

ESTUDO DE TENSÕES TÉRMICAS EM VERTEDOIRO DE PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA

Eduardo Issamu FUNAHASHI Júnior
Mestrando em Engenharia Civil – Universidade de São Paulo

Selmo Chapira KUPERMAN
Consultor – Desek Ltda – Universidade de São Paulo.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é comprovar que as fissuras verificadas quando da inspeção dos blocos do vertedouro de uma Pequena Central Hidrelétrica, eram de origem térmica. Para isto foi realizada simulação computacional através de um modelo tridimensional de elementos finitos desenvolvido com o software B4cast. Comprovou-se que devido às dimensões do vertedouro de concreto as temperaturas desenvolvidas na estrutura originaram elevadas tensões de origem térmica que superaram a resistência à tração do material e causaram o panorama fissuratório encontrado.

ABSTRACT

This paper aims to show how cracks observed during the inspection on spillway blocks of a small hydroelectric plant were proved to be of thermal origin. A three dimensional computer simulation of temperatures and stresses was carried out using the finite element method through the software B4cast. The results showed that due to the size of the concrete spillway the temperatures developed in the structure resulted in high thermal stresses that exceeded the tensile strength of the material and caused the formation of thermal cracks in the concrete.

1. INTRODUÇÃO

Um dos mais importantes fatores associados às fissuras de origem térmica, em estrutura de concreto massa é a evolução e distribuição do aumento da temperatura em toda a seção, a qualquer instante, após o seu lançamento. O aumento da temperatura é uma consequência direta da evolução do calor de hidratação do cimento. [1]

Sendo a estrutura 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.

As tensões de tração oriundas da queda de temperatura, normalmente formam um quadro fissuratório no elemento de concreto. A formação deste panorama prejudica tanto a capacidade portante quanto a durabilidade da estrutura, no caso de obras hidráulicas podem ocorrer infiltrações por essas fissuras prejudicando seu desempenho, por exemplo. Para evitar sua ocorrência, é necessária a utilização de materiais adequados, além do estudo e elaboração de um plano executivo adequado.

Os estudos térmicos consistem em análises de temperaturas e tensões oriundas respectivamente da liberação de calor gerada pela hidratação dos compostos do cimento e respectiva 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 quando de seu resfriamento.

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. [2]

Os parâmetros básicos que influenciam no projeto e na análise de estruturas de concreto massa em geral são: tipo de cimento (calor de hidratação do cimento); consumo de cimento por m³ de concreto (elevação adiabática da temperatura do concreto); litologia do agregado (difusividade térmica); temperatura ambiente; temperatura de lançamento do concreto fresco; geometria da estrutura de concreto; altura das camadas de concretagem; intervalo de lançamento das camadas de concretagem e transmissão superficial de temperatura (tipo de cura e fôrmas).

2. OBJETIVO

Este trabalho apresenta uma avaliação das tensões de origem térmica passíveis de ocorrerem quando da concretagem do bloco de vertedouro de dimensões 35mx 15mx7,5m de uma Pequena Central Hidrelétrica através da simulação de um modelo computacional matemático baseado no método dos elementos finitos. Para os estudos de evolução de temperaturas e tensões foi utilizado o programa B4cast

versão 3.26, no qual foi simulado método construtivo similar ao aplicado em obra, com fluxo térmico tridimensional.

Este estudo teve como objetivo específico comprovar que as fissuras verificadas quando da inspeção dos blocos do vertedouro eram de origem térmica. Devido às dimensões do vertedouro e as condições ambientais da região da obra verificou-se que as temperaturas desenvolvidas na estrutura, pelo concreto, originaram elevadas tensões de origem térmica. Estas tiveram como origem as reações de hidratação do cimento, sempre exotérmicas e que, em razão das dimensões do vertedouro, encontraram dificuldades em se dissipar para o meio circundante. Desta forma criaram-se condições para que, durante o arrefecimento da temperatura do concreto surgissem tensões de tração que foram superiores à resistência à tração do material e provocaram fissuras no mesmo. [3]

Vários fatores integraram o modelo matemático como, por exemplo, a temperatura de lançamento do concreto fresco, as alturas das camadas de concretagem, o intervalo de lançamento entre as camadas, condições ambientais (variação da temperatura ambiente e velocidade do vento), consumo de cimento, propriedades térmicas do concreto e da fundação, elevação adiabática, traços dos concretos utilizados e a geometria da estrutura, entre outros. Além disto, o modelo teórico considerou que a base está assentada sobre rocha basáltica.

3. INSPEÇÃO DO VERTEDOIRO – ESTUDO DE CASO

Previamente a realização da simulação térmica foi realizada uma inspeção no vertedouro para verificação das fissuras existentes. Após inspeção visual constatou-se que as fissuras, aparentemente, eram de origem térmica. A Figura 1 e Figura 2 apresentam as fissuras possivelmente térmicas verificadas quando da visita à usina.



FIGURA 1 – Fissuras verificadas quando da visita à usina



FIGURA 2 – Detalhe das fissuras. Notar fissuras de aproximadamente 0,8mm

4. PARÂMETROS DE CÁLCULO

4.1. CRONOGRAMA DE CONCRETAGEM

Para a verificação das fissuras presentes no bloco do vertedouro, cujo comprimento e largura considerados foram de 35m e 15m respectivamente, foi adotado o tempo de lançamento e altura das camadas de concretagem de acordo com informações fornecidas pela obra e apresentadas na Tabela 1.

Camadas	Duração da concretagem (dias)	Altura das camadas de concretagem (m)
C-I	2	0,5
C-II	1	0,5
C-III	1	0,5
C-IV	1	2,0
C-V	1	2,0
C-VI	1	2,0

TABELA 1 – Informações do lançamento e alturas de concretagem das camadas

4.2. ZONEAMENTO E CAMADAS DE CONCRETAGEM

A Figura 3 apresenta o zoneamento e camadas de concretagem adotados para o vertedouro e utilizado na simulação computacional.

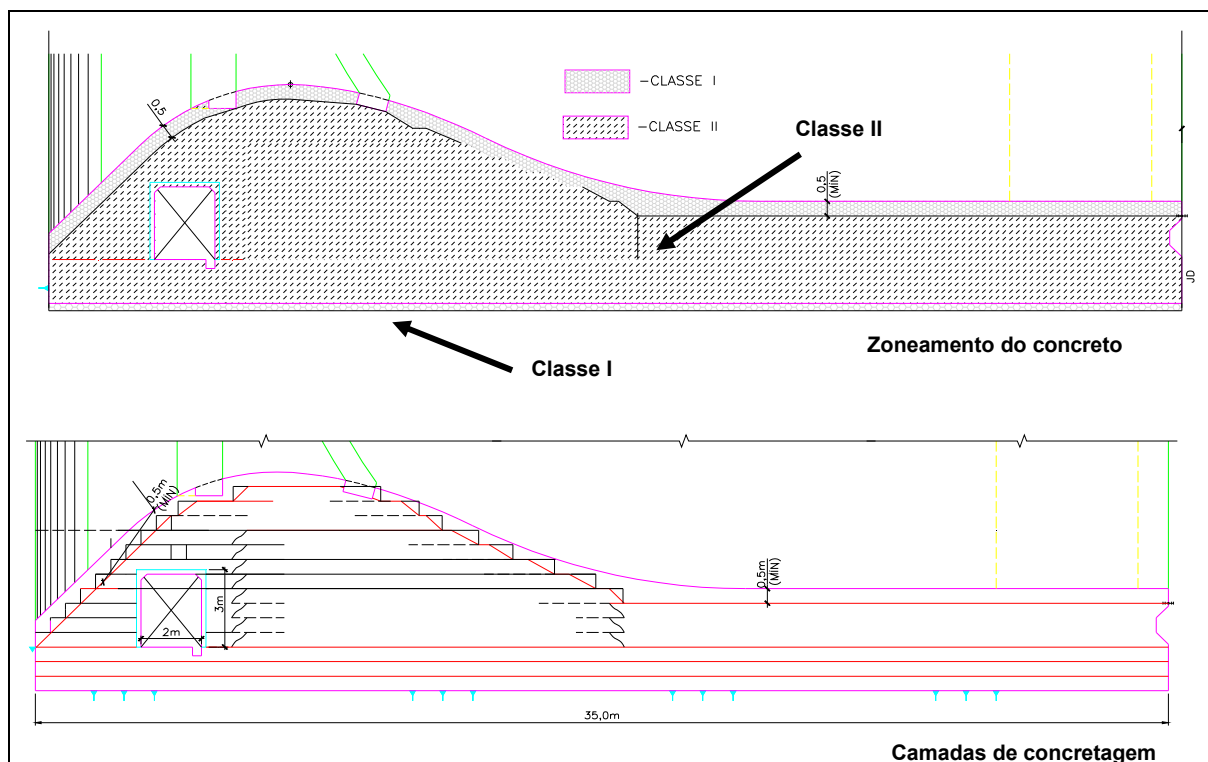


FIGURA 3 – Zoneamento e camadas de concretagem do vertedouro – Seção transversal

4.3. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS CONCRETOS

A Tabela 2 apresenta o traço dos concretos utilizados nas simulações de concretagem dos vertedouros.

Composição(kg/m ³)	Classe I	Classe II
Areia	728	735
Brita	1300	1190
Cimento	260	350
Água	179	184
Massa específica	2467	2459

TABELA 2 – Traço dos concretos envolvidos nas simulações de concretagem do vertedouro

O coeficiente de Poisson foi estimado a partir da dosagem prevista, admitindo-se o uso de um cimento tipo CP IV com agregado graúdo e miúdo de origem basáltica. [4] Foram adotados os seguintes valores para os coeficientes de Poisson, como mostra a Tabela 3.

Coeficiente de Poisson	Classe I	Classe II
7 dias	0,17	0,18
28 dias	0,20	0,24
90 dias	0,21	0,24

TABELA 3 – Coeficiente de Poisson

Os valores dos ensaios de resistência média à compressão dos concretos que foram aplicados nos vertedouros estão dispostos na Tabela 4.

Resistência à Compressão – Ensaio – (MPa)			
Classe do Concreto	7 dias	28 dias	90 dias
Classe I	5	6	16
Classe II	11	19	23

TABELA 4 – Resistência à compressão dos concretos obtidos nos ensaios

Os resultados de resistência à compressão obtidos através dos corpos de prova foram ajustados, para se adequarem a uma equação matemática que pudesse ser utilizada nos cálculos de tensões de origem térmica. Para este ajuste, foram calculados valores de resistência à compressão nas idades de controle (7, 28 e 90 dias) relacionando o consumo de cimento de cada traço com a eficiência (MPa/kg/m³) estimada de concretos que utilizaram o mesmo tipo de cimento. Para isto, foram utilizados resultados obtidos na barragem de Salto Caxias, da COPEL, onde se empregou também o cimento CP-IV. [5]

Após a obtenção dos três pontos correspondentes às idades de 7, 28 e 90 dias, as curvas de resistência à compressão para cada classe de concreto foram ajustadas. Os valores de resistência à compressão empregados no cálculo constam da Tabela 5.

Resistência à compressão– Estimada (MPa)			
Classe do Concreto	7 dias	28 dias	90 dias
Classe I	9	14	18
Classe II	11	19	24

TABELA 5 – Resistência à compressão estimada do concreto através da eficiência

A evolução da resistência à compressão para as classes de concreto I e II consta da Figura 4.

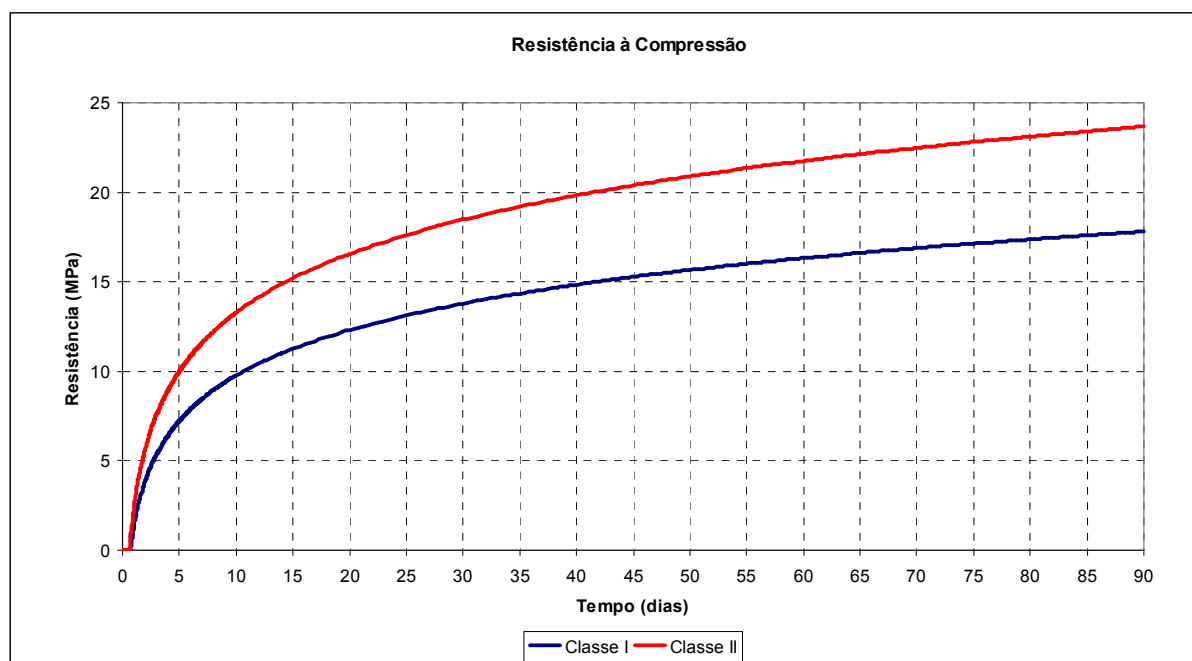


FIGURA 4 – Resistência à compressão concretos classe I e II

A resistência à tração foi calculada como 10% da resistência à compressão e seus valores estão dispostos na Tabela 6.

Resistência à tração (f_{ct}) (MPa)			
Classe do concreto	7 dias	28 dias	90 dias
Classe I	0,9	1,4	1,8
Classe II	1,1	1,9	2,5

TABELA 6. Resistência à tração dos concretos classe I e II

A Figura 5 apresenta a curva de resistência à tração de cada classe de concreto utilizada na simulação:

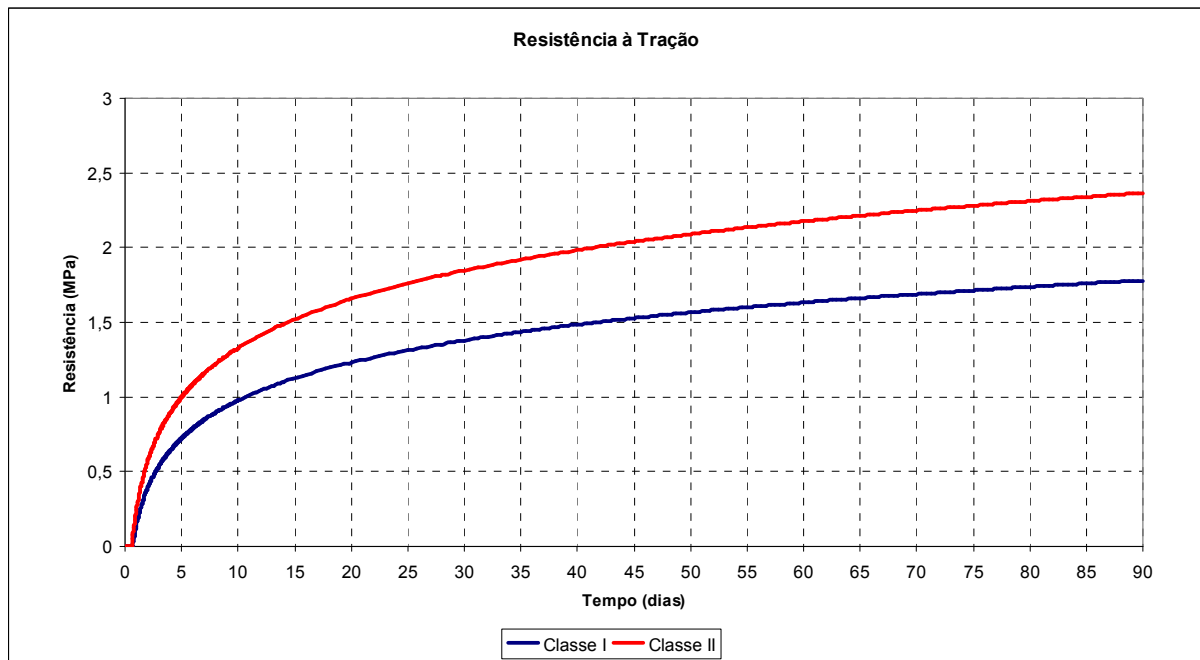


FIGURA 5 – Resistência à tração

Pelo fato dos concretos possuírem consumos relativamente elevados de cimento e serem produzidos com brita 1 e 2, o módulo de elasticidade foi calculado a partir da fórmula da NBR 6118-2003 e variável conforme dosagens similares.

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

$$E_{cs} = 0,85 E_{ci} = \text{módulo de elasticidade secante} \quad (2)$$

A Figura 6 mostra a evolução do módulo de elasticidade considerada para cada classe de concreto:

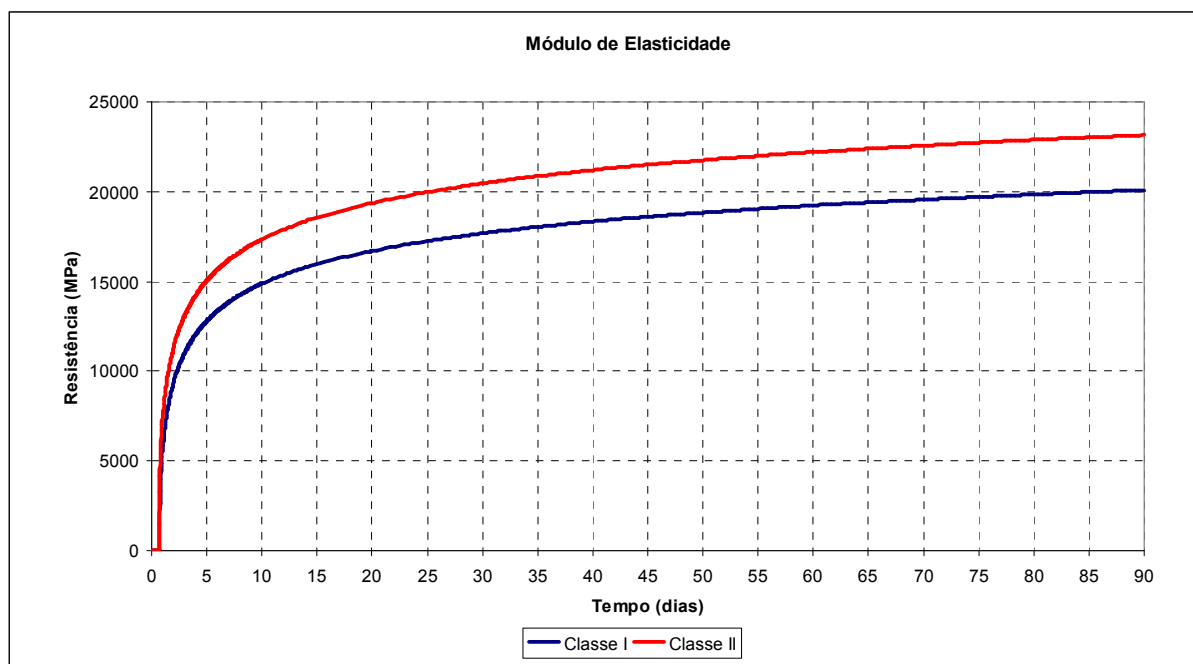


FIGURA 6. Módulo de elasticidade

4.4. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS CONCRETOS

4.4.1. Calor Específico e Condutividade Térmica

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

$$\text{Calor específico} = \frac{\sum m_i c_i}{\sum m_i} \quad (3)$$

$$\text{Condutividade térmica} = \frac{\sum m_i k_i}{\sum m_i} \quad (4)$$

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.

Na Tabela 7 são apresentados os valores de calor específico e condutividade térmica para cada classe de concreto:

Classe do concreto	Calor específico (kcal/kg°C)	Condutividade térmica (kcal/m.h.°C)
I	0,74	7,90
II	0,74	7,81

TABELA 7 – Características térmicas dos concretos

4.4.2. Elevação Adiabática de Temperatura e Calor de Hidratação

Como não estavam disponíveis os resultados de ensaios de calor de hidratação para o tipo de cimento CP-IV empregado e elevação adiabática para os concretos utilizados na obra, estes valores foram estimados.

As elevações adiabáticas para os concretos utilizados no vertedouro estão apresentadas na Tabela 8.

Tempo (horas)	Classe I	Classe II
0	0	0
24	21,4	28,6
48	31,2	41,8
72	36,9	48,2
120	40,5	54,3
168	43,8	57,3
240	44,6	59,7
336	45,8	61,4
480	46,8	62,7
672	47,5	63,6

TABELA 8 – Elevação adiabática dos concretos de classes I e II

A Figura 7 apresenta o desenvolvimento da elevação adiabática para os diferentes consumos de cimento de cada classe de concreto:

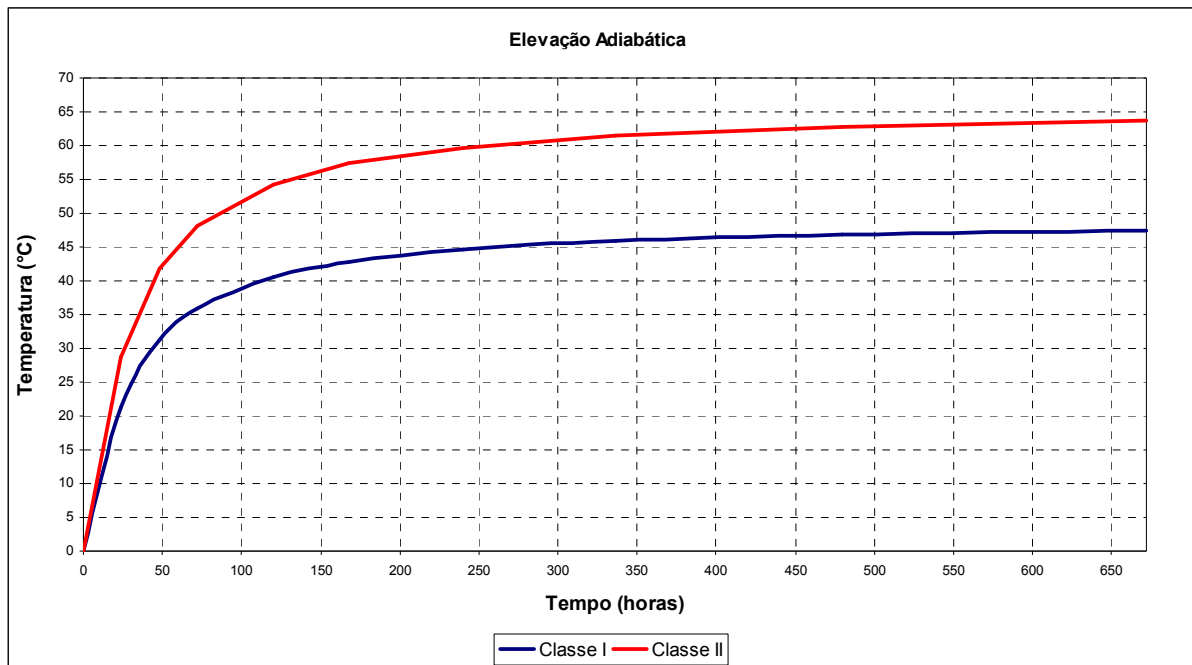


FIGURA 7 – Elevação adiabática dos concretos classes I e II

4.4.3. Calor de Hidratação do Cimento CP-IV

O calor de hidratação do cimento foi calculado através da fórmula de Rastrup a partir dos valores de elevação adiabática de temperatura da Tabela 8. [6]

$$\text{Calor de hidratação} = \frac{\Delta T \cdot \lambda \cdot c}{C} \quad (5)$$

Onde:

ΔT = Elevação adiabática (°C)

λ = Massa específica (kg/m³)

c = Calor de hidratação (kJ/kg °C)

C = Consumo de cimento (kg/m³)

A Figura 8 apresenta o desenvolvimento do calor de hidratação para o cimento CP-IV.

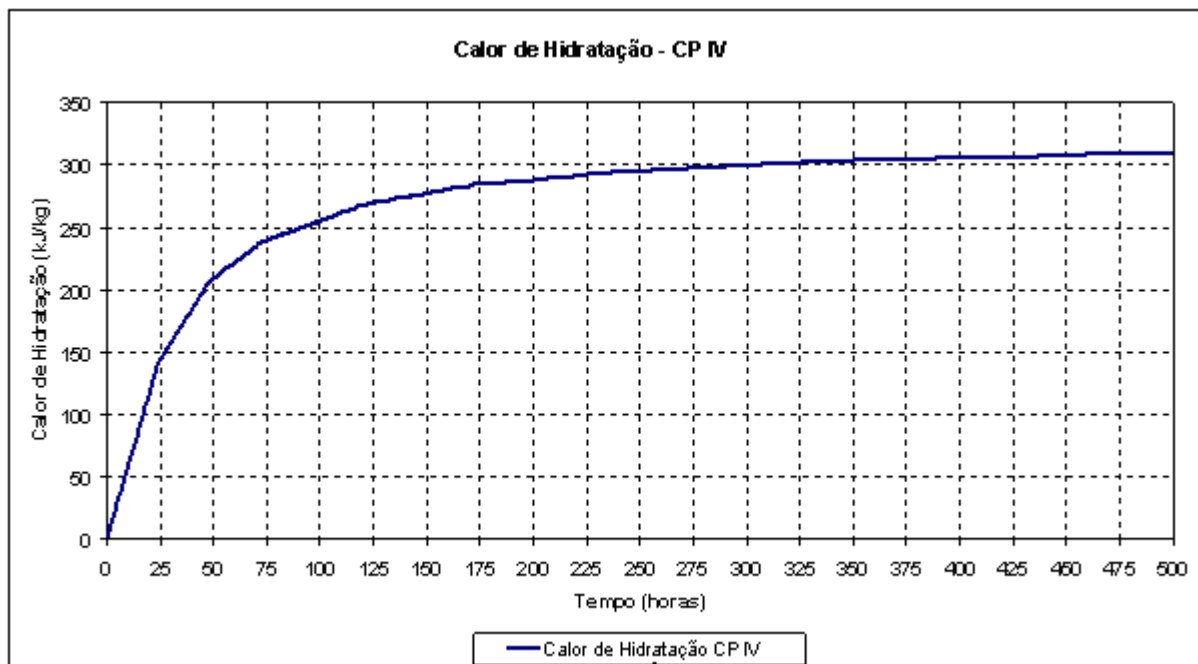


FIGURA 8 – Calor de hidratação do cimento CP-IV

4.4.4. Coeficiente de Dilatação Térmica

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

$$\alpha = \frac{m_{pasta} \cdot \alpha_{pasta} + m_{areia\ natural} \cdot \alpha_{areia\ natural} + m_{areia\ artificial} \cdot \alpha_{areia\ artificial} + m_{brita} \cdot \alpha_{brita}}{m_{pasta} + m_{areia\ natural} + m_{areia\ artificial} + m_{brita}} \quad (6)$$

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 a/c. [4]

Os valores do coeficiente de dilatação linear para cada classe de concreto são indicados na Tabela 9.

Tempo (dias)	Classe I	Classe II
7	7,8E-06	8,0E-06
28	8,0E-06	8,3E-06
90	8,3E-06	8,7E-06

TABELA 9 – Coeficiente de dilatação térmica

4.5. CARACTERÍSTICAS DO SOLO DE FUNDAÇÃO

As características da fundação foram adotadas de acordo com o tipo de formação geológica do local onde foi concretado o vertedouro: rocha basáltica.

Para este tipo de formação geológica foram adotados os seguintes valores constantes da Tabela 10.

Propriedades da fundação – Rocha basáltica	
Massa específica (kg/m ³)	2940
Calor específico(kJ/kg/°C)	0,90
Condutividade térmica (kJ/m/h/°C)	8,1
Módulo de elasticidade (MPa)	70800
Resistência à compressão (MPa)	164,6
Coeficiente de dilatação térmica (10 ⁻⁶ /°C)	6,3
Coeficiente de Poisson	0,21

TABELA 10 – Propriedades da fundação (FURNAS, 1997)

5. CONDIÇÕES DE CONTORNO

5.1. TEMPERATURA AMBIENTE

A temperatura média ambiente foi adotada de acordo com informações constantes do CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos). A temperatura média anual considerada foi de cerca de 20°C. A Figura 9 ilustra a evolução das temperaturas médias ambiente mensais adotadas.

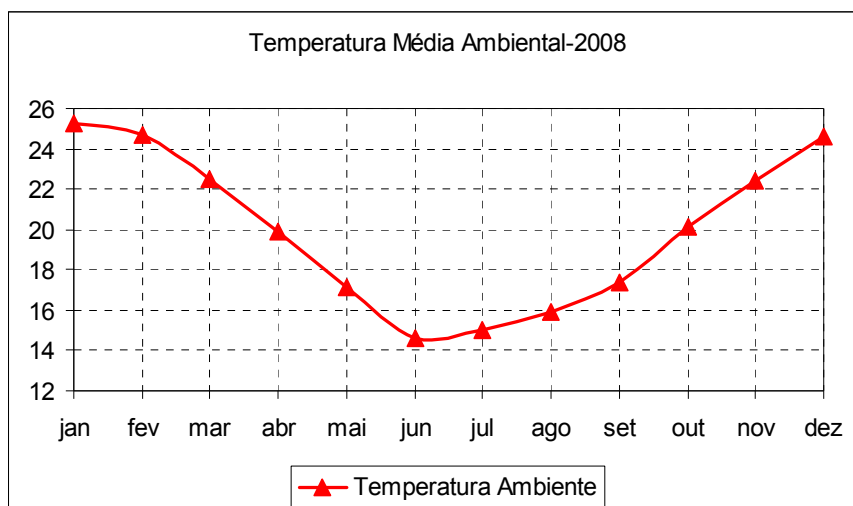


FIGURA 9 – Temperatura média ambiente – 2008

5.2. COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO SUPERFICIAL DE CALOR

Os coeficientes de transmissão superficial de calor considerados na simulação constam da Tabela 11.

Tipo de troca	Transmissão superficial de calor (kJ/m ² .h.°C)
Concreto - ar	48,57
Concreto - água de cura	1256,04
Concreto - fôrma+vento	138,6

TABELA 11 – Transmissão superficial de calor (MEHTA, 2006)

- A velocidade do vento incidente na estrutura, embora seja variável, foi adotada como de 5m/s de acordo com as características locais;
- As fôrmas foram simuladas como colocadas no início da concretagem e retiradas 48 horas após o término da concretagem, segundo informações da obra;
- A temperatura de lançamento adotada para os concretos foi de 32°C de acordo com as informações da obra;
- Temperatura superficial do solo adotada igual a temperatura média ambiente mensal.

6. MODELO ANALISADO – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Foram simuladas as evoluções de temperaturas e tensões que ocorreriam num modelo tridimensional através do método de elementos finitos, nas seções mais críticas do bloco de vertedouro.

A malha de elementos finitos é automaticamente formada por elementos tetraédricos e desenvolvida pelo software através de modelos probabilísticos. Os elementos tetraédricos são formados com 10 nós para análise térmica e 20 nós (cada um com 3 graus de liberdade) para análise das tensões. [7] [8]

O cálculo tridimensional de temperaturas, no elemento de concreto, pressupõe que a propagação de calor ocorre na seção transversal e longitudinal simultaneamente aproximando-se de uma situação real. A malha de elementos finitos adotada para a simulação está apresentada na Figura 10 enquanto a geometria está apresentada na Figura 11.

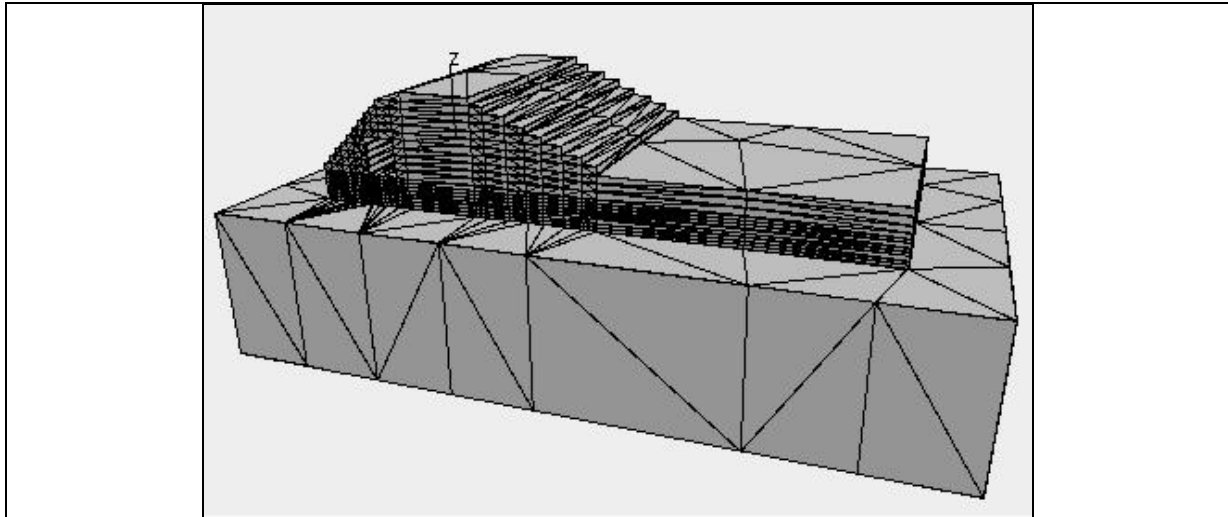


FIGURA 10 – Malha de elementos finitos

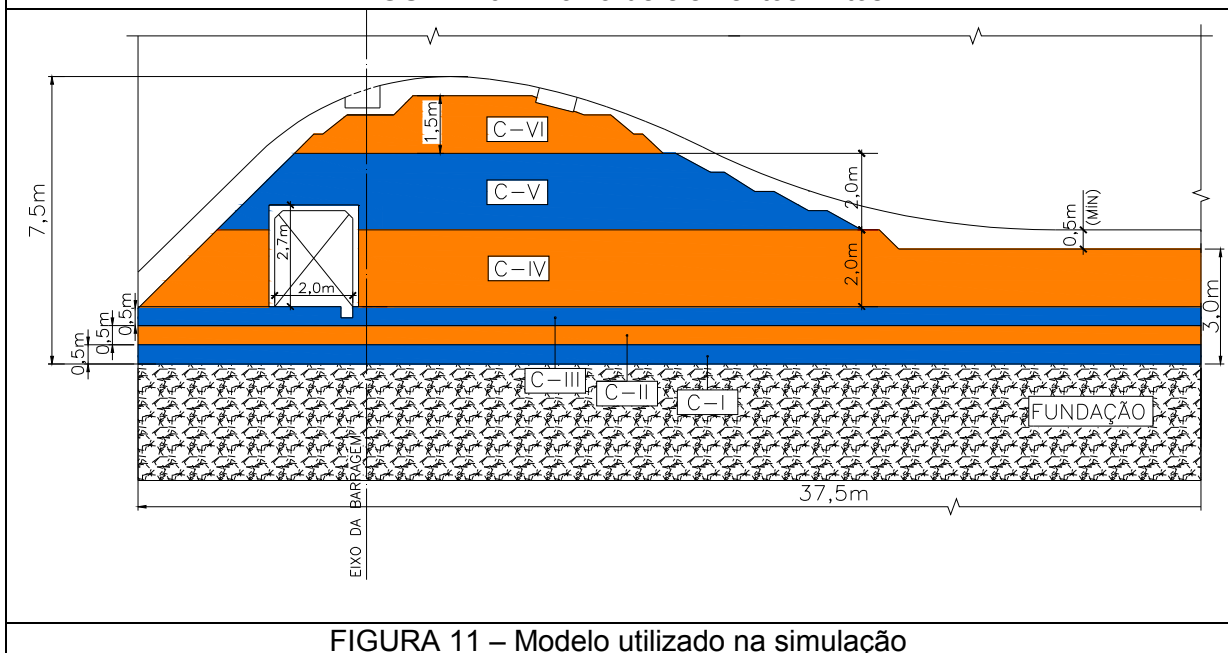


FIGURA 11 – Modelo utilizado na simulação

7. ESTUDO DE CASO – TENSÕES DE ORIGEM TÉRMICA

Na simulação foi considerada camada de 0,5m para regularização, em contato com a fundação. A simulação do lançamento de cada camada de 2 metros não considerou seu lançamento instantâneo, mas sim de acordo com uma velocidade de concretagem compatível com o volume de cada camada. Este tipo de simulação aproxima-se mais da realidade e faz com que as temperaturas máximas atingidas sejam inferiores aquelas que seriam obtidas caso o lançamento fosse instantâneo. Todas as camadas seguiram os intervalos de lançamento indicados na Tabela 12.

Estrutura	Intervalo de lançamento (dias)	Altura da camada (m)	Temperatura de lançamento do concreto (°C)
Bloco do vertedouro	3	2	32

TABELA 12 – Caso estudado (condições de lançamento do concreto)

Através da simulação analisou-se o desenvolvimento das máximas temperaturas ocorridas nos blocos do vertedouro. Para os estudos de temperatura decidiu-se analisar 4 pontos situados em regiões mais críticas e escolhidos a partir das isotermas obtidas nas simulações; estes pontos foram localizados em diferentes camadas e alturas de concretagem, como indicam a Figura 12. A seguir são apresentadas as isotermas e a localização dos pontos de estudo para os blocos do vertedouro nas seções x, y e z.

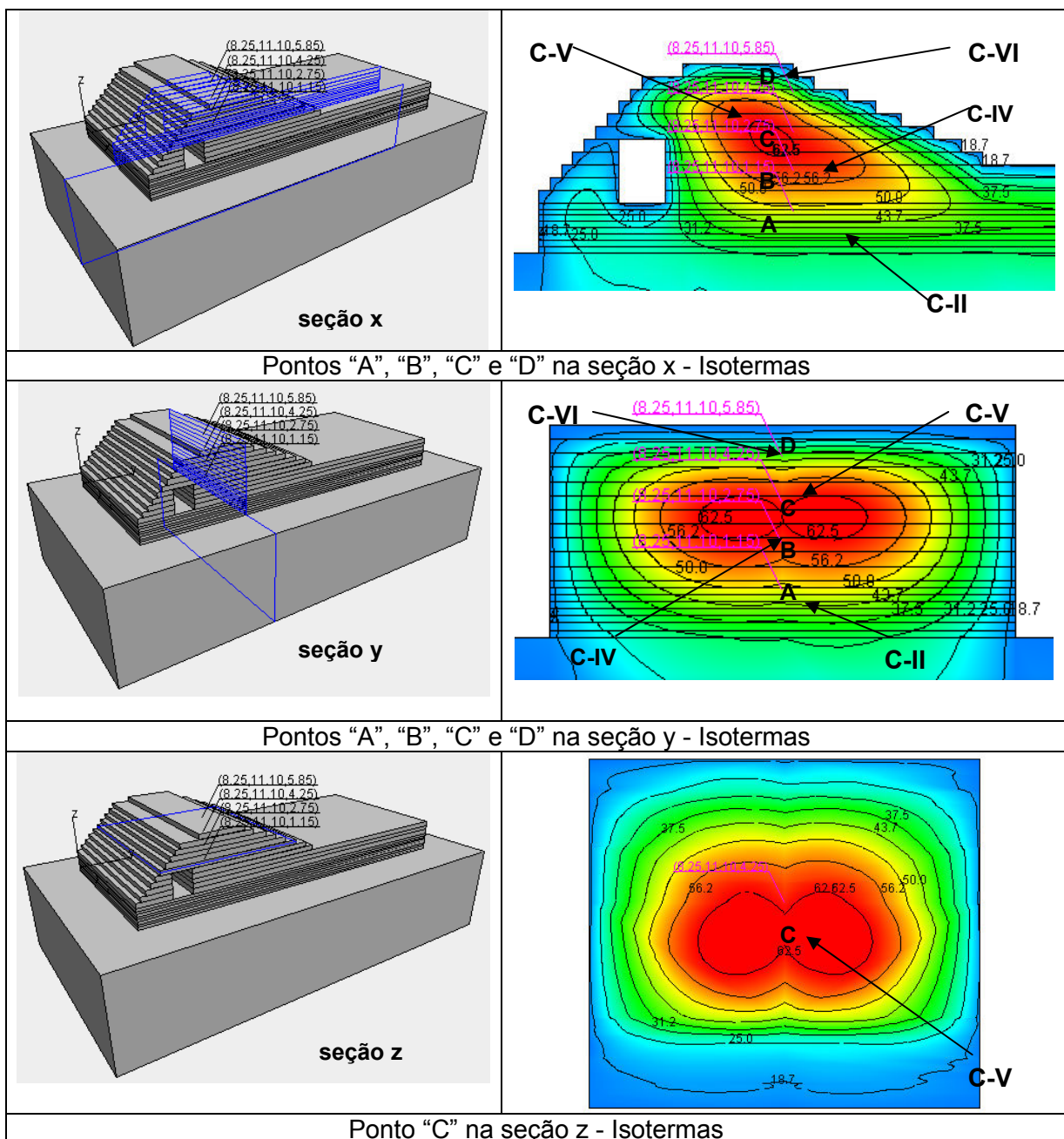


FIGURA 12 – Isotermas e localização dos pontos estudados

A Figura 13 indica a localização dos pontos “A”, “B”, “C” e “D” de temperaturas e tensões estudados para o bloco do vertedouro.

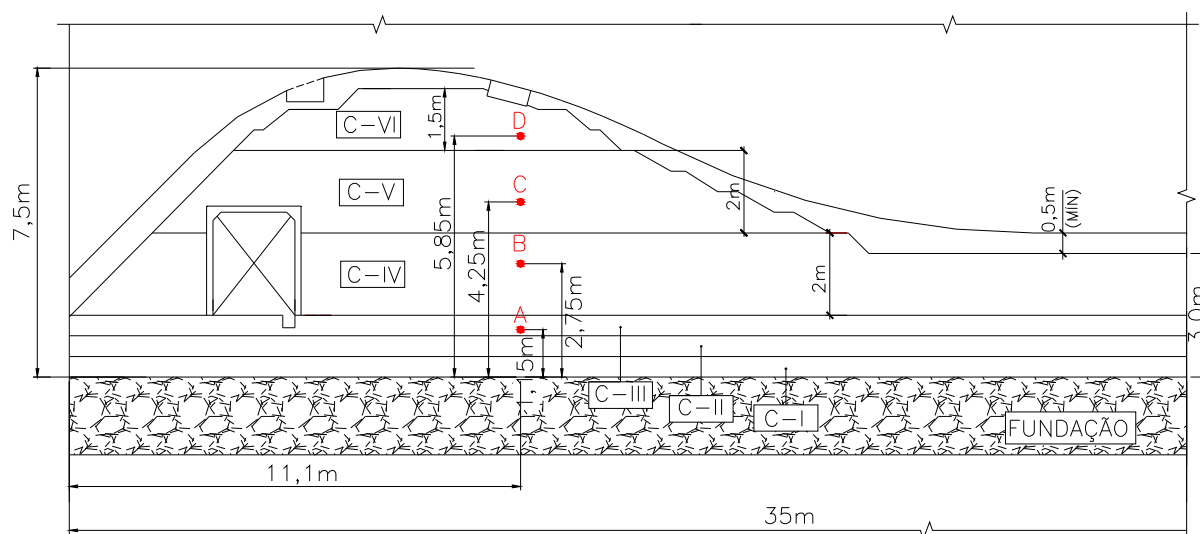


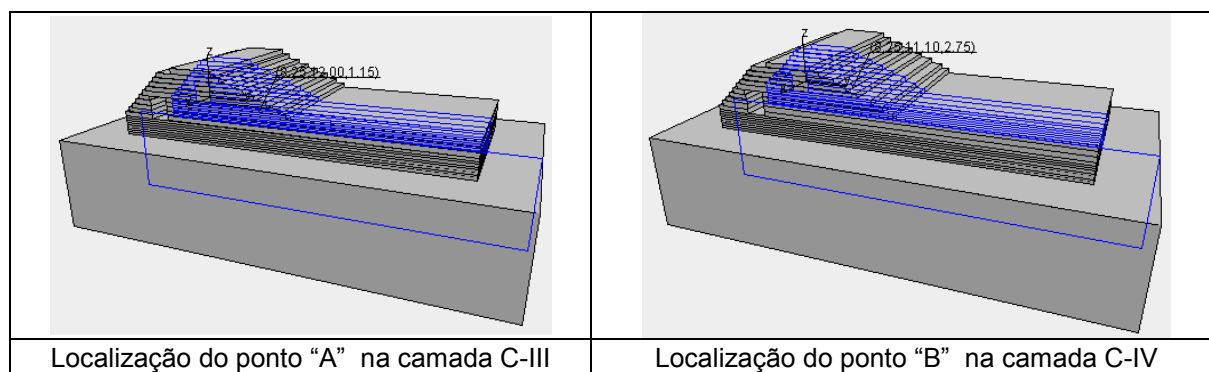
FIGURA 13 – Localização dos pontos “A”, “B”, “C” e “D” de temperaturas e tensões estudados – Seção transversal

Primeiramente realizou-se uma análise do desenvolvimento das temperaturas máximas ao longo do tempo onde foram simuladas camadas de 2 metros de altura com intervalo de lançamento de três dias. A seguir é apresentado o estudo dos pontos “A”, “B”, “C” e “D” localizados na estrutura do vertedouro. A Tabela 13 apresenta os pontos estudados nas respectivas camadas de concretagem e suas alturas em relação à fundação. Todos os pontos analisados estão localizados ao meio da seção longitudinal para as respectivas alturas em relação à fundação.

Estrutura	Ponto	Camada	Altura em relação à regularização(m)
Bloco do vertedouro	A	C-III	1,15
	B	C-IV	2,75
	C	C-V	4,25
	D	C-VI	6,15

TABELA 13 – Localização dos pontos de estudo de tensões e temperaturas

Na Figura 14 é apresentada a localização dos pontos “A”, “B”, “C” e “D” estudados.



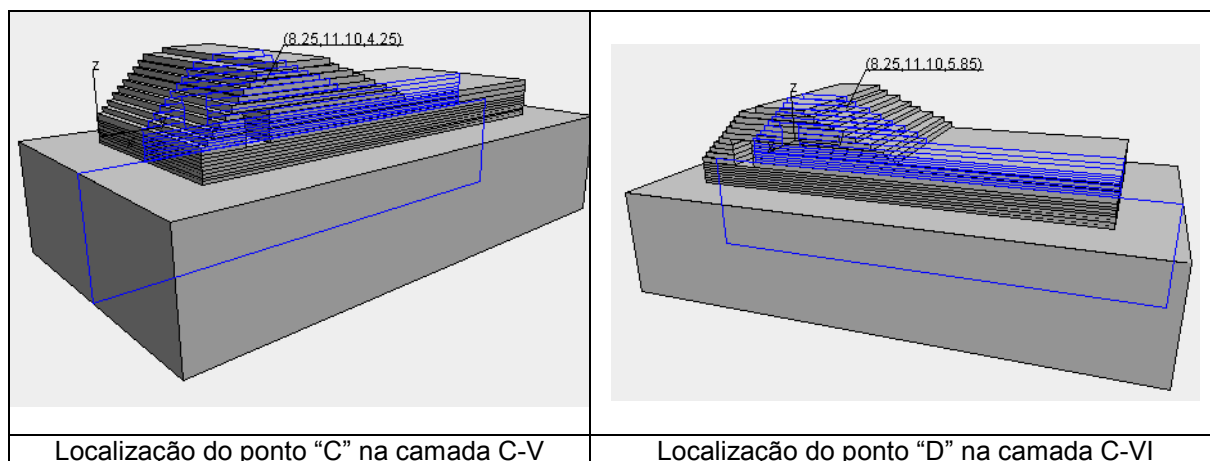


FIGURA 14 – Localização dos pontos analisados

7.1. RESULTADOS DA ANÁLISE TÉRMICA

É apresentado na Figura 15 o comportamento das curvas de temperatura para as camadas de concretagem C-III, C-IV, C-V e C-VI cujos pontos estudados em cada camada (“A”, “B”, “C” e “D”) constam da Figura 13 e Figura 14. O gráfico mostra o desenvolvimento das temperaturas ao longo do tempo a partir do lançamento de cada camada. A temperatura de lançamento em todas as camadas foi considerada de 32°C.

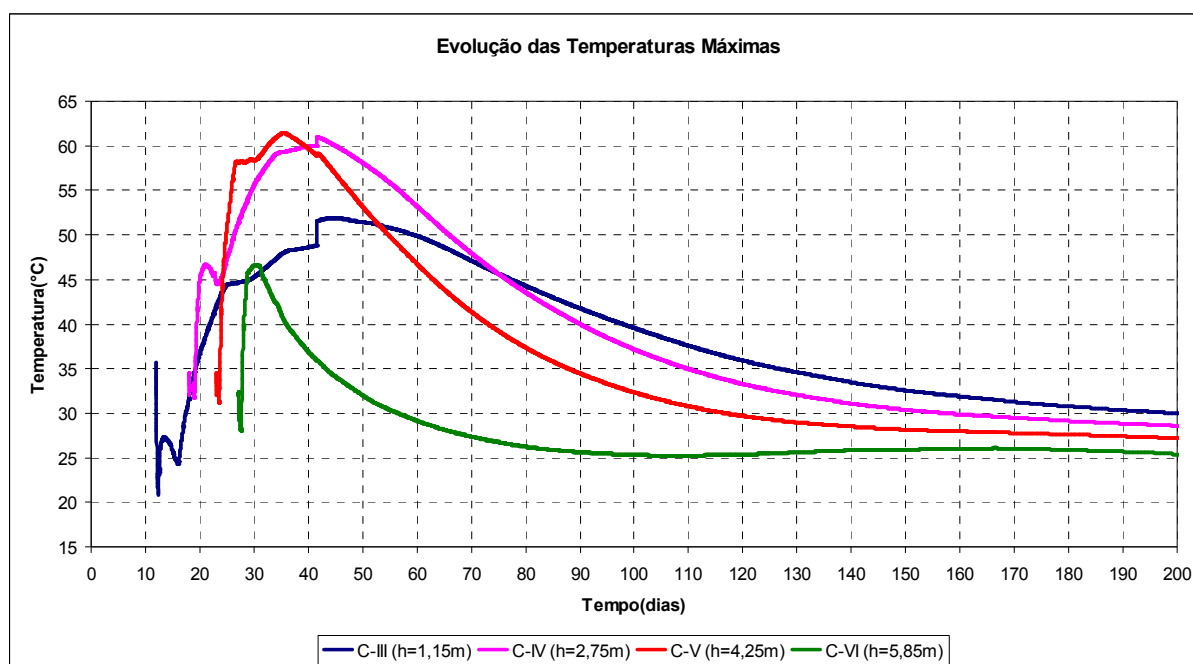


FIGURA 15 – Evolução das temperaturas – IL =3dias (altura de camadas de 2m)

Pelas curvas de temperatura nota-se uma rápida elevação da temperatura nas primeiras horas em virtude do calor gerado pela hidratação do cimento nas primeiras idades. As temperaturas máximas atingidas nos pontos seleccionados e localizados nas camadas C-IV e C-V são de 61,0°C e 61,3°C, respectivamente. Estas temperaturas são elevadas pelo fato dos pontos estarem localizados próximos ao centro da estrutura, o que dificulta a troca de calor com o exterior. A camada C-III atinge a temperatura de 51,9°C, que é baixa quando comparada com os demais

pontos estudados, fato explicado pela sua proximidade com a fundação, onde há uma melhor dissipação do calor gerado. O ponto localizado na camada C-VI atinge a sua temperatura máxima de 46,5°C cerca de 3 dias após o seu lançamento e rapidamente sua temperatura decresce quando comparada com os demais pontos estudados. Isto é explicado pela localização desta camada que está mais próxima da superfície, o que possibilita uma maior troca de calor com o meio ambiente. Pela leitura da Figura 15 identifica-se que as temperaturas desenvolvidas nas camadas tendem a aproximar-se dos 25°C cerca de 180 dias após o início da concretagem; o equilíbrio com a temperatura média ambiente ocorrerá ao longo do tempo.

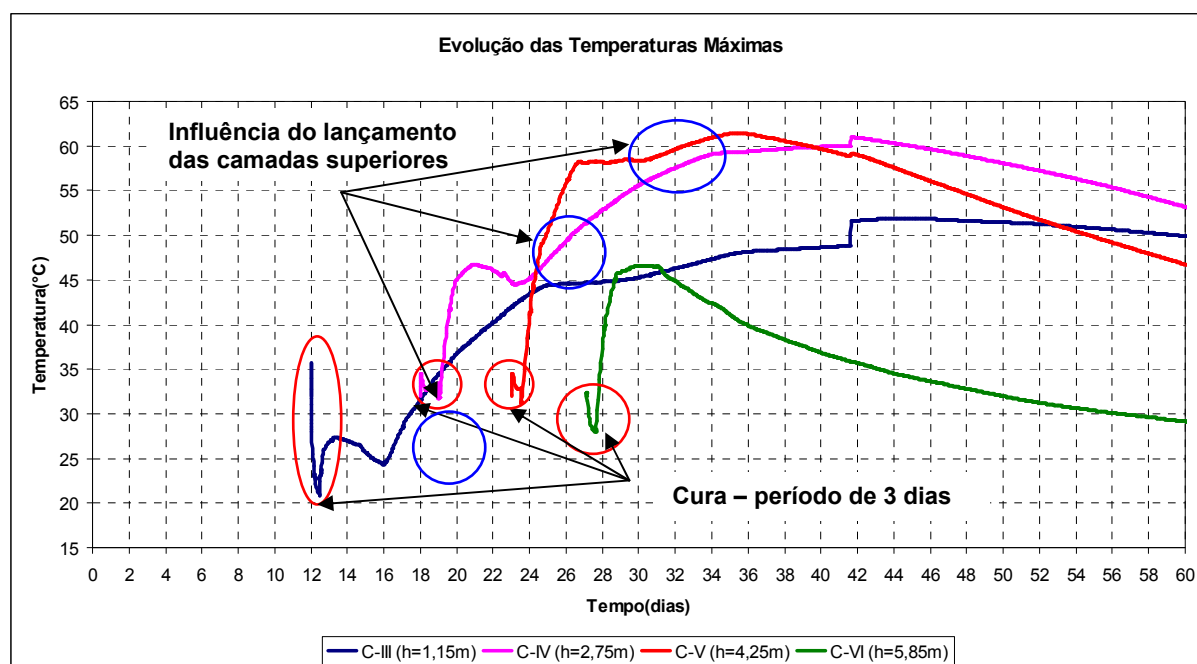


FIGURA 16 – Evolução das temperaturas nas primeiras idades— IL=3dias (camadas de 2m)

Através da Figura 16 nota-se a influência da cura realizada em cada camada lançada. Neste caso a cura foi realizada em um período de 3 dias, ou seja, iniciou-se 2 horas após o término da concretagem da camada e foi finalizada ao iniciar-se a concretagem da próxima. Através dos períodos sinalizados na Figura 16 nota-se uma elevação da temperatura gerada pela liberação de calor através das reações de hidratação do cimento e em seguida uma queda de temperatura ocasionada pela realização da cura, perda de calor para o ambiente, ação do vento e temperatura ambiente. No ponto localizado na camada C-III há uma queda de aproximadamente 10°C. Este fato é explicado pela espessura da subcamada de 0,5m propiciando uma maior perda de calor para o ambiente e pela proximidade da camada da rocha de fundação, o que possibilita uma dissipação de calor para a mesma. Isso é verificado nos outros pontos estudados, porém a perda é menor já que esses pontos estão localizados no centro das camadas que possuem espessura de 2 metros.

Nas camadas C-IV e C-V há uma interferência no desenvolvimento das curvas de temperaturas devido ao lançamento das subcamadas posteriores. Os gráficos mostram ter havido uma queda de temperatura ocasionada pela cura realizada entre os intervalos de lançamento. Essa diminuição de temperatura variou de 0,5 a 2,8°C dependendo da localização do ponto estudado. A diminuição de temperatura no ponto localizado na camada C-V foi pequena, pois localiza-se no meio da camada

de 2m. Já para a camada C-III, houve uma queda maior de temperatura no período de cura, pois esta possui 0,5m de espessura possibilitando uma perda de calor mais acentuada.

7.2. RESULTADOS DE TENSÕES DE ORIGEM TÉRMICA

É apresentada na Figura 17 a evolução das tensões principais máximas ao longo do tempo a partir de seu lançamento para os pontos “A”, “B”, “C” e “D”. Estes pontos estão localizados nas camadas C-III, C-IV, C-V e C-VI, respectivamente.

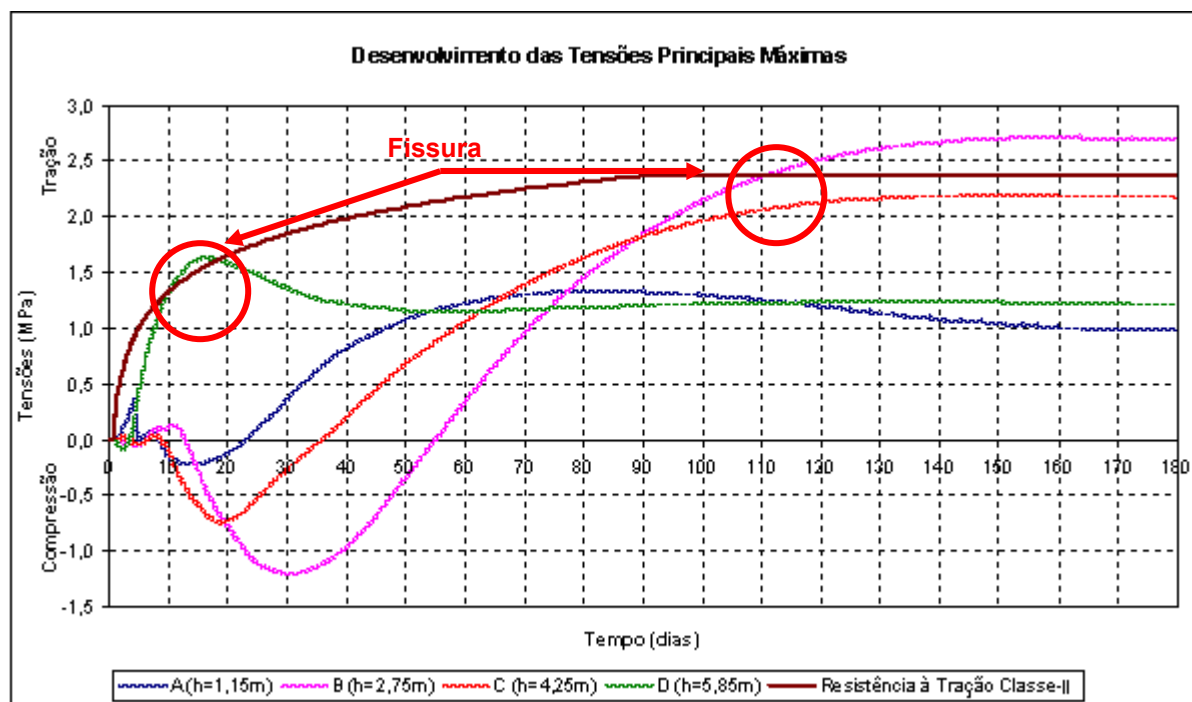


FIGURA 17 – Evolução das Tensões nos pontos “A”, “B”, “C” e “D”

Para a verificação da possibilidade de fissuração foi realizada uma comparação entre a resistência à tração do concreto com as tensões máximas desenvolvidas em todo período de cálculo. Através da Figura 17 verifica-se que há a possibilidade de fissuração no ponto “B” após 110 dias e no ponto “D” após 10 dias do lançamento de suas camadas de concretagem, pois nestes instantes a resistência à tração do concreto classe I é ultrapassada pelas tensões desenvolvidas nos pontos estudados.

8. CONCLUSÕES

- As simulações de tensões de origem térmica efetuadas mostraram que eram grandes as possibilidades de ocorrência de fissuração nas camadas C-IV, C-V e C-VI para o bloco do vertedouro, fato comprovado pela constatação das fissuras térmicas quando da inspeção do vertedouro;
- Para evitar a ocorrência de fissuras térmicas seria necessário reduzir a temperatura máxima a ser atingida pelo concreto, no caso de estruturas maciças como o vertedouro.

c) A redução da temperatura máxima a ser atingida pelo concreto pode ser obtida mediante refrigeração do concreto. Outras medidas importantes que poderiam auxiliar seriam a redução do consumo de cimento, aumento da idade de controle das resistências (desde que haja real aumento das mesmas ao longo do tempo) e redução do valor exigido das resistências de modo a se reduzir o consumo de cimento;

9. PALAVRAS-CHAVE

Palavra-Chave: concreto massa, vertedouro, tensão de origem térmica, simulação computacional, software b4cast

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MORABITO, P. (1998) – “Methods to Determine the Heat of Hydration of Concrete. Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages”, Report 15, R.Springenschmid, E & FN SPON;
- [2] MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. (2006) - “Concrete - Structure, Properties and Materials”, Editora Pini Ltda., São Paulo, Chapter. 13, 652p. ;
- [3] KUPERMAN, S. C. (2005) – “Concreto Massa Convencional e Compactado com Rolo para Barragens”, Concreto-Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, São Paulo, Vol. 2;
- [4] FURNAS. (1997) - “Concretos – Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo, laboratório de concreto”, editor Walton Pacelli de Andrade, PINI, São Paulo;
- [5] KRUGUER, D. A. V. (2001) - “Análise Térmica Transiente de Estruturas de Concreto Executadas por Camadas”, dissertação de mestrado, UFPR, Curitiba;
- [6] RASTRUP, E. (1954) - “Heat of Hydration in Concrete”, Magazine of Concrete Research, Copenhagen, Vol. 6, nº 17, p. 79-92;
- [7] HETEK. (1997) - “Control of Early Age Cracking in Concrete”, Main Report, Report No. 118.Road directorate, ministry of transport, Denmark;
- [8] FREIESLEBEN-HANSEN, P., PEDERSEN, E. J. (1977) - “Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concret”, Nordisk Betong, vol. 1, pp. 21-25.
- [9] CONTECH ANALYSIS APS (2006) – “B4cast User Guide“, Denmark, 21p.