



Ministério da Educação

Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura

**MODELAGEM TERMICA DE BARRAGEM DE CONTRAFORTE VIA
ANSYS: CASO DE ESTUDO BLOCO E6 DA USINA HIDRELETRICA
DE ITAIPU - UHI**

LUIS ANTONIO SUCAPUCA ARACAYO

Foz do Iguaçu, PR

Julho de 2016



Ministério da Educação

Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura

MODELAGEM TERMICA DE BARRAGEM DE CONTRAFORTE VIA ANSYS: CASO DE ESTUDO BLOCO E6 DA USINA HIDRELETRICA DE ITAIPU - UHI

LUIS ANTONIO SUCAPUCA ARACAYO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da UNILA, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientador: Prof. DSc. Aref Kalilo Lima Kzam

Coorientadora: Profa. DSc. Tásia Hickmann

Foz do Iguaçu, PR

Julho de 2016

MODELAGEM TERMICA DE BARRAGEM DE CONTRAFORTE VIA ANSYS: CASO DE ESTUDO BLOCO E6 DA USINA HIDRELETRICA DE ITAIPU - UHI

LUIS ANTONIO SUCAPUCA ARACAYO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da UNILA, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Foz do Iguaçu, 22 de julho de 2016

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. DSc. Aref Kalilo Lima Kzam
UNILA

Banca examinadora: Prof. DSc. Ulises Bobadilla Guadalupe
UNILA

Banca examinadora: Prof. DSc. Julio Flórez López
UNILA

Foz do Iguaçu, 22 de julho de 2016

Dedico este trabajo a mis padres Paula y Segundino que han entregado su vida trabajando para darme el futuro que tengo.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus, pela força, coragem e sabedoria durante toda esta longa caminhada. Agradecer minha família: Paula, Segundino, Hector, Omar e Carlos pelo apoio e amor incondicional. A minha família adotiva: Maria das Dores, Manuel e José Maria que sem me conhecer profundamente confiaram em mim.

Agradecer a meus líderes e orientadores por sempre. Tásia, Aref, Everton, Dimilson que nunca desistiram em ensinar e guiar, a eles devo muito. À equipe do CEASB Alexandra pela confiança, Claudio Osako pelos ensinamentos e primeiros passos e Jean pela ajuda indispensável.

A meus professores Edna, Pedro, Juan de Dios, Ulises, Julio, Glaucia, Helenice, Ricardo, Fabio, Rodrigo, Ana Caroline e Noé pela dedicação e paciência nos ensinamentos.

A meus colegas de aula e amigos da universidade por acompanharem no transcurso desta longa caminhada. Os amigos de pesquisa da Universidade do Oeste do Paraná pelo apoio e companheirismo nos desafios de cada projeto.

Ao grupo de amigos "pru" e ao grupo de paz pelas alegrias e conselhos.

Ao CEASB, FPTI e UNILA pelo apoio nas pesquisas que colaboraram na origem do presente trabalho.

*Se quer viver uma vida feliz, amarre-se a uma meta, não
às pessoas nem às coisas. **Albert Einstein***

RESUMO

Este trabalho consiste na avaliação térmica transiente de um bloco de contraforte da barragem da Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHI). A influência da temperatura no comportamento estrutural de barragens de concreto é amplamente estudada na literatura, uma vez que a resistência e a estabilidade das estruturas podem ser afetadas por elevados gradientes térmicos, além disso a variação sazonal da temperatura provoca o aparecimento de altas concentrações de tensões em diferentes regiões, o que pode resultar em fissuração no corpo da barragem. Por meio de um estudo de caso ajustam-se as séries de Fourier para os dados de temperatura dos termômetros superficiais do bloco de contraforte que foram empregados como condições de contorno para o modelo térmico. Comparam-se os resultados obtidos por meio da simulação numérica no *software Ansys* baseada em Métodos dos Elementos Finitos (MEF) com os dados ajustados dos termômetros internos ao bloco em estudo, a fim de obter um Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) aceitável na área da construção civil. Entre os resultados numéricos e os dados ajustados da instrumentação, verificou-se boa precisão do modelo térmico proposto, o que justifica o emprego do MEF como método aproximado para análise térmica transiente.

Palavras chaves: Análise térmica transiente; Barragem de contraforte; Series de Fourier; Termômetros superficiais e internos.

ABSTRACT

This work consists of transient thermal evaluation of a buttress block the hydroelectric plant of ITAIPU dam (UHI). The influence of temperature on the structural concrete dams behavior is widely studied in the literature since the strength and stability of the structures can be affected by high thermal gradients in addition to seasonal variation of temperature causes the onset of high stress concentrations in different regions, which can result in cracks in dam body. Through a case study to adjust the Fourier series for the temperature data of the surface of the buttress pad thermometers were used as boundary conditions to the thermal model. the results obtained by numerical simulation are compared in Ansys software-based methods the Finite Element Method (FEM) with the adjusted data of internal thermometers to block study in order to obtain an error Absolute Percentage Average (MAPE) acceptable in the area construction. Among the numerical results and the data set of instrumentation, it is good precision thermal model proposed, which justifies the use of the FEM to approximate method for transient thermal analysis

Key words: Transient thermal analysis; Dam buttress; Fourier series; Surface and internal thermometers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Tipos de barragens de acordo com o material empregado	15
Figura 1.2 - Características de barragem de contraforte	16
Figura 1.3 - Vista Panorâmica	17
Figura 1.4 - Trecho E – UHE ITAIPU.....	18
Figura 1.5 - Temperatura ambiente ano 1971-1972-1973.....	20
Figura 2.1 – Cargas Térmicas	27
Figura 2.2 – Gráfico da temperatura ambiente vs deslocamento da crista do bloco E6.....	29
Figura 3.1 – Fenômeno da Condução	35
Figura 3.2 – Malha de Elementos Finitos – 2D.....	41
Figura 3.3 – Uma viga carregada em MEF.....	41
Figura 3.4 – Malha de elementos Finitos empregada nas análises estacionária e transiente.....	43
Figura 3.5 – Plane55 2D - Elemento térmico.....	43
Figura 4.1 – Fluxograma do método de trabalho.....	46
Figura 4.2 – Desenho em planta do Trecho E.....	47
Figura 4.3 – Desenho lateral do Trecho E.....	47
Figura 4.4 – Aplicação do recurso plano	48
Figura 4.5 – Aplicação do recurso esboço	48
Figura 4.6 – Aplicação do recurso esboço	49
Figura 4.7 – Aplicação do recurso loft	49
Figura 4.8 – Monólito a do Bloco E6.....	49
Figura 4.9 – Formato da peça única.....	49
Figura 4.10 – Montagem das peças	49
Figura 4.11 – Relacionamento das peças	49
Figura 4.12 – Relacionamento de peças–Bloco6	50
Figura 4.13 – Relacionamento de peças-Trecho E	50
Figura 4.14 – Aplicação do recurso corte	50
Figura 4.15 – Modelo 2D do bloco E6	50
Figura 4.16 – Termômetro superficial.....	51
Figura 4.17 – Localização dos termômetros do Bloco E6	52
Figura 4.18 – Localização do termômetro TS-D-503.....	53
Figura 4.19 – Localização do termômetro TS-D-504/D-5.....	53
Figura 4.20 – Localização dos termômetros e condições de Contorno	55
Figura 4.21 – Esquema de trabalho no ambiente Ansys	58
Figura 4.22 – Inserção dos materiais E	58

Figura 4.23 – Importação da geometria	58
Figura 4.24 – Definição de espessura	59
Figura 4.25 – Métodos usados na malha	59
Figura 4.26 – Utilização de named selection E.....	59
Figura 4.27 – Condição inicial	59
Figura 4.28 – Definição dos passos de tempo	60
Figura 4.29 – Inserção de condição de contorno	60
Figura 4.30 – Geração de resultados	60
Figura 4.31 – Rodar programa para simulação	60
Figura 5.1 – Condições de contorno – Interpolação trigonométrica via Series de Fourier	57
Figura 5.2 – Modelo 3D do Trecho E (Estrutura – Fundação).....	61
Figura 5.3 – Modelo 3D Trecho E – Vista isométrica	62
Figura 5.4 – Modelo 3D Trecho E – Bloco E6	62
Figura 5.5 – Campo de temperaturas – Estado estacionário	63
Figura 5.6 – Instrumentação vs Solução numérica por Ansys.....	64
Figura 5.7 – Campo de Temperatura do dia 31 de janeiro.....	74
Figura 5.8 – Campo de Temperatura do dia 28 de fevereiro.....	74
Figura 5.9 – Campo de Temperatura do dia 31 de março.....	75
Figura 5.10 – Campo de Temperatura do dia 30 de abril.....	75
Figura 5.11 – Campo de Temperatura do dia 31 de maio.....	76
Figura 5.12 – Campo de Temperatura do dia 30 de junho.....	76
Figura 5.13 – Campo de Temperatura do dia 31 de julho.....	77
Figura 5.14 – Campo de Temperatura do dia 30 de agosto.....	77
Figura 5.15 – Campo de Temperatura do dia 30 de setembro.....	78
Figura 5.16 – Campo de Temperatura do dia 31 de outubro.....	78
Figura 5.17 – Campo de Temperatura do dia 30 de novembro.....	79
Figura 5.18 – Campo de Temperatura do dia 31 de dezembro.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Massa específica (ρ)	31
Tabela 3.2 – Calor específico (c)	32
Tabela 3.3 – Condutividade Térmica (k)	33
Tabela 3.4 – Difusividade Térmica (α).....	33
Tabela 3.5 – Quadro resumo: Propriedades térmicas adotados segundos (PROMON e ALTO PARANA, 1976)	34
Tabela 4.1 – Informações dos termômetros usados no trabalho	54
Tabela 4.1 – Informações dos termômetros usados no trabalho	56
Tabela 5.2 – Numero de armonicos e MAPE dos sete termômetros – Fase Validação	62
Tabela 5.3 – Valores max. e min. observados nos termômetros internos	65
Tabela A.1 – Coeficientes das séries de Fourier – termômetro superficial TS-D-5	72
Tabela A.2 – Coeficientes das séries de Fourier – termômetros superficiais TS-D-903, TS-D-904 e TS-E-1	73
Tabela A.3 – Coeficientes das séries de Fourier – termômetros superficiais TI-E-1, TI-E-2 e TI-E-3	73

LISTA DE SÍMBOLOS

c	Calor específico
k_x, k_y e k_z	Condutividade térmica do material em x, y e z respectivamente
q'	Geração de energia interna
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
K	Grau Kelvin
ρ	Massa específica
∇^2	Operador Laplaciano
q_x, q_y e q_z	Taxas de condução de calor em x, y e z respectivamente

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

UHI	Usina Hidrelétrica de Itaipu
CAD	Computer Aided Design (Projeto assistido por computador)
CEASB	Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens
FPTI	Fundação Parque Tecnológico Itaipu
MEF	Método dos Elementos Finitos
SAT	Sistema de Arquivos Técnicos
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i> (Erro Percentual Absoluto Médio)

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS	xii
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS.....	21
1.2. JUSTIFICATIVA.....	22
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	23
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1. EFEITOS TÉRMICOS EM BARRAGENS	26
CAPÍTULO 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	30
3.1. CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DOS MATERIAIS.....	30
3.2. MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	34
3.2.1. Condução	35
3.3. SÉRIES DE FOURIER PARA PROBLEMA DE SERIES TEMPORAIS	37
3.4. MÉTODOS NUMÉRICOS.....	41
3.4.1. Métodos dos elementos finitos	41
3.4.2. Malha de elementos finitos	42
CAPÍTULO 4 METODOLOGIA.....	45
4.1. MODELAGEM GEOMÉTRICA “BLOCO E6” DA USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU – UHI.....	47
4.2. INTERPOLAÇÃO TRIGONOMETRICA - SERIES DE FOURIER.....	51

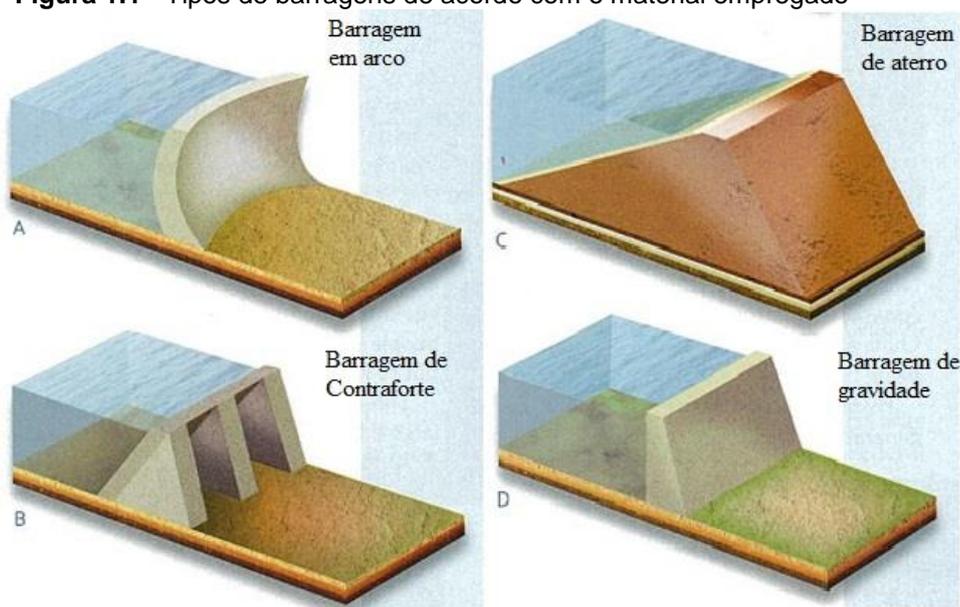
4.3. MODELAGEM NUMÉRICA VIA-ANSYS	57
CAPÍTULO 5 RESULTADOS	61
5.1. COMPARAÇÃO VALORES NUMERICOS COM INSTRUMENTOS	62
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
REFERÊNCIAS	68
APENDICE 1 – SERIES DE FOURIER	71
COEFICIENTES DAS SÉRIES DE FOURIER (1985 - 2015).....	72
APENDICE 2 – CAMPOS DE TEMPERATURA.....	74
CAMPOS DE TEMPERATURA	74

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

De acordo com Hickmann (2016) barragens são estruturas hidráulicas construídas no curso de um rio para criar um reservatório para uso de água com diversas finalidades, como: irrigação, abastecimento de água, controle de enchentes, navegação, pesca ou produção de energia hidrelétrica. Para esta última finalidade, as barragens podem ser classificadas em grupos de acordo com o material utilizado na sua construção: barragens de concreto, que podem ser do tipo gravidade, arco e contrafortes e barragens convencionais (de terra ou enrocamento). Na Figura 1.1 observa-se os tipos de barragens mencionadas.

Figura 1.1 - Tipos de barragens de acordo com o material empregado



Fonte: Adaptado (HICKMANN, 2016)

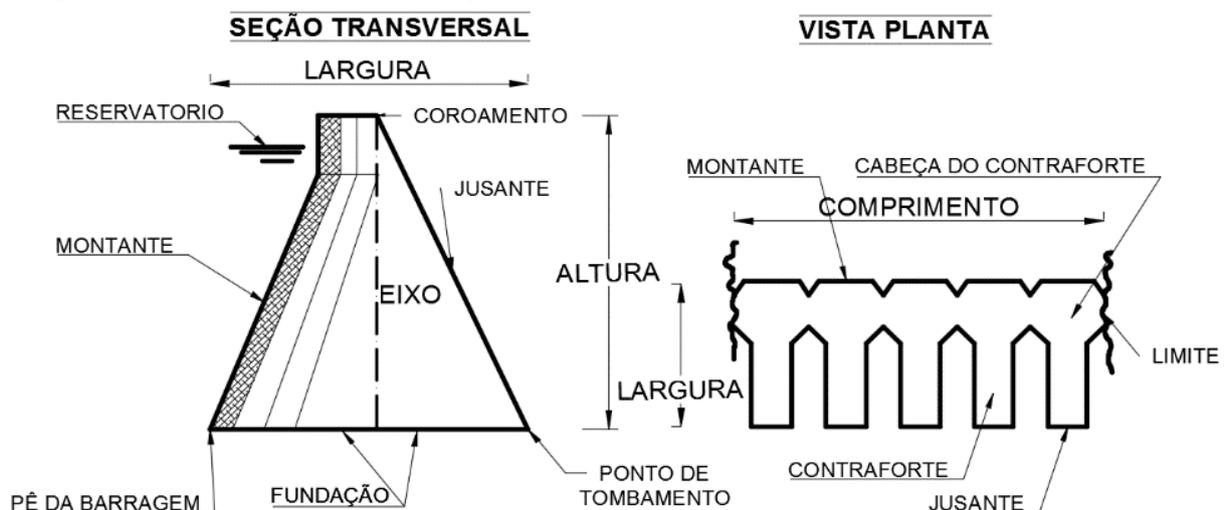
Um grande número de barragens de contrafortes foram construídas na década de 1930, já que neste período a relação entre os custos laborais e os custos materiais eram baixos. Entre suas vantagens, se exige para sua construção em torno de 60% a menos em relação as barragens de gravidade (ENERGY, 2015).

Entre as vantagens e desvantagens tem-se a situação da subpressão (tensão positiva) sob a barragem, reduzida devido à pequena área apoiada. Por outro lado, o peso próprio em uma área reduzida gera um acréscimo de tensão de compressão na fundação, fato ocorrido muitas vezes exige-se um tratamento das fundações como: uso de tirantes, injeção de calda de cimento ou tratamento por chavetas (situações críticas).

O projeto de barragens de contrafortes é baseado no conhecimento e julgamento que vem quase que exclusivamente da experiência do projetista. Devido este fato, e por causa dos estudos aplicados as barragens de contrafortes serem limitados na literatura, seus estudos não são tão abordados. O custo deste tipo de construção é normalmente não competitivo, portanto sua utilização não é tão frequente (U.S. DEPT. OF THE INTERIOR, 1987).

Barragens de contrafortes são compostas por plataformas planas e blocos estruturais, na Figura 1.2 ilustra-se um bloco de contraforte com as características básicas.

Figura 1.2 - Características de barragem de contraforte



Fonte: Adaptado (ENERGY, 2015)

Um exemplo de barragem de contraforte consiste no Trecho E – Bloco E6 da Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHI), utilizado como estudo de caso neste trabalho, conforme a Figura 1.3. A UHI constituída basicamente por seis seções: barragem lateral direita, barragem

principal, estrutura de desvio, barragem de terra da margem direita, barragem de enrocamento e barragem de terra da margem esquerda.

O trecho E da barragem da UHI está localizado na margem direita, apoiado em um maciço rochoso e está composta por seis blocos enumerados do E-1 ao E-6.

Figura 1.3 - Vista Panorâmica



Fonte: Adaptado (ITAIPU, 2015)

Neste trabalho desenvolve-se um estudo térmico no “Trecho E” e para modelagem do comportamento térmico é utilizada o bloco “E-6” devido ao fato desse ser o bloco chave do trecho, destacado na Figura 1.4. Em termos técnicos, chamado de bloco chave ao bloco mais instrumentado e estrutura que apresenta características diferenciadas dos outros.

Figura 1.4 - Trecho E – UHE ITAIPU

Neste tipo de barragens é comum usar o concreto massa, denominação usada devido ao grande volume de concreto necessário em estruturas de grande porte. Em construção de barragens, medidas de controle no calor gerado na hidratação do cimento e nas mudanças de volume, produzidos pelas dimensões, de modo a diminuir o risco de fissuração devem ser tomadas para reduzir o gradiente térmico do concreto nas primeiras idades (ALBUQUERQUE, 2006); (COELHO, 2012).

Após redução de temperatura das primeiras idades, a temperatura do concreto pode ser alterada pelos efeitos da condução, radiação e convecção, que representam uma parcela na deformação da barragem ao longo do tempo. Entre as várias solicitações que ocorrem na barragem, deformações são provenientes destes fenômenos térmicos (TELES, 1985). Segundo o autor, as propriedades térmicas do concreto, as deformações sazonais nas diferentes estações do ano e a deterioração dos materiais, estão fortemente associadas às variações de temperatura que a estrutura está sujeita.

A correta avaliação do campo de temperaturas em barragens é essencial para a determinação das tensões e deformações de origem térmica. 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).

Uma das problemáticas de transferência de calor em barragens é o cálculo da distribuição de temperaturas em estruturas de geometria complexa, estimativa e avaliação dos fenômenos térmicos no concreto massa não são tarefas imediatas, e constam de várias etapas, como: desenvolvimento do modelo da geometria 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 capazes de modelar problemas complexos envolvendo diversas variáveis físicas e matemáticas, como por exemplo o *software* comercial ANSYS® baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF).

Devido a segurança de barragens e a utilização do concreto massa nos dias atuais, este trabalho tem o intuito de fazer um estudo da transferência de calor obtendo os campos de temperatura no bloco de contraforte da UHI, considerando-se as condições externas de temperatura a que este está sujeito com auxílio do *software* ANSYS®.

Entre as etapas mencionadas, é desenvolvida um modelo geométrico do “Trecho E” baseada nos desenhos reais da construção por meio do *software* SolidWork, com o objetivo de representar sua forma e suas características geométricas que descrevam a estrutura. Provendo uma descrição analítica, matemática e abstrata do modelo real. Por outro lado, o modelo fornece facilidade de visita e observação, sendo econômico e prático para analisá-lo e testá-lo. Em suma o modelo serve como suporte para outros projetos em desenvolvimento.

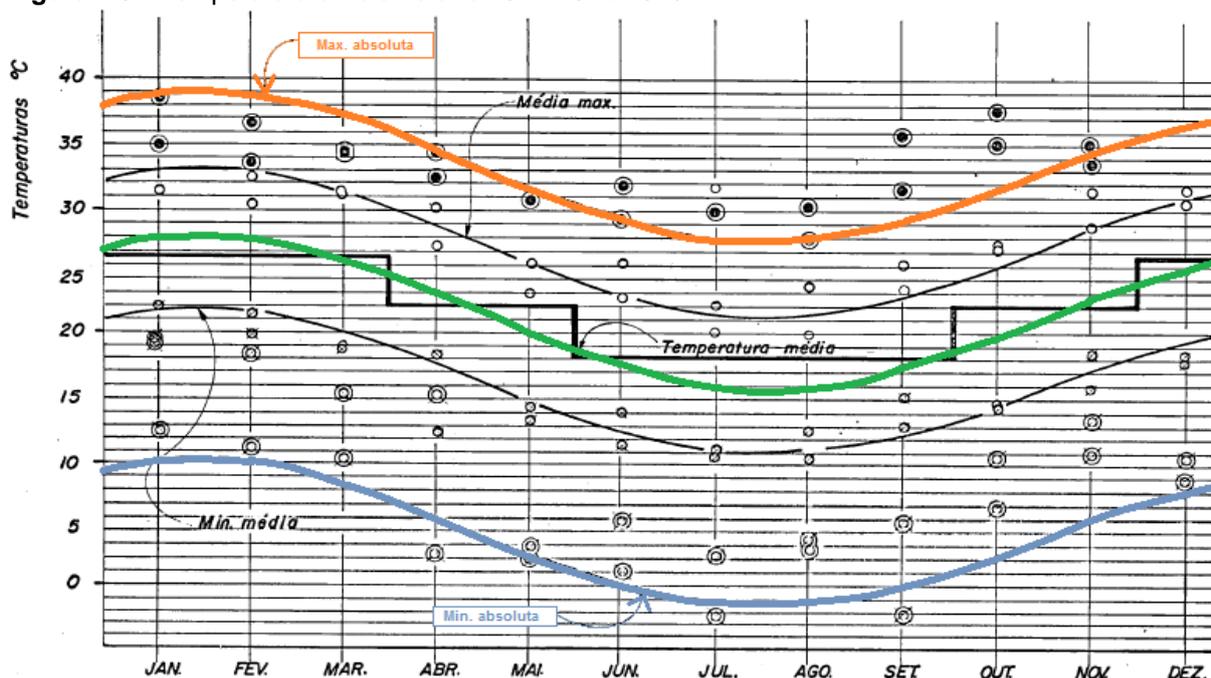
Em razão a essa situação, a verificação do modelo geométrico, situações na falta de informações e medições que não foram definidos no projeto, são resgatadas com a realização de uma série de visitas técnicas à usina para validar as medidas ou em outro caso atualizar algumas incorporações (reforços) estruturais.

Na etapa de desenvolvimento térmico, na época da construção da UHI observou-se uma alta variação de temperatura na região e as temperaturas pico provocavam certa preocupação nos lançamentos de concreto. Por tanto realizaram estudos meteorológicos da temperatura ambiente.

Promon e Alto Paraná (1976) realizou estudos para o controle térmico das estruturas da barragem principal de UHI. No estudo foram obtidos dados meteorológicos das estações

de SALTO DEL GUAIRA e HERNANDARIAS como se observa na Figura 1.5 e obteve-se resultados médios das épocas mais frias e mais quentes do ano. No gráfico observa-se, valores medidos de temperatura em cada mês do ano, em que a linha vermelha representa os valores máximos, a linha verde a média de todos os valores e a linha azul representa os valores mínimos. O gráfico com as curvas senoidais mostra a variação da temperatura ambiente no tempo de um ano médio.

Figura 1.5 - Temperatura ambiente ano 1971-1972-1973



Fonte: Adaptado (PROMON e ALTO PARANA, 1976, p. 24)

Por outro lado, identificaram-se as médias das temperaturas nos meses mais frios do ano (JUN, JUL, AGO, SET) que ficaram entorno a 18 °C, a média anual das temperaturas em torno a 22 °C e a média das temperaturas nos meses mais quentes do ano (DEZ, JAN, FEV, MAR) ficaram entorno a 26°C segundo o gráfico mostrado e os relatórios escritos pelos consultores da época da construção.

Segundo Rodrigues (2010) o ciclo de vida das Barragens pode ser dividido em: fase preliminar, projeto, construção, operação e revisão dos planos de segurança da barragem. Na fase de operação, os responsáveis pela segurança devem garantir o funcionamento da barragem compatível com o risco associado ao longo do tempo de vida da estrutura. Por outro lado, os proprietários devem tomar as devidas ações para que mantenham a segurança da estrutura. Por esse motivo, neste trabalho aborda-se o estudo da fase de operação da UHI com a finalidade de conhecer e estudar o comportamento térmico ao longo do tempo.

Entre os principais instrumentos de monitoramento na estrutura de concreto da UHI são: pêndulo direto, que mede os deslocamentos horizontais de vários pontos dos blocos em cotas determinadas, pêndulo invertido que mede os deslocamentos da fundação da barragem em relação a um ponto da fundação, tensômetro de concreto que mede a tensão no interior de estruturas de concreto e o termômetro de resistência que sua finalidade é de medir a temperatura no interior da estrutura de concreto.

Por tanto, neste trabalho avaliou-se o gradiente de temperatura a partir dos termômetros entre os anos 1985 e 2015 com o fim de poder representar de forma precisa os campos de temperatura. Os dados observados das temperaturas dos termômetros externos são ajustados por meio de séries de Fourier a fim de serem utilizados como condições de contorno no modelo em elementos finitos e os dados ajustados dos termômetros internos para validação do modelo térmico.

É importante salientar que o estudo pode ser aplicado a qualquer tipo de estrutura em concreto massa sempre e quando conte com instrumentação. Os objetivos deste trabalho são detalhados na próxima seção.

1.1. OBJETIVOS

Objetivo Geral

Modelar o comportamento térmico transiente de um bloco de contraforte da UHI, empregando o software Ansys na resolução do problema da condução térmica.

Para que o objetivo principal seja atendido os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

Objetivos Específicos e Metodologia

Realizar uma revisão bibliográfica da influência térmica nas estruturas de concreto massa;

Realizar a caracterização das propriedades térmicas (massa específica, calor específico e condutividade térmica) dos materiais empregados neste trabalho;

Modelar a geometria do Trecho E da barragem UHI com o *Software Solidwork*;

Ajuste dos valores medidos pela instrumentação via Séries de Fourier, para o uso como condição de contorno no problema da condução térmica;

Empregar o pacote computacional ANSYS com a finalidade de identificar as regiões dos gradientes térmicos da barragem;

Comparar os valores numéricos com os valores medidos na instrumentação;

1.2. JUSTIFICATIVA

Os objetivos mencionados anteriormente tratam do estudo dos efeitos térmicos sazonais em barragem de contrafortes através da modelagem numérica computacional. Este trabalho contém relevância especial pelo fato de ser um estudo em barragem de contrafortes, pouco abordado na literatura (U.S. DEPT. OF THE INTERIOR, 1987). Grande parte das pesquisas é enfatizada em barragens de gravidade, gravidade aliviada e a arco. Outro aspecto importante será a análise térmica sob os efeitos da sazonalidade, que são as variações térmicas entre inverno e verão.

Uma aplicação deste estudo foi feita em um bloco de contraforte da barragem da Usina Hidrelétrica de ITAIPU a fim de avaliar a propagação de calor no bloco entre os anos 1985 e 2015, quando este é sujeito a temperaturas nas suas faces externas. O modelo numérico-computacional desenvolvida via Ansys tem certa originalidade com sua geometria e os parâmetros usados.

O Software ANSYS empregada neste trabalho, está baseado em elementos finitos e foi usada devido a seu potencial de acoplamento de problemas físicos e ter um ambiente amigável, bastante usado nas distintas áreas da engenharia. O software é usado em análises estacionárias e transientes com problemas que abrangem a área térmica, fluidos monofásicos e multifásicos, estrutural, elétrico, modal, e acoplamentos entre eles.

Aqui escreve da equipe de trabalho

Uma aplicação deste estudo é feita no projeto

O projeto do CEASB - ITAIPU é de desenvolver tecnologia

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica que consiste em uma breve descrição dos trabalhos relacionados aos principais efeitos da temperatura em barragens.

O capítulo 3 apresenta os conceitos fundamentais dos mecanismos de transferência de calor, levando-se em conta três modos básicos de transferência: condução, convecção e radiação, método de interpolação trigonométrica por Series de Fourier e uma descrição do Método dos Elementos Finitos.

O capítulo 4 compõe a metodologia para desenho geométrico da estrutura em *software Solidwork®*, a partir dos desenhos reais da época da construção. Posteriormente se faz o uso das Series de Fourier para a interpolação trigonométrica das medições dos termômetros. Seguidamente, o esquema numérico empregado para modelagem térmica transiente do bloco E-6.

No Capítulo 5 são obtidos os resultados do esquema numérico proposto no capítulo 4, sendo comparado com os valores da instrumentação.

Finalmente apresentam-se no capítulo 6 as conclusões do trabalho tomadas a partir dos resultados obtidos e do desenvolvimento do trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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. A ruptura ou acidentes graves em barragens podem levar as perdas de vidas humanas, impactos ambientais, prejuízos materiais e queda econômico-financeiros consequentes de um desastre.

Segundo Alves (2016) dois são os principais fatores que podem ser apontados como causa primária desse evento: o aparecimento de um fenômeno natural intenso responsável por danificar a estrutura da barragem, sendo um fenômeno natural de intensidade inesperada, como terremotos, tufões, furacões ou grandes variações no ambiente. Na falta de planejamento como um fator externo leva ao colapso, pois a estrutura da barragem deve ser apta a oscilações naturais do ambiente em que se insere. O autor recomenda como solução para mitigar os riscos desses eventos, a implantação de uma fiscalização periódica mais rigorosa e a adoção de estudos e técnicas estruturais.

Dentre uma das principais causas que podem levar à fissuração de barragens e aumento do risco ao colapso da estrutura por grandes deslocamentos, consiste nos efeitos ocasionados pela variação de temperatura.

Conforme Maken, Léger e Roth (2013), as barragens estão sujeitas a gradiente térmico ocasionadas pela diferença entre a temperatura interna e externa, além do calor de hidratação proveniente de reações químicas do concreto durante a fase de construção da

barragem. As cargas térmicas sobre a superfície da barragem são oriundas da radiação solar, variação de temperatura do ar. Há também o fenômeno da 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.

Após a construção da barragem, o controle da temperatura por meio de instrumentos tem sua vantagem no monitoramento dos deslocamentos da estrutura, medida por movimentos pendulares, pois a variação de temperatura é uma das causas mais importantes deste deslocamento (DIVISÃO DE CONTROLE DE CONCRETO, 1977).

A correta avaliação da variação de temperatura na barragem é essencial para a determinação das tensões e deformações de origem térmica. Diversos trabalhos presentes na literatura destacam a importância de se estudar e analisar os efeitos da temperatura no desempenho estrutural de barragens, tais como: (ANSELL; MALM, 2008); (LÉGER; LECLERC, 2007); (MIRZABOZORG, *et al.*, 2014).

Há ainda trabalhos presentes na literatura que abordam metodologias para a descrição do campo de temperatura em barragens de concreto através do Método dos Elementos Finitos.

Em Daoud *et al.* (1993), é realizada uma avaliação numérica do campo de temperatura periódica em uma barragem de concreto. O autor leva em consideração as variações de temperatura ambiente, radiação solar, cobertura de neve, gradientes de temperatura e formação de gelo na água do reservatório.

No trabalho de Mirzabozorg *et al.* (2014) é considerado a radiação solar sobre a distribuição térmica em uma barragem em arco. Os resultados da simulação obtidos pelo autor são comparados com os dados registrados pelo termômetro da barragem em arco.

Noorzaei *et al.*(2006) desenvolveu um código em elementos finitos bidimensional para a análise térmica e estrutural da barragem de gravidade 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 em boa concordância com as temperaturas reais medidas através de termopares instalados dentro do corpo da barragem.

No trabalho de Amorim (2012) um problema de calor de hidratação em concreto massa é modelada com o software ANSYS. A simulação apresenta bons resultados quanto à evolução de temperatura no tempo e demonstra que o método dos elementos finitos (MEF) pode ser eficiente para a solução da equação de Fourier que regem os problemas de transferência de calor.

Quanto à aplicabilidade do software Ansys em problemas de engenharia, em particular análise térmica em estruturas, pode-se consultar Moaveni (2008) e Madenci e Guven (2015).

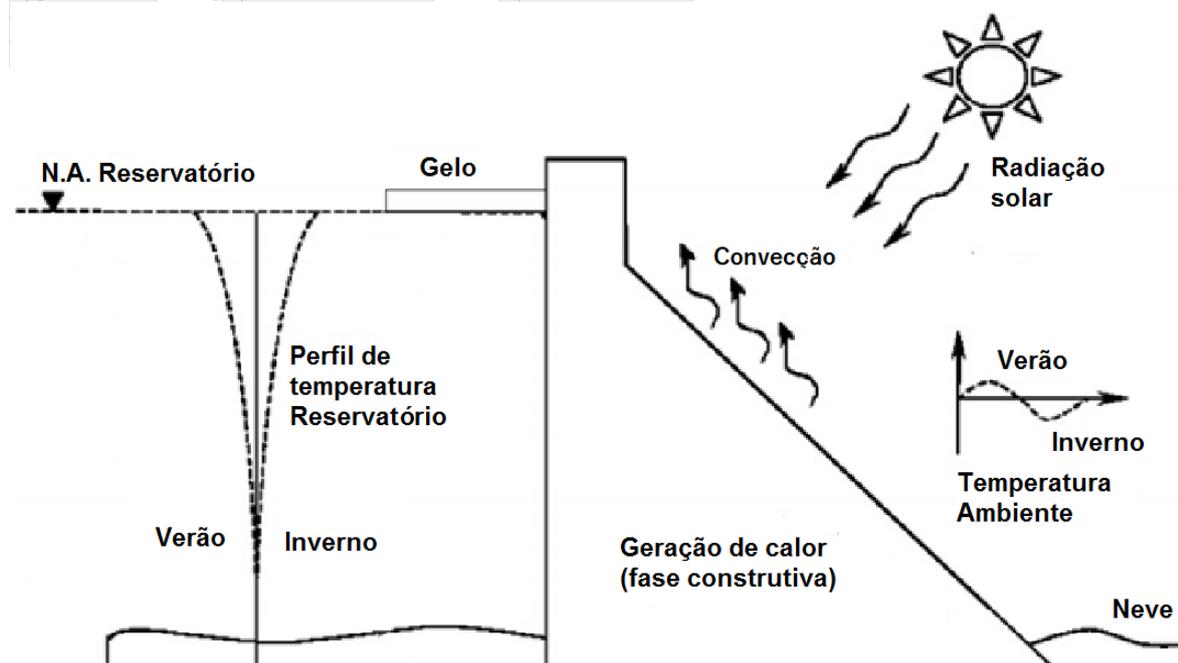
Devido à natureza temporal da temperatura do ar, requerem investigações no espaço tempo a fim de revelar características comportamentais no tempo. Vários trabalhos na literatura abordam métodos aplicando series temporais.

Em Vilani e Sanches (2013), analisaram as séries temporais da temperatura do ar utilizando a Serie de Fourier e a transformada de Wavelet. Aplicada num ponto da área urbana e três na cidade, o autor encontrou que os resultados apresentaram uma sazonalidade similar, com valores elevados nas áreas urbanas. Ambas ferramentas de análise são de grande aplicabilidade para series-temporais.

Outra aplicação desenvolvida em Alcântara (2010), encontrou por meio de imagens de satélite os campos de temperatura diurno e noturno da superfície da água do reservatório, a transformada de Fourier foi importante na determinação da variabilidade espaço-temporal do campo de temperatura. Os resultados encontrados revelam que o reservatório ganha calor de janeiro a maio e agosto a dezembro, e que perde de maio a agosto.

2.1. EFEITOS TÉRMICOS EM BARRAGENS

O comportamento térmico da barragem é influenciado por parâmetros como: radiação solar, geração de calor, temperatura ambiente, perfil de temperatura do reservatório e a fundação, assim como os campos de tensões e deformações provenientes das solicitações térmicas. Em algumas regiões há dependência das ações térmicas provenientes da neve e do gelo. Na Figura 2.1 ilustram-se alguns carregamentos térmicos atuantes em estruturas de barragens. Observa-se na figura que os fenômenos de condução e convecção se apresentam tanto a montante como a jusante diferenciados pelo fluido.

Figura 2.1 – Cargas Térmicas

Fonte: Adaptado de Éger e Venturelli (1993)

Na fase de produção, após a dissipação do calor de hidratação, o comportamento térmico da estrutura está estreitamente sujeito a mudanças climáticas. Conjuntamente de parâmetros como: propriedades dos materiais (influenciando na difusão do calor na barragem) e a temperatura do ar, reservatório e a fundação.

Por tanto, no estudo do comportamento térmico a caracterização das propriedades térmicas do material são as que mais interferem: peso específico, calor específico e a condutividade térmica.

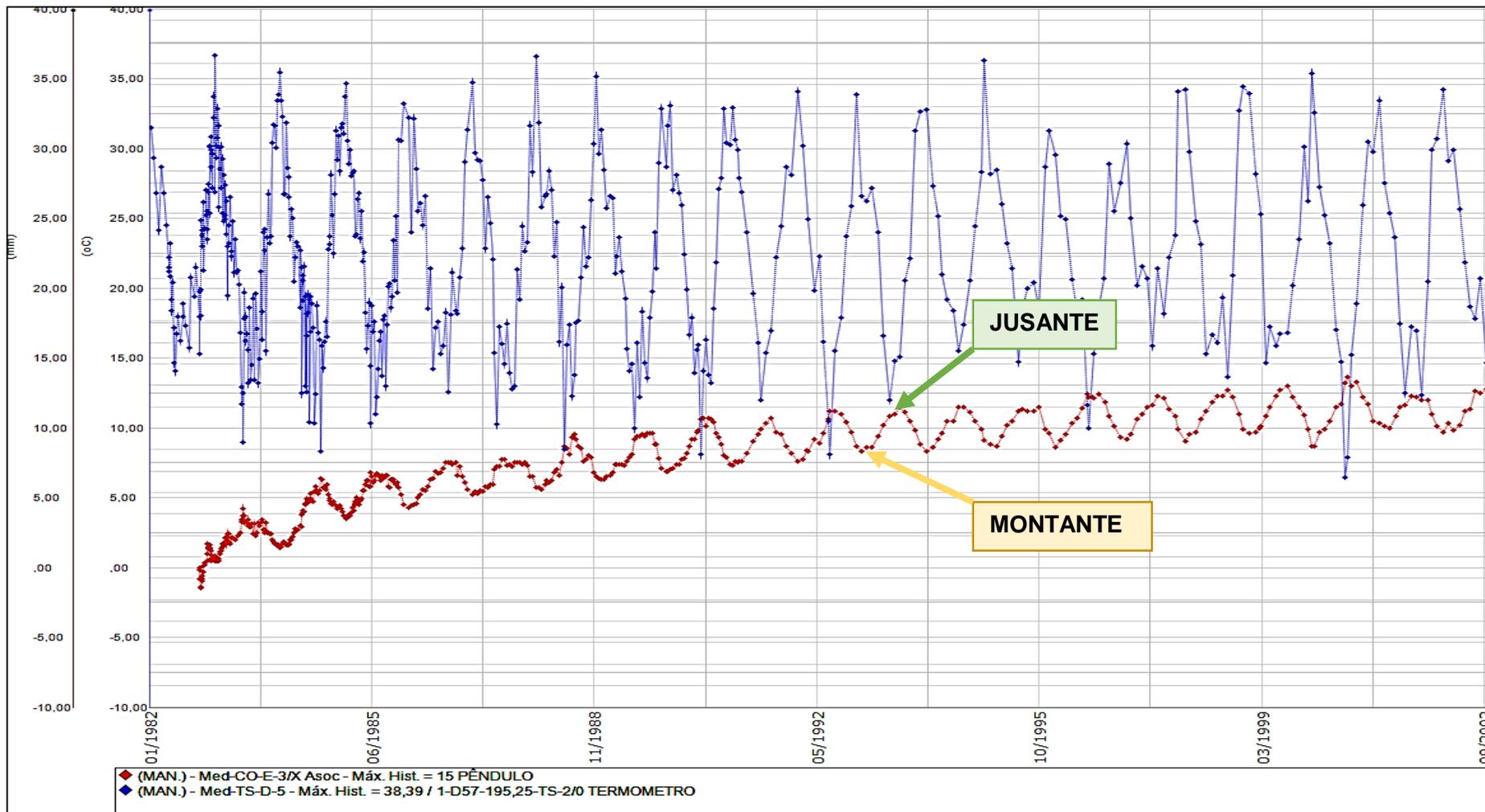
A água no reservatório apresenta uma evolução no tempo de carácter sazonal, e é influenciada pelas condições climáticas do local (temperatura do ar, intensidade da radiação solar), assim também o regime hidrológico do afluente (rio que alimenta o reservatório) intervém, e sua determinação é extremadamente difícil caso não se tenha instrumentação (CASTILHO, 2013).

A temperatura ambiente é o comportamento mais variável segundo a sua localização e medição ao longo do dia. Por tanto, o propósito de modelar a evolução do campo térmico no corpo da barragem está fortemente ligado à variação da temperatura do ar ao longo do tempo.

Na Figura 2.2 observa-se o gráfico da evolução da temperatura média sazonal com o deslocamento da crista da barragem, obtido a partir dos registros diários de temperatura máxima e mínima do ar medidos pela instrumentação do bloco E6.

A figura a seguir é apresentada no eixo horizontal a linha do tempo e no eixo vertical duas escalas, referindo-se à temperatura e o outro ao deslocamento. A curva azul representa a temperatura medida pelo termômetro, apresentando um comportamento senoidal com temperaturas alcançando na mínima de 6°C e na máxima de 38 °C. A curva vermelha representa a medição do pendulo, sendo o deslocamento entre a jusante e a montante, deslocamento relacionado com a crista (topo da estrutura) do bloco.

Percebe-se que os picos da curva da temperatura em alguns pontos interceptam-se com os picos do pendulo, sendo um indicador que o deslocamento da crista do bloco está relacionado com a temperatura. Nas temporadas frias o bloco se desloca a jusante e nas temporadas quentes se desloca a montante.

Figura 2.2 – Gráfico da temperatura ambiente vs deslocamento da crista do bloco E6

Fonte: Adaptado do Sistema de arquivo Técnico – UHI

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os fundamentos teóricos abordados neste capítulo são necessários para uma boa compreensão e um bom desenvolvimento deste trabalho. Parâmetros térmicos que envolvem o problema, mecanismo de transferência de calor, método de interpolação trigonométrica e conhecimentos gerais do método dos elementos finitos são prescindíveis.

É conveniente apresentar os mecanismos de transferência de calor entre um corpo e o meio que o circunda. Neste trabalho aplicou-se o conceito de gradiente de temperatura e estudou-se o problema de condução térmica com maior foque. Por tanto, há o interesse em determinar com precisão um modelo térmico que descreva o campo de temperatura ao longo do tempo.

3.1. CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DOS MATERIAIS

A caracterização das propriedades térmicas dos materiais são parâmetros importantes, que intervêm, de forma direta no comportamento térmico da estrutura. Nas aplicações de concreto em massa, a hidratação do cimento e as fracas condições de dissipação do calor resultam numa significativa elevação da temperatura do concreto nos primeiros dias o que leva a trincas do concreto. Para que a barragem se mantenha monolítica sem fissuras nas primeiras idades, controla-se a elevação da temperatura realizando uma escolha criteriosa da composição do concreto. A finalidade da escolha do material é de obter

propriedades térmicas que garantam condições adequadas de estabilidade da estrutura (CASTILHO, 2013).

A escolha do material determina o comportamento em função a suas propriedades. Geralmente as propriedades térmicas (condutividade térmica e calor específico) do concreto em barragens por meio de estudos laboratoriais não é muito comum, pelo que é habitual recorrer aos valores indicados na literatura.

Propriedades e valores recomendados por expertos/pesquisadores da área são apresentados a seguir:

Uma propriedade física do material é a massa específica (ρ), definida como o quociente da massa de uma quantidade de substancia entre o volume correspondente e é considerada uma propriedade termodinâmica, como a condutividade térmica e a viscosidade. Na Tabela 3.1 exibe-se os valores de literatura que podem ser adotados para estudos em caso de não existirem valores de ensaios (BRAGA, 2004).

Tabela 3.1 – Massa específica (ρ)

MASSA ESPECÍFICA ρ	VALOR MÍN.	VALOR MÁX.	FONTE
	$Kg \cdot m^{-3}$		
Concreto convencional	2000	2400	(FARINHA; REIS, 2000, p. 94)
Rocha basáltica	2710		
Rocha granito	2600		(CHIOSSI, 2013, p. 3.4)
Rocha Calcário Denso	2090		

Outra propriedade que influencia no comportamento térmico é o calor específico (c), definida como a quantidade de calor necessária para elevar um grau de temperatura em uma unidade de massa. Do mesmo modo é a medida da capacidade de o material armazenar energia térmica. O seu valor muda conforme as variações de temperatura mudam, e para estruturas maciças de concreto esta é considerada constante (ÇENGEL, 2003).

Tabela 3.2 – Calor específico (c)

CALOR ESPECÍFICO (C)	VALOR MÍN.	VALOR MÁX.	FONTE
	$J \cdot kg^{-1} K^{-1}$		
Concreto convencional	836,80	1056,00	(RIBEIRO, 2004, p.376)
Concreto (Agregado Calcário)		2480	(SILVOSO, 2002, p. 52)
Concreto massa	750,00	1166,00	(FARINHA; REIS, 2000, p. 94)
Fundação (areia - Argila)	800,00 – 920,00		

Cengel (2003) compara o calor específico da água $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ e o ferro $c = 0,45 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ em temperatura ambiente, o que indica que a água pode armazenar quase 10 vezes mais energia do que o ferro por unidade de massa. Fazendo uma relação do calor específico no uso de concreto massa e a água, entende-se pela fração de ambos que a água armazena calor em maior quantidade que o concreto, devido a sua capacidade térmica.

Finalmente a condutividade térmica (k) de um material pode ser definida como a taxa de transferência de calor por meio de uma unidade de comprimento de um material por unidade de área por unidade de diferença de temperatura. Esta propriedade quantifica a tendência de o material conduzir calor (ÇENGEL, 2003).

Esta variação deve-se, entre outros fatores, à textura e à composição química dos materiais, sendo que esta propriedade do concreto, não é significativamente afetada pela idade ou por variações de temperatura (CASTILHO, 2013).

Tabela 3.3 – Condutividade Térmica (κ)

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (κ)	VALOR MÍN.	VALOR MÁX.	FONTE
	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$		
Concreto convencional	1,73	3,46	(FARINHA; REIS, 2000, p. 94)
Concreto (Agregado Calcário)	3,00		(SILVOSO, 2002, p. 52)
Fundação (Rochas)	1,63	6,23	(FARINHA; REIS, 2000, p. 94)

A difusividade térmica (α) representa a velocidade com que o calor se difunde por meio de um material, definida como a razão entre a condutividade térmica (κ) e a capacidade térmica ($\rho \cdot c$).

Ribeiro (2004) também apresenta valores de difusividade térmica, provenientes de várias barragens de concreto convencional, assim como se mostra na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Difusividade Térmica (α)

DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α)	VALOR MÍN.	VALOR MÁX.	FONTE
	$m^2 \cdot h^{-1}$		
Concreto massa Rocha (Geral)	0,003	0,006	(FARINHA; REIS, 2000, p. 94)
Concreto convencional	0,0025	0,006	(RIBEIRO, 2004, p.378)
Concreto	0,0027		(CENGEL; 2003, p. 23)
Água	0,000504		

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a difusividade térmica do concreto é uma propriedade que influencia a distribuição da temperatura pela massa. Uma difusividade térmica mais elevada leva a uma perda mais rápida de calor, o que resulta em uma temperatura máxima mais baixa. Nem sempre é desejável ter uma dissipação rápida do calor, porque o concreto pode não ter suficiente resistência à tração nas primeiras idades.

Em Castilho (2013) para análise térmica da barragem de Alqueva foram adotados para o concreto as propriedades térmicas de $c = 920 \text{ (} J \cdot \text{kg}^{-1} K^{-1} \text{)}$ e $\kappa = 2,62 \text{ (} W \cdot m^{-1} K^{-1} \text{)}$ os quais, considerando uma massa específica $\rho = 2400 \text{ (} \text{kg} \cdot m^{-3} \text{)}$ conduzem a uma difusividade térmica $\alpha = 0,00417 \text{ (} m^2 \cdot h^{-1} \text{)}$.

A continuação é apresentada as propriedades térmicas adotadas neste trabalho para a modelagem térmica do Bloco E6 da UHI, foram obtidas do relatório de pré-projeto “Análise de tensões de origem térmica pelo método dos Elementos Finitos” realizado pelos Grupos consultores de Engenharia PROMON e ALTO PARANÁ na época da construção de 1976.

Na Tabela 3.5 apresenta-se um resumo das propriedades adotadas para o modelo térmico para a fase de operação.

Tabela 3.5 – Quadro resumo: Propriedades térmicas adotados segundos (PROMON e ALTO PARANA, 1976)

PROPRIEDADE	CONCRETO	FUNDAÇÃO (ROCHA)	UNIDADES
Calor específico (c)	895,980	753,620	$J \cdot \text{kg}^{-1} \cdot K^{-1}$
Condutividade Térmica (k)	1,8492	1,8841	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Massa Específica (ρ)	2550,00	2950,00	$\text{kg} \cdot m^{-3}$ (*)
Difusividade Térmica (α)	5,26E ⁻⁷	-	$m^2 \cdot s^{-1}$

3.2. MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor numa estrutura, pode ser entendida como a transferência de energia de uma região da estrutura para outra, como resultado da diferença de temperatura. É importante a identificação dos mecanismos de transferência de calor que rodeiam a barragem, de modo a conseguir quantificar a energia a ser transferida na unidade de tempo, chamada também de taxa de transferência de calor. Considera-se três mecanismos para a transferência de calor: condução, convecção e radiação (BRAGA, 2004). Neste trabalho aprofunda-se e aplica-se o mecanismo de transporte de calor por condução.

Devido ao fato de ter termômetros localizados no corpo interno da estrutura, torna o caso de estudo como um problema de condução de calor, considerada como hipóteses neste trabalho, sendo desconsiderados os mecanismos de transferência de calor da convecção e radiação.

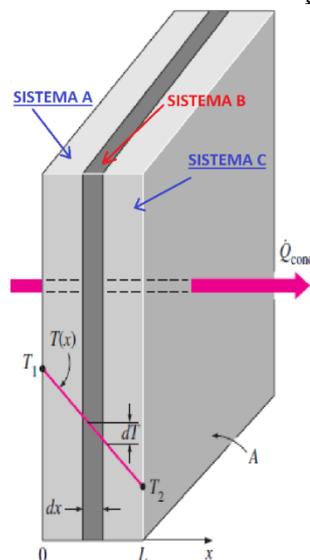
Devido a estrutura possuir instrumentos localizados no corpo interno, com leituras desde a época da construção (início da década de 1980) até nossos dias atuais o problem.

3.2.1. Condução

A condução do calor é definida como o processo de troca de energia entre sistemas. E ocorre pela interação molecular na qual moléculas de alto nível energético transferem energia aos de menor nível energético.

Na Figura 3.1 observa-se três sistemas, a transferência de calor por condução térmica (também chamada de difusão térmica) ocorre pela transferência de energia de partículas de maior energia (sistema A) para as partículas adjacentes de menor energia (sistema C), através do sistema (B). O mecanismo ocorre em sólidos, líquidos e gasosos. Nos gases e nos líquidos a condução ocorre em menor intensidade e se deve às colisões entre moléculas durante seu movimento aleatório. Nos sólidos ocorre a vibração das moléculas e a energia é transportada pelos elétrons livres (BRAGA, 2004); (ÇENGEL, 2003); (KREITH e BOHN, 2011).

Figura 3.1 – Fenômeno da Condução



Fonte: Adaptado (CENGEL, 2003)

A equação da difusão do calor é determinada pela primeira lei da termodinâmica e pela Lei de Fourier. Sendo uma relação empírica que envolve o fluxo de calor e o gradiente de temperatura em uma direção normal a superfície e através de uma constante de proporcionalidade, denominada de coeficiente de condutividade térmica, vista como uma das propriedades térmicas dos materiais. Na Equação (1) apresenta-se o fluxo de calor para um sistema unidimensional (ÇENGEL, 2003).

$$q_x = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

Sendo:

q_x : Fluxo de calor na direção "x" (W ou J);

k : Condutividade térmica do material ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);

A : área da seção transversal (m^2);

$-\frac{\partial T}{\partial X} = \frac{T_2 - T_1}{L}$: gradiente de temperatura (o sinal refere-se à direção da temperatura

no sentido decrescente), $(T_2 - T_1)$ como a diferença de temperatura ($^{\circ}\text{C}$ ou K) e L a distância entre os pontos extremos.

Segundo Magalhães (2003), a condução de calor é categorizada como problema físico, denominado como problema de campo (comumente, problema de potencial). Este fenômeno de campo tem o equacionamento quase-harmônica. Casos particulares da equação quase-harmônica são as conhecidas equações de Poisson e de Laplace.

Çengel (2003) indica que para um material isotrópico nas três direções, onde os coeficientes térmicos k , ρ e c são constantes e não exista geração de energia interna, a Equação (1) pode ser reescrita como:

$$\nabla^2 \mathbf{T} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} \quad (2)$$

Sendo:

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) : \text{É o operador Laplaciano};$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c} : \text{Difusividade térmica } (m^2 \cdot s^{-1}).$$

A difusividade térmica avalia a velocidade com que o calor se difunde em um lado do material. Utilizado em problemas que envolve condução transiente.

3.3. SÉRIES DE FOURIER PARA PROBLEMA DE SERIES TEMPORAIS

Segundo carvalhos (2016), uma função temporal pode ser uma função x aleatória. Sendo na maioria dos casos uma função no tempo. Uma das características de seu comportamento: é não previsível no futuro ao contrário de uma função determinística.

A temperatura na região de Foz do Iguaçu ou outras regiões, pode ser considerado um processo estacionário, caracterizadas por serem similares num intervalo de tempo, ou seja, as series temporais exibem-se variações com período anual. Pode ser dita qualitativamente, que uma serie estacionaria é aquela que está em equilíbrio estatístico (CARVALHO, 2016).

Na representação de uma serie temporal que possui um caráter senoidal com uma função harmônica é representada da seguinte forma:

$$Y_t = \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{n}\right) \quad (3)$$

Sendo “n” o número total de pontos ou medições;

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi \cdot t}{n} : \text{é a média angular e } \omega_1 = \frac{2 \cdot \pi}{n} \text{ frequência angular, ou seja, } \omega_1 \text{ pertence}$$

a onda que executa um ciclo completo sobre a série de dados.

Realizando um deslocamento à equação (3), adicionando uma média dos valores da série de dados co-seno ou seno e é dado por \bar{Y} , com isso assegura-se que o mesmo irá estar em torno do valor médio, por outro lado, a compressão da onda devido ao deslocamento pode ser obtido pela multiplicação de uma constante “C” conhecida como amplitude, assim também, a casos que se precisa deslocar lateralmente, para isso aplica-se um ϕ_1 de modo que a equação (3) é escrita como:

$$Y_t = \bar{Y} + C_1 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{n} - \phi_1\right) \quad (4)$$

Sendo:

ϕ_1 : ângulo de fase, o argumento $Y_t = 0$, se $\phi_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot t}{n}$;

\bar{Y} : é a média dos valores das séries temporais;

Aplicando identidade trigonométrica e multiplicando por C_1 obtém-se:

$$C_1 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{n} - \phi_1\right) = C_1 \cos(\phi_1) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{n}\right) + C_1 \sin(\phi_1) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{n}\right) \quad (5)$$

Sendo:

C_1 : amplitude para o primeiro harmônico, ϕ_1 : ângulo de fase.

Para encontrar C_1 deve ser resolvida com a seguinte equação:

$$C_1 = \left|A_1^2 + B_1^2\right|^{1/2} \quad (6)$$

Sendo:

A_1, B_1 : dados como $A_1 = C_1 \cdot \cos(\phi_1)$ e $B_1 = C_1 \cdot \sin(\phi_1)$ e por meio de mínimos quadrados é possível encontrar A_1, B_1 . Por outro lado, ϕ_1 pode ser determinada por:

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{B_1}{A_1} \text{ para } A_1 > 0, \quad \phi_1 = \tan^{-1} \frac{B_1}{A_1} \pm \pi \text{ para } A_1 < 0 \text{ e } \phi_1 = \frac{\pi}{2} \text{ para } A_1 = 0.$$

Este caso apresentado refere-se a um harmônico, ou seja, para uma onda que passa pelas series temporais. A continuação é apresentada para o caso de n harmônicos, isto irá a ajustar de melhor forma a serie temporal.

Por tanto é possível encontrar uma função com k harmônicos que passam pelos pontos, assim adiciona-se uma serie de n/2 funções harmônicas da seguinte forma:

$$Y_t = \bar{Y} + \sum_{k=1}^{n/2} \left[A_k \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{n}\right) + B_k \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{n}\right) \right] \quad (7)$$

Sendo:

\bar{Y} : é a média dos valores das séries temporais;

k: indica o número de harmônicos;

ϕ_k : ângulo de fase para o número k de harmônicos;

C_k : amplitude para o número k de harmônicos;

Por tanto para resolução por mínimos quadrados ou por series as variáveis ficam:

$$A_k = \frac{2}{n} \cdot \sum_{k=1}^n Y_t \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{n}\right)$$

$$B_k = \frac{2}{n} \cdot \sum_{k=1}^n Y_t \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{n}\right) \quad (8)$$

$$C_k = |A_k^2 + B_k^2|^{1/2}$$

E ϕ_1 pode ser determinada pela equação seguinte:

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{B_k}{A_k} \quad \text{para } A_1 > 0$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{B_1}{A_1} \pm \pi \quad \text{para } A_1 < 0 \quad (9)$$

$$\phi_1 = \frac{\pi}{2} \quad \text{para } A_1 = 0$$

3.4. MÉTODOS NUMÉRICOS

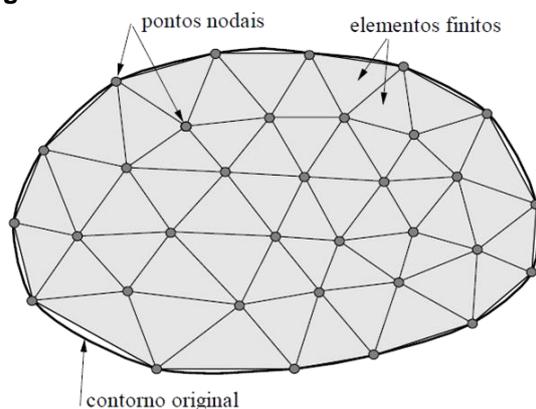
Um sistema de equações diferenciais que representa um fenômeno físico, onde se impõem condições iniciais e de contorno, precisa de uma solução para sua aplicação prática. Uma via é a solução exata, baseada em métodos algébricos e diferenciáveis, no entanto, dependendo do problema torna-se impraticável, por esse motivo recorre-se a métodos numéricos, obtendo-se soluções aproximadas (HICKMANN, 2016).

3.4.1. Métodos dos elementos finitos

O uso do MEF consiste em um método numérico aproximado para análise de diversos fenômenos físicos que ocorrem em meios contínuos. O método consiste em obter soluções numéricas de modelos descritos por equações diferenciais e/ou integrais, cujo domínio de solução está sujeito a condições iniciais e de contorno.

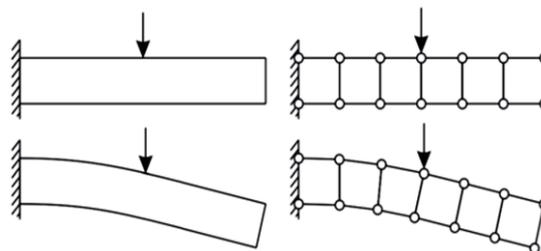
A ideia principal do MEF consiste em dividir o domínio (meio contínuo) do problema em sub-regiões de geometrias simples chamados de elementos na forma triangular, quadrilateral, cubica, etc. O processo é conhecido como discretização do domínio (veja Figura 3.2), os elementos são conectados por pontos, chamados de nós ou pontos nodais. Por conseguinte, esse conjunto dá-se o nome de malha de elementos finitos podendo ser até tridimensional. Na Figura 3.3 observa-se um exemplo de viga discretizada com carregamento de força que resultou flexionada.

Figura 3.2 – Malha de Elementos Finitos – 2D



Fonte: Adaptado de (MAGALHÃES, 2003)

Figura 3.3 – Uma viga carregada em MEF



Fonte: (MADENCI e GUVEN, 2015)

Segundo Kzam (2016) a ideia principal do MEF é representar o domínio físico empregando-se entes matemáticos discretos, onde as propriedades físicas e geométricas são

definidas a partir de valores nodais e funções interpoladoras a fim de se obter informações de geometria e grandezas físicas em qualquer ponto do domínio.

A precisão do método depende da quantidade de nós e elementos, e do tamanho e tipo do elemento presentes na malha. Um dos aspectos mais importantes do MEF diz respeito a sua convergência. Embora trata-se de um método aproximado, à medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero, e conseqüentemente, a quantidade de nós tende a infinito, a solução obtida converge para a solução exata do problema. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número de elementos em uma determinada malha, mais precisos serão os resultados da análise (MAGALHÃES, 2003).

3.4.2. Malha de elementos finitos

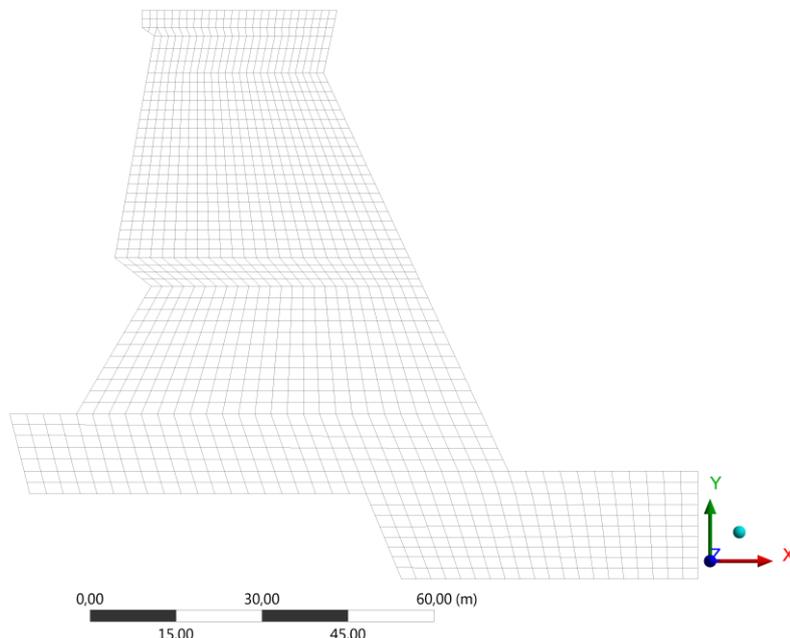
Uma vez definida a geometria de análise ou geometria simplificada, a primeira decisão do analista estrutural ao usar um código computacional consiste na escolha do tipo de elemento finito utilizado para representar a geometria e as variáveis físicas do problema. O elemento escolhido deverá satisfazer as condições mecânicas, como por exemplo, representar satisfatoriamente os campos de deslocamentos, deformações e tensões.

Essa discussão é importante para elucidar que a escolha do tipo de elemento não é um procedimento aleatório e exige do analista um real entendimento do problema. (KZAM, 2016, p.65)

Para o estudo de caso, a malha adotada na Figura 3.4 foi obtida como a mais econômica computacionalmente, com o fim de obter resultados dentro do esperado. O alvo de interesse neste trabalho é obter os campos de temperatura da estrutura ao longo do tempo, desse modo adota-se elementos PLANE55¹ de 1 m de tamanho aproximadamente.

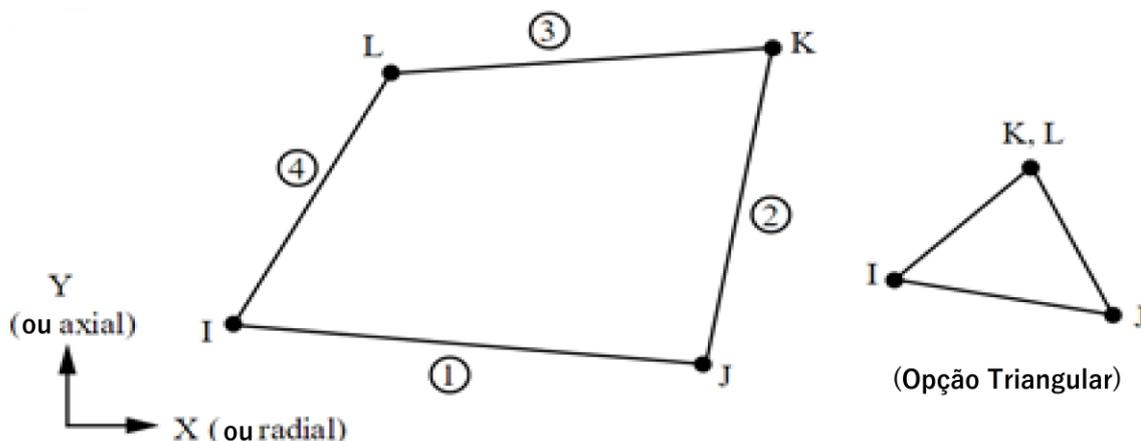
¹ Para informações do PLANE55: http://www.ansys.stuba.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-55.htm

Figura 3.4 – Malha de elementos Finitos empregada nas análises estacionária e transiente



O elemento usado é formado por 4 nós com um único grau de liberdade de temperatura por nó, assim como é apresentado na seguinte figura a seguir.

Figura 3.5 – Plane55 2D - Elemento térmico



Fonte: Adaptado de Support Ansys (2016)

É usada como um elemento plano e é aplicável para análise térmica bidimensional, em estado estacionário ou transiente que é uma das características que são solicitadas no estudo de caso para resolver o problema da condução de calor. Entre outras aplicações que o elemento fornece:

- Aplicação de carregamentos na superfície como: convecção, fluxo de calor;
- Aplicação de carregamentos de corpo como: geração de calor interna;

- Processo de Birth and death;
- E não considera efeitos de transporte de massa;

Para maiores detalhes do elemento podem ser encontrados (ANSYS, 2013). A malha apresentada anteriormente é aplicada no estudo de caso deste trabalho.

Uma vez definido a malha numérica, seguidamente conforme visto na seção 3.1, neste trabalho o concreto é considerado como um material isotrópico, com propriedades térmicas constantes e sem há existência de fonte de calor ou geração de calor interno. Emprega-se as series de Fourier, apresentada na seção 3.3 para determinação das condições de contorno do problema de condução de calor da barragem UHI. O problema de condução de calor é resolvido por meio do software ANSYS baseada no Método dos Elementos Finitos.

A continuação é apresentada com maiores detalhes a metodologia adotada para resolução do estudo de caso “Bloco E6” da UHI.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados os métodos a serem aplicados para alcançar os objetivos definidos na seção 1.1. O estudo deste trabalho envolveu 4 etapas descritas a seguir:

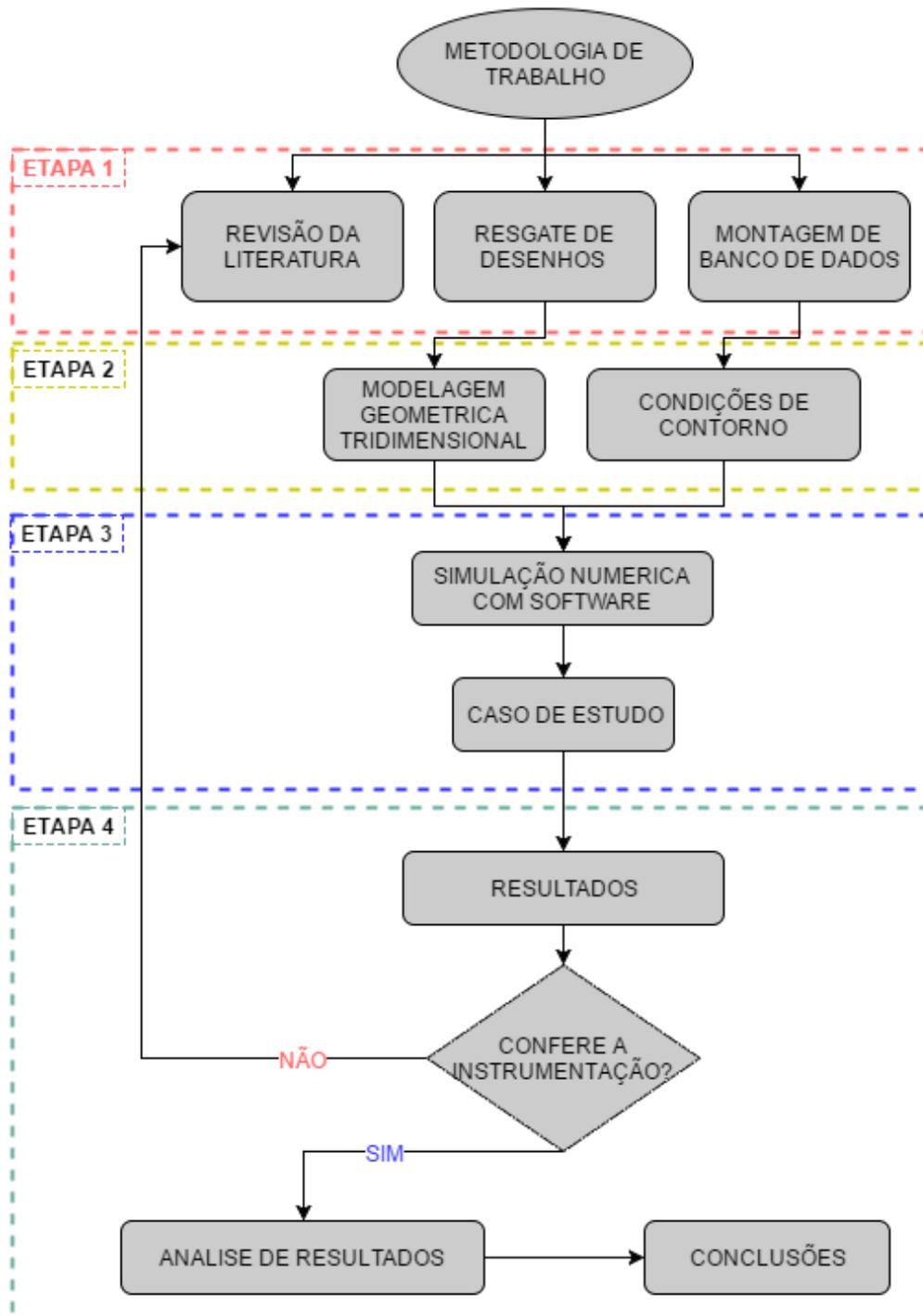
A primeira etapa, apresentada no capítulo 2 e 3 como revisão bibliográfica e fundamentação teórica, formam parte da metodologia. Esta etapa deu base para entender como outros autores estudam o problema da condução de calor aplicado em barragens e por meio das idéias captadas dos autores conseguiu-se adotar a seguinte metodologia dividida entre as etapas 2, 3 e 4.

Na segunda etapa, é desenvolvida o modelo geométrico de estudo do “Trecho E” da UHI. A partir dos desenhos reais da época da construção e via *software Solidwork®* é feito um modelo 3D, representando em detalhes toda a estrutura. Em seguida, a partir das medições da época de 1985 até 2015 dos termômetros instalados no corpo da barragem, utilizam-se as Series de Fourier para encontrar uma função que interpola cada uma desses termômetros, com o fim de usar cada termômetro como condição de contorno para a modelagem térmica transiente.

Na terceira etapa é apresentada como escopo de trabalho o uso do software ANSYS para resolução do problema da condução de calor do Bloco E6 da UHI, que serve como estudo de caso.

Finalmente na quarta etapa são apresentados os resultados do estudo de caso. Os valores numéricos são comparados com a instrumentação e verificadas com o Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE). Com esses resultados em mãos apresenta-se as conclusões deste trabalho. Na Figura 4.1 aprecia-se as quatro etapas que compõe essa metodologia.

Figura 4.1 – Fluxograma do método de trabalho



4.1. MODELAGEM GEOMÉTRICA “BLOCO E6” DA USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU – UHI.

O objetivo da modelagem geométrica é descrever a forma e as características geométricas de um objeto. Esta provê uma descrição analítica, matemática e abstrata do modelo real. O modelo fornece facilidade de visita e observação, sendo econômico e prático para analisá-lo e testá-lo. Assim também, serve como suporte para outros projetos em desenvolvimento.

Para o estudo de caso, a etapa da modelagem geométrica iniciou-se por meio dos desenhos reais da época de construção da barragem como observa-se na Figura 4.2 e 4.3.

Figura 4.2 – Desenho em planta do Trecho E

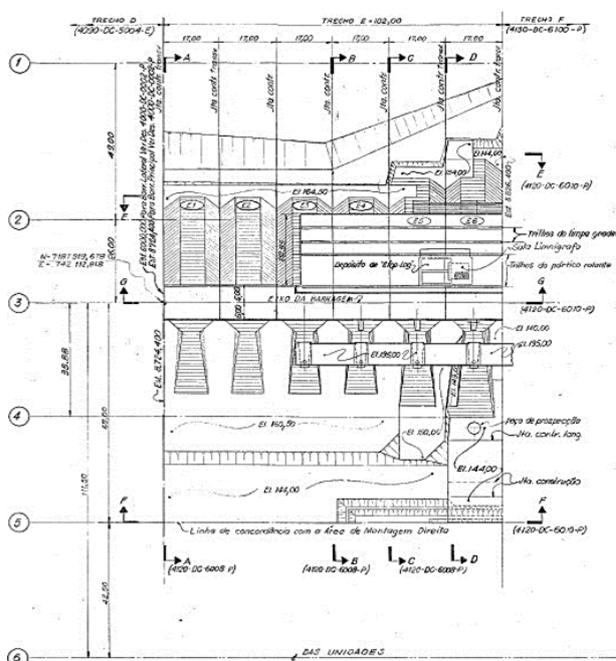
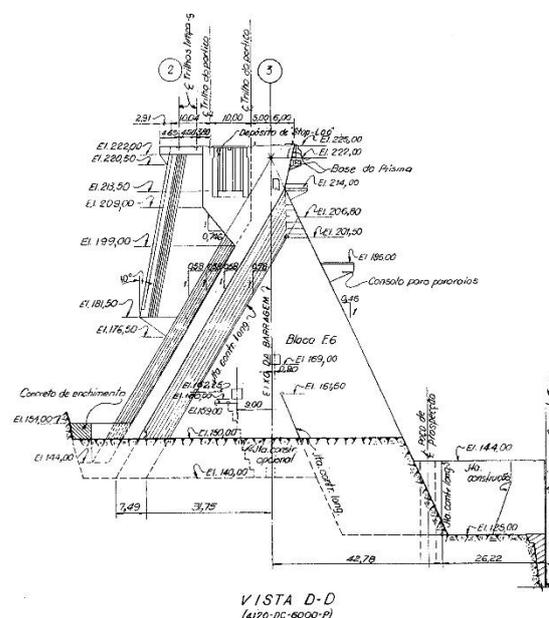


Figura 4.3 – Desenho lateral do Trecho E



Fonte: Sistema de arquivo Técnico – SAT

A modelagem geométrica de uma estrutura pode ser uma tarefa complexa, mesmo com acesso aos desenhos originais. Esta requer uma análise de cada desenho, reconstituição detalhada de cada região do trecho E, devido à falta de informações ou medidas, foram resgatadas com a realização de uma série de visitas técnicas à usina, com isso foi possível validar as medidas projeto original ou em outro caso, atualizar algumas incorporações (reforços) estruturais.

Com a finalidade de modelar as estruturas, o *software* usado está baseado no *Computer Aided Design* (CAD) – Solidworks e este se encaixa no princípio de CSG (*Constructive Solid Geometry*), sistema capaz de realizar a modelagem sólida, construindo

componentes que são objetos sólidos e, não simplesmente uma malha de linhas e traçados (KERRY, 1997).

Este software foi escolhido devido a sua função paramétrica capaz de criar formas tridimensionais a partir de formas geométricas elementares. A vantagem desse software das outras ferramentas, é de permitir criar modelos com dimensões variáveis.

Os seguintes passos foram importantes para a modelagem da estrutura Trecho E, sendo iniciada com o bloco E6, segue na Figura 4.4 a criação de um plano com o recurso *plane*, a partir de três pontos referenciados ou uma aresta e um ponto definido para o esquema do bloco.

Para criação da geometria, utiliza-se o recurso esboço conforme, apresentado na Figura 4.5, este deve ser definido com suas dimensões, ou relações de geometria, (linha preta) para evitar modificações inesperadas.

Figura 4.4 – Aplicação do recurso plano

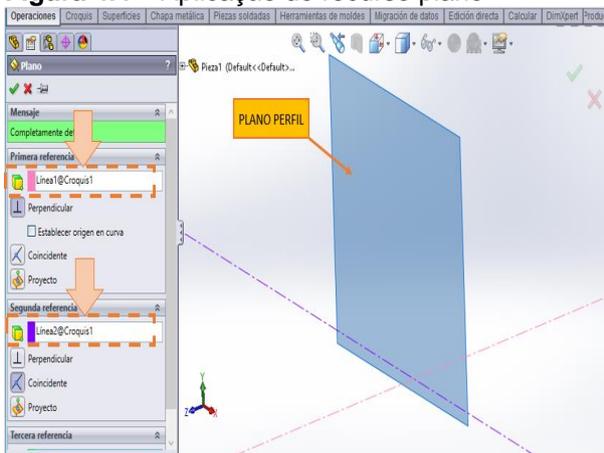
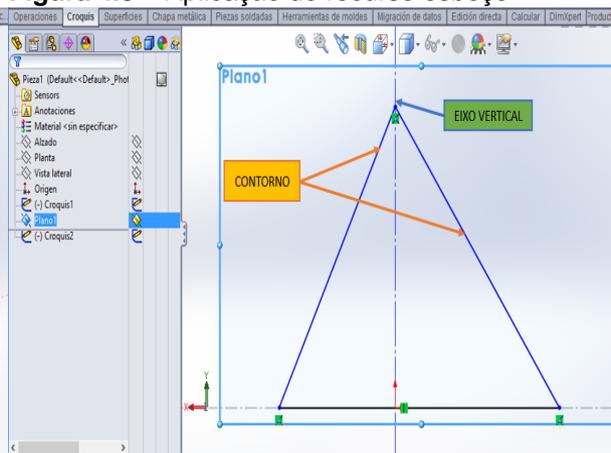


Figura 4.5 – Aplicação do recurso esboço



Um outro recurso bastante usado é o *Loft* que basicamente tem a função de unir dois esboços Figura 4.6 no espaço por meio de interpolação linear ou conectores, formando um sólido definido. Este recurso foi usado na modelagem das diferentes camadas de concretagem, assim como se apresenta na Figura 4.7.

Figura 4.6 – Aplicação do recurso esboço

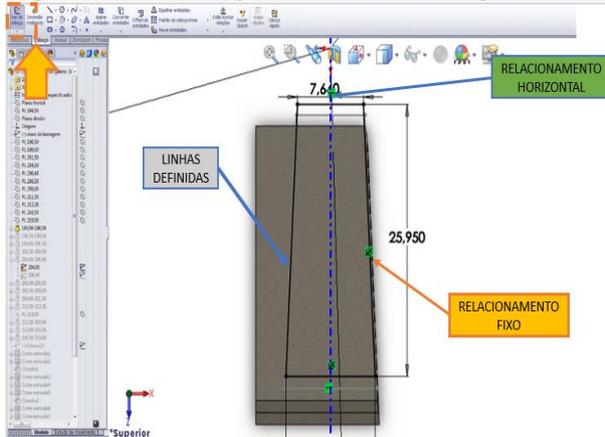
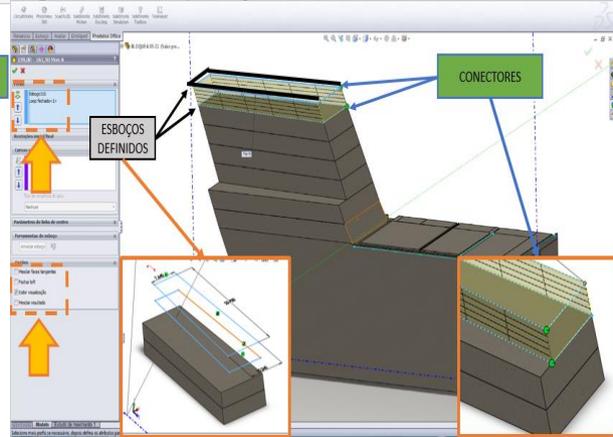


Figura 4.7 – Aplicação do recurso loft



Uma vez terminada uma das peças é possível trabalhar de forma separada, com o fim de posteriormente montar por partes. Na Figura 4.8 observa-se uma peça completa, chamada “monólito a” segundo os construtores da barragem da UHI. Para salvar como peça única utiliza-se o formato *.sldlfp* apresentado na Figura 4.9

Figura 4.8 – Monólito a do Bloco E6

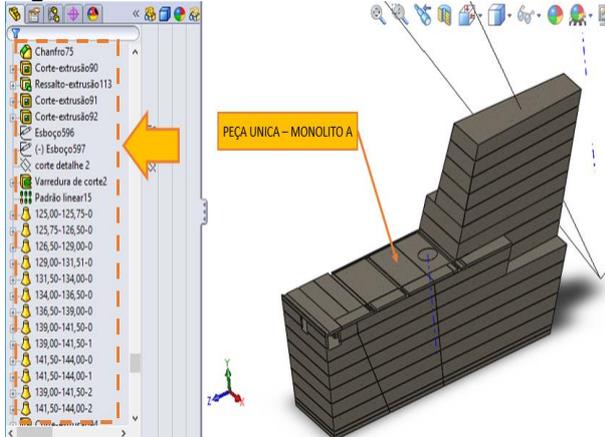
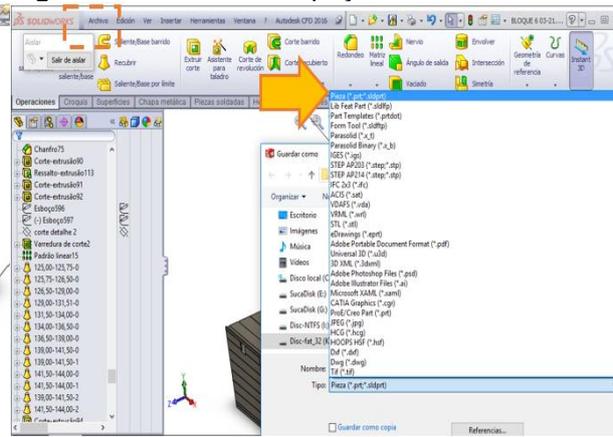


Figura 4.9 – Formato da peça única



Feito por peças, cria-se uma nova peça, chamada “montagem” Figura 4.10.

Figura 4.10 – Montagem das peças

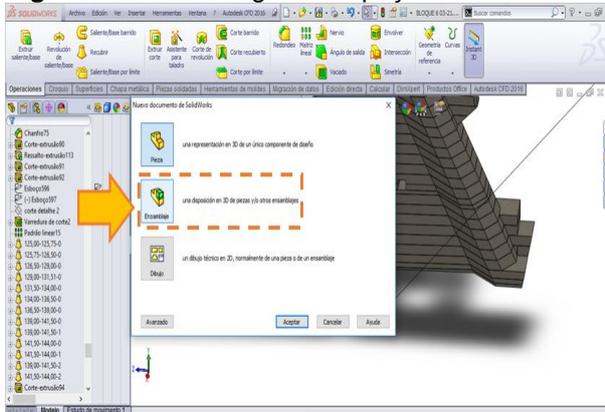
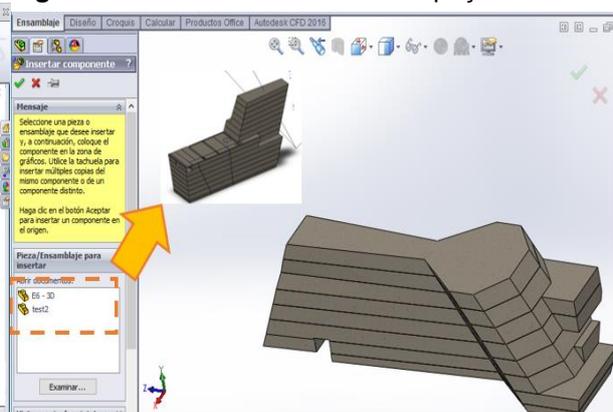


Figura 4.11 – Relacionamento das peças



Inserir-se cada uma das peças em uma só Figura 4.11, utilizando recurso de relacionamentos Figura 4.12, Figura 4.13 como paralela, coincidente, perpendicular, tangente, entre outras.

Figura 4.12 – Relacionamento de peças–Bloco6

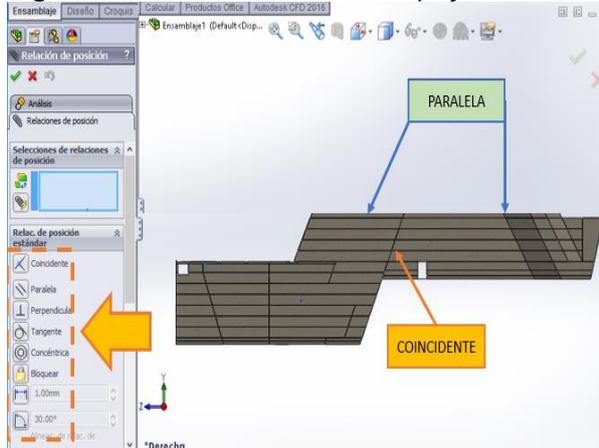
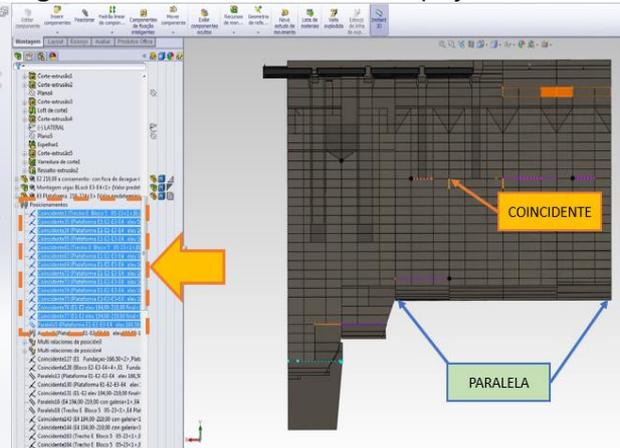


Figura 4.13 – Relacionamento de peças-Trecho E



O modelo tridimensional realizado no *Solidwork®* é rico em detalhes, portanto isso acarreta dificuldades na modelagem em elementos finitos. Por esse motivo é realizado algumas simplificações na geometria. Detalhes que podem ser desprezados como: chanfro, suportes de fixação de cabos, drenos, vigas, pavimento, instrumentação, parapeito do coroamento da estrutura, passarela e entre outros equipamentos usados no dia a dia da barragem.

Para as devidas simplificações se realiza um corte no modelo 3D, na Figura 4.14 apresenta-se a seção hachurada após a aplicação do corte. A partir deste recurso obtém-se o modelo 2D, previamente simplificada para facilitar nas simulações Figura 4.15.

Figura 4.14 – Aplicação do recurso corte

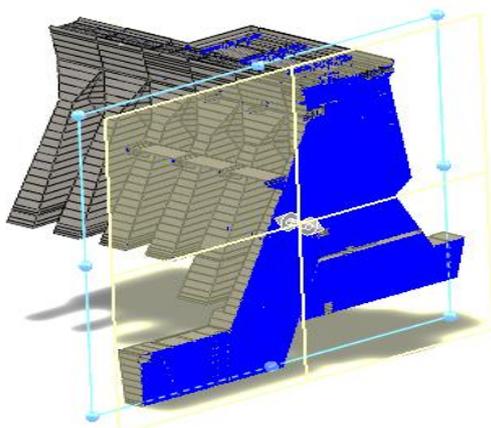
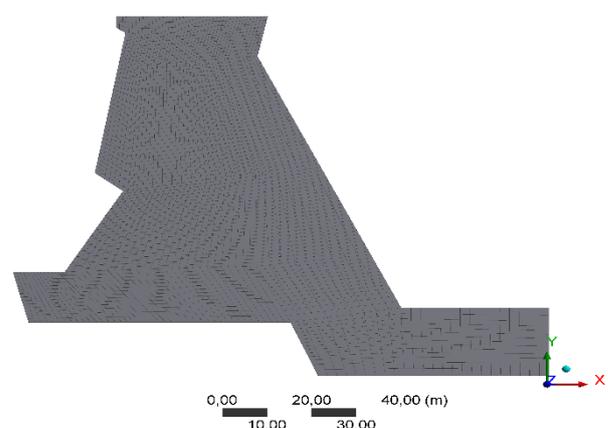


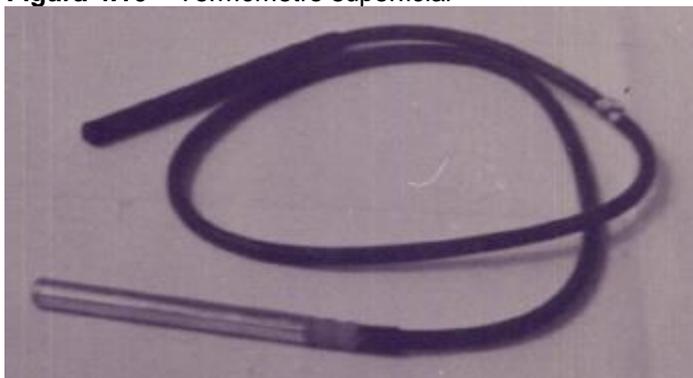
Figura 4.15 – Modelo 2D do bloco E6



4.2. INTERPOLAÇÃO TRIGONOMETRICA - SERIES DE FOURIER

Na UHI os instrumentos de medição de temperatura caracterizam-se por sua localização, sendo: termômetros superficiais (TS) instalados aproximadamente a quatro metros da superfície e os termômetros internos (TI) instalados no interior da barragem (região central-inferior da estrutura), também chamado de termômetro de massa. Na Figura 4.16 observa-se o instrumento termômetro.

Figura 4.16 – Termômetro superficial



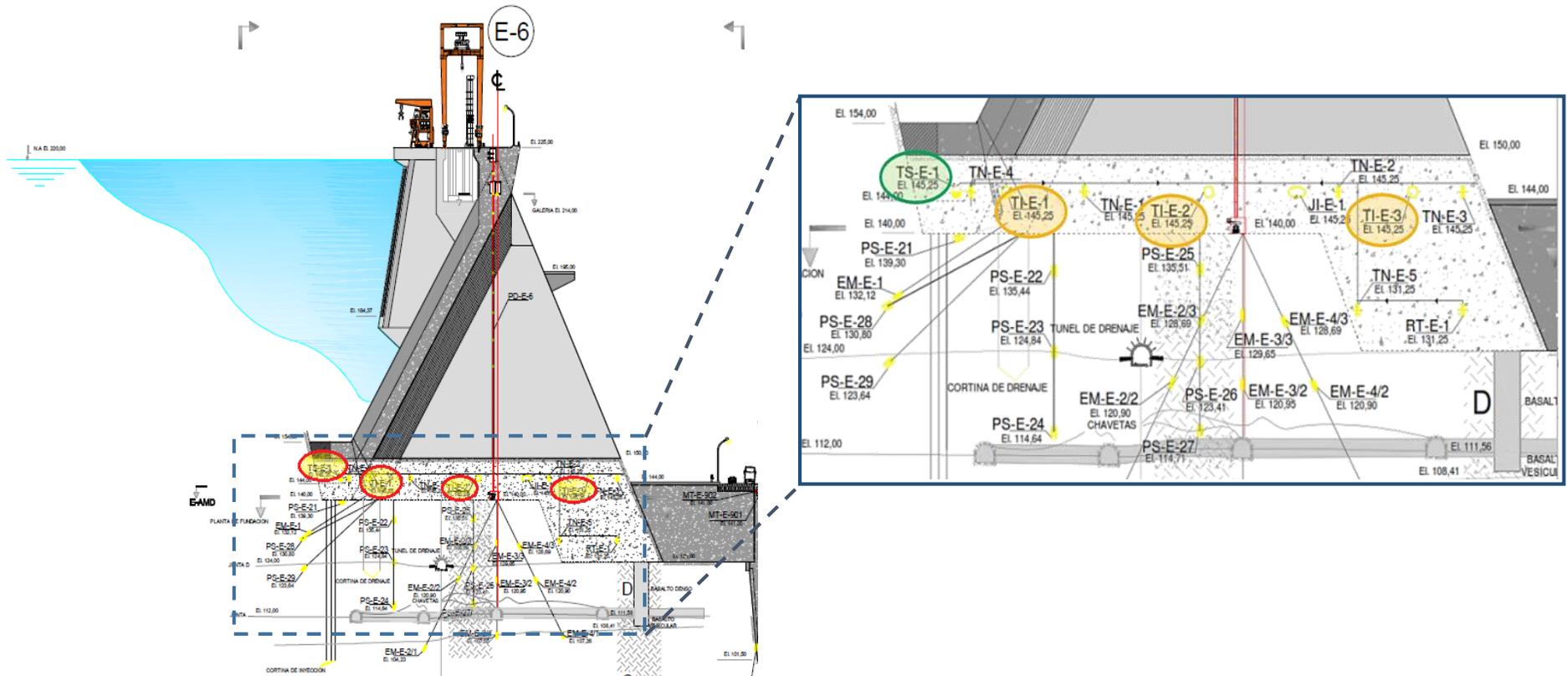
Fonte: Sistema de arquivo Técnico – UHI

Estes termômetros foram localizados antes do lançamento de concreto. Nas primeiras idades sua leitura era tomada manualmente e diariamente. Na atualidade as medições são automatizadas. Os dados obtidos antes da automatização das medições, estão sujeitos a horários de medição não bem definidos. Após a automatização das leituras, todas as medições passam a ser num mesmo horário.

A medição da evolução das temperaturas no corpo da barragem é efetuada por termômetros distribuídos ao longo do corpo do bloco. O bloco E6 possui 4 termômetros (TS-E01, TI-E01, TI-E02 e TI-E03) mostrados na Figura 4.17 (marcados num círculo).

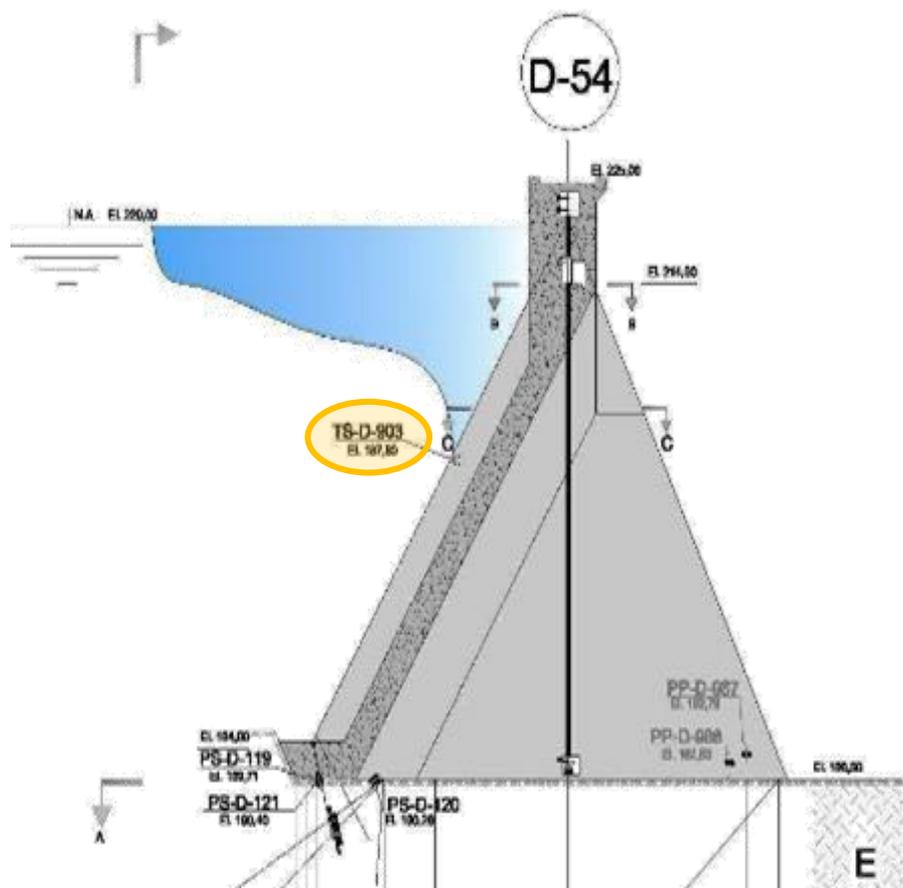
A fim de se obter mais informações acerca da temperatura do bloco E6, encontram-se três termômetros de superfície, que devido a sua proximidade com os blocos D54 e D57 e por serem localizadas em um bloco com características geométricas similares, adotou-se seus valores no projeto térmico do bloco E6. Desse modo, o termômetro TS-D-903 posicionado a montante do bloco D-54 e dois termômetros do bloco D-57, um posicionado a montante (TS-D-904) e outro a jusante (TS-D-5) foram considerados. Na Figura 4.18 e Figura 4.19 ilustram-se as posições desses termômetros.

Figura 4.17 – Localização dos termômetros do Bloco E6



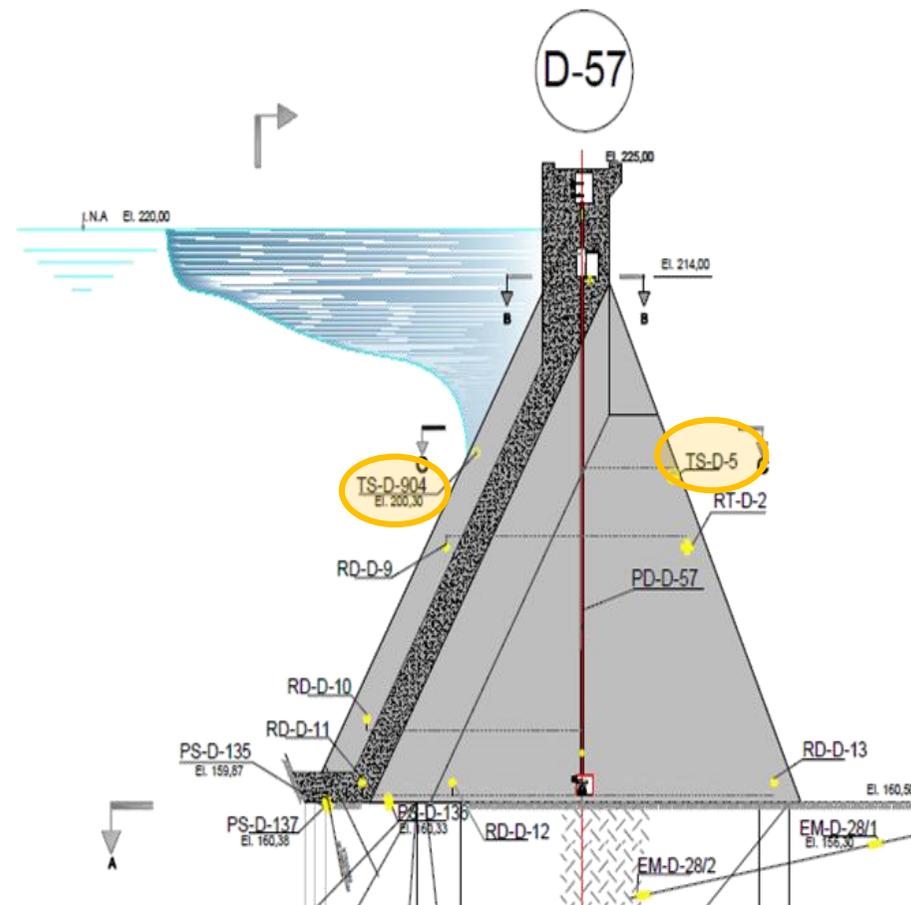
Fonte: Adaptado Sistema de arquivo Técnico – UHI

Figura 4.18 – Localização do termômetro TS-D-503



Fonte: Adaptado Sistema de arquivo Técnico – UHI

Figura 4.19 – Localização do termômetro TS-D-504/D-5



Fonte: Adaptado do Sistema de arquivo Técnico – UHI

No fim, considerou-se o registro de sete termômetros compreendidos entre os anos 1985 e 2015, foram 4662 medições registradas. Sua periodicidade de leitura registra um padrão: durante as primeiras idades do concreto as leituras foram realizadas diariamente a cada quatro horas, após duas semanas as leituras foram diárias e após cerca de seis meses passaram a ser quinzenal. Atualmente essas leituras são realizadas mensalmente. As informações dos termômetros usados no trabalho são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Informações dos termômetros usados no trabalho

LOCALIZAÇÃO	TERMÔMETRO	COTA (M)	PERÍODO DE MEDIÇÃO	VALORES MEDIDOS
Bloco D54	TS-D-903	187,00	02/01/85 a 02/05/16	739
Bloco D57	TS-D-904	200,30	02/01/85 a 02/05/16	756
Bloco D57	TS-D-5	198,00	02/01/85 a 02/05/16	756
Bloco E6	TS-E-1	154,00	02/01/85 a 03/05/16	780
Bloco E6	TI-E-1	145,25	07/01/85 a 11/03/16	549
Bloco E6	TI-E-2	145,25	07/01/85 a 11/03/16	553
Bloco E6	TI-E-3	145,25	07/01/85 a 11/03/16	529

Para se utilizar os valores reais medidos pelos termômetros, na simulação do modelo do bloco da barragem, foi utilizado interpolação dos dados, empregando-se polinômios trigonométricos.

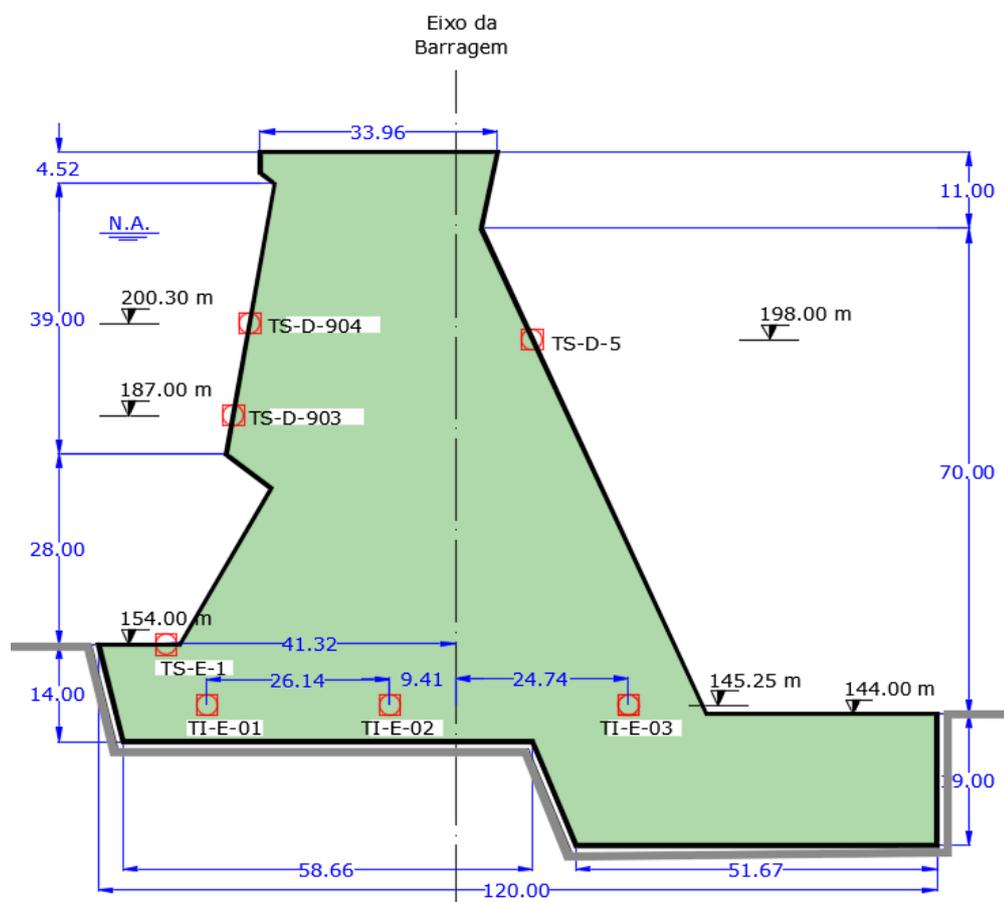
Esses polinômios são tradicionalmente utilizados para representar dados provenientes de series temporais.

Dado a grande importância desses polinômios a seguir, descreve-se a obtenção dos coeficientes empregado pelos polinômios e ajuste dos dados a partir da interpolação dos vetores da temperatura ao longo do tempo.

Na Figura 4.20 observa-se a localização dos termômetros superficiais e internos. Com a posição dos termômetros superficiais, definem-se as condições de contorno da estrutura para a análise no software Ansys. Do ponto A ao ponto B a temperatura adotada são as aferidas pelo 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 e finalmente do ponto E ao A é considerado isolado, ou seja, não há fluxo de calor com a fundação.

A consideração da condição de contorno adiabático do ponto E ao ponto A, se deve a duas situações: i) não se tem informações das propriedades térmicas da fundação, nem o monitoramento com termômetros internos na fundação, ii) a área de incidência dos raios solares é muito pequena na fundação com relação a área de incidência da estrutura como um todo, indicando a pouca absorção de calor por parte da fundação.

Figura 4.20 – Localização dos termômetros e condições de Contorno



O bloco E-6 tem instalado no seu corpo 7 termômetros, sendo 4 superficiais e 3 internos apresentados Figura 4.20. Na Tabela 4.1 é apresentada características gerais do banco de dados tanto dos termômetros superficiais quanto dos termômetros internos. O número de amostras é elevado, em torno a 4662 medições no período de 1985 a 2015.

Observa-se que a temperatura média das amostras, conforme os relatórios da época da construção da barragem, é de aproximadamente 22 °C. O valor máximo medido nos instrumentos é de 39,34 °C e a mínima de 4,60 °C.

Tabela 4.1 – Informações dos termômetros usados no trabalho

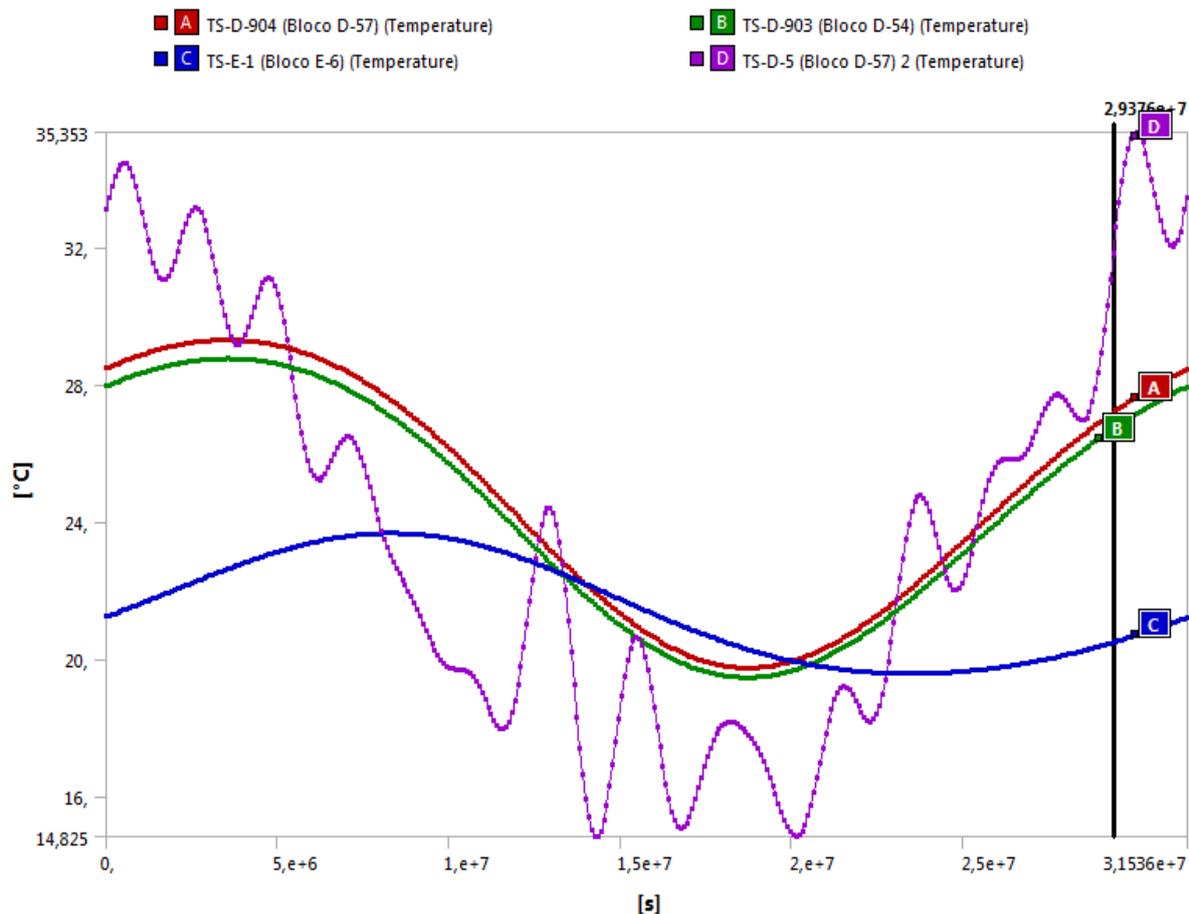
CARACTERÍSTICAS GERAIS	TERMÔMETROS SUPERFICIAIS				TERMÔMETROS INTERNOS		
	TS-D-5	TS-D-903	TS-D-904	TS-E-1	TI-E-1	TI-E-2	TI-E-3
Média da amostra (°C)	22,09	24,13	24,56	22,03	22,45	22,63	23,01
Medições registradas	756,00	739,00	756,00	780,00	549,00	553,00	529,00
Valor Max. (°C)	38,39	39,34	36,59	32,82	37,12	36,65	31,00
Valor Min. (°C)	6,45	4,60	7,55	5,96	9,18	4,97	7,32
Desvio padrão	6,40	3,94	4,17	2,81	3,94	4,48	2,45
Coefficiente de Variação (%)	40,94	15,55	17,40	7,91	15,52	20,09	6,02

Na Tabela 4.1, observa-se o coeficiente de variação dos valores medidos pelos instrumentos desta medida pode-se entender como "o quão longe", em geral, os dados se encontram do valor esperado, ou seja, quanto menor for o valor da variância, mais homogêneos serão os dados. Por exemplo, o coeficiente de variação do termômetro TS-E-1 é 7,91%, isso significa que o desvio padrão deste termômetro corresponde a 7,91% do valor da média de 22.03 °C. Assim também, observa-se variância e desvio padrão maiores no termômetro TS-D-5 devido ao contato com o ar ambiente e cuja temperatura varia ao longo do dia.

Posteriormente devido ao comportamento sazonal da temperatura no bloco, escolheu-se ajustar os valores medidos pela instrumentação por series de Fourier segundo a fundamentação que é apresentada na seção 3.3 e no apêndice 1. A função de temperatura dada pelas series de Fourier de cada termômetro representa a temperatura em qualquer

instante de tempo para um ano chamado 'médio', pois o período adotado da série foi 365,25 dias. Seguidamente é apresentada as interpolações para um ano médio via Series de Fourier.

Figura 5.1 – Condições de contorno – Interpolação trigonométrica via Series de Fourier



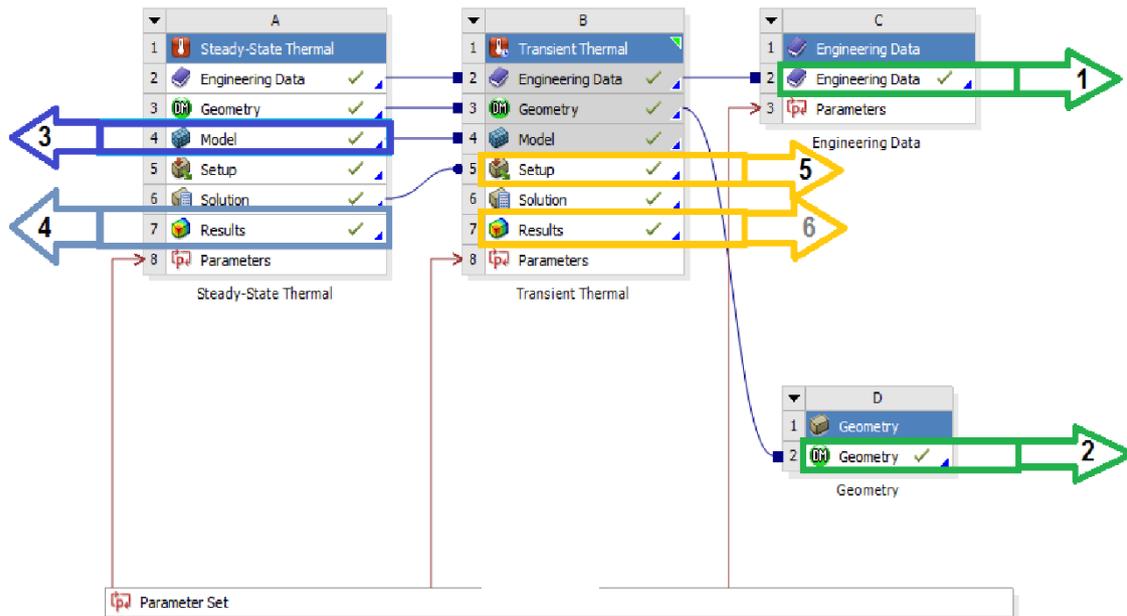
4.3. MODELAGEM NUMÉRICA VIA-ANSYS

A modelagem térmica do “Bloco E6” por meio de elementos finitos é definida pelos seguintes itens: i) Definição das propriedades térmicas, da geometria a analisar e das condições de contorno que envolvem a estrutura. ii) definição da malha de elementos finitos, iii) simulação no software e iv) verificação e comparação com a instrumentação.

Para uma melhor visualização do esquema de trabalho dentro do Ansys observa-se na Figura 4.21 a sequência dos passos e de inserção das informações, dadas nas seções anteriores. Em (1) se intruz as propriedades dos materiais usados; seguidamente em (2) define-se a geometria 2D/3D. É possível realizar a modelagem no ambiente Desing Modeler ou importar da geometria de Spaceclaim, Solidwork®, Autocad®, em (3) define-se a malha de elementos finitos com a utilização de métodos de discretização que se encontram no mesmo

ambiente do software Ansys; em (4) obtêm-se os resultados (campos de temperatura, intensidade, direção do fluxo de calor, etc); em (5) acopla-se a análise térmica estacionária como condição de entrada para a análise térmica transiente. Dessa forma obtêm-se um campo de temperaturas inicial. Por fim em (6) obtêm-se os resultados para interpretação do problema.

Figura 4.21 – Esquema de trabalho no ambiente Ansys



Para maior detalhamento do processo, apresenta-se os passos para modelagem térmica transiente. Na Figura 4.22 seleciona-se o tipo de material, no caso o concreto foi selecionado e modificado com os valores apresentados na seção de “Caracterização térmica dos materiais”. Na Figura 4.23 observa-se a forma de importação da geometria, podendo ser desenha no mesmo ambiente

Figura 4.22 – Inserção dos materiais E

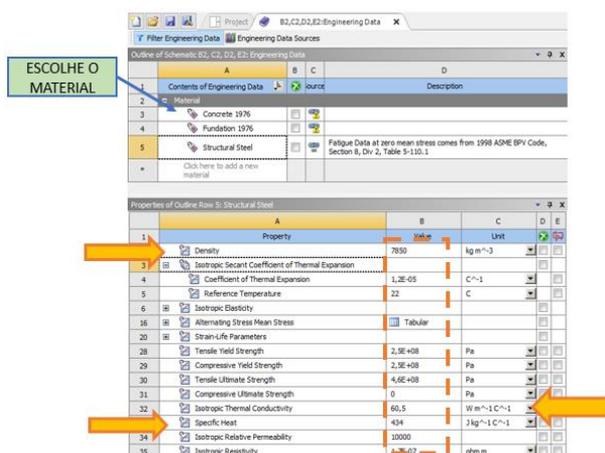
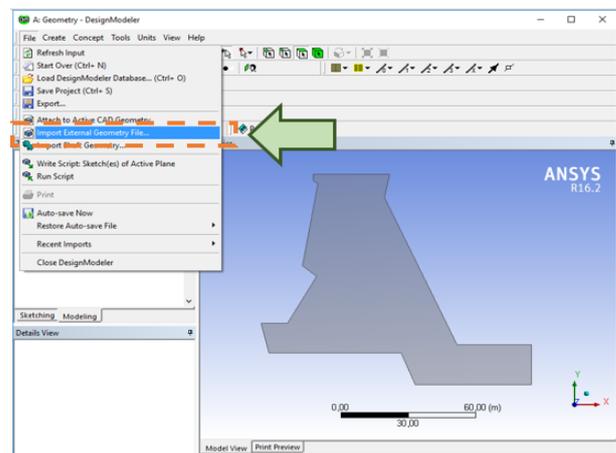


Figura 4.23 – Importação da geometria



Um item a não esquecer em modelos 2D é a espessura da estrutura, utilizada como 1m para obter resultados de uma seção unitária Figura 4.24. Os métodos usados como: refinement, face meshing e sizing facilitam na definição da malha, na maioria dos casos *Edge sizing* que te dá a possibilidade de definir o tamanho do elemento, definiu-se 1 me.

Figura 4.24 – Definição de espessura

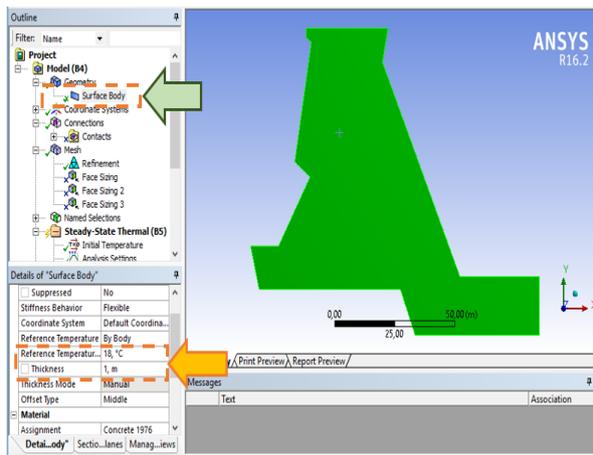
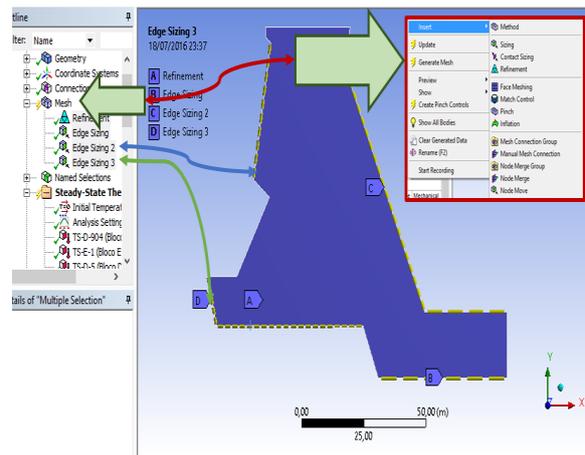


Figura 4.25 – Métodos usados na malha



Posteriormente, usa-se o recurso *named selection* Figura 4.26 que facilita no agrupamento das arestas, com a finalidade de separar o contorno. Em Figura 4.27 define-se a temperatura inicial e a condição inicial do problema, no caso da modelagem transiente, tem-se como condição de entrada uma modelagem estacionária.

Figura 4.26 – Utilização de *named selection* E

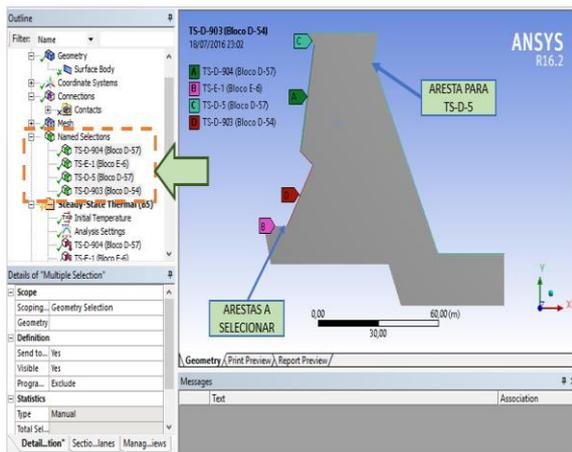
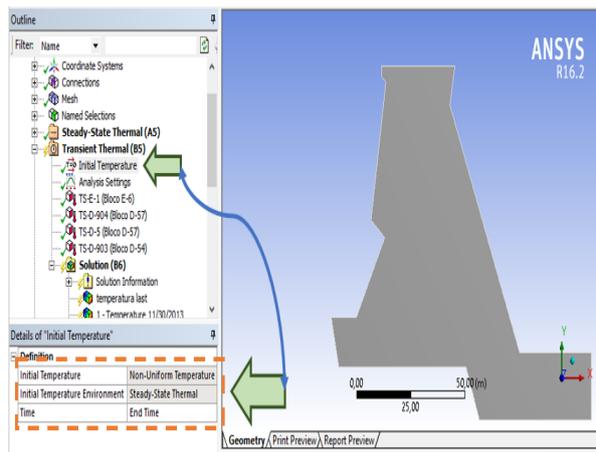


Figura 4.27 – Condição inicial



Esta etapa é de soma importância, na Figura 4.28 define-se o tempo de cada carregamento a ser aplicado, também chamado de *step*. Para este caso definiu-se cada *step* em 86400 s equivalente a 1 dia, tendo como opção o cálculo entre *steps*, chamado de *substeps*. Este último definiu-se como 14400, equivalente a 6hrs. O tempo adotado se deve ao tempo necessário para obter os mesmos resultados com um número maior de *substep*.

Na Figura 4.29 insere-se as condições de entrada na coluna direita, tendo três termômetros a montante (TS-D-903, TS-D-904 e TS-E-1) e na jusante TS-D-5.

Observação: as temperaturas devem coincidir com o tempo de medição dos termômetros.

Figura 4.28 – Definição dos passos de tempo

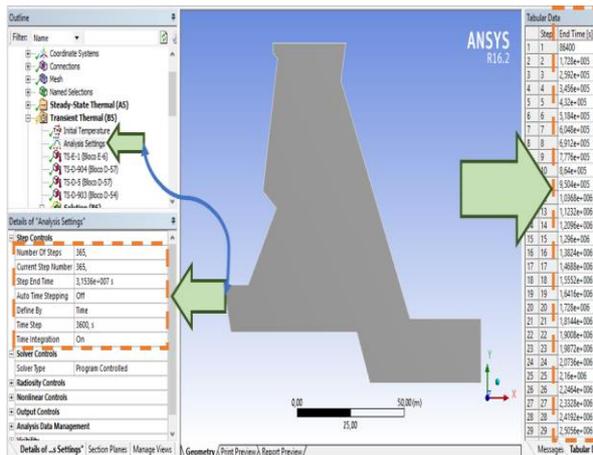
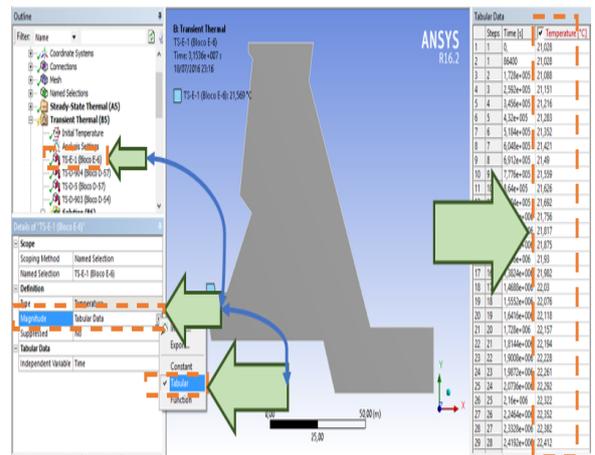


Figura 4.29 – Inserção de condição de contorno



Na Figura 4.30 gera-se os resultados como campo de temperatura, fluxo de calor total e direcional. Finalmente na Figura 4.31 se roda a simulação.

Figura 4.30 – Geração de resultados

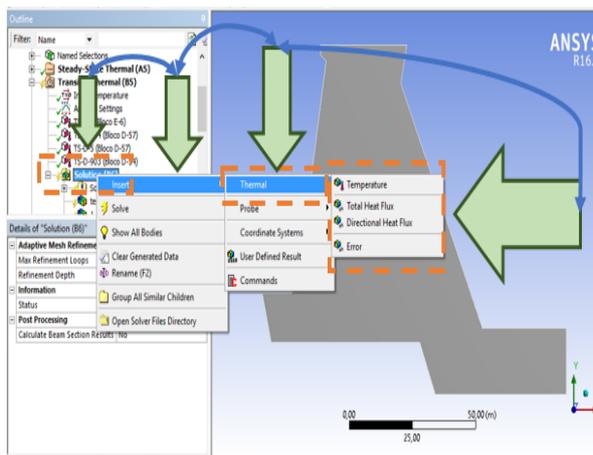
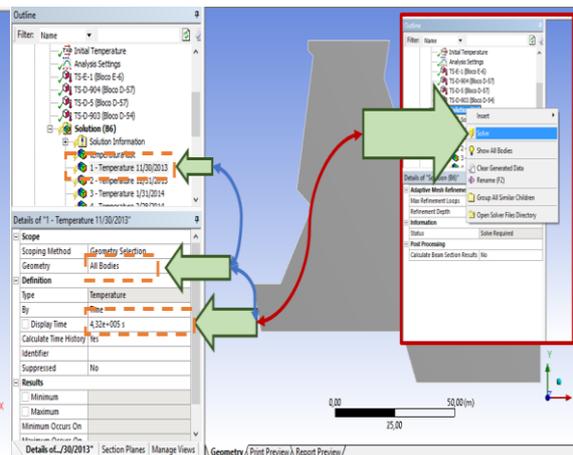


Figura 4.31 – Rodar programa para simulação



Aplicada a geometria, propriedades do material, condições de contorno, malha de elementos finitos e mandado rodar. Apresenta-se a continuação a solução do problema da condução de calor via *software ANSYS®*.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Os resultados encontrados para o bloco em análise são apresentados a seguir.

Resultado da primeira etapa: obteve-se o modelo tridimensional do trecho E de UHI. O modelo fornece facilidade de visita em ambiente virtual, sendo uma boa referência para viabilizar projetos como o de realidade aumentada, prototipagem em impressora 3D e aplicativos com informações técnicas da barragem. Observa-se na Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4 os detalhes do trecho E.

Figura 5.2 – Modelo 3D do Trecho E (Estrutura – Fundação)

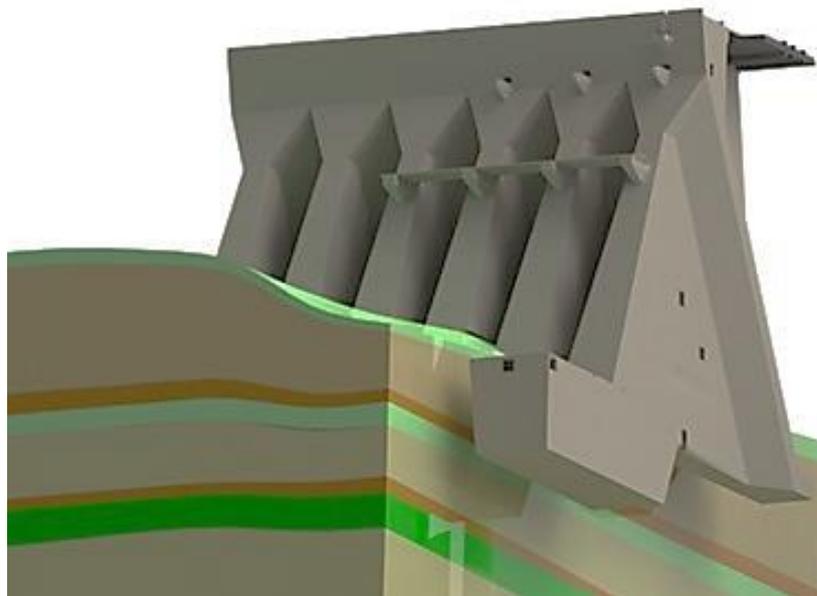
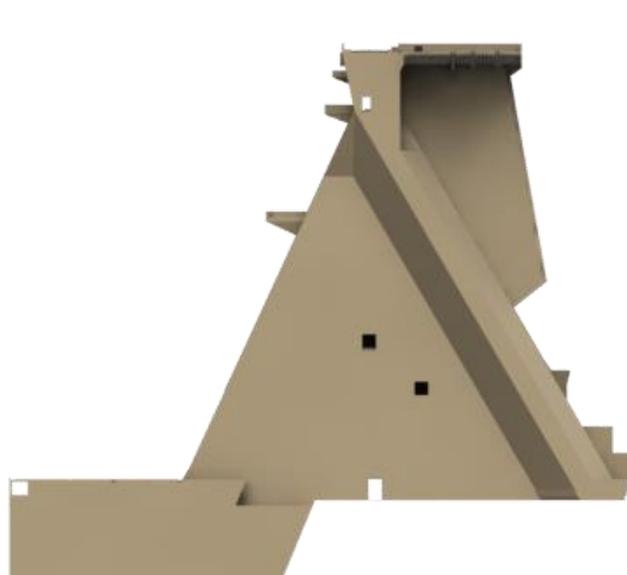


Figura 5.3 – Modelo 3D Trecho E – Vista isométrica

Figura 5.4 – Modelo 3D Trecho E – Bloco E6


5.1. COMPARAÇÃO VALORES NUMERICOS COM INSTRUMENTOS

Nesta etapa as análises estacionárias e transientes são aplicadas, com dados usados entre 1985 até 2015. Os harmônicos para a interpolação por Series de Fourier são apresentados na tabela Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Numero de armonicos e MAPE dos sete termômetros – Fase Validação

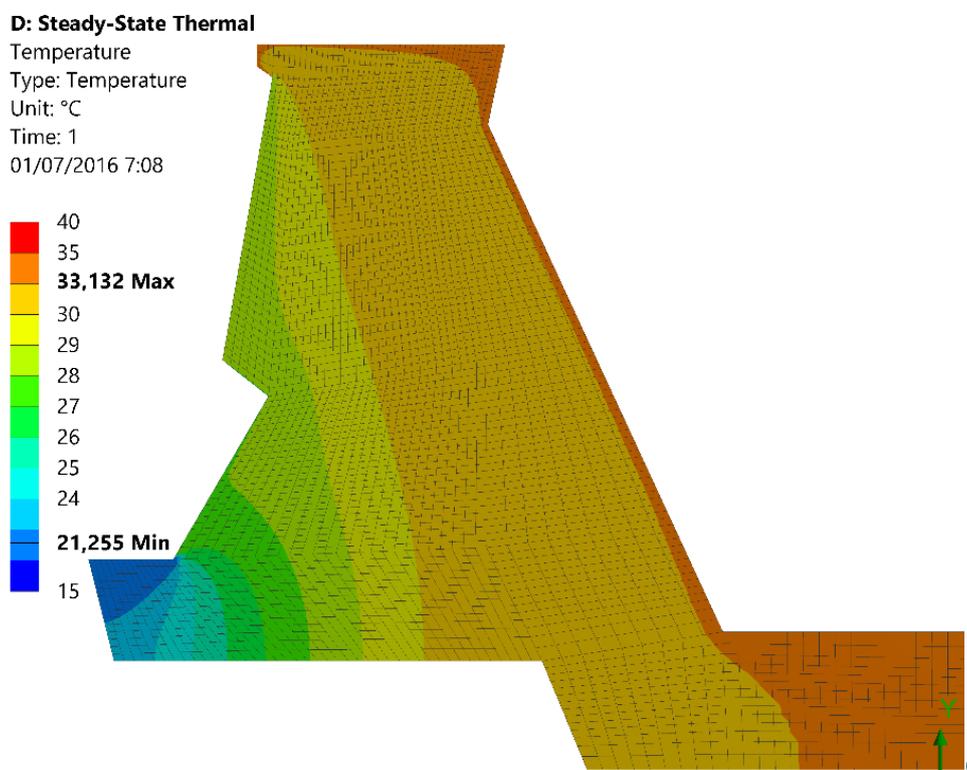
TERMÔMETRO	TS-D-5	TS-D-903	TS-D-904	TS-E-1	TI-E-1	TI-E-2	TI-E-3
Harmônicos	15	2	2	2	2	1	2
MAPE (%)	9,81	2,76	2,87	1,35	0,71	2,01	0,88

O Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) será o médio para definir o grau de diferença entre o calculado e o medido.

$$\text{MAPE}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - X'_i}{X_i} \right|}{n} \quad (10)$$

Sendo: “ X_i ” o valor medido no instrumento, “ X'_i ” o valor calculado pelo software Ansys e “ n ” o número de medidas;

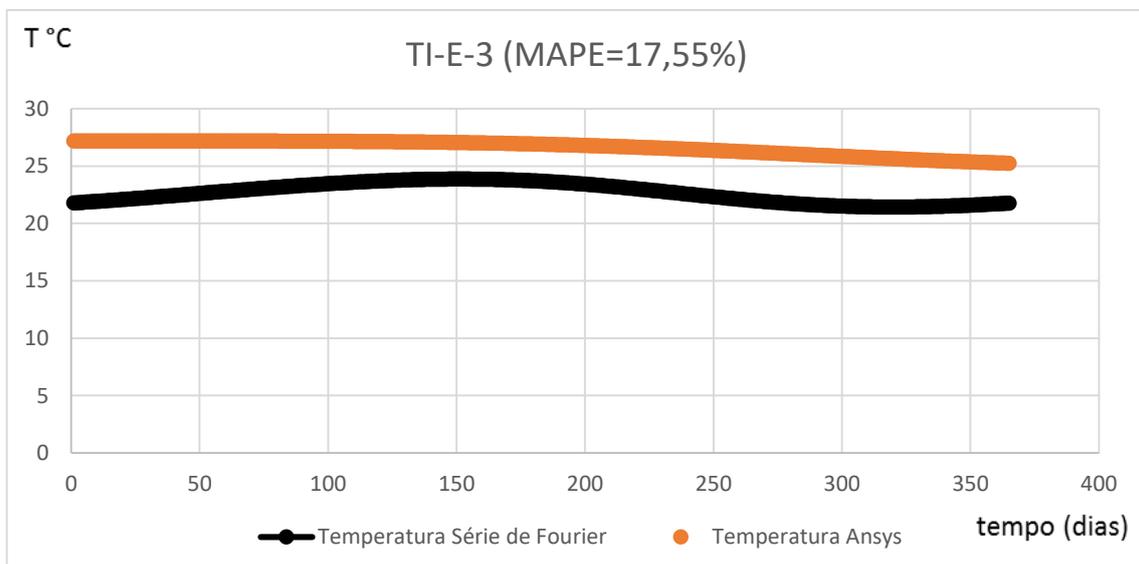
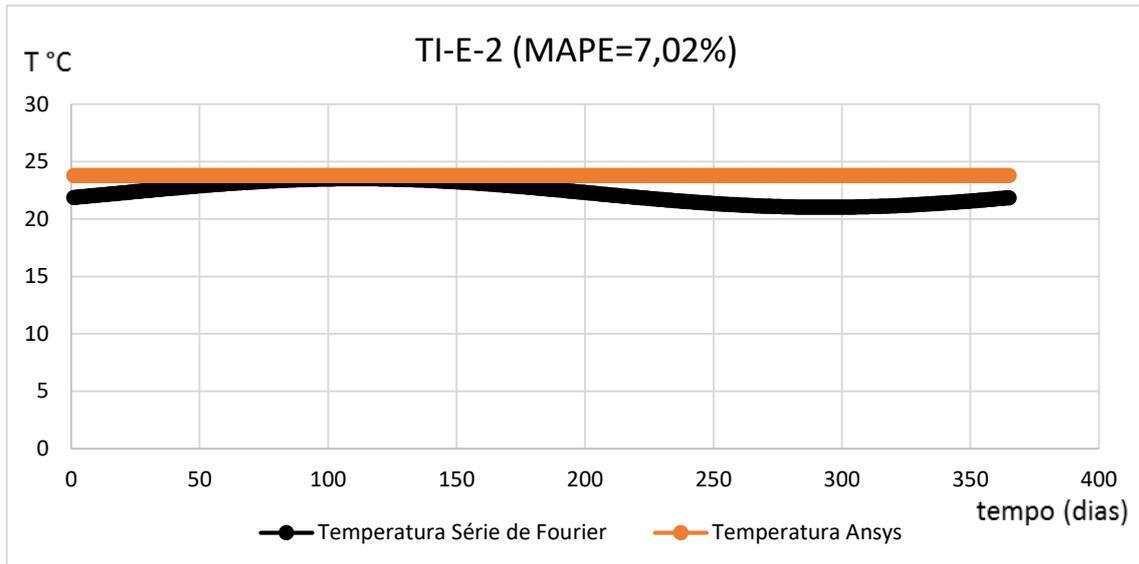
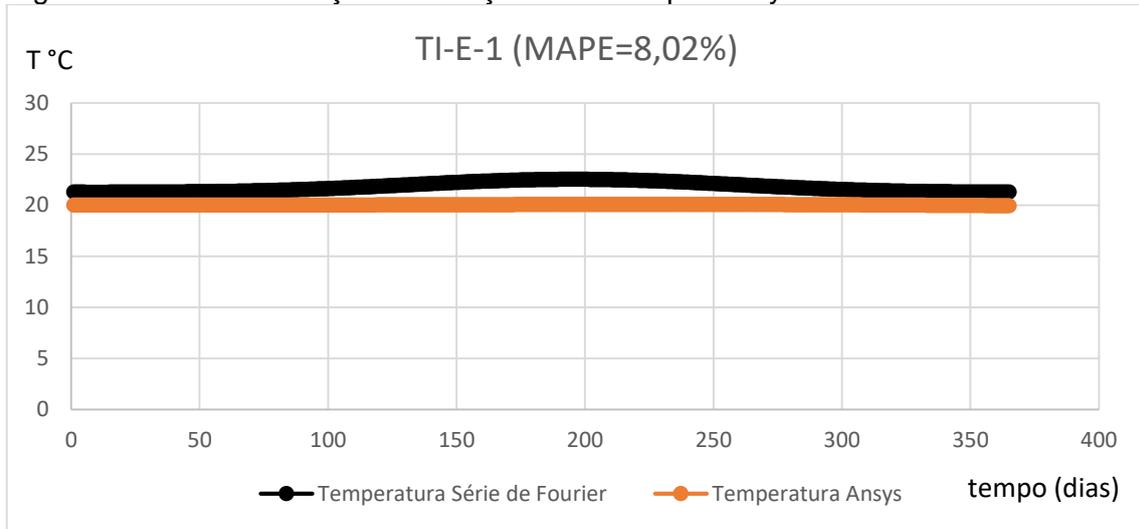
Figura 5.5 – Campo de temperaturas – Estado estacionário



Observa-se na Figura 5.1 um campo de temperatura para uma modelagem estacionária com valores do primeiro dia do ano médio. Este campo de temperatura irá ser a condição inicial da modelagem térmica transiente, sendo considerada esta metodologia como uma hipótese para aproximar a temperatura inicial no ano “médio”. Outros autores adotam três meses de simulação, sendo que esse critério não é definido estritamente.

Na Figura 5.6 compara-se os resultados obtidos na simulação numérica com os termômetros instalados no interior da barragem nomeados como TI-E1, TI-E2 e TI-E3.

Figura 5.6 – Instrumentação vs Solução numérica por Ansys



Observou-se que grandes variações de temperatura ocorrem na fase em contato com o ambiente (jusante) e no contato com o reservatório (montante). Já a propagação de calor na região interna do bloco (alma) e na base do contraforte (onde se localizam os termômetros internos) originou gradientes muito baixas ao longo do ano médio, o que era de se esperar de um material como o concreto com alta inércia térmica, ou seja, dissipação lenta por causa da resistência à liberação de energia.

Tabela 5.3 – Valores max. e min. observados nos termômetros internos

TERMÔMETRO	TEMPERATURA OBSERVADA	VALIDAÇÃO		MAPE (%)
		MIN.	MAX.	
TI-E-1	Instrumentação	21,255	22,551	8,020
	Aproximada (MEF)	19,933	20,058	
TI-E-2	Instrumentação	21,042	23,814	7,020
	Aproximada (MEF)	21,932	23,814	
TI-E-3	Instrumentação	21,428	23,866	17,553
	Aproximada (MEF)	25,244	27,185	

O MAPE entre os valores das temperaturas do 'ano médio' tanto para Calibração e Validação encontradas via série de Fourier e via ANSYS foi aproximadamente a 20% para os pontos monitorados TI-E-1, TI-E-2 e TI-E-3

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi realizado a modelagem e simulação do termômetro de condução de calor de um bloco da UHI ITAIPU.

No estudo de caso do Trecho E da UHI, os termômetros superficiais da barragem foram ajustados por meio series de Fourier, com o intuito de se verificar os valores resultantes da simulação com os dados dos termômetros internos da barragem.

Observou-se comparando a simulação e a instrumentação que o Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) em todos os pontos monitorados obteve-se um valor inferior a 20%. Para a tolerância em problemas de engenharia, simplicidade do método, tempo computacional necessário é considerada eficiente o modelo térmico.

Conclui-se que as propriedades térmicas usadas pelos consultores na época da construção são validas para trabalhos atuais, devido a que as propriedades térmicas do concreto variam muito pouco no decorrer do tempo.

Conclui-se que a temperatura do ar cumpre um jogo importante no modelo térmico, já que influencia fortemente no comportamento do reservatório, fundação e da barragem.

Para trabalhos futuros na modelagem térmica de Blocos de contraforte, algumas sugestões são apresentadas:

- Realizar modelos 3D para considerar as temperaturas laterais no bloco de contraforte.
- Considerar a temperatura da fundação, já que é um corpo que também transfere ou mantém calor.
- Obter malhas mais estruturadas e refinadas para obtenção de campos de temperatura mais próximos do instrumento de medição de temperatura.
- Realizar análises termo-estruturais validando com os tensômetros e o pêndulo do bloco de forma a definir a parcela de deslocamento causada pela temperatura.
- Busca de outros métodos que aproximem mais com a realidade da barragem.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. C. **Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu**. 2009. 257 p. Tese (Doutorado em Engenharia)–Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. RS: Porto Alegre. 2009.
- ANSELL, A. E. A. **Crack propagation in buttress dams: application of non-linear models-part II**. *Elforsk*. Stockholm, p. 1-43. 2010.
- ANSELL, A.; MALM, R. Modelling of thermally induced cracking of a concrete buttress dam. **Nordic Concrete Research**, v. 38, p. 69-88, 2008.
- ANSYS. **ANSYS mechanical APDL thermal analysis guide**. Canonsburg, PA. : 2013. p. 90.
- ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6484**. Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. [s.i.]: [s.n.]. 1998.
- BERGMAN, T. L. et al. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 7. ed. New York: J. Wiley, 2011.
- BRAGA, W. F. **Transmissão de calor**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.
- CASTILHO, E. M. **Análise térmica de barragens de betão durante a construção**. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Engenharia de Estruturas, Instituto superior Tecnico Lisboa. Lisbon: [s.n.]. 2013. p. 194.
- ÇENGEL, J. A. **Heat Transfer: A practical approach**. 2. ed. [S.I.]: McGraw – Hill, 2003.
- CHIOSSI, N. J. **Geologia aplicada à engenharia**. 3. ed. São Paulo: Grêmio Politécnico – USP, 1976.
- COELHO, N. A. **Um estudo numérico do efeito térmico em concreto massa**. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília: [s.n.]. b ABRIL 2012.
- DAOUD, M.; GALANIS, N.; BALLIIVY, G. Calculation of the Periodic Temperature Field in a Concrete Dam.. **Canadian journal of civil engineering**, v. 24, n. 5, p. 772-784, 1997.
- DIVISÃO DE CONTROLE DE CONCRETO. **Assistencia à construção de concreto divisão de controle de concreto. sugestão para o plano da instalação , leitura e interpretação da auscultação da obra de ITAIPU**. Foz do Iguaçu, p. 124. 1977. (C-24/77 2160-50-16020-P-R0).
- ELETROBRÁS CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, S. A. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Eletrobras. Rio de Janeiro. 2003.
- ENERGY. **Design of the buttress**, 2015. Disponível em: <www.energy.kth.se/compedu/AsiaLink/Glossary/B/Buttress_dams.htm>. Acesso em: 05 Julio 2015.

FARINHA, J. S.; REIS, A. C. **Tabelas Técnicas**. Setúbal: [s.n.], 2000. Disponível em: <scribd.com/doc/186505284/Tabelas-Tecnicas-J-S-Brazao-Farinha-A-Correia-dos-Reis-1993>. Acesso em: 29 maio 2016.

GRUPO ETEP. **Aspectos teóricos dos estudos realizados. Estudos para a reavaliação dos valores de controle para a instrumentação civil das estruturas e fundações**. Central Hidrelétrica de ITAIPU. Foz do Iguaçu, p. 39. 2004.

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.

KREITH, F.; BOHN, M. **Principles of heat transfer**. 1. ed. Colorado: Cengage Learning, v. 1, 2011.

KZAM, A. K. L. **Análise da instabilidade estrutural global e local pelo MEF posicional com determinação de pontos críticos na trajetória de equilíbrio**. 2016. 236 p. Tese (Doutorado em engenharia)–Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. SP: São Carlos. 2016.

LÉGER, P.; LECLERC, M. Hydrostatic, Temperature, Time-Displacement Model for Concrete Dams. **Engineers, American Society of Civil: Journal of engineering mechanics**, v. 133, n. 3, p. 267-277, marzo 2007.

LEWIS, R. W.; NITHIARASU, P.; SEETHARAMU, K. **Fundamentals of the finite element method for heat and fluid flow**. Malaysia: JOHN WILEY & SONS, 2004.

LEWIS, R. W.; NITHIARASU, P.; SEETHARAMU, K. N. **Fundamentals of the finite element**. [S.I.].

MADENCI, E.; GUVEN, I. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS. **Springer Science & Business Media**, n. 2, 2015.

MAGALHÃES, R. **O Método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor**. Universidade Federal do Pará. Belen, p. 39. 2003.

MAKEN, D. D.; LÉGER, P.; ROTH, S. N. Seasonal thermal cracking of concrete dams in northern regions. **American Society of Civil Engineers: Journal of Performance of Construct-ed Facilities**, v. 28, jun. 2013.

MELCONIAN, M. V. **Modelagem numérica e computacional com similitude e elementos finitos**. 1. ed. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, v. 1, 2014.

MIRZABOZORG, H. et al. Mathematical Modeling and Numerical Analysis of Thermal Distribution in Arch Dams Considering Solar Radiation Effect. **The Scientific World Journal**, v. 2014, n. Hindawi Publishing Corporation, p. 15, fev. 2014. Disponível em: <downloads.hindawi.com/journals/tswj/2014/597393.pdf>. Acesso em: 10 maio 2016.

MOAVENI, S. **Finite element analysis: Theory and Application with ANSYS**. 3. ed. New Jersey: Pearson Education India, 2008.

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

ORGANON – NÚCLEO DE ESTUDO PESQUISA E EXTENSÃO EM MOBILIZAÇÕES SOCIAIS. **Impactos socioambientais no Espírito Santo da ruptura da barragem de rejeitos da Samarco**. Espiritu Santo. nov-dez. 2015.

PROMON; ALTO PARANA. **Aproveitamento hidrelétrico de ITAIPU**: Análise de tensões de origem térmica pelo método dos elementos finitos. Foz do Iguaçu, p. 16. 1976. (Relatório IT01-ST9-007-R0).

RIBEIRO, A. C. B. **Betão compactado com cilindros – Composição e características**. 2004. 534 p. Tese (Doutor em Engenharia civil) – Programas de investigação LNEC, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto. Lisboa: Porto. 2004.

TELES, M. Comportamento térmico de barragens de betão. Porto: DEC – FEUP, 1985.

U.S. DEPT. OF THE INTERIOR, B. O. R. **Design of small dams**. 3. ed. Washington, DC: United States Government Printing Office, 1987.

APENDICE 1 – SERIES DE FOURIER

A escolha das funções $g_i(x)$ é realizada de acordo com a características dos dados em análise. Quando se trata de dados periódicos, ou seja, dados que possuem um caráter similar a cada intervalo de tempo, normalmente faz-se uso de funções senoidais. As Séries de Fourier são assim adotadas e estas podem ser representadas da seguinte forma:

$$f(t) = y_0 + \sum_{k=1}^N a_k \cos\left(\frac{2k\pi}{P}t\right) + b_k \sin\left(\frac{2k\pi}{P}t\right) \quad (11)$$

Onde N é o número de harmônicos, totalizando $2*N+1$ coeficientes e P é o período da função a ser ajustada.

Neste trabalho foi utilizado ajuste dos dados dos termômetros superficiais e internos por meio de tais séries de Fourier e o cálculo dos coeficientes foi realizado através do método dos mínimos quadrados implementado em um código do Matlab. A escolha desta forma de ajuste deu-se pelo fato dos dados de temperatura obedecerem a característica de sazonalidade.

COEFICIENTES DAS SÉRIES DE FOURIER (1985 - 2015)

Tabela A.1– Coeficientes das séries de Fourier – termômetro superficial TS-D-5

TS-D-5 (BLOCO D-57)					
HARMÔNICOS	Y ₀ 22,0917		HARMÔNICOS	Y ₀ 22,0917	
	A _i	B _i		A _i	B _i
1	7,806	0,6341	24	0,2624	0,0435
2	2,1514	0,0457	25	-0,2100	0,2921
3	-0,1057	0,178	26	1,0256	0,426
4	-0,1958	-0,5412	27	-0,4028	0,0955
5	-0,4331	0,3534	28	0,5359	0,1166
6	-0,5305	0,0628	29	-0,6008	-0,1504
7	-0,742	0,5715	30	0,1037	0,1946
8	0,0099	0,3624	31	-0,1849	0,0538
9	-1,6081	-0,1253	32	0,4981	0,578
10	0,1749	0,0522	33	-0,2244	0,4085
11	-1,3218	0,1751	34	-0,0197	-0,0581
12	0,0655	0,361	35	-0,1271	0,3059
13	-1,324	0,2382	36	0,442	-0,1405
14	0,6831	0,1544	37	-0,208	-0,0158
15	-0,7252	0,6345	38	0,6074	0,2119
16	0,5017	-0,2294	39	-0,0765	0,4319
17	-0,8934	0,2184	40	0,6858	-0,5162
18	1,1018	-0,2601	41	-0,4476	-0,2549
19	-0,118	0,5952	42	0,8755	0,0596
20	0,7638	-0,411	43	0,1397	-0,0763
21	-0,1054	0,6714	44	1,3534	-0,2526
22	0,7368	-0,0202	45	-0,5205	-0,1487
23	-0,5249	0,5141			

Tabela A.2 – Coeficientes das séries de Fourier – termômetros superficiais TS-D-903, TS-D-904 e TS-E-1

HARMÔNICOS	TS-D-903		TS-D-904		TS-E-1	
	(BLOCO D-54)		(BLOCO D-57)		(BLOCO E-6)	
	Y_0	24,0715	Y_0	24,4733	Y_0	21,5694
	A_l	B_l	A_l	B_l	A_l	B_l
1	3,6304	-0,0326	3,7288	-0,0517	0,0251	-0,0584
2	2,9364	0,0431	3,0018	0,0311	2,646	0,0053
3	-0,3189	-0,0745	-0,3421	-0,0538	-0,4204	-0,0395
4	-0,3968	0,0247	-0,3792	0,0375	-0,2127	0,0296
5	0,1126	-0,0713	0,1276	-0,0625	0,0389	-0,0503
6	-0,1307	-0,0328	-0,1115	-0,0189	-0,043	0,0313
7	0,0162	0,0114	0,0057	-0,0095	-0,0353	0,0256
8	0,0731	0,0197	0,0925	0,0351	-0,0006	0,0132
9	-0,0374	0,0140	-0,0459	0,0129	-0,0159	-0,0665
10	-0,0168	0,1158	-0,0313	0,1075	-0,0108	0,0482

Tabela A.3 – Coeficientes das séries de Fourier – termômetros superficiais TI-E-1, TI-E-2 e TI-E-3

HARMÔNICOS	TI-E-1		TI-E-2		TI-E-3	
	BLOCO E-6		BLOCO E-6		BLOCO E-6	
	Y_0	21,7775	Y_0	21,9947	Y_0	22,5277
	A_l	B_l	A_l	B_l	A_l	B_l
1	-0,7439	-0,0111	-0,5693	0,0534	-0,9695	0,0033
2	-0,1337	0,0372	1,5801	0,1056	0,7677	0,0416
3	0,0457	-0,02	0,062	-0,1093	-0,0052	-0,053
4	0,0085	0,0163	-0,0702	-0,0235	0,0043	0,0058
5	0,0071	-0,0106	0,0236	-0,0536	0,0023	-0,0403

APENDICE 2 – CAMPOS DE TEMPERATURA

Figura 5.7 – Campo de Temperatura do dia 31 de janeiro

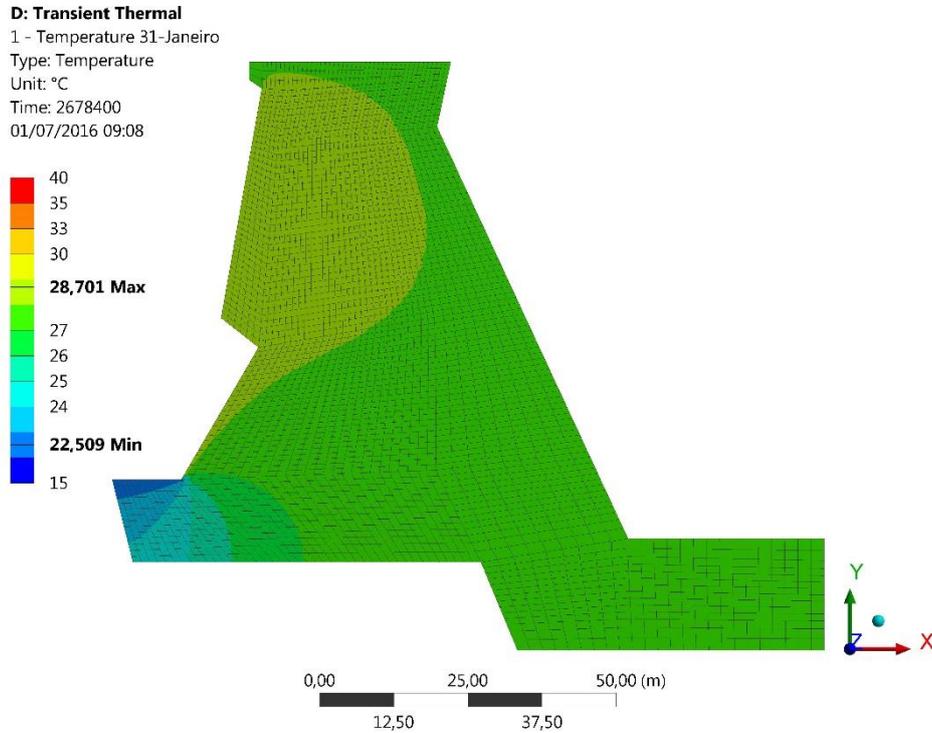


Figura 5.8 – Campo de Temperatura do dia 28 de fevereiro.

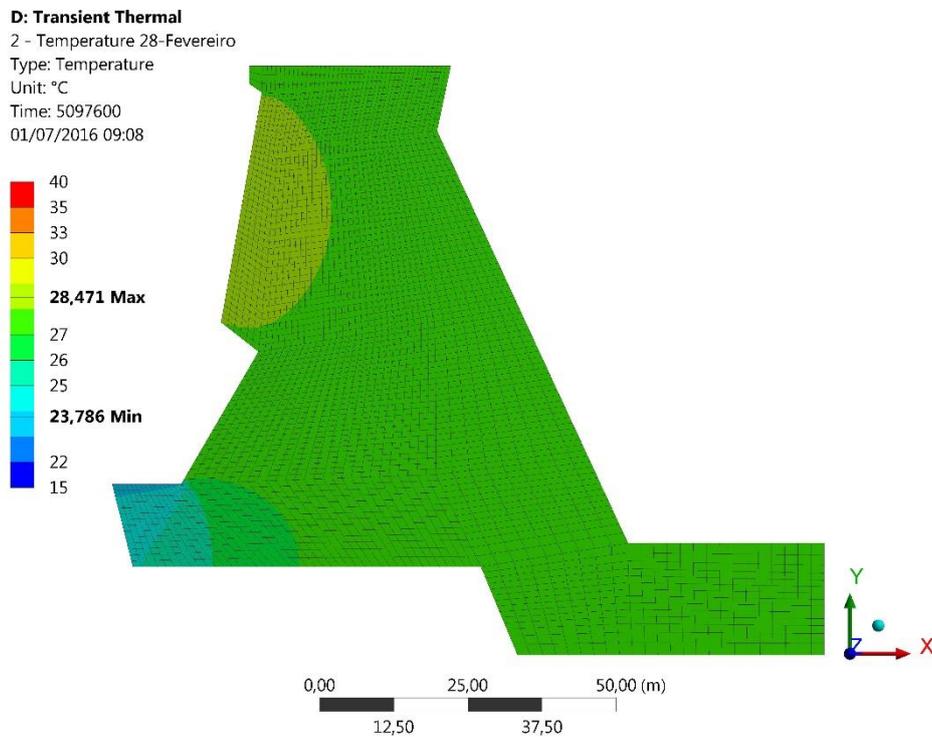


Figura 5.9 – Campo de Temperatura do dia 31 de

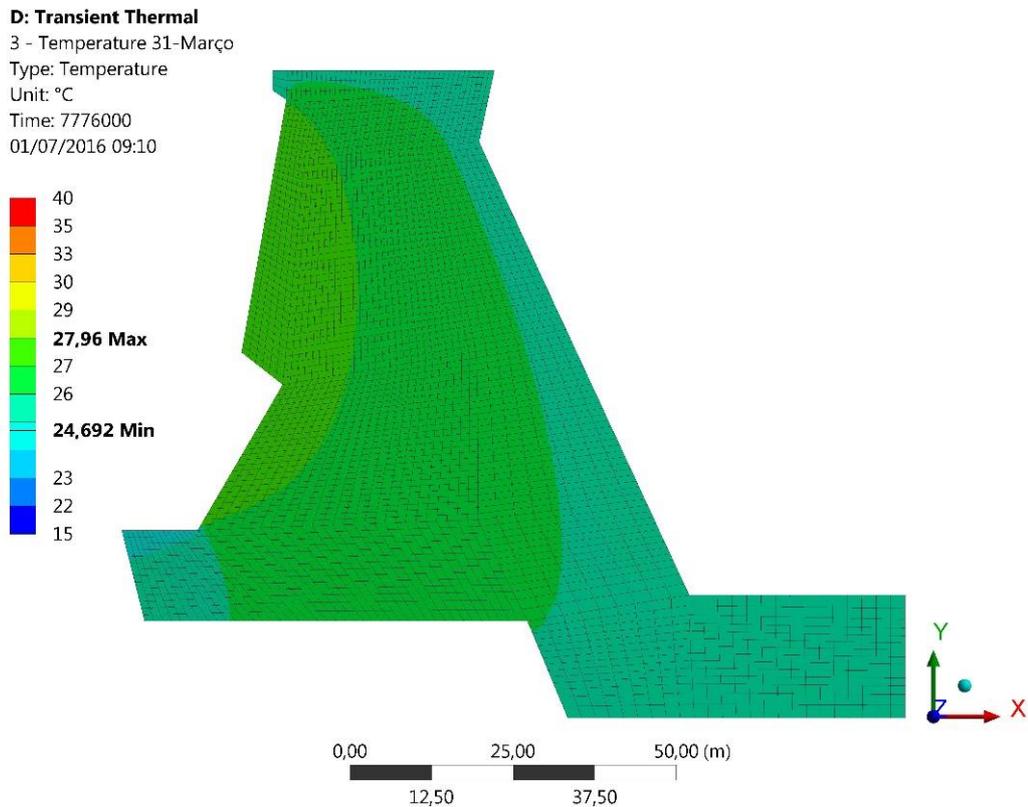


Figura 5.10 – Campo de Temperatura do dia 30 de abril

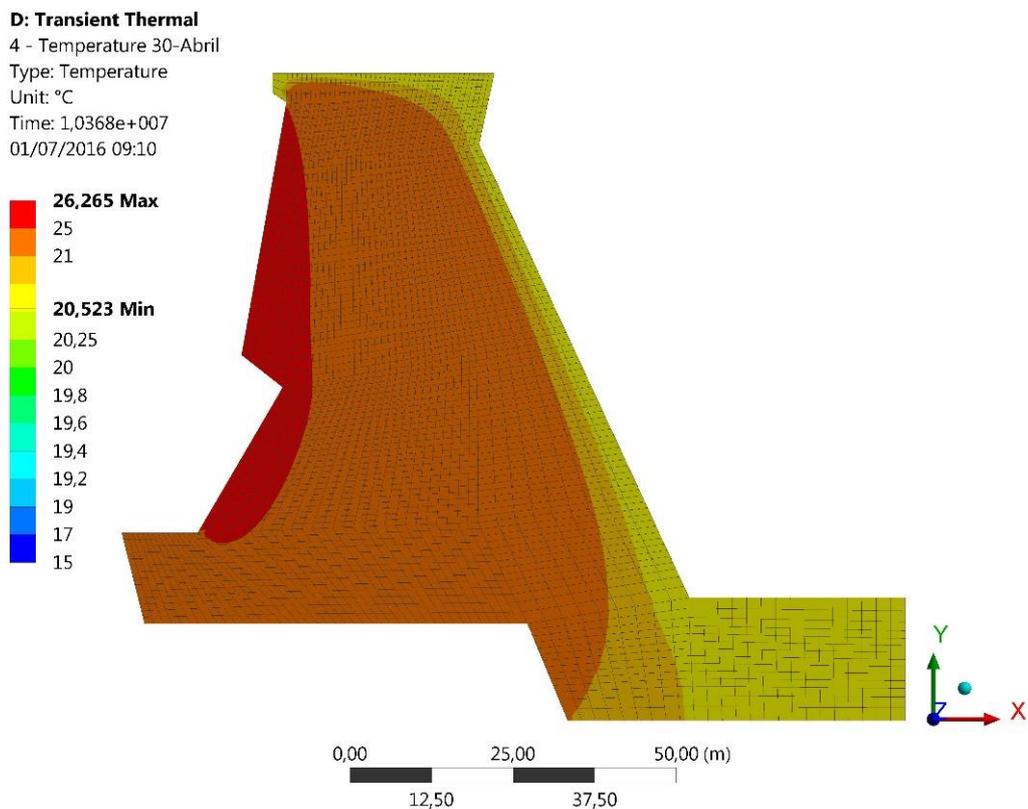


Figura 5.11 – Campo de Temperatura do dia 31 de maio.

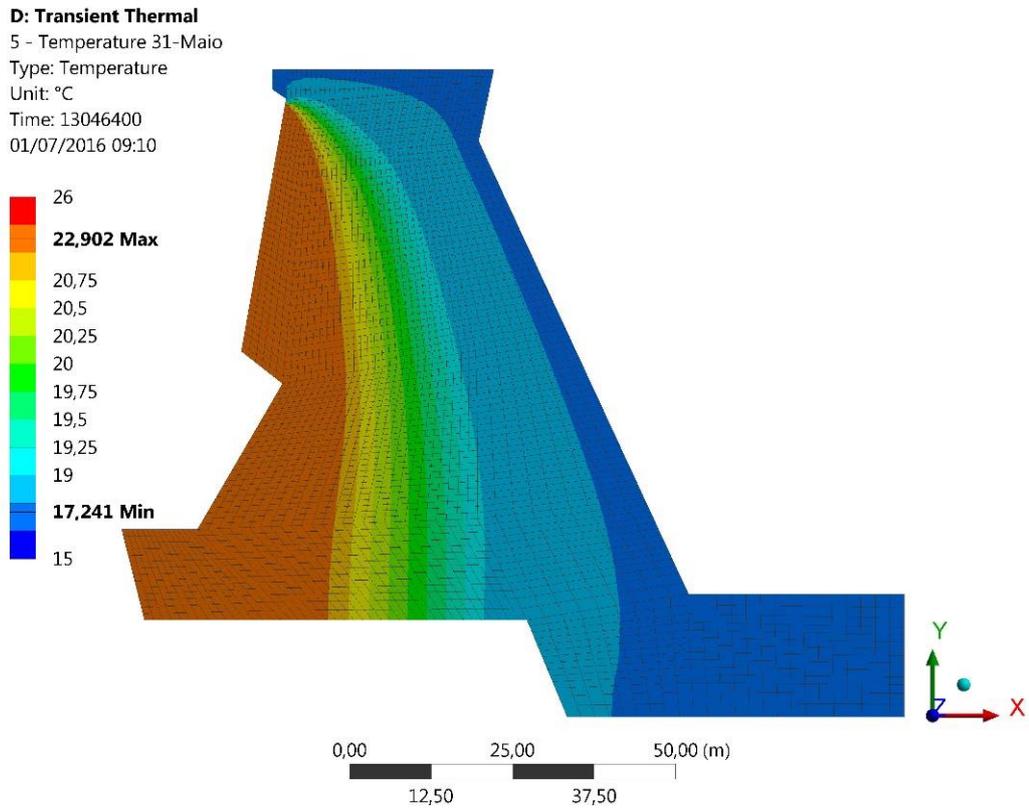


Figura 5.12 – Campo de Temperatura do dia 30 de junho.

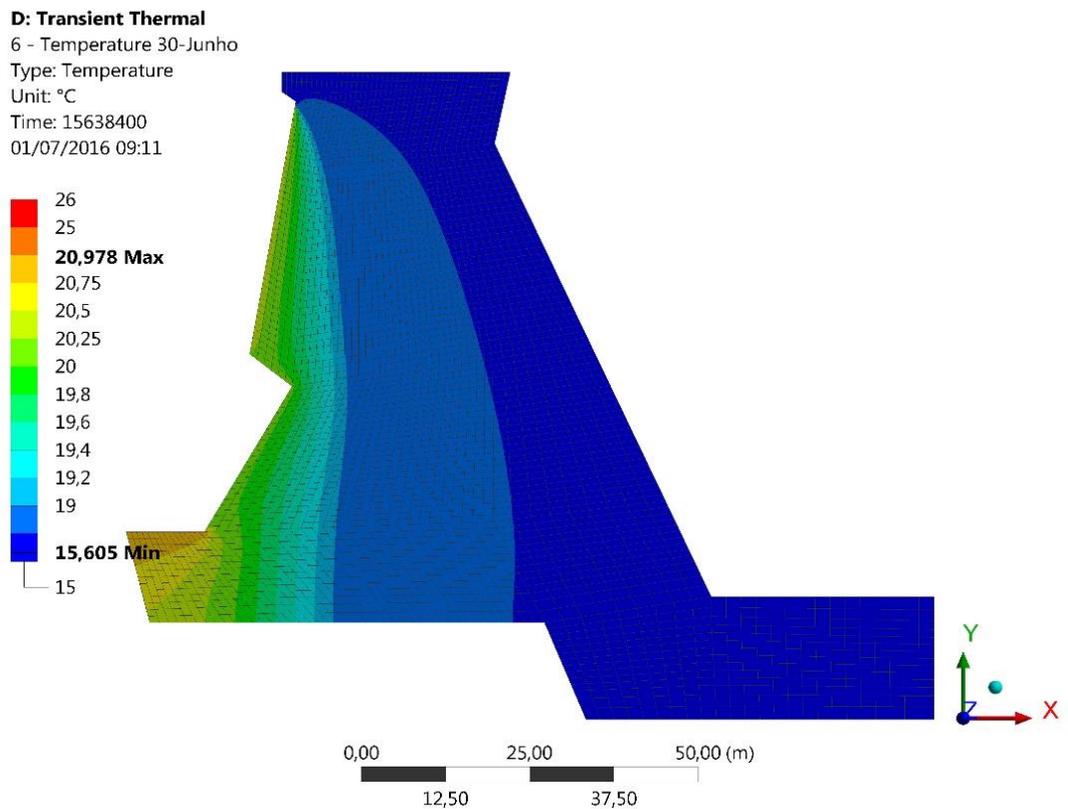


Figura 5.13 – Campo de Temperatura do dia 31 de julho.

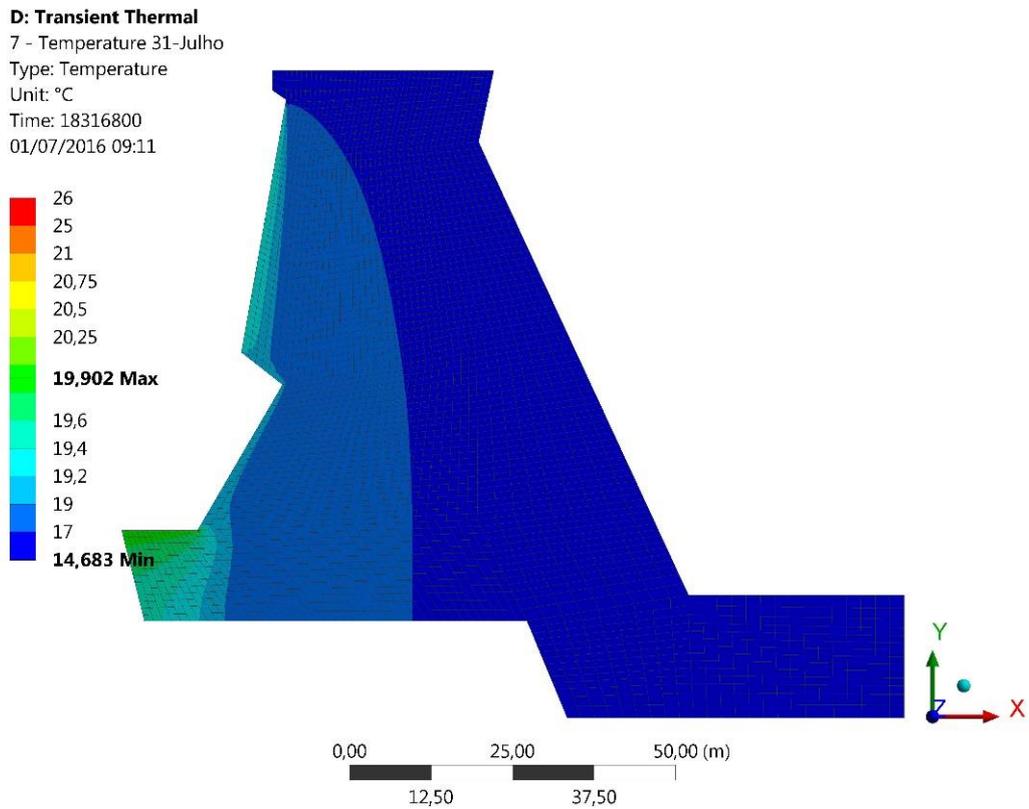


Figura 5.14 – Campo de Temperatura do dia 30 de agosto.

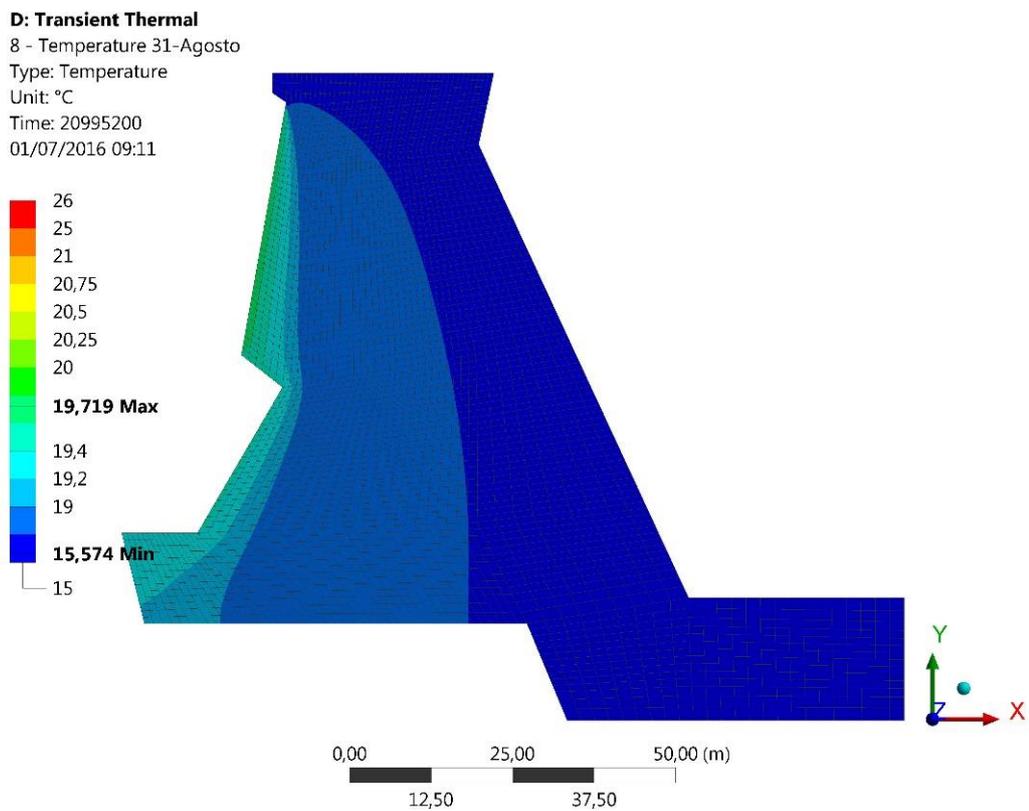


Figura 5.15 – Campo de Temperatura do dia 30 de setembro.

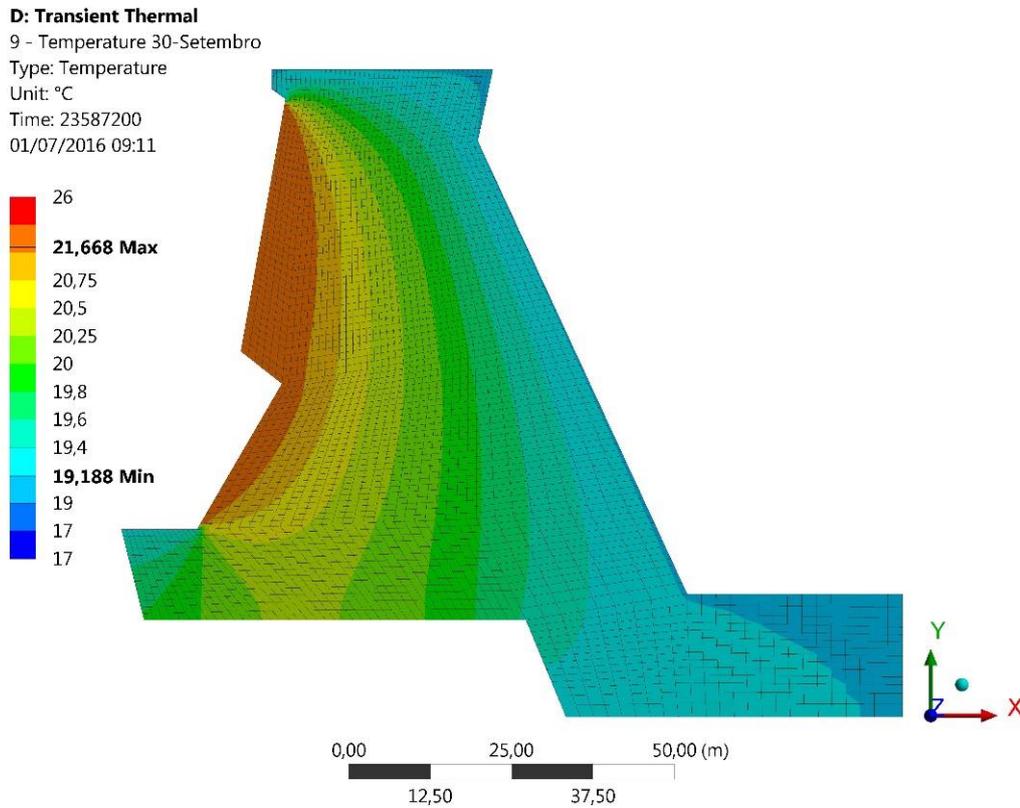


Figura 5.16 – Campo de Temperatura do dia 31 de outubro.

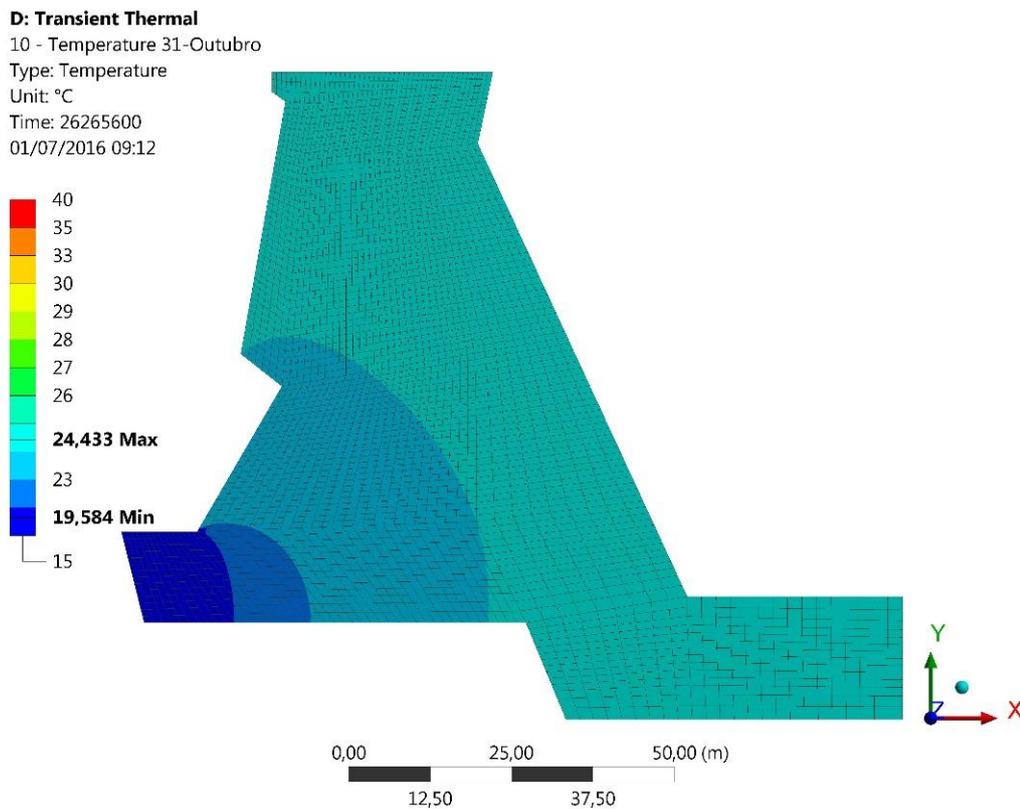


Figura 5.17 – Campo de Temperatura do dia 30 de novembro.

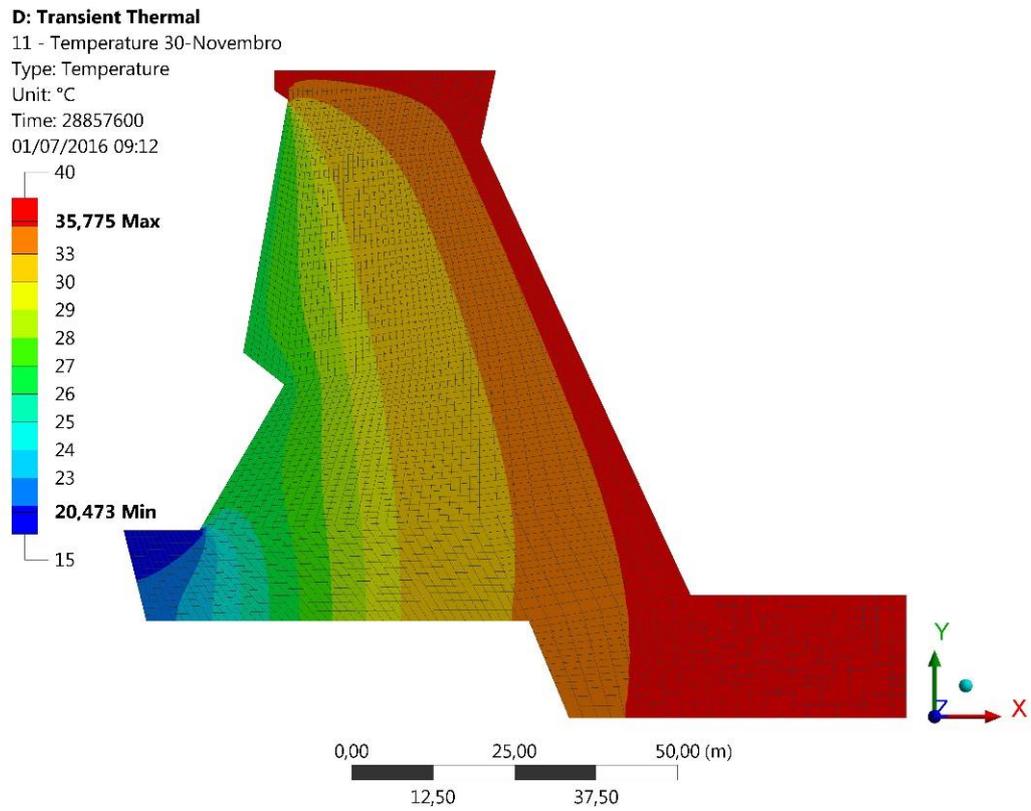


Figura 5.18 – Campo de Temperatura do dia 31 de dezembro.

