

A INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO NA CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS DE GRAVIDADE

Nailde de Amorim COELHO
Doutoranda, M.Sc. – Universidade de Brasília.

Lineu José PEDROSO
Professor, PhD – Universidade de Brasília.

João Henrique da Silva RÊGO
Professor, DSc. – Universidade de Brasília.

Antonio Alberto NEPOMUCENO
Professor, Dr. Ing. – Universidade de Brasília.

RESUMO

As barragens são obras de grande impacto social, econômico e ambiental. Desta forma, uma análise prévia das tensões, antes da construção, assim como dos fatores que as provocam, pode acarretar em soluções mais econômicas e com menores impactos para a sociedade. O estudo das propriedades térmicas do concreto são importantes fatores para o conhecimento dos gradientes de temperatura desenvolvidos nas primeiras idades do concreto. Alterando-as na construção de barragens, há uma mudança no gradiente térmico desenvolvido, isso implica dizer que a quantidade de cimento utilizada deve ser bem monitorada afim de se obter propriedades que proporcionem uma menor elevação de temperatura para o concreto massa utilizado em barragens de gravidade.

ABSTRACT

The dams are shell-work of great impact social, economic and environmental. So, a preliminary analysis of the tensions, before construction, as well as the factors that cause, can lead to more economical solutions with lower impacts on society. The study of the thermal properties of concrete is an important factor for the knowledge of the temperature gradients developed in the early ages of concrete. Altering the construction of dams, there is a change in thermal gradient developed; this implies that the amount of cement used should be well monitored in order to obtain properties which provide a lower temperature rise for the concrete mass used in gravity dams.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o American Concrete Institute [1], o concreto massa é definido como um grande 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.

Muitas obras utilizam o concreto massa na sua confecção. Um exemplo dessa aplicação é a construção de barragens. Tais estruturas normalmente apresentam grandes dimensões e grandes volumes de concreto. As construções que consomem grandes volumes de concreto tornam-se preocupantes devido à probabilidade do surgimento de patologias, tais como fissurações e trincas. Quando os compostos do cimento entram em contato com a água, eles se hidratam e liberam calor, conhecido como calor de hidratação. A geração de calor pode provocar tensões térmicas que comprometem a estabilidade da estrutura, pois com elas pode ocorrer o início das fissurações [2].

O estudo do concreto massa torna-se importante uma vez que ainda é bastante aplicado no Brasil, principalmente em barragens. A construção de barragens é uma técnica utilizada desde os primórdios das civilizações para o acúmulo de água para abastecimento, sendo também utilizada para irrigação e, com o passar do tempo, para a geração de energia. No entanto, mesmo sendo uma prática antiga, ainda existem muitos problemas em construções de barragens, sobretudo com o concreto.

A diferença entre as temperaturas internas e externas do concreto massa, ou seja, o gradiente de temperatura, faz com que o concreto se deforme ocasionando as fissuras. Quanto maior o gradiente de temperatura, maior a possibilidade do surgimento de trincas, e maior também as aberturas dessas fissuras devido ao aumento das tensões.

Fissuras em estruturas de concreto massa são indesejáveis, pois afetam a permeabilidade, a durabilidade, aparência e as tensões internas das estruturas. As fissuras ocorrem, normalmente, quando as tensões de tração desenvolvidas excedem a resistência à tração do concreto. Estas tensões de tração podem ocorrer devido às cargas impostas à estrutura, mas frequentemente ocorrem devido à restrição por causa da mudança volumétrica. No entanto, a maior alteração volumétrica em concreto massa é resultado da modificação da temperatura, principalmente, pela geração do calor de hidratação. O controle dessa temperatura é importante para que fissuras sejam evitadas [3].

Alguns recursos, como a utilização de softwares, podem prever e avaliar a temperatura interna no concreto massa. 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 proporcionando uma análise rápida e econômica quando comparada com ensaios experimentais.

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. Sabe-se que uma peça de concreto tem restrições, as quais podem ser de origem interna ou externa. Para o estudo de barragens a restrição interna é o que gera as fissurações pelo aquecimento devido à hidratação do cimento.

Segundo o International Commission on Large Dams [4] 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.

Para tentar reduzir a geração de calor interno do concreto algumas medidas ou artifícios podem ser adotados [5]:

- Escolher um cimento Portland com uma composição química que resulte um desprendimento lento de calor, recomenda-se o CPIII ou CPIV;
- O uso de agregado com um diâmetro máximo característico alto
- O isolamento superficial;
- Processos de pré-resfriamento ou pós-resfriamento do concreto.

3. Propriedades Térmicas do Concreto

O estudo da massa e do calor específico, da condutividade e da 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 isolação térmica proporcionada pelo serviço do concreto. A seguir apresentam-se suas definições resumidamente [6]:

- Massa específica (ρ) – 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 (δ) - 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 4.1.

$$\delta = \frac{k}{c\rho} \quad (4.1)$$

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

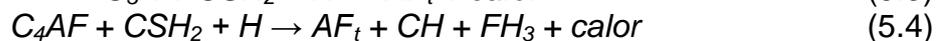
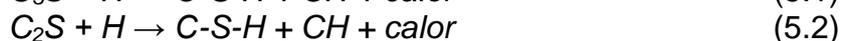
de cada ponto no interior da barragem, embora sofrendo variações, mantém um valor médio ao longo do tempo, que é a temperatura de equilíbrio [7].

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 que é 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 [8].

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 [8].

A reação de hidratação é na realidade a composição de diversas reações de hidratação, podendo ser apresentadas, esquematicamente, sob a forma das equações 5.1 a 5.4 abaixo [8]:



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; o AF_t simboliza a etringita; e C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF , CSH_2 , FH_3 são os compostos do cimento.

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.

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 C_3S e C_3A terão alta resistência inicial somada a uma grande liberação de calor durante a sua hidratação. Por outro lado, um concreto com alto teor de C_2S irá promover uma baixa resistência inicial, alta resistência a longo prazo e, ainda, baixa liberação de calor [9].

A figura 5.1 mostra a quantidade de calor desenvolvida por cada composto do cimento segundo estudos de [10].

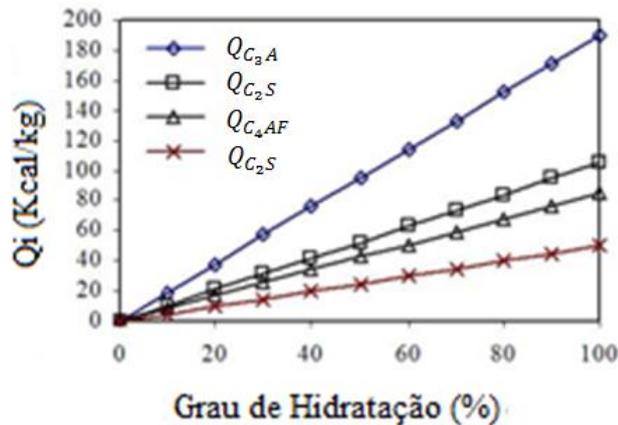


FIGURA 5.1 – Calor desenvolvido por cada componente de cimento [10].

5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

6.1 EQUAÇÃO GERAL DA CONDUÇÃO DE CALOR

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 [11].

Considerando-se um meio homogêneo no interior do qual não há movimento macroscópico (advecção) e a distribuição de temperaturas $T(x,y,z)$ está representada em coordenadas cartesianas. Para deduzir a equação geral da transmissão de calor é avaliado o fluxo de calor que passa através desse corpo, como mostrado na figura 6.1.

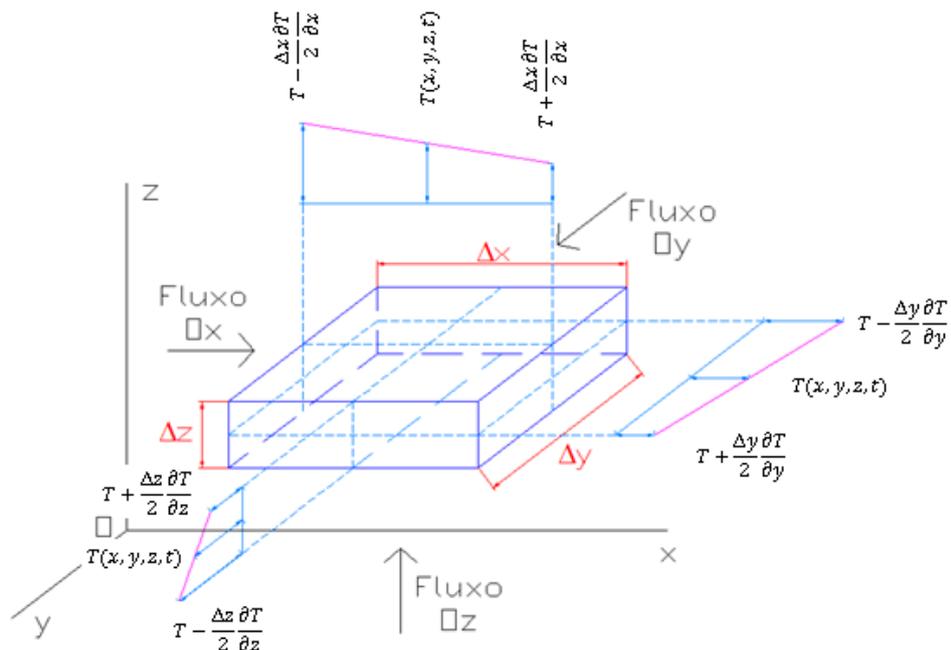


Figura 6.1 - Corpo influenciado por fluxo de calor.

Considerando-se um elemento de volume $\Delta x \Delta y \Delta z$ de um corpo homogêneo e isotrópico atravessado por um fluxo calorífico. Seja $T(x,y,z,t)$ a temperatura do centro do elemento de volume, as temperaturas das faces são mostradas na figura. Com base em um tratamento matemático obtém-se a Equação de Fourier mostrada na equação 6.1 [12].

$$k \nabla^2 T = c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.1)$$

Onde:

k = condutibilidade térmica;

c = calor específico;

ρ = massa específica;

$\frac{dT}{dt}$ = variação da temperatura com o tempo;

$\nabla^2 T$ = gradiente térmico nas direções de x , y e z .

Se o corpo desenvolver calor, como é o caso do concreto, a Equação de Fourier torna-se, equação 6.2:

$$k \nabla^2 T + \dot{q} = c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.2)$$

Em que: $\dot{q} = \rho c \frac{\partial T_d}{\partial t}$

Pode-se dizer ainda que a Equação Geral da Condução de Calor, considerando a Equação de Fourier e a geração de calor interno, ou seja, o calor de hidratação (\dot{q}), é dada pela fórmula da equação 6.2:

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{c \rho}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.2)$$

6. ANÁLISE DOS PARÂMETROS UTILIZADOS NAS EQUAÇÕES

Para um melhor entendimento da influência dos parâmetros (calor específico, massa específica e condutividade térmica) utilizados na Equação de Fourier para os efeitos térmicos do concreto, estudou-se as isotermas de temperatura para os diferentes valores admitidos para cada parâmetro, sem considerar a real dependência entre eles, através do elemento PLANE 55 do Ansys. A figura 7.1 mostra a malha de elementos finitos para a estrutura examinada.

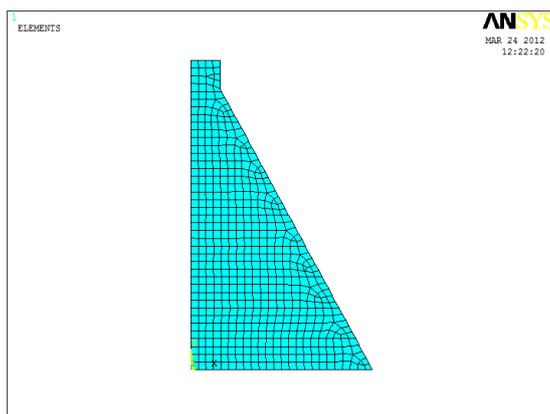


FIGURA 7.1 - Malha de elementos finitos para a estrutura em estudo.

Este exemplo mostra a análise de um perfil de barragem, o qual é baseado em uma seção típica 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, ou seja, sem a presença da galeria de drenagem.

Os parâmetros foram considerados variando isoladamente, ou seja, sem a dependência dos outros parâmetros. No entanto, sabe-se que alterando-se o traço do concreto, normalmente, haverá a alteração de todos os parâmetros e não de apenas um como está sendo verificado.

Para a análise dos parâmetros da equação de Fourier, as isotermas de temperatura foram analisadas após dois e quatro de concretagem. Para todos os casos, as variáveis que correspondem a cada propriedade estão relacionadas abaixo:

- Condutividade térmica = k ;
- Massa específica = ρ ;
- Calor específico = c ;
- Diferença de temperatura em porcentagem = $\Delta(\%)$.

Foram admitidos temperatura ambiente de 25°C, temperatura na face inferior da barragem de 25°C e temperatura de lançamento do concreto de 27°C. Na análise dos parâmetros, os resultados encontram-se nas figuras de 7.2 a 7.6 e nas tabelas de 7.1 a 7.3. Foi admitida a situação hipotética de que a estrutura tivesse sido concretada em camada única.

7.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Os valores de condutividade térmica para o concreto variam de 1,4 W/m.K a 3,6 W/m.K [13]. Para avaliação da influência deste parâmetro na temperatura do concreto massa foram utilizados os números inteiros mais próximos dos valores de máximo e mínimo, ou seja, 1 e 4 W/m.K. As outras variáveis permaneceram constantes, entretanto, sabe-se que todas elas apresentam situação de dependência e se alteram com a mudança de temperatura.

Considerando-se todas as particularidades do caso, observa-se na Tabela 7.1 e na Figura 7.2 que houve pouca diferença com relação a máxima temperatura atingida, após dois e quatro dias de concretagem, para as diferenças entre os valores de condutividade térmica. No entanto, para a condutividade térmica com o seu valor máximo, existiu uma maior dissipação do calor, isto é, houve um menor gradiente térmico (diferença entre os valores de temperatura máxima e mínima). Este fato pode diminuir o risco de fissuração, visto que, quanto maior o gradiente térmico, maior a probabilidade do aparecimento das tensões térmicas.

Observa-se que, apesar da pouca diferença, quanto menor a condutividade térmica do concreto, maior será a temperatura máxima atingida. Isso pode ser explicado pelo fato de que com uma menor condutividade térmica, maior será a dificuldade de dissipação do calor gerado internamente nesse corpo. Nota-se também que o parâmetro 'tempo' influencia diretamente nestas isotermas. Com o tempo, observa-se que a região que apresenta temperatura máxima, ou valores próximos, diminui.

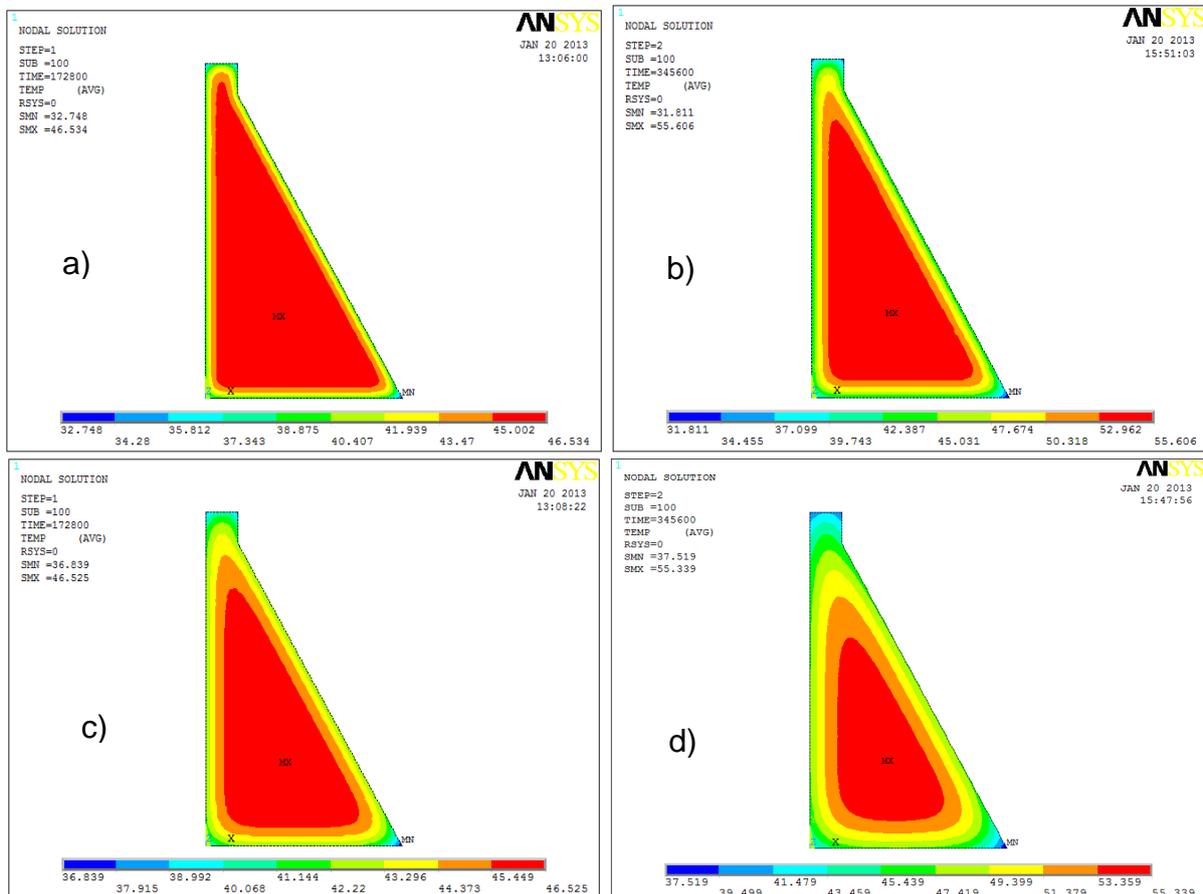


FIGURA 7.2. a) Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem, com $k=1$ W/m.°C; b) Isotermas de temperatura para 4 dias de concretagem, com $k=1$ W/m.°C; c) Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem, com $k=4$ W/m.°C; d) Isotermas de temperatura para 4 dias de concretagem, com $k=4$ W/m.°C.

TABELA 7.1 - Resultados para diferentes valores de k.

PROPRIEDADES	TEMPERATURA MÁXIMA	
	2 DIAS	4 DIAS
k = 1 W/m.°C $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ $c = 1000 \text{ J/g.}^\circ\text{C}$ $h = 10 \text{ W/m}^2.^\circ\text{C}$	46.534°C	55.606°C
k = 4 W/m.°C $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ $c = 1000 \text{ J/g.}^\circ\text{C}$ $h = 10 \text{ W/m}^2.^\circ\text{C}$	46.525°C	55.339°C
$\Delta(\%)$	0,02	0,48

7.2 MASSA ESPECÍFICA

Considerando-se os valores máximo e mínimo de massa específica que pode ser obtido com o concreto, foram utilizados para testar a influência de variação deste parâmetro na elevação da temperatura do concreto $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ e $\rho = 3000 \text{ kg/m}^3$, após dois e quatro dias de concretagem. Adotou-se também que as outras variáveis permaneciam constante durante todo o tempo e que a massa específica não sofre modificação com a variação térmica.

Neste caso, como pode ser visto na Figura 7.3 e na Tabela 7.2, as temperaturas foram maiores para uma menor massa específica, chegando a diferenças de aproximadamente 18% para um período de tempo de 2 dias de concretagem e aproximadamente 22% após 4 dias de concretagem. Para uma menor massa específica percebe-se também um maior gradiente térmico.

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.

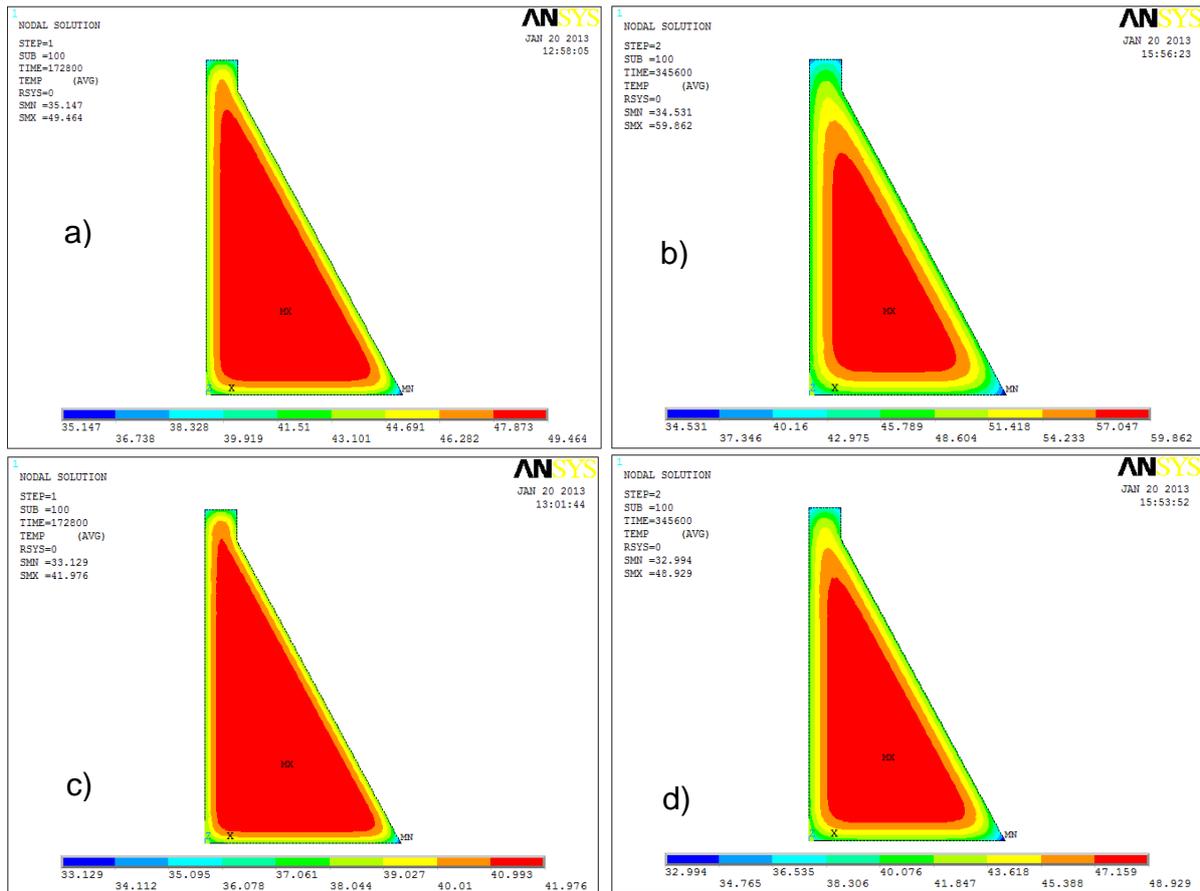


FIGURA 7.3. a) Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem, com $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$; b) Isotermas de temperatura para 4 dias de concretagem, com $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$; c) Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem, com $\rho=3000 \text{ kg/m}^3$; d) Isotermas de temperatura para 4 dias de concretagem, com $\rho=3000 \text{ kg/m}^3$.

Tabela 7.2 - Resultados para diferentes valores de ρ .

PROPRIEDADES	TEMPERATURA MÁXIMA	
	2 DIAS	4 DIAS
$k = 1,79 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ $c = 1000 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ $h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	49.464°C	59.862°C
$k = 1,79 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ $\rho = 3000 \text{ kg/m}^3$ $c = 1000 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ $h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	41.976°C	48.929°C
$\Delta(\%)$	17,84	22,34

7.3 CALOR ESPECÍFICO

Valores típicos do calor específico para concretos normais estão entre 840 e 1260 J/(g·°C) [14]. Neste trabalho foram utilizados os valores de 800 J/(g·°C) e 1260 J/(g·°C), para valores de mínimo e máximo, respectivamente.

Levando-se em consideração que os valores não sofrem modificação com a variação de temperatura e que as demais variáveis permanecem constantes,

observa-se que para um menor calor específico obtém-se uma maior elevação térmica no núcleo da barragem e um maior gradiente térmico entre as fases externa e interna do concreto massa. Essa diferença chega a aproximadamente 22% para 2 dias de concretagem e 28% para 4 dias de concretagem. Esses resultados estão mostrados na Figura 7.4 e na Tabela 7.3.

O calor específico corresponde à quantidade de calor necessária para elevar em um grau a temperatura de uma unidade de massa; e atinge um valor máximo para o concreto saturado. 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.

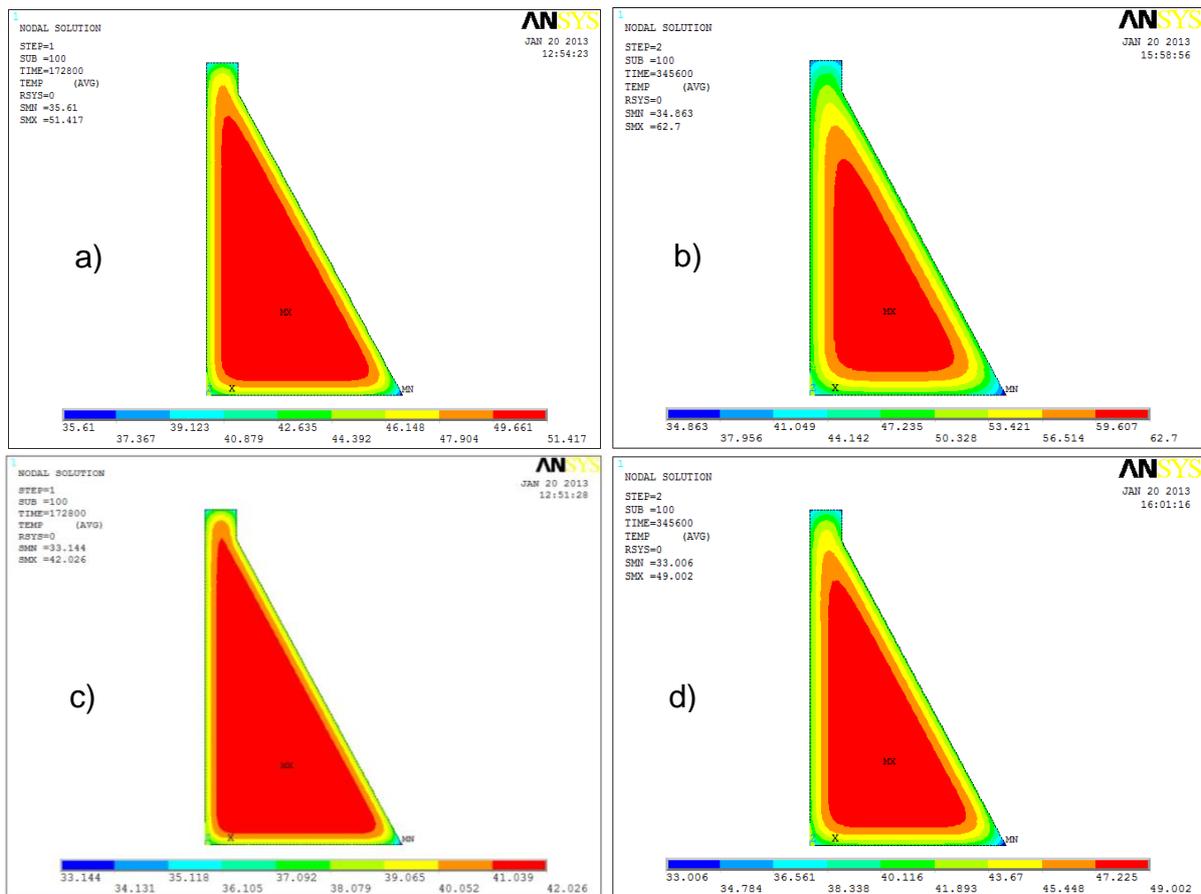


FIGURA 7.4. a) Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem, com $c=800 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; b) Isotermas de temperatura para 4 dias de concretagem, com $c=800 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; c) Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem, com $c=1300 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; d) Isotermas de temperatura para 4 dias de concretagem, com $c=1300 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$.

Tabela 7.3 - Resultados para diferentes valores de c.

PROPRIEDADES	TEMPERATURA MÁXIMA; NÓ	
	2 DIAS	4 DIAS
k = 1,79 W/m.°C ρ = 2300 kg/m³ c = 800 J/g.°C h = 10 W/m².°C	51.417°C	62.700°C
k = 1,79 W/m.°C ρ = 2300 kg/m³ c = 1300 J/g.°C h = 10 W/m².°C	42.026°C	49.002°C
Δ(%)	22,34	27,95

7. CONCLUSÕES

Um dos fatores de mais influência nos efeitos térmicos é a geração do calor interno no concreto. Quando os grãos do cimento entram em contato com a água eles se hidratam e liberam calor. Essa geração de calor provoca as tensões térmicas que podem causar danos a estrutura. No entanto, essas tensões são mais significativas quando há um maior gradiente de temperatura, ou seja, quando há maior diferença entre as temperaturas máximas e mínimas no concreto massa.

Foram realizadas diversas análises para estruturas em concreto massa, onde os efeitos térmicos puderam ser analisados através das isotermas de temperatura obtidas com o software ANSYS. Essas isotermas indicam a evolução do calor, mostrando temperaturas no domínio do corpo estudado.

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. No entanto, essas propriedades estabelecem uma relação de dependência que não foi considerada neste trabalho.

Verificou-se ainda que o uso de um programa baseado no método dos elementos finitos na solução dos problemas, pode ser um meio rápido e prático para uma análise térmica em estruturas. Isso possibilita que as estruturas sejam analisadas antes mesmo da construção, permitindo assim estratégias para a redução de tensões devido aos efeitos térmicos.

8. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à equipe do PECC – Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da UnB – Universidade de Brasília e as agências de fomento Capes e CNPq.

9. PALAVRAS-CHAVE

Temperatura, Propriedades Térmicas, Concreto Massa, Barragem.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. “Cement and Concrete Terminology”. ACI 318 Farmington Hills, 2005.
- [2] COELHO, N. A.; “Um estudo numérico do efeito térmico em concreto massa”. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília – UnB. Brasília: 2012.
- [3] TOWNSEND, C. L.; “Control of Cracking in Mass Concrete Structures”. Monografia de Engenharia. The United States: Bureau of Reclamation, 1981.
- [4] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS; “The Specification and Quality Control of Concrete for Dams”. Paris: 2009.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] SILVEIRA, A. F.; “As variações de temperatura nas barragens”. Lisboa: Lab Nac Eng Civ, 1961. 437 p.
- [8] 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.
- [9] MAEKAWA, K., CHAUBE, R. AND KISHI, T.; “Modeling of Concrete Performance, Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport”. 1ª ed. London: E & FN Spon, 1999.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] ANDRADE, W. P. (Ed.); “Concretos: Massa, estrutural, projetado e compactado com rolo”. São Paulo: Pini, 1997. 1 v.
- [14] 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.