



MODELO TÉRMICO TRANSIENTE DE UM BLOCO DE CONTRAFORTE POR MEIO DE DADOS DE INSTRUMENTAÇÃO E DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS: ESTUDO DE CASO ITAIPU

Luis A. Sucapuca Aracayo

luis.aracayo@pti.org.br

Fundação Parque Tecnológico Itaipu – FPTI

Av. Presidente Tancredo Neves - 6731, 85866-900, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil

Aref Kalilo Lima Kzam

aref.kzam@unila.edu.br

Universidade Federal de Integração Latino-Americana – UNILA

Av. Silvio Américo Sasdelli - 1842, 85866-000, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil

Tásia Hickmann

hickmann@utfpr.edu.br

Universidade Federal Tecnológica de Paraná, Câmpus Medianeira – UTFPR

Av. Brasil – 4232, 85884-000, Medianeira, Paraná, Brasil

Dimilson Pinto Coelho

dimilson@itaipu.gov.br

Itaipu Binacional

Av. Tancredo Neves - 6731, 85866-900, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil

Resumo. Este trabalho consistiu na avaliação transiente do carregamento térmico de um bloco de contraforte da barragem da Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHE-ITAIPU). Os resultados obtidos pela simulação numérica-computacional foram comparados com os valores observados em termômetros instalados no interior do bloco. Para modelagem térmica do bloco empregou-se a equação da difusão bidimensional. O modelo em elementos finitos foi gerado e calibrado com auxílio do pacote computacional ANSYS. Apresentou-se, além disso, um estudo sobre a influência da temperatura na resistência, durabilidade e estabilidade do concreto. Estas propriedades podem ser afetadas por grandes gradientes térmicos, uma vez que a variação sazonal de temperatura provoca o aparecimento de altas concentrações de tensões em diferentes pontos da barragem. As temperaturas obtidas nos pontos monitorados, onde se

localizam os termômetros internos, por meio do modelo numérico apresentam boa concordância com relação aos dados da instrumentação.

Palavras chaves: Séries Temporais, Barragem de Concreto, Equação da Difusão, Temperatura, MEF.

Abstract. This work consisted in the thermal transient load evaluation of a buttress block from the Itaipu Hydroelectric Dam (UHE-ITAIPU). The results obtained by numerical-computational simulation were compared with the collected values from the thermometers installed inside the block. For the thermal modeling of the block the equation of two-dimensional diffusion was applied. The Finite Element Model (FEM) was generated and calibrated using the computational package ANSYS. In addition, a study about the influence of the temperature in the strength, durability and stability of concrete was presented. These properties can be affected by large thermal gradients, since the seasonal variation of temperature causes the onset of high stress concentrations in different points of the dam. The temperatures obtained in the monitored points, where the internal thermometers are located, by means of the numerical model present good agreement with respect to the instrumentation data.

Keywords: Time Series, Concrete Dam, Diffusion Equation, Temperature, MEF.

INTRODUÇÃO

De acordo com Eletrobrás (2003), a segurança das barragens constitui uma preocupação permanente para o governo e a sociedade, tanto por sua importância econômica como pelo risco potencial que representa uma possível ruptura. Esta pode levar as perdas de vidas humanas e materiais, impactos ambientais e prejuízos econômicos financeiros consequentes de um desastre.

Além da segurança, o monitoramento do desempenho estrutural das barragens tem se mostrado cada vez mais evidente e o processo de fissuração da estrutura é uma das principais causas que podem afetar negativamente o desempenho e por consequência elevar o risco de colapso da estrutura. Um dos principais fatores para o surgimento de fissuras são os elevados gradientes de temperatura a que o concreto está sujeito.

Maken, Léger e Roth (2013) afirmam que as barragens nas primeiras idades estão sujeitas a gradientes térmicos ocasionadas pela diferença de temperatura entre o calor de hidratação produto das reações químicas do concreto e a temperatura ambiente que incide na superfície externa. Após as primeiras idades as cargas térmicas sobre a superfície da barragem são oriundas da radiação solar, variação de temperatura do ar e também do fenômeno de condução térmica entre a fundação, o reservatório e a estrutura. Esses carregamentos podem causar alterações volumétricas significativas na estrutura, o que frequentemente faz exceder a resistência à tração do concreto levando ao desenvolvimento de fissuras.

A estimativa do campo de temperaturas em barragens auxilia na determinação das tensões e deformações de origens térmicas. Sob esse aspecto é pertinente empregar um método capaz de aproximar o campo de temperatura, afim de se estimar as deformações na estrutura. Essa abordagem está diretamente ligada a um assunto de grande interesse na engenharia civil de infraestrutura, que é a segurança de barragens (HICKMANN, 2016).

Em uma análise de transferência de calor em barragens, tem-se que a complexidade da geometria pode tornar o processo de obtenção da distribuição de temperaturas relativamente laborioso. Assim, a avaliação dos fenômenos térmicos no concreto massa não se tratam de uma tarefa imediata, e consiste de algumas etapas, tais como: desenvolvimento do modelo geométrico que melhor represente a estrutura, definições das condições iniciais e de contorno para obtenção da solução do modelo térmico e definição de um método numérico de solução. Em razão desses fatores é comum a utilização de softwares baseados em métodos numéricos computacionais envolvendo diversas variáveis físicas e matemáticas, como por exemplo o *software* comercial ANSYS® baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF).

Noorzaei et al. (2006) desenvolveu um código em elementos finitos bidimensional para a análise térmica e estrutural da barragem de gravidade em Kinta, na Malásia, ainda em construção. As condições climáticas da região e as propriedades térmicas dos materiais foram consideradas na análise. As temperaturas previstas através do método aproximado foram consideradas e estes ficaram em boa concordância com as temperaturas reais medidas através de termopares instalados dentro do corpo da barragem.

No trabalho de Amorim (2012) um modelo para o calor de hidratação em concreto massa foi desenvolvido por meio do software ANSYS. A simulação apresentou bons resultados quanto à evolução de temperatura no tempo e demonstrou que o MEF pode ser eficiente para a solução da equação de Fourier que regem os problemas de transferência de calor.

Rosso, J. et. al. (2012) indicam numa de suas lições aprendidas na UHI-ITAIPU que os deslocamentos e as subpressões observadas por meio dos instrumentos na região do contato

concreto-rocha, sob a cabeça da montante da barragem, são influenciados pela variação térmica, por essa razão conduziram à revisão dos critérios de projeto.

Em vista disso, a equipe do Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB) em conjunto da equipe de superintendência em engenharia da UHI-ITAIPU, realizaram os estudos térmicos num bloco de contraforte de concreto, altamente instrumentado, com o objetivo de realizar uma avaliação estrutural transiente neste bloco quando sujeito a um carregamento térmico.

1. FUNDAMENTOS

1.1. Transferência de Calor

Os mecanismos de transferência de calor, que são: condução, convecção e radiação, são usados para a obtenção dos modelos térmicos em estruturas, no sentido geral. Esses podem apresentar-se de forma isolada, como neste estudo de caso no qual será abordado um problema de condução ou em concomitância.

Em um corpo bidimensional (espessura unitária constante, a equação da difusão do calor, obtida por meio da primeira lei da termodinâmica e da lei de Fourier, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Sendo k_x e k_y a condutividade do material (W/m K) na direção x e y, respectivamente, Q é a fonte de calor ou taxa de geração de calor interno (W/m³), ρ a densidade do material (kg/m³) e c é a capacidade térmica ou calor específico (J/kg K) do material.

Na Equação (1) para um material isotrópico, homogêneo e com comportamento linear, as variáveis $k_x = k_y = k$, ρ e c são constantes. Um modelo estacionário sem fonte de calor entende-se por $\partial T / \partial t = 0$, já um modelo transiente sem fonte de calor pode ser escrita da seguinte forma:

$$k \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

1.2. Condições iniciais e de contorno

Em geral, para resolução da Eq. (2) podem ser aplicados dois tipos de condições de contorno para o problema da condução de calor: a função temperatura (condição de Dirichlet) na região de Γ_T e o fluxo de calor (condição de Neumann) na região de Γ_q .

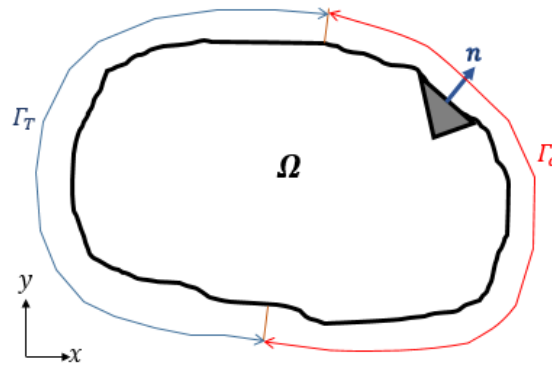


Figura 1. Elemento infinitesimal no contorno Fonte: Adaptado de SOUZA, 2003

A Condição de Dirichlet, consiste basicamente em definir o valor da temperatura (T) na região Γ_T , sendo $\bar{T}$ uma temperatura conhecida.

$$T = \bar{T}, \text{ em } \Gamma_T \quad (3)$$

A Condição de Neumann, consiste na definição de um fluxo de calor ($\bar{q}_n$) em “equilíbrio” no contorno de um elemento infinitesimal Γ_q .

$$-q_x n_x - q_y n_y = \bar{q}_n, \text{ em } \Gamma_q \quad (4)$$

Sendo $\bar{q}_n$ o fluxo de calor constante (W m^{-2}), $\bar{q}_x, \bar{q}_y$ fluxo de calor nas direções (x, y) e n é o vetor normal à superfície Γ_q .

A condição inicial para o problema de valor de contorno PVC é definida como a temperatura no domínio Ω no tempo $t=t_0$, chamado de tempo inicial. Esta temperatura pode ser expressa como $T=T_0$ para todo o domínio Ω no tempo $t=t_0$. sendo T a temperatura (K) e t o tempo (s).

2. METODOLOGIA

Este estudo teve como objetivo obter um modelo térmico que represente o comportamento da temperatura no corpo de um bloco de contraforte e sua respectiva fundação para um período de um ano, chamado de ‘ano médio’. O caso de estudo foi aplicado no Bloco E6 localizado num trecho da barragem de contrafortes da UHI-ITAIPU, na margem direita, apoiada num maciço rochoso. Esta contempla instrumentos que monitoram o comportamento da estrutura, o pendulo instalada na crista do bloco mede deslocamento horizontal e para medição da temperatura tem-se termômetros internos e de superfície.

A estrutura de concreto e os adjacentes a ele, contem em conjunto 7 termômetros, 4 superficiais e 3 internos que são usados neste trabalho, apresentados na Figura 2. O número de medições realizadas é em torno de 4.662 medições no período de 1985 a 2016.

Conforme os relatórios da época da construção da barragem observaram-se que a temperatura média no corpo da barragem foi de aproximadamente 22 °C. O valor máximo

medido nos termômetros neste período foi de 39,34 °C e a mínima de 4,60 °C. As séries dos termômetros durante estes anos de monitoramento apresentaram um comportamento sazonal anual de inverno e verão, mostrando-se como as temperaturas extremas.

Os 20 primeiros anos de medições foram coletados para cada termômetro, para ajuste de interpolação via Series de Fourier, afim de obter uma curva com período anual, chamada de “ano médio”, na Fig. 3 observam-se as curvas dos termômetros superficiais. Posteriormente, foram consideradas como condições de contorno no perfil do bloco da seguinte forma: ao visualizar a Figura 2, a função temperatura adotada na face compreendida do ponto A ao ponto B foi a do termômetro TS-E-1, do ponto B ao C do termômetro TS-D-903, do ponto C ao D do termômetro TS-D-904, do ponto D ao E do termômetro TS-D-5, do ponto E ao ponto A (contato bloco-fundação) fluxo de calor contínuo.

Na figura 2, observa-se os termômetros internos TI-E-01, TI-E-02 e TI-E-03 na alma da estrutura, os mesmo tem a finalidade de ser usados para validação do modelo térmico.

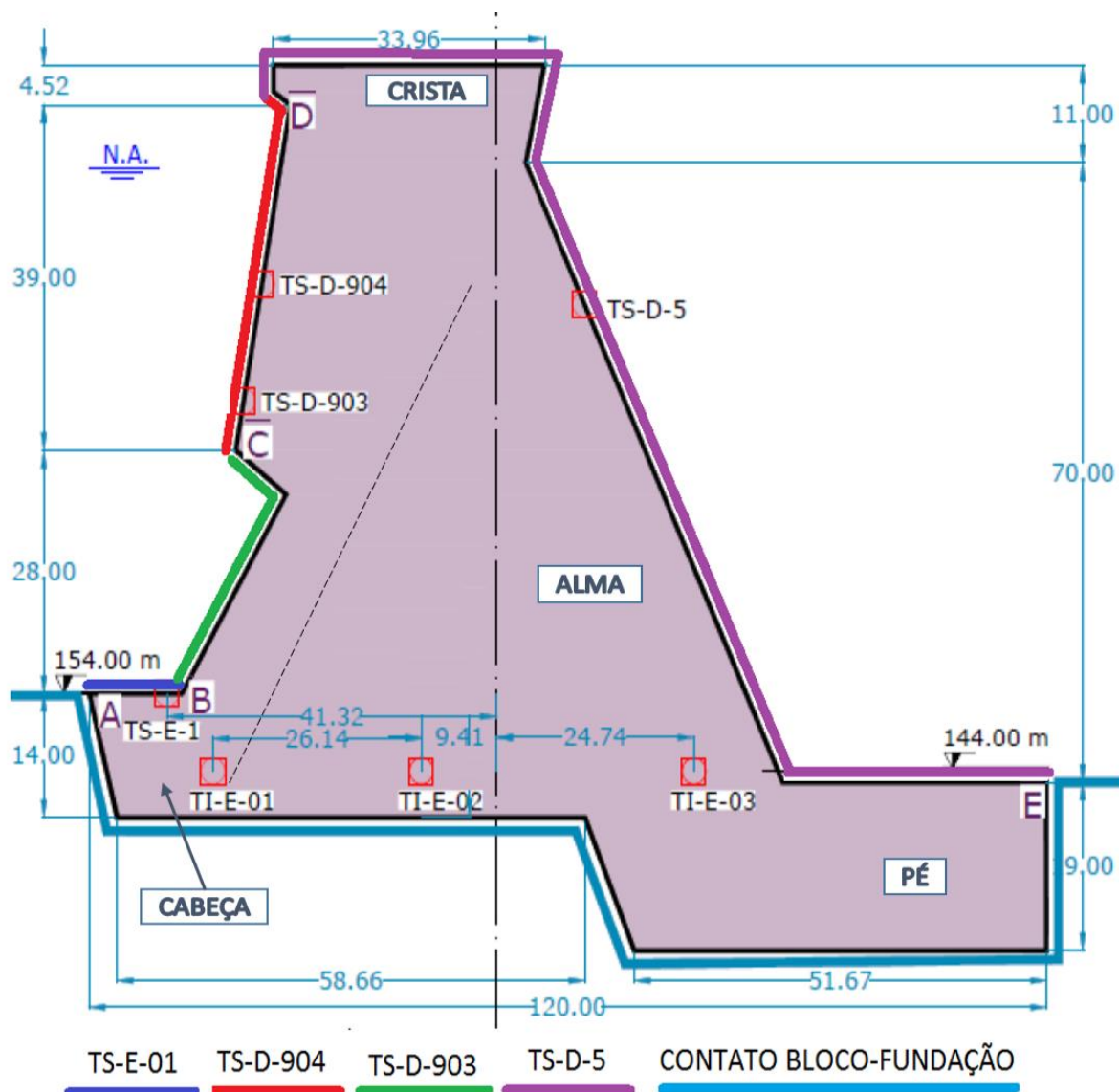


Figura 2. Localização dos termômetros e condições de Contorno Fonte: Autoria própria

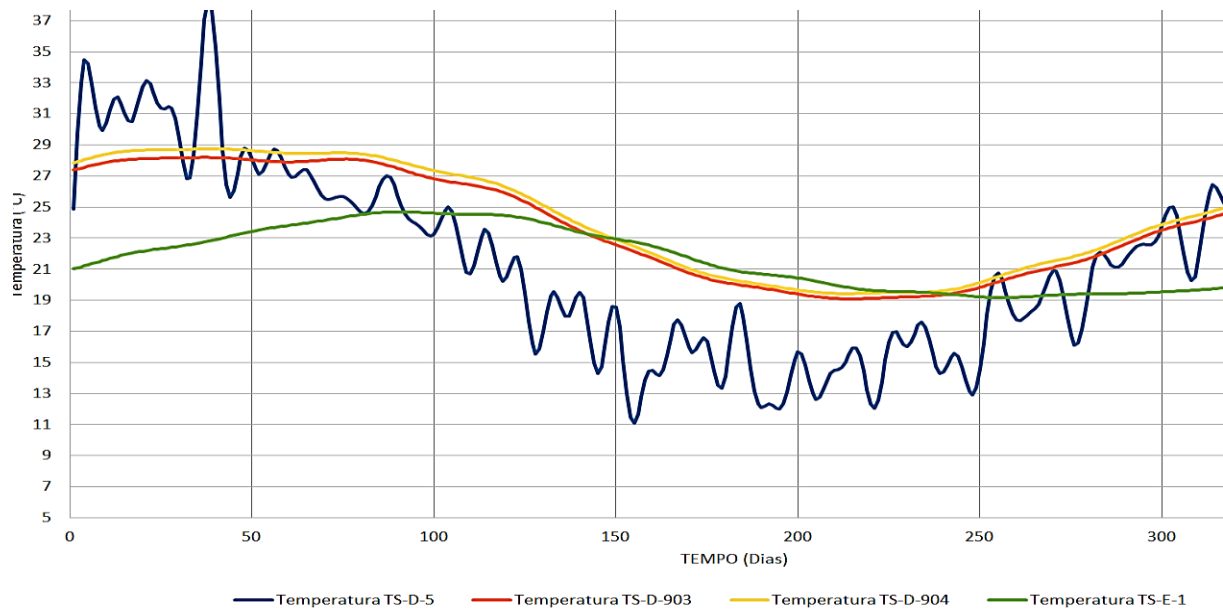


Figura 3. Condições de contorno para um ‘ano médio’ Fonte: Autoria própria

A ITAIPU supervisiona e realiza estudos constantes nos elementos estruturais hidráulicos da barragem. Entre esses estudos foram realizados ensaios mecânicos com a extração de corpos de prova no concreto e na fundação, a seguir são relatados.

Com relação ao modelo estrutural, os blocos de concreto apresentaram uma variação granulométrica para cada altura da barragem, para simplificação do modelo foi considerado como um corpo monolítico em meio contínuo, homogêneo, isotrópico e elástico. Desse modo, por recomendação da equipe técnica do laboratório de concreto e relatórios de ensaios da época da construção, foram inicialmente definidas suas propriedades térmicas e mecânicas para representar o comportamento elástico do concreto.

Sendo, as propriedades mecânicas para o concreto: resistência a compressão $\sigma_c = 21$ Mpa, módulo de elasticidade $E = 35.000,00$ Mpa, Poisson $\nu = 0,16$ e Massa Específica $\rho = 2600$ Kg/m³. As propriedades térmicas adotadas foram: calor específico $c = 895,38$ J kg⁻¹ K⁻¹, condutividade térmica $k = 1,3671$ Wm⁻¹ K⁻¹ e coeficiente de dilatação de $\alpha = 9 \times 10^{-6}$ K⁻¹.

Por outro lado, a fundação é constituída por uma sequência de derrames ou camadas basálticas que representam variações litológicas, com descontinuidades geológicas sub-horizontais nos contatos e nas zonas de transição. No modelo este sistema é representado por derrames basálticos sucessivos iniciando a enumeração de acima para abaixo, modelado como um complexo de vários materiais, em que cada um foi considerado um meio contínuo, homogêneo, isotrópico e elástico. As propriedades geomecânicas adotadas para a fundação em base a ensaios mecânicos realizados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades das rochas de fundação

Camada no modelo	Densidade (Kg/m ³)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coeficiente de Poisson	Resistência Compressão (MPa)	Resistência Tração (MPa)
1 Camada	2960	32.000,00	0,28	194,000	11,750
2 Camada	2520	10.000,00	0,22	41,000	72,000
3 Camada	2110	9.000,00	0,21	32,000	5,570
4 Camada	2960	25.000,00	0,28	143,000	13,830
5 Camada	2520	11.768,00	0,20	8,532	1,471
6 Camada	2110	11.768,00	0,20	8,532	1,471
7 Camada	2960	25.497,30	0,16	15,691	1,569
8 Camada	2520	9.806,65	0,20	6,865	1,471
9 Camada	2110	14.710,00	0,20	8,532	1,471
10 Camada	2960	29.420,00	0,16	16,671	1,667
11 Camada	2500	9.414,40	0,20	8,336	1,471
12 Camada	2500	9.414,40	0,20	8,336	1,471
13 Camada	2110	14.710,00	0,20	8,532	1,471
14 Camada	2960	29.420,00	0,20	16,671	1,667

Com as condições de contorno e os materiais definidos, a Equação da Difusão do Calor Eq. 2 foi resolvida via MEF com auxílio do software ANSYS e a estimativa do campo de temperatura, fluxo de calor da estrutura de concreto foi calculada e analisada.

2.1. Malha em elementos finitos

O elemento SHELL131, que pode ser visto na Figura 4, foi usado neste estudo para representar o maciço rochoso e a estrutura de concreto. Trata-se de um elemento tridimensional capaz de realizar modelagens bidimensionais e tridimensionais, com capacidade térmica de fazer análises térmica estacionária ou transiente. Possui quatro nós, com até 32 graus de temperatura em cada nó. Para realizar um estudo estrutural do problema térmico, este elemento SHELL131 não contempla características mecânicas, por tanto, é substituído pelo SHELL181 apresentado na Figura 5. .

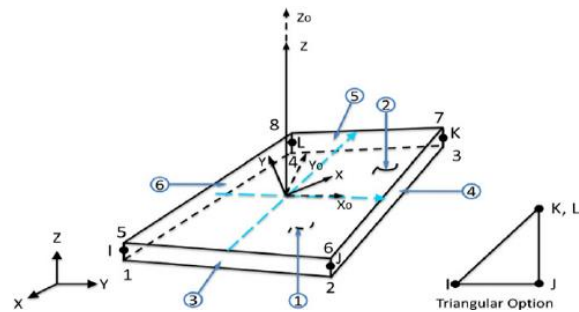
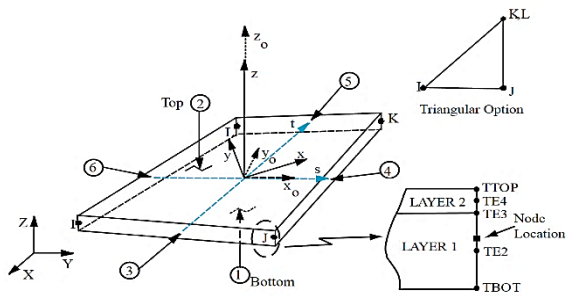


Figura 4. Elemento SHELL131 Fonte: Ansys help Figura 5. Elemento SHELL181 Fonte: Ansys help

O modelo possui 5.509 nós e 5.332 elementos de 1 metro de largura para a estrutura e a fundação. A seguir observa-se uma malha estrutura utilizada tanto para a estrutura de concreto como para o maciço rochoso.

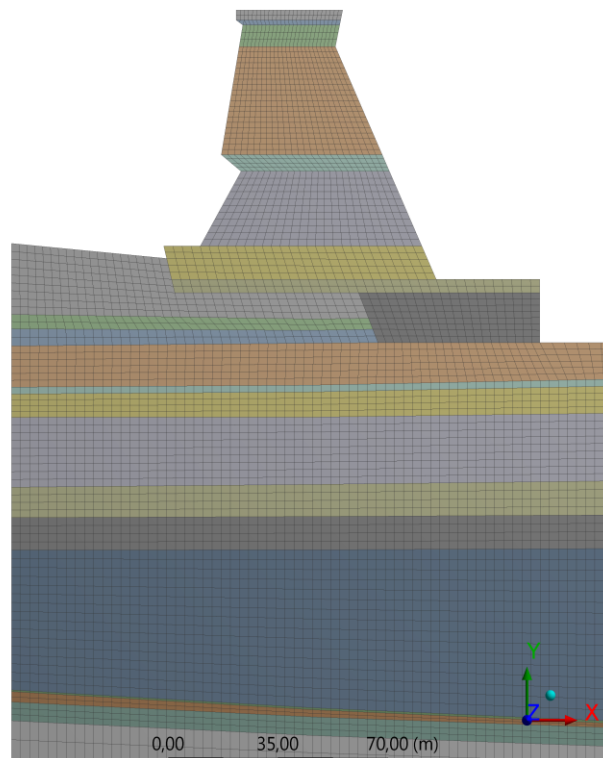


Figura 6. Malha estruturada de Elementos Finitos Fonte: Autoria própria

A modelagem via MEF foi realizada no software ANSYS no laboratório do Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB). A sequência realizada para a análise térmica do bloco em sínteses iniciou com a simplificação da geometria, definição das condições de contorno através dos termômetros superficiais, as propriedades térmicas do concreto com ensaios de laboratório, criação da malha e a convergência física-matemática do modelo.

O problema de calor foi resolvido com uma simulação estacionária com o objetivo de criar um campo de temperatura inicial na estrutura de concreto, e este foi aplicado como condição inicial no modelo térmico transiente.

Para o modelo transiente replicou-se o ‘ano médio’ duas vezes, com as mesmas condições de contorno, este com o objetivo de obter a convergência física do modelo térmico. A estratégia adotada deu resultados mais próximos da instrumentação, o modelo térmico no segundo ano replicado já considera a inércia térmica influenciada pelo ano anterior. Por outro lado, o modelo térmico considerou como fluxo de calor contínuo entre o contato estrutura-fundação, não tendo restrição de temperatura entre os corpos.

Finalmente, um estudo acoplado é aplicado com o modelo térmico e estrutural dentro do *software*, sendo resolvida de forma sequencial. A distribuição de temperatura como resultado de um mapeamento, partindo de um modelo térmico é introduzida e aplicada como cargas térmicas no modelo estrutural, de modo a induzir tensões térmicas. Por tanto, o campo de deslocamento u é função da temperatura $u = f(T)$ e o campo de temperatura T é independente do deslocamento $T \neq (u)$. Este acoplamento é possível realizar somente se as malhas em elementos finitos e a geometria forem idênticas.

2.2.Resultados numéricos

Nos resultados, uma única escala foi configurada para exibir a variação do campo de temperatura em cada temporada (inverno e verão). A seguir são apresentados resultados das datas com maior variação no campo de temperatura, entre esses 6 –fevereiro, 20-agosto e 2-dezembro ver Fig. 7, 9 e 11 e uma outra escala de cores para o fluxo de calor nas datas apresentadas, ver Fig. 8, 10 e 12.

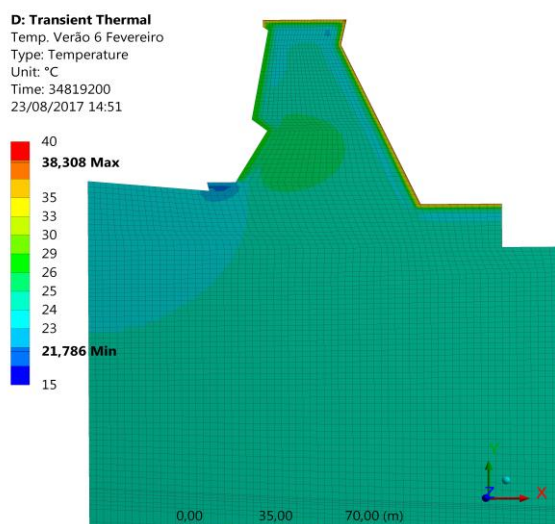


Figura 7. 6 de fevereiro - Campo de temperatura

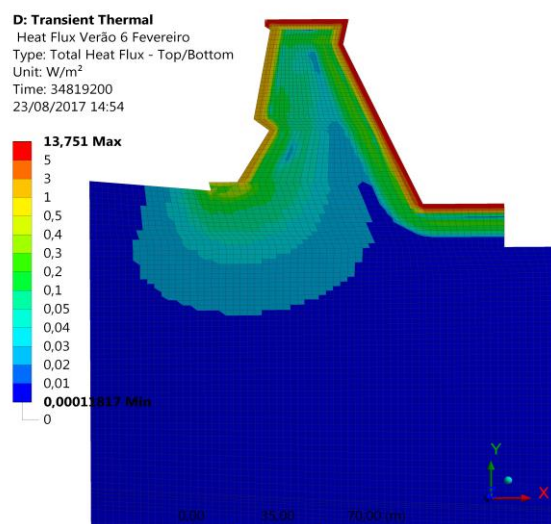


Figura 8. 6 de fevereiro - Fluxo total (W/m²)

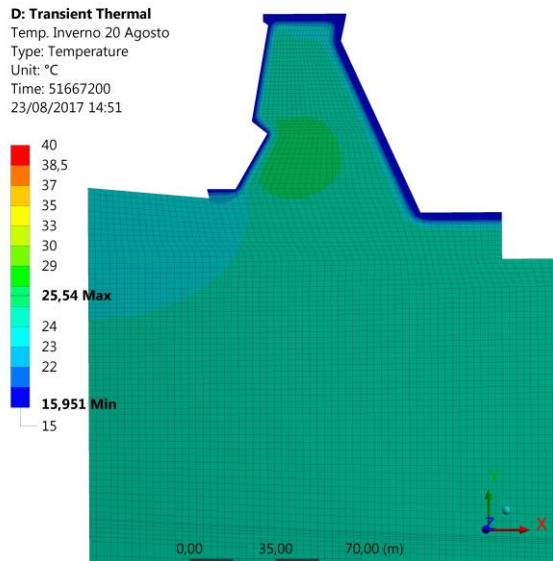


Figura 9: 20 de agosto- Campo de temperatura

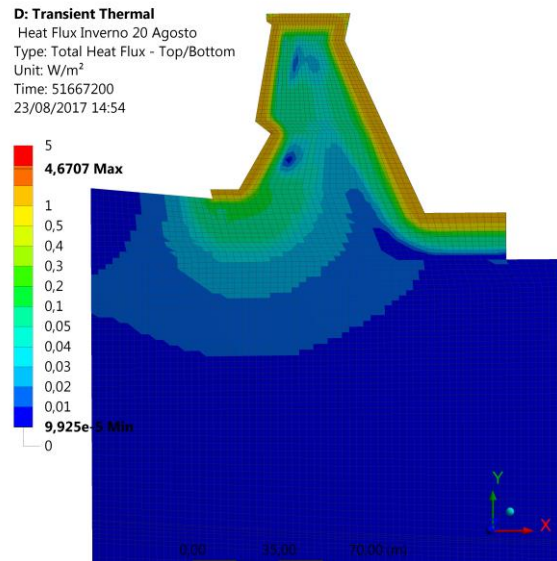
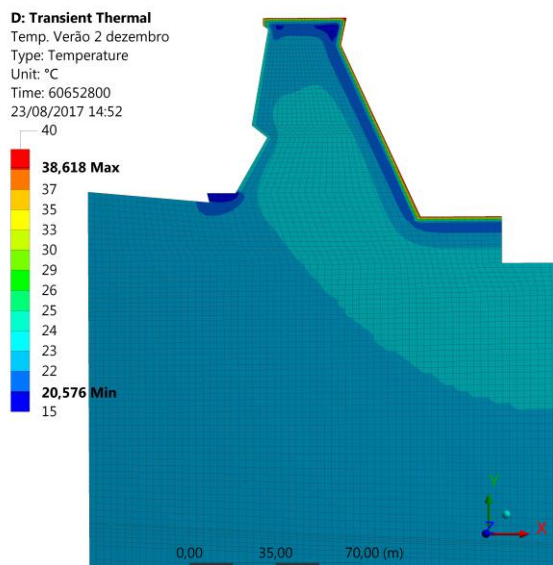
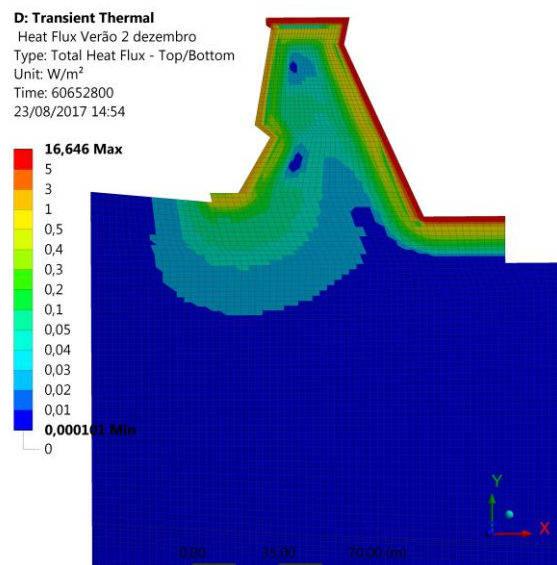
Figura 10: 20 de agosto - Fluxo total (W/m²)

Figura 11: 2 de dezembro - Campo de temperatura

Figura 12: 2 de dezembro - Fluxo total (W/m²)

A escala de cores iniciando de azul até vermelho expressa a baixa e alta temperatura consequentemente. Na estrutura de concreto, regiões com baixa temperatura representam contração e regiões com alta temperatura dilatação do material (concreto). Portanto, a troca de calor entre o reservatório (montante) e a temperatura ambiente (jusante) geram um comportamento de deslocamento oscilatório da crista da estrutura num período de 365 dias.

Outro detalhe importante é a concentração de temperatura na alma do bloco, ou seja, um armazenamento de energia interna, como poder ia-se esperar do material, pois há uma baixa dissipação de calor no tempo.

Para avaliação da fiabilidade do modelo térmico os valores numéricos são comparados com a instrumentação termométrica. Em círculo amarelo na Figura 13, observa-se os termômetros internos instalados na época da construção TI-E-01, TI-E-02 e TI-E-03 estes medem a temperatura interna do corpo da estrutura.

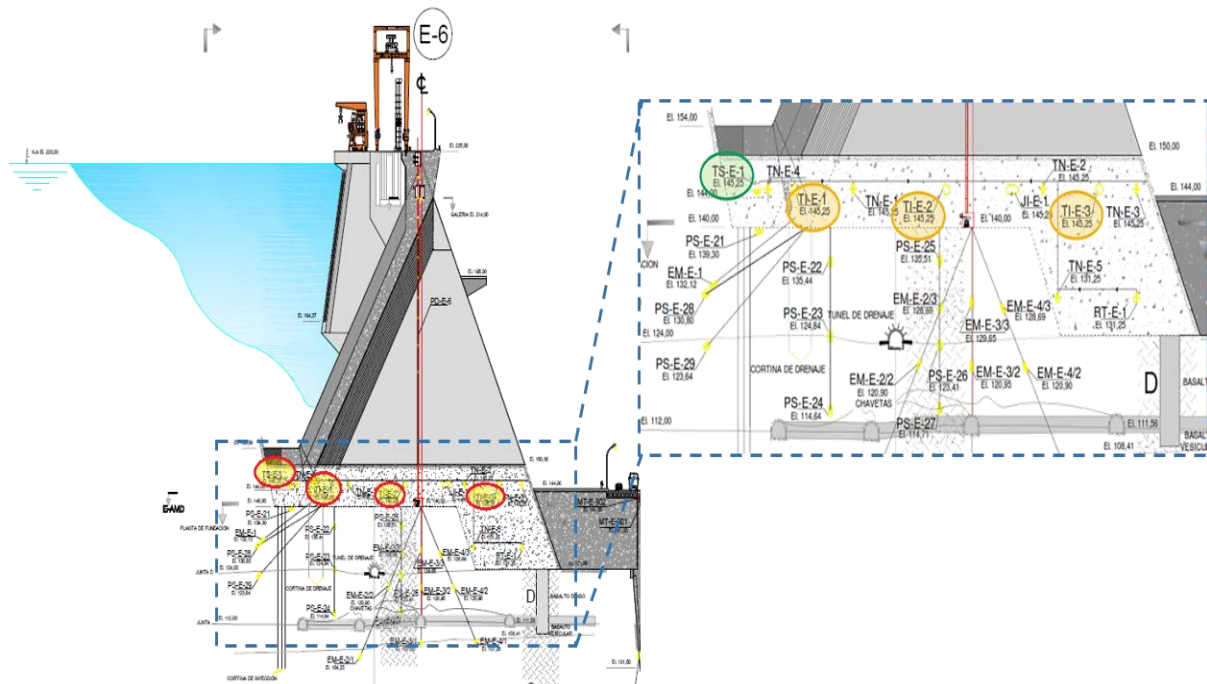


Figura 13: Termômetros internos Fonte: Adaptado do Sistema de arquivo Técnico – UHI

Para comparação dos valores é usado o erro MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) para estimar o erro entre os modelos numéricos. Sua precisão expressada em percentagem e definida da seguinte forma:

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - \hat{X}_i}{X_i} \right|}{n} \quad (5)$$

Sendo X_i o valor real medida pela instrumentação termométrica, $\hat{X}_i$ o valor calculado no modelo numérico na mesma localização do instrumento e n é a quantidade de valores comparados.

A tabela resumo a seguir expressa os valores max, min e médio medidos pelos termômetros e o modelo térmico no ANSYS ao longo do ‘ano médio’.

Tabela 2 - Tabela resumo do erro MAPE

Termômetro	Temperatura Observada	Calibração			MAPE (%)
		Min.	Max.	Média	
TI-E-1	Instrumentação	21,03	22,59	21,74	8,38
	Aproximação (MEF)	23,56	23,62	23,59	
TI-E-2	Instrumentação	20,14	23,61	21,92	3,47
	Aproximação (MEF)	19,40	25,00	22,41	
TI-E-3	Instrumentação	21,21	23,76	22,52	9,64
	Aproximação (MEF)	24,56	24,78	24,66	

Um outro resultado proveniente da análise termoestrutural consistiu nos deslocamentos da estrutura, estes unicamente influenciados pela dilatação e contração da estrutura ao longo do ‘ano médio’. A partir de um ponto de monitoramento no modelo numérico, localização do pêndulo na crista da barragem, obteve-se o gráfico de deslocamento longitudinal (sentido montante-jusante). A Fig. 14, apresenta o deslocamento no sentido positivo a jusante (inverno) e no sentido negativo a montante (verão).

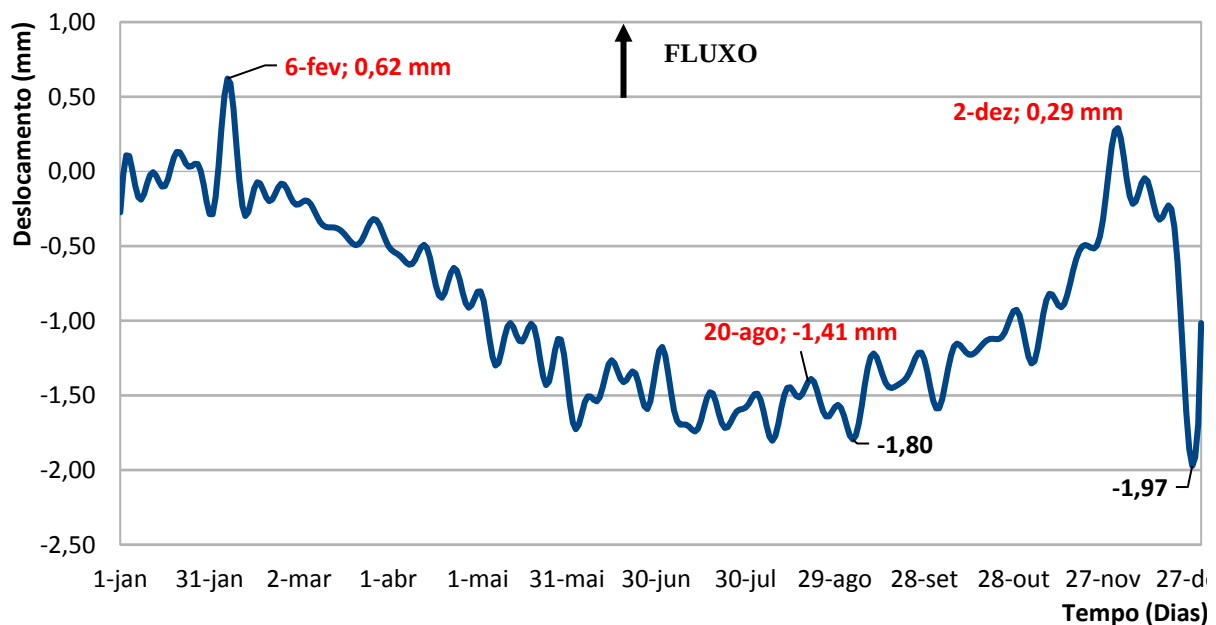


Figura 14: Deslocamento da crista do bloco (X), influenciada pela temperatura sazonal ‘ano médio’

Fonte: Autoria própria

3. CONCLUSÕES

É importante salientar que este estudo pode ser aplicado a qualquer tipo de estrutura em concreto massa, sempre e quando possua a instrumentação termométrica para geração das condições de contorno e validação do modelo. O bloco E6 da barragem da UHI-ITAIPU, objeto deste estudo, que tem uma altura de 100 m de altura, 120 m de comprimento e 17 m de espessura, foi simplificada para um modelo 2D com espessura unitária, no estado plano de tensões com comportamento linear do concreto-rocha. Curvas de temperatura foram ajustadas via séries de Fourier, e estas foram aplicadas como condição de contorno num modelo térmico transiente, posteriormente determinado o deslocamento da crista do bloco quando está sob influência exclusiva da temperatura e as conclusões observadas no desenvolvimento do trabalho foram as seguintes:

A interpolação via Series de Fourier para dados sazonais com valores pontuais como a variável da temperatura neste problema, é apropriado, mas é dependente da quantidade elevada de dados coletados.

Os deslocamentos horizontais influenciados pelas variações térmicas ambientais, observou-se tanto na instrumentação (pendulo) como nos modelos numéricos um comportamento diferenciado entre os paramentos de montante e jusante. Na face da montante, há um gradiente de temperatura reduzido resultante do equilíbrio da enorme massa de água no reservatório, por outro lado na jusante experimenta variações térmicas significativas, explicando o deslocamento da crista.

O pendulo, um instrumento localizado na crista da barragem que mede os deslocamentos horizontais na direção x. Através do instrumento, observou-se que na época de inverno a crista desloca-se na direção do fluxo do rio (montante a jusante) e na época de verão desloca-se contrário ao fluxo do rio (jusante a montante), a oscilação deste deslocamento nos instrumentos é aproximadamente $\approx 3,80$ a $4,10$ mm. No modelo numérico obteve-se a mesma oscilação observada na Fig. 13 aproximadamente de $\approx 2,40$ a $2,60$ mm, isto indica que o modelo numérico térmico tem a mesma grandeza, o mesmo comportamento físico e apresenta boa concordância com relação ao pendulo. Acreditando que a diferença seja devido a outros carregamentos que envolvem esta oscilação.

Os dados observados nos termômetros internos foram comparados com os valores obtidos na simulação numérica e o MAPE máximo entre os calculados foi de 9,64%. Os resultados de temperatura obtidos nos pontos monitorados no modelo numérico apresentam boa aproximação com relação aos dados da instrumentação termométrica instaladas no corpo da barragem.

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 e obtenção de valores de controle (limite máximo) mais confiáveis.

Como futuros trabalhos pretende-se fazer um sistema acoplamento duplo com as cargas hidrodinâmicas do reservatório, a subpressão e o comportamento térmico obtido neste trabalho. Acreditando que um modelo que contemple a maioria das cargas poderia representar de melhor forma o comportamento da barragem.

AGRADECIMENTOS

Agradecer ao CEASB e ITAIPU da disponibilidade dos equipamentos informáticos, softwares e pela oportunidade de publicar esta pesquisa aplicada. Aos professores da UNILA e UTFPR pelo apoio técnico incondicional.

REFERÊNCIA

ANSYS. **Meshing User's Guide**. 2017. 492 p. (RELEASE18.0).

ARACAYO, L. A. S. **Modelagem térmica de barragem de contraforte via ANSYS: caso de estudo bloco E6 da usina hidrelétrica de ITAIPU**. 2016. p.88. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2016.

HICKMANN, T. **Análise da variação térmica sazonal em barragem de contrafortes com o uso de cálculo fracionário**. 2016. 138 p. Tese (Doutor em Ciências) – Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Área de Concentração em Programação Matemática, Setores de Tecnologia e de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná – UFPR. PR: Curitiba. 2016.

ITAIPU BINACIONAL: **Usina hidrelétrica – projeto: aspectos de engenharia** / Reavaliação da Diretoria Técnica de Itaipu Binacional; Coordenação Geral da Superintendência de Engenharia da Itaipu Binacional; Apoio da Assessoria de Comunicação Social; Execução Gráfica de TAB Marketing Editorial, Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2009.

ITAIPU BINACIONAL. **Aspectos teóricos dos estudos realizados** – Estudos para a reavaliação dos valores de controle para a instrumentação civil das estruturas e fundações. 1999. Documento do Arquivo Técnico (SAT). N° 2660.50.15402.P-R0, Foz do Iguaçu, 1999.

ITAIPU BINACIONAL. **Bloco de contraforte E-6** – Estudos para a reavaliação dos valores limites para a instrumentação civil das estruturas e fundações. 1999. Documento do Arquivo Técnico (SAT). N° 2662.50.15401.P-R0, Foz do Iguaçu, 1999.

ITAIPU BINACIONAL. **Especificação técnica de consultoria para análise estrutural da barragem de contrafortes, Trecho E, da barragem de ITAIPU**. 2014. Documento do Arquivo Técnico (SAT). N° 8012.20.15225.P-R0, Foz do Iguaçu, 2014.

NOORZAEI, J. et al. Thermal and Stress Analysis of Kinta RCC Dam. **Engineering Structures**, v. 28, n. 13, p. 1795-1802, 2006.

QUEIROZ, P. F. **Utilização de modelos de elementos finitos tridimensionais no cálculo estrutural de barragens**. 2010. P.79. Trabalho final de mestrado (Mestre em Engenharia civil)-instituto de Engenharia de Lisboa – ISEL. Lisboa. 2010.

ROSSO J. et al. **Barragem de ITAIPU** – Lições aprendidas com comportamento térmico das estruturas tipo gravidade-aliviada e contraforte. XXII Seminário Nacional de Grandes Barragens, PR, Foz do Iguaçu. 2012.

SOUZA, R. **O Método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor**. 2003. P.40. Departamento de Engenharia Civil Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia, PA, Belém. 2003.