



SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DAS TENSÕES DE ORIGEM TÉRMICA EM UM BLOCO DE CONCRETO MASSA

COMPUTER SIMULATION OF THERMAL STRESSES IN A MASS CONCRETE BLOCK

Eduardo I. Funahashi Júnior (1); Leandro Sanchez (2); Selmo Kuperman (3)

(1) *Mestrando em engenharia civil, Universidade de São Paulo/Desek LTDA*

(2) *Universidade de São Paulo*

(3) *Desek LTDA, Universidade de São Paulo*

Resumo

O concreto, durante a reação de hidratação do cimento, libera calor. Esta geração de calor acarreta a formação de um gradiente térmico entre o elemento de concreto e o meio ambiente que, dependendo de seu tamanho e geometria, de sua localização, das condições de restrição e das características dos materiais empregados em sua construção pode desenvolver tensões de tração que conseqüentemente formarão um quadro fissuratório no mesmo.

Normalmente, estruturas maciças de concreto são mais suscetíveis às chamadas fissuras de origem térmica. Por isso, torna-se necessário o controle da elevação de temperatura de tais estruturas através da utilização de materiais com características apropriadas e metodologias executivas adequadas.

Este trabalho apresenta a análise das temperaturas e tensões de origem térmica de um bloco de concreto de 8 metros de comprimento, 9 metros de largura e 4 metros de altura, através de um modelo tridimensional de elementos finitos desenvolvido com o software B4CAST.

A partir de um traço pré-definido, são analisados alguns fatores que influenciam no desenvolvimento das fissuras térmicas. Estes incluem os intervalos de lançamento entre camadas sucessivas, as espessuras das camadas e a temperatura de lançamento do concreto.

Os resultados demonstram a real importância da análise térmica de estruturas massivas previamente a sua concretagem e, ao final do trabalho, é apresentada a solução adequada para a mitigação da formação do quadro fissuratório no elemento de concreto.

Palavra-Chave: concreto massa, controle de temperatura, tensão de origem térmica, simulação computacional, software B4CAST.

Abstract

The cement hydration of concrete releases heat. This heat generation provides a temperature gradient between the concrete element and the environment that, depending on its size and geometry, location, restraint conditions and characteristics of materials used in its construction, can generate tensile stresses and consequently originate thermal cracks in the concrete structure.

Often, massive concrete structures are more susceptible to the development of thermal cracks. Therefore, it is necessary to control the temperature of those structures through the use of materials with appropriate characteristics and suitable construction methodologies.

This work presents a three dimensional thermal stress analysis of a concrete block with 8 meters length, 9 meters wide and 4 meters high, using a finite element method through the B4CAST software.

With a pre-defined concrete mixture, some factors that influence the development of thermal cracks are analyzed as the time intervals between successive lifts, the lift height and the placement temperature of fresh concrete.

The results demonstrate the real importance of the thermal analysis of massive structures and in the end, the appropriate solution to mitigate the formation of thermal cracks in the concrete element is presented.

Keywords: mass concrete, temperature control, thermal cracks, computer simulation, software B4CAST software.



1 INTRODUÇÃO

O concreto, durante as reações de hidratação do cimento, libera calor. Sendo um corpo sólido, as distribuições de temperatura e fluxo de calor em seu interior seguem o princípio da conservação de energia, que pode ser descrito pelo modelo de Fourier. Desta forma, o concreto tende a equiparar a sua temperatura com a temperatura ambiente, resultando em um gradiente térmico e conseqüentemente em uma retração térmica que, quando restringida, pode gerar tensões de tração superiores as suportadas pelo material (GRASSO, 1999).

As tensões de tração oriundas da queda de temperatura, normalmente formam um quadro fissuratório no elemento de concreto. A formação deste quadro prejudica tanto a capacidade portante quanto a durabilidade da estrutura. Para evitar sua ocorrência, é necessária a utilização de materiais adequados, além do estudo e elaboração de um plano executivo correto.

Os estudos térmicos consistem em análises de temperaturas e tensões oriundas respectivamente da liberação de calor gerada pela hidratação do cimento e da retração térmica do concreto. Basicamente, os estudos térmicos dividem-se em duas etapas: a) cálculo das evoluções de temperaturas do concreto e b) análise das tensões e/ou deformações térmicas resultantes na estrutura.

Na prática, os principais desafios do projeto de estruturas de concreto massa são a maximização da espessura das camadas de concreto e a minimização do tempo de lançamento entre elas, sem resultar na ocorrência de um quadro fissuratório.

Os parâmetros básicos que influenciam no projeto e na análise de estruturas de concreto massa são:

- Tipo de cimento (elevação adiabática da temperatura do concreto);
- Consumo de cimento por m³ de concreto (elevação adiabática da temperatura do concreto);
- Tipo litológico de agregado (difusividade térmica);
- Temperatura ambiente;
- Temperatura de colocação do concreto na praça;
- Geometria da estrutura;
- Altura das camadas de concretagem;
- Intervalo de lançamento das camadas de concretagem e;
- Transmissão superficial de temperatura

2 ESTUDO DE CASO

O presente trabalho apresenta a análise e o estudo das tensões de origem térmica em um bloco de concreto de seção em planta de 9,0m x 8,0m e altura de 4,0 m. Para isto, são

realizadas simulações através do método dos elementos finitos com a utilização do software B4CAST.

A partir de um traço pré-definido, foram simuladas treze hipóteses (Tabela 1) a fim de obter-se a melhor solução do ponto de vista técnico e construtivo, para que não ocorressem fissuras de origem térmica no bloco em questão. Os seguintes parâmetros foram testados e avaliados:

- Intervalo de lançamento entre camadas;
- Espessura das camadas e
- Temperatura de lançamento do concreto.

Tabela 1 – Hipóteses estudadas e avaliadas.

Hipótese (n°)	Altura da camada (m)	Temperatura de lançamento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Intervalo de lançamento (horas)
I	0,25	25	20	48
II	0,50			
III	1,00			
IV	2,00			
V	4,00			
Hipótese (n°)	Intervalo de lançamento (horas)	Temperatura de lançamento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Altura da camada (m)
VI	6	25	20	0,50
VII	12			
VIII	72			
IX	96			
Hipótese (n°)	Temperatura do concreto fresco (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Altura da camada (m)	Intervalo de lançamento (horas)
X	15	20	0,50	48
XI	20			
XII	30			
XIII	35			

3 PARÂMETROS DE CÁLCULO

3.1 Características do Solo

No presente modelo, adotou-se a concretagem do bloco sobre solo de micaxisto carbonático, com as seguintes características (Tabela 2):

Tabela 2 – Características do solo de fundação (FURNAS, 1997).

Propriedades	Parâmetros
Resistência média à compressão (MPa)	85,2
Módulo de elasticidade (MPa)	33000
Coefficiente de Poisson	0,18
Massa específica (kg/m ³)	2750
Coefficiente de dilatação térmica (10 ⁻⁶ /°C)	1,26
Calor específico (kJ/kg.°C)	0,86

3.2 Características térmicas do concreto

O concreto do bloco em questão foi confeccionado com cimento CP III. A Figura 1 representa o desenvolvimento do calor de hidratação do cimento em função do tempo:

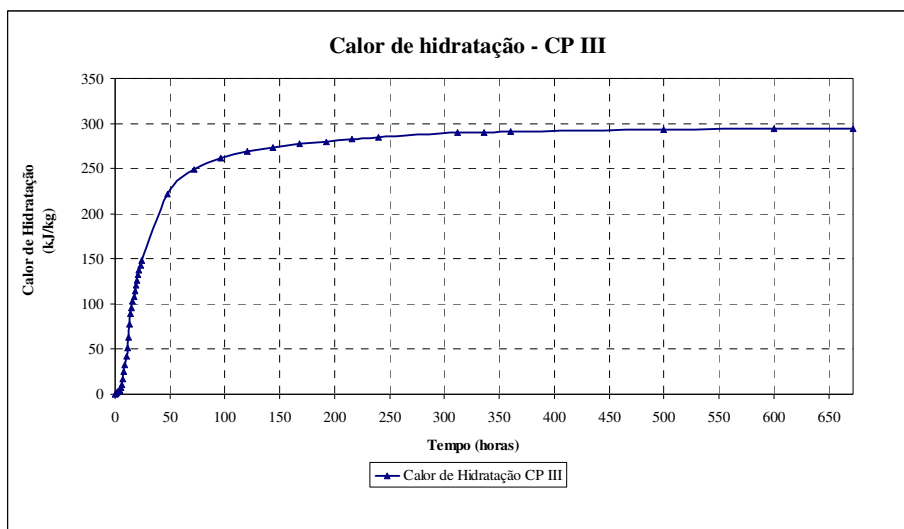


Figura 1 – Calor de hidratação do cimento tipo CP III.

Os valores do calor específico e da condutividade do concreto foram calculados considerando os valores individuais de cada material nas expressões a seguir:

$$\text{Calor específico} = \frac{\sum m_i c_i}{\sum m_i} \text{ (Equação 1)} \quad \text{e} \quad \text{Condutividade} = \frac{\sum m_i k_i}{\sum m_i} \text{ (Equação 2)}$$

Onde: m_i = massa de cada constituinte da dosagem; c_i = calor específico de cada constituinte da dosagem; k_i = condutividade de cada constituinte da dosagem.

A Tabela 3 indica o consumo de cada material utilizado no concreto e sua respectiva massa unitária (m_i).

Tabela 3 – Dosagem do concreto.

Material	Consumo (kg/m ³)	m_i
Cimento	302	1
Água	179	0,59
Brita 19 mm	1051	3,48
Areia	836	2,77
Relação a/c	0,593	-

O coeficiente de dilatação térmica do concreto foi calculado a partir da média ponderada dos coeficientes de dilatação térmica de cada material presente no mesmo, como mostra a expressão a seguir:

$$\alpha = \frac{m_{pasta} \cdot \alpha_{pasta} + m_{areia\ natural}^{areia} \cdot \alpha_{natural}^{areia} + m_{areia\ artificial}^{areia} \cdot \alpha_{artificial}^{areia} + m_{brita} \cdot \alpha_{brita}}{m_{pasta} + m_{natural}^{areia} + m_{artificial}^{areia} + m_{brita}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

m_i = massa de cada constituinte (kg/m³)

α_i = coeficiente de dilatação térmica de cada constituinte (x10⁻⁶/°C)

Os valores do coeficiente de dilatação térmica linear da pasta (α_{pasta}) foram calculados em função da relação água/cimento (a/c) (Furnas, 1997).

A Tabela 4 apresentada as propriedades do concreto utilizadas na simulação computacional:

Tabela 4 – Propriedades térmicas do concreto

Propriedades	Parâmetros
Condutividade Térmica (kJ/kg.°C)	12
Calor específico (MPa)	1,02
Coeficiente de dilatação térmica (1/°C)	10 ⁻⁶
Massa específica (kg/m ³)	2370
Coeficiente de Poisson	0,20

O desenvolvimento da elevação adiabática do concreto foi calculado através da fórmula de Rastrup a partir dos valores de calor de hidratação estimado.

$$\Delta T = \frac{C \cdot (\text{calor de hidratação})}{\lambda \cdot c}$$

Onde:

ΔT = Elevação Adiabática (°C)

λ = Massa específica (kg/m³)

c = Calor de hidratação (kJ/kg °C)

C = Consumo de cimento (kg/m³)

A curva de elevação adiabática do concreto está representada na Figura 2.

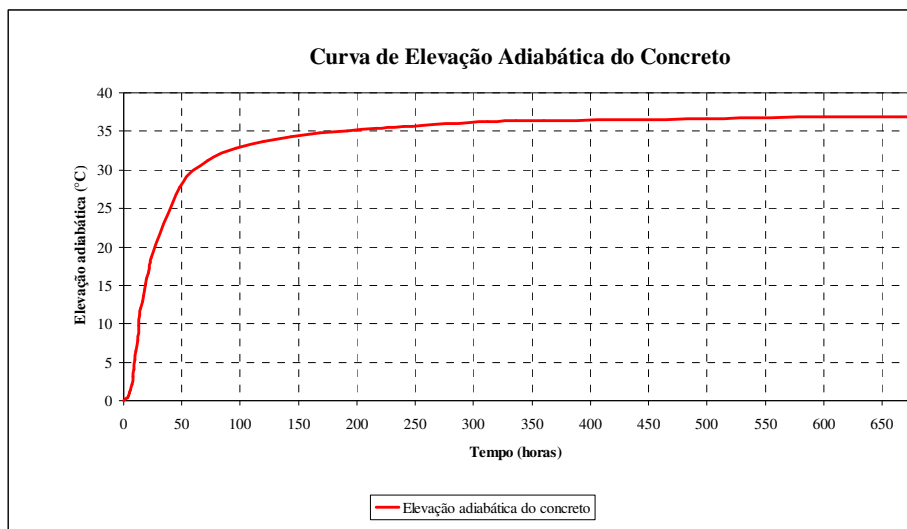


Figura 2 – Elevação adiabática do concreto.

3.3 Características mecânicas do concreto

Como este estudo foi realizado de maneira prévia à concretagem, os valores das propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade) foram estimados a partir de seu traço. A resistência especificada de projeto considerada é de 25 MPa ($f_{ck}=25,0$ MPa).

Os valores de resistência à compressão estimados foram calculados a partir do consumo de cimento do concreto, utilizando-se o conceito de rendimento (MPa/kg/m³). Para isto, foram estudados e analisados concretos semelhantes com o mesmo tipo de cimento. A resistência à tração foi calculada como 10% da resistência à compressão.

A Figura 3 ilustra a resistência à compressão e resistência à tração utilizada nos cálculos.

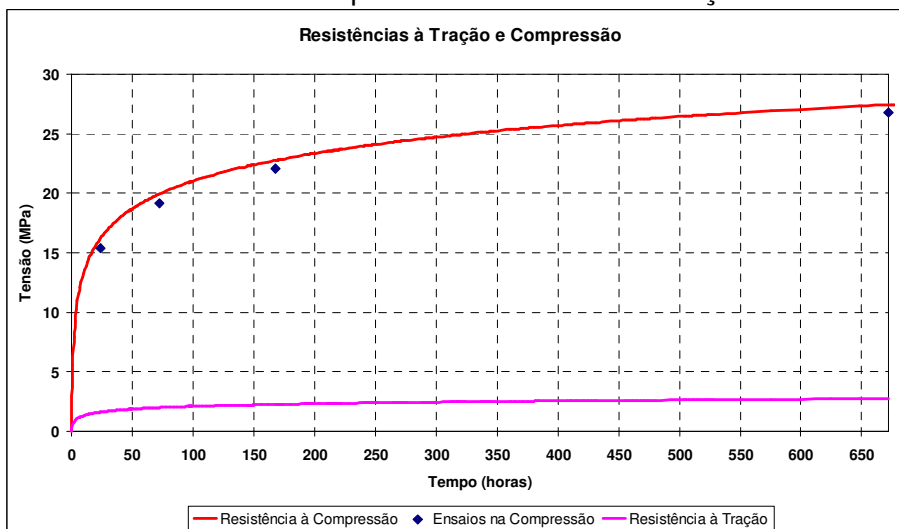


Figura 3 – Variação das resistências à tração e compressão com o tempo.

Pelo fato do concreto possuir consumo de cimento relativamente elevado e estar sendo produzido com brita 1, o módulo de elasticidade foi calculado a partir da fórmula da NBR 6118-2003 onde,

$E_{ci} = 5600 (f_{cj})^{1/2}$, à idade de 28 dias = módulo de elasticidade inicial.

$E_{cs} = 0,85 E_{ci}$ = módulo de elasticidade secante.

Os dados de módulo de elasticidade estimados foram ajustados para se adequarem a uma equação que pudesse ser utilizada nos cálculos de tensões de origem térmica.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a evolução do módulo de elasticidade considerada para o concreto

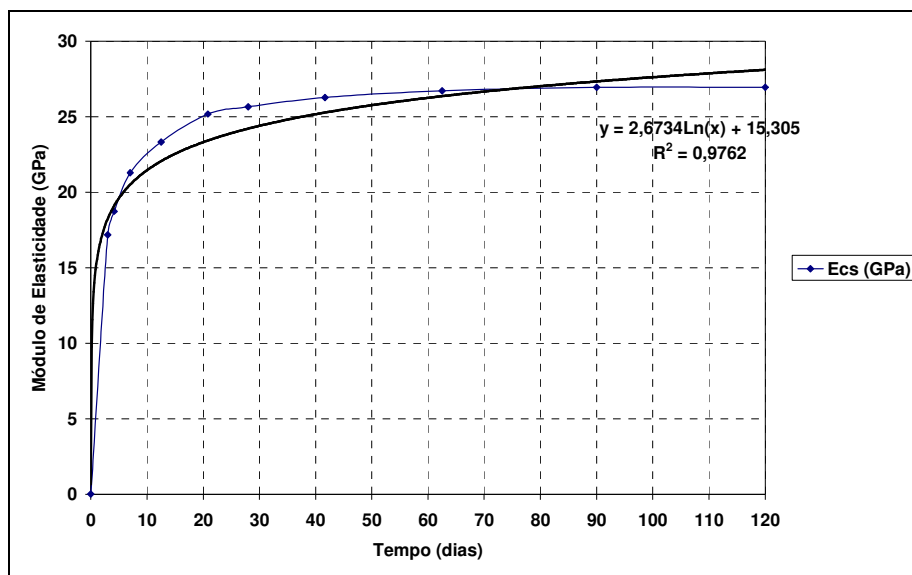


Figura 4 – Variação do módulo de Elasticidade com o tempo

4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para todas as simulações realizadas, foram consideradas as seguintes condições de contorno:

- Cura realizada até o lançamento da camada subsequente (duração máxima de sete dias);
- Coeficiente de transmissão de calor superficial concreto/água de cura de 48,53KJ/m².h. °C;
- Coeficiente de transmissão de calor superficial concreto/ar de 48,53 KJ/m².h. °C;
- Velocidade do vento de 5m/s;
- Temperatura superficial do solo igual à temperatura ambiente e;

- Formas de madeira de 21 mm de espessura durante um período de sete dias. Após a retirada da forma é considerado o peso próprio da estrutura.

5 MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

A malha de elementos finitos utilizada nos cálculos da estrutura do bloco de fundação está apresentada na Figura 5. Esta é mais refinada no bloco, uma vez que o objetivo é analisar o desenvolvimento de temperatura e tensões na estrutura de concreto. Os elementos finitos utilizados pelo software no modelo são tetraedros e o lançamento da malha é automático, desenvolvido pelo software através de modelos probabilísticos, para que a obtenção das respostas seja confiável.

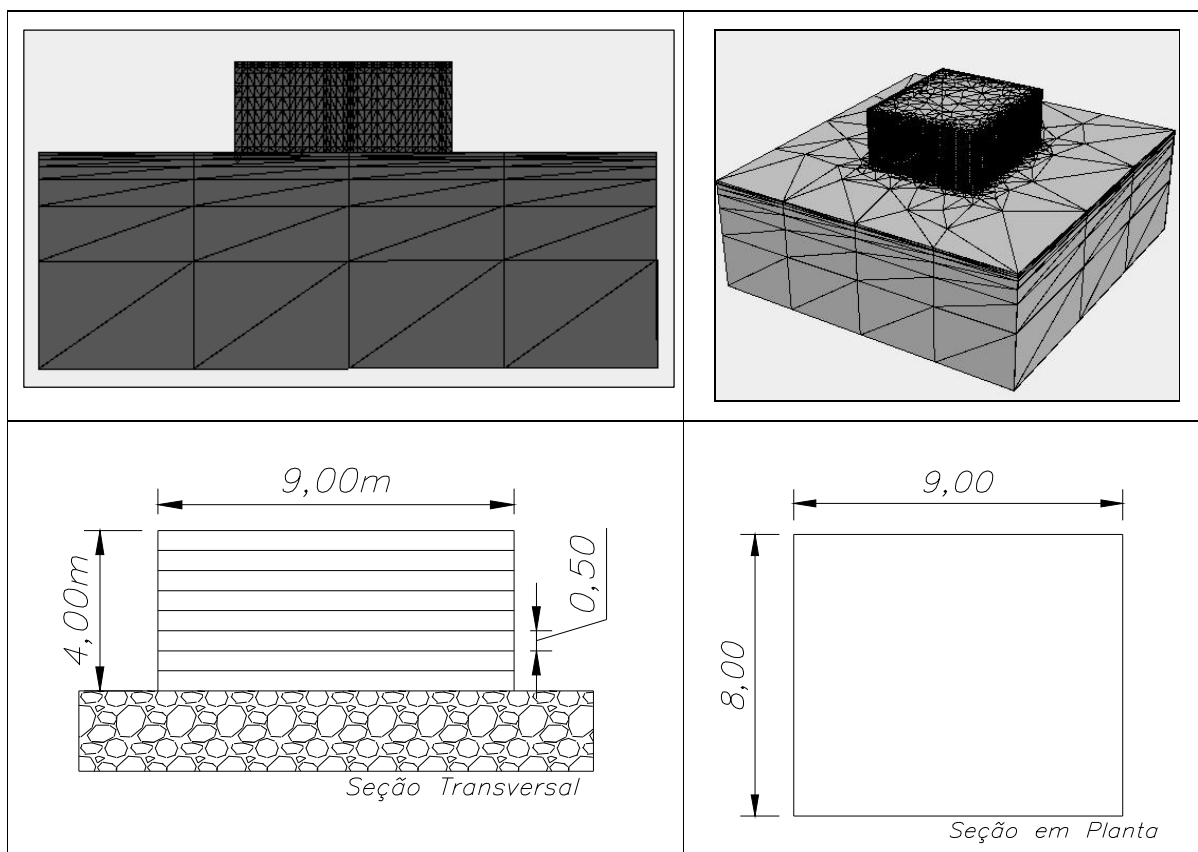


Figura 5 – Malha de elementos finitos e seção transversal e em planta

6 RESULTADOS DE TEMPERATURAS

A Tabela 5 apresenta o resumo das temperaturas máximas atingidas em cada hipótese, quando os parâmetros temperatura de lançamento, temperatura ambiente e intervalo de lançamento são fixados.

Tabela 5 – Influência da espessura da camada.

Hipóteses de Lançamento			Temperatura máxima na estrutura (°C)	Condições Impostas		
Hipótese (nº)	Número de camadas	Altura da camada (m)		Temperatura de lançamento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Intervalo de lançamento (horas)
I	16	0,25	28,5	25	20	48
II	8	0,50	38,3			
III	4	1,00	46,7			
IV	2	2,00	53,2			
V	1	4,00	57,9			

A Tabela 6 apresenta o resumo das temperaturas máximas atingidas em cada camada, quando os parâmetros temperatura de lançamento, temperatura ambiente e altura da camada são fixados.

Tabela 6 – Influência do intervalo de lançamento entre as camadas

Hipóteses de lançamento		Temperatura máxima na estrutura (°C)	Condições impostas		
Hipótese (nº)	Intervalo de lançamento (horas)		Temperatura de lançamento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Altura da camada (m)
VI	6	58,2	25	20	0,50
VII	12	54,8			
VIII	72	33,3			
IX	96	31,1			

A Tabela 7 apresenta o resumo das temperaturas máximas atingidas em cada camada, quando os parâmetros temperatura ambiente, altura da camada e intervalo de lançamento são fixados.

Tabela 7 – Influência da temperatura de lançamento

Hipóteses de lançamento		Temperatura máxima na estrutura (°C)	Condições impostas		
Hipótese (nº)	Temperatura do concreto fresco (°C)		Temperatura ambiente (°C)	Altura da camada (m)	Intervalo de lançamento(horas)
X	15	34,9	20	0,5	48
XI	20	36,8			
XII	30	40,3			
XII	35	41,8			

7 RESULTADOS DE TENSÕES DE ORIGEM TÉRMICA

A análise das tensões de origem térmica foi realizada em três pontos (A, B, C) demonstrados na Figura 6.

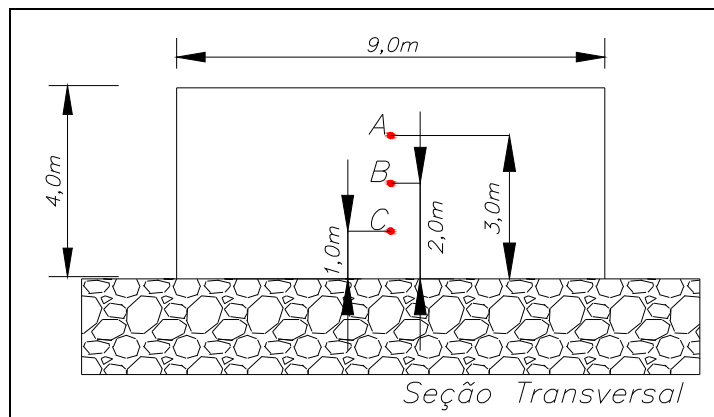


Figura 6 – Localização dos pontos de estudo de tensões

A Tabela 8 apresenta o resumo das tensões máximas atingidas em cada hipótese testada (nos três pontos analisados, ponto A, B e C), quando os parâmetros temperatura de lançamento, temperatura ambiente e intervalo de lançamento são fixados.

Tabela 8 – Influência da espessura da camada.

Hipóteses de Lançamento			Tensão máxima na estrutura (MPa)			Condições Impostas		
Hipótese (nº)	Número de camadas	Altura da camada (m)				Temperatura de lançamento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Intervalo de lançamento (horas)
I	16	0,25	0,4	0,7	0,7	25	20	48
II	8	0,50	0,3	1,2	1,4			
III	4	1,00	0,5	1,6	2,0			
IV	2	2,00	0,6	1,9	2,7			
V	1	4,00	1,1	1,9	2,8			

A Tabela 9 apresenta o resumo das tensões máximas atingidas em cada hipótese testada (nos três pontos analisados), quando os parâmetros temperatura de lançamento, temperatura ambiente altura da camada são fixados.

Tabela 9 – Influência do intervalo de lançamento entre as camadas

Hipótese de Lançamento		Tensão máxima na estrutura (MPa)			Condições Impostas		
Hipótese (nº)	Intervalo de Lançamento (horas)				Temperatura de lançamento (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Altura da camada (m)
VI	6	0,8	2,3	2,7	25	20	0,50
VII	12	0,7	1,9	2,0			
VIII	72	0,4	1,0	1,1			
IX	96	0,5	0,8	0,9			

A Tabela 10 apresenta o resumo das tensões máximas atingidas em cada hipótese (nos três pontos analisados), quando os parâmetros temperatura ambiente, altura da camada e intervalo de lançamento são fixados.

Tabela 10 – Influência da temperatura de lançamento

Hipóteses de Lançamento		Tensão máxima na estrutura (MPa)			Condições Impostas		
Hipótese (nº)	Temperatura do concreto fresco (°C)				Temperatura Ambiente (°C)	Altura da camada (m)	Intervalo de Lançamento (horas)
X	15	0,1	0,4	1,2	20	0,5	48
XI	20	0,2	0,8	1,4			
XII	30	0,5	1,4	1,6			
XII	35	0,7	1,4	1,6			

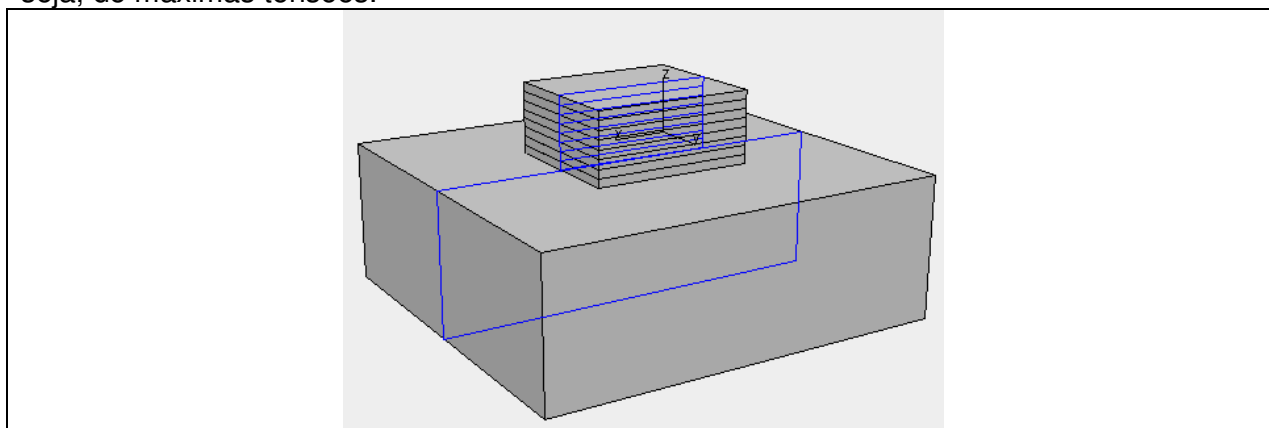
Analisando as Tabelas 8, 9 e 10, adotou-se a hipótese II como a melhor solução custo-benefício.

A partir da adoção da hipótese considerada e, para a constatação do estudo realizado nos pontos previamente descritos, o estudo das isotermas e isotensões ao longo do tempo na região mais crítica da estrutura foi realizado.

Para a hipótese II, a temperatura de lançamento do concreto adotada foi de 25°C, o que dispensaria a utilização do concreto refrigerado, aproximando-se de uma situação favorável durante a concretagem.

Através dos cálculos, esta hipótese apresentou-se segura, uma vez que as tensões desenvolvidas foram inferiores à curva de resistência à tração adotada com fator de segurança de 1,20.

A Figura 7 mostra a seção de análise das isotermas e isotensões para a hipótese II e, percebe-se que os pontos considerados realmente situam-se na região mais crítica, ou seja, de máximas tensões.



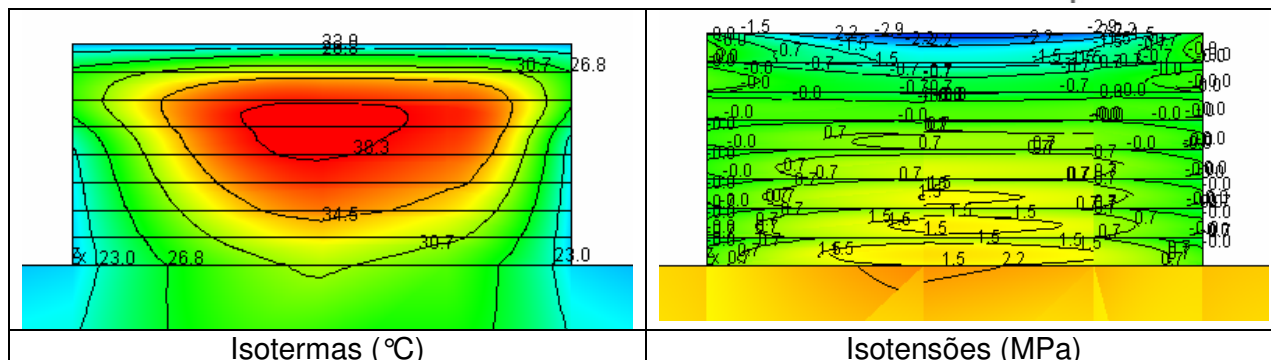


Figura 7 – Isotermas e isotensões para o bloco de fundação – Hipótese II

Através da ilustração que representa as isotermas, para o bloco estudado, nota-se um maior incremento de temperatura no centro do bloco, o que gera maiores tensões quando de seu resfriamento. Através da ilustração das isotensões, verifica-se, naquele instante, que as maiores tensões de tração de origem térmica (valores negativos) concentram-se próximas à fundação, que estão sujeitas a uma maior restrição pela mesma. Os valores positivos representam tensões de compressão relacionadas ao aumento de temperatura no instante verificado.

A Figura 8 mostra a evolução das temperaturas para pontos A, B e C, a partir do lançamento de cada camada, para a hipótese II ao longo do tempo.

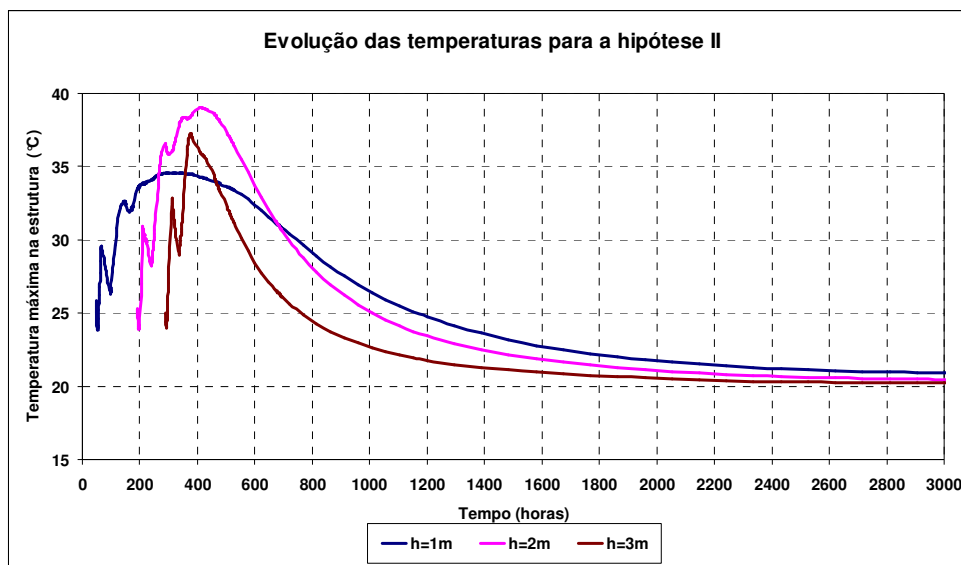


Figura 8 – Evolução das temperaturas para altura de 1, 2 e 3 metros

A Figura 9 apresenta a evolução das tensões nos pontos A, B e C do bloco, além da evolução da resistência à tração do concreto utilizado no mesmo.

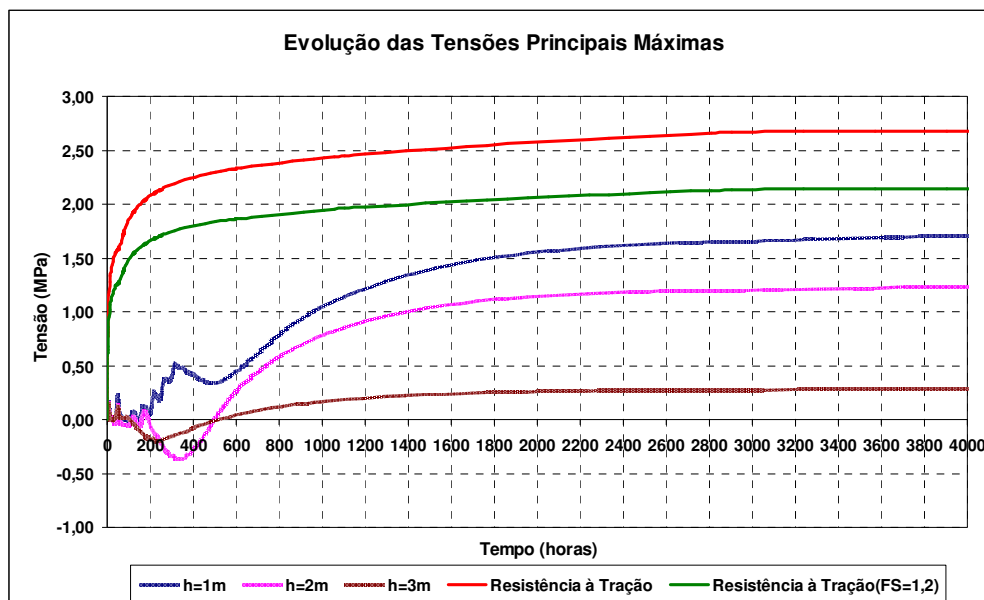


Figura 9 – Evolução das tensões principais máximas

Verifica-se que em nenhum momento a tensão originada no bloco superou a resistência presente no material. Isto significa que esta hipótese atendeu aos requisitos necessários para execução do bloco em questão no que tange as tensões de origem térmica.

8 CONCLUSÕES

A partir das análises prévias de temperatura e tensão, pode-se concluir através do estudo que:

- a) Adotando-se intervalo de lançamento entre camadas de dois dias (48 horas) e temperatura de lançamento de 25°C, percebe que espessuras de camada superiores a 2 metros poderiam ocasionar um quadro fissuratório no bloco de concreto. Entretanto, levando em conta aspectos de segurança e os eventuais desvios que sempre ocorrem em obra, espessuras iguais ou inferiores a 1 metro poderiam ser adotadas sem maiores problemas;
- b) Para temperatura de lançamento de 25°C e espessura de camadas de 0,5 metros, nota-se que intervalos de lançamento inferiores a 12 horas poderiam ocasionar fissuras no bloco. Porém, considerando aspectos de segurança, intervalos de lançamento superiores a 24 horas poderiam ser adotados sem comprometer a estrutura;
- c) A variação da temperatura de lançamento do concreto fresco não é significativa para camadas pouco espessas, pois há uma grande dissipação de calor para o meio ambiente através da cura, vento e temperatura ambiente;



- d) As tensões de origem térmica são sempre maiores no ponto C para todas as hipóteses. Este fato é justificado pela sua maior proximidade à fundação e, sendo assim, a sua maior restrição ao movimento do que nas demais localidades.

9 REFERÊNCIAS

- ACI:** AMERICAN CONCRETE INSTITUTE Committee N° 207 – “*Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete*”, Detroit-USA, ACI Manual of Concrete Practice, 1978, Part 1, pp. 207-42 - 207-47.
- ASTM C 1074** - “*Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*”, Annual Book of ASTM Standards, vol.04.02, American Society for Testing Materials, Philadelphia, 1998.
- Calmon**, J.L. “*Estudio Termico y Tensional en Estructuras Masivas de Hormigón. Aplicación a Las Presas Durante la etapa de Construcción*”. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 1995, 649p.
- Carlson**, R.W., “*A Simple Method for Computation of Temperature in Concrete Structures*”, ACI Journal, Proceedings, v.34, Nov-Dec.1997, pp.89-102.
- Equipe de Furnas**. “*Concretos – massa, estrutural, projetado e compactado com rolo, laboratório de concreto*”, editor Walton Pacelli de Andrade – PINI.
- Freiesleben-Hansen**, P., Pedersen, E. J., “*Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concret*”, Nordisk Betong, vol. 1, 1977, pp. 21-25.
- Gambale** E.A., Andrade M.A. S, Bittencourt, R.M, Santos S.B. “*Avaliação de Resultados do Ensaio de Elevação Adiabática do Concreto com base em um Novo Calorímetro*”. 46º Congresso Brasileiro do Concreto – Florianópolis – SC, 2004.
- Garotti**, E. A. O., Gambale, E. A., Bosco, J. M. C., Marques, J. M., Pacelli, W. A. “*Comportamento e Análise Térmica do Concreto Compactado com Rolo da UHE Salto Caxias*”. 41º Congresso Brasileiro do Concreto, Salvador – BA, 1999.
- Hetek**, “*Control of Early age cracking in concrete*”, Main Report. Report No. 118. Road directorate, ministry of transport, Denmark, 1997.
- Ibracon**, “*Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*” - Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, vol.1 e vol.2 (2005).
- Kuperman**, S. C.: “*Concreto Massa Convencional e Compactado com Rolo para Barragens*”, Concreto-Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, vol. 2, 2005.



**Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2009**

Outubro / 2009

ISBN

@ 2009 - IBRACON



Kuperman, S. C., Martinez, R.S.; Cifu, S., Fabbro, J.C.D. *“Temperaturas medidas e calculadas para o concreto compactado com rolo da UHE Lajeado”*. Seminário Nacional de Grandes Barragens, Salvador – BA, 2003.

Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. *“Concrete - Structure, Properties and Materials”*. São Paulo – SP: Editora Pini Ltda., 1994, Chapter 12, 573p.

Neville, A. M. *“Propriedades do Concreto”*. São Paulo: Editora Pini, 1989.

Paulon, V. A. *“O Fenômeno Térmico no Concreto”*. São Paulo-SP: Associação Brasileira do Cimento Portland, 1997, 42p.

Rastrup, E.: “Heat of hydration in concrete”. Magazine of Concrete Research, Vol. 6, nº 17 (1954), pp. 79-92.

Scandiuzzi, L., Andriolo, F. R. *“Concreto e seus Materiais: Propriedades e Ensaio”*. PINI, 1986. 553p.