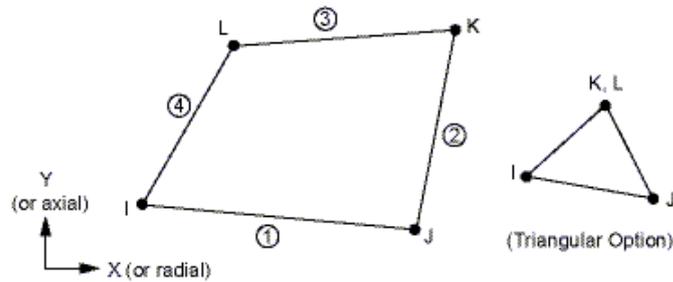


Figura 4 - Geometria do elemento PLANE55 (biblioteca do ANSYS).

Um outro elemento que poderia ser usado seria o elemento PLANE 77, também para análises térmicas em duas dimensões. Apresenta um grau de liberdade, a temperatura e oito nós, adequado para representar fronteiras curvas.

## 6 RESULTADOS

Esta sessão mostra o uso da simulação numérica através do programa ANSYS na análise de uma estrutura de concreto massa, de forma que se possa observar o comportamento térmico da mesma.

Inicialmente, será mostrada o estudo em uma viga, que valida a utilização do programa neste tipo de estudo pela autora, e posteriormente será realizada a simulação em um perfil de barragem. Para ambos os casos foi utilizado o método de construção em camadas o recurso *Birth and Death* no ANSYS. Sua função é de ativar e desativar os elementos conforme vai prosseguindo a análise. Nos modelos estudados neste trabalho, primeiro desativa todos os elementos e a medida que o número de camada vai aumentando os elementos são ativados supondo a construção de uma nova camada.

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).

### 6.1 Viga da usina hidrelétrica Serra da Mesa

Andrade (1997) traz o estudo realizado pela equipe de Furnas para as vigas de uma ponte rolante da Usina Hidrelétrica (UHE) Serra da Mesa localizada na Bacia do Alto Tocantins, em Goiás. As vigas são estruturas atirantadas ao maciço rochoso da caverna da Casa de Força, como mostra a Fig. 5. A Fig. 5 mostra a geometria e o perfil modelado no programa para a viga estudada.

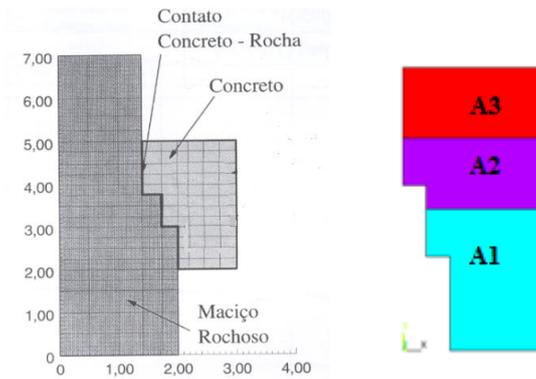


Figura 5 – Geometria da viga estudada (Andrade, 1997) e áreas estudadas com o ANSYS.

Andrade (1997) considerou a viga construída em três camadas, sendo a primeira de 1,5 m de espessura e as demais de 0,75 m de espessura e temperatura ambiente de 27°C. As propriedades utilizadas foram: condutividade térmica ( $k$ ) = 2,27 W/m.°C; massa específica ou densidade ( $d$ ) = 2295 kg/m<sup>3</sup>; calor específico ( $c$ ) = 1063 J/g.°C. Para análise ele considerou a concretagem com intervalos de 7 e 14 dias; em todos os casos encontrou temperatura máxima no concreto de 51,7°C. Na simulação computacional, encontrou-se temperatura máxima para 36h de concretagem com um valor de 56,4°C, como mostra a Fig. 6. Analisando a viga para intervalos de concretagem de 7 e 14 dias, os resultados obtidos são mostrados na Tabela 1 e comparados aos encontrados por Krüger (2001).

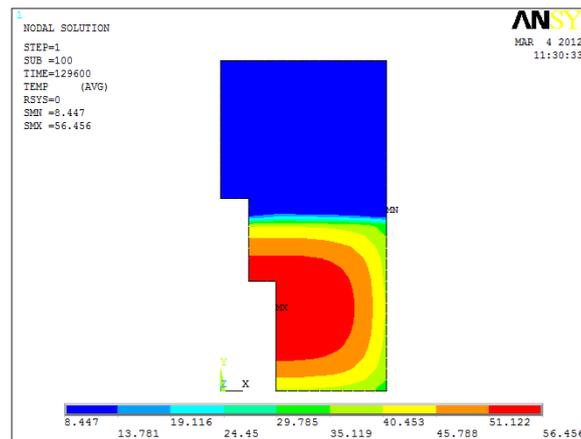


Figura 6 – Temperatura máxima encontrada no ANSYS.

Tabela 1 - Temperatura máxima para a viga.

Camada	Temperatura Máxima		
	Intervalo de lançamento das camadas		
	7 dias	14 dias	7 dias (Krüger, 2001)
1	43.106 °C	35.583 °C	44.310 °C
2	43.585 °C	31.994 °C	43.670 °C
3	46.089 °C	34.816 °C	44.220 °C

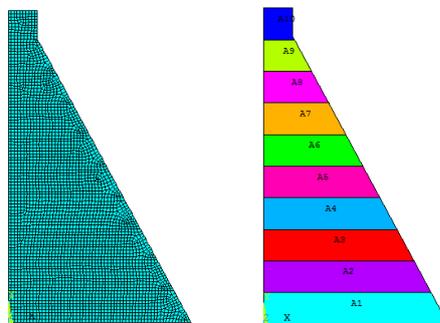
É perceptível uma boa concordância entre os resultados encontrados por Andrade (1997), Krüger (2001) e o presente trabalho. Desta forma, pode-se ter o programa ANSYS como uma ferramenta confiável nesse tipo de análise, e, portanto tornando seguras outras análises semelhantes.

## 6.2 Estrutura de Barragem em camadas

Neste tópico, as análises foram efetuadas em um perfil de barragem baseado em uma seção típica real, porém, 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. Na verdade tínhamos limitações computacionais para as análises mais pesadas.

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.

Para esse estudo, admitiu-se a estrutura maciça, ou seja, sem a presença da galeria de drenagem, e a construção em camadas de 1 m. 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. A Fig. 7 representa as camadas estudadas, assim como a malha utilizada nas modelagens. De uma forma geral, as propriedades empregadas para concreto foram as mesmas utilizadas por Krüger (2001), Silva (2003) e Kavamura (2005).



**Figura 7 – Malha de elementos finitos e áreas utilizadas na modelagem de um perfil de barragem com o programa ANSYS.**

Para os estudos mostrados no trabalho as propriedades adotadas para o concreto massa (valor dito normal/usual) foram:

Condutividade térmica ( $k$ ) = 1,79 W/m.°C; Massa específica ou densidade ( $d$ ) = 2300 kg/m<sup>3</sup>; Calor específico ( $c$ ) = 1105 J/g.°C; Coeficiente de convecção ( $h$ ) = 13,95 W/m<sup>2</sup>.°C;

Para simplificação de apresentação, os resultados foram disponibilizados em gráficos. Entretanto, outros resultados, com outras estruturas, modelos e condições iniciais e de contorno podem ser comparados e observados em Azenha (2009), Coelho *et al.* (2012), Coelho *et al.* (2013), Coelho (2012), Gomes (2011), Kavamura (2005), Krüger (2001), Santos (2004), Silva (2003), entre outros.

### 6.3 Análise das condições iniciais e de contorno

A fim de observar a influência das temperaturas de lançamento do concreto, foram simuladas seis temperaturas de lançamento do concreto, 20°C, 25,5°C, 27°C, 30°C, 40°C e 50°C, sendo a temperatura ambiente (T) igual a 25,5°C. Os resultados obtidos são mostrados nas Fig. 8 e 9, sendo que a Fig. 8 apresenta o perfil das isotermas de temperatura para temperatura de lançamento do concreto de 20°C. Os demais são desenvolvidos de forma semelhante e devido a uma limitação de espaço não são mostrados neste trabalho, podendo ser encontrados em Coelho e Pedroso (2013).

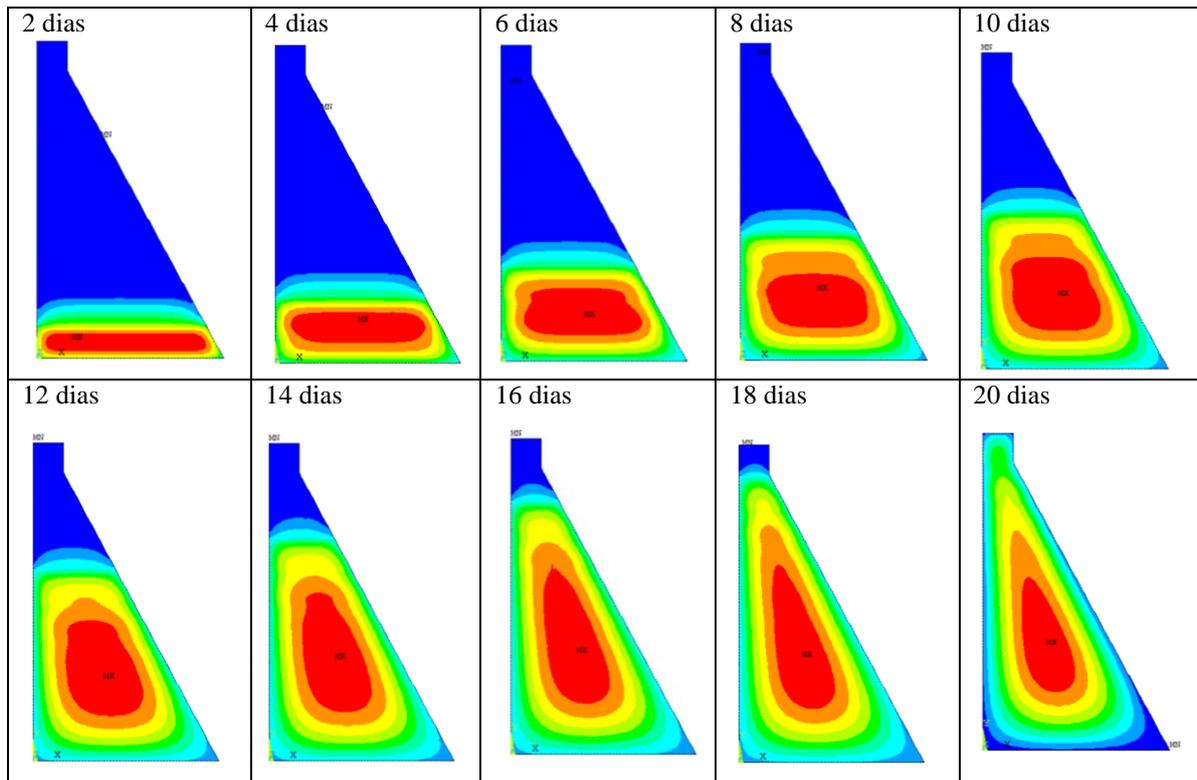


Figura 8 – Isotermas de temperatura para temperatura ambiente de 25,5°C e temperatura de lançamento do concreto de 20°C.

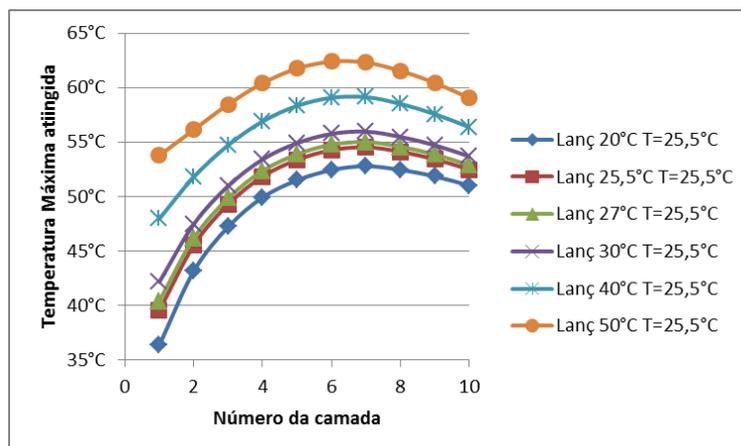


Figura 9 – Temperaturas variando com a temperatura de lançamento do concreto.

Para o modelo, nota-se que menores temperaturas foram atingidas para o concreto lançado a 20°C e maiores temperaturas para um concreto com temperatura inicial de 50°C.

Dessa forma, pode-se confirmar que na construção em camadas, assim como na construção convencional, quanto maior a temperatura do lançamento do concreto, maior será a temperatura atingida.

Na Fig. 10 tem-se o gráfico comparativo entre as variações da temperatura no contono da estrutura de concreto massa. Considerou-se a temperatura de lançamento do concreto fixa, 27°C, e a temperatura no contorno de 20°C, 25,5°C, 30°C e 40°C, supondo não haver variação ao longo do processo construtivo. Neste caso, assim como esperado, por semelhança com o processo construtivo convencional, quanto maior a temperatura do contorno, maior também a temperatura máxima alcançada no concreto. Pode-se ressaltar ainda que, analisando o caso anterior, os resultados para a temperatura no contorno de 40°C são maiores que no caso para o lançamento do concreto com 50°C e temperatura do contorno de 25,5°C.

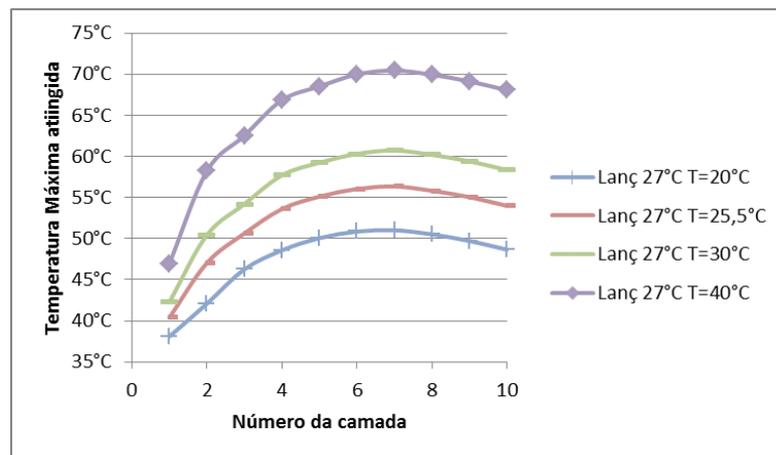


Figura 10 – Resultados para variação de temperatura no contorno.

Alterando-se a temperatura da face esquerda da barragem mostrada na Fig. 7 para 25,5°C, mantendo as demais faces com as condições do modelo anterior e comparando os dois resultados, nota-se pouca variação nas temperaturas máximas obtidas. O caso que apresenta maior variação é quando há temperatura no contorno vale 40°C, pois nesta hipótese há uma maior diferença entre as temperaturas impostas nas faces, como mostra a Fig. 11.

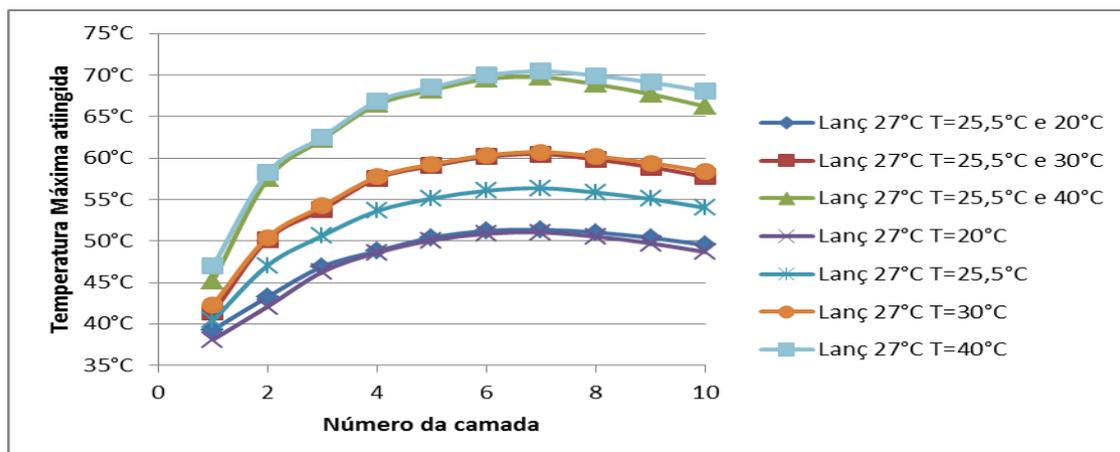


Figura 11 – Resultados para duas temperaturas no contorno.

## **6.4 Estudo das propriedades térmicas**

Para um melhor entendimento da influência dos parâmetros (calor específico(c), massa específica(d) e condutividade térmica(k)) utilizados na Equação de Fourier para os efeitos térmicos do concreto, estudou-se a estrutura da barragem mencionada construída em camadas para diferentes parâmetros térmicos.

É importante ressaltar que os parâmetros foram analisados supondo-se os valores máximos e mínimos admitidos para o concreto. Sendo que estes foram aproximados para valores inteiros; para o número inteiro imediatamente inferior no caso dos valores mínimos; e para o número inteiro imediatamente superior, no caso do valor máximo. Considerou-se também a não existência da dependência entre eles desses parâmetros e a não alteração dos seus valores com a mudança de temperatura.

As Fig. 12, 13 e 14, mostram as temperaturas para diferentes valores da condutividade térmica, da massa específica e da condutividade térmica, respectivamente. Na Fig. 15 há uma comparação entre esses resultados.

Observa-se que para menores valores de condutividade térmica, massa específica e calor específico, maiores as temperaturas alcançadas. Para a condutividade térmica, tem-se que uma menor condutividade térmica proporciona uma maior dificuldade de dissipação do calor gerado internamente nesse corpo.

Com a redução da massa específica tem-se o aumento de temperatura. Sabe-se que a massa específica é a relação entre a massa de um corpo sobre o volume que esse mesmo corpo ocupa; e que a redução da relação água/cimento na mistura aumenta sua massa específica. Dessa forma, pode-se afirmar que para uma menor massa específica, têm-se uma maior porosidade, fato que dificulta a dissipação interna de calor

Quanto ao calor específico, sabe-se que este corresponde à quantidade de calor necessária para elevar em um grau a temperatura de uma unidade de massa; e que atinge um valor máximo para o concreto saturado. Observa-se que para um menor valor de calor específico, têm-se maiores temperaturas, ou seja, uma quantidade menor de calor é necessária para que haja elevação de temperatura. Na Fig. 15 percebe-se também que o calor específico baixo implica na maior temperatura atingida, denotando uma maior influência na elevação térmica. Posteriormente, há uma maior elevação pela massa específica e por fim, pela condutividade térmica.

As Fig. 16, 17 e 18, mostram as isotermas finais de temperatura para a condutividade térmica, a massa específica e a condutividade térmica, respectivamente. Nota-se uma pequena variação nas isotermas e nos pontos de aplicação da temperatura máxima.

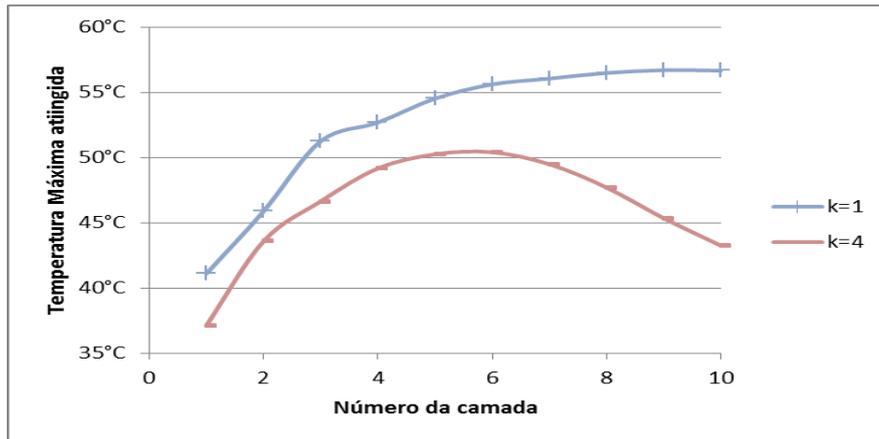


Figura 12 – Temperatura para diferentes valores de condutividade térmica.

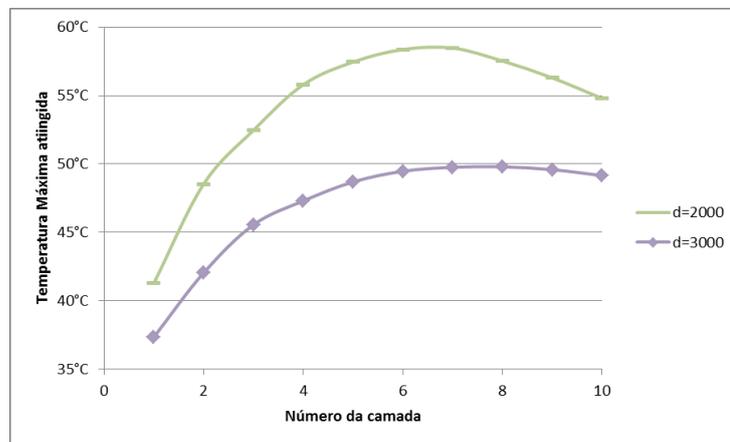


Figura 13 – Temperatura para diferentes valores de massa específica.

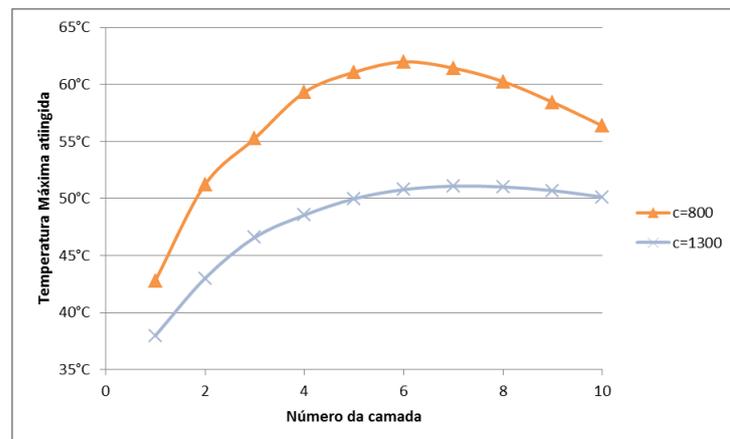


Figura 14 – Temperatura para diferentes valores de calor específico.

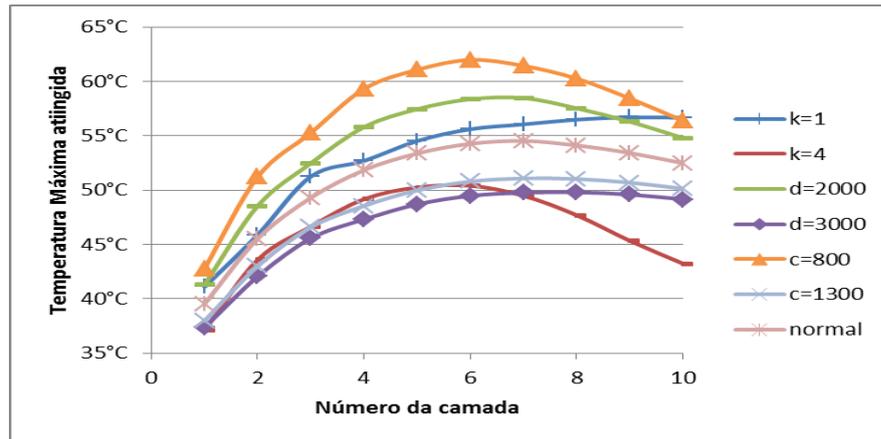


Figura 15 – Temperatura para diferentes propriedades térmica.

As Fig. 16, 17 e 18, mostram as isotermas finais de temperatura para a condutividade térmica, a massa específica e a condutividade térmica, respectivamente. Nota-se uma pequena variação nas isotermas e nos pontos de aplicação da temperatura máxima.

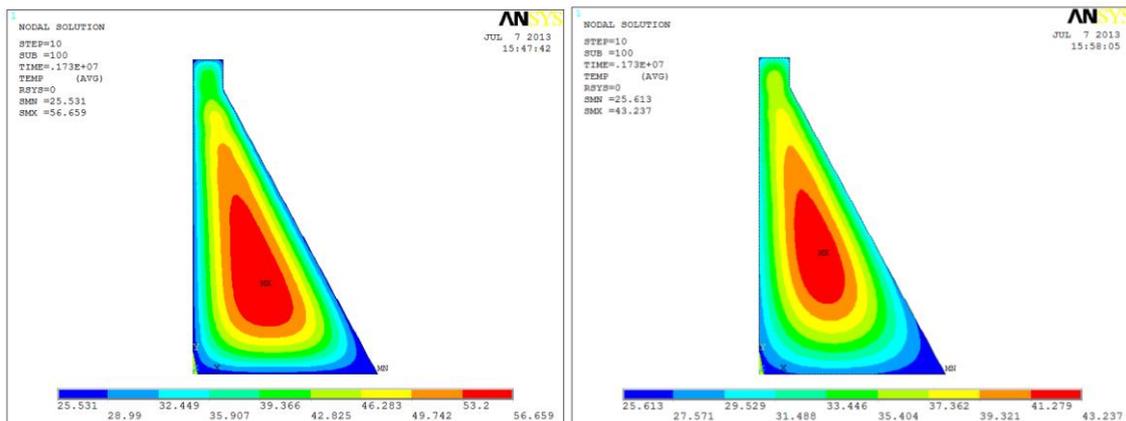


Figura 16 – Isotermas de temperatura para  $k = 1 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$  e  $k = 4 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ .

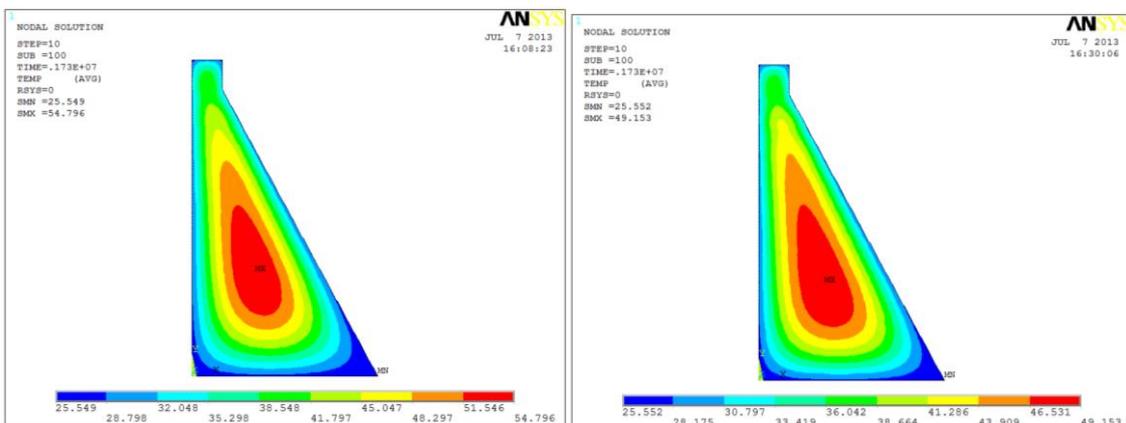


Figura 17 – Isotermas de temperatura para  $d = 2000 \text{ kg/m}^3$  e  $d = 3000 \text{ kg/m}^3$ .

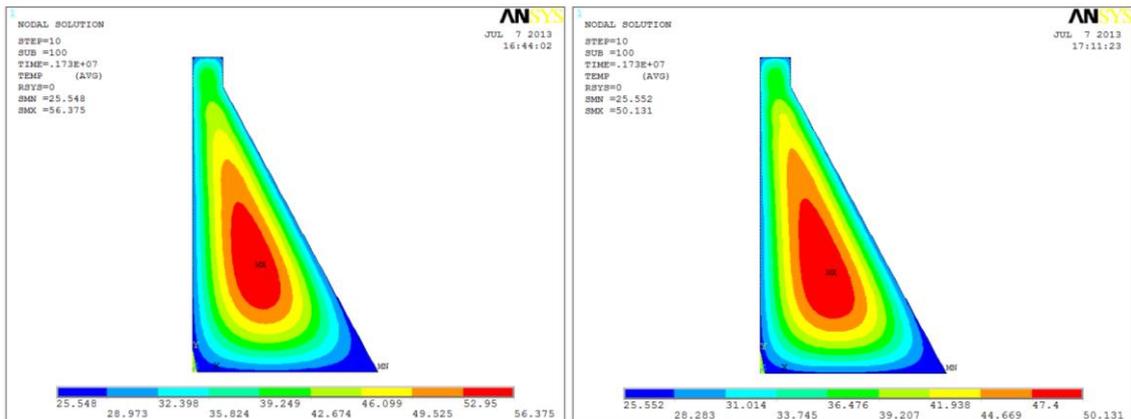


Figura 18 – Isotermas de temperatura para  $c = 800 \text{ J/g}^\circ\text{C}$  e  $c = 1300 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ .

## 7 CONCLUSÕES

O estudo do concreto massa para barragens 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 suportável, provoca tensões no concreto podendo danificá-lo.

Vários são os fatores que influenciam na temperatura do concreto massa, entre eles tem-se o tipo e a quantidade de cimento utilizado, a relação água-cimento, a finura do cimento, a espessura da camada concretada, a temperatura de lançamento, e os processos de pré ou pós-refriamento, quando existentes. Influi também na temperatura máxima alcançada pelo concreto no ambiente em que se encontra.

Para as condições iniciais, foi possível observar que a temperatura máxima atingida é diretamente proporcional à temperatura de lançamento do concreto, ou seja, quanto maior a temperatura de lançamento, maior será a temperatura final atingida pelo concreto. Com isso, ressalta-se a importância do processo de pré-resfriamento do concreto utilizando água gelada ou gelo no processo de construção do concreto.

Analisando as condições de contorno, conclui-se que quanto mais próxima a temperatura de lançamento da temperatura ambiente, menor será o gradiente térmico e, conseqüentemente, menor o risco de fissuração. A temperatura do contorno, ou seja, as condições ambientais, também influencia na temperatura máxima. Assim, é possível afirmar que é desejável que as temperaturas do concreto, da superfície de recebimento e do ambiente estejam próximas.

Na análise dos parâmetros, notou-se que uma menor a condutividade térmica do concreto implica em uma maior temperatura máxima devido à dificuldade de dissipação do calor gerado internamente nesse corpo. Com a redução da massa específica tem-se o aumento da temperatura. Isso porque têm-se uma maior porosidade, o que dificulta a dissipação interna de calor. Para o calor específico, quanto menor o valor, maior a temperatura, pois uma quantidade menor de calor é necessária para que haja elevação de temperatura. Dessa forma, percebe-se que para redução do calor interno é desejável um concreto com uma maior condutividade térmica, densidade e calor específico.

Verifica-se também que o Programa ANSYS é um meio rápido e prático de se obter o campo de temperaturas em qualquer estrutura. Isso implica que as estruturas podem ser analisadas antes mesmo da construção, viabilizando assim estratégias de redução de tensões devido aos efeitos térmicos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimentos à equipe do PECC – Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da UnB – Universidade de Brasília, a agência de fomento CNPq e ao Instituto Federal Pernambucano – Campus salgueiro.

## **REFERENCIAS**

American Concrete Institute. *Cement and Concrete Terminology*. ACI 318 Farmington Hills, 2005.

Albuquerque, A. C.; *Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu*. 259 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre: 2009.

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

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.

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*. Songklanakar 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.

Coelho, N. A.; Pedroso, L. J.; *Análise térmica através de software computacional em uma estrutura de concreto massa construída em camadas para diferentes propriedades térmicas*. Relatório Técnico – NAC1-03/2013. Universidade de Brasília – UnB. Brasília: 2013.

Coelho, N. A.; Rêgo, J. H. S.; Pedroso, L. J.; Nepomuceno, A. A.; *Análise numérica e térmica de blocos de concreto massa por meio de um código computacional*. Maceió. IBRACON: 2012.

Coelho, N. A.; Pedroso, L. J.; Rêgo, J. H. S.; Nepomuceno, A. A.; *Influência das propriedades térmicas do concreto massa na análise da temperatura em estruturas de grandes dimensões*. São Paulo. 10th World Congress on Computational Mechanics: 2012

Coelho, N. A.; Pedroso, L. J.; Rêgo, J. H. S.; Nepomuceno, A. A.; *Um Estudo Numérico dos Efeitos Térmicos Provocados Pelo Calor de Hidratação do Cimento em Barragens*. Maceió. Dam World – IBRACON: 2012.

Coelho, N. A.; Pedroso, L. J.; Rêgo, J. H. S.; *A influência das propriedades térmicas do concreto na construção de barragens de gravidade*. Recife. Seminário nacional de grandes barragens - SNGB: 2013.

Fairbairn, E. M. R.; Silvano, 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.

Gomes, F.M.P.; *Concreto nas primeiras idades: propriedades e modelagem termomecânica simplificada*. 160f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás – UFG. Goiânia: 2011.

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.

Inoue, G.; *Medidas Preventivas de Controle de Temperatura que Induz Fissuração no Concreto Massa*. Boletim Técnico Nº 7; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP; São Paulo: 1986.

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.; *Análise térmica transiente de estruturas de concreto executadas por camadas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba: 2001.

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.

Rao, S. S.; *The Finite Element Method in Engineering*. 3ª ed. United States of America: Butterworth Heinemann: 1999.

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.