



SIMULAÇÃO DE TENSÕES TÉRMICAS DA SALA DE RADIOTERAPIA DO HOSPITAL DAS CLÍNICAS DE RIBEIRÃO PRETO-SP

THERMAL STRESSES SIMULATION OF THE RADIOTHERAPY ROOM AT RIBEIRÃO PRETO CLÍNICAS HOSPITAL-SP

Eduardo I. Funahashi Jr. (1); Selmo Chapira Kuperman (2); Grazielle Ribeiro Vicente (3); Edson Seixas Forni (4); Evandro Cesar de Lima (5)

(1) *Mestrando em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo/DESEK Ltda., eduardo.desek@gmail.com*

(2) *Doutor em Engenharia Civil /DESEK Ltda., selmo@desek.com.br*

(3) *Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Mackenzie/DESEK Ltda., grazielle.desek@gmail.com*

(4) *Engenheiro Civil, ETEC, etec@netsite.com.br*

(5) *Engenheiro Civil, HCRP-FMRP, arq.evandro@hcrp.fmrp.usp.br*

Resumo

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 e metodologias executivas adequadas. Este trabalho apresenta a análise das temperaturas e tensões de origem térmica da sala de radioterapia de concreto do Hospital das Clínicas de Ribeirão Preto-SP, construída em 2009, que possui elevadas espessuras das paredes e lajes de concreto. Fissuras nestes elementos são indesejáveis devido à existência de radiação. O estudo empregou um modelo tridimensional de elementos finitos utilizando-se o software B4cast. Durante e após a concretagem as temperaturas do concreto foram registradas através de termômetros instalados no interior das paredes.

A partir do traço utilizado, das condições de lançamento do concreto (fabricado com adição de gelo), do intervalo de lançamento e das espessuras das camadas adotadas, foi analisado o desenvolvimento das tensões térmicas passíveis de ocorrerem na estrutura.

Os resultados demonstraram a importância do emprego da refrigeração do concreto neste tipo de estrutura e a adequação do cálculo de tensões térmicas através do modelo empregado. Chama-se a atenção para a importância de simulação computacional para diminuição dos riscos de fissuração térmica e para orientar metodologias construtivas a serem utilizadas.

Palavra-Chave: concreto massa, fissuras de origem térmica, simulação computacional, software B4cast, concreto refrigerado

Abstract

Massive concrete structures are more susceptible to develop thermal cracks. Therefore, it is necessary to control the temperature of those structures through the use of appropriate materials and suitable construction methodologies. This work presents the thermal stress analysis of the radiotherapy concrete room at the Ribeirão Preto Clínicas Hospital-SP, built in 2009, which has large walls thicknesses and thick concrete slabs. Cracking of these elements are undesirable due to the existence of radiation. A three dimensional model using the finite element method calculated the thermal stresses through the B4cast software. Concrete temperatures were recorded by thermometers embedded in the walls.

Thermal stresses analysis considered the concrete mixture used, type of concrete placement (including cooling with ice flakes), the time interval between successive lifts and the lift height.

The results showed the importance of cooling concrete for that structures and the adequacy of the thermal stresses calculation through the model. Attention is drawn to the importance of computer simulation to reduce risks of thermal cracking and to guide the constructive methodologies to be used.

Keywords: mass concrete, thermal cracks, computer simulation, b4cast software, cooling concrete



1 Introdução

Durante o processo de endurecimento do concreto nas primeiras idades, o calor é gerado através de reações químicas entre o cimento e a água. O acúmulo de calor no interior do concreto massa pode resultar em um aumento significativo de temperatura, podendo alcançar temperaturas superiores a 60°C (GADJA, 2002).

Durante a dissipação de calor através da superfície de concreto para o meio ambiente, a temperatura no concreto massa não é uniforme e, eventualmente pode cair rapidamente a níveis próximos à temperatura ambiente levando-o a contrações desiguais que, devido a existência de restrições, podem originar fissuras térmicas.

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

O ACI Committee 116 define concreto massa como o concreto em uma estrutura maciça, por exemplo, blocos, vigas, pilares, estacas e barragens, onde o volume é de tal magnitude que requer meios especiais para combater a geração de calor e a decorrente mudança de volume.

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, transmissão superficial de temperatura (tipo de cura e fôrmas) e propriedades mecânicas do concreto.

2 Objetivo

Este trabalho apresenta uma avaliação das tensões de origem térmica passíveis de ocorrerem quando da concretagem da sala de radioterapia do hospital das Clínicas de Ribeirão Preto-SP, através da simulação de um modelo computacional matemático baseado no método dos elementos finitos. Para os estudos de evolução de temperaturas e tensões térmicas foi utilizado o programa B4cast versão 3.31, no qual foi simulado método construtivo similar ao aplicado em obra, com fluxo térmico tridimensional.

Devido às dimensões das paredes e da laje da sala de radioterapia além das condições ambientais da região da obra verificou-se que as temperaturas desenvolvidas na estrutura, pelo concreto, poderiam originar elevadas tensões de origem térmica. Havia, neste caso, condições para que durante o arrefecimento da temperatura do concreto surgissem tensões de tração que se fossem superiores à resistência à tração do material poderiam provocar fissuras no mesmo (KUPERMAN, 2005).

O modelo matemático é integrado por alguns fatores como, por exemplo: a temperatura de lançamento do concreto fresco, as alturas das camadas de concretagem, o intervalo de lançamento entre camadas, condições ambientais (variação da temperatura ambiente e velocidade do vento), consumo de cimento, propriedades mecânicas do concreto e da

fundação, elevação adiabática do concreto, dosagem dos materiais, geometria da estrutura, entre outros.

3 Estudo de Caso

A sala de radioterapia do hospital das Clínicas de Ribeirão Preto-SP foi construída para utilização de um acelerador linear ONCOR DUAL e terá a finalidade de tratamento médico através da utilização de intensidade modulada de feixes de radiação.

POLIVKA e DAVIS afirmam que o concreto é um excelente material de blindagem que possui as características necessárias tanto para a atenuação de nêutrons quanto para raios gama, tem propriedades mecânicas satisfatórias e um custo inicial e de manutenção relativamente baixo. Também a facilidade de construção faz do concreto um material especialmente apropriado para a blindagem de radiação. Pelo fato de conter uma mistura de hidrogênio e de outros núcleos leves, além de núcleos de número atômico maior, e poder ser produzido dentro de uma faixa relativamente ampla de massas específicas, o concreto é eficiente na absorção de ressonância e de nêutrons lentos. O hidrogênio e o oxigênio, presentes nos hidratos de cimento sob forma quimicamente combinada, moderam satisfatoriamente o fluxo de nêutrons (MEHTA, 2006).

Desta maneira, visando esta blindagem à radiação, as paredes e laje de concreto do bunker são espessas e, poderiam ocorrer fissuras de origem térmica. A Figura 1 mostra a planta geral da sala de radioterapia.

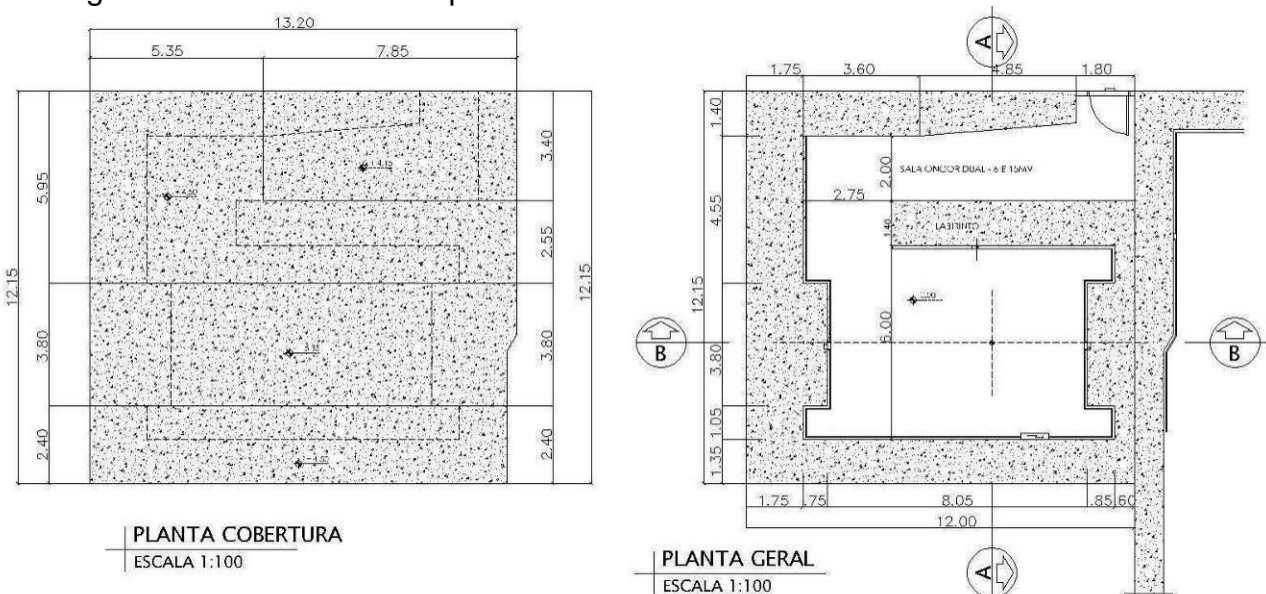


Figura 1 – Planta da cobertura e planta geral da sala de radioterapia

A Figura 2 mostra o corte AA e corte BB da sala de radioterapia do hospital das Clínicas de Ribeirão Preto-SP.

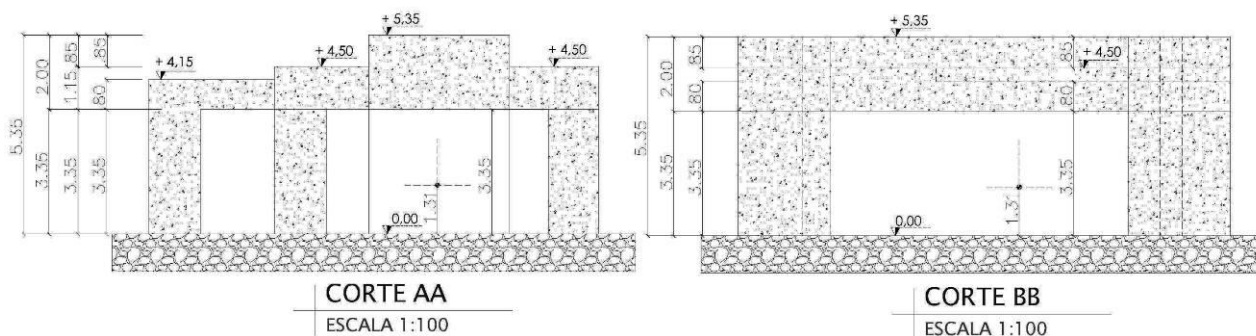


Figura 2 – Corte AA e corte BB

Para que a possibilidade de fissuração fosse minimizada, optou-se pela refrigeração do concreto fresco a uma temperatura de lançamento inferior a 16°C. A partir do cálculo de balanço térmico, verificou-se que somente seria possível atingir esta temperatura se fosse adicionado 100% de gelo em substituição à água de amassamento. Os materiais secos (cimento, areia natural, areia artificial, brita 1 e aditivo) foram adicionados na própria usina e os caminhões betoneira chegaram à obra sem a adição de água. Assim, toda a água foi adicionada ao concreto no caminhão betoneira em forma de gelo (para controle da temperatura de lançamento do concreto) além de ser adicionado aditivo polifuncional para se obter uma melhor trabalhabilidade do concreto.

Visando uma maior dissipação de calor para o meio externo, a concretagem das paredes do bunker foi subdividida em 3 fases e após foi lançada a laje em 2 fases distintas.

A Figura 3 ilustra uma vista geral das formas para a 1ª e 2ª fase de concretagem enquanto a Figura 4 ilustra uma vista geral para a 3ª fase de concretagem das paredes laterais do bunker.



Figura 3 – Vista geral das formas para 1ª e 2ª concretagem



Figura 4 – Vista geral das formas para 3ª concretagem

A Figura 5 ilustra o caminhão frigorífico com o gelo armazenado durante a concretagem enquanto a Figura 6 mostra o gelo sendo adicionado diretamente no caminhão betoneira antes do lançamento do concreto. Todo o gelo adicionado no caminhão betoneira era pesado de maneira que fosse obedecida a relação a/c do traço utilizado.



Figura 5 – Caminhão frigorífico de gelo



Figura 6 – Adição de gelo no caminhão betoneira

4 Parâmetros de Cálculo

4.1 Cronograma de Concretagem

Devido ao volume elevado de concreto a ser lançado e objetivando uma dissipação de calor para o meio externo, a concretagem foi dividida em cinco etapas. A Tabela 1 apresenta o cronograma de concretagem da sala de radioterapia, intervalo de lançamento entre as concretagens e o respectivo volume de concreto lançado, além da temperatura média de lançamento do concreto fresco em cada etapa de concretagem.

Tabela 1 – Cronograma de concretagem

Fase de concretagem	Estrutura	Altura da camada de concretagem (m)	Volume teórico de concreto (m ³)	Intervalo de lançamento do concreto fresco (dias)	Temperatura média de lançamento (°C)
1 ^a	Paredes	1,00	66,7	3	14,5
2 ^a		1,00	66,7	18	12,4
3 ^a		1,35	90,1	42	18,8
4 ^a	Lajes	1,15	173,6	3	16,5
5 ^a		0,85	42,5	-	16,5

4.2 Características da Rocha

No modelo computacional foi considerado o bunker sobre rocha basáltica com as características geológicas locais. A Tabela 2 apresenta as características da base da estrutura.

Tabela 2 – Propriedades da rocha de fundação

Massa específica (kg/m ³)	2840
Calor específico (kJ/kg.°C)	0,7
Condutividade térmica (kJ/m.h.°C)	6,8
Módulo de elasticidade (GPa)	99,4
Resistência à compressão (MPa)	181,7
Coefficiente de dilatação térmica (10 ⁻⁶ /°C)	6,6
Coefficiente de Poisson	0,2

4.3 Características Térmicas do Concreto

Como não havia informações relacionadas às características térmicas dos materiais constituintes do concreto estes valores foram estimados através de dados de bibliografia, periódicos e dissertações existentes considerando as características dos materiais disponíveis na região. O traço utilizado na dosagem do concreto de fck 25MPa consta da Tabela 3.

Tabela 3 – Dosagem do concreto

Material	Composição (kg/m ³)
Cimento CII-Z 32	276
Areia natural	742
Areia artificial	205
Brita 1	1114
Aditivo FK 22	1,471
Aditivo Polifuncional	2,45
Água	163
Massa Específica	2503,9
a/c	0,59

4.3.1 Calor Específico e Condutividade Térmica

Os valores do calor específico (c) e condutividade térmica (k) do concreto foram estimados considerando os valores individuais de cada material nas expressões a seguir:

$$c = \frac{\sum m_i c_i}{\sum m_i} \text{ (Equação 1) e } k = \frac{\sum m_i k_i}{\sum m_i} \text{ (Equação 2)}$$

Onde: c_i = calor específico de cada constituinte da dosagem; k_i = condutividade térmica de cada constituinte do concreto; m_i = massa de cada constituinte da dosagem. A partir dos cálculos o calor específico foi adotado de 0,95kJ/kg.°C e a condutividade térmica foi adotada de 6,25kJ/m.h.°C.

4.3.2 Calor de Hidratação do Cimento

A Figura 7 mostra a evolução do calor de hidratação do cimento estimada a partir dos dados de ensaio realizado pelo laboratório da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland).

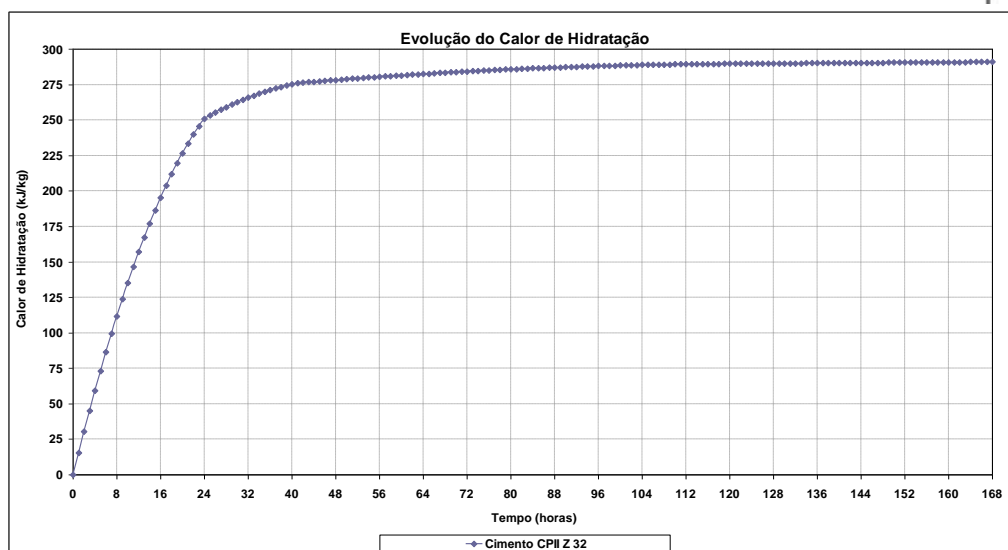


Figura 7 – Calor de hidratação do cimento CII-Z 32

4.3.3 Elevação Adiabática de Temperatura

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

$$\Delta T = \frac{CH \cdot C}{\gamma \cdot c} \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde: ΔT = Elevação Adiabática (°C); γ = Massa específica (kg/m³); CH= Calor de hidratação (kJ/kg); C = Consumo de cimento (kg/m³); c = Calor específico (kJ/kg.°C).

A curva de elevação adiabática do concreto está representada na Figura 8.

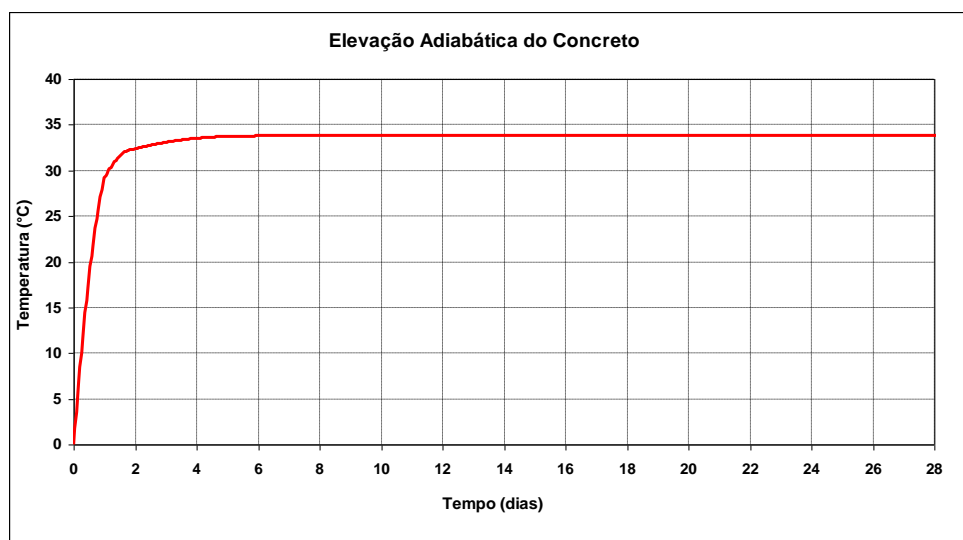


Figura 8 – Elevação adiabática de temperatura do concreto

4.3.4 Coeficiente de Dilatação Térmica

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:

$$\alpha = \frac{m_{pasta} \cdot \alpha_{pasta} + m_{areia\ natural}^{areia} \cdot \alpha_{areia\ natural}^{areia} + m_{areia\ artificial}^{areia} \cdot \alpha_{areia\ artificial}^{areia} + m_{brita} \cdot \alpha_{brita}}{m_{pasta} + m_{areia\ natural}^{areia} + m_{areia\ artificial}^{areia} + m_{brita}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: m_i = massa de cada constituinte (kg/m^3); α_i = coeficiente de dilatação térmica de cada constituinte ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$).

O valor do coeficiente de dilatação térmica linear da pasta (α_{pasta}) foi calculado em função da relação água/cimento (a/c). O valor adotado para os cálculos foi de $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

4.4 Características Mecânicas do Concreto

4.4.1 Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson foi estimado a partir da dosagem prevista, admitindo-se o uso de cimento tipo CP II-Z 32 com agregado graúdo e miúdo de origem basáltica. O coeficiente de Poisson foi adotado de 0,21.

4.4.2 Resistência à Compressão e Tração

A evolução das propriedades mecânicas dos concretos (resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade) foram estimados a partir dos ensaios de resistência à compressão realizados (idade de controle de 3, 7 e 28 dias). A resistência à tração foi considerada como 10% da resistência à compressão. As evoluções da resistência à compressão e tração estimadas a partir dos ensaios realizados são mostradas na Figura 9.

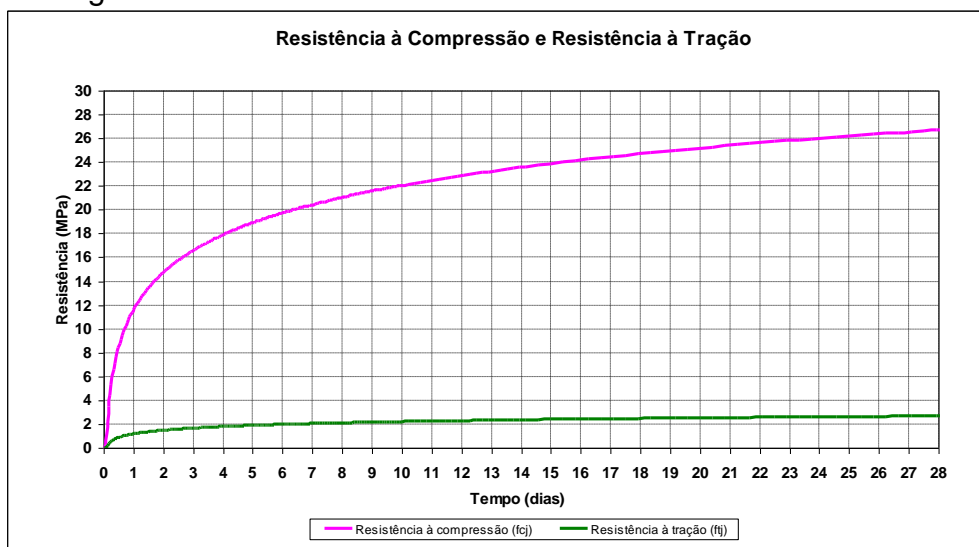


Figura 9 – Evolução da resistência à compressão e a tração, estimadas a partir dos ensaios

4.4.3 Módulo de Elasticidade

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 Figura 10 mostra a evolução do módulo de elasticidade considerada para o concreto.

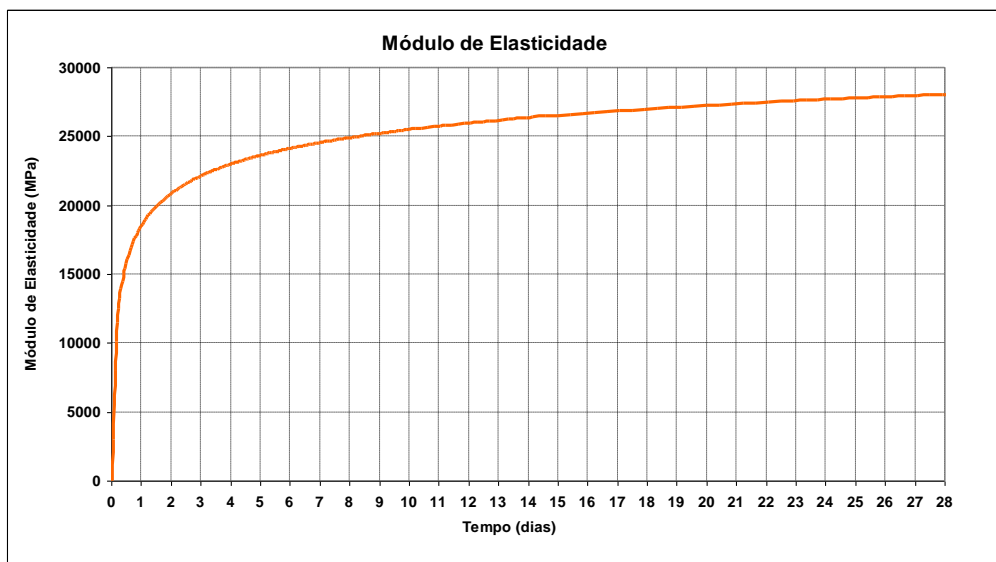


Figura 10 – Evolução do módulo de elasticidade do concreto

5 Condições de Contorno

5.1 Temperatura Média Ambiente

De acordo com informações do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), pode-se estimar a temperatura média ambiente mensal de acordo com a Figura 11.

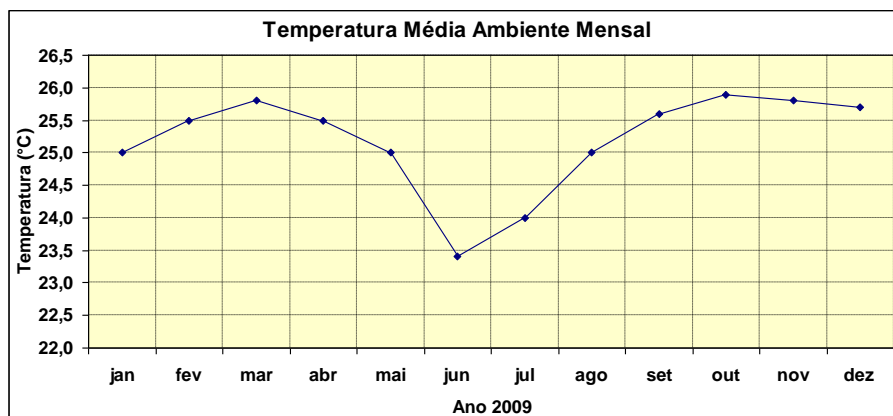


Figura 11 – Evolução da temperatura média ambiente mensal (CPTEC)

5.2 Coeficientes de Transmissão Superficial de Calor

Os coeficientes de transmissão superficial adotados para os cálculos constam da Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes de transmissão superficial de calor

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

- 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 quando do lançamento da camada seguinte, segundo informações da obra;
- A temperatura de lançamento adotada para os concretos, para cada fase de concretagem, foi considerada de acordo com as medições realizadas na obra durante a concretagem como apresentado na Tabela 1;
- Temperatura superficial da rocha basáltica base da estrutura foi adotada igual à temperatura média ambiente.

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. A Figura 12 apresenta a malha de elementos finitos desenvolvida pelo software para o caso analisado.

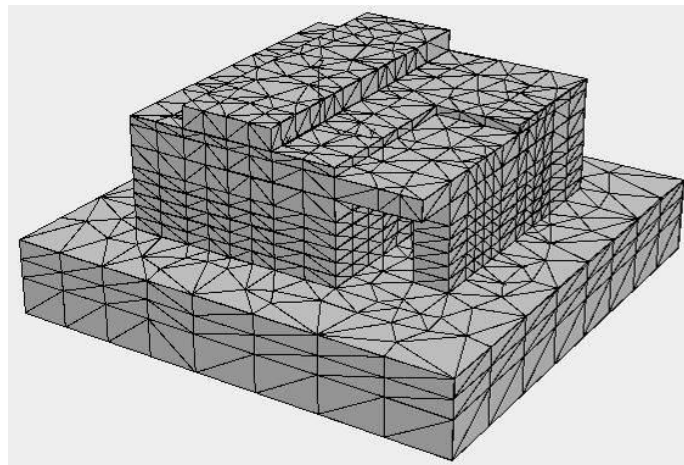


Figura 12 – Malha de elementos finitos

7 Análise de Temperaturas e Tensões de Origem Térmica

Através da simulação analisou-se o desenvolvimento das máximas temperaturas ocorridas na sala de radioterapia. Para os estudos de temperatura decidiu-se analisar pontos situados em regiões mais críticas e escolhidos a partir das isotermas obtidas das simulações. Nestas regiões foram instalados termômetros para o acompanhamento do desenvolvimento das temperaturas. A Figura 13 e Figura 14 indicam as isotermas e localização dos pontos de estudo, respectivamente.

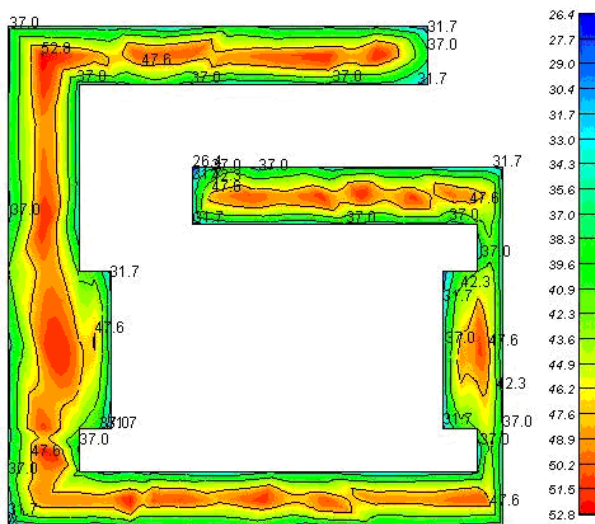


Figura 13 – Isotermas fornecidas através dos cálculos (541 horas)- h=2,90m – Seção em planta

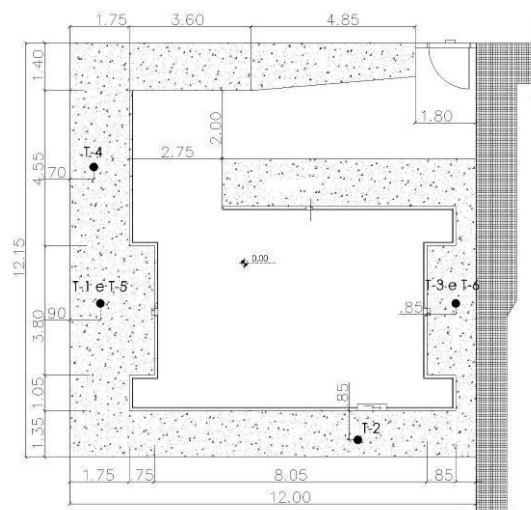


Figura 14 – Localização dos termômetros instalados – Seção em planta

É apresentada na Tabela 5 a altura dos termômetros instalados em relação à fundação.

Tabela 5 – Altura de instalação dos termômetros na estrutura

Termômetro	Camada de concretagem	Altura em relação à fundação- h (m)
T-1, T-2, T-3 e T-4	2º	1,10
T-5 e T-6	3º	2,90

Durante a 1ª fase de concretagem foi instalado um termômetro de haste na superfície do concreto (Figura 15). Após a leitura deste termômetro notou-se sua ineficiência para medição de temperaturas em concreto endurecido, pois o mesmo marcava 120°C, como mostra a Figura 16.



Figura 15 – Termômetro com haste utilizado na 1ª concretagem

Figura 16 – Temperatura medida pelo termômetro indica funcionamento defeituoso

A partir desta constatação foram instalados termopares em alguns pontos considerados, teoricamente, mais críticos do ponto de vista de elevação de temperaturas. Este tipo de instrumentação fornece temperaturas a qualquer instante através de um medidor digital como mostra a Figura 17 e Figura 18.



Figura 17 – Instalação de termopares no interior da estrutura



Figura 18 – Leitura através de aparelho digital

As Figura 19 e 20 apresentam uma comparação entre as temperaturas medidas “in loco” e as temperaturas simuladas através do software para a 2ª e 3ª fase de concretagem.

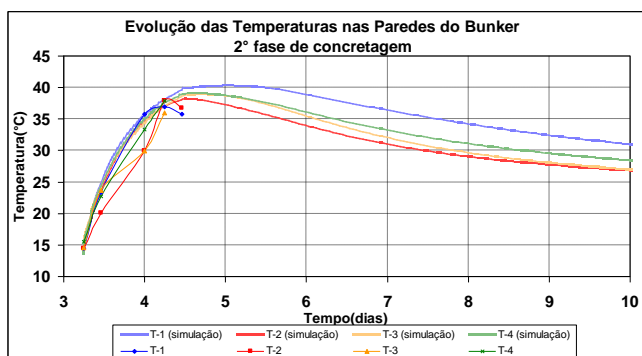


Figura 19 – Comparação entre as temperaturas medidas e simuladas (2ª fase de concretagem)

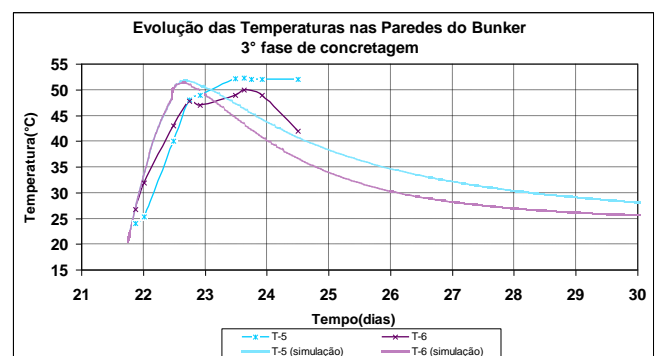


Figura 20 – Comparação entre as temperaturas medidas e simuladas (3ª fase de concretagem)

A partir dos resultados de temperatura fornecidos através do cálculo computacional tridimensional e dos termômetros instalados na estrutura, decidiu-se analisar os pontos, teoricamente, mais suscetíveis à fissuração de origem térmica.

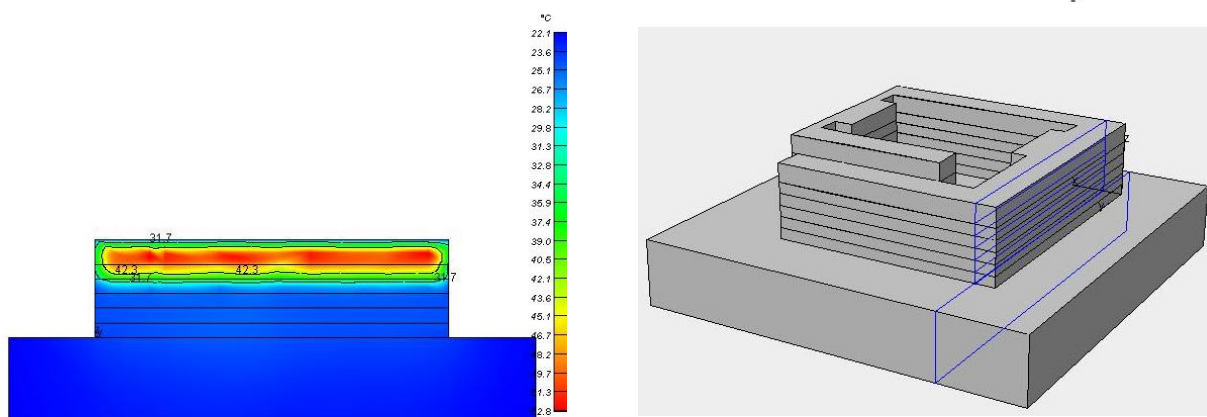


Figura 21 – 3ª fase de concretagem – Isothermas (541horas) – Seção CC

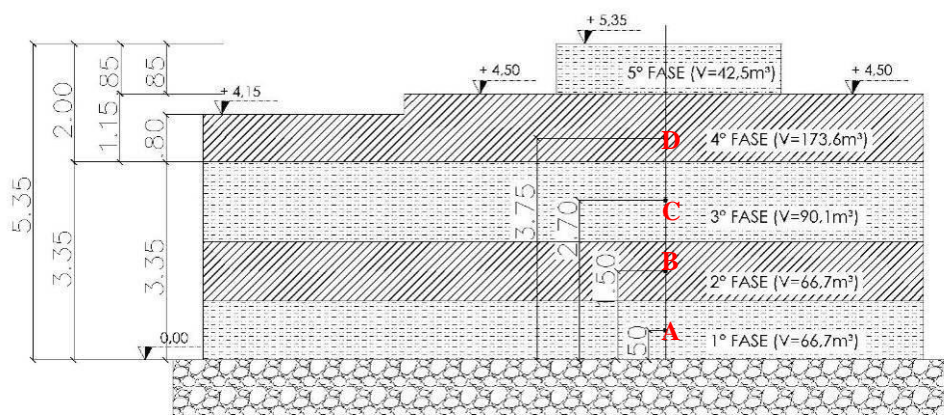


Figura 22 – Localização dos pontos de estudo de tensões de origem térmica – Seção CC

7.1 Resultados da Análise Térmica

É apresentado na Figura 23 o comportamento das curvas de temperatura para cada camada de concretagem cujos pontos estudados em cada camada (“A”, “B”, “C” e “D”) constam da Figura 22. O gráfico mostra o desenvolvimento das temperaturas ao longo do tempo a partir do lançamento de cada camada. As temperaturas de lançamento do concreto para todas as camadas foram consideradas de acordo com informações da obra.

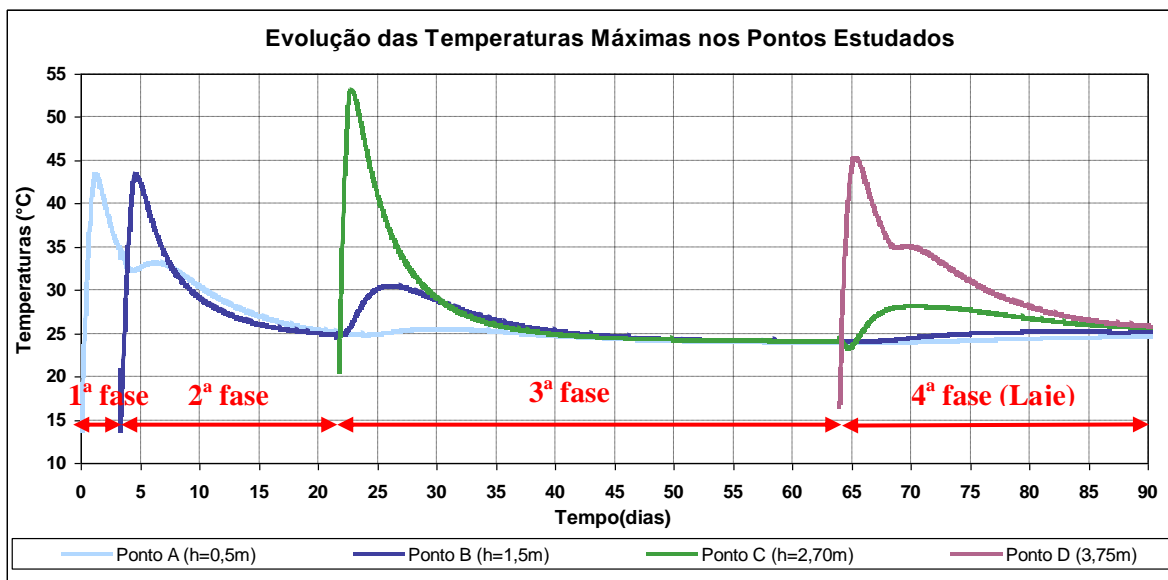


Figura 23 – Evolução das temperaturas nos pontos de estudo (“A”, “B”, “C” e “D”)

7.2 Resultados de Tensões de Origem Térmica

É apresentada na Figura 24 a evolução das tensões principais máximas ao longo do tempo a partir de seu lançamento para os pontos “A”, “B”, “C” e “D”.

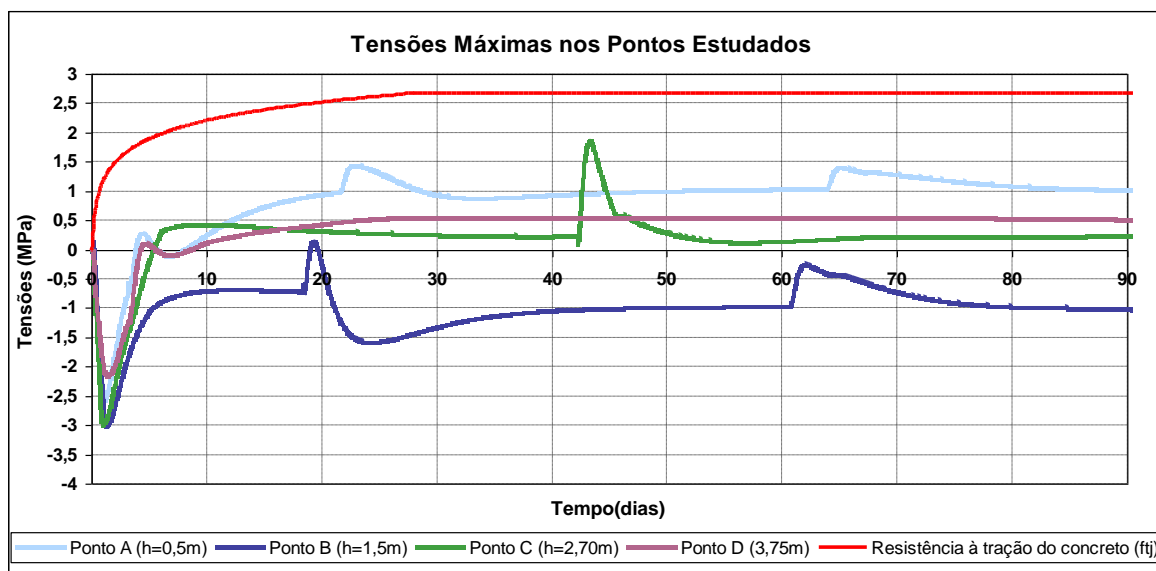


Figura 24 – Evolução das tensões de origem térmica nos pontos de estudo (“A”, “B”, “C” e “D”)

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 24 nota-se que não há a possibilidade de fissuração nos pontos analisados, porque em nenhum instante as tensões de origem térmica, ultrapassam a resistência tração do concreto.



8 Conclusões

As simulações de tensões de origem térmica efetuadas mostraram que eram pequenas as possibilidades de ocorrência de fissuração de origem térmica na estrutura da sala de radioterapia do hospital das Clínicas de Ribeirão Preto-SP considerando as condições de lançamento do concreto fresco refrigerado. Desta maneira conclui-se que:

a) As temperaturas medidas in loco através da instalação de termômetros e as temperaturas calculadas pelo software aproximaram-se consideravelmente, o que mostra a eficiência deste tipo de simulação computacional tridimensional térmica para estruturas massivas.

b) A utilização de termômetros com haste se mostrou inadequada para acompanhamento do desenvolvimento de temperaturas no interior da estrutura após a concretagem das paredes de concreto. A utilização de termopares apresentou desempenho satisfatório para acompanhamento da evolução das temperaturas no interior do concreto.

b) A adição do gelo em substituição a água de amassamento, na própria obra, previamente ao lançamento do concreto, apresentou resultados satisfatórios para temperaturas de lançamento inferiores a 16°C. Para este tipo de concretagem é importante que todos os sacos de gelo sejam pesados antes de serem adicionados à betoneira. Recomenda-se que o gelo seja adicionado em escamas porque minimiza o tempo de mistura no caminhão betoneira.

c) Para evitar a ocorrência de fissuras térmicas é necessário reduzir a temperatura máxima a ser atingida pelo concreto.

d) A redução da temperatura máxima a ser atingida pelo concreto pode ser obtida mediante refrigeração do concreto e intervalo de lançamento adequado entre as camadas de concretagem. 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.

e) O efeito da redução de temperatura, através da adição de gelo, nas propriedades do concreto fresco interferem na trabalhabilidade da mistura principalmente pela redução da velocidade de hidratação dos compostos do cimento, permitindo que o concreto permaneça no estado plástico por um período maior e, conseqüentemente, o tempo de pega do concreto é aumentado.

9 Agradecimentos

Os autores agradecem a importante participação do Engenheiro Leandro Sanchez no desenvolvimento deste trabalho, ao Hospital das Clínicas de Ribeirão Preto-SP e à empresa ETEC pela autorização da publicação deste artigo.



10 Referências

ACI COMMITTEE ACI 349-01. **Report on Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures**. ACI Manual of Concrete Practice, 2002;

CONTECH ANALYSIS APS. **B4cast User Guide**. Denmark, 21p., 2006;

FREIESLEBEN-HANSEN, P., PEDERSEN, E. J. **Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete**. Nordisk Betong, vol. 1, pp. 21-25, 1977;

FURNAS. **Concretos – Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo, laboratório de concreto**. Editor Walton Pacelli de Andrade, PINI, São Paulo, 1997;

HETEK. **Control of Early Age Cracking in Concrete**. Main Report, Report No. 118. Road directorate, ministry of transport, Denmark, 1997;

KUPERMAN, S. C. **Concreto Massa Convencional e Compactado com Rolo para Barragens**. Concreto-Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, São Paulo, Vol. 2, 2005

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concrete - Structure, Properties and Materials**. Editora Pini Ltda., São Paulo, Chapter. 13, 652p. 2006;

MORABITO, P. **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, 1998;

RASTRUP, E. **Heat of Hydration in Concrete**. Magazine of Concrete Research, Copenhagen, Vol. 6, nº 17, p. 79-92, 1954.