

**UM ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO TÉRMICO EM
CONCRETO MASSA**

NAILDE DE AMORIM COELHO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**UM ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO TÉRMICO EM
CONCRETO MASSA**

NAILDE DE AMORIM COELHO

ORIENTADOR: ANTONIO ALBERTO NEPOMUCENO

CO-ORIENTADOR: LINEU JOSÉ PEDROSO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

PUBLICAÇÃO: E.DM-006A/12

BRASÍLIA/DF: ABRIL – 2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**UM ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO TÉRMICO EM
CONCRETO MASSA**

NAILDE DE AMORIM COELHO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. Antonio Alberto Nepomuceno, Dr. Ing. (UnB)
(Orientador)

Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Roberto Dalledone Machado, DSc (UFPR)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 13 DE ABRIL DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

COELHO, NAILDE DE AMORIM

Um Estudo Numérico do Efeito Térmico em Concreto Massa

[Distrito Federal] 2012.

xxi, 152p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2012).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Concreto massa

2. Temperatura

3. Método dos elementos finitos

4. Gradiente térmico

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COELHO, N. A.; Um Estudo Numérico do Efeito Térmico em Concreto Massa. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. 152p. Publicação E.DM-006A/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília – UnB. Brasília, DF, 152p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Nailde de Amorim Coelho

TÍTULO: Um Estudo Numérico do Efeito Térmico em Concreto Massa.

GRAU: Mestre ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Nailde de Amorim Coelho

Av. Pacheco Fernandes, Lote 05, Apto 1C, Vila Planalto.

70.804-080 Brasília - DF- Brasil

e-mail: naildea@yahoo.com.br

Dedico à minha família, meus pais e irmãos pelo apoio e incentivo. E também a minha sobrinha Isabela de 2 anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre guiar os meus passos, abrir os meus caminhos rumo à realização dos meus sonhos e por tudo que tenho e sou.

Agradeço a minha família, meus pais João Cincinato e Maria Alice, meus irmãos e seus cônjuges Etevaldo e Jô, Erenita e Carlos, Jobson e Adenise, Elielton e minha sobrinha Isabela. Também a minha avó, tios e primos. A todos, os meus agradecimentos pelo apoio e incentivo nessa jornada.

Aos professores da UnB pelos novos aprendizados e a oportunidade de adquirir novas experiências. Agradeço a todos em nome dos meus orientadores Nepomuceno, Lineu e João Henrique, que me convidou para trabalhar com o tema.

Minha gratidão a toda equipe de funcionários da UnB que contribuem diariamente para que possamos desenvolver nossas pesquisas, sobretudo a Eva Veloso, secretária do programa e que se tornou para mim uma amiga inesquecível.

Aos que compartilharam comigo toda a experiência do mestrado e que de alguma forma também colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho: Chaira, Fernanda, Henrique Jr, Jorge, Juliano, Ramon, Virley e Wallison. De forma especial agradeço a Dyorgge, Eneida, Morgana, Nazaré e Wagner, estes foram mais que amigos, em todos os momentos de alegria ou dificuldade pessoas com quem eu sempre pude e posso contar.

O reconhecimento às pessoas externas que contribuíram com as pesquisas aqui desenvolvidas: Thiago Valente – mestrando de engenharia mecânica da UnB; Emílio Kavamura – professor da UFPR; Flávio Mamed – engenheiro de Furnas; Antonival – engenheiro da Eletronorte.

Enfim, agradeço a todos os que acreditaram em mim e me apoiaram na conquista de mais um objetivo de vida. Aos que mesmo distantes, me deram força para continuar lutando. Aos que de perto, me ampararam em cada novo desafio. Os agradecimentos são muitos, a alegria é imensa, a sensação de dever cumprido é inexplicável. Portanto, a todos o meu muito obrigada!

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”
Albert Einstein

RESUMO

UM ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO TÉRMICO EM CONCRETO MASSA

Autor: Nailde de Amorim Coelho

Orientador: Antonio Alberto Nepomuceno, Dr. Ing.

Co-orientador: Lineu José Pedroso, Dr. Ing.

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, abril de 2012

O concreto massa é geralmente utilizado em obras de grande porte, como barragens e fundações. É denominado assim por apresentar concretagens de grandes dimensões e volume. Essas características influenciam para o aumento da temperatura no interior do concreto devido à liberação de calor no processo de hidratação dos produtos cimentícios, esse processo é chamado de calor de hidratação.

Junto com o calor de hidratação, os efeitos de condução, radiação e convecção, assim como as condições iniciais e de contorno do concreto também influenciam na elevação da temperatura do material. No entanto, a principal causa de preocupação nesses tipo de problema é o gradiente térmico atingido, ou seja, a diferença entre as temperaturas máxima e mínima que o concreto está sujeito. Pois, quanto maior o gradiente térmico, maior a probabilidade de surgimento de tensões térmicas que provocam as fissurações.

As características e propriedades do concreto utilizado também influenciam diretamente nos efeitos térmicos. As análises realizadas com o ANSYS apresentam bastante performance quanto à evolução de temperatura, mudanças na geometria e condições de contorno. Isso mostra que a aplicação do método dos elementos finitos (MEF) pelo programa pode ser eficiente para a solução da equação de Fourier que rege os problemas de transferência de calor.

A utilização do MEF pelo programa para o desenvolvimento das isotermas de temperatura no interior do concreto apresentou-se de forma satisfatória quanto a evolução de temperatura no interior de uma estrutura de concreto massa. Desta forma, as estruturas podem ser estudadas antes mesmo da execução, visualizando possíveis situações críticas.

ABSTRACT

A NUMERICAL STUDY OF THERMAL EFFECT IN MASS CONCRETE

Author: Nailde de Amorim Coelho

Supervisor: Antonio Alberto Nepomuceno, Dr. Ing.

Co-Supervisor: Lineu José Pedroso, Dr. Ing.

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, April of 2012

The concrete mass is generally used in large construction such as dams and foundations. Concrete mass is called in this way for presenting large dimension and volume of concreting. These characteristics influence the temperature rise in the interior of the concrete due to release of heat in the process of hydration of cementitious products, this process is called the hydration heat.

Together with the hydration heat, the effects of conduction, radiation and convection, as well as initial and boundary conditions of the concrete also influence the temperature rise of the concrete mass material. However, the main cause of concern in this type of problem is the temperature gradient achieved, ie the difference between the maximum and minimum temperatures that the concrete is subject. For the higher the thermal gradient, the greater the probability of occurrence of the thermal stresses causing cracking.

The characteristics and properties of concrete used also directly influence the thermal effects. The analysis performed with ANSYS have enough performance for the evolution of temperature, changes in geometry and boundary conditions. It shows that the application of finite element method (FEM) by the program could be efficient for the solution of Fourier equation that defines the heat transfer problems.

The use of the FEM by the program for the development of isotherms temperature within the concrete showed satisfactory results as the evolution of temperatures within the mass concrete structure. Thus, the structures can be studied even before the execution, observing possible critical situations.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	GENERALIDADES	1
1.2	MOTIVAÇÃO.....	5
1.3	OBJETIVOS	6
1.3.1	Objetivo geral	6
1.3.2	Objetivos específicos	6
1.4	PROBLEMÁTICA	6
1.5	METODOLOGIA.....	7
1.6	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	INTRODUÇÃO.....	10
2.2	CONCRETO MASSA	10
2.3	DEFINIÇÃO DE BARRAGENS.....	16
2.4	AS BARRAGENS DE GRAVIDADE E AS FISSURAÇÕES	18
2.5	PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO.....	19
2.6	PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO	21
2.7	EFEITOS TÉRMICOS EM BARRAGENS.....	23
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	32
3.1	LEI DE FOURIER	32
3.2	EQUAÇÃO GERAL DA CONDUÇÃO DE CALOR	36
3.3	CALOR DE HIDRATAÇÃO.....	39
3.4	CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO	40
3.5	SOLUÇÃO DO PROBLEMA	42
3.5.1	Método numérico	42
3.5.1.1	Solução da equação de Fourier pelo método dos elementos finitos ..	43
3.5.2	Método computacional.....	48

4	VALIDAÇÃO DE RESULTADOS PARA PROBLEMAS TÉRMICOS COM O USO DO ANSYS.....	52
4.1	BLOCO DE CONCRETO EM CAMADA ÚNICA	52
4.2	BLOCO DE CONCRETO EM DUAS CAMADAS	57
4.3	BLOCO DE CONCRETO EM TRÊS CAMADAS.....	62
4.4	BLOCO DE CONCRETO ANALISADO EXPERIMENTALMENTE.....	68
4.5	COMPARAÇÃO PASSO-A-PASSO ENTRE MEF (MANUAL) E O PROGRAMA ANSYS	74
5	ESTUDOS DE CASOS.....	81
5.1	BLOCO DE CONCRETO CONSTRUÍDO EM CAMADAS	81
5.2	TETRÁPODE DE CONCRETO.....	85
5.3	FUNDAÇÃO	88
5.4	VIGA DA USINA HIDRELÉTRICA SERRA DA MESA	93
5.5	ESTRUTURA DE BARRAGEM EM CAMADAS	100
6	CONCLUSÕES.....	109
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
	APÊNDICES.....	119
	APÊNDICE A - PROGRAMAÇÃO NO ANSYS	120
	APÊNDICE B - ANÁLISES DAS EQUAÇÕES UTILIZADAS	126
	APÊNDICE C - ANÁLISE DOS PARÂMETROS UTILIZADOS NAS EQUAÇÕES.....	129
	C.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	132
	C.2 DENSIDADE	134
	C.3 CALOR ESPECÍFICO	136
	C.4 COEFICIENTE DE CONVECÇÃO.....	138
	APÊNDICE D - ANÁLISE DAS CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO .	140
	D.1 CONDIÇÕES INICIAIS	140
	D.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO	141
	APÊNDICE E - ANÁLISE DA VARIAÇÃO GEOMÉTRICA.....	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Simbologia dos óxidos e compostos do cimento (CARVALHO, 2002).....	28
Tabela 2.2 – Cimentos utilizados no Brasil.....	28
Tabela 4.1 - Coeficientes da equação 14 de aumento da temperatura adiabática dos concretos usados na represa de Três Gargantas.....	39
Tabela 4.1 – Propriedades térmicas utilizadas no modelo.....	53
Tabela 4.2 – Comparação entre os resultados obtidos.....	56
Tabela 4.3 – Propriedades térmicas do bloco analisado.....	58
Tabela 4.4 – Comparação entre os resultados obtidos.....	62
Tabela 4.5 – Propriedades térmicas utilizadas no modelo.....	63
Tabela 4.6 - Comparação entre os resultados obtidos para o bloco em três camadas.....	68
Tabela 4.7 – Propriedades térmicas dos materiais (SILVOSO, 2002).	69
Tabela 4.8 – Propriedades térmicas da placa.....	74
Tabela 4.9 – Resultados para o modelo numérico.....	80
Tabela 5.1 – Propriedades térmicas do concreto.....	86
Tabela 5.2 – Propriedades dos materiais.....	89
Tabela 5.3 – Propriedades utilizadas.....	94
Tabela 5.4 – temperatura máxima para a viga.....	100
Tabela B.1 - Coeficientes da equação 14 de aumento da temperatura adiabática dos concretos usados na represa de Três Gargantas LIU et al. (2010).	126
Tabela C.1 – Definição dos parâmetros.....	130
Tabela C.2 - Fórmulas empíricas para calcular o coeficiente de transferência de calor por convecção (ar-superfície) segundo distintos autores. CALMON (1995) <i>apud</i> SANTOS (2004).	131
Tabela C.3 – Valores para diferentes valores de k.....	133
Tabela C.4 – Valores para diferentes valores de ρ	135
Tabela C.5 – Valores para diferentes valores de c.....	137
Tabela C.6 – Valores para diferentes valores de h.....	139
Tabela D.1 – Resultados encontrados para diferentes condições iniciais.....	141
Tabela D.2 – Resultados encontrados para diferentes condições de contorno.....	143
Tabela E.1 - Resultados encontrados para diferentes superfícies.....	148
Tabela E.2 - Resultados encontrados para diferentes alturas de concretagem.....	150
Tabela E.3 - Resultados encontrados para diferentes larguras.....	152

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Barragem Belo Monte (Eletrobrás, 2011).....	3
Figura 1.2 – Preparação dos blocos de fundação da Ponte Juscelino Kubistchek para concretagem (ALBUQUERQUE, 2009).	4
Figura 1.3 – Concretagem do Bloco 3 da Estação Faria Lima – Linha 4 Amarela em São Paulo (ALBUQUERQUE, 2009).	4
Figura 2.1 – Calor de hidratação para os diferentes tipos de cimento (FARIA, 2004).	12
Figura 2.2 - Efeito do agregado sobre a máxima diferença de temperatura admissível (modificado - GADJA e VANGEEM, 2002).	13
Figura 2.3 – Temperatura na superfície de um bloco de concreto (CHOKTAWEEKARN e TANGTERMSIRIKUL, 2010).	14
Figura 2.4 – Efeito dos tubos de resfriamento interno (modificado - GADJA e VANGEEM, 2002).	15
Figura 2.5 - Variação da temperatura do concreto para diferentes espessuras do concreto (CHOKTAWEEKARN e TANGTERMSIRIKUL, 2010).	15
Figura 2.6 - Variação da temperatura em relação do tempo para diferentes posições no concreto (CHOKTAWEEKARN e TANGTERMSIRIKUL, 2010).	16
Figura 2.7 – Barragem de Tucuruí do tipo gravidade.....	17
Figura 2.8 – a) Surgimento de micro-fissuras; b) Micro-fissuras se ligam e formam macro-fissuras. (SKUMAUTZ, 2006).	20
Figura 2.9 – Fluxo de calor em barragem.....	24
Figura 2.10 – Calor desenvolvido por cada componente de cimento (CHOKTAWEEKARN e TANGTERMSIRIKUL, 2010).	29
Figura 2.11 – Estágios do processo de hidratação do cimento (FARIA, 2004).	30
Figura 2.12 – Influência da temperatura na evolução de calor do cimento Portland (PINTO, 1997 apud CARVALHO, 2002).	31
Figura 3.1 - Fluxo de calor que passa em uma superfície.	32
Figura 3.2 – a) Dois meios em contato pela superfície de área A; b) Fluxo de calor na direção da normal.	34
Figura 3.3 - Corpo influenciado por fluxo de calor.	36
Figura 3.4 - Domínio para solução bidimensional.	44
Figura 3.6 - Geometria do elemento PLANE55 (biblioteca do ANSYS).	50

Figura 3.5 – Solução do ANSYS em elementos finitos.	50
Figura 4.1 - a) Dimensões e malha do bloco estudado neste trabalho com o programa ANSYS. Sendo A1 = rocha; A2 = bloco de concreto. b) Discretização da malha em elementos finitos.....	52
Figur 4.2 - Elevação da temperatura adiabática do concreto utilizado (SANTOS, 2004).	53
Figura 4.3 – Curva de geração de calor (SANTOS, 2004).....	53
Figura 4.4 - Isotemperaturas para ½ dia de concretagem do bloco pelo programa ANSYS.	54
Figura 4.5 - Isotemperaturas para ½ dia de concretagem do muro pelo programa PFEM_2DT (SANTOS, 2004).	55
Figura 4.6 - Isotemperaturas para 2 dias de concretagem do bloco pelo programa ANSYS.	55
Figura 4.7 - Isotemperaturas para 2 dias de concretagem do muro pelo programa PFEM_2DT (SANTOS, 2004).	55
Figura 4.8 - Isotemperaturas para 5 dias de concretagem do bloco pelo programa ANSYS.	56
Figura 4.9 - Isotemperaturas para 5 dias de concretagem do muro pelo programa PFEM_2DT (SANTOS, 2004).	56
Figura 4.10 – Seção transversal analisada (SANTOS, 2004).....	57
Figura 4.11 – a) Bloco estudado. Sendo A1 = base; A2 = 1ª camada de concreto; A3 = 2ª camada de concreto. B) Discretização da malha em elementos finitos do bloco.....	57
Figura 4.12 – Curva de elevação adiabática do concreto.	58
Figura 4.13 – Curva de geração de calor.	58
Figura 4.14 – Isotemperaturas obtidas com o ANSYS após 24 h de lançamento da primeira camada.	59
Figura 4.15 - Isotemperaturas 24 h após o lançamento da primeira camada obtido por Santos (2004).....	60
Figura 4.16 – Isotemperaturas obtidas com o ANSYS após 76 h de lançamento da primeira camada.	60
Figura 4.17 - Isotemperaturas 76 h após o lançamento da primeira camada obtido por Santos (2004).....	60
Figura 4.18 - Isotemperaturas obtidas com o ANSYS após 288 h de lançamento da primeira camada e 76 h após o lançamento da segunda camada.	61

Figura 4.19 - Isotemperaturas 288 h após o lançamento da primeira camada obtido por Santos (2004).....	61
Figura 4.20 - a) Bloco estudado. Sendo A1 = 1ª camada; A2 = 2ª camada; A3 = 3ª camada. b) Discretização da malha em elementos finitos.	62
Figura 4.21 – Elevação adiabática do concreto.	63
Figura 4.22 – Curva de geração de calor.	63
Figura 4.23 – Isotermas de temperatura para 1ª camada após 2 dias de concretagem.	64
Figura 4.24 – Isotermas de temperatura para 1ª camada após 2 dias de concretagem (SILVA, 2003).....	64
Figura 4.25 – Isotermas de temperatura para 1ª camada após 2 dias de concretagem (KAVAMURA, 2005).....	65
Figura 4.26 – Isotermas de temperatura após 2 dias de concretagem da 2ª camada.	65
Figura 4.27 – Isotermas de temperatura após 2 dias de concretagem da 2ª camada (SILVA, 2003).....	66
Figura 4.28 – Isotermas de temperatura após 2 dias de concretagem da 2ª camada (KAVAMURA, 2005).....	66
Figura 4.29 – Isotermas de temperatura após 2 dias de concretagem da 3ª camada.	67
Figura 4.30 – Isotermas de temperatura após 2 dias de concretagem da 3ª camada (SILVA, 2003).....	67
Figura 4.31 – Isotermas de temperatura após 2 dias de concretagem da 3ª camada (KAVAMURA, 2005).....	68
Figura 4.32 - Superfícies de troca de calor por convecção (SILVOSO, 2002).	69
Figura 4.33 – Elevação adiabática do concreto (SILVOSO, 2002).....	70
Figura 4.34 – Análise realizada no ANSYS após 12 horas de concretagem.....	70
Figura 4.35 - Análise realizada por Silvoso após 12 horas de concretagem.	71
Figura 4.36 – Análise realizada no ANSYS após 24 horas de concretagem.....	71
Figura 4.37 - Análise realizada por Silvoso após 24 horas de concretagem.	71
Figura 4.38 – Análise realizada no ANSYS após 36 horas de concretagem.....	72
Figura 4.39 - Análise realizada por Silvoso após 36 horas de concretagem.	72
Figura 4.40 – Análise realizada no ANSYS após 48 horas de concretagem.....	72
Figura 4.41 - Análise realizada por Silvoso após 48 horas de concretagem.	73
Figura 4.42 – Comparação entre as temperaturas em função do tempo para resultados encontrados no presente trabalho com o ANSYS e para um sensor instalado na massa de concreto segundo Silvoso (2004).	73

Figura 4.43 – Condições de contorno da placa em estudo.	74
Figura 4.44 – Divisão da chapa em elementos.	75
Figura 4.45 – a) Resultado obtido pelo ANSYS; b) Resultado mostrado por Bhatti (2005).	79
Figura 4.46 – Resultados nodais encontrados pelo ANSYS.	79
Figura 5.1 – Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem da primeira camada. .	82
Figura 5.2 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem da segunda camada e 4 dias de concretagem da primeira camada de concreto.	83
Figura 5.3 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem da terceira camada, 4 dias de concretagem da segunda camada e 6 dias de concretagem da primeira camada de concreto.	83
Figura 5.4 – Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem da primeira camada, considerando-se temperatura inferior de 30 °C.	84
Figura 5.5 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem da segunda camada e 4 dias de concretagem da primeira camada de concreto.	84
Figura 5.6 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem da terceira camada, 4 dias de concretagem da segunda camada e 6 dias de concretagem da primeira camada de concreto.	85
Figura 5.7 - Construção de um quebra-mar – colocação de tetrápodes (AZENHA et al., 2011).	85
Figura 5.8 – Geometria da seção (AZENHA et al., 2011).	86
Figura 5.9 – Resultados obtidos por Azenha et al. (2011) para o tetrapodo.	87
Figura 5.10 – Resultados obtidos pelo ANSYS para 20h, 36h, 50h, 120h, respectivamente.	87
Figura 5.11 – Torre eólica e construção da fundação (AZENHA, 2009).	88
Figura 5.12 – Seção da torre e localização do sensor (AZENHA, 2009).	88
Figura 5.13 – Elevação adiabática do concreto (AZENHA, 2009).	90
Figura 5.14 – Curva de geração de calor (AZENHA, 2009).	90
Figura 5.15 – Isotermas de temperatura para 0,9 dias de concretagem: a) ADINA (AZENHA, 2009); b) ANSYS.	90
Figura 5.16 – Isotermas de temperatura para 1,3 dias de concretagem: a) ADINA (AZENHA, 2009); b) ANSYS.	91
Figura 5.17 – Isotermas de temperatura para 2,3 dias de concretagem: a) ADINA (AZENHA, 2009); b) ANSYS.	91

Figura 5.18 – Isotermas de temperatura para 5 dias de concretagem: a) ADINA (AZENHA, 2009); b) ANSYS.	92
Figura 5.19 – Isotermas de temperatura para 9 dias de concretagem: a) ADINA (AZENHA, 2009); b) ANSYS.	92
Figura 5.20 – Resultados obtidos pelo ANSYS e pelo sensor. Adaptado de Azenha (2009).	93
Figura 5.21 – Seção típica das vigas de pontes rolantes de Serra da Mesa (ANDRADE, 1997).	94
Figura 5.22 – Geometria da viga estudada (ANDRADE, 1997).	94
Figura 4.23 – Elevação adiabática do concreto.	95
Figura 4.24 – Curva de geração de calor.	95
Figura 5.25 – Áreas estudadas e malha utilizada na análise da viga.	96
Figura 5.26 – Temperatura máxima encontrada.	96
Figura 5.27 – Isotermas de temperatura para concretagem de camadas com intervalo de 7 dias.	97
Figura 5.28 – Isotermas de temperatura para concretagem de camadas com intervalo de 14 dias.	98
Figura 5.29 – Isotermas de temperatura para concretagem de camadas com intervalo de 7 dias (KRÜGER, 2001).	99
Figura 5.30 – Perfil de uma barragem de concreto (fornecido pela equipe da Eletronorte).	101
Figura 5.31 – Subdivisão da estruturas em áreas e malha de elementos finitos utilizada.	101
Figura 5.32 – Isotermas de temperatura para a 1ª e 2ª camada de concretagem.	102
Figura 5.33 – Isotermas de temperatura para a 3ª e 4ª camada de concretagem.	103
Figura 5.34 – Isotermas de temperatura para a 5ª e 6ª camada de concretagem.	104
Figura 5.35 – Isotermas de temperatura para a 7ª e 8ª camada de concretagem.	105
Figura 5.36 – Isotermas de temperatura para a 9ª e 10ª camada de concretagem.	106
Figura 5.37 – Malha de 0.1 e isotermas de temperatura após a concretagem da 10ª camada.	107
Figura 5.38 – Malha de 0.1 e isotermas de temperatura após a concretagem da 10ª camada.	107
Figura A.1 – Isotermas de temperatura para concretagem com intervalos de 2 dias e em 3 camadas.	120

Figura B.1 - Elevação da temperatura – T (°C) em função do tempo – t (dias) para diferentes resistências do concreto.	127
Figura B.2 - a) Modelo estudado; b) Isotermas de temperatura para o modelo.	127
Figura B.3 - a) Modelo estudado; b) Isotermas de temperatura para o modelo.	128
Figura B.4 - Isotermas de temperatura para o modelo.	128
Figura C.1 – malha de elementos finitos para o bloco em estudo, dimensões = 5 m x 5 m.	129
Figura C.2 – Isotermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com $k = 1$ W/m.°C.	132
Figura C.3 – Isotermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com $k = 4$ W/m.°C.	133
Figura C.4 – Isotermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com $\rho = 2000$ kg/m ³	134
Figura C.5 – Isotermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com $\rho = 3000$ kg/m ³	135
Figura C.6 – Isotermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com $c = 800$ J/g°C.	136
Figura C.7 – Isotermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com $c = 1300$ J/g°C.	137
Figura C.8 – Isotermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com 9 W/m ² .°C.	138
Figura C.9 – Isotermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com 15 W/m ² .°C.	139
Figura D.1 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem e temperatura de lançamento do concreto de a) 20°C; b) 30°C; c) 40°C; d) 45°C.	140
Figura D.2 – Faces do bloco para análise das condições de contorno.	142
Figura D.3 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem e condições de contorno para os casos de “a” a “m”, conforme a tabela 5.9.	142
Figura E.1 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem e condições de contorno para os casos de “a” a “g”, conforme a tabela 5.10.	147
Figura E.2 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem e condições de contorno para os casos de “a” a “o”, conforme a tabela 5.11.	149
Figura E.3 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem e condições de contorno para os casos de “a” a “f”, conforme a tabela 5.12.	151

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ρ	Massa específica
δ	Difusividade térmica
h_c	Coefficiente de convecção
h_r	Coefficiente de transferência de calor por radiação
Q_c	Quantidade de calor transmitida por convecção
Q_r	Calor de radiação
$T_{f,\infty}$	Temperatura da vizinhança
T_s	Temperatura do corpo
T_1	Temperatura do corpo 1
T_2	Temperatura do corpo 2
T_a	Temperatura ambiente
\dot{q}	Calor de hidratação
q_i	Temperatura inicial do concreto
q_s	Calor ganho devido à radiação solar
α	Constante do concreto
A	Área da superfície
a_r	Fator de absorção
c	Calor Específico
C_c	Consumo de cimento
h	Coefficiente de transmissão de calor global
k	Condutividade térmica
t	Tempo
I	Radiação total
Q	Quantidade de calor
T	Temperatura
m	Traço do concreto
n	Normal
β	Constante do concreto
ε	Emissividade da superfície
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
C_2S	Silicato de dicálcio

CP	Cimento Portland
C ₃ S	Silicato de tricálcio
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₄ AF	Ferro aluminato tetracálcico
C	Óxido de cálcio
S	Óxido de sílica
A	Óxido de alumínio
F	Óxido de ferro
M	Óxido de magnésio
S	Sulfato
H	Água
CaO	Óxido de cálcio
SiO ₂	Óxido de sílica
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
MgO	Óxido de magnésio
SO ₄	Sulfato
H ₂ O	Água
m	Metro
°C	Graus Celsius
J	Joule
$\frac{dQ}{dt}$	Quantidade de calor que atravessa a área A na unidade de tempo
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente térmico
$\frac{dT}{dn}$	Gradiente térmico segundo a normal
$sen \alpha$	Seno do ângulo α
$cos \alpha$	Cosseno do ângulo α
$tg \alpha$	Tangente do ângulo α
Δx	Elemento na direção x
Δy	Elemento na direção y
Δz	Elemento na direção z
$\Delta x \Delta y \Delta z$	Elemento de volume

MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
W	Watt
v_v	Velocidade do vento
$\Delta(\%)$	Diferença em porcentagem
$\nabla^2 T$	Laplaciano da temperatura
1D	Uma dimensão
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ACI	American Concrete Institute
CCR	Concreto Compactado com Rolo
CBDB	Comitê Brasileiro de Grandes Barragens
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

De acordo com o American Concrete Institute - ACI (2005), o concreto massa é definido como um grande volume de concreto que apresenta dimensões grandes o suficiente para que algumas medidas sejam tomadas para reduzir a temperatura interna dessa estrutura, ou melhor, para reduzir o gradiente térmico entre as partes interna e externa do concreto.

Muitas obras utilizam o concreto massa na sua confecção. Um exemplo dessa aplicação é a construção de barragens. Tais estruturas normalmente apresentam grandes dimensões e grandes volumes de concreto. As construções que consomem grandes volumes de concreto tornam-se preocupantes devido à probabilidade do surgimento de patologias, tais como fissurações e trincas. Quando os compósitos do cimento entram em contato com a água, eles se hidratam e liberam calor, conhecido como calor de hidratação. A geração de calor pode provocar tensões térmicas que comprometem a estabilidade da estrutura, pois com elas há o início das fissurações.

Geração de calor no interior de um bloco de concreto gera um gradiente de temperatura em relação aos bordos externos que, se o concreto não puder se movimentar livremente, induz o surgimento de tensões de tração que, se ultrapassarem a resistência à tração do concreto, haverá fissuração comprometendo a estabilidade e estanqueidade da estrutura (Inoue, 1986).

A diferença entre as temperaturas internas e externas do concreto massa, ou seja, o gradiente de temperatura, faz com que o concreto se deforme ocasionando as fissuras. Quanto maior o gradiente de temperatura, maior a possibilidade do surgimento de trincas, e maior também as aberturas dessas fissuras devido ao aumento das tensões.

Fissuras em estruturas de concreto massa são indesejáveis, pois afetam a permeabilidade, a durabilidade, aparência e as tensões internas das estruturas. As fissuras ocorrem, normalmente, quando as tensões de tração desenvolvidas excedem a resistência à tração do concreto. Estas tensões de tração podem ocorrer devido às cargas impostas à estrutura, mas frequentemente ocorrem devido à restrição por causa da mudança volumétrica. No entanto, a maior alteração volumétrica em concreto massa é resultado da modificação da

temperatura, principalmente, pela geração do calor de hidratação. O controle dessa temperatura é importante para que fissuras sejam evitadas (Townsend, 1981).

A temperatura do concreto pode ainda ser alterada pelas trocas de calor por radiação solar, convecção e condução, sendo que, o calor gerado na hidratação do cimento é dominante nesse processo ao longo das primeiras idades.

A temperatura máxima atingida depende do tipo e da quantidade de cimento, da relação água-cimento, da finura do cimento, entre outras características. A construção do concreto massa em camadas é uma forma de redução do gradiente térmico. Nesse caso, influenciarão também a espessura da camada, a temperatura de lançamento, e os processos de pré ou pós-refriamento, quando existentes.

Albuquerque (2009) afirma que outra tecnologia utilizada para redução de temperatura é o concreto compactado com rolo (CCR). Esse se diferencia do concreto massa convencional por apresentar consistência seca, consumo de cimento muito baixo e, conseqüentemente, menor elevação da temperatura, com a vantagem de resultar num custo de transporte e compactação mais baixo.

A geração de calor internamente no concreto provoca efeitos que são capazes de danificar a estrutura, sendo um problema para os construtores. Alguns recursos, como a utilização de softwares, podem prever e avaliar a temperatura interna no concreto massa. Este processo permite a identificação das maiores temperaturas atingidas, do tempo de evolução do calor e dos locais de temperatura crítica na estrutura. Com esses dados é possível buscar soluções para melhor adequação ao problema.

Um exemplo de software que pode ser utilizado nesses problemas é o ANSYS, uma ferramenta poderosa que utiliza o método dos elementos finitos para solução de vários problemas de engenharia, como estruturais, dinâmicos, térmicos, entre outros. O que proporciona uma análise rápida e econômica quando comparada com ensaios experimentais.

O estudo do concreto massa torna-se importante uma vez que ainda é bastante aplicado no Brasil, principalmente em barragens. A construção de barragens é uma técnica utilizada

desde os primórdios das civilizações para o acúmulo de água para abastecimento, sendo também utilizada para irrigação e, com o passar do tempo, para a geração de energia. No entanto, mesmo sendo uma prática antiga, ainda existem muitos problemas em construções de barragens, sobretudo com o concreto.

O principal emprego das barragens hoje é a geração de energia elétrica e o acúmulo de água para abastecimento. Segundo o Comitê Brasileiro de Grandes Barragens – CBDB (1982), no Brasil as grandes barragens passaram a ser construídas após o período da grande seca, nos anos 70. Outras obras deste tipo estão previstas para construção no país, mas enfrentam alguns problemas sociais e ambientais, como a inundação de grandes áreas, deslocamento de ribeirinhos, preservação ambiental, entre outros. Esse é o caso da barragem de Belo Monte que, quando em funcionamento, passará a ser a maior em produção energética inteiramente do Brasil. E, geralmente, essas construções fazem uso do concreto massa.

A figura 1.1 mostra a imagem da maquete virtual da futura Barragem Belo Monte, que será localizada na região norte do país, no estado do Pará. Esta será uma barragem de gravidade construída com concreto massa.



Figura 1.1 - Barragem Belo Monte (Eletrobrás, 2011).

Albuquerque (2009) cita em seu trabalho outras obras que utilizaram o concreto massa na sua execução, as quais são mostradas e relatadas abaixo.

Os blocos das fundações da Ponte Juscelino Kubistchek em Brasília, no Distrito Federal, são outro exemplo de estrutura em concreto massa. Os blocos de fundação medem 23 x 30 x 3,50 metros e foram feitos através de um caixão de concreto, executado fora da água, que

foi posteriormente submerso. Para a concretagem desses blocos foi necessário adotar pré-refrigeração, com substituição de parte da água por gelo em escamas, e pós-refrigeração. A figura 1.2 mostra a preparação do bloco para a concretagem.



Figura 1.2 – Preparação dos blocos de fundação da Ponte Juscelino Kubistchek para concretagem (Pedroso, 2000).

O Bloco 3 da Estação Faria Lima (linha 4 Amarela) em São Paulo também apresentou a maior concretagem realizada da história do Metrô (3.700 m³). Na concretagem deste bloco, utilizou-se um concreto massa resfriado com gelo, para que as peças não sofressem fissuração térmica. A laje de piso da estação tem uma espessura que varia entre 2,5 e 2,8 metros, necessária para suportar todas as cargas previstas, inclusive a sub-pressão do lençol freático. A figura 1.3 mostra a concretagem deste bloco.



Figura 1.3 – Concretagem do Bloco 3 da Estação Faria Lima – Linha 4 Amarela em São Paulo (Albuquerque, 2009).

Sabendo-se da importância e da utilização do concreto massa nos dias atuais, esse trabalho busca fazer uma análise da variação das temperaturas no concreto massa a partir das

características iniciais do concreto, como tipo de cimento, temperatura de lançamento, entre outros.

A análise será feita com o software ANSYS. Os resultados podem ser utilizados para identificação das situações mais críticas e, conseqüentemente, contribuirão para uma busca pelas melhores soluções. Vale ressaltar ainda que o estudo pode ser aplicado para qualquer tipo de estrutura em concreto massa. Com isso, procura-se conhecer esse material, avaliar os fatores que influenciam para elevação térmica e analisar os gradientes de temperatura para diferentes geometrias e formas construtivas do concreto massa.

1.2 MOTIVAÇÃO

As barragens hidroelétricas são as principais fontes energéticas do Brasil. Alguns projetos estão em andamento e os problemas construtivos não estão totalmente solucionados. Um dos principais é a geração do calor de hidratação interno, agindo também com os processos de radiação solar, condução e convecção.

Os estudos sobre os efeitos térmicos no concreto massa estão em fase de crescimento no país. No entanto, na UnB – Universidade de Brasília o assunto é pioneiro. Há o registro de trabalhos envolvendo modelagem numérica na UFES - Universidade Federal do Espírito Santo – Santos (2004); na COPPE-UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro - Faria (2004), Silvos (2002); na UFPR - Universidade Federal do Paraná – Kavamura (2005), Krüger (2002), Silva (2003); e também em FURNAS - empresa brasileira de energia elétrica.

O tema traz a proposta de uma pesquisa que envolve as duas áreas de atuação do programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, e os resultados da pesquisa são de interesse das equipes de Furnas e da Eletronorte.

Com isso, busca-se desenvolver o início dos estudos de uma temática que é importante e necessária no cotidiano de grandes obras procurando desencadear o interesse de outros pesquisadores na área. O êxito dos resultados encontrados para os efeitos térmicos com o software ANSYS poderá ser o início de um gama de soluções de alguns problemas da

engenharia. Dessa forma, este trabalho apresenta uma contribuição tanto ao meio acadêmico como ao meio técnico.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Analisar o efeito térmico em estruturas de concreto massa para variação paramétrica, geométrica, de condições iniciais e de contorno, mudança e geração de malhas em distintas estruturas, utilizando o ANSYS como ferramenta operacional para processamento numérico através do Método dos Elementos Finitos e visualização desses efeitos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Fazer uma revisão bibliográfica sobre os assuntos de interesse, como concreto massa, efeitos térmicos;
- Estudar um modelo matemático que represente o problema do efeito térmico do concreto massa;
- Aplicar métodos de solução do problema, como o método dos elementos finitos;
- Fazer estudo e utilizar o ANSYS como meio de análise da estrutura;
- Analisar o efeito térmico do concreto massa diante de diferentes parâmetros, situações geométricas, condições de contorno e espessuras de camada;

1.4 PROBLEMÁTICA

O presente estudo trata do comportamento térmico em diferentes estruturas de concreto que empregam o concreto massa na execução, entre elas pode-se citar as barragens por gravidade.

Nessas construções existe um aquecimento no interior do concreto causado pela reação de hidratação do cimento, uma reação exotérmica, ou seja, que libera calor. A evolução das isotermas de temperatura é influenciada não só por fatores internos, tais como as

propriedades do concreto e temperatura de lançamento do concreto, mas também sofre influência de fatores externos, como a temperatura ambiente.

Existem alguns meios de reduzir o gradiente de temperatura do concreto massa. A construção em camadas é uma alternativa. A técnica permite uma redução da máxima temperatura obtida, sendo que o intervalo de tempo de lançamento entre as camadas tem influência direta nas temperaturas. A tecnologia permite que o método construtivo e a representação da evolução das isotermas de temperatura possam ser analisados com programas computacionais, inclusive para a construção em camadas.

Este trabalho busca fazer a análise das isotermas de temperatura do concreto massa com o auxílio do software ANSYS. Não sendo a interface gráfica do programa tão interativa, faz-se uso da programação. Essa análise será realizada primeiramente por meio do estudo da equação que governa o problema. Serão investigados também a influência dos parâmetros utilizados na elevação de temperatura, as condições de contorno utilizadas, assim como o método construtivo.

1.5 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu inicialmente de uma busca por material bibliográfico correlato ao tema em estudo, buscando uma abordagem sobre o concreto massa e os efeitos térmicos a que está submetido. Para a solução do problema foram estudadas as equações matemáticas que regem os efeitos térmicos no concreto massa procurando entender a física do problema e as isotermas de temperatura existentes.

Após a familiarização com o tema, foi estudada a formulação da Equação de Fourier, que rege os problemas de transferência de calor. Consequentemente, consideram-se as condições iniciais e de contorno às quais as estruturas estão submetidas e a utilização do Método dos Elementos Finitos como forma de solução do problema.

Buscou-se o conhecimento e aplicação de uma ferramenta computacional para análise dos resultados por meio do método dos elementos finitos. O programa ANSYS foi escolhido como ferramenta de trabalho para análise de diversos casos e situações, devido a sua

aceitação no mercado e por ser um programa já utilizado em análise de tensões no Programa de Pós-Graduação de Estruturas e Construção Civil da UnB.

Para emprego do programa utilizou-se o elemento PLANE 55, que faz análise térmica em estruturas bidimensionais. Primeiramente, buscou-se conhecer o programa através de análises mais simplificadas, partindo-se para exemplos já estudados com outros recursos computacionais e/ou experimentais.

Após essas etapas partiu-se para o estudo de casos procurando observar o comportamento das estruturas quanto aos efeitos térmicos, admitindo-se a geração interna de calor no concreto massa em estruturas reais, já analisadas, e também para situações hipotéticas.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido em seis capítulos, conforme descritos abaixo.

O primeiro capítulo apresenta os aspectos iniciais do trabalho, fazendo uma introdução de alguns conceitos fundamentais, motivações, justificativa, objetivos e metodologia aplicados ao trabalho, buscando a compreensão do leitor do tema abordado.

O capítulo dois aborda uma revisão bibliográfica apresentando uma base teórica para o entendimento e desenvolvimento do tema. São mostrados conceitos sobre o concreto massa, algumas estruturas que utilizam esse material e as propriedades térmicas e mecânicas que influenciam o concreto massa.

As formulações matemáticas, as equações que governam os problemas térmicos, as respectivas condições de contorno, assim como os métodos que podem ser utilizados para solução de problemas envolvendo os efeitos térmicos em estruturas de concreto massa são observados no capítulo três.

O capítulo quatro traz aplicações do ANSYS para algumas situações já estudadas. Entre elas, a construção em uma, duas e três camadas de blocos de concreto, um caso com

temperaturas medidas experimentalmente e uma solução com o desenvolvimento mostrado matematicamente com os resultados sendo comparados aos encontrados com o programa.

Após a aplicação do programa em algumas situações, foram estudados alguns casos de forma a fazer análise da aplicação do programa para problemas reais e hipotéticos, observando as isotermas de temperatura para diferentes geometrias condições iniciais e de contorno e ainda havendo geração interna de calor.

As conclusões são mostradas no capítulo seis, assim como algumas sugestões para trabalhos futuros.

Nos apêndices encontram-se ainda a programação elaborada para um exemplo no ANSYS, uma análise das isotermas de temperatura para os termos isolados para a equação em estudo e a influência da variação de parâmetros na temperatura máxima obtida e nas isotermas de temperatura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Segundo Fairbairn *et al.* (2003) grandes estruturas de concreto, tais como barragens, blocos de fundação e lajes de pontes, podem estar sujeitas a fissurações em idades precoces devido às tensões térmicas e a indução da retração autógena. Do ponto de vista da engenharia, estas tensões podem ser evitadas com algumas medidas preventivas que tentam reduzir os efeitos térmicos na reação de hidratação do cimento. Entre elas pode-se citar:

- Escolha de um material capaz de reduzir a reação de hidratação do cimento e as tensões de retração autógena;
- Controlar a espessura das camadas e o intervalo de tempo entre as camadas para permitir a dissipação do calor;
- Redução da temperatura de lançamento do concreto ou fazer uso dos tubos de resfriamento.

As obras que utilizam concreto massa apresentam, normalmente, um elevado custo e podem causar grandes desastres em caso de ruptura. Por isso, torna-se importante uma análise a fim de prevenir as possíveis falhas na estrutura.

Dentre as utilizações do concreto massa destacam-se as barragens, que geralmente utilizam esse material. O Brasil tem previsão de construção de algumas grandes barragens, principalmente na região norte onde serão construídas as usinas de Belo Monte e do complexo Tapajós, que engloba cinco barragens. Visando o conhecimento dessas estruturas e uma futura aplicação dos estudos apresentados, no item 2.3, há uma breve definição e estudo dessas construções.

2.2 CONCRETO MASSA

O concreto massa é qualquer volume de concreto com dimensões grandes o suficiente que requeiram medidas a serem tomadas para superar a geração de calor de hidratação do cimento reduzindo a mudança de volume para minimizar a fissuração (ACI, 2005).

O aspecto fundamental do concreto massa é o comportamento térmico. O projeto desse tipo de estrutura busca evitar o aparecimento ou controlar a abertura e espaçamento das fissuras. Sabe-se que uma peça de concreto tem restrições, as quais podem ser de origem interna ou externa. Para o estudo de barragens a restrição interna é o que gera as fissurações pelo aquecimento devido a hidratação do cimento, portanto, será o componente de estudo deste tópico.

A restrição interna se origina do fato de que, quando a superfície externa do concreto pode perder calor para o ambiente, se desenvolve um diferencial de temperatura entre o exterior frio e o interior quente do elemento de concreto, não sendo o calor dissipado para o exterior de modo suficientemente rápido em vista da baixa difusividade térmica do concreto. Como resultado as deformações de origem térmica são diferentes nas diversas partes do elemento de concreto. A restrição da dilatação resulta em tensão de compressão em uma parte do elemento e tração em outra. Surgem fissuras na superfície se, devido à contração do exterior do elemento, a tensão de tração na superfície for maior do que a capacidade de deformação (Neville, 1997).

Segundo o International Commission on Large Dams (2009) o concreto massa difere do concreto estrutural na medida em que é colocado em seções de espessura onde o calor de hidratação dissipa lentamente e o gradiente térmico pode induzir aberturas no concreto.

As fissuras no concreto massa são prejudiciais e são causadas principalmente por tensões de tração desenvolvidas em resposta à retração térmica em combinação com restrição de mudança de volume do concreto. O gradiente de temperatura pode ser reduzido proporcionando a diminuição do pico da temperatura do concreto e utilizando um concreto com baixas propriedades de contração térmica. A temperatura máxima é dependente da temperatura de lançamento do concreto, do calor de hidratação e da perda ou ganho de calor pelo ambiente.

Além das fissuras térmicas, que podem ter consequências graves para o desempenho de uma estrutura, fissuras por outras causas também podem ocorrer, como é o caso da retração por secagem, que normalmente não é significativo em concreto massa.

O concreto massa deve ser especificado e controlado para que efeitos adversos não induzam a aberturas de fissuras na estrutura. Juntas podem ser fornecidos em barragens de gravidade para reduzir o tamanho dos blocos para uma dimensão tal onde a fissuração térmica seja evitada por meios de procedimentos construtivos.

Para tentar reduzir a geração de calor interno do concreto algumas medidas ou artifícios podem ser adotados:

- Escolher um cimento Portland com uma composição química que resulte um desprendimento lento de calor. Nesse caso é recomendável cimentos com adições que reagem mais lentamente, reduzindo os efeitos térmicos. Os cimentos recomendados para esse tipo de estrutura são os cimentos CP III - Cimento Portland de alto-forno, que possui de 35% a 70% de escória (NBR 5735, 1991), e o cimento CP IV - Cimento Portland pozolânico, no qual o teor de materiais pozolânicos secos deve estar compreendido entre 15% e 50% da massa total de aglomerante (NBR 5736, 1991). Esses cimentos possuem um menor teor dos compostos que se hidratam mais rapidamente, C_3S e C_3A , tendo uma evolução mais lenta da resistência, mas que não altera a resistência final. Faria (2004) mostra a diferença de temperatura adiabática atingida para diferentes tipos de cimento, ou seja, temperatura máxima do concreto sem a ocorrência de trocas térmicas. Isso pode ser visto na figura 2.1.

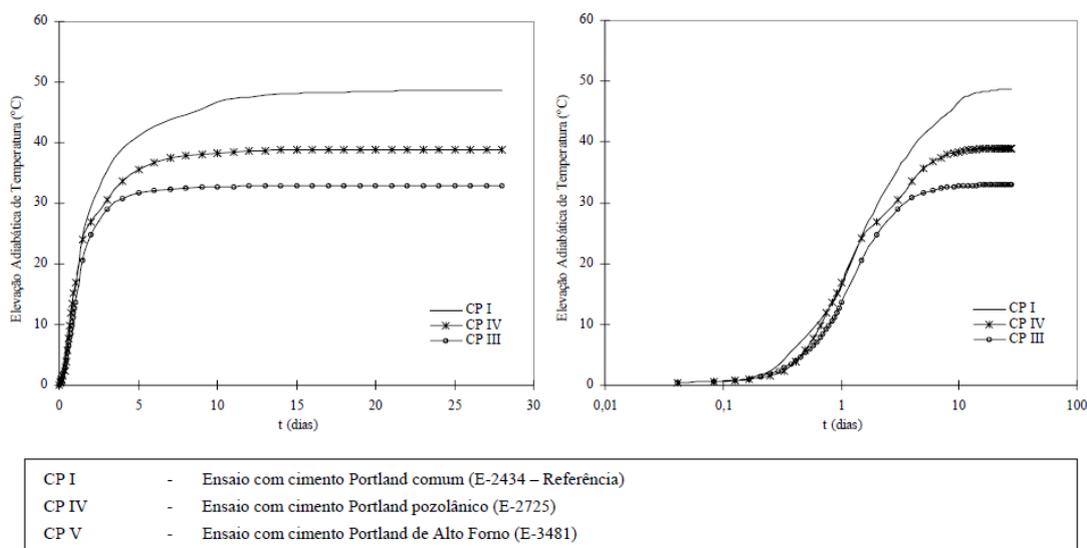


Figura 2.1 – Calor de hidratação para os diferentes tipos de cimento (Faria, 2004).

- O uso de agregado com um tamanho máximo grande, 75 mm ou mesmo 150 mm, permite uma redução do teor de água na mistura. A relação água/cimento pode ser alta (até 0,75), pois em estruturas como barragens de gravidade, a resistência do concreto tem pouca importância estrutural (Neville, 1997).

Gadja e Vangeem (2002) também relatam que quando o agregado escolhido tem baixa expansibilidade térmica, como é o caso do granito, há um maior gradiente térmico. A figura 2.2 mostra a máxima diferença de temperatura para concretos devido à mudança de agregados, uma vez que a expansibilidade do concreto é diretamente proporcional a expansão térmica do agregado.

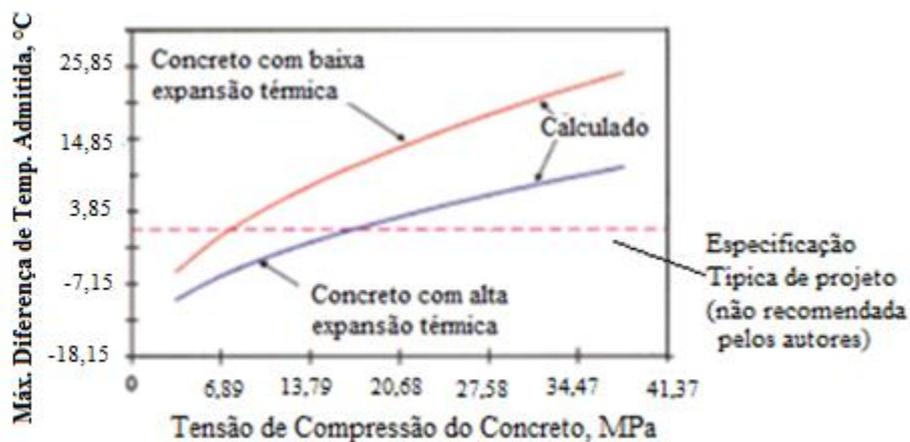


Figura 2.2 - Efeito do agregado sobre a máxima diferença de temperatura admissível (modificado - Gadja e Vangeem, 2002).

- O isolamento da superfície também é uma técnica que propicia a redução da taxa de resfriamento, pois a fissuração acontece pela diferença de temperatura entre o interior e a superfície. A isolação deve controlar a perda de calor por evaporação, por condução e por radiação.

O objetivo do isolamento superficial não é restringir a elevação de temperatura, mas regular a taxa de queda de temperatura de forma que as diferenças de tensão, devidas a altos gradientes de temperaturas entre a superfície do concreto e seu interior, sejam reduzidas (Mehta e Monteiro, 2008).

Choktaweekarn e Tangtermsirikul (2010) mostraram em um gráfico a variação da temperatura com o tempo, conforme a figura 2.3. Na superfície, por volta de 4,6 dias, observa-se uma queda de temperatura. Esta queda é devido a retirada do

isolamento da superfície. Logo, percebe-se que a partir desse momento pode haver um aumento no gradiente térmico.

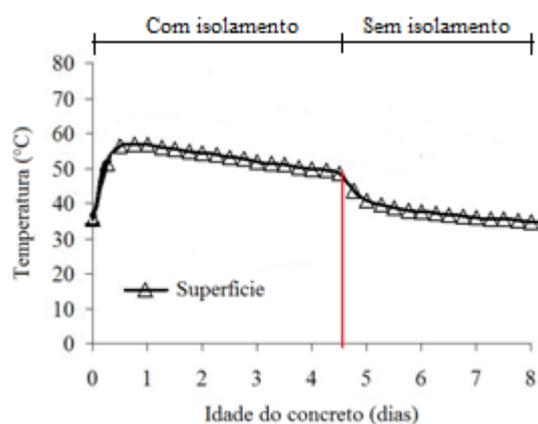


Figura 2.3 – Temperatura na superfície de um bloco de concreto (modificado - Choktaweekarn e Tangtermsirikul, 2010).

- Outra forma de redução do calor de hidratação é o processo de pré-resfriamento do concreto. As formas de resfriamento do concreto incluem o sombreamento e a aspersão de água nas pilhas de agregados, uso de água gelada, substituição da água da mistura por gelo e a o uso do nitrogênio líquido. O resfriamento dos agregados tem um grande efeito visto que representam de 70 a 85% do peso do concreto. O uso do nitrogênio líquido tem permitido sucesso mas uma de suas desvantagens é o alto custo (Gadja e Vangeem, 2002).
- Existe também o processo de pós-resfriamento do concreto. Este consiste em tubos de refrigeração que são inseridos no concreto massa para reduzir de forma rápida a temperatura interior, reduzindo a temperatura máxima atingida por esse concreto. Este método tem um alto custo inicial e operacional, mas apresenta resultados muito satisfatórios na redução de temperatura. A figura 2.4 mostra a redução média de temperatura no concreto massa com a presença dos tubos de resfriamento (Gadja e Vangeem, 2002).

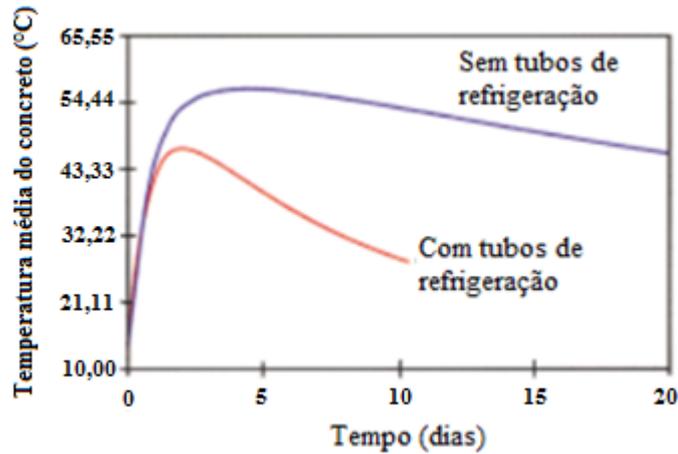


Figura 2.4 – Efeito dos tubos de resfriamento interno (modificado - Gadja e Vangeem, 2002).

Choktaweekarn e Tangtermsirikul (2010) fizeram um trabalho mostrando resultados analíticos para as variações de temperatura em diferentes regiões de um bloco de concreto (topo, centro e região inferior), apresentando também o estudo das variações de temperatura para diferentes espessuras de concreto. Os resultados foram encontrados com a utilização do método dos elementos finitos.

A figura 2.5 *a* mostra a variação da temperatura para diferentes espessuras do concreto, por exemplo, $d0.5$ = espessura da camada igual a 0,5 m. Na figura 2.5 *b*, apresenta-se a curva da temperatura máxima atingida de acordo com a espessura da camada.

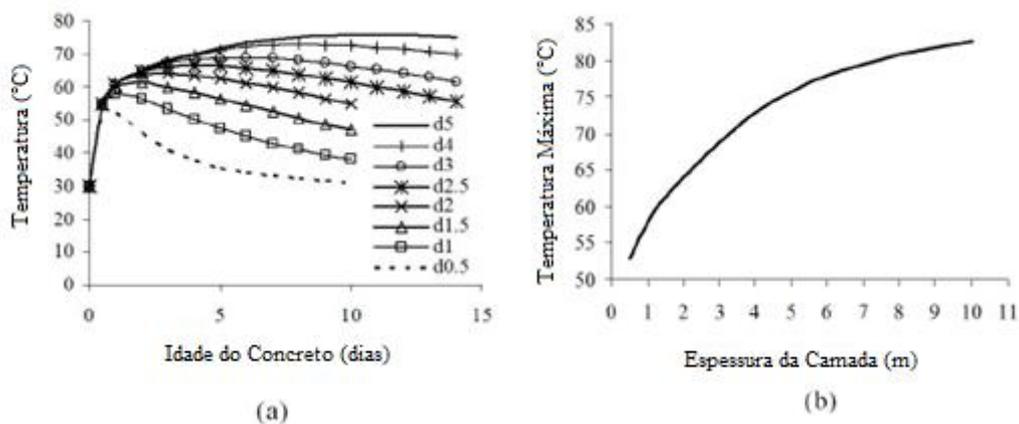


Figura 2.5 - Variação da temperatura do concreto para diferentes espessuras do concreto (Choktaweekarn e Tangtermsirikul, 2010).

Dessa forma, pode-se notar que a temperatura do concreto varia com a espessura da camada e com a variação do tempo. Quanto mais espessa a camada, maior será a temperatura máxima atingida na reação de hidratação do cimento. A variação de temperatura também muda com a região do concreto analisada, como pode ser notado na figura 2.6. Para o centro da estrutura têm-se as maiores temperaturas atingidas, enquanto no topo acontece o inverso. Isso resulta num gradiente de temperatura para o concreto que é o responsável pela fissuração, por isso o isolamento térmico da superfície no processo de cura é importante. Choktaweekarn e Tangtermsirikul (2010) comentaram e mostraram ainda no seu trabalho que a fissuração foi mais perceptível quando foi retirado esse isolamento, ou seja, por volta de 4,6 dias.

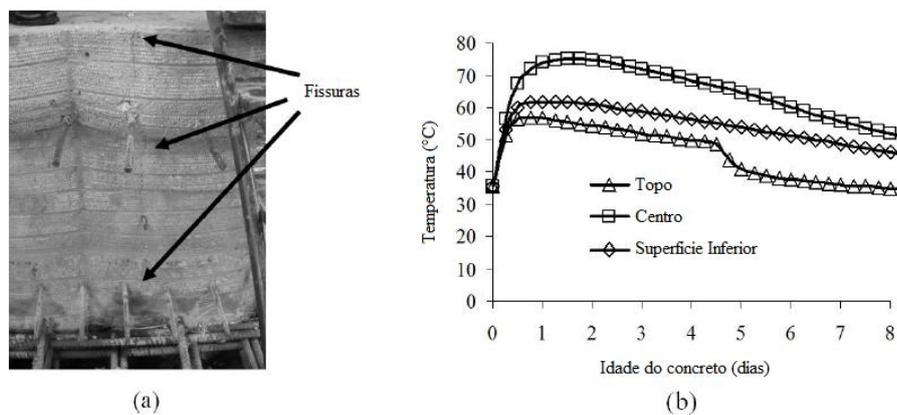


Figura 2.6 - Variação da temperatura em relação do tempo para diferentes posições no concreto (Choktaweekarn e Tangtermsirikul, 2010).

2.3 DEFINIÇÃO DE BARRAGENS

Com os problemas de aquecimento global e de aumento da população do planeta é necessário que haja uma preocupação com a diminuição do consumo e com a retenção de água doce. Apesar da Terra ser parcialmente coberta por água, apenas 2,5% corresponde à água doce, dentre os quais 0,3% são armazenados em rios, 30,8% no lençol freático e 68,9% estão em geleiras ou coberturas de neve (CBDB, 2008).

Segundo a Lei 12.334 (2010), barragem é qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas.

Barragens são barreiras ou estruturas que cruzam córregos, rios ou canais para confinar e assim controlar o fluxo da água. Podem variar de pequenos maciços de terra a enormes estruturas de concreto, geralmente usadas para fornecimento de água, energia hidrelétrica e irrigação (CBDB, 2008).

Para o Ministério da Integração Nacional, barragem é qualquer obstrução em um curso permanente ou temporário de água, ou talvegue, para fins de retenção ou acumulação de substâncias líquidas ou misturas de líquidos e sólidos, compreendendo a estrutura do barramento, suas estruturas associadas e o reservatório formado pela acumulação. Diques para proteção contra enchentes e aterros-barragem de estradas também se incluem nessa definição.

Pedroso (2002), também afirma que uma das formas mais tradicionais de armazenar água é a construção de barreiras em rios que apresentem potencial hidráulico, ou seja, vazão adequada que permita a acumulação de água, e essas barreiras são conhecidas como barragens.

Várias são as definições de barragens, no entanto, elas se resumem a dizer que uma barragem é uma estrutura criada para reter água, podendo esta ser consumida ou utilizada por um período de tempo prolongado.

As barragens de gravidade são os tipos mais comuns e que requerem a menor manutenção, se adaptam em qualquer localidade, mas tem limitações de altura com relação à base e à fundação (Creager, 1964). A figura 2.7 mostra a barragem de Tucuruí que é do tipo gravidade.



Figura 2.7 – Barragem de Tucuruí do tipo gravidade.

(FONTE: <http://www2.transportes.gov.br/bit/hidrovias/barragens/tucurui.htm>)

A Eletrobrás (2000) diz que este tipo de barragem é capaz de resistir, com seu peso próprio, à pressão da água do reservatório e à subpressão das águas que se infiltram pelas fundações.

2.4 AS BARRAGENS DE GRAVIDADE E AS FISSURAÇÕES

As barragens de gravidade, como relatado no parágrafo anterior, são formadas por grandes maciços de concreto. Para grandes volumes de concreto, dá-se o nome de concreto massa. O concreto massa apresenta características diferenciadas do concreto convencional, visto que sua resistência está mais associada à própria massa do concreto.

Dentre os problemas existentes nesse tipo de barragem, uma das grandes preocupações das empresas construtoras é com o efeito térmico que levam às fissurações. As tensões de origem térmica podem ser devidas a variações de temperaturas atmosféricas ou temperaturas internas.

As variações de temperatura no concreto endurecido originam mudanças de forma e volume. Se tais mudanças são impedidas pela vinculação da estrutura da obra, resultam tensões que podem produzir a fissuração do concreto. Se as alterações de volume ou de forma não se podem fazer livremente, aparecem tensões e talvez fissuras (Castro e Martins, 2006).

As fissuras de retração de origem interna também são conhecidas como fissuras devido a ações térmicas autógenas. Estão associadas à liberação de calor das reações de hidratação do cimento que são exotérmicas. Estas fissuras ocorrem nas primeiras idades do concreto durante o processo de resfriamento do mesmo. O resfriamento provoca a contração da peça que, quando impedida, leva à fissuração. Este fenômeno que ocorre com frequência em obras que envolvem grande volume de concreto como as barragens tem sido também detectado em obras de pontes (Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - DNER, 1994).

Ainda segundo o DNER (1994), a variação da temperatura ambiente provoca movimentação de contração e dilatação nas peças das estruturas, que se impedidos geram fissuras.

As barragens são estruturas que requerem dispendiosos custos financeiros, grandes mobilizações sociais, ambientais e econômicas. Além de que, um acidente com barragens pode provocar danos desastrosos e pode por em risco inúmeras vidas humanas.

Dessa forma, há uma necessidade de ações preventivas, visando à segurança dessas estruturas. O estudo do calor de hidratação é uma forma de entender o que acontece dentro de uma estrutura de concreto massa. A evolução térmica pode levar a um gradiente de temperatura que ocasiona fissuras destrutivas para as barragens. Ressalta-se que o estudo do calor de hidratação em concreto massa é aplicável em qualquer estrutura que faça o uso desse material durante a construção.

Para o estudo das fissurações em barragens é necessário estudar as propriedades físicas, mecânicas e térmicas do concreto. Essas características serão relatadas no tópico a seguir.

2.5 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO

Para a análise e entendimento dos efeitos térmicos no concreto é necessário antes conhecer suas propriedades físicas e mecânicas. Para o conhecimento dos estados tensionais do material faz-se inicialmente um estudo dos processos de tração, compressão e deformação do concreto, buscando, dessa forma, perceber a influência da temperatura nesses estágios de tensão, uma vez que a hidratação do cimento, e outros efeitos térmicos associados, podem acelerar esses processos físicos e mecânicos e ajudar no surgimento de patologias. Assim, serão comentados, de forma breve, cada um desses processos.

- **Resistência à compressão** - segundo Mehta e Monteiro (2008), a resistência à compressão do concreto depende de vários fatores que influenciam em sua porosidade. Esses fatores são a relação água/cimento, o teor de ar incorporado, o tipo de cimento utilizado, as características dos agregados, o uso de aditivos, as condições de cura, desenvolvimento da idade de hidratação do concreto. Na compressão, é necessário um maior gasto de energia para gerar e aumentar fissuras existentes na matriz.
- **Resistência à Tração** - a fissuração do concreto é frequentemente consequência de uma ruptura por tração; a retração geralmente ocorre devido à redução da

temperatura do concreto ou à secagem do concreto úmido. Para estruturas de concreto geralmente se utiliza o aço para absorver as cargas de tração, no entanto, essa solução é impraticável em estruturas de concreto massa, tais como barragens (Mehta e Monteiro, 2008). É importante ressaltar também que no concreto massa a análise tensional devido ao problema térmico está relacionada com a resistência à tração. Deve-se lembrar ainda que os fatores que influenciam na resistência à compressão também influenciam a tração.

- **Deformação do Concreto** - as deformações no concreto podem levar às fissurações, sendo preocupante no caso das barragens. Elas ocorrem devido ao comportamento do material com relação às cargas externas ou como resposta às ações ambientais. Geralmente, em peças espessas, a retração por secagem é um fator menos importante que a contração térmica.

Com relação às fissurações, Skumautz (2006) comentou que as micro-fissuras do concreto aparecem devido à relação entre as forças internas e a rigidez dentro do concreto. Sabendo-se que a resistência da matriz do concreto é menor que a dos grãos do agregado, surgem micro-fissuras ao redor dos grãos. Com o aumento da tensão, essas micro-fissuras se ligam e formam fissuras macroscópicas, que podem levar ao surgimento de trincas. A figura 2.8 mostra esse processo.

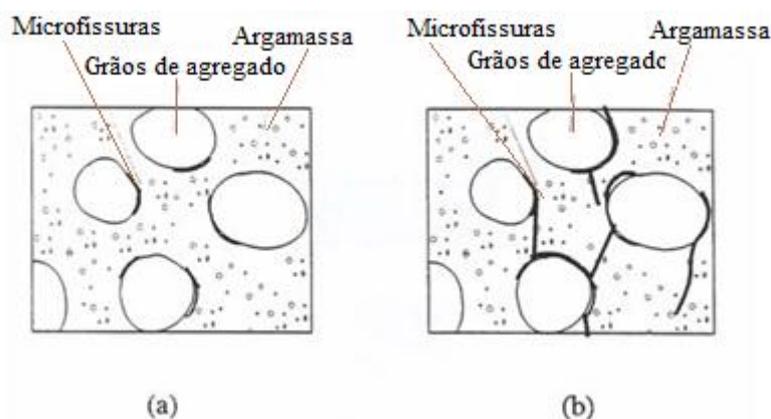


Figura 2.8 – a) Surgimento de micro-fissuras; b) Micro-fissuras se ligam e formam macro-fissuras. (Skumautz, 2006).

2.6 PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO

É necessário ter o conhecimento das propriedades térmicas do concreto para entender o seu comportamento. O estudo da massa e do calor específico, da condutividade e da difusividade térmica são importantes para o desenvolvimento de gradientes de temperatura, deformações térmicas, empenamento e fissuração nas primeiras idades do concreto e também para a isolamento térmica proporcionada pelo serviço do concreto. A seguir apresentam-se suas definições resumidamente:

- **Massa específica (ρ)** – A massa específica é a relação entre a massa de um corpo sobre o volume que esse mesmo corpo ocupa. Desta forma pode-se dizer que a densidade mede o grau de concentração de massa em determinado volume. É influenciada pelo teor de água e de finos, pelos agregados utilizados e pelo índice de vazios. Quanto menor a quantidade de água e teor de pasta na mistura maior será a massa específica.

A massa específica do concreto no estado fresco pode ser um importante indicador das características que este apresentará no estado endurecido.

O aumento de temperatura é dado com o aumento da massa específica do concreto.

- **Condutividade térmica (k)** - capacidade do material conduzir calor, é definido como a relação entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura. A condutividade térmica depende da composição do concreto e o aumento da umidade também eleva o seu valor (Neville, 1997).

Mehta e Monteiro (2008) diz que a condutividade térmica fornece o fluxo de calor transmitido através de uma unidade de área de um material sob uma unidade de gradiente de temperatura unitária. É influenciada pelas características mineralógicas do agregado e pelo teor de umidade, densidade e temperatura do concreto.

De acordo com Andrade (1997), essa condutividade tem valores que variam de 1,4 a 3,6 (W/m.K). Khan (2001) mostrou que a condutividade térmica do concreto é influenciada pelo teor de umidade e pelo agregado, afirmando que quanto maior o teor de umidade e a condutividade térmica do agregado, maior será a condutividade térmica do concreto.

A temperatura do concreto será maior quanto maior for a condutividade térmica do concreto.

- **Calor Específico (c)** - é um parâmetro físico que expressa à capacidade de um material armazenar calor. O calor específico corresponde à quantidade de calor necessária para elevar em um grau a temperatura de uma unidade de massa. Valores típicos do calor específico para concretos normais estão entre 0,84 e 1,26 kJ/(kg·K) (Faria, 2004).

Andrade (1997) afirma que o calor específico aumenta com o aumento da temperatura, com a diminuição da massa específica do concreto e com o acréscimo de umidade, atingindo um valor máximo para o concreto saturado, diminui com o aumento da dimensão máxima característica do agregado graúdo e é pouco alterado pela composição mineralógica do agregado.

A temperatura do concreto será maior quanto menor for o valor do calor específico do concreto.

- **Difusividade térmica (δ)** - representa a velocidade à qual a temperatura varia no interior de uma massa, sendo, portanto um índice da facilidade com a qual o concreto pode sofrer variações de temperatura.

De acordo com a NBR 12818 (1993) a difusividade térmica é a propriedade que expressa a capacidade de difusão de calor em todas as direções e indica a facilidade com que o concreto tolera variações de temperatura.

É influenciada pelo teor de umidade do concreto, que depende do teor inicial de umidade da mistura, do grau de hidratação do cimento e da exposição à secagem. Os valores estão entre 2 a 6 (10^{-3} m²/h). A difusividade térmica é calculada de acordo com a equação 2.1.

$$\delta = \frac{k}{c\rho} \quad (2.1)$$

Onde:

- ✓ k = condutividade térmica;
- ✓ c = calor específico;
- ✓ ρ = massa específica do concreto – para efeito de cálculo pode-se adotar para o concreto simples valor 2 400 kg/m³ e para o concreto armado 2 500 kg/m³ (NBR 6118, 2007).

A difusividade do concreto é um índice da facilidade com que o concreto vai sofrer mudança de temperatura. Embora desejável do ponto de vista de calor, não é possível selecionar agregados, areia e cimento para um concreto com base em

características térmicas. As propriedades térmicas do concreto devem, portanto, ser aceitas por aquilo que são (Townsend, 1981).

A difusividade varia de acordo com os diferentes tipos de agregado, aumenta com o aumento da dimensão e do volume do agregado, reduz com o aumento do fator água/cimento e aumenta com o aumento da temperatura (Andrade, 1997).

A variação da condutividade, difusividade e calor específico do concreto com a temperatura é pouco significativa em relação ao intervalo de temperaturas existentes no caso de barragem de concreto na fase de construção (Santos, 2004).

Neville (1982) afirma que a reação de hidratação dos compostos do cimento é exotérmica, assim como muitas outras reações químicas, chegando a liberar energia de até 500 J/g de cimento. A condutividade térmica do concreto é relativamente pequena. Sendo assim, ele pode comportar-se como um isolante e, no interior de grandes massas de concreto, a hidratação pode resultar em grandes elevações de temperatura.

2.7 EFEITOS TÉRMICOS EM BARRAGENS

Em uma barragem de concreto o efeito, da hidratação do cimento produz uma reação exotérmica com uma elevação significativa da temperatura desse material. Além do calor de hidratação existem outros fenômenos térmicos que atuam diretamente em uma barragem: a radiação solar, a condução e a convecção. A figura 2.9 representa o fluxo de calor que ocorre em uma barragem.

A barragem gera calor nos primeiros tempos de sua existência, conduz calor através de sua massa; recebe, emite e reflete calor através de suas faces e, após certo tempo, atinge sua temperatura de equilíbrio. Esta temperatura só pode ser atingida depois de dissipado o calor de hidratação do cimento, quando o calor absorvido em épocas quentes é igual ao perdido durante épocas frias. Nessa altura, a temperatura de cada ponto no interior da barragem, embora sofrendo variações, mantém um valor médio ao longo do tempo, que é a temperatura de equilíbrio (Silveira, 1961).

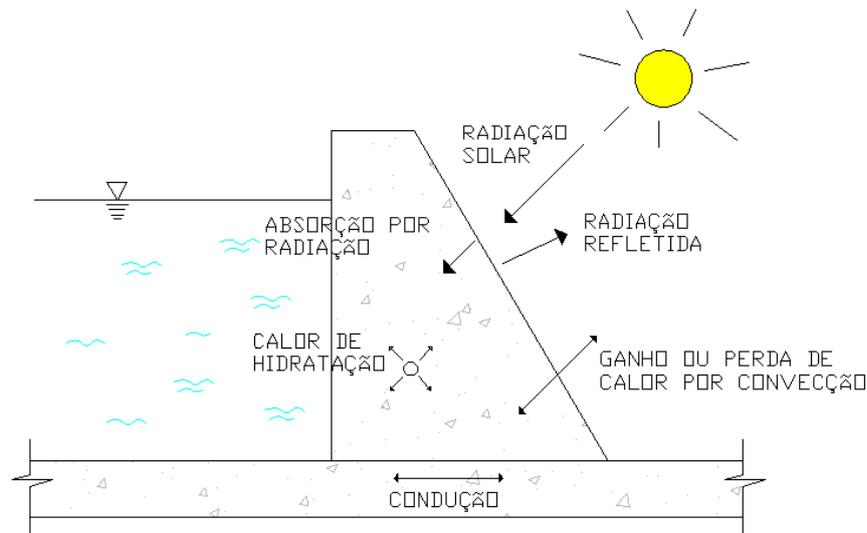


Figura 2.9 – Fluxo de calor em barragem.

As variações de temperatura dão origem a variações de forma e volume de um material que podem produzir tensões. No caso do concreto, quando essas tensões são de tração em uma barragem, são extremamente inconvenientes, uma vez que podem fissurar a barragem causando danos à estrutura.

As tensões de origem térmica dependem, principalmente, da temperatura, do coeficiente de dilatação do material, das constantes elásticas e inelásticas do material e das formas da barragem e suas ligações (Silveira, 1961).

Para um maior entendimento das transmissões de calor em barragem, a seguir são estudados separadamente cada um desses processos, de forma que possa ficar mais claro a influência de cada um deles na alteração da temperatura e nos métodos de transferência de calor.

- **Radiação** - de acordo com Silveira (1961), radiação térmica é o processo de emissão, por um corpo, de energia radiante cuja quantidade depende da temperatura do corpo. O conhecimento da radiação solar é indispensável para determinar as temperaturas das superfícies da barragem, ou melhor, a elevação da temperatura dessas superfícies em relação à temperatura do ar.

Dependendo do material do corpo, a radiação solar recebida pode ser parte refletida e outra parte absorvida, o que aumenta sua temperatura. Quanto mais escura uma

superfície maior será a absorção por ela adquirida sendo que a cor preta absorve totalmente a radiação imposta. Também influencia na quantidade de calor absorvido a inclinação dos raios solares. De acordo com Incropera *et al* (2008) e Silva (2003), a equação que governa o fenômeno da energia de calorífica transmitida pelo corpo negro com temperatura maior que o zero absoluto é dada pela equação 2.2:

$$Q_r = \sigma * A * T^4 \quad (2.2)$$

Onde:

- ✓ Q_r é a quantidade de calor obtida por radiação;
- ✓ A é a área da superfície;
- ✓ T é a temperatura;
- ✓ σ é a constante de Stefan-Boltzmann, sendo:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Os corpos reais emitem radiação inferior a dos corpos negros e o calor transferido por radiação de T_1 para o corpo negro que esteja em T_2 será:

$$Q_r = \sigma * A * \varepsilon * (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.3)$$

Em que:

- ✓ ε é a emissividade da superfície;
- ✓ T_1 é a temperatura do corpo 1;
- ✓ T_2 é a temperatura do corpo 2.

Analisando o concreto, como também outras estruturas expostas ao ambiente, durante as horas diurnas existe um ganho de energia calorífica. Tal fato é resultado da radiação solar incidente sobre as superfícies da mesma, a qual absorve parte desta energia. Contrariamente, no período noturno, ocorre uma perda de energia calorífica armazenada pela estrutura, devido, em parte, a re-radiação emitida por esta ao ambiente (Calmon, 1995 *apud* Santos, 2004).

O autor também ressalta que as temperaturas não muito altas dos efeitos da radiação térmica não são muito significativos e podem ser desprezados na modelação do fenômeno físico.

- **Convecção** - é a troca de calor através do movimento de um fluido. A quantidade de calor que passa de um sólido para um fluido ou que um fluido cede a um sólido é diretamente proporcional ao gradiente térmico da superfície do sólido. Para que ocorra a convecção é necessário que ocorra uma diferença de temperatura entre o fluido e o corpo. O fenômeno também é influenciado pela velocidade de deslocamento do fluido, pela densidade, viscosidade, calor específico e condutividade térmica do fluido, e ainda da natureza, forma, rugosidade, dimensões e orientação do corpo (Silveira, 1961).

Existem dois tipos de convecção: a natural e a forçada. A primeira acontece quando o movimento do fluido se dá unicamente pela diferença de densidade, motivada pela diferença de temperatura. No caso da convecção forçada, agentes externos provocam o movimento do fluido, independente do fenômeno térmico.

Em relação a um corpo colocado ao ar, o vento pode ser a causa que confere o caráter de forçada à convecção. No caso do estudo dos problemas térmicos relativos às barragens de concreto, observa-se convecção forçada sempre que correntes de ar devidas ao vento atuam sobre sua superfície (Santos, 2004).

O autor afirma ainda que o mecanismo de transferência de calor por convecção, em geral, é bastante complexo e depende de numerosos fatores tais como:

- ✓ Diferença de temperatura entre o fluido e o corpo;
- ✓ Velocidade de deslocamento do fluido;
- ✓ Densidade, viscosidade, calor específico e condutividade térmica do fluido;
- ✓ Natureza, forma, rugosidade, dimensões e orientação do corpo.

Esses fatores podem variar de forma aleatória, dependendo de onde a estrutura está localizada, evidenciando a complexidade de se avaliar analiticamente esse mecanismo de transmissão de calor.

A Lei de Newton diz que, supondo um corpo sólido mergulhado num fluido, em que T_s é a temperatura da superfície e $T_{f,\infty}$ é a temperatura do fluido perturbado distante da superfície transmissora de calor, A é a área da superfície, e h_c é o coeficiente de convecção, a quantidade de calor transmitida no tempo, Q_c , é dada pela equação 2.4:

$$Q_c = h_c * A * (T_s - T_{f,\infty}) \quad (2.4)$$

Lembrando que o coeficiente h_c é dado em função da velocidade do vento.

Se Q_c for dividido pela área superficial A encontra-se o fluxo de calor transferido por convecção q_c .

- **Condução** - o processo de condução de calor ocorre através de um material, geralmente em sólido, podendo ocorrer também em fluidos. De acordo com Santos (2004), na condução, a energia calorífica se transmite das moléculas com maior energia cinética (maior temperatura) às moléculas com menor energia cinética (menor temperatura), sem que haja transferência de massa.

Ressalta ainda que o calor transferido unicamente por condução é muito pequeno e difícil de quantificar, sendo comum admitir que a transferência de calor por convecção e por condução seja analisada conjuntamente, assumindo um único coeficiente de transferência de calor, o qual dependerá das variáveis que intervêm no fenômeno da convecção: velocidade do vento, temperatura na superfície e temperatura ambiente do ar. Assim, admitindo-se que os diferentes mecanismos de transferência de calor podem se agrupar assumindo um coeficiente de transmissão global, h , conforme a equação 2.5:

$$h = h_c + h_r \quad (2.5)$$

- **Calor de hidratação** - o cimento, na reação de hidratação, é responsável por uma grande liberação de calor, que muda de acordo com a idade do concreto, o chamado calor de hidratação, medido em calorias por grama. A quantidade de calor desenvolvida depende dos diferentes componentes do cimento e de outros fatores: a finura do cimento, a relação água-cimento, a temperatura inicial (Silveira, 1961). Carvalho (2002) declara que a reatividade dos compostos do cimento com a água varia consideravelmente, sendo possível modificar as características de desenvolvimento de resistência, e por conseqüência o desenvolvimento de calor de hidratação, alterando-se as quantidades dos compostos do cimento, os quais são mostrados na tabela 2.1; sendo o C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF os componentes mais importantes do cimento. Dessa forma, podem-se produzir cimentos com características diferentes, como os de alta resistência inicial, de baixo calor de hidratação, alta resistência a sulfatos, etc. Os mais utilizados no Brasil são mostrados na tabela 2.2.

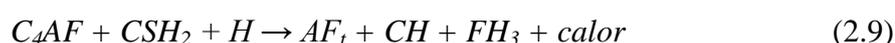
Tabela 2.1 - Simbologia dos óxidos e compostos do cimento (Carvalho, 2002).

Óxidos	Abreviação	Compostos	Abreviação
CaO	C	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
SiO ₂	S	2CaO.SiO ₂	βC ₂ S
Al ₂ O ₃	A	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M	4CaO.3Al ₂ O ₃ .SiO ₃	C ₄ A ₃ S
SO ₄	S	3CaO.2SiO ₂ .3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
H ₂ O	H	CaSO ₄ .2H ₂ O	CS H ₂

Tabela 2.2 – Cimentos utilizados no Brasil.

Cimento	Abreviação	Norma
Portland comum	CP I	NBR 5732
Portland composto com escória	CP II - E	NBR 11578
Portland composto com pozolana	CP II - Z	
Portland composto com filler	CP II - F	
Portland de alto forno	CP III	NBR 5735
Portland pozolânico	CP IV	NBR 5736
Portland de alta resistência inicial	CP V - ARI	NBR 12989

Faria (2004), afirma que a reação de hidratação é na realidade a composição de diversas reações de hidratação, podendo ser apresentadas, esquematicamente, sob a forma das equações 2.6 a 2.9 abaixo:



onde o *H* representa a água; o *C-S-H* os hidratos de silicato de cálcio hidratado; o *CH*, o hidróxido de cálcio ou Portlandita; e o *AF_t* simboliza a etringita.

Com a introdução da água, os componentes do cimento começam a se hidratar. Os produtos formados em sua maioria são os silicatos de cálcio hidratado (CSH). A

medida em que se desenvolvem mais CSH a mistura ganha resistência. Imediatamente após a introdução da água na mistura de cimento, um pequeno período de intensa atividade química ocorre. Esta atividade química corresponde à dissolução dos íons, reação da água com o C₃A, na qual ocorre a liberação de uma grande quantidade de calor (Carvalho, 2002).

O grau de dependência entre as reações dos minerais de clínquer ainda deixa muitos fatos inexplicados e, até agora, é difícil avaliar quantitativamente as possíveis causas e seus graus de influência. Apesar disso, é de consenso que concretos com cimentos de altos teores de C₃S e C₃A terão alta resistência inicial somada a uma grande liberação de calor durante a sua hidratação. Por outro lado, um concreto com alto teor de C₂S irá promover uma baixa resistência inicial, alta resistência a longo prazo e, ainda, baixa liberação de calor (Maekawa, 1999 *apud* Faria, 2004).

A figura 2.10 mostra a quantidade de calor desenvolvida por cada componente do cimento segundo estudos de Choktaweekarn e Tangtermsirikul (2010); e a figura 2.11 mostra a evolução da reação de hidratação no concreto segundo Faria (2004), o qual é descrito abaixo.

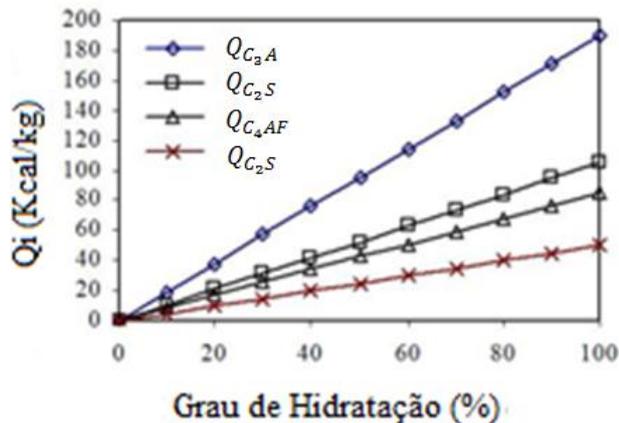


Figura 2.10 – Calor desenvolvido por cada componente de cimento (Choktaweekarn e Tangtermsirikul, 2010).

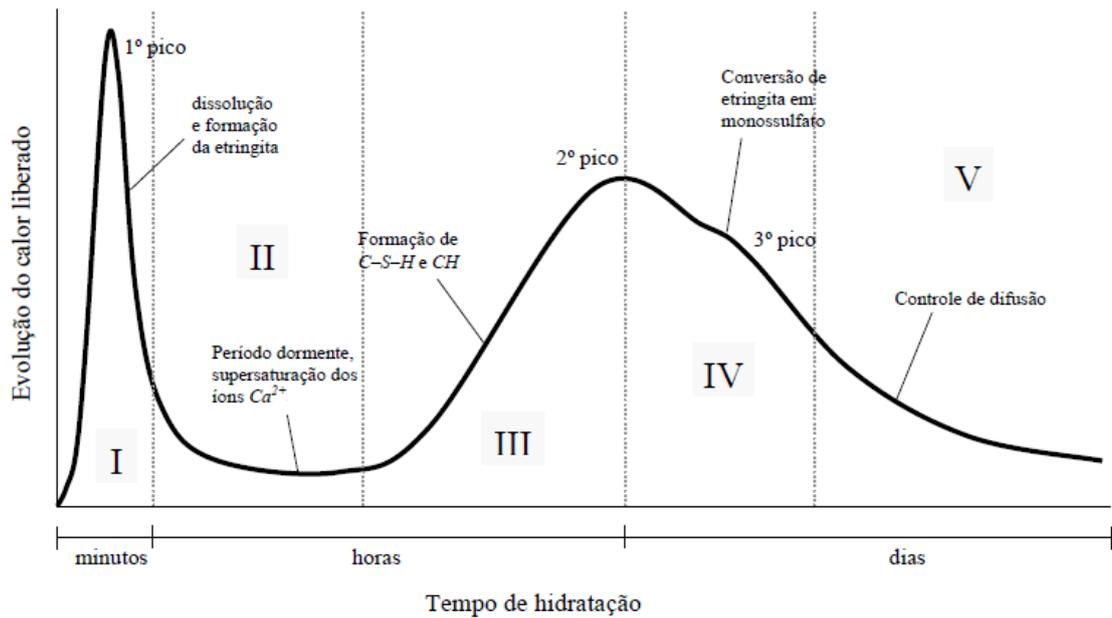


Figura 2.11 – Estágios do processo de hidratação do cimento (Faria, 2004).

Nos primeiros instantes (15 a 20 minutos), estágio I, o cimento começa a ser dissolvido na água liberando uma grande quantidade de calor, promovendo o primeiro pico exotérmico. Desta reação resulta uma camada de etringita. Logo após, a cristalização de Silicato de Cálcio Hidratado ($C-S-H$) e de Hidróxido de Cálcio (CH) começa. Este advento é seguido pelo estágio II (2 a 4 horas), chamado período dormente ou de indução, em que há baixa liberação de calor.

No estágio III (4 a 8 horas), ocorre a taxa máxima de reação, promovendo uma forte liberação de calor que dá origem ao segundo pico exotérmico. A pega chega ao final e o endurecimento se inicia.

Após o segundo pico exotérmico, ocorre a conversão da etringita em monossulfato consolidando o estágio IV (8 a 12 horas). No estágio V (12 a 24 horas), também chamado controle de difusão, a temperatura tem pouco efeito na hidratação.

- **Outros fatores** – conforme Silveira (1961) outros fatores afetam diretamente o estado térmico de uma barragem. Entre esses fatores podem citar-se os fatores climáticos que, de uma forma geral, influenciam as condições nos limites, as propriedades dos materiais que atuam sobre a difusão do calor na barragem e os métodos de construção que atuam, principalmente, sobre as condições iniciais. Dentre os fatores climáticos que interessa considerar tem-se a temperatura do ar, temperatura da água, velocidade do vento, ritmo de concretagem.

As leis de transferência de calor demonstram que em sistemas com fonte interna de calor, este pode fluir de um corpo, inversamente ao quadrado de sua menor dimensão. Considerando algumas paredes feitas com concreto normal e exposta ao ar em ambas as faces, temos que: para uma parede de 15 cm de espessura 95% do calor no concreto será perdido para o ar em 1h e 30 min. Para uma parede de 1,5 m de espessura, esta mesma proporção de calor seria perdida em uma semana. Para uma parede de 15 m de espessura, que poderia representar a espessura de uma barragem tipo arco, levaria 2 anos para dissipar 95% do calor armazenado, enquanto que para uma barragem de 152 m de espessura levaria 200 anos (Inoue, 1986).

A temperatura à qual ocorre a hidratação influencia bastante a velocidade de desprendimento de calor da reação (figura 2.12). Se as condições de contorno do sólido na qual se processa a hidratação não forem adiabáticas, pode-se dizer que a quantidade total de calor de hidratação não é a grandeza mais importante, mas sim, a velocidade com que esse calor é gerado. A mesma quantidade de calor, produzida em período longo, pode ser dissipado, por convecção ou condução, em maior quantidade com uma elevação final de temperatura do sólido conseqüentemente menor (Carvalho, 2002).

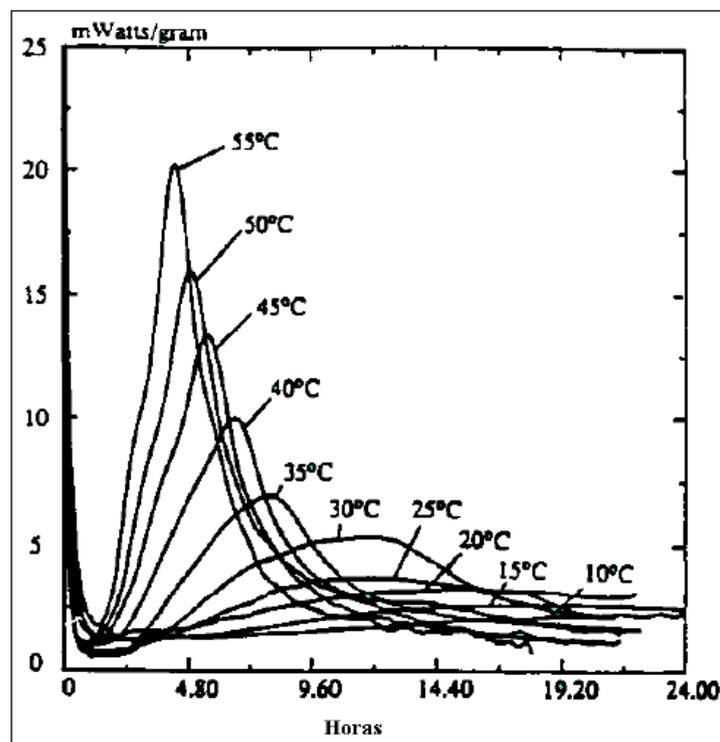


Figura 2.12 – Influência da temperatura na evolução de calor do cimento Portland (Pinto, 1997 apud Carvalho, 2002).

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 LEI DE FOURIER

O problema da transferência de calor no concreto é conduzido pela equação de Fourier. Para a compreensão do trabalho exposto a equação será deduzida a partir do princípio da Lei de Fourier (figura 3.1), lembrando que a dedução aqui apresentada é adaptada de Silveira (1961) e Incropera *et al* (2008), e que a equação mostrada é a mesma citada por outros autores em pesquisas recentes.

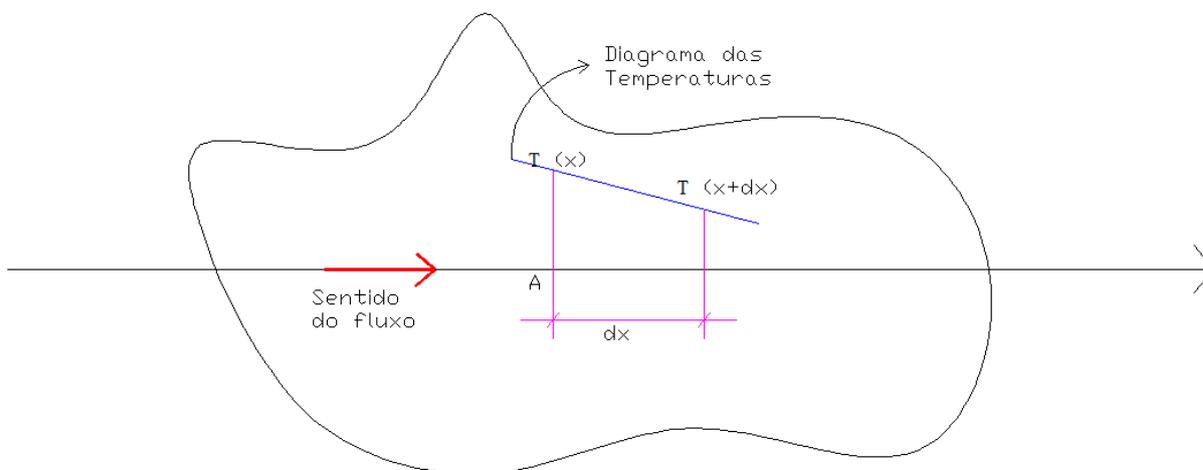


Figura 3.1 - Fluxo de calor que passa em uma superfície.

O fenômeno da condução do calor é regido pela Lei de Fourier, desenvolvida a partir de fenômenos observados, a qual estabelece que a quantidade de calor que passa através de uma área A , colocada normalmente à direção do fluxo calorífico, por unidade de tempo, é proporcional ao produto da área A pelo gradiente térmico, como mostra a equação 3.1.

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

Onde:

$\frac{dQ}{dt}$ = quantidade de calor que atravessa a área A na unidade de tempo, ou seja, taxa de transferência de calor;

A = área da seção transversal considerada;

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente térmico;

k = condutibilidade térmica, que representa a quantidade de calor que passa, perpendicularmente, através da unidade de superfície de uma substância, por unidade de tempo, quando existe uma diferença de temperatura unitária entre essa superfície e outra igual afastada de uma distância unitária.

O gradiente é considerado no sentido do fluxo, isto é, no sentido das temperaturas decrescentes. Assim, T diminui quando x aumenta e $\frac{dT}{dx}$ é negativo.

É importante ressaltar que na variação de temperatura existe o regime permanente, em que a variação de temperatura num ponto não depende do tempo, e o regime variável, em que a temperatura num ponto é dependente do tempo.

Supondo, agora, que a área A não é normal à direção do fluxo e que sua normal faz um ângulo α com aquela direção, tem-se a equação 3.2:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\alpha} = -kA \frac{dT}{dx} \cos \alpha \quad (3.2)$$

Sendo,

$$\frac{dT}{dx} \cos \alpha = \frac{dT}{dn}$$

Em que, $\frac{dT}{dn}$ é o gradiente segundo a normal A . Assim tem-se a equação 3.3:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\alpha} = -kA \frac{dT}{dn} \quad (3.3)$$

Sendo uma área A na direção do fluxo, tem-se a equação 3.4:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{90^{\circ}} = 0 \quad (3.4)$$

Pois, nesse caso, $\frac{dT}{dn} = 0$.

Ou seja, na direção normal à direção do fluxo, $dT = 0$; dessa forma, pode-se concluir que, os pontos situados sobre uma linha ou superfície normal à direção do fluxo tem as mesmas temperaturas. As linhas ou superfícies geométricas desses pontos chamam-se linhas ou superfícies isotérmicas.

Às envolventes das direções do fluxo chamam-se linhas de fluxo.

Chama-se também fluxo calorífico numa direção, q , à quantidade de calor que atravessa a unidade de superfície na unidade de tempo, conforme mostra a equação 3.5:

$$q = \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} = -k \frac{dT}{dn} \quad (3.5)$$

Sejam, agora, dois meios de condutibilidade térmica k_1 e k_2 , em contato, de tal forma que existe um fluxo do meio 2 para o meio 1. Suponhamos conhecer o ângulo α_2 e que queremos conhecer o ângulo α_1 , conforme a figura 3.2.

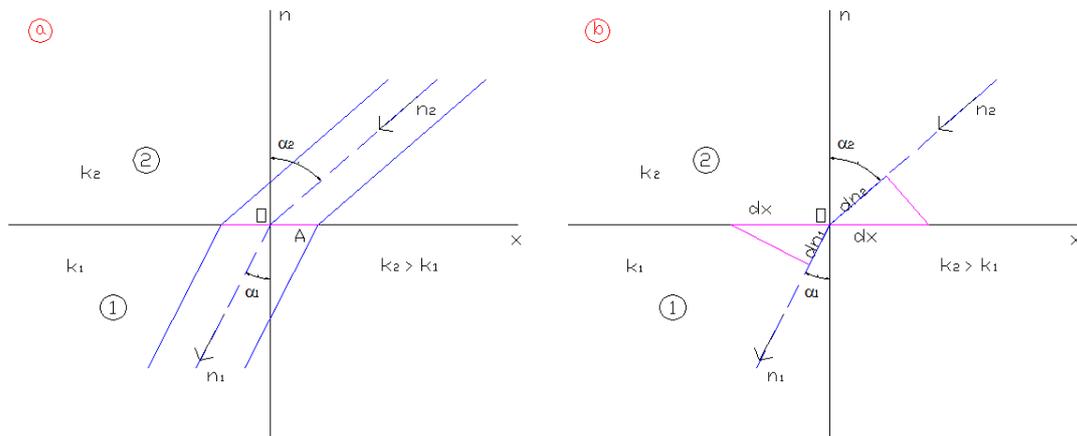


Figura 3.2 – a) Dois meios em contato pela superfície de área A; b) Fluxo de calor na direção da normal.

O fluxo que atravessa a área A, suposta pertencer ao meio 2, é dado pela equação 3.6:

$$q = -k_2 \frac{dT}{dn} = -k_2 \frac{dT}{dn_2} \cos \alpha_2 \quad (3.6)$$

Em que,

$$\frac{dT}{dn_2} = \text{gradiente na direção do fluxo.}$$

Se A pertence ao meio 1, tem-se a equação 3.7:

$$q = -k_1 \frac{dT}{dn} = -k_1 \frac{dT}{dn_1} \cos \alpha_1 \quad (3.7)$$

Fazendo $q = q$, obtém-se a equação 3.8:

$$-k_2 \frac{dT}{dn_2} \cos \alpha_2 = -k_1 \frac{dT}{dn_1} \cos \alpha_1 \quad (3.8)$$

Sabendo-se que:

$$dn_2 = dx \cdot \text{sen } \alpha_2 \quad (3.9)$$

$$dn_1 = dx \cdot \text{sen } \alpha_1 \quad (3.10)$$

Resulta:

$$\text{tg } \alpha_1 = \frac{k_1}{k_2} \text{tg } \alpha_2 \quad (3.11)$$

As linhas de fluxo aproximam-se da normal ao penetrarem no meio de menor condutibilidade térmica. Se a condutibilidade térmica do meio 1 for muito menor do que a do meio 2, as linhas de fluxo penetram no meio 1 quase normalmente à superfície de separação e esta será, assim, uma superfície isotérmica.

3.2 EQUAÇÃO GERAL DA CONDUÇÃO DE CALOR

Um dos principais objetivos da condução de calor é determinar o campo de temperatura em um meio resultante das condições impostas em suas fronteiras. Ou seja, deseja-se conhecer a distribuição de temperaturas, que representa como a temperatura varia com a posição no meio. Uma vez conhecida essa distribuição, o fluxo de calor por condução em qualquer ponto do meio ou na sua superfície pode ser determinado através da lei de Fourier (Incropera, 2008).

Considerando-se um meio homogêneo no interior do qual não há movimento macroscópico (advecção) e a distribuição de temperaturas $T(x,y,z)$ está representada em coordenadas cartesianas. Para deduzir a equação geral da transmissão de calor será avaliado o fluxo de calor que passa através desse corpo, como mostrado na figura 3.3.

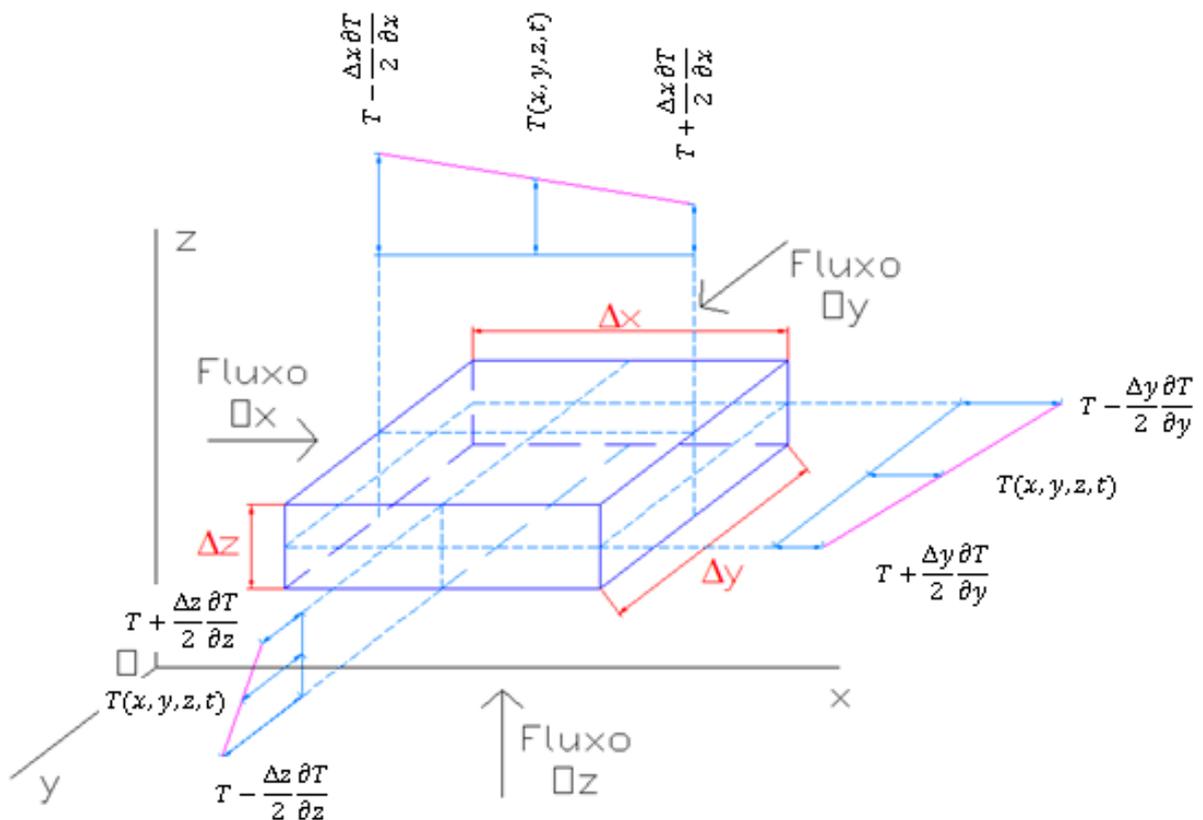


Figura 3.3 - Corpo influenciado por fluxo de calor.

Considere-se um elemento de volume $\Delta x \Delta y \Delta z$ de um corpo homogêneo e isotrópico atravessado por um fluxo calorífico. Seja $T(x, y, z, t)$ a temperatura do centro do elemento de volume, as temperaturas das faces são mostradas na figura.

Dessa forma, o fluxo calorífico que atravessa a face $(\Delta y \Delta z)$, cuja temperatura é $T + \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial T}{\partial x}$, é dado na equação 3.12:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_d = -k \Delta y \Delta z \frac{\partial}{\partial x} \left(T + \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.12)$$

E o que atravessa a face $\Delta y \Delta z$, de temperatura é $T - \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial T}{\partial x}$, é dado na equação 3.13:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_e = -k \Delta y \Delta z \frac{\partial}{\partial x} \left(T - \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.13)$$

A quantidade de calor armazenado num elemento de volume é dado pela quantidade de calor que entra menos a quantidade de calor que sai, dessa forma temos a equação 3.14:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_x = \left(\frac{dQ}{dt}\right)_e - \left(\frac{dQ}{dt}\right)_d = -k \Delta y \Delta z \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.14)$$

Considerando os fluxos nas outras direções, a quantidade total de calor armazenada no elemento de volume, na unidade de tempo, é dado pela equação 3.15:

$$\frac{dQ}{dt} = k \Delta x \Delta y \Delta z \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = k \Delta x \Delta y \Delta z \nabla^2 T \quad (3.15)$$

Seja c o calor específico do material, ou seja, a quantidade de calor necessário para elevar da unidade de temperatura de uma unidade de massa do corpo e ρ sua massa específica, o elemento de volume sofrerá, na unidade de tempo, uma elevação de temperatura $\frac{dT}{dt}$. Logo chega-se as equações 3.16 e 3.17:

$$k \Delta x \Delta y \Delta z \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = c \rho \Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial T}{\partial t} \Rightarrow \quad (3.16)$$

$$k \nabla^2 T = c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.17)$$

A equação 3.17 é a chamada Equação de Fourier.

Se o corpo desenvolver calor, como é o caso do concreto, a Equação de Fourier torna-se, equação 3.18:

$$\frac{dQ}{dt} = k\Delta x\Delta y\Delta z \nabla^2 T + \Delta x\Delta y\Delta z \rho c \frac{\partial T_d}{\partial t} \quad (3.18)$$

Em que $\frac{\partial T_d}{\partial t}$ é a elevação de temperatura resultante do calor desenvolvido no corpo.

Assim a Equação de Fourier toma a forma da equação 3.19:

$$k\Delta x\Delta y\Delta z \nabla^2 T + \Delta x\Delta y\Delta z \rho c \frac{\partial T_d}{\partial t} = c\rho\Delta x\Delta y\Delta z \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.19)$$

Chamando $\rho c \frac{\partial T_d}{\partial t} = \dot{q}$, temos a equação 3.20:

$$k\nabla^2 T + \dot{q} = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.20)$$

Onde \dot{q} é a quantidade de calor desenvolvida, por unidade de volume, na unidade de tempo.

Logo, a Equação Geral da Condução de Calor, considerando a Equação de Fourier e a geração de calor interno, ou seja, o calor de hidratação, é dada pela fórmula da equação 3.21:

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{c\rho}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.21)$$

A equação 3.21 implica dizer que em qualquer ponto do meio, a taxa líquida de transferência de energia por condução para o interior de um volume unitário somada a taxa volumétrica de geração de energia térmica deve ser igual à taxa de variação de energia térmica acumulada no interior desse volume (Incropera, 2008).

3.3 CALOR DE HIDRATAÇÃO

Para a resolução da Equação de Fourier, descrita anteriormente, é necessário considerar o calor de hidratação, q , para o caso do concreto. O estudo mais recente, sobre a barragem de Três Gargantas na China, realizado por Liu *et al.*, (2010) afirma que o calor desenvolvido pela hidratação do cimento pode ser representado pela equação 3.22, obtida por meio de dados experimentais levando em consideração a temperatura adiabática em diferentes idades do concreto.

$$\dot{q} = q_i (1 - e^{-\alpha t^\beta}) \quad (3.22)$$

Em que:

\dot{q} = calor de hidratação;

q_i, α, β = constantes obtidas experimentalmente, depende da composição do cimento; sendo que q_i é o calor inicial do concreto.

Para diferentes valores de resistência (em MPa) os autores elaboraram a tabela 3.1 com os parâmetros da equação 3.22:

Tabela 3.1 - Coeficientes da equação 14 de aumento da temperatura adiabática dos concretos usados na represa de Três Gargantas.

Concreto	q_i (°C)	α	β
R15	19,51	0,0900	0,1287
R20	21,31	0,2282	0,977
R25	23,51	0,3190	0,849
R30	27,83	0,3542	0,908

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), para a distribuição do calor no concreto massa, a geração de calor, \dot{q} , é associada à elevação de temperatura adiabática, T_a . Tendo o concreto um consumo de cimento C_c , um calor específico c e massa específica ρ (kg/m³), a relação entre a temperatura adiabática e o calor interno gerado pelo concreto, Q , é dada pela equação 3.23:

$$T_a = \frac{C_c}{c\rho} Q \quad (3.23)$$

O calor interno gerado pelo concreto, Q , é obtido por unidade de massa do cimento e, portanto, o fator $\frac{C_c}{\rho}$ deve ser usado para calcular o calor de hidratação por unidade de massa do concreto. Assim, a taxa de geração de calor, \dot{q} , pode ser expressa conforme a equação 3.24:

$$\dot{q} = C_c \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (3.24)$$

Substituindo pela equação 3.25, chega-se a equação 3.25:

$$\dot{q} = \rho c \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (3.25)$$

De forma similar, Silveira (1961) escreve a mesma fórmula utilizando o traço do concreto ao invés de utilizar a massa específica do concreto, ou seja, uma fórmula mais prática para uso num canteiro de obras, por exemplo.

Dessa forma, se a composição do concreto em massa for dada por l (uma) parte de cimento, x partes de água, a_r partes de areia e b partes de brita (traço= $l:x:a_r:b$), a elevação de temperatura sofrida pelo concreto, em regime adiabático, será dada pela equação 3.26:

$$\dot{q} = mc \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (3.26)$$

Em que: $m = l + x + a_r + b$

3.4 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

As definições das condições iniciais e de contorno aqui determinadas foram adaptadas de Santos (2004) e Mehta e Monteiro (2008).

Condições iniciais:

A princípio deve-se definir a condição inicial pela prescrição da distribuição de temperatura através de um corpo no tempo zero para todo o domínio, como uma função de x , y e z , como mostrado na equação 3.27.

$$T(x, y, z, t = 0) = f(x, y, z) \quad (3.27)$$

Condições de contorno:

As condições gerais de contorno às quais se encontram sujeitas a equação de Fourier são as condições de Dirichlet e de Neumann.

A condição de Dirichlet, também dita condição essencial de contorno, mostra que a temperatura existente em uma porção do contorno do corpo Γ_t é dada pela equação 3.28:

$$T(x, y, z, t) = f(x, y, z, t) \quad x, y, z \text{ em } \Gamma_t \quad (3.28)$$

O fluxo de calor prescrito no contorno é dado pela condição de Neumann. Esta supõe que o fluxo de calor através de uma parte do contorno exterior do domínio Γ_q é conhecido para todo ponto de tal contorno e para qualquer instante de tempo t . Matematicamente tal condição se traduz em determinar a derivada do campo de temperaturas em relação à normal ao sólido na fronteira Γ_q , sendo tal derivada uma função conhecida, como mostra a equação 3.29:

$$k \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = q_n(x, y, z, t) \quad x, y, z \text{ em } \Gamma_q \quad (3.29)$$

Sendo q_n a quantidade de fluxo de calor dada no ponto (x, y, z) , e n é a normal externa à superfície.

O fluxo de calor nas superfícies externas analisadas pode ser dado segundo o somatório dos fluxos de calor devido à radiação solar, convecção e radiação, segundo equação 3.30.

$$q(x, y, z, t) = q_s(x, y, z, t) + h[T(x, y, z, t) - T_a(t)] \quad (3.30)$$

Sendo:

- $T(x, y, z, t)$ a temperatura existente em cada ponto do contorno;
- T_a a temperatura ambiente existente no exterior do domínio;
- h o coeficiente de transferência de calor global;
- $q_s(x, y, z, t)$ o calor ganho devido à radiação solar (radiação de onda curta) e é dado pela equação 3.31:

$$q_s(x, y, z, t) = a_r \cdot I(x, y, z, t) \quad (3.31)$$

Em que a_r é o fator de absorção e $I(x, y, z, t)$ é a radiação total incidente sobre qualquer ponto da superfície no instante t .

3.5 SOLUÇÃO DO PROBLEMA

3.5.1 Método numérico

A tecnologia nos permite fazer uso de equipamentos que facilitam a resolução de problemas complexos de engenharia, assim como de outras áreas da ciência. Existem softwares capazes de fornecer respostas precisas em um curto intervalo de tempo para esses problemas, porém o uso de métodos analíticos é indispensável para o entendimento e o uso dos programas computacionais.

Muitos dos problemas práticos de engenharia não têm solução exata, portanto faz-se uso de soluções aproximadas. Dentre os métodos numéricos mais utilizados tem-se o Método das Diferenças Finitas (MDF), o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Elementos de Contorno (BEM). No primeiro a aproximação dos resultados é dada por equações diferenciais lineares e é de fácil aplicação em problemas de geometria simples. No entanto, a aplicação é complicada para problemas com complexa geometria e condições de contorno (Moaveni, 1999).

Ainda segundo Moaveni (1999), o Método dos Elementos Finitos utiliza a formulação integral criando sistemas de equações algébricas e proporcionando uma solução aproximada em cada elemento. A solução completa é dada com o somatório dos resultados individuais para cada elemento.

A resolução pelo MEF é dada dividindo-se o corpo contínuo em um número finito de partes (os elementos), conectados entre si por intermédio de pontos discretos, que são chamados de nós. A montagem de elementos, que constitui o Modelo Matemático, tem o seu comportamento especificado por um número finito de parâmetros (Alves Filho, 2000).

Zienkiewicz e Taylor (1994) afirmam que o MEF é um método de aproximação de tal forma que o contínuo se divide em um número finito de partes (elementos), cujo comportamento se especifica mediante um número finito de parâmetros.

Segundo Silva e Buiocchi (2011) a solução de um problema em MEF é alcançada da seguinte forma:

- a) Por meio de interpolação (ou aproximação) a solução é conhecida para qualquer ponto do domínio;
- b) A equação é resolvida na forma integral;
- c) Os sistemas matriciais obtidos são em geral simétricos, o que torna eficiente a sua solução;
- d) A implementação é complexa, porém genérica;
- e) Não há problemas em se aplicar o MEF em domínios irregulares;

Para o problema de calor em barragens construída em camadas será utilizado o MEF devido a complexidade da geometria do problema. O procedimento de resolução, segundo Silva (2009), é dado da seguinte forma:

1. Desenvolvimento das equações do elemento.
2. Discretização do domínio de solução dentro de uma malha de elementos finitos.
3. Montagem das equações do elemento.
4. Introdução das condições de contorno (restrições físicas e geométricas).
5. Solução para os nós desconhecidos.
6. Cálculo da solução e das quantidades (grandezas) em cada elemento.

3.5.1.1 Solução da equação de Fourier pelo método dos elementos finitos

A solução aqui demonstrada, assim como o exemplo matemático mostrado, foram adaptados de Bhatti (2005).

Seja a temperatura dada por $T(x,y)$ ao longo da estrutura. Assumindo o gradiente de temperatura ao longo da direção longitudinal para um problema bidimensional. A equação diferencial que governa o problema é dada em 3.32:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{q} = m \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.32)$$

Sendo, k_x e k_y a condutividade térmica nas direções de x e y ; e \dot{q} a geração de calor interna por unidade de volume. Considerando que a condutividade térmica do concreto é a mesma em todas as direções, tem-se que $k = k_x = k_y$. Para a equação de calor em regime transiente $m = \rho.c$, sendo ρ a massa específica e c o calor específico do material.

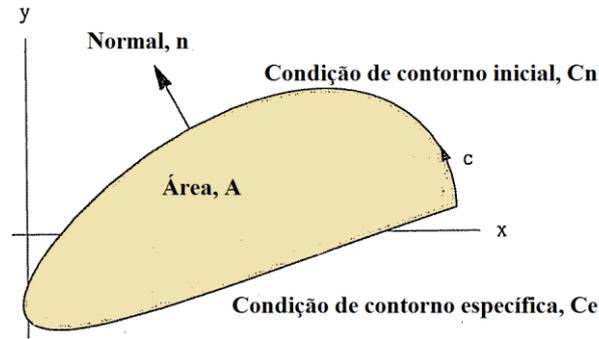


Figura 3.4 - Domínio para solução bidimensional.

Dado o domínio representado na figura 3.4, para a solução do problema em elementos finitos será utilizado o método de Galerkin. Serão utilizadas as seguintes notações: A para área e C para o contorno. O índice para todos os casos onde for necessário é dado por $i = 1, 2, 3, \dots, n$. Dessa forma tem-se a equação 3.33:

$$\iint_A \left(\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) + \dot{q} - m \frac{\partial T}{\partial t} \right) N_i dA = 0 \quad (3.33)$$

Em que N_i representa a função de interpolação.

Utilizando o teorema de Green-Gauss os primeiros termos da equação ponderada residual tornam-se, equações 3.34 e 3.35:

$$\iint_A \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) N_i dA = \int_c k_x \frac{\partial T}{\partial x} N_i n_x dc - \iint_A k_x \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} dA = 0 \quad (3.34)$$

$$\iint_A \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) N_i dA = \int_c k_y \frac{\partial T}{\partial y} N_i n_y dc - \iint_A k_y \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} dA = 0 \quad (3.35)$$

Logo a função ponderada residual resulta na equação 3.36:

$$\int_c \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right) N_i dc + \iint_A \left(-k_x \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} - k_y \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} + \dot{q} N_i - m \frac{\partial T}{\partial t} \right) dA = 0 \quad (3.36)$$

Dividindo a integral do contorno em duas partes, condição essencial e condição específica; e substituindo a condição inicial na equação, tem-se a equação 3.37:

$$\int_{c_e} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right) N_i dc + \int_{c_n} (\alpha T + \beta) N_i dc + \iint_A \left(-k_x \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} - k_y \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} + \dot{q} N_i - m \frac{\partial T}{\partial t} \right) dA = 0 \quad (3.37)$$

Na expressão 3.37, α e β são parâmetros específicos do contorno.

Sabendo-se que a condição essencial específica do contorno é igual a zero, tem-se a equação 3.38:

$$\int_c \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right) N_i dc + \iint_A \left(-k_x \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} - k_y \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} + \dot{q} N_i - m \frac{\partial T}{\partial t} \right) dA = 0 \quad (3.38)$$

Assumindo que a solução pode ser escrita como as equações de 3.39 a 3.41:

$$T(x, y) = (N_1(x, y) \quad N_2(x, y) \quad \dots \quad N_n(x, y)) \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{pmatrix} \equiv \mathbf{N}^T \mathbf{d} \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{pmatrix} \equiv \mathbf{B}_x^T \mathbf{d} \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{pmatrix} \equiv \mathbf{B}_y^T \mathbf{d} \quad (3.41)$$

Onde T_1, T_2, \dots , são soluções desconhecidas dos elementos nodais em função do tempo. A solução assumida ao longo do contorno deve ser escrita em termos dos limites das coordenadas de acordo com a equação 3.42:

$$T(c) = (N_1(c) \quad N_2(c) \quad \dots \quad N_n(c)) \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{pmatrix} \equiv \mathbf{N}_c^T \mathbf{d} \quad (3.42)$$

Substituindo na equação 3.37 tem-se a equação 3.43:

$$\int_{c_n} (\alpha N_i(c) \mathbf{N}_c^T \mathbf{d} + \beta N_i) dc + \iint_A \left(-k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \mathbf{B}_x^T \mathbf{d} - k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \mathbf{B}_y^T \mathbf{d} + \dot{q} N_i - m \frac{\partial T}{\partial t} N_i \right) dA = 0 \quad (3.43)$$

Escrevendo na forma matricial, chega-se a equação 3.44:

$$\int_{c_n} \left(\alpha \begin{pmatrix} N_1(c) \\ N_2(c) \\ \vdots \\ N_n(c) \end{pmatrix} \mathbf{N}_c^T \mathbf{d} + \beta \begin{pmatrix} N_1(c) \\ N_2(c) \\ \vdots \\ N_n(c) \end{pmatrix} \right) dc + \iint_A \left(-k_x \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} \\ \frac{\partial N_2}{\partial x} \\ \vdots \\ \frac{\partial N_n}{\partial x} \end{pmatrix} \mathbf{B}_x^T \mathbf{d} - \dots \right) dA = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.44)$$

Ou, simplesmente, a equação 3.45:

$$\int_{c_n} (\alpha \mathbf{N}_c \mathbf{N}_c^T \mathbf{d} + \beta \mathbf{N}_c) dc + \iint_A (-k_x \mathbf{B}_x \mathbf{B}_x^T \mathbf{d} - k_y \mathbf{B}_y \mathbf{B}_y^T \mathbf{d} + \dot{q} \mathbf{N} - m \mathbf{N} \mathbf{N}^T) dA = 0 \quad (3.45)$$

Reorganizando os termos, obtém-se a equação 3.46:

$$\left(- \int_{c_n} \alpha N_c N_c^T dc + \iint_A (k_x \mathbf{B}_x \mathbf{B}_x^T + k_y \mathbf{B}_y \mathbf{B}_y^T + m \mathbf{N} \mathbf{N}^T) dA \right) \mathbf{d} = \int_{c_n} \beta N_c dc + \iint_A \dot{q} \mathbf{N} dA \quad (3.46)$$

Os primeiros termos da integral da área podem ainda ser escritos de forma mais compacta como a equação 3.47:

$$k_x \mathbf{B}_x \mathbf{B}_x^T + k_y \mathbf{B}_y \mathbf{B}_y^T = (\mathbf{B}_x \quad \mathbf{B}_y) \begin{pmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{B}_x^T \\ \mathbf{B}_y^T \end{pmatrix} \equiv \mathbf{B} \mathbf{C} \mathbf{B}^T \quad (3.47)$$

Onde:

$$\mathbf{B}^T = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \cdots & \frac{\partial N_n}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \cdots & \frac{\partial N_n}{\partial y} \end{pmatrix} \mathbf{e} \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{pmatrix}$$

Logo, a equação em elementos finitos torna-se segundo a equação 3.48:

$$\left(- \int_{c_n} \alpha N_c N_c^T dc + \iint_A (\mathbf{B} \mathbf{C} \mathbf{B}^T + m \mathbf{N} \mathbf{N}^T) dA \right) \mathbf{d} = \int_{c_n} \beta N_c dc + \iint_A \dot{q} \mathbf{N} dA \quad (3.48)$$

Definindo matrizes $n \times n$ como a equação 3.49:

$$k_k = \iint_A \mathbf{B} \mathbf{C} \mathbf{B}^T dA; k_m = \iint_A m \mathbf{N} \mathbf{N}^T dA; k_\alpha = \iint_A \alpha N_c N_c^T dA. \quad (3.49)$$

Definindo os vetores $n \times 1$ como:

$$\mathbf{r}_q = \iint_A \dot{q} \mathbf{N} dA; \mathbf{r}_\beta = \int_{c_n} \beta N_c dc.$$

Assim, chega-se a seguinte equação 3.50:

$$(k_k + k_\alpha + k_m) \mathbf{d} = \mathbf{r}_q + \mathbf{r}_\beta \quad (3.50)$$

Uma aplicação numérica da equação desenvolvida pode ser observada no capítulo 4, exemplo 4.6.

3.5.2 Método computacional

A maior parte dos problemas práticos de engenharia envolvem problemas complexos que não apresentam solução analítica. O nível de dificuldade está relacionado com a complexidade da geometria envolvida, as equações que descrevem o fenômeno físico (por exemplo, escoamento fluido envolvendo viscosidade, plasticidade em estruturas, propriedades que dependem da temperatura, etc.), ou a variação das grandezas envolvidas (por exemplo, estruturas sujeitas à grandes deformações).

Uma abordagem comum em engenharia para resolver esses problemas até então era utilizar fórmulas com coeficientes obtidos de forma empírica. Essa abordagem é muito trabalhosa, pois exige a realização de experimentos para obter esses coeficientes sendo incompatível com a engenharia moderna. Atualmente esses problemas de engenharia são analisados utilizando-se simulação computacional que envolve uma forte combinação de computação gráfica e métodos numéricos. Pelo fato dos computadores serem mais acessíveis atualmente, a simulação computacional está fortemente presente em todos os ramos da engenharia (Silva e Buioche, 2011).

Problemas de transferência de calor é um exemplo aonde métodos numéricos vêm sendo aplicados há muito tempo. No entanto, soluções analíticas são obtidas apenas para problemas simples, como, por exemplo, o fluxo de calor num domínio unidimensional.

Diante disso, buscou-se um software para solução computacional do problema térmico utilizando o método dos elementos finitos, também conhecido por MEF. Existem vários programas para tal utilização, tais como ABAQUS, NASTRAN, ANSYS, ADINA, entre outros. A escolha do ANSYS para o trabalho foi motivada por este se tratar de uma ferramenta de análise versátil com uma boa aceitação e utilização no mercado. É uma boa ferramenta que tem uma boa interação entre temperatura e tensão e também possui recursos que permitem visualizar os resultados através de uma excelente interface software-usuário.

Com o ANSYS pode-se fazer análises de modelos desde os mais simples aos mais complexos, com extrema flexibilidade e com a vantagem de ser um software já utilizado pela comunidade científica e pela indústria, em particular, em nosso meio.

Nos programas que utilizam o MEF, o domínio é subdividido em pequenas regiões discretas, conhecidas como elementos finitos. Estes elementos são definidos pela geometria, por nós e funções de interpolação. As equações são escritas para cada elemento, estes elementos são montados e geram uma matriz global. Carregamentos e restrições são aplicados e a solução é então determinada (ANSYS, 2004).

No entanto, a quantidade de elementos a ser utilizado deve ser estudado para cada caso, deve-se buscar sempre a convergência. Inicialmente faz-se a discretização de uma malha e analisa os seus resultados, posteriormente, refina-se a malha e observa se os valores estão próximos aos encontrados anteriormente. Caso isso aconteça, então a primeira malha utilizada é suficiente para a análise dos resultados. Convém observar também que quanto mais refinada a malha, maior será o tempo de processamento do programa.

De forma geral, o objetivo de uma análise de elementos finitos é simular matematicamente o comportamento de um problema real. Isto é possível a partir da criação de um modelo que represente a situação a ser estudada. Este modelo dispõe de todos os nós, elementos, propriedades dos materiais, constantes reais, condições de limite e outras características que são utilizados para representar o sistema físico.

Resumidamente, pode-se afirmar que o ANSYS é um pacote de modelagem em elementos finito com o propósito geral de resolver numericamente uma grande variedade de problemas mecânicos. Esses problemas incluem: análise estrutural estática e/ou dinâmica (lineares e não-lineares), transferência de calor e problemas de fluido, bem como problemas acústicos e electro-magnético.

Em geral uma solução em elemento finito pode ser dividida em três fases, como mostra a figura 3.5. Essa é uma diretriz geral que pode ser usada para a criação de qualquer análise de elementos finitos.



Figura 3.5 – Solução do ANSYS em elementos finitos.

Para a análise dos efeitos térmicos nas estruturas analisadas nos capítulos 4 e 5 foi utilizado o elemento PLANE55 do ANSYS 11.0 que tem capacidade de condução térmica em duas dimensões, 2D. O elemento tem quatro nós e um único grau de liberdade em cada nó, a temperatura. O elemento é mostrado na figura 3.6 (biblioteca do ANSYS).

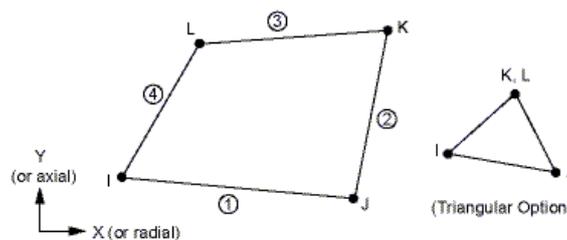


Figura 3.6 - Geometria do elemento PLANE55 (biblioteca do ANSYS).

Um outro elemento que poderia ser usado seria o elemento PLANE 77, também para análises térmicas em duas dimensões. Apresenta um grau de liberdade, a temperatura e oito nós, adequado para desenhar fronteiras curvas.

No apêndice A a programação para um exemplo de um bloco construído em camadas para assimilação do software. E o capítulo 4 traz exemplos de aplicação do software ANSYS.

4 VALIDAÇÃO DE RESULTADOS PARA PROBLEMAS TÉRMICOS COM O USO DO ANSYS

Para o método computacional, inicialmente foram realizados alguns testes comparativos com outros modelos já analisados de forma experimental e/ou pela utilização de outro software computacional. Desta forma, pretende-se mostrar que o programa em estudo apresenta os resultados esperados e que a análise numérica pode ser aplicada a problemas reais, atendendo as necessidades exigidas.

Os modelos analisados apresentam-se a seguir, com as propriedades e resultados mostrados separadamente. Todas as análises desenvolvidas neste trabalho são do tipo transiente.

4.1 BLOCO DE CONCRETO EM CAMADA ÚNICA

Santos (2004) utilizou o programa PFEM_2DT, com análise linear utilizando elementos finitos triangulares lineares de três nós, o qual foi desenvolvido na Universidade Federal do Espírito Santo para a análise térmica em estruturas. Este exemplo mostra a análise de um bloco hipotético com o programa PFEM_2DT em comparação com os resultados obtidos pela presente autora com o programa ANSYS. As isotermas de temperatura foram analisadas para $\frac{1}{2}$, 2 e 5 dias. O bloco tem dimensões de 2 m x 3 m e está apoiado sobre uma rocha de propriedades semelhantes ao concreto. As dimensões do muro e a malha utilizada são mostradas na figura 4.1.

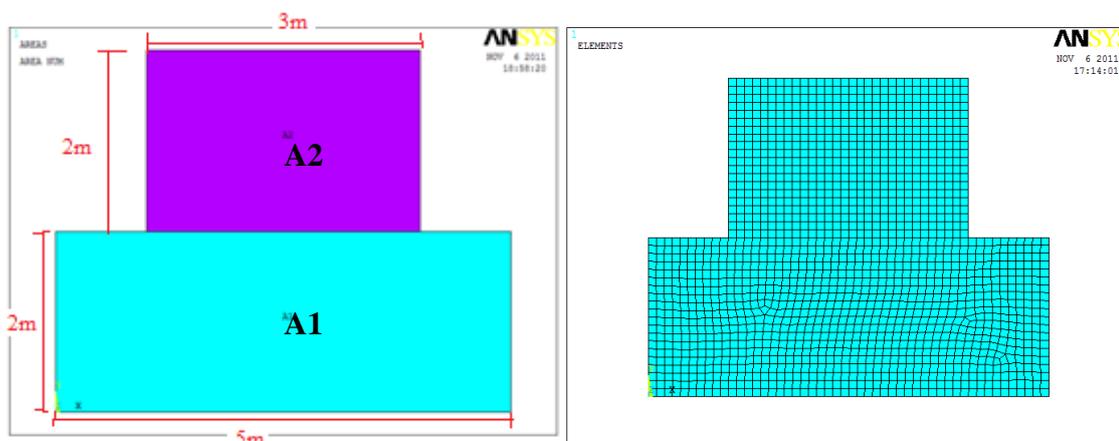


Figura 4.1 - a) Dimensões e malha do bloco estudado neste trabalho com o programa ANSYS. Sendo A1 = rocha; A2 = bloco de concreto. b) Discretização da malha em elementos finitos.

Para simulação com o ANSYS, foram usadas as propriedades definidas na tabela 4.1. A figura 4.2 apresenta a curva de elevação adiabática do concreto utilizado e a figura 4.3 a curva de geração de calor. A temperatura ambiente (condições do contorno) definida foi de 30°C, a mesma utilizada como temperatura de lançamento do concreto e temperatura inicial da rocha. Na programação utilizou-se o elemento PLANE 55, com quatro nós e um grau de liberdade, que é a temperatura, para todos os exemplos mostrados neste trabalho. O bloco foi analisado para ½, 2 e 5 dias de concretagem.

Tabela 4.1 – Propriedades térmicas utilizadas no modelo.

PROPRIEDADES	
Condutividade Térmica (W/m.°C)	2,53
Calor Específico (J/g.°C)	940,5
Massa Específica (kg/m ³)	2368
Coef. de Dilatação (10 ⁻⁶ /°C)	7
Coef convecção (W/m ² .°C)	13,95

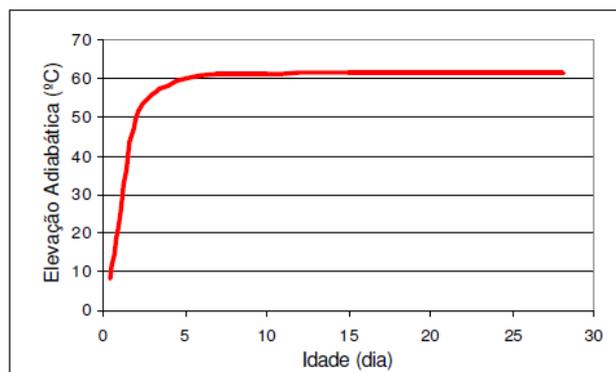


Figura 4.2 - Elevação da temperatura adiabática do concreto utilizado (Santos, 2004).

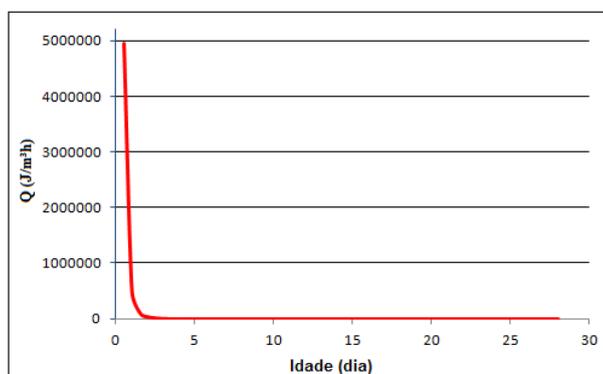


Figura 4.3 – Curva de geração de calor (Santos, 2004).

Como resultado da análise tem-se:

- Após ½ dia de concretagem, a temperatura máxima obtida pelo ANSYS foi de 41,9°C e pelo PFEM_2DT foi de 43°C.
- Com dois dias de concretagem, obteve-se temperatura máxima de 81,2°C no ANSYS e de 82,5°C no PFEM_2DT;
- No quinto dia de concretagem as temperaturas no ANSYS e no PFEM_2DT foram, respectivamente, 63,2°C e 63°C.

Todos esses resultados podem ser observados na figuras de 4.4 a 4.9. No ANSYS, foram utilizados 1690 nós e 919 elementos para análise, enquanto no PFEM_2DT utilizou-se 960 elementos e 537 nós.

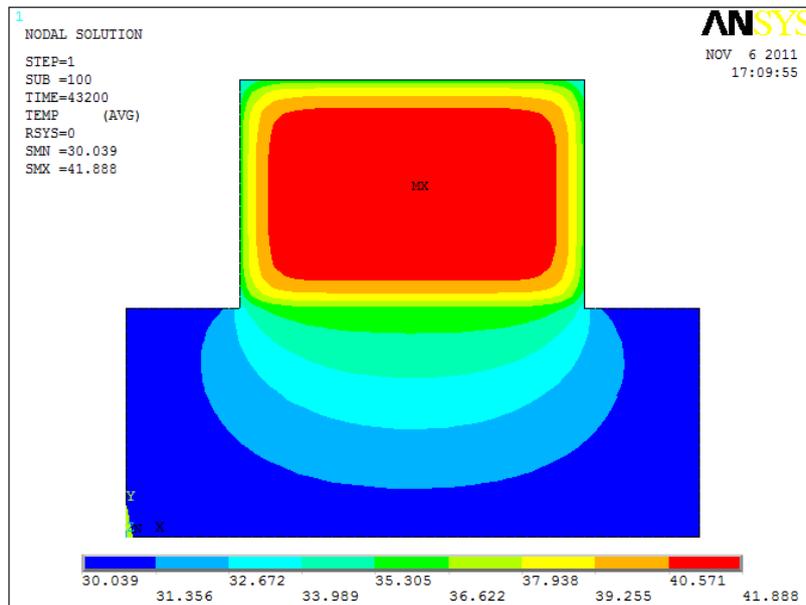


Figura 4.4 - Iso temperaturas para ½ dia de concretagem do bloco pelo programa ANSYS.

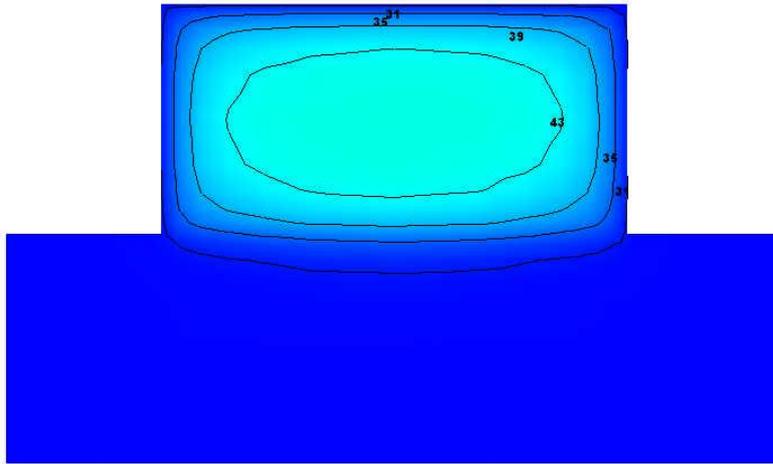


Figura 4.5 - Iso temperaturas para 1/2 dia de concretagem do muro pelo programa PFEM_2DT (Santos, 2004).

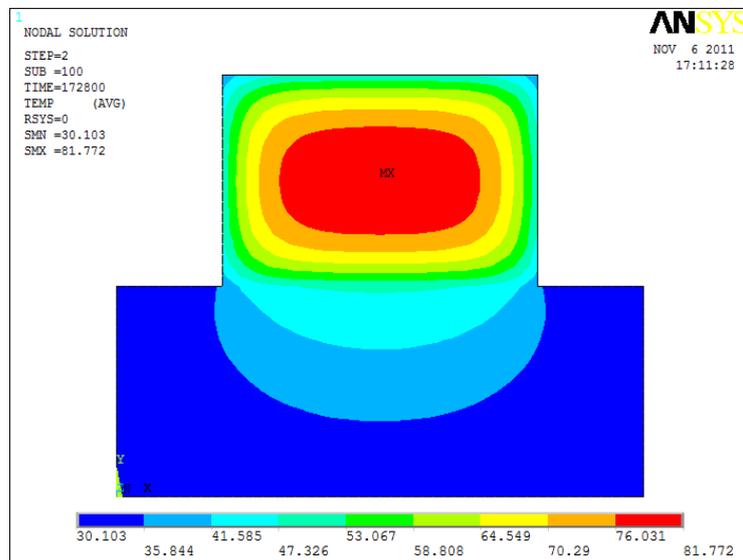


Figura 4.6 - Iso temperaturas para 2 dias de concretagem do bloco pelo programa ANSYS.

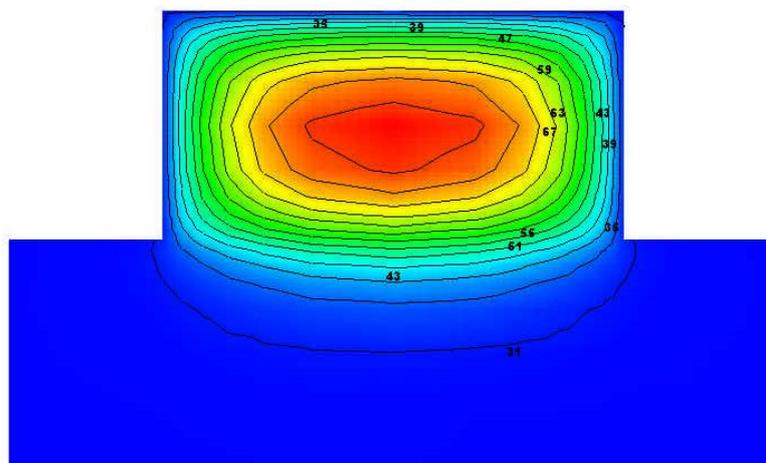


Figura 4.7 - Iso temperaturas para 2 dias de concretagem do muro pelo programa PFEM_2DT (Santos, 2004).

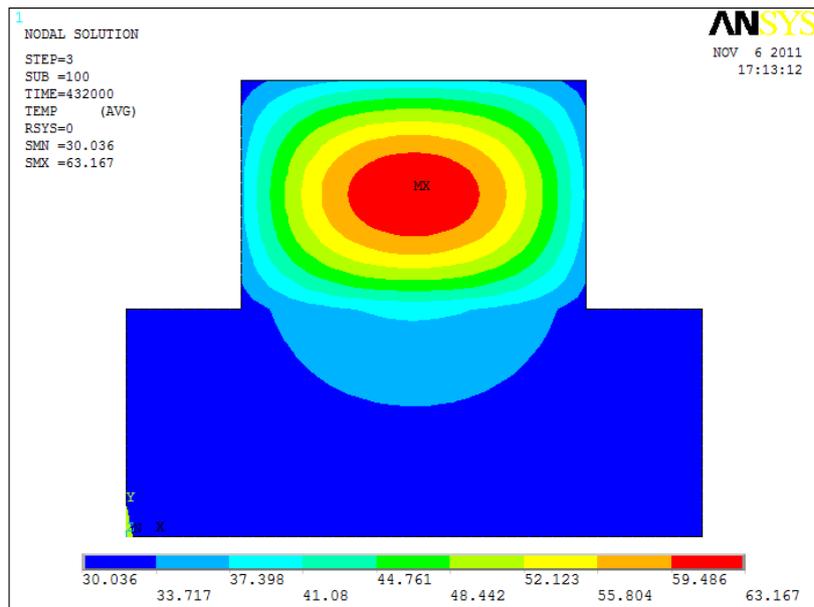


Figura 4.8 - Iso temperaturas para 5 dias de concretagem do bloco pelo programa ANSYS.

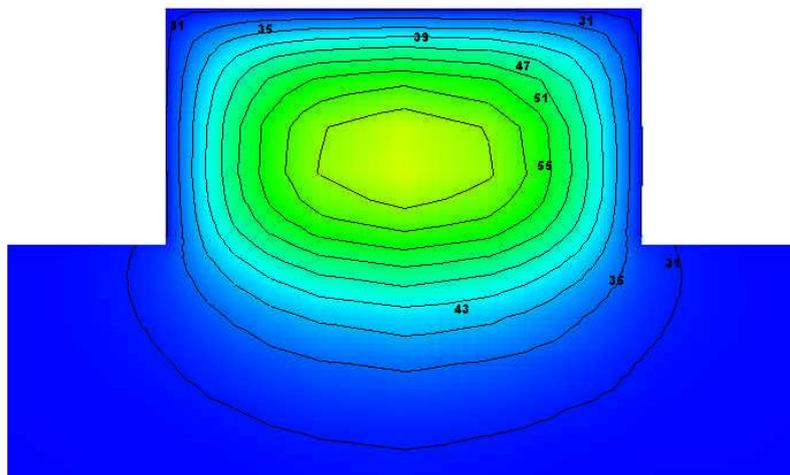


Figura 4.9 - Iso temperaturas para 5 dias de concretagem do muro pelo programa PFEM_2DT (Santos, 2004).

A tabela 4.2 mostra um resumo dos resultados obtidos para este bloco de concreto massa.

Tabela 4.2 – Comparação entre os resultados obtidos.

Camada	Tempo	ANSYS (Presente trabalho)	PFEM_2DT
1	12 h	41,9 °C	43 °C
1	48 h	81,2 °C	82,5 °C
1	120 h	63,2 °C	63 °C

4.2 BLOCO DE CONCRETO EM DUAS CAMADAS

Santos (2004), analisou a variação de temperatura em um bloco de concreto maciço através do programa PFEM_2DT desenvolvido na Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. O bloco foi analisado experimentalmente em 1996 por Kawaguchi e Nakane.

As temperaturas foram analisadas na direção vertical do centro das camadas do bloco maciço de concreto. A estrutura real apresenta dimensões de (12 x 12 x 2) m em cada camada, no entanto foi analisado apenas uma seção dessa estrutura em duas dimensões, ou seja, para aplicação no programa utilizou-se blocos de (2 x 6) m. A figura 4.10 mostra uma representação da estrutura de uma camada analisada.

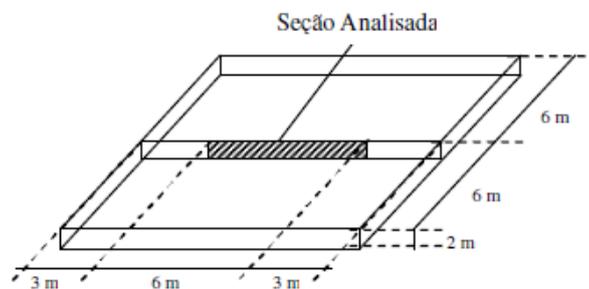


Figura 4.10 – Seção transversal analisada (Santos, 2004).

A estrutura analisada é formada por uma base de concreto e duas camadas de concreto para formação do bloco. Sendo que, a segunda camada foi lançada após nove dias de lançada a primeira camada. Para a análise no software ANSYS foram considerados 625 nós e 504 elementos e um fluxo de calor vertical. A figura 4.11 mostra o bloco estudado.

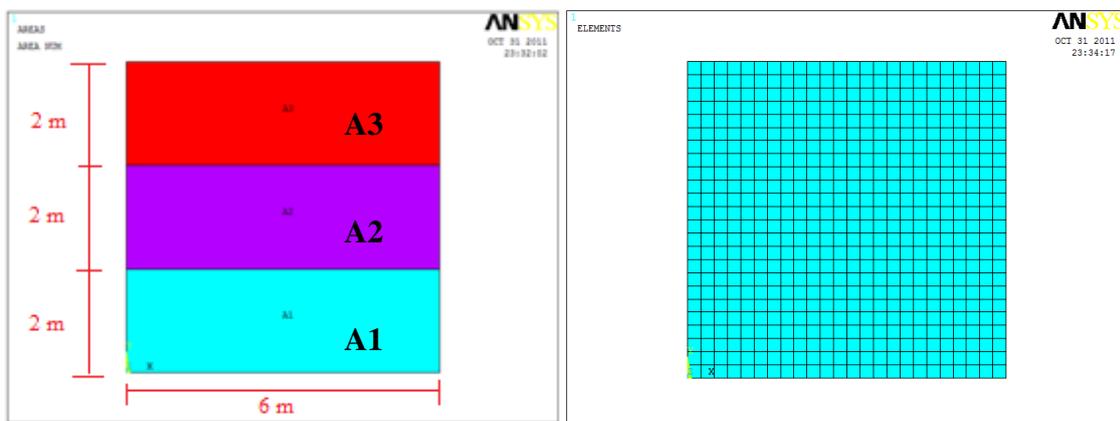


Figura 4.11 – a) Bloco estudado. Sendo A1 = base; A2 = 1ª camada de concreto; A3 = 2ª camada de concreto. B) Discretização da malha em elementos finitos do bloco.

Para a análise térmica foram consideradas as propriedades térmicas conforme mostra a tabela 4.3. A figura 4.12 apresenta a curva de elevação adiabática do concreto utilizado e a figura 4.13 mostra a curva de geração de calor. Foram também considerados para temperatura ambiente e para a rocha 30°C e a temperatura de lançamento do concreto foi de 26°C.

Tabela 4.3 – Propriedades térmicas do bloco analisado.

PROPRIEDADES	BASE (Concreto Pré-Existente)	CONCRETO
Condutividade Térmica (W/m.°C)	0,48	2,32
Calor Específico (J/g.°C)	836	836
Massa Específica (kg/m ³)	2400	2400
Coef. de Dilatação (10 ⁻⁶ /°C)	7	7
Coef convecção (W/m ² .°C)	13,95	13,95

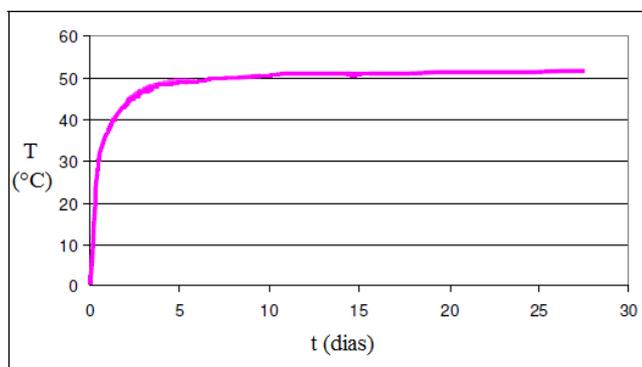


Figura 4.12 – Curva de elevação adiabática do concreto.

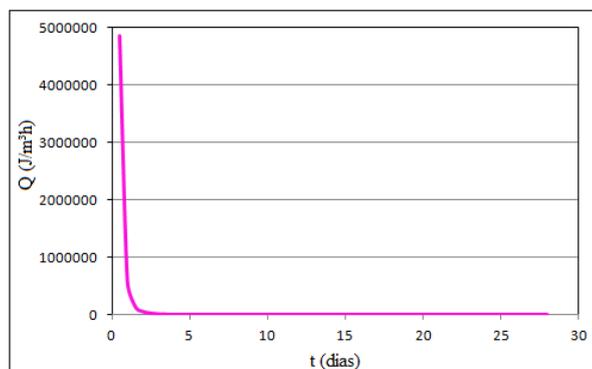


Figura 4.13 – Curva de geração de calor.

Para o modelo desenvolvido no ANSYS foram obtidos os seguintes resultados de temperatura:

- 24 h (1 dia) após o lançamento da primeira camada, a máxima temperatura encontrada com o ANSYS foi de 53,5 °C no centro da primeira camada. Houve também uma transmissão de calor para a base de concreto pré-existente. Isso pode ser visto na figura 4.14. No programa PFEM_2DT a máxima temperatura encontrada foi de 54°C, como mostra a figura 4.15.
- Após 72 h (3 dias) do lançamento da primeira camada a máxima temperatura obtida foi de 64,3°C no ANSYS e de 62°C no PFEM_2DT, como pode ser observado nas figuras 4.16 e 4.17.
- Após 288 h (12 dias) do lançamento da primeira camada e 72 h do lançamento da segunda camada a máxima temperatura obtida no ANSYS foi de 64,3°C na segunda camada e de 62°C no PFEM_2DT, como pode ser observado nas figuras 4.18 e 4.19. Para a primeira camada foram obtidas temperaturas em torno de 54°C em ambos os programas.

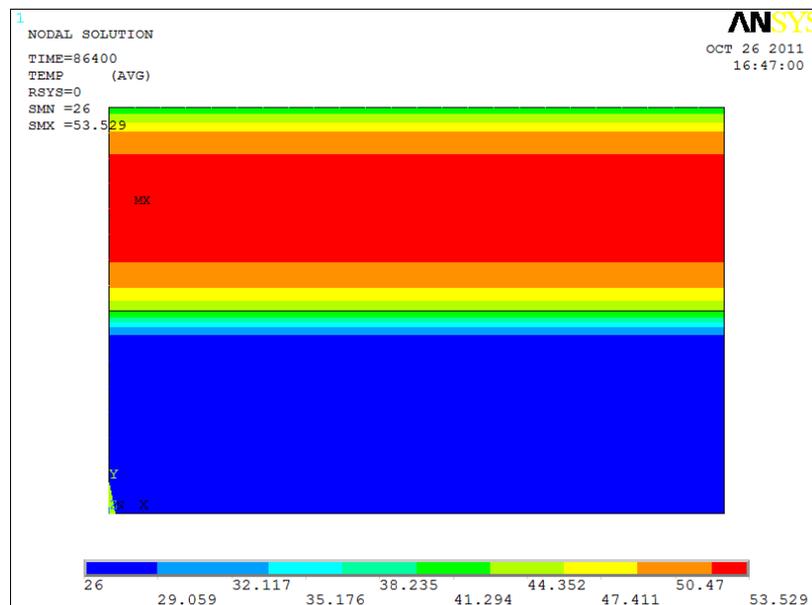


Figura 4.14 – Isothermas obtidas com o ANSYS após 24 h de lançamento da primeira camada.

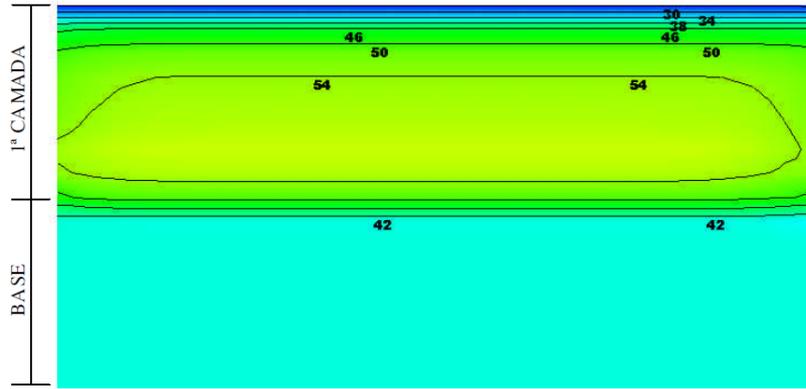


Figura 4.15 - Iso temperaturas 24 h após o lançamento da primeira camada obtido por Santos (2004).

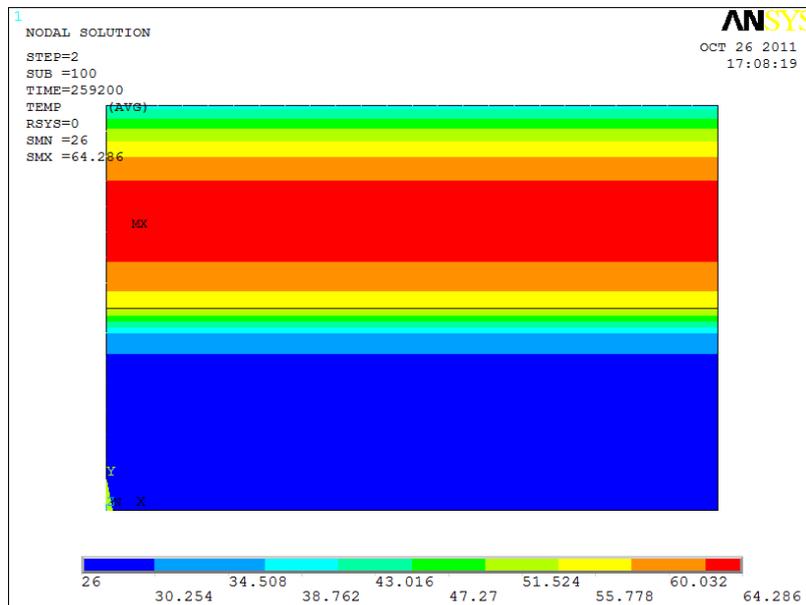


Figura 4.16 – Iso temperaturas obtidas com o ANSYS após 76 h de lançamento da primeira camada.

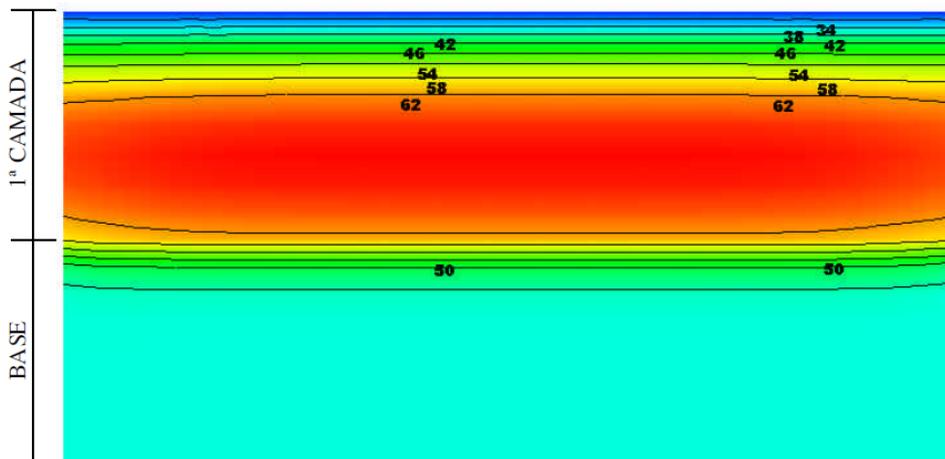


Figura 4.17 - Iso temperaturas 76 h após o lançamento da primeira camada obtido por Santos (2004).

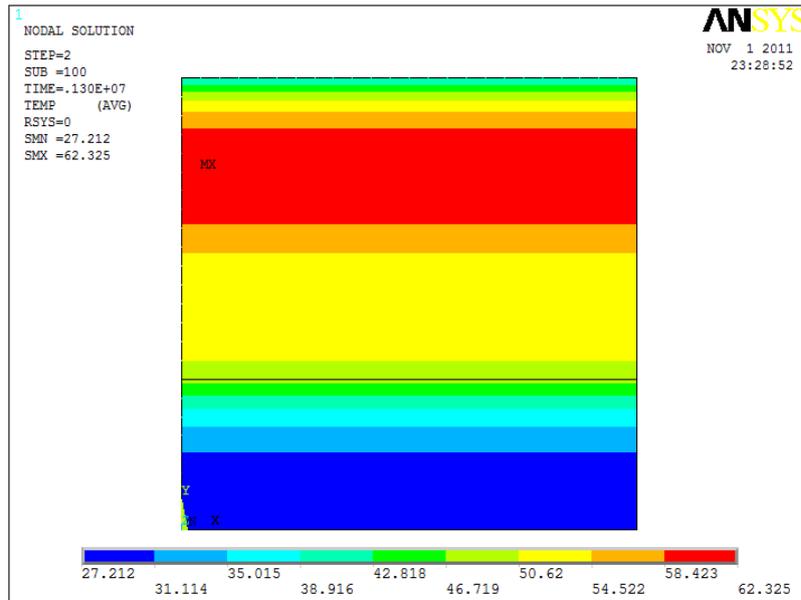


Figura 4.18 - Iso temperaturas obtidas com o ANSYS após 288 h de lançamento da primeira camada e 76 h após o lançamento da segunda camada.

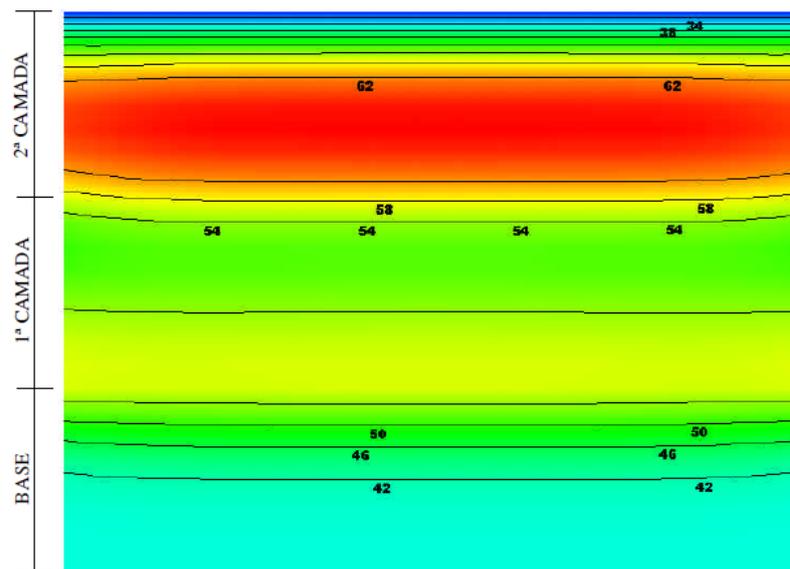


Figura 4.19 - Iso temperaturas 288 h após o lançamento da primeira camada obtido por Santos (2004).

Para análise dos resultados, a tabelas 4.4 mostra um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 4.4 – Comparação entre os resultados obtidos.

Camada	Tempo	ANSYS (Presente trabalho)	PFEM_2DT
1	24 h	53,5 °C	54 °C
1	72 h	64,3 °C	62 °C
1	288 h	54 °C	54 °C
2	72 h	64,3 °C	62 °C

4.3 BLOCO DE CONCRETO EM TRÊS CAMADAS

Silva (2003) e Kavamura (2005) analisaram um bloco de concreto hipotético, construído em três camadas de 4 m x 4 m, concretados a cada dois dias. A figura 4.20 mostra a geometria do bloco de concreto e a malha de elementos finitos discretizada.

Neste caso admitiu-se temperatura ambiente de 20 °C e temperatura de lançamento do concreto de 45 °C.

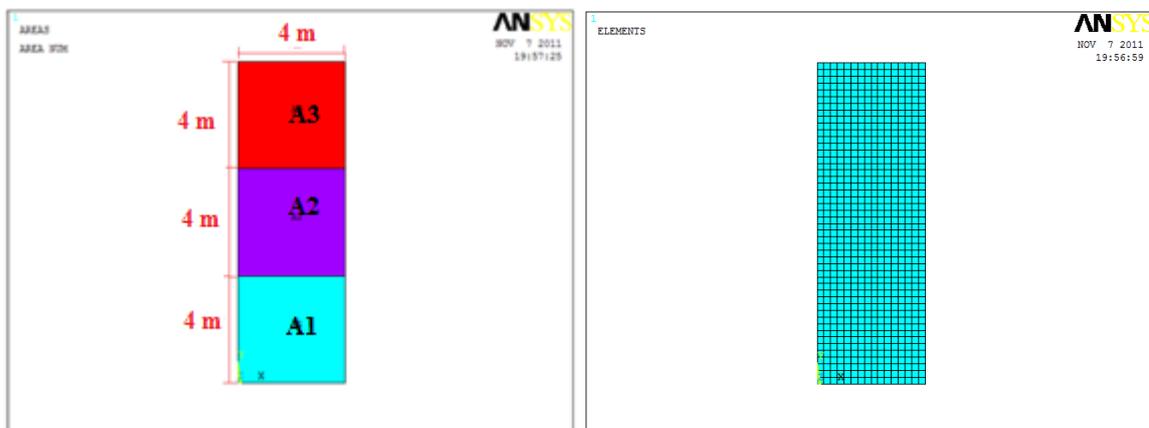


Figura 4.20 - a) Bloco estudado. Sendo A1 = 1ª camada; A2 = 2ª camada; A3 = 3ª camada.
b) Discretização da malha em elementos finitos.

Para o caso em estudo, é interessante observar que, quando a segunda camada está com dois dias de concretagem, a primeira camada está com quatro dias. E quando a terceira está com três dias, a segunda está com quatro dias e a primeira está com seis dias. No entanto, após a concretagem da segunda camada, por exemplo, os autores consideram que não há mais geração de calor da camada inferior.

A tabela 4.5 mostra as propriedades térmicas utilizadas e as figuras 4.21 e 4.22 apresentam a curva de elevação adiabática do concreto e a respectiva curva de geração de calor.

Tabela 4.5 – Propriedades térmicas utilizadas no modelo.

PROPRIEDADES	
Condutividade Térmica (W/m.°C)	1,79
Calor Específico (J/g.°C)	1105
Massa Específica (kg/m ³)	2388
Coef. de Dilatação (10 ⁻⁶ /°C)	7,07
Coef convecção (W/m ² .°C)	13,95

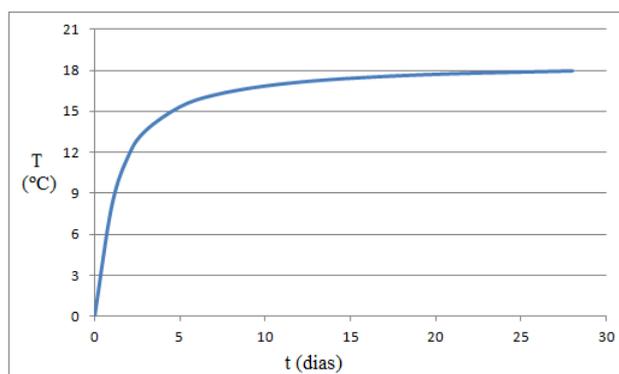


Figura 4.21 – Elevação adiabática do concreto.

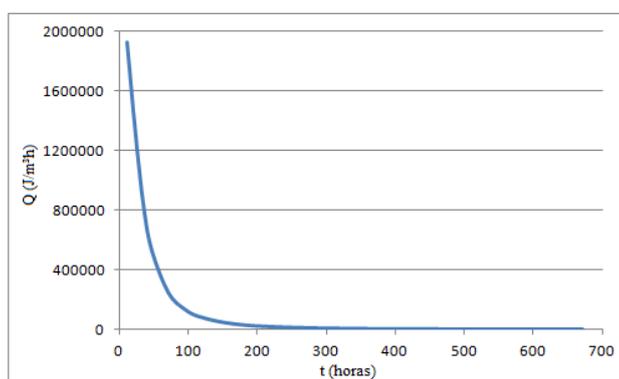


Figura 4.22 – Curva de geração de calor.

Como pode ser observado nas figuras de 4.23 a 4.31, as isotermas de temperatura entre os três trabalhos são semelhantes e apresentam valores próximos. Ressalta-se também que quando uma camada está sendo analisada inicialmente, as subsequentes estão desativadas,

ou seja, não existem. Dessa forma o valor de sua temperatura não interessa nesta fase da análise. Observa-se que nas figuras 4.23 e 4.24, por exemplo as temperaturas acima da primeira camada diferem, no entanto, elas não estão sendo avaliadas no momento e essa diferença de valores é dada pela sequência diferenciada da programação.

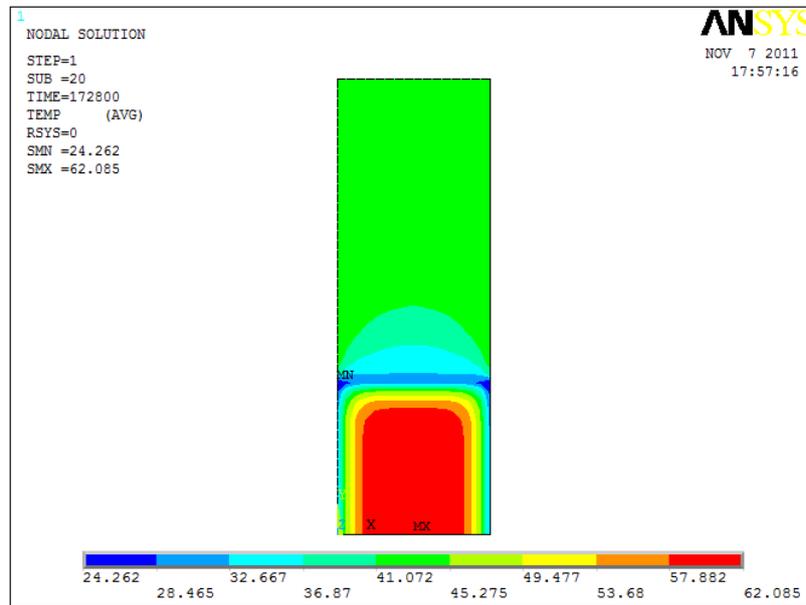


Figura 4.23 – Isotermas de temperatura para 1ª camada após 2 dias de concretagem.

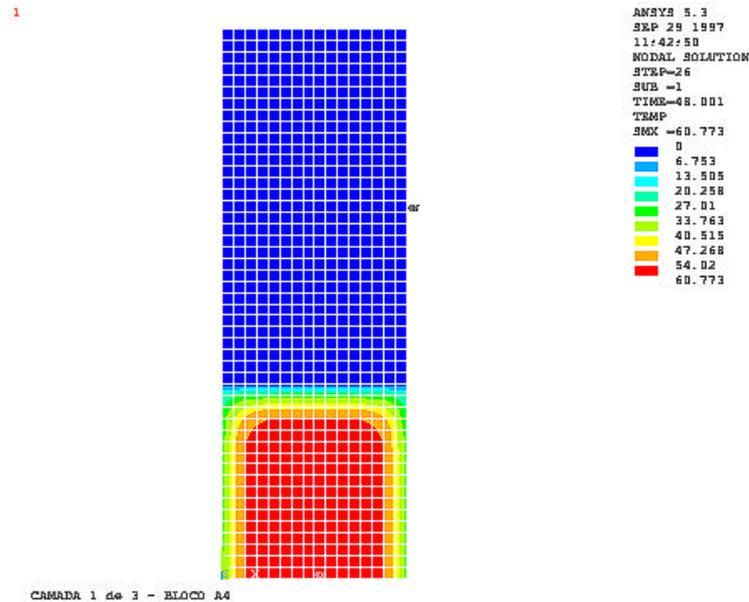


Figura 4.24 – Isotermas de temperatura para 1ª camada após 2 dias de concretagem (Silva, 2003).

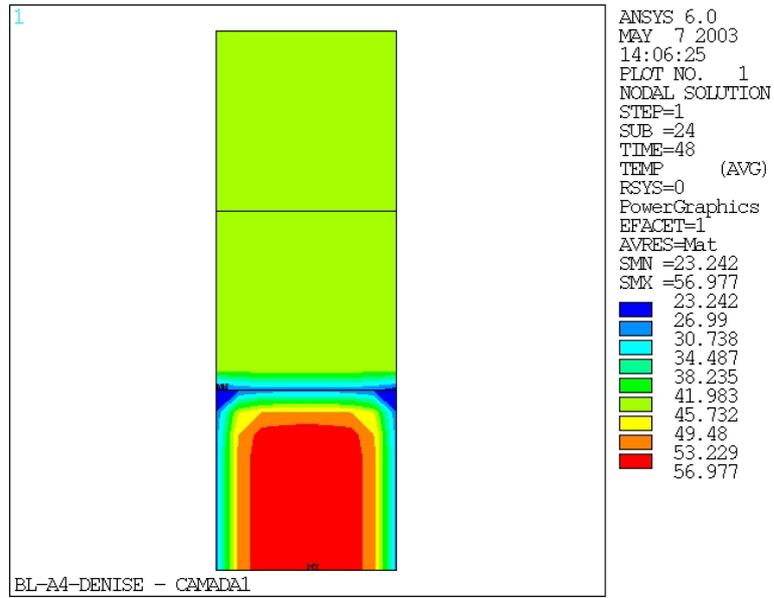


Figura 4.25 – Isotermas de temperatura para 1ª camada após 2 dias de concretagem (Kavamura, 2005).

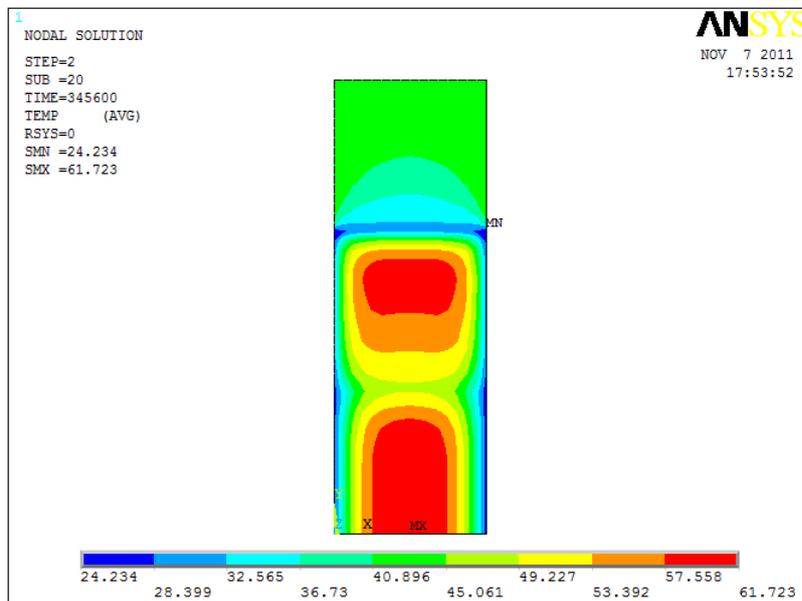


Figura 4.26 – Isotermas de temperatura após 2 dias de concretagem da 2ª camada.

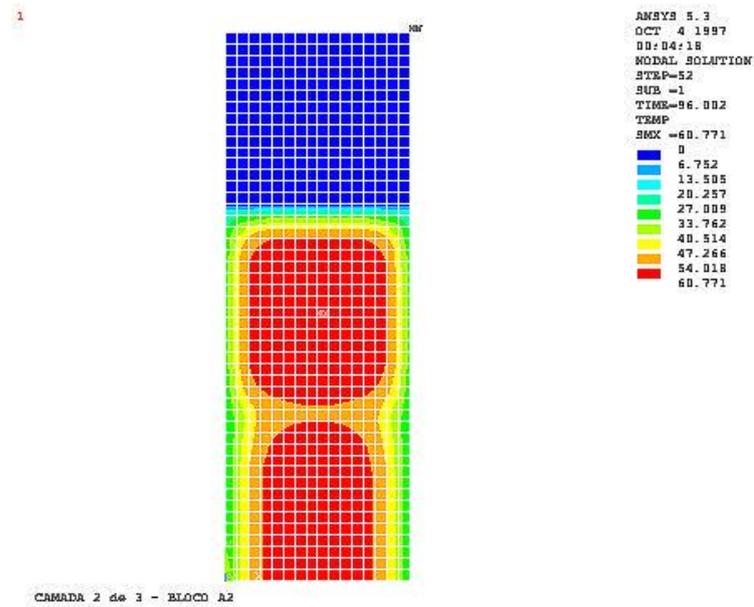


Figura 4.27 – Isothermas de temperatura após 2 dias de concretagem da 2ª camada (Silva, 2003).

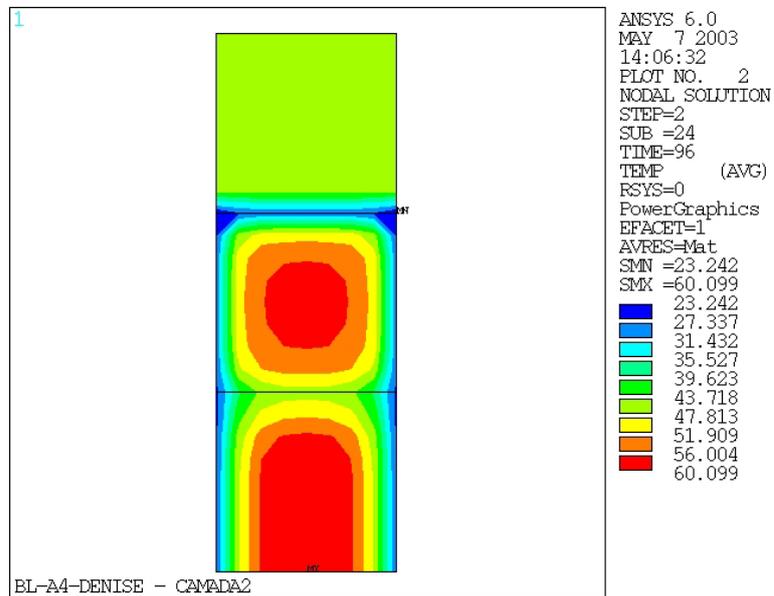


Figura 4.28 – Isothermas de temperatura após 2 dias de concretagem da 2ª camada (Kavamura, 2005).

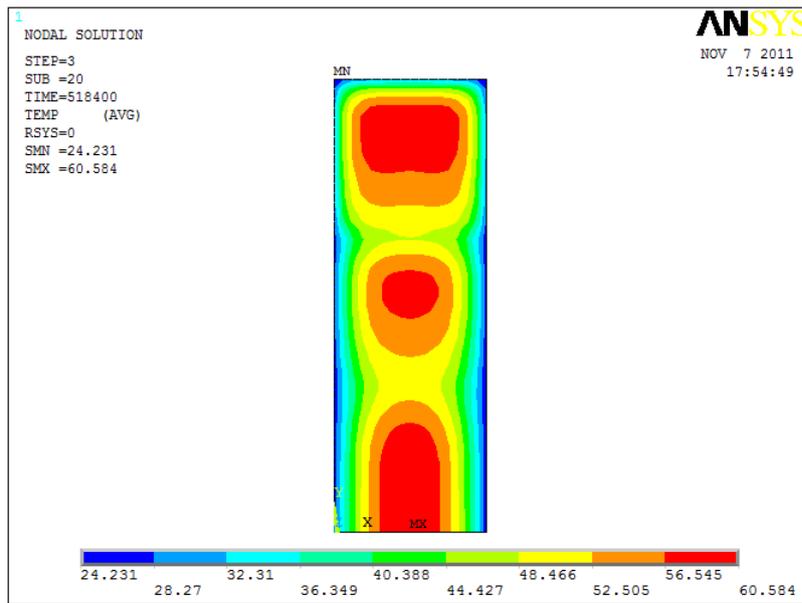


Figura 4.29 – Isothermas de temperatura após 2 dias de concretagem da 3ª camada.

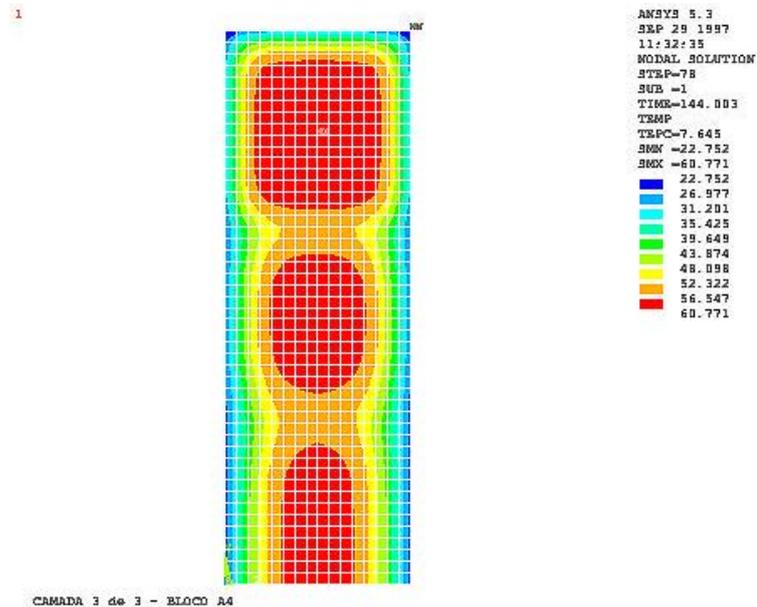


Figura 4.30 – Isothermas de temperatura após 2 dias de concretagem da 3ª camada (Silva, 2003).

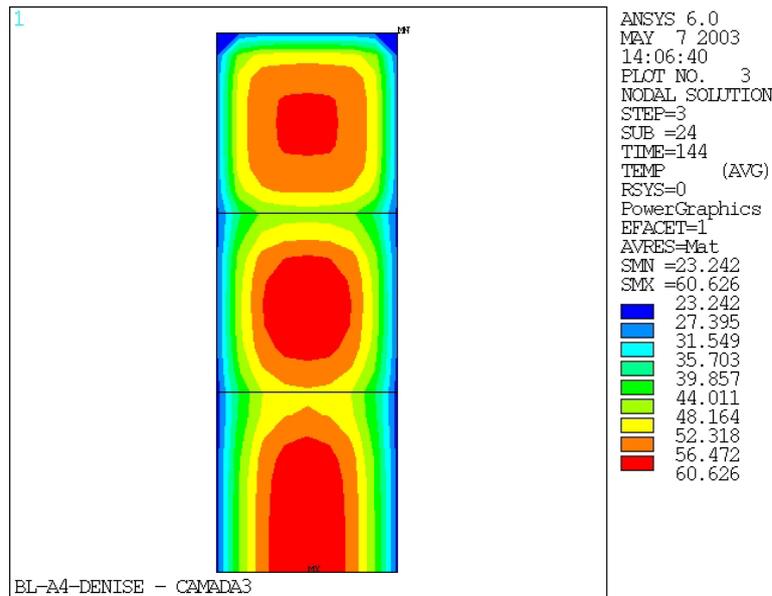


Figura 4.31 – Isotermas de temperatura após 2 dias de concretagem da 3ª camada (Kavamura, 2005).

Para uma melhor análise dos resultados, a tabela 4.6 mostra um resumo dos resultados obtidos em ambos os casos.

Tabela 4.6 - Comparação entre os resultados obtidos para o bloco em três camadas.

Camada	Presente trabalho (ANSYS)	Silva (2003)	Kavamura (2005)
1	62,085	60,773	56,977
2	61,723	60,771	60,099
3	60,584	60,771	60,626

4.4 BLOCO DE CONCRETO ANALISADO EXPERIMENTALMENTE

Silvoso (2002) estudou uma laje de fundação na fase construtiva no estado de São Paulo. A laje considerada tem 17.55 m de comprimento, 5.25 m de largura e 1.0 m de altura, executada sobre uma camada de regularização de concreto magro de 0.1 m de espessura assentada sobre uma rocha do tipo arenito. A execução da laje foi prevista em duas etapas de concretagem de 0.5 m de altura. O modelo considerou o semi-espaço de rocha como uma faixa de 3 m de largura no entorno da laje e 3 m de profundidade.

Para o problema térmico foram consideradas as seguintes condições de contorno para a seção transversal mostrada na figura 4.32 e na tabela 4.7: S1 é a superfície úmida superior da laje; S2 e S3 representam as superfícies laterais da laje, considerando-se a utilização de fôrmas de madeira; e S4 representa a superfície superior da rocha com troca direta com a atmosfera em ambiente ventilado. A curva de elevação adiabática do concreto pode ser vista na figura 4.33.

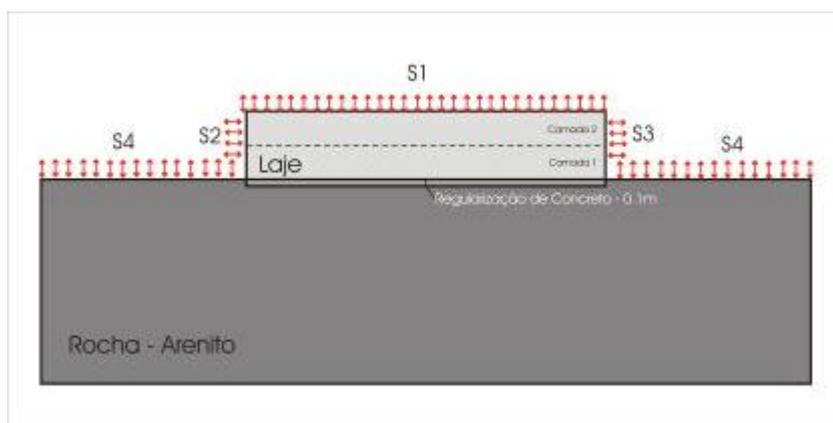


Figura 4.32 - Superfícies de troca de calor por convecção (Silvoso, 2002).

Tabela 4.7 – Propriedades térmicas dos materiais (Silvoso, 2002).

Material	Condutividade (W/mK)	Calor específico (MJ/m ³ K)	Coefficiente de convecção (W/m ² K)
Rocha – Arenito	2,50	2,50	-
Laje de regularização	1,50	1,90	-
Concreto	3,00	2,48	-
S2 e S3	-	-	2,55
S4	-	-	6,00
S1	-	-	10,00

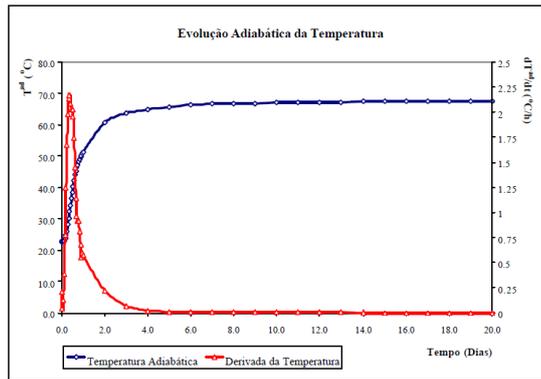


Figura 4.33 – Elevação adiabática do concreto (Silvoso, 2002).

A análise térmica realizada por Silvoso (2002) foi realizada em um programa de elementos finitos desenvolvido no PEC/COPPE em linguagem FORTRAN. A mesma análise foi realizada no ANSYS utilizando 651 elementos e 713 nós. As figuras de 4.34 a 4.41 mostram os resultados obtidos pelo ANSYS e por Silvoso (2002), para as idades do concreto de 12, 24, 36 e 48 horas, respectivamente.

Como condições de contorno foram fornecidas uma temperatura ambiente de 25 °C, temperatura inicial da rocha de 25°C, temperatura inicial do concreto e do concreto massa de 29 °C.

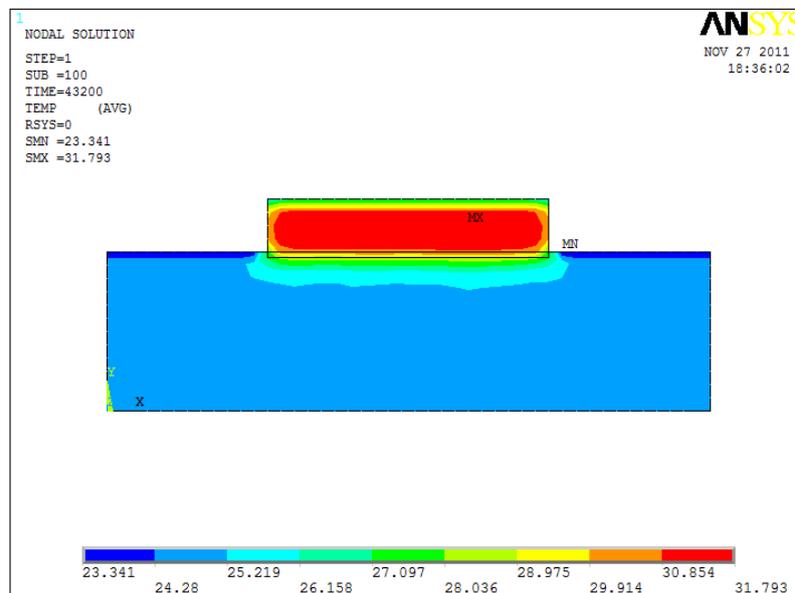


Figura 4.34 – Análise realizada no ANSYS após 12 horas de concretagem.

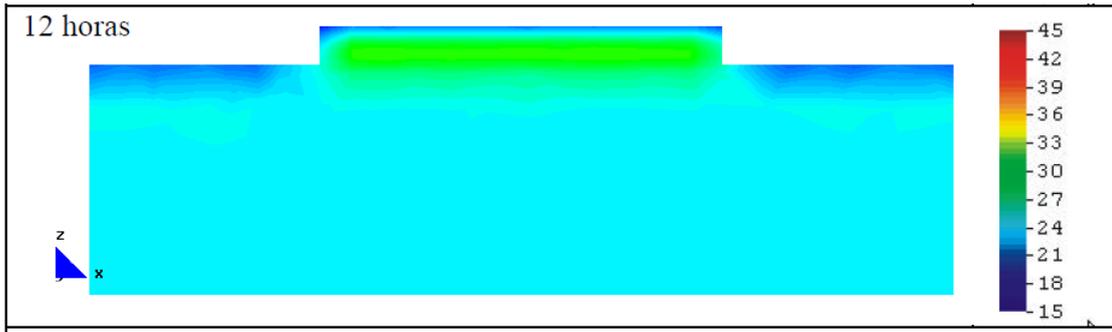


Figura 4.35 - Análise realizada por Silvosos após 12 horas de concretagem.

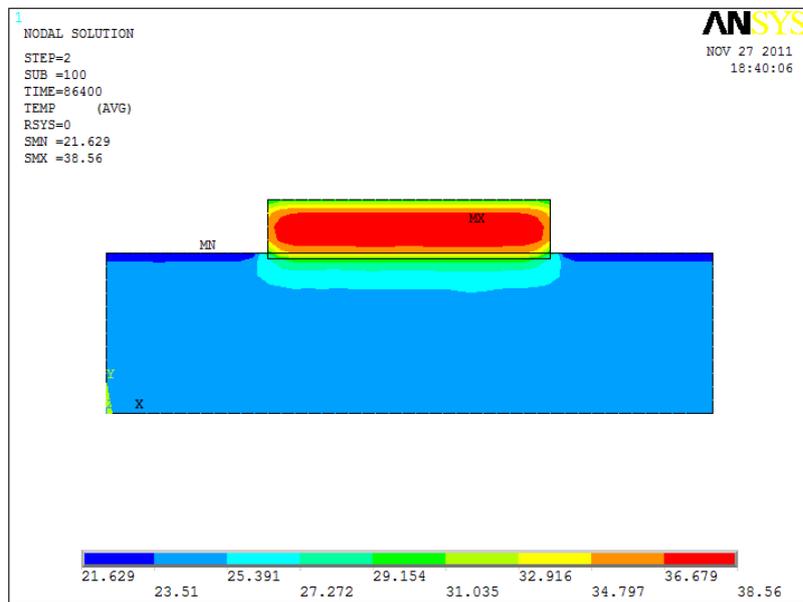


Figura 4.36 – Análise realizada no ANSYS após 24 horas de concretagem.

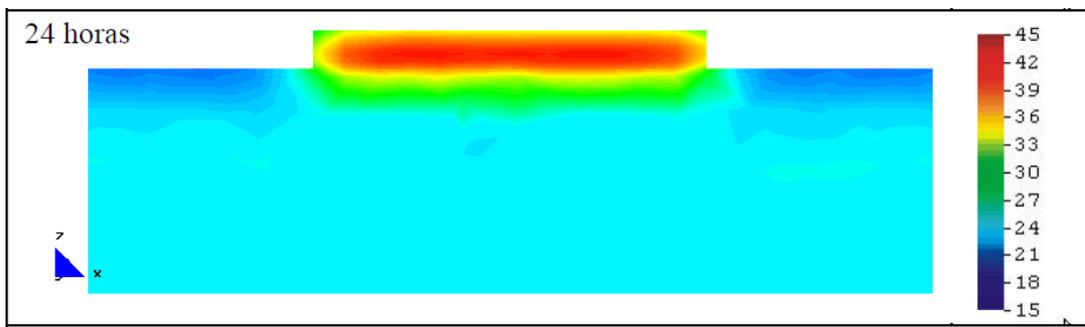


Figura 4.37 - Análise realizada por Silvosos após 24 horas de concretagem.

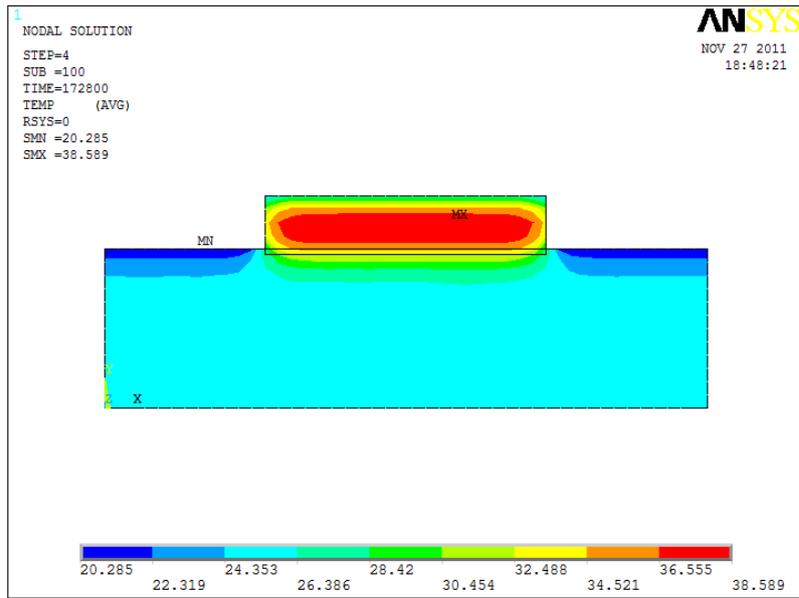


Figura 4.38 – Análise realizada no ANSYS após 36 horas de concretagem.

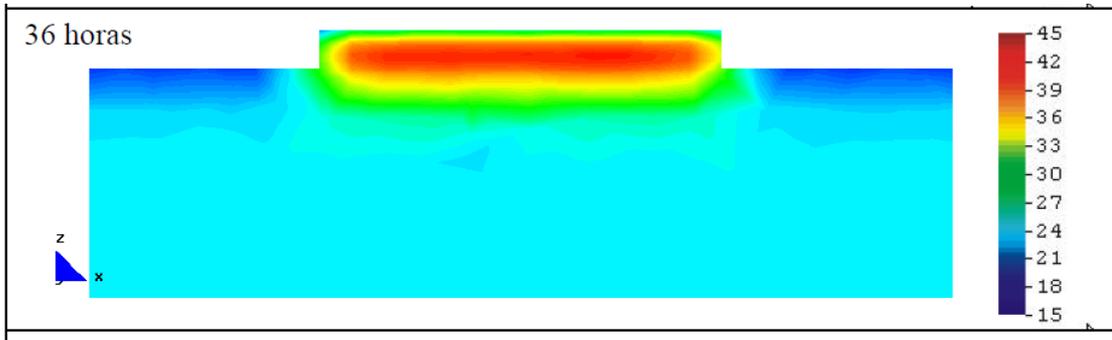


Figura 4.39 - Análise realizada por Silvosio após 36 horas de concretagem.

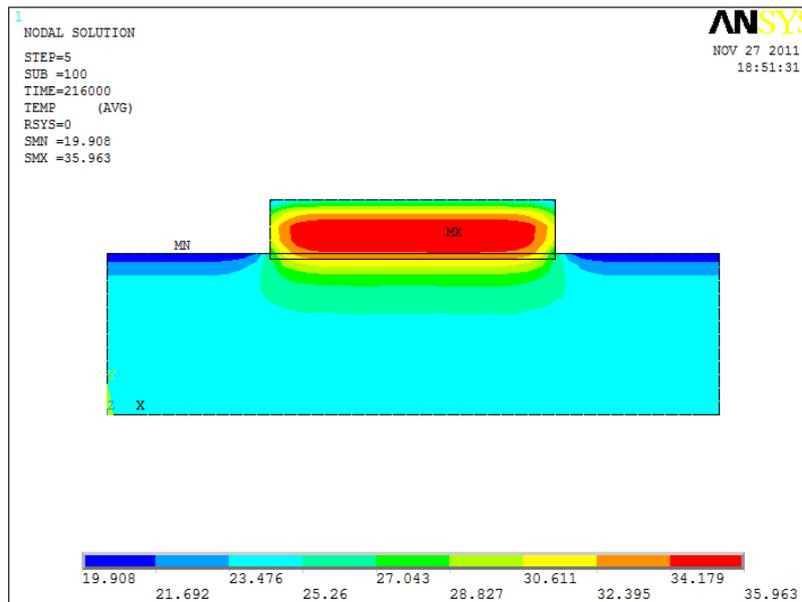


Figura 4.40 – Análise realizada no ANSYS após 48 horas de concretagem.

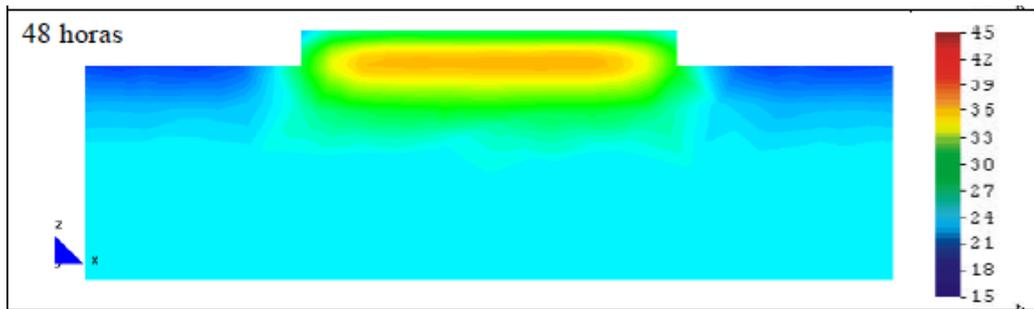


Figura 4.41 - Análise realizada por Silvosos após 48 horas de concretagem.

Silvosos (2004) também mostrou os resultados experimentais de temperatura para um sensor instalado na primeira camada de concreto. Esse resultado pode ser observado na figura 4.42. Sendo a curva dada pelos resultados experimentais e os pontos obtidos pelo presente trabalho com o ANSYS, observa-se uma boa concordância entre os valores experimentais e os valores obtidos pelo software.

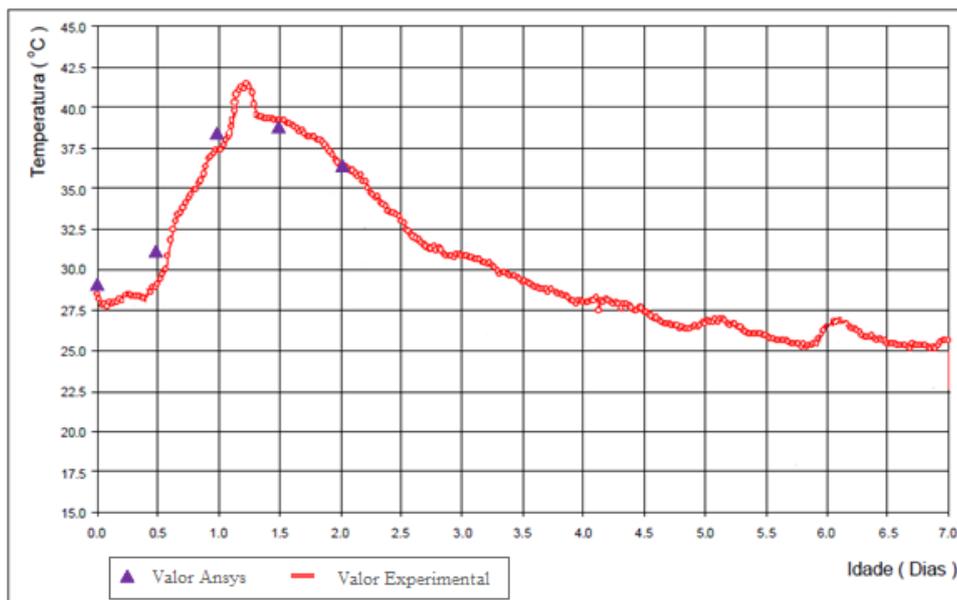


Figura 4.42 – Comparação entre as temperaturas em função do tempo para resultados encontrados no presente trabalho com o ANSYS e para um sensor instalado na massa de concreto segundo Silvosos (2004).

4.5 COMPARAÇÃO PASSO-A-PASSO ENTRE MEF (MANUAL) E O PROGRAMA ANSYS

Bhatti (2005) em um exemplo numérico mostrou os efeitos térmicos em uma placa em L submetida a um fluxo de calor, com as condições de contorno e propriedades térmicas apresentadas na tabela 4.8 e na figura 4.43. Com isso o autor encontrou os resultados das temperaturas em alguns pontos da placa utilizando o MEF de forma manual. Para assimilação do programa estudado neste trabalho, o mesmo exemplo foi feito no ANSYS e os resultados foram comparados com os resultados obtidos por Bhatti (2005).

Tabela 4.8 – Propriedades térmicas da placa.

Condutividade térmica (k)	45 W/m °C
Temperatura inferior da chapa (T_0)	110°C
Temperatura ambiente	20°C
Coefficiente de convecção (h)	55 W/m ² °C
Fluxo de calor (q_0)	8000 W/m ²
Geração de calor (Q)	5 x 10 ⁶ W/m ³

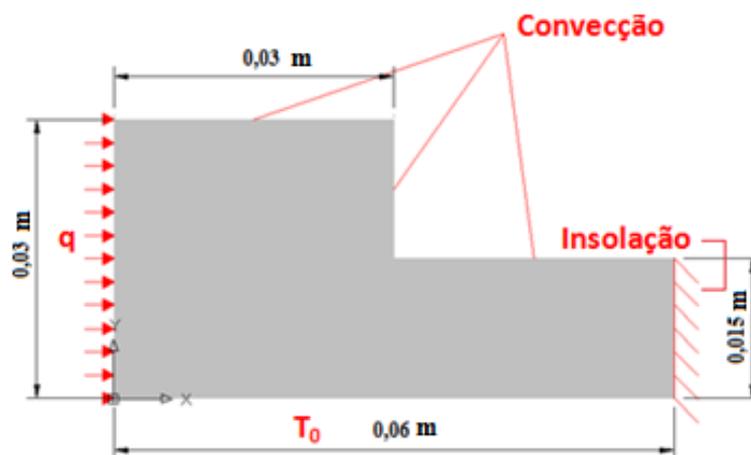


Figura 4.43 – Condições de contorno da placa em estudo.

Como mostrado anteriormente no capítulo 3, a equação diferencial que governa um problema de fluxo de calor é um caso especial. Analisando o problema dado, temos:

$$k_x = k_y = 45 \frac{\text{W}}{\text{m}} \text{°C}; \quad q = 5 \times 10^6 \text{W/m}^3; \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0.$$

Para as condições de contorno temos:

Para todos os nós da parte inferior da chapa temos: $T_0 = 110$

Do lado esquerdo da chapa ($n_x = -1, n_y = 0$):

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = k \frac{\partial T}{\partial x} = q_0 \Rightarrow \alpha = 0; \quad \beta = 8000$$

Para o lado direito, $\alpha = 0; \beta = 0$.

Para a convecção na parte horizontal da chapa ($n_x = 0, n_y = -1$)

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = -k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_\infty)$$

$$\Rightarrow \alpha = -h = -55; \quad \beta = hT_\infty = 55 \times 20 = 1100$$

Para a convecção na parte vertical da chapa ($n_x = 1, n_y = 0$)

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = -k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_\infty)$$

$$\Rightarrow \alpha = -h = -55; \quad \beta = hT_\infty = 55 \times 20 = 1100$$

A solução do problema utilizando o método dos elementos finitos é realizada dividindo a chapa em seis elementos, como mostrado na figura 4.44. Portanto, há 13 nós e, conseqüentemente, 13 graus de liberdade.

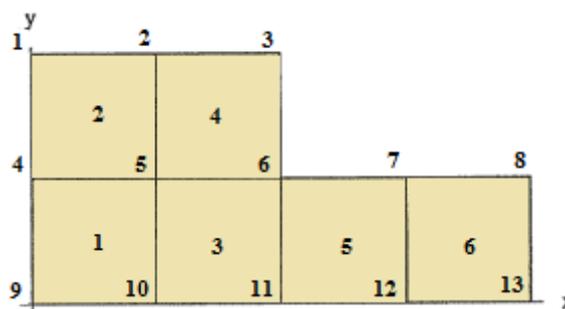


Figura 4.44 – Divisão da chapa em elementos.

A solução em elementos finitos é mostrada a seguir.

Equação para o elemento 1:

Dimensão do elemento: $a = 0,0075; b = 0,0075$.

$$k_x = k_y = 45; \quad q = 5 \times 10^6;$$

$$k_x = \begin{pmatrix} 30 & -7,5 & -15 & -7,5 \\ -7,5 & 30 & -7,5 & -15 \\ -15 & -7,5 & 30 & -7,5 \\ -7,5 & -15 & -7,5 & 30 \end{pmatrix}; \quad r_q = \begin{pmatrix} 281,25 \\ 281,25 \\ 281,25 \\ 281,25 \end{pmatrix}$$

NBC no lado 4:

$$L = 0,015; \quad \alpha = 0; \quad \beta = 8000;$$

$$k_\alpha = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad r_\beta = \begin{pmatrix} 60 \\ 0 \\ 0 \\ 60 \end{pmatrix}$$

Equação completa do elemento:

$$\begin{pmatrix} 30 & -7,5 & -15 & -7,5 \\ -7,5 & 30 & -7,5 & -15 \\ -15 & -7,5 & 30 & -7,5 \\ -7,5 & -15 & -7,5 & 30 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_9 \\ T_{10} \\ T_5 \\ T_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 341,25 \\ 281,25 \\ 281,25 \\ 341,25 \end{pmatrix}$$

Equação para o elemento 2:

Dimensão do elemento: a = 0,0075; b = 0,0075.

$$k_x = k_y = 45; \quad q = 5 \times 10^6;$$

$$k_x = \begin{pmatrix} 30 & -7,5 & -15 & -7,5 \\ -7,5 & 30 & -7,5 & -15 \\ -15 & -7,5 & 30 & -7,5 \\ -7,5 & -15 & -7,5 & 30 \end{pmatrix}; \quad r_q = \begin{pmatrix} 281,25 \\ 281,25 \\ 281,25 \\ 281,25 \end{pmatrix}$$

NBC no lado 3:

$$L = 0,015; \quad \alpha = -55; \quad \beta = 1100;$$

$$k_{\alpha} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2750 & 0,1375 \\ 0 & 0 & 0,1375 & 0,2750 \end{pmatrix}; \quad r_{\beta} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 8,25 \\ 8,25 \end{pmatrix}$$

NBC no lado 4:

$$L = 0,015; \quad \alpha = 0; \quad \beta = 8000;$$

$$k_{\alpha} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad r_{\beta} = \begin{pmatrix} 60 \\ 0 \\ 0 \\ 60 \end{pmatrix}$$

Equação completa do elemento:

$$\begin{pmatrix} 30 & -7,5 & -15 & -7,5 \\ -7,5 & 30 & -7,5 & -15 \\ -15 & -7,5 & 30,275 & -7,3625 \\ -7,5 & -15 & -7,3625 & 30,275 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_4 \\ T_5 \\ T_2 \\ T_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 341,25 \\ 281,25 \\ 289,5 \\ 349,5 \end{pmatrix}$$

Fazendo o processamento dos outros elementos da mesma forma, obtemos a seguinte equação global:

$$\begin{pmatrix} 30,275 & -7,3625 & 0 & -7,5 & -15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -7,3625 & 60,55 & -7,3625 & -15 & -15 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -7,625 & 30,55 & 0 & -15 & -7,3625 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -7,5 & -15 & 0 & 60 & -15 & 0 & 0 & 0 & -7,5 & -15 & 0 & 0 & 0 \\ -15 & -15 & -15 & -15 & 120 & 15 & 0 & 0 & -15 & -15 & -15 & 0 & 0 \\ 0 & -15 & -7,3625 & 0 & -15 & 90,55 & -7,3625 & 0 & 0 & -15 & -15 & -15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7,3625 & 60,55 & -7,3625 & 0 & 0 & -15 & -15 & -15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7,3625 & 30,275 & 0 & 0 & 0 & -15 & -7,5 \\ 0 & 0 & 0 & -7,5 & -15 & 0 & 0 & 0 & 30 & -7,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -15 & -15 & -15 & 0 & 0 & -7,5 & 60 & -7,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -15 & -15 & -15 & 0 & 0 & -7,5 & 60 & -7,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -15 & -15 & -15 & 0 & 0 & -7,5 & 60 & -7,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -15 & -7,5 & 0 & 0 & 0 & -7,5 & 30 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \\ T_8 \\ T_9 \\ T_{10} \\ T_{11} \\ T_{12} \\ T_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 349,5 \\ 579,0 \\ 297,75 \\ 682,50 \\ 1125,0 \\ 860,25 \\ 579 \\ 289,5 \\ 341,25 \\ 562,50 \\ 562,50 \\ 562,50 \\ 281,25 \end{pmatrix}$$

Da condição de contorno essencial, temos que a parte inferior da chapa tem uma temperatura de 110°C.

Logo, temos:

Nó	Definição	Valor
9	T ₉	110
10	T ₁₀	110
11	T ₁₁	110
12	T ₁₂	110
13	T ₁₃	110

Assim, essas equações podem ser eliminadas, e a equação global resulta em:

$$\begin{pmatrix}
 30,275 & -7,3625 & 0 & -7,5 & -15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -7,3625 & 60,55 & -7,3625 & -15 & -15 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -7,3625 & 30,55 & 0 & -15 & -7,3625 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -7,5 & -15 & 0 & 60 & -15 & 0 & 0 & 0 & -7,5 & -15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -15 & -15 & -15 & -15 & 120 & 15 & 0 & 0 & -15 & -15 & -15 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -15 & -7,3625 & 0 & -15 & 90,55 & -7,3625 & 0 & 0 & -15 & -15 & -15 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7,3625 & 60,55 & -7,3625 & 0 & 0 & -15 & -15 & -15 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7,3625 & 30,275 & 0 & 0 & 0 & -15 & -7,5 & 0
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 T_1 \\
 T_2 \\
 T_3 \\
 T_4 \\
 T_5 \\
 T_6 \\
 T_7 \\
 T_8 \\
 110 \\
 110 \\
 110 \\
 110 \\
 110
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 349,5 \\
 579,0 \\
 297,75 \\
 682,5 \\
 1125,0 \\
 860,25 \\
 579,0 \\
 289,5
 \end{pmatrix}$$

Operando a matriz, encontramos:

$$\begin{pmatrix}
 30,275 & -7,3625 & 0 & -7,5 & -15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -7,3625 & 60,55 & -7,3625 & -15 & -15 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -7,3625 & 30,55 & 0 & -15 & -7,3625 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -7,5 & -15 & 0 & 60 & -15 & 0 & 0 & 0 & -7,5 & -15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -15 & -15 & -15 & -15 & 120 & 15 & 0 & 0 & -15 & -15 & -15 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -15 & -7,3625 & 0 & -15 & 90,55 & -7,3625 & 0 & 0 & -15 & -15 & -15 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7,3625 & 60,55 & -7,3625 & 0 & 0 & -15 & -15 & -15 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7,3625 & 30,275 & 0 & 0 & 0 & -15 & -7,5 & 0
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 T_1 \\
 T_2 \\
 T_3 \\
 T_4 \\
 T_5 \\
 T_6 \\
 T_7 \\
 T_8
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 349,5 \\
 579,0 \\
 297,75 \\
 3157,5 \\
 6075,0 \\
 5810,25 \\
 5529,0 \\
 2764,5
 \end{pmatrix}$$

Resolvendo o sistema, encontramos os resultados mostrados na tabela 4.9:

Utilizando o software ANSYS como meio de solução do problema encontramos o resultado mostrado nas figuras 4.45 a e 4.46. A figura 4.45 b é o resultado do programa mostrado por Bhatti (2005). Como forma de comparação a tabela 4.9 mostra os resultados encontrados analiticamente e os resultados encontrados pelo programa, e a diferença percentual entre eles.

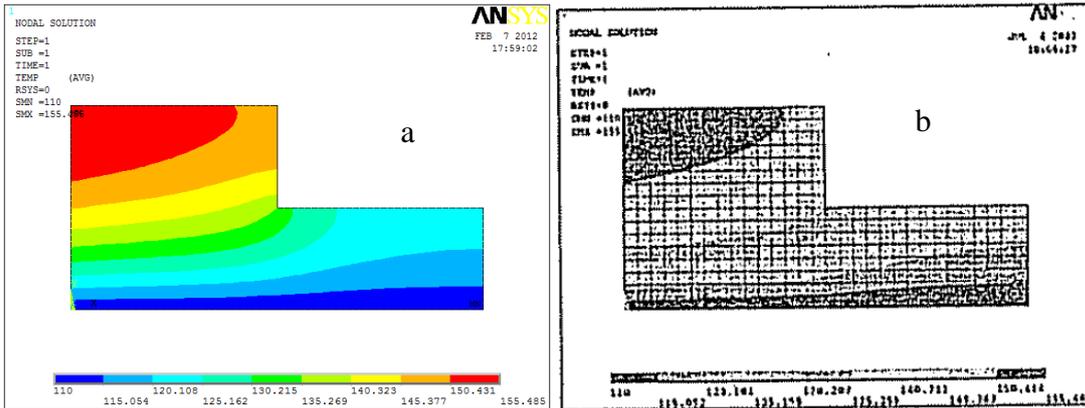


Figura 4.45 – a) Resultado obtido pelo ANSYS; b) Resultado mostrado por Bhatti (2005).

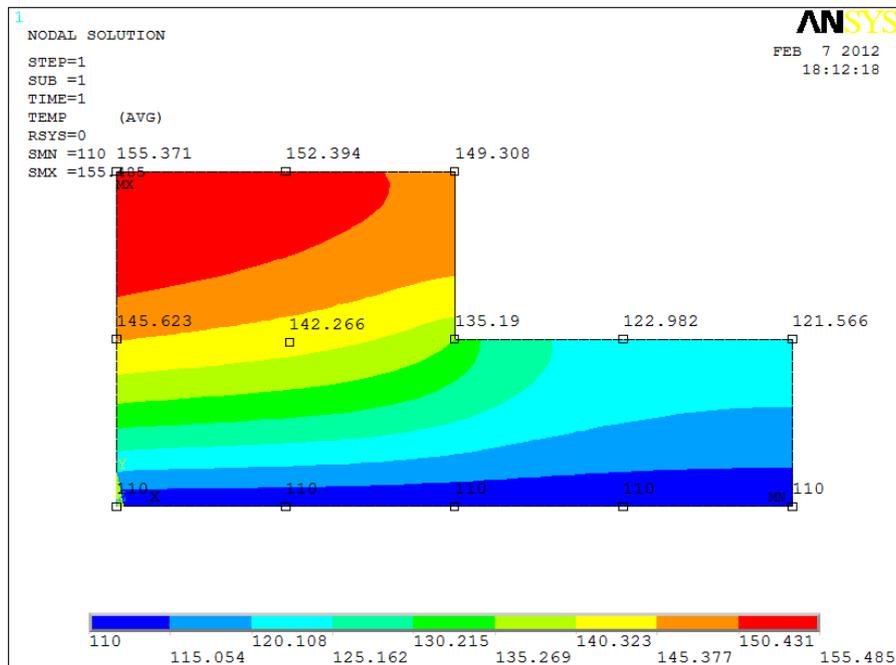


Figura 4.46 – Resultados nodais encontrados pelo ANSYS.

Tabela 4.9 – Resultados para o modelo numérico.

Nó	Definição	Valor Numérico	Valor ANSYS	$\Delta(\%)$
1	T ₁	154,962	155,371	0,26
2	T ₂	151,228	152,394	0,76
3	T ₃	148,673	149,308	0,42
4	T ₄	145,433	145,623	0,13
5	T ₅	142,521	142,266	0,19
6	T ₆	134,871	135,190	0,24
7	T ₇	122,436	122,982	0,44
8	T ₈	121,088	121,566	0,39
9	T ₉	110	110	0
10	T ₁₀	110	110	0
11	T ₁₁	110	110	0
12	T ₁₂	110	110	0
13	T ₁₃	110	110	0

Após a familiarização com o programa, foi realizada uma análise individual dos termos da equações, das condições iniciais, das condições de contorno e da forma geométrica aplicadas no programa ANSYS. Os resultados dessas análises podem ser observadas nos apêndices de B a E.

5 ESTUDOS DE CASOS

Este capítulo tem o intuito de utilizar a ferramenta computacional ANSYS na análise de algumas situações reais e hipotéticas, de forma que se possa visualizar o comportamento térmico de algumas estruturas. Inicialmente, será estudado o bloco hipotético estudado por Silva (2003) e Kavamura (2005) e mostrado no item 4.3, mostrando agora as isotermas de temperatura considerando a geração interna de calor para as camadas inferiores.

Para os exemplos construídos em camadas foi utilizado o recurso *Birth and Death* no ANSYS. Sua função é de ativar e desativar os elementos conforme vai prosseguindo a análise. Nos modelos estudados neste trabalho, primeiro desativa todos os elementos e a medida que o número de camada vai aumentando os elementos são ativados supondo a construção de uma nova camada.

A simulação bidimensional instável das várias etapas da sequência de construção pode ser realizada com o *Birth and Death* do software, que é usado para ativar e desativar elementos. Desta forma, a análise pode ser feita com uma única malha computacional em vez de várias, uma para cada fase de construção (Krüger *et al*, 2003).

5.1 – BLOCO DE CONCRETO CONSTRUÍDO EM CAMADAS

O bloco de concreto analisado por Silva (2003) e Kavamura (2005) não admite a geração de calor das camadas inferiores na análise da camada subsequente após dois dias de concretagem. No entanto, a configuração das isotermas muda ao admitir que o concreto continue gerando calor após quatro e seis dias. Essa geração de calor acontece a uma taxa bem menor, por isso o aumento de temperatura nas camadas anteriores é menor.

Analisando essa estrutura, mas agora acrescentando a geração de calor para quatro e seis dias obtem-se os resultados apresentados nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3. Para esses casos, nota-se que a temperatura para a primeira camada após dois dias de concretagem permaneceu inalterada em comparação com a análise realizada pelos autores citados.

Quando há a concretagem da segunda camada, esta apresenta temperatura equivalente à primeira camada para dois dias de concretagem. Entretanto, a primeira camada com quatro

dias de concretagem apresenta uma elevação de aproximadamente 7 °C com relação a temperatura para dois dias de concretagem.

Na concretagem da terceira camada acontece o mesmo processo, ou seja, a terceira camada apresenta uma temperatura máxima inferior às demais, isso por que o calor de hidratação para dois dias de concretagem é muito maior que para quatro e seis dias.

Considerando-se que a estrutura está apoiada em uma rocha ou sobre uma base de concreto com temperatura inicial de 30 °C, as isotermas mudam a configuração. Os valores das temperaturas máximas permanecem inalterados, mudam apenas as isotermas da primeira camada. Isso pode ser notado nas figuras 5.4 a 5.6.

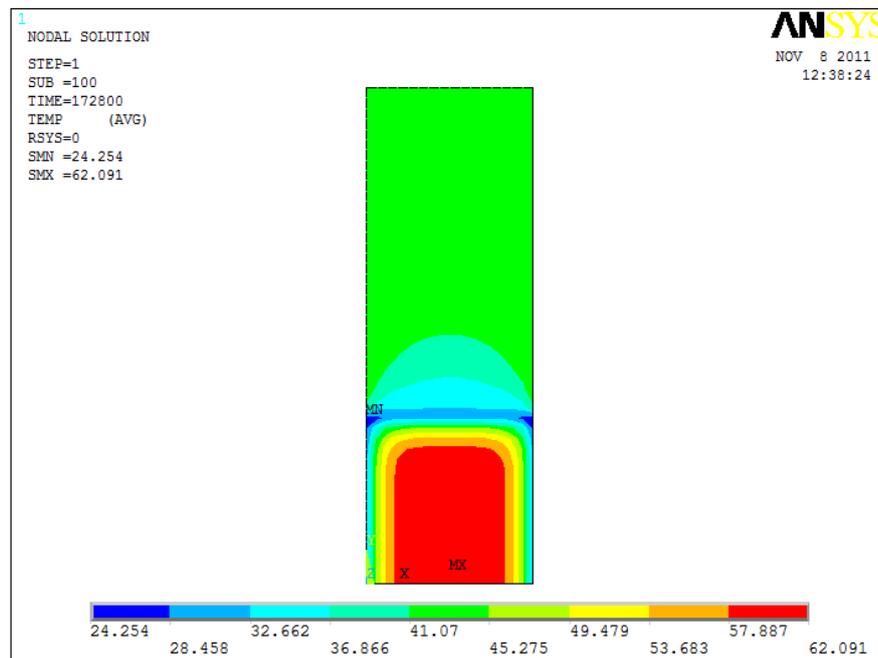


Figura 5.1 – Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem da primeira camada.

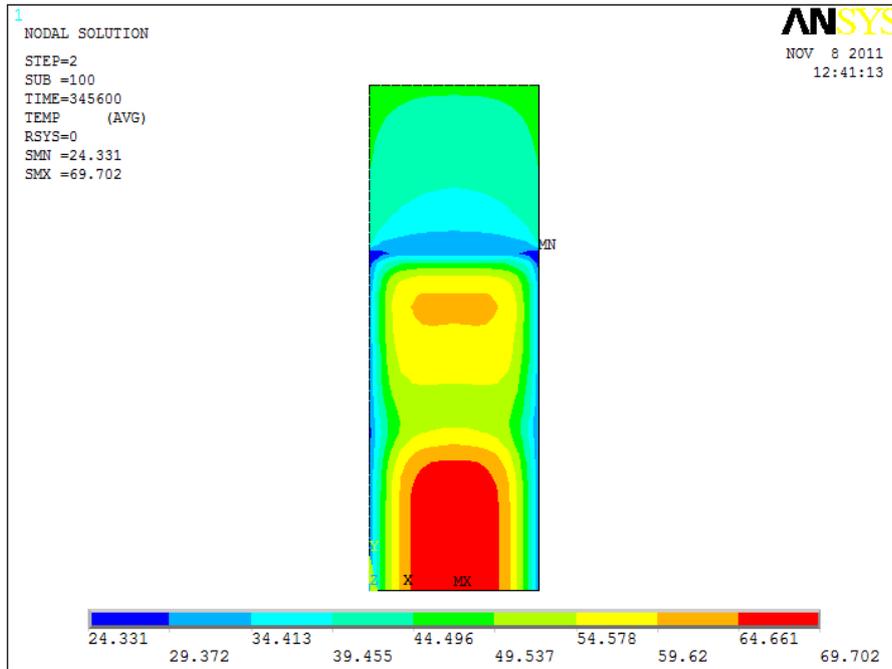


Figura 5.2 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem da segunda camada e 4 dias de concretagem da primeira camada de concreto.

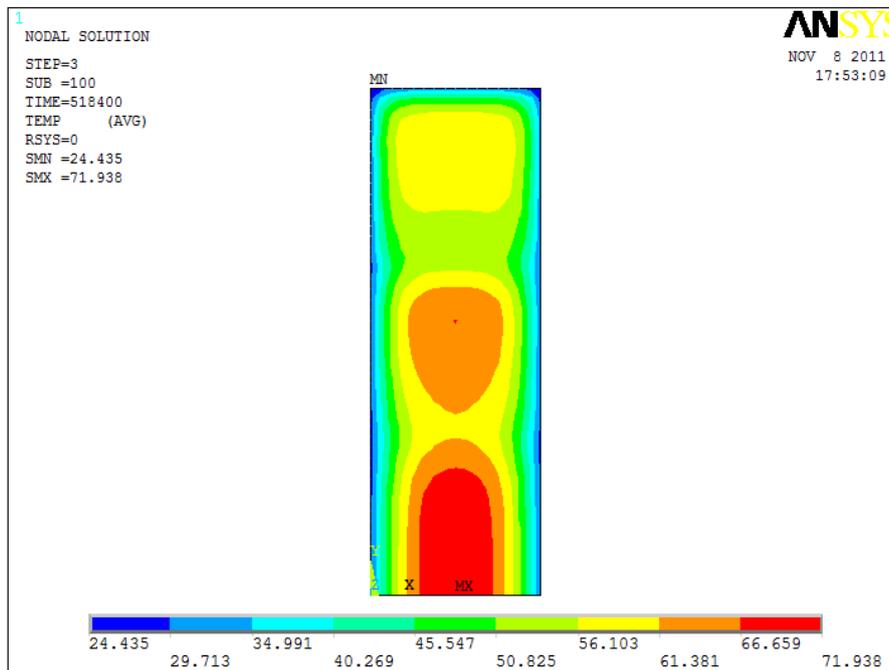


Figura 5.3 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem da terceira camada, 4 dias de concretagem da segunda camada e 6 dias de concretagem da primeira camada de concreto.

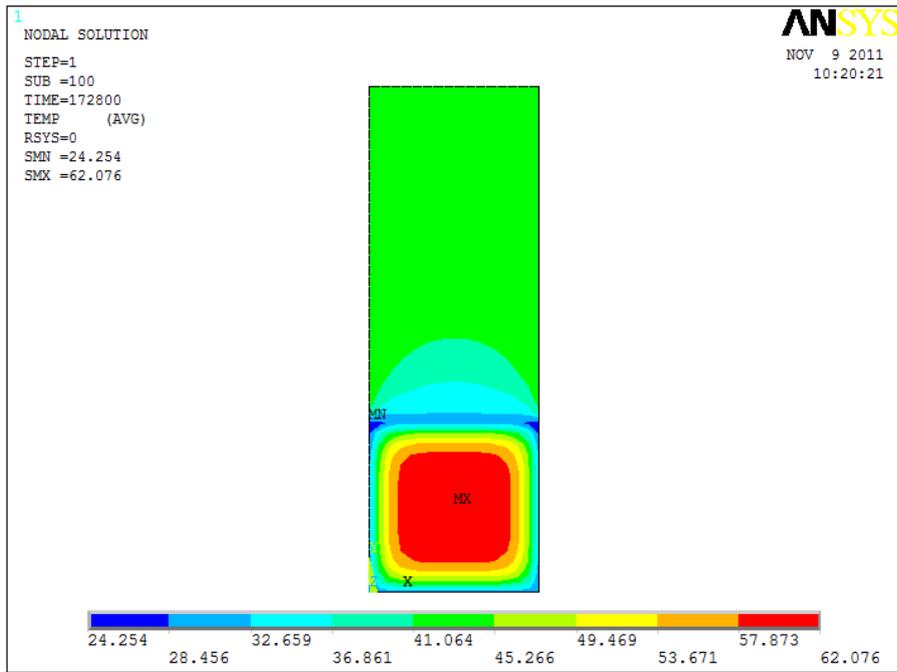


Figura 5.4 – Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem da primeira camada, considerando-se temperatura inferior de 30 °C.

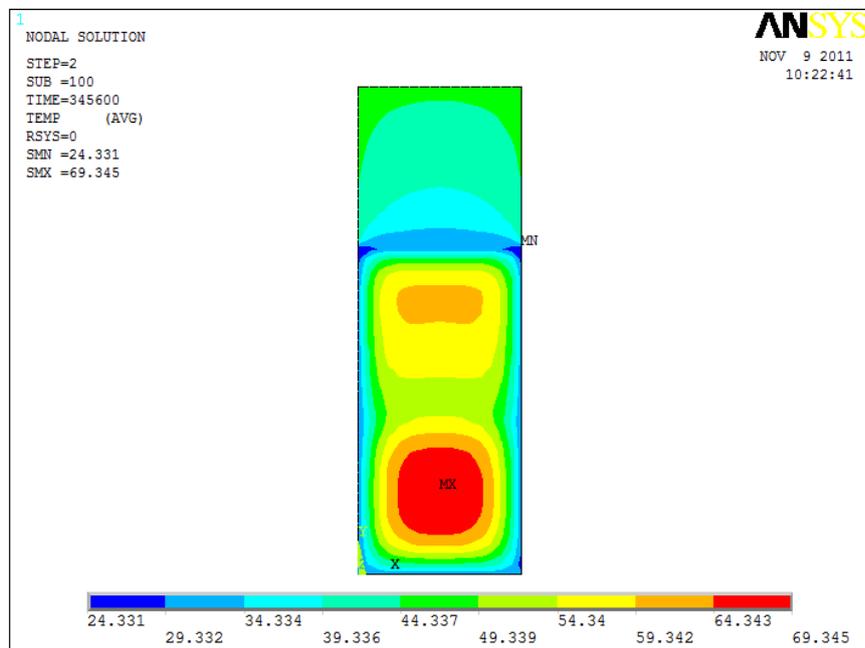


Figura 5.5 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem da segunda camada e 4 dias de concretagem da primeira camada de concreto.

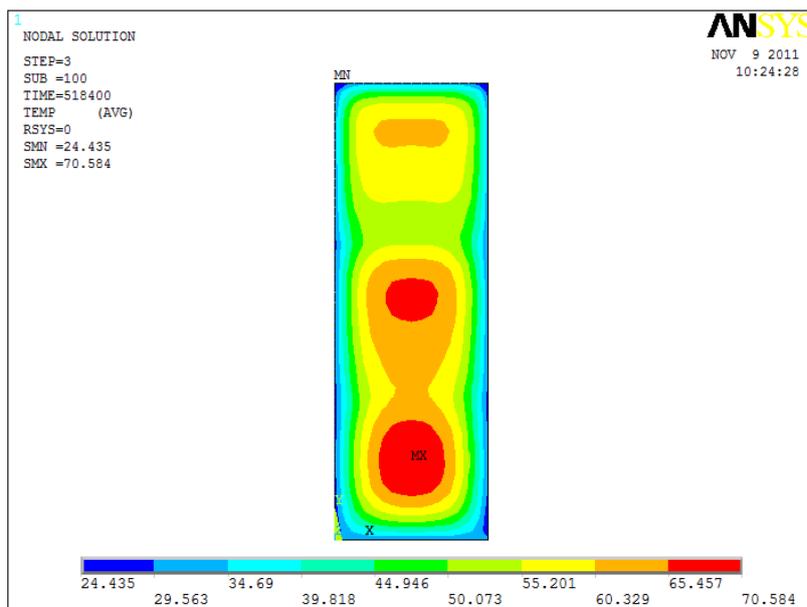


Figura 5.6 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem da terceira camada, 4 dias de concretagem da segunda camada e 6 dias de concretagem da primeira camada de concreto.

5.2 TETRÁPODE DE CONCRETO

O tetrápode é uma peça utilizada na proteção de quebra-mares, consistindo num bloco de concreto simples constituído por quatro pernas tronco-cónicas irradiando de um ponto central, como mostra a figura 5.7 (Azenha, 2004).



Figura 5.7 - Construção de um quebra-mar – colocação de tetrápodes (Azenha *et al.*, 2011). Azenha *et al.*(2011) analisou os efeitos térmicos de um tetrapodo construído conforme a geometria mostrada na figura 5.8, utilizando o software *ADINA* com as propriedades de uma estrutura real, como mostra a tabela 5.1.

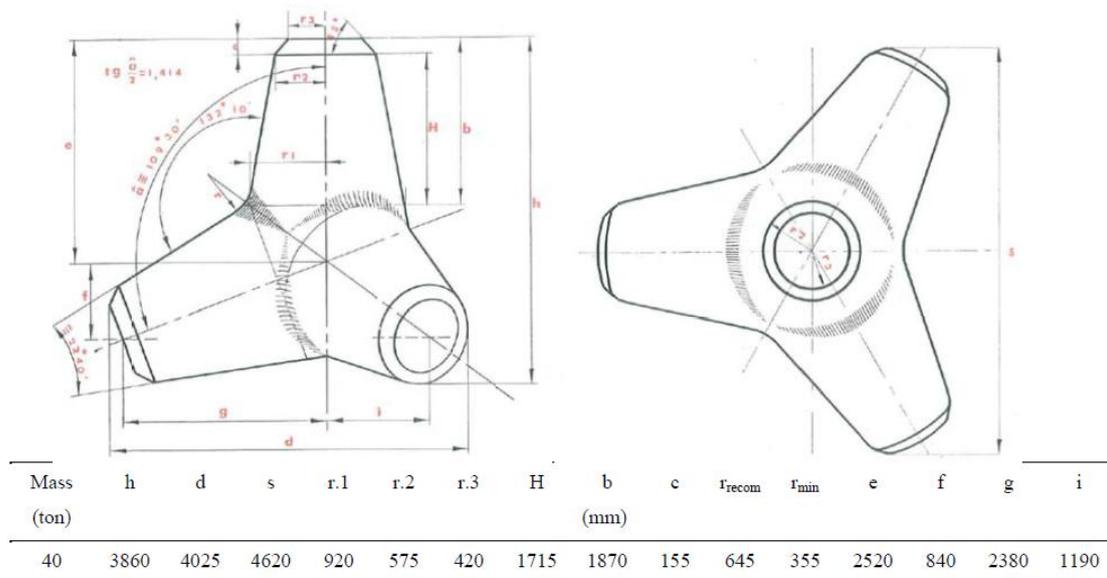


Figura 5.8 – Geometria da seção (Azenha *et al.*, 2011).

Tabela 5.1 – Propriedades térmicas do concreto.

PROPRIEDADES	
Condutividade Térmica (W/m.°C)	2,6
Calor Específico (J/g.°C)	1100
Massa Específica (kg/m ³)	2400
Coef convecção (W/m ² .°C)	10

A figura 5.9 mostra os resultados obtidos por Azenha *et al.* (2011) para 20h, 36h, 50h e 120h em três dimensões. Observa-se a temperatura máxima no tetrapodo para 36h de concretagem. A figura 5.10 mostra os resultados para os mesmos intervalos de tempo obtidos no ANSYS para duas dimensões. Percebe-se para 20h, 36h, 50h e 120h, uma temperatura máxima de 47.244°C, 59.851°C, 56.683°C e 35.68°C, respectivamente.

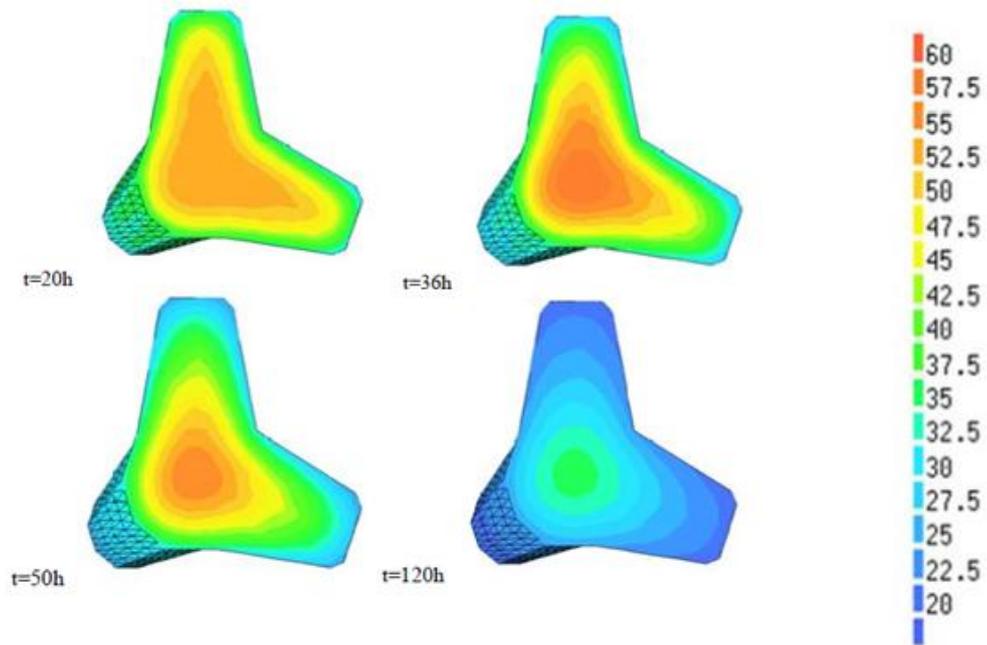


Figura 5.9 – Resultados obtidos por Azenha *et al.* (2011) para o tetrapodo.

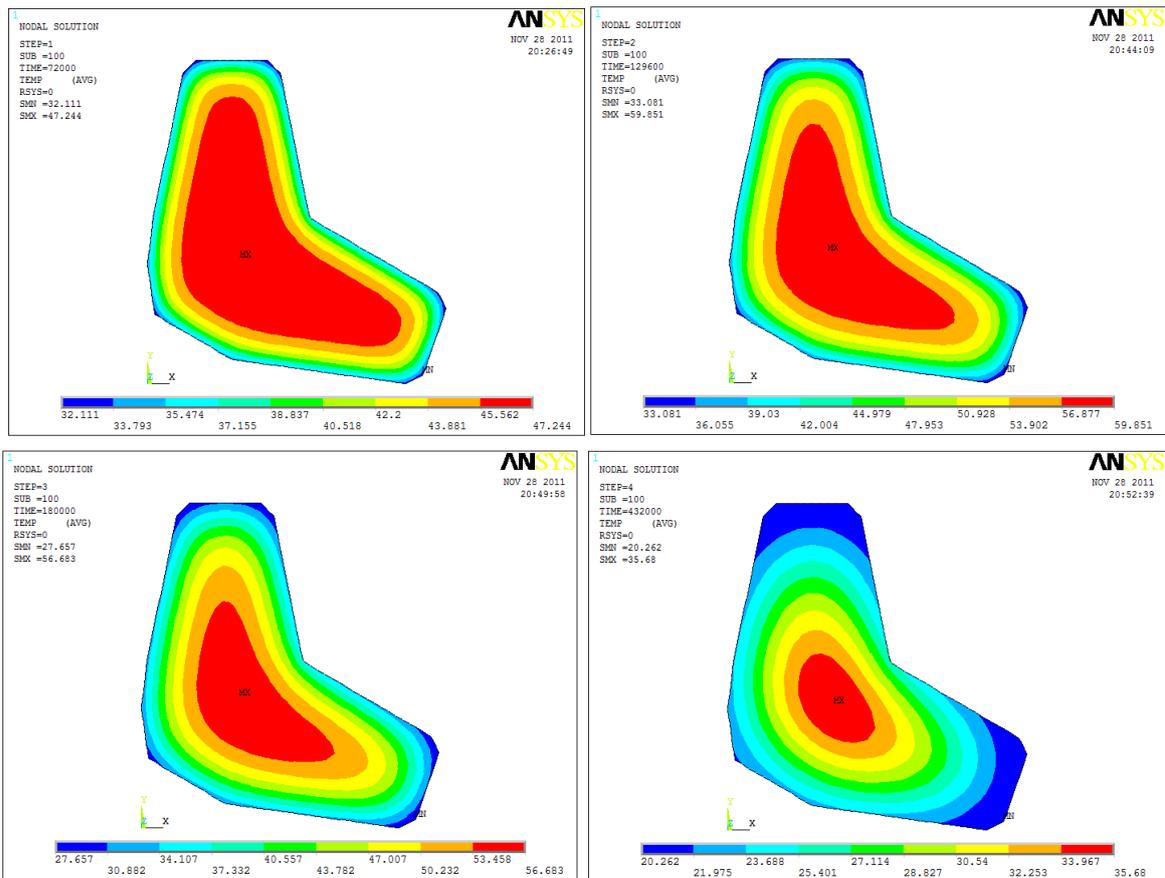


Figura 5.10 – Resultados obtidos pelo ANSYS para 20h, 36h, 50h, 120h, respectivamente.

A análise realizada por Azenha *et al.* (2011) foi feita em três dimensões, enquanto a análise obtida pelo ANSYS foi para duas dimensões. Observa-se que uma coerência entre os resultados e que a temperatura máxima atingida acontece entre 1,5 e 2,0 dias de concretagem.

5.3 - FUNDAÇÃO

Azenha (2009) mostrou o desenvolvimento da temperatura em uma fundação de uma torre eólica. A fim de obter um bom desempenho, uma torre eólica deve estar bem fixada na base, de forma a garantir que não haverá oscilação na torre. Para isso, no ato da construção da fundação, um anel de aço é prendido na fundação. A figura 5.11 mostra as dimensões da torre eólica e a construção da fundação; a figura 5.12 mostra a seção analisada e a localização do sensor verificado.

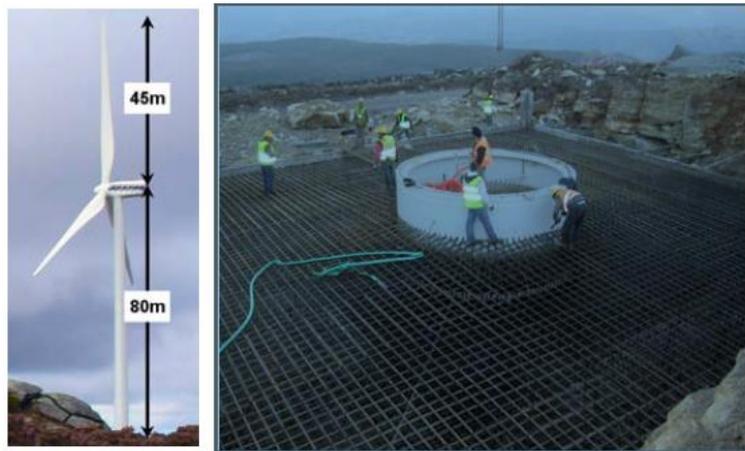


Figura 5.11 – Torre eólica e construção da fundação (Azenha, 2009).

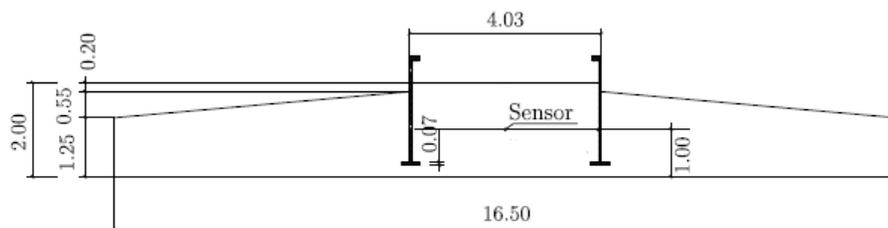


Figura 5.12 – Seção da torre e localização do sensor (Azenha, 2009).

A fundação foi monitorada por sensores e Azenha (2009) também analisou a fundação através do software ADINA. Para esta análise foram considerados três materiais com as propriedades mostradas na tabela 5.2 e a curva de elevação adiabática do concreto encontra-se na figura 5.13 e a curva de geração de calor na figura 5.14.

Tabela 5.2 – Propriedades dos materiais.

PROPRIEDADES		
Base da fundação (rocha)	Condutividade Térmica (W/m.°C)	2,79
	Calor Específico (J/g.°C)	730
	Massa Específica (kg/m ³)	2794
	Coef convecção (W/m ² .°C)	8
	Temperatura inicial (°C)	9,8
Fundação	Condutividade Térmica (W/m.°C)	2,6
	Calor Específico (J/g.°C)	1333
	Massa Específica (kg/m ³)	1800
	Coef convecção (W/m ² .°C)	10
	Temperatura inicial (°C)	15
Aço	Condutividade Térmica (W/m.°C)	54
	Calor Específico (J/g.°C)	1090
	Massa Específica (kg/m ³)	3000
	Coef convecção (W/m ² .°C)	7,5
	Temperatura inicial (°C)	15

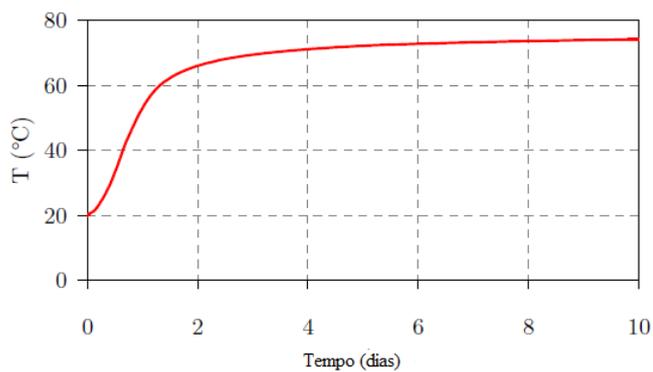


Figura 5.13 – Elevação adiabática do concreto (Azenha, 2009).

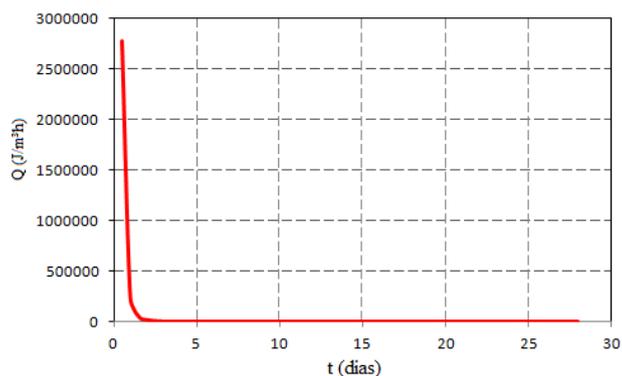


Figura 5.14 – Curva de geração de calor (Azenha, 2009).

Os resultados obtidos para as isotermas encontradas através dos softwares são mostradas nas figuras de 5.15 a 5.19 para 0,9; 1,3; 2,3; 5,0 e 9,0 dias de concretagem, respectivamente. A figura 5.20 mostra ainda a curva obtida pelo sensor, medido experimentalmente e os resultados conseguidos com o ANSYS.

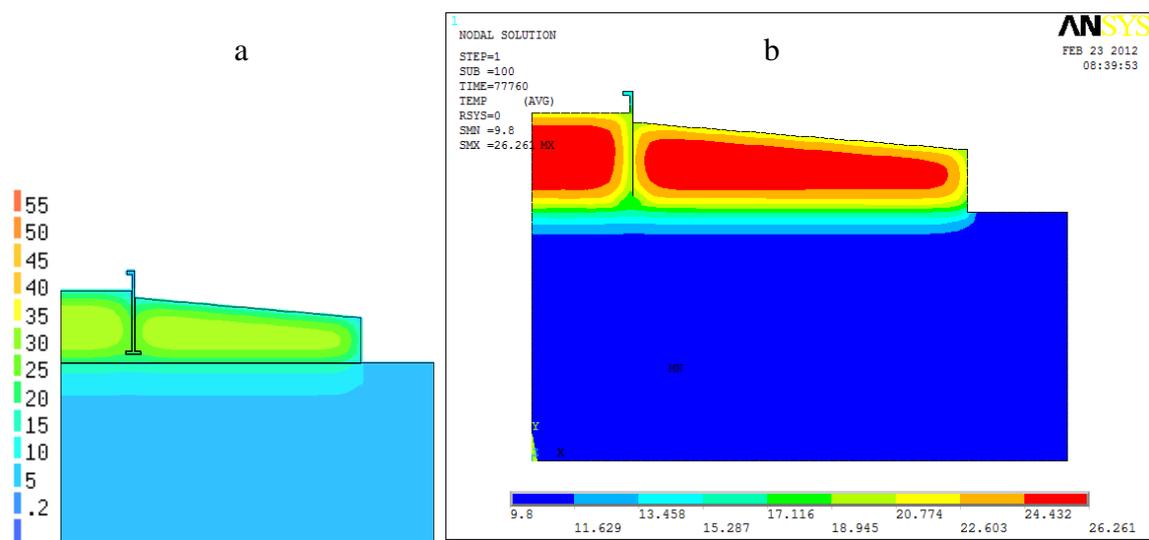


Figura 5.15 – Isotermas de temperatura para 0,9 dias de concretagem: a) ADINA (Azenha, 2009); b) ANSYS.

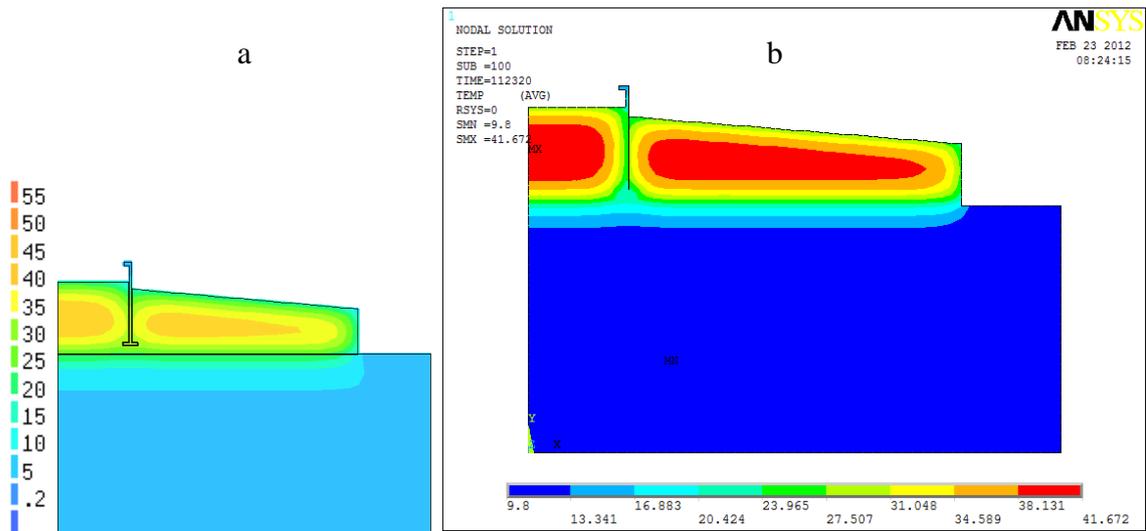


Figura 5.16 – Isotermas de temperatura para 1,3 dias de concretagem: a) ADINA (Azenha, 2009); b) ANSYS.

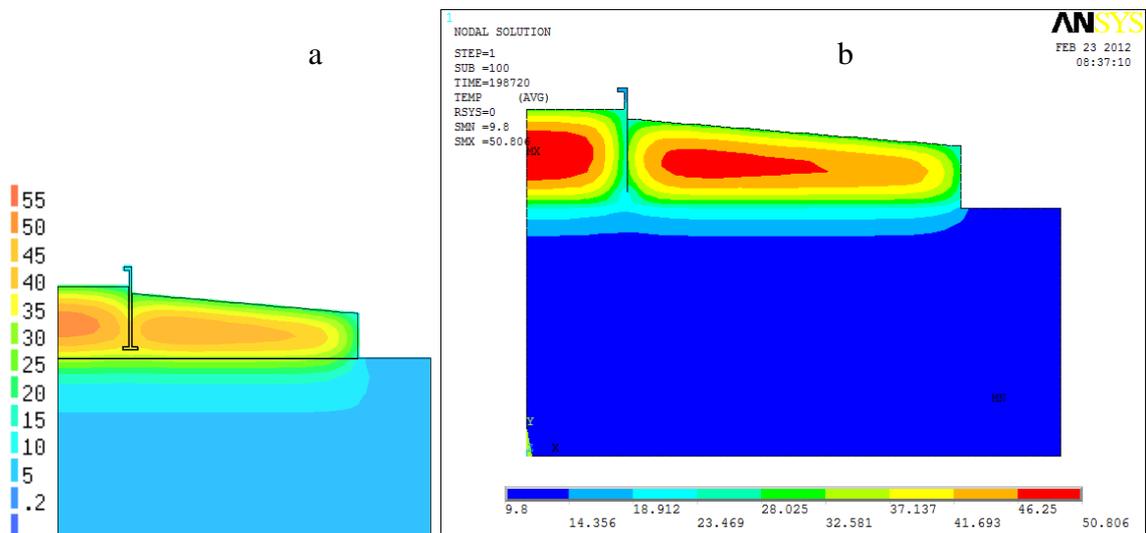


Figura 5.17 – Isotermas de temperatura para 2,3 dias de concretagem: a) ADINA (Azenha, 2009); b) ANSYS.

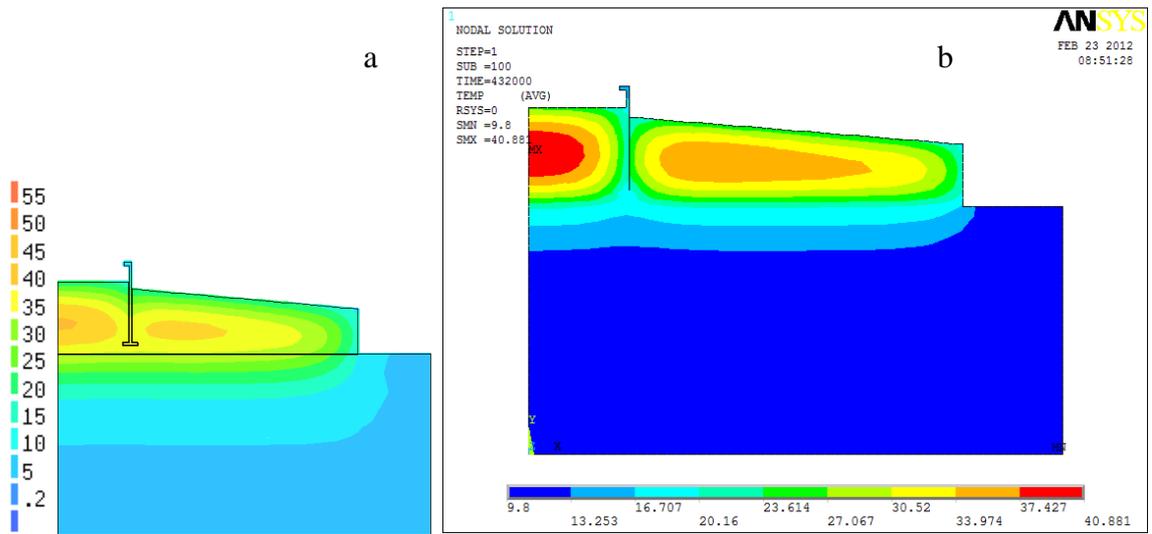


Figura 5.18 – Isotermas de temperatura para 5 dias de concretagem: a) ADINA (Azenha, 2009); b) ANSYS.

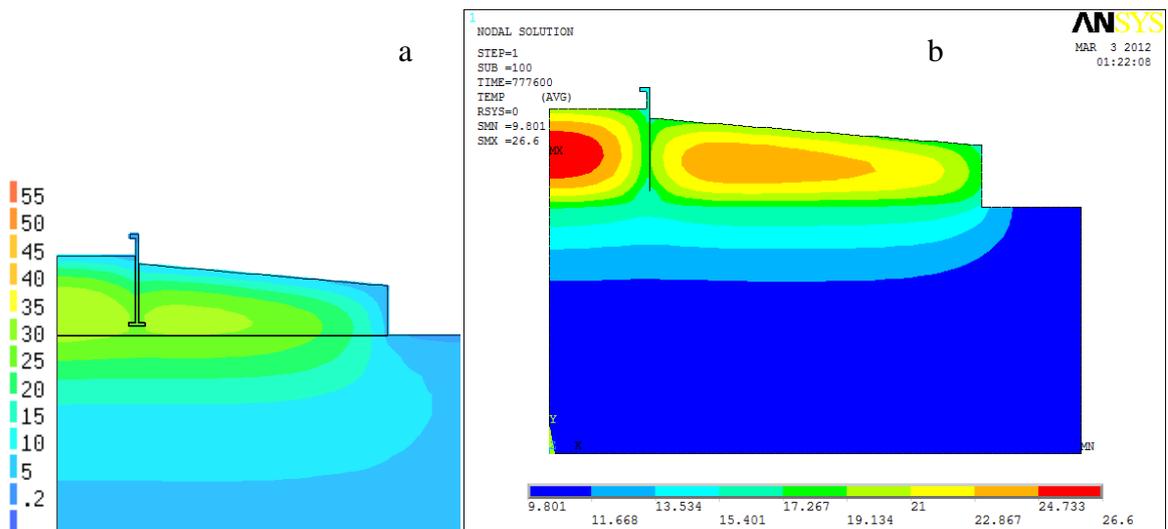


Figura 5.19 – Isotermas de temperatura para 9 dias de concretagem: a) ADINA (Azenha, 2009); b) ANSYS.

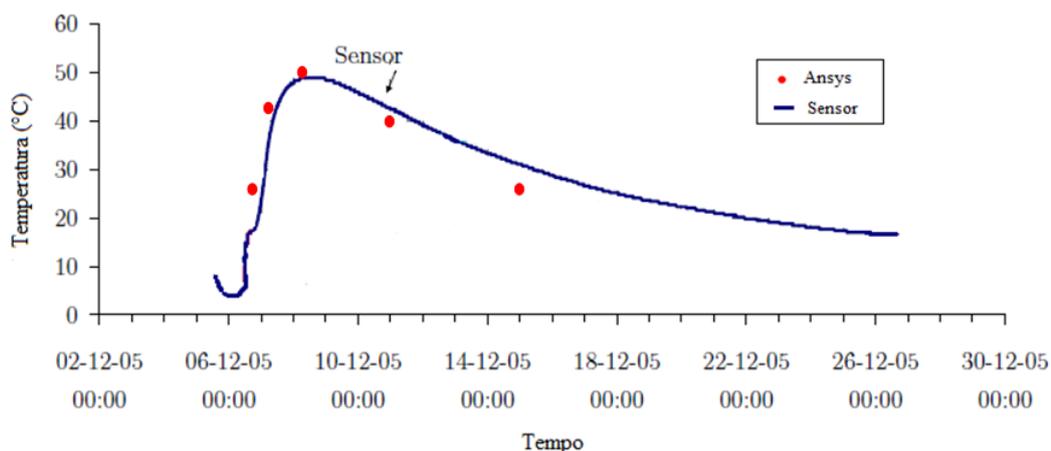


Figura 5.20 – Resultados obtidos pelo ANSYS e pelo sensor. Adaptado de Azenha (2009).

Para a fundação, os resultados obtidos pelos diferentes softwares estão em concordância. Com relação aos dados de campo, para 0,9 dias houve uma divergência entre os resultados medidos pelo software, mas os demais apresentam-se em concordância. E em todas as análises, a máxima temperatura atingida está em torno de dois dias de concretagem.

5.4 – VIGA DA USINA HIDRELÉTRICA SERRA DA MESA

Andrade (1997) traz o estudo realizado pela equipe de Furnas para as vigas de uma ponte rolante da Usina Hidrelétrica (UHE) Serra da Mesa localizada na Bacia do Alto Tocantins, em Goiás. As vigas são estruturas atirantadas ao maciço rochoso da caverna da Casa de Força, como mostra a figura 5.21. Cada viga tem cerca de 130 m de comprimento. A figura 5.22 mostra a geometria da viga estudada, a tabela 5.3 apresenta as propriedades utilizadas nos cálculos e a figura 5.23 traz a curva de elevação adiabática do concreto e a figura 5.24 traz a curva de geração de calor.

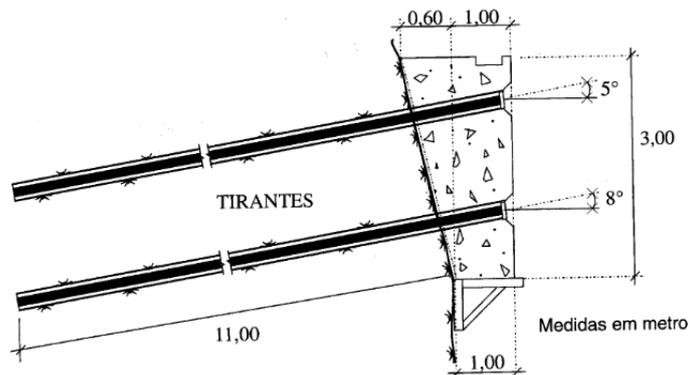


Figura 5.21 – Seção típica das vigas de pontes rolantes de Serra da Mesa (Andrade, 1997).

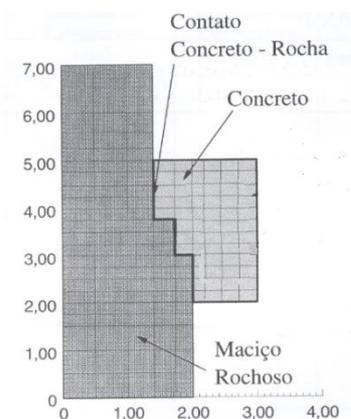


Figura 5.22 – Geometria da viga estudada (Andrade, 1997).

Tabela 5.3 – Propriedades utilizadas.

PROPRIEDADES	
Condutividade Térmica (W/m.°C)	2,27
Calor Específico (J/g.°C)	1063
Massa Específica (kg/m ³)	2295

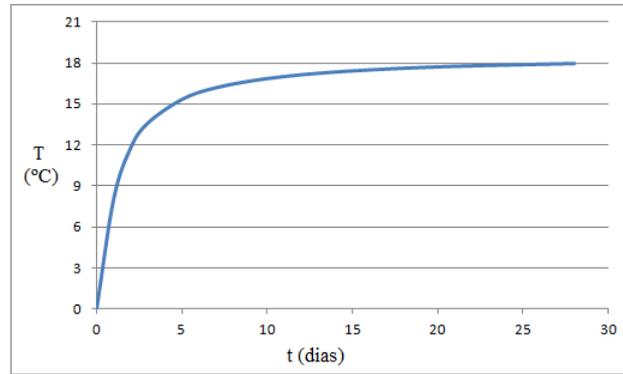


Figura 5.23 – Elevação adiabática do concreto.

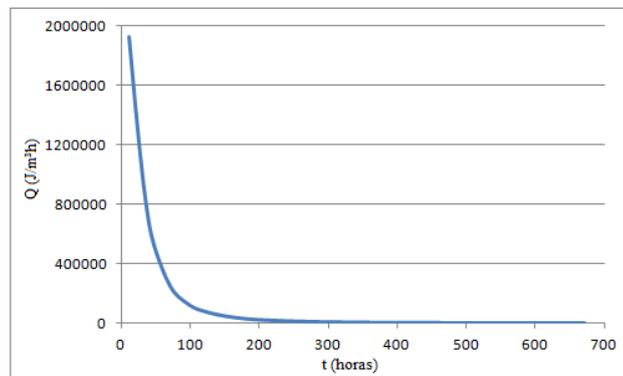


Figura 5.24 – Curva de geração de calor.

Andrade (1997) considerou a viga construída em três camadas, sendo a primeira de 1,5 m de espessura e as demais de 0,75 m de espessura e temperatura ambiente de 27°C. Para análise ele considerou a concretagem com intervalos de 7 e 14 dias; em todos os casos encontrou temperatura máxima no concreto de 51,7°C. a figura 5.25 mostra as áreas estudadas e a malha utilizada na análise da viga.



Figura 5.25 – Áreas estudadas e malha utilizada na análise da viga.

Analisando a viga para intervalos de concretagem de 7 e 14 dias, os resultados obtidos são mostrados nas figuras 5.27 e 5.28 e na tabela 5.4. A temperatura máxima atingida para a viga, em ambos os casos, foi para 36h de concretagem com um valor de 56,4°C, como mostra a figura 5.26.

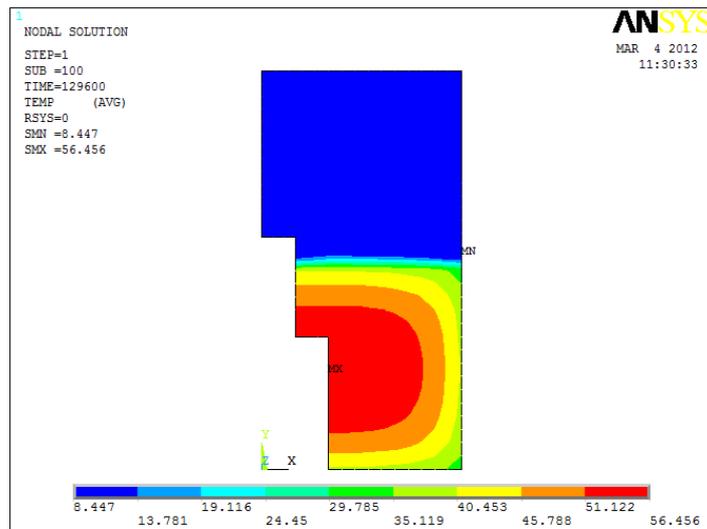


Figura 5.26 – Temperatura máxima encontrada.

Krüger (2001) também analisou esta viga para a concretagem das camadas com intervalos de concretagem entre as camadas de sete dias, os resultados são mostrados na figura 5.29 e na tabela 5.4.

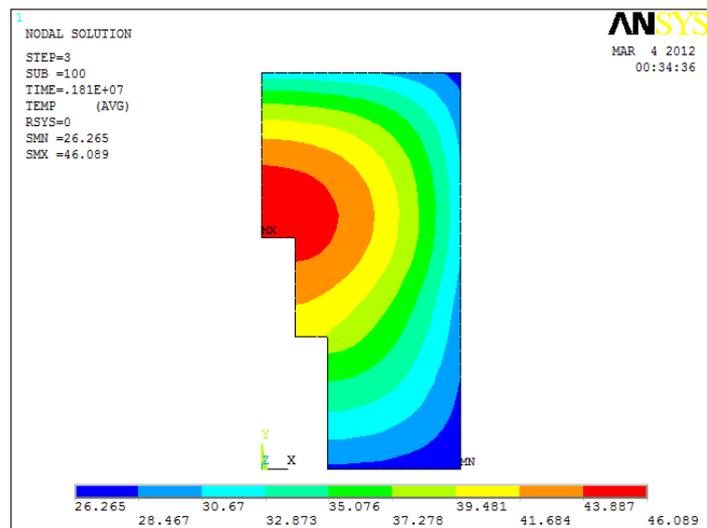
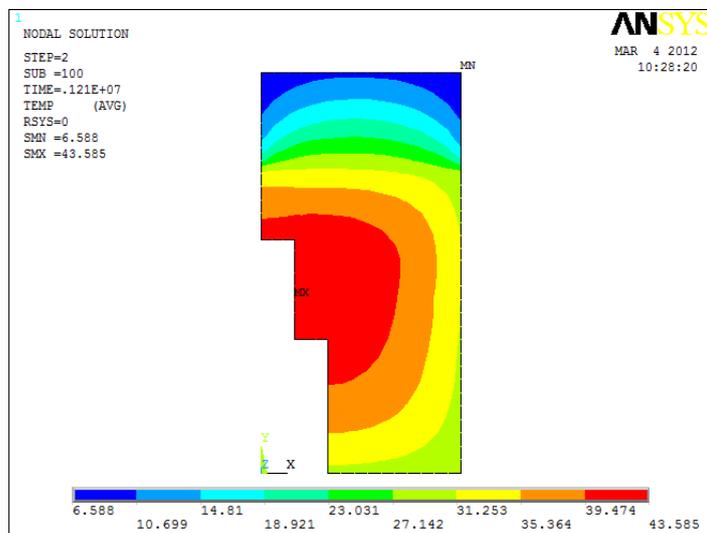
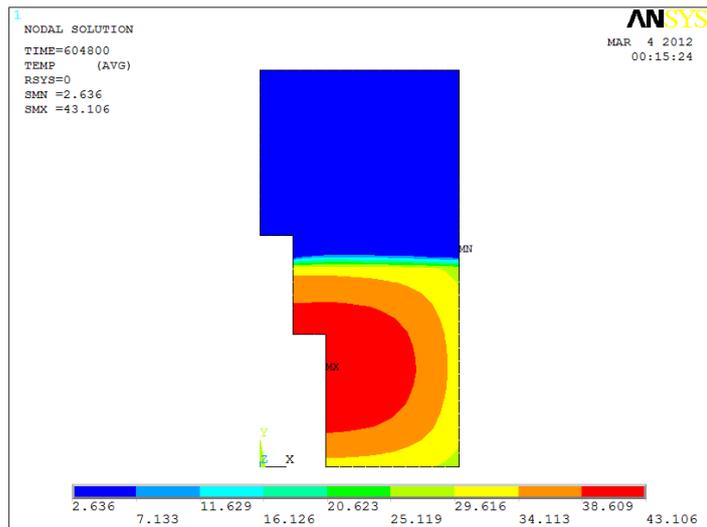


Figura 5.27 – Isotermas de temperatura para concretagem de camadas com intervalo de 7 dias.

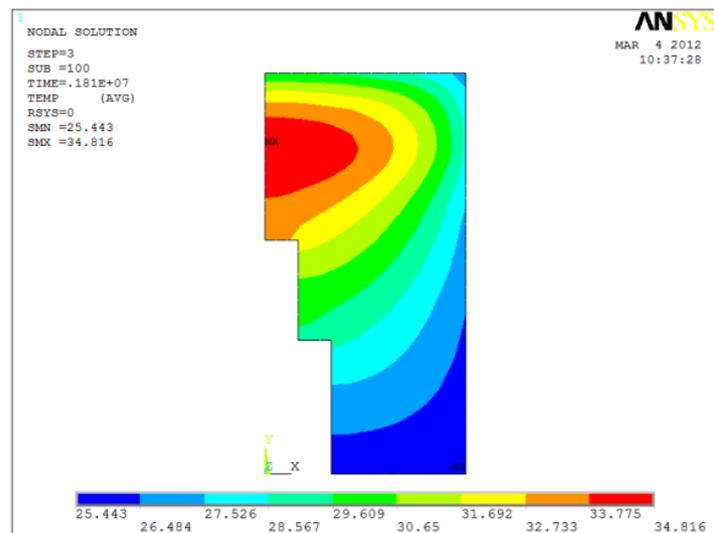
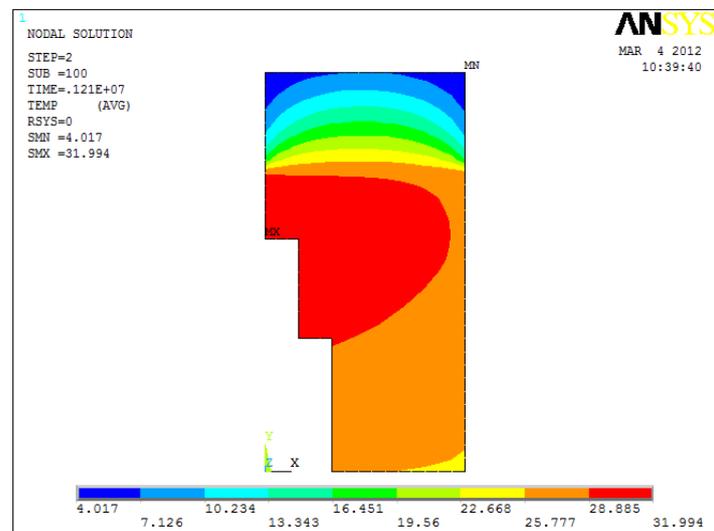
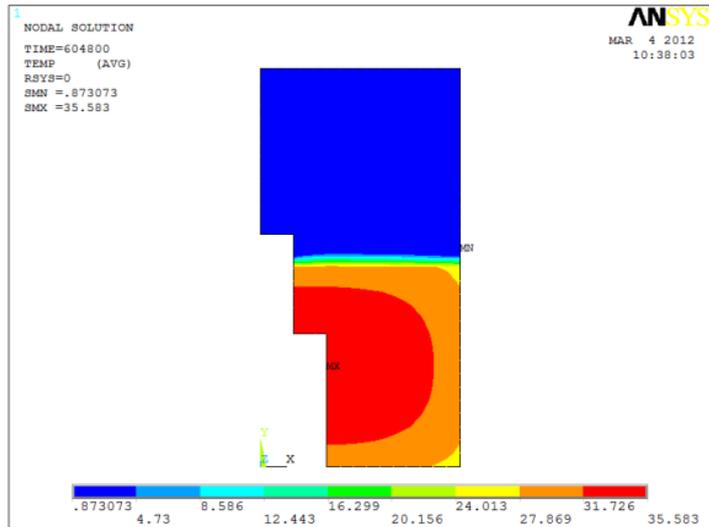


Figura 5.28 – Isotermas de temperatura para concretagem de camadas com intervalo de 14 dias.

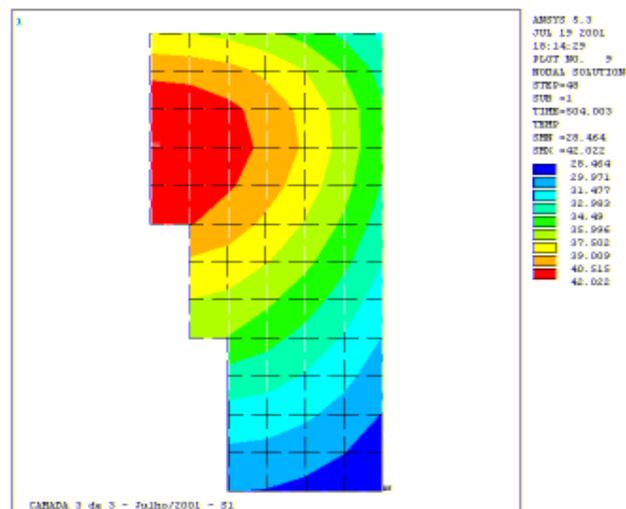
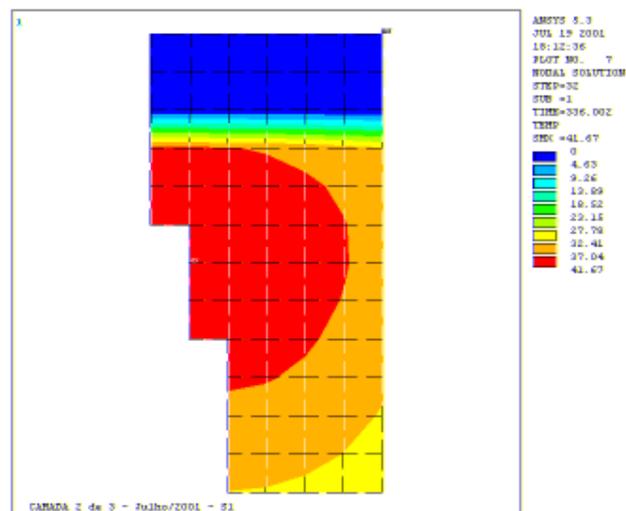
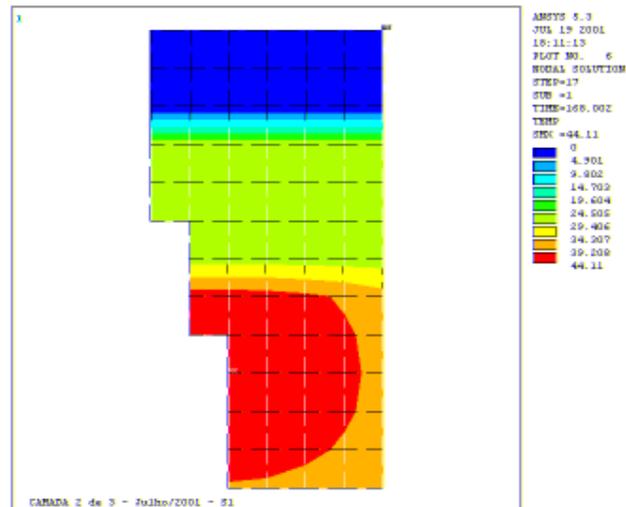


Figura 5.29 – Isothermas de temperatura para concretagem de camadas com intervalo de 7 dias (Krüger, 2001).

Tabela 5.4 – temperatura máxima para a viga.

CAMADA	TEMPERATURA MÁXIMA		
	Intervalo de lançamento das camadas		
	7 dias	14 dias	7 dias (Krüger, 2001)
1	43.106 °C	35.583 °C	44.310 °C
2	43.585 °C	31.994 °C	43.670 °C
3	46.089 °C	34.816 °C	44.220 °C

Para este caso é perceptível que quanto maior o intervalo de tempo entre o lançamento das camadas, menor será o gradiente térmico atingido, pois o valor máximo obtido é menor. A máxima temperatura encontrada durante toda a execução foi para a primeira camada com 36h após a concretagem e o valor apresenta-se próximo ao valor determinado pela equipe de Furnas.

5.5 ESTRUTURA DE BARRAGEM EM CAMADAS

Marques Filho (2005) afirma que em barragens utilizando o concreto massa convencional a espessura da camada varia, em geral, entre 2,0 m e 2,5 m, enquanto utilizando o método construtivo de Concreto Compactado com Rolo (CCR) esses valores estão entre 0,25 m e 0,50 m. No entanto, Bastos (2011), afirma que para concretos não refrigerados as camadas possuem no máximo 1 m de espessura.

Este exemplo mostra a análise de um perfil de barragem, o qual é baseado em uma seção típica de barragem real, conforme mostrado na figura 5.30. No entanto, utilizou-se altura da barragem de 10 m e as demais medidas proporcionais a essa altura, uma vez que a simulação pode ser reproduzida para qualquer dimensão. Para esse estudo, admitiu-se a estrutura maciça, ou seja, sem a presença da galeria de drenagem, e a construção em camadas de 1 m. Foram empregadas as propriedades do concreto da viga da Usina Serra da Mesa, mostradas na seção 5.4.

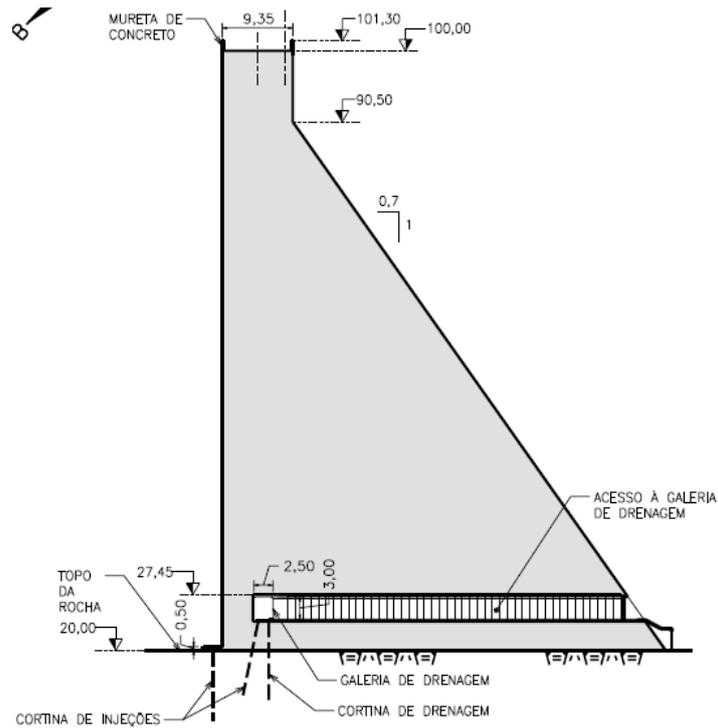


Figura 5.30 – Perfil de uma barragem de concreto (fornecido pela equipe da Eletronorte).

A figura 5.31 mostra a subdivisão da barragem em áreas de 1 m e a a malha utilizada neste trabalho para obtenção dos resultados. Para a análise, admitiu-se também um intervalo de concretagem das camadas de dois dias. Dessa forma, quando a terceira camada é lançada, a segunda camada está com dois dias e a primeira com quatro dias de concretagem. As figuras de 5.32 a 5.36 mostram esses resultados.

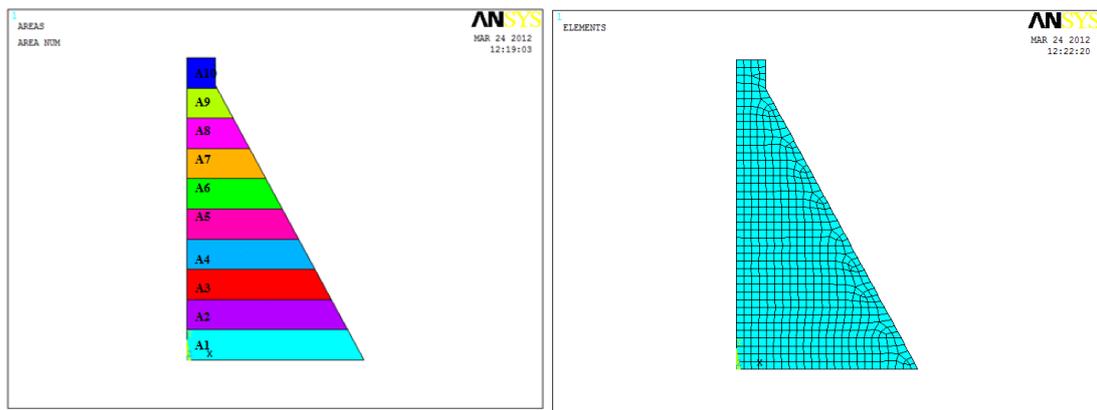


Figura 5.31 – Subdivisão da estruturas em áreas e malha de elementos finitos utilizada.

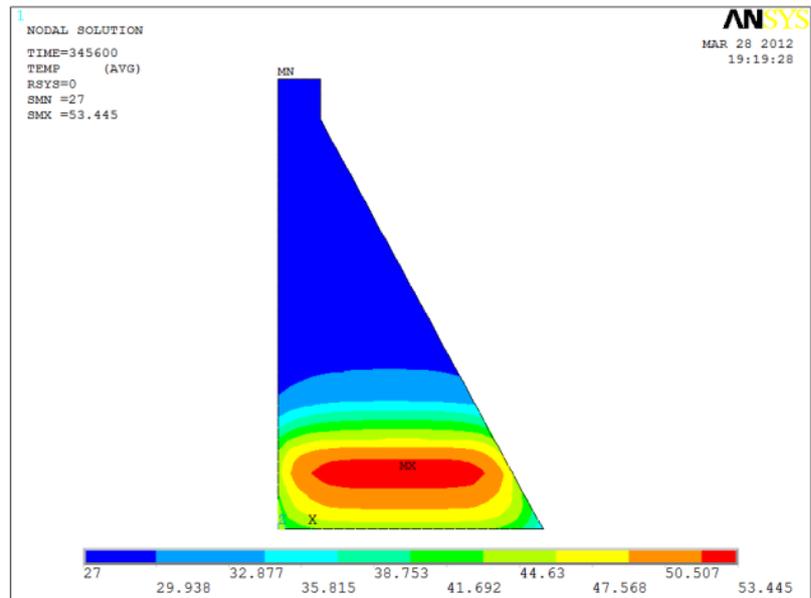
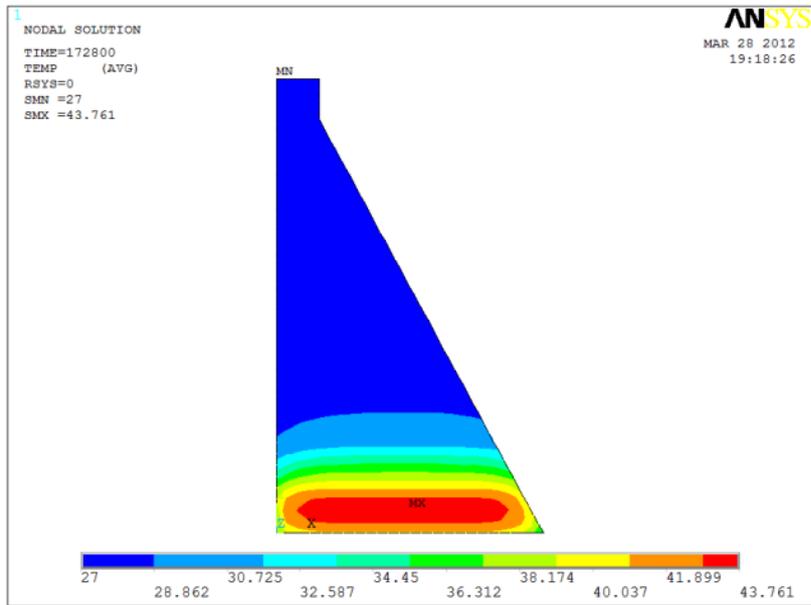


Figura 5.32 – Isotermas de temperatura para a 1ª e 2ª camada de concretagem.

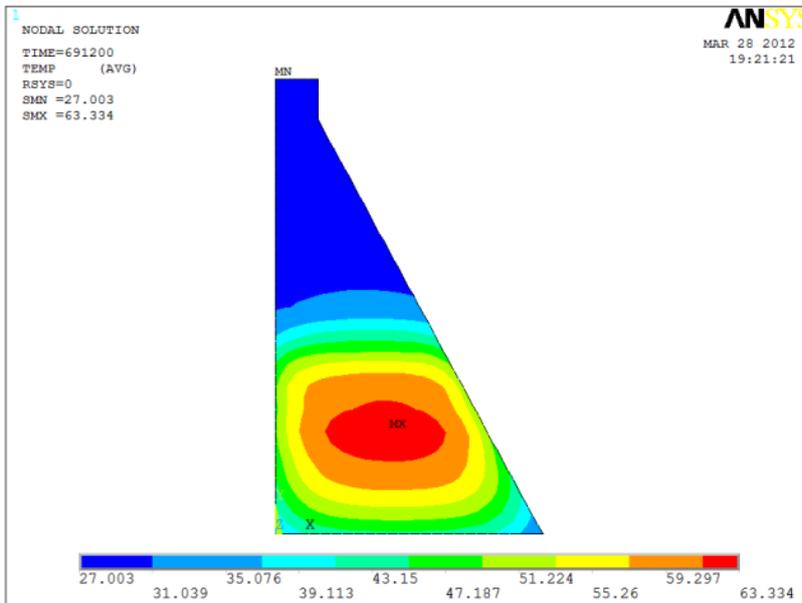
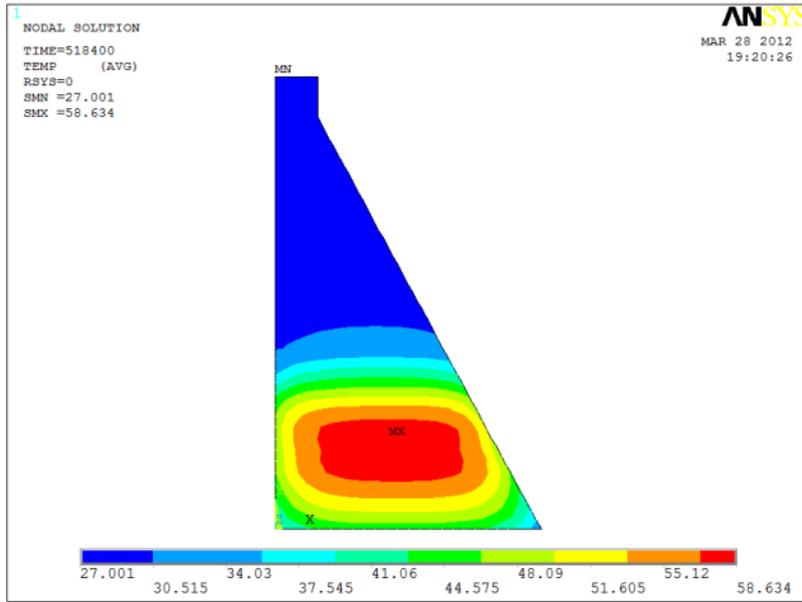


Figura 5.33 – Isotermas de temperatura para a 3ª e 4ª camada de concretagem.

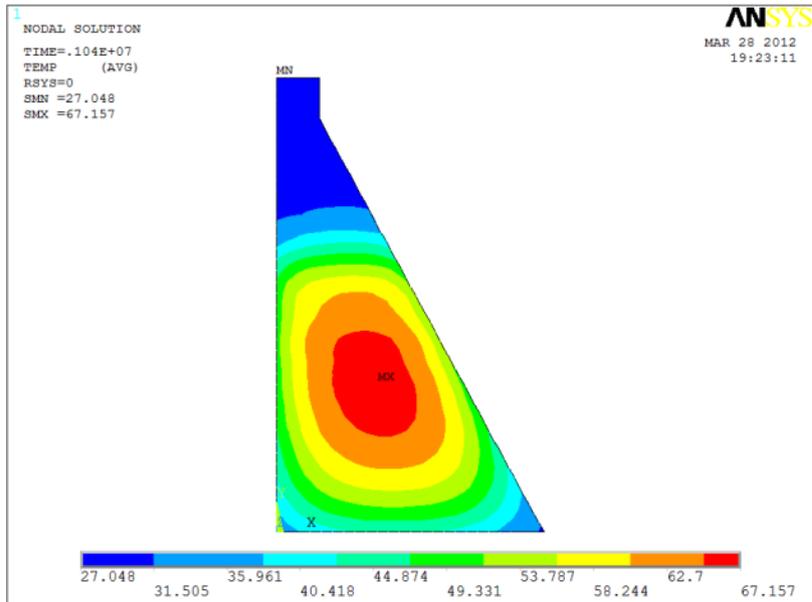
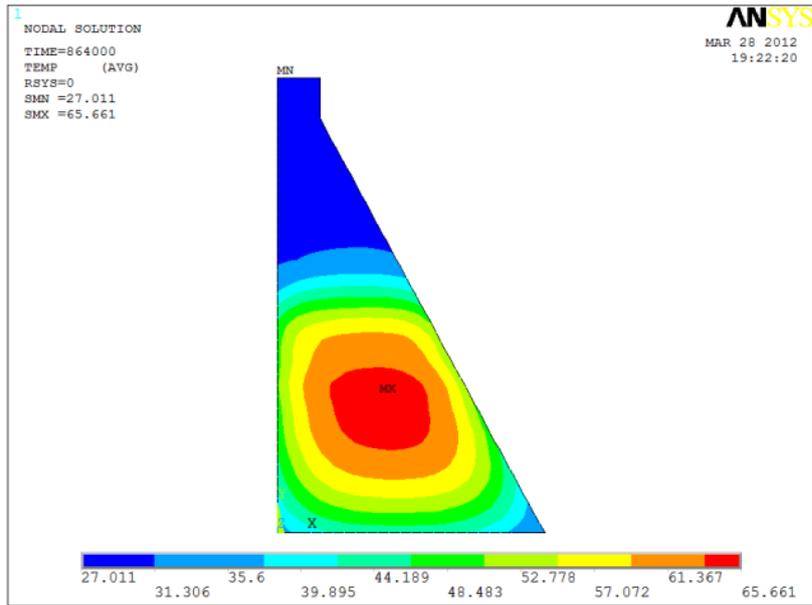


Figura 5.34 – Isotermas de temperatura para a 5ª e 6ª camada de concretagem.

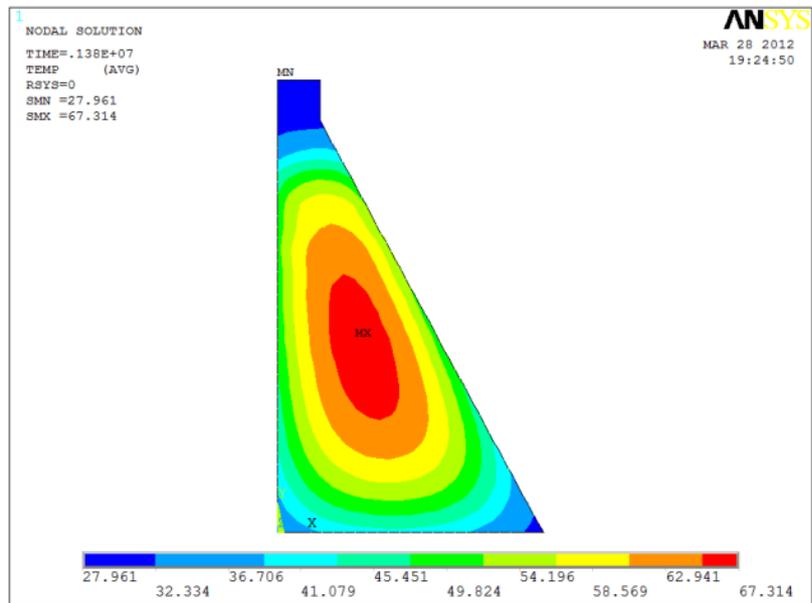
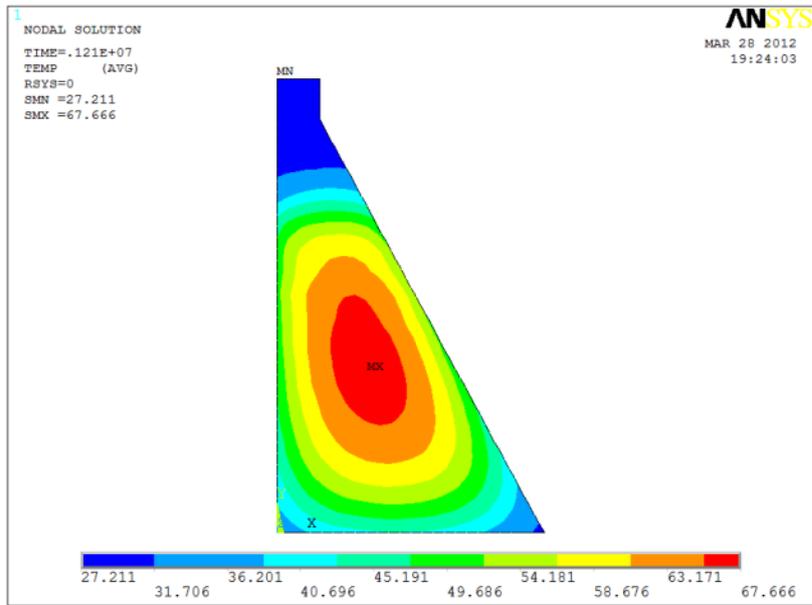


Figura 5.35 – Isotermas de temperatura para a 7ª e 8ª camada de concretagem.

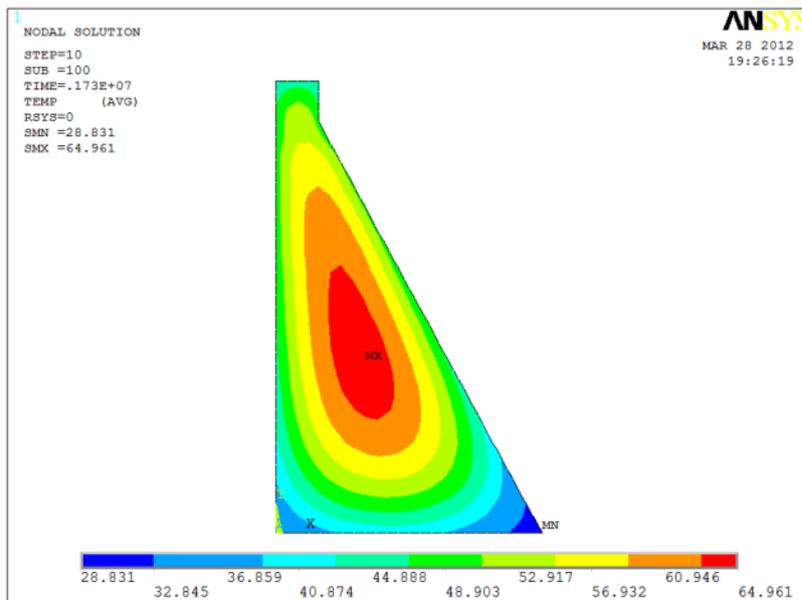
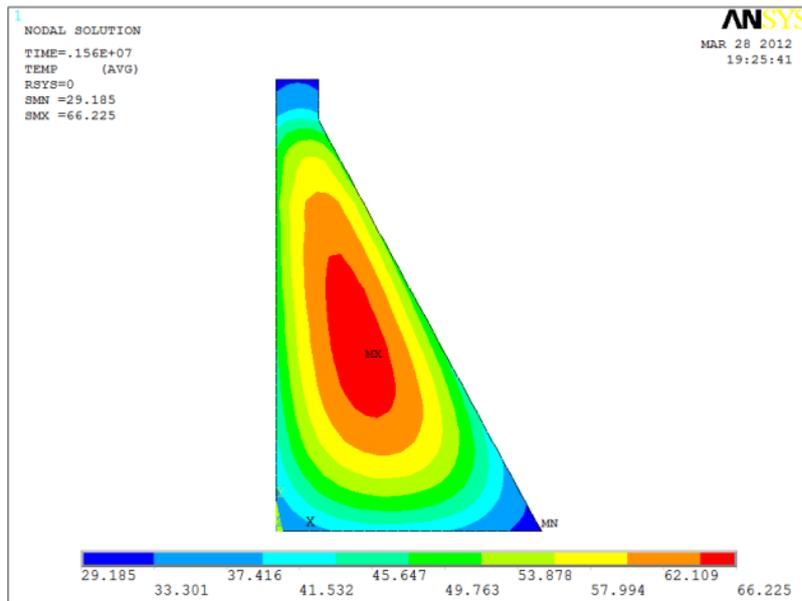


Figura 5.36 – Isotermas de temperatura para a 9ª e 10ª camada de concretagem.

Como forma de um melhor entendimento da influência da malha de elementos finitos na análise, desenvolveu-se também a análise térmica para uma malha mais refinada (0,1) e para uma malha de 0,5. Os resultados obtidos após a concretagem da 10ª camada e as malhas estudadas são mostradas nas figuras 5.37 e 5.38.

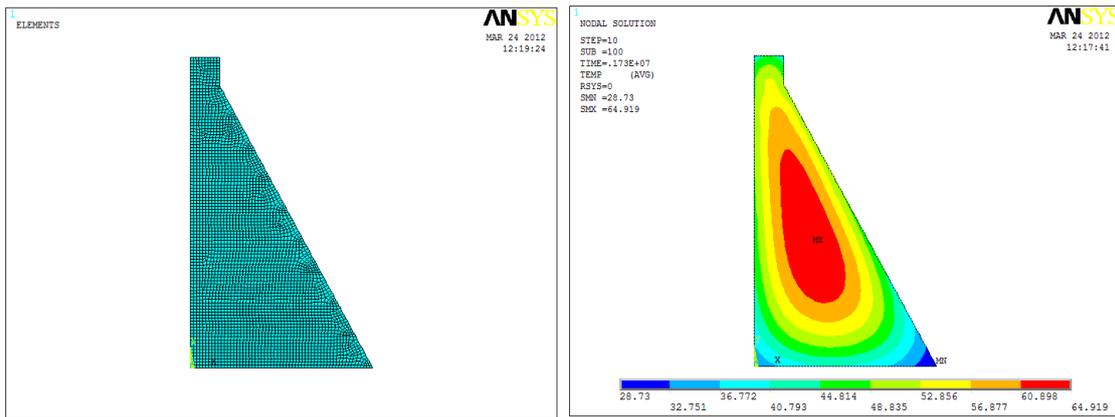


Figura 5.37 – Malha de 0.1 e isotermas de temperatura após a concretagem da 10ª camada.

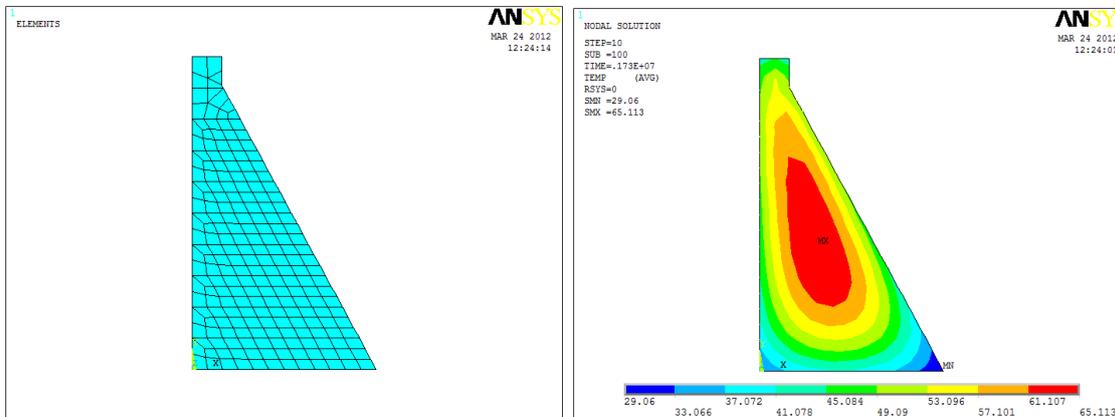


Figura 5.38 – Malha de 0.1 e isotermas de temperatura após a concretagem da 10ª camada.

Observa-se que o programa ANSYS representa bem as isotermas de temperatura do concreto. Primeiramente, há uma elevação da temperatura e com o decorrer do tempo, apesar de ainda haver lançamento de material, essa temperatura começa a reduzir, conforme o esperado.

Nota-se também que há uma diferença entre os valores finais obtidos com diferentes malhas. Lembrando que quanto mais refinada a malha, maior será a sua precisão. O valor de temperatura máxima ao final da análise obtido com uma malha de 0,25 é aproximadamente igual ao valor da malha de 0.1 (64,919 °C) e difere em 0,2% para a malha de 0,5 (65,113 °C). Dessa forma, pode-se dizer que houve a convergência dos valores encontrados, ou seja, o índice de erros é muito pequeno.

A representação elaborada para uma estrutura de 10 m pode ser reproduzida para outras dimensões, formas geométricas e condições de contorno. Assim, é possível afirmar que o programa é uma forma prática, econômica e dinâmica de avaliar os efeitos térmicos em uma construção mesmo antes de sua execução. Com isso, podem ser analisadas formas de combater possíveis problemas existentes, como é o caso das fissurações.

6 CONCLUSÕES

O concreto massa devido a suas características de grande volume e grandes dimensões apresenta comportamento diferenciado do concreto convencional. Há uma maior preocupação com as possíveis fissuras que venham a surgir nessas estruturas, pois geralmente este material é utilizado em obras de grande porte. Os casos mais comuns de utilização são em obras de barragens, pontes e fundações. Qualquer dano que venha a ocorrer nessas estruturas pode ocasionar grandes acidentes colocando em risco muitas vidas humanas afetando também a economia local.

O estudo do concreto massa ou qualquer outra estrutura antes da execução é fundamental na prevenção dos riscos. O conhecimento detalhado da obra que se deseja construir é essencial para que futuros problemas possam ser evitados. A temperatura no interior do concreto é um exemplo disso, pois quando apresenta valores acima do desejável, provoca tensões no concreto podendo levá-lo ao rompimento.

Vários são os fatores que influenciam na temperatura do concreto massa, entre eles tem-se o tipo e a quantidade de cimento utilizado, a relação água-cimento, a finura do cimento, a espessura da camada concretada, a temperatura de lançamento, e os processos de pré ou pós-refriamento, quando existentes.

Influi também na temperatura máxima alcançada pelo concreto o ambiente em que se encontra, uma vez que os efeitos de convecção, condução e radiação também atuam para elevar ou diminuir essa temperatura.

Um dos fatores de maior influência nos efeitos térmicos é a geração do calor interno no concreto. Quando os compostos do cimento entram em contato com a água eles se hidratam e liberam calor. Essa geração de calor provoca as tensões térmicas que comprometem a estabilidade da estrutura. No entanto, essas tensões são mais significativas quando há um maior gradiente de temperatura, ou seja, quando há maior diferença entre as temperaturas máximas e mínimas do concreto massa.

O calor de hidratação também é influenciado diretamente pelo tipo de cimento utilizado. Os cimentos com adição de escória e materiais pozzolânicos, o CP III e o CP IV, respectivamente, reagem mais lentamente com água, reduzindo os efeitos térmicos. Isso é

devido a um menor teor de C_3S e C_3A na sua composição. Esses componentes proporcionam uma evolução mais lenta da resistência, mas não altera a resistência final.

O efeito térmico no concreto é regido pela equação de Fourier, equação que governa os problemas de calor para qualquer problema físico. No caso do material em estudo, a equação apresenta mais um termo que é o da geração de calor.

A equação de geração de calor para o concreto, o calor de hidratação, é definida em termos do traço e propriedades do concreto e do tempo de hidratação, ou seja, varia também de acordo com a resistência final a ser obtida. Os efeitos térmicos da estrutura estão também relacionados com a elevação adiabática do concreto, que é medida em laboratório.

Foram realizadas diversas análises para diferentes geometrias em concreto massa. Os efeitos podem ser analisados através das isotermas de temperatura obtidas com o software ANSYS. Essas isotermas indicam a evolução do calor, mostrando onde estão as temperaturas mais baixas e mais altas.

Inicialmente buscou-se aplicar no software algumas situações já estudadas com o intuito de verificar se o programa estava sendo utilizado corretamente. Os resultados mostraram-se coerentes, confirmando que o ANSYS poderia ser aplicado a outras situações.

Após essa demonstração, a equação de Fourier foi estudada para cada termo isoladamente no ANSYS. Foi realizada uma análise estática - sem dependência do tempo, uma análise transiente – dependente do tempo, e uma análise transiente com geração interna de calor. Nos três casos nota-se que há uma variação nas isotermas e nas dimensões dessas, ou seja, a evolução de calor no interior do concreto muda conforme o tipo de análise. Se há alteração das isotermas, significa dizer que há também variação das temperaturas internas.

Em seguida foram analisados os parâmetros utilizados na equação. Esses parâmetros são influenciados pelo traço do concreto e mantém uma dependência entre eles, ou melhor, ao variar um deles pode ser que haja variação em outro. Embora se saiba disso, estes foram considerados como se não houvesse dependência a fim de expor o quanto eles influenciam ou não nos efeitos térmicos.

Notou-se que uma menor a condutividade térmica do concreto implica em uma maior temperatura máxima devido à dificuldade de dissipação do calor gerado internamente nesse corpo. Com a redução da massa específica tem-se o aumento da temperatura. Isso porque têm-se uma maior porosidade, o que dificulta a dissipação interna de calor. Para o calor específico, quanto menor o valor, maior a temperatura, pois uma quantidade menor de calor é necessária para que haja elevação de temperatura. O valor do coeficiente de convecção entre o concreto e o ar é pouco variável e, conseqüentemente, sua alteração tem pouca ou nenhuma influência sobre a temperatura final. Dessa forma, percebe-se que para redução do calor interno é desejável um concreto com uma maior condutividade térmica, densidade e calor específico.

Para as condições iniciais, foi possível observar que a temperatura máxima atingida é diretamente proporcional à temperatura de lançamento do concreto, ou seja, quanto maior a temperatura de lançamento, maior será a temperatura final atingida pelo concreto. Com isso, ressalta-se a importância do processo de pré-resfriamento do concreto utilizando água gelada ou gelo no processo de construção do concreto.

Analisando as condições de contorno, conclui-se que quanto mais próxima a temperatura de lançamento da temperatura ambiente, menor será o gradiente térmico e, conseqüentemente, menor os risco de fissuração. A temperatura do contorno, ou seja, as condições ambientais, também influencia na temperatura máxima. Do mesmo modo, quando há diferença entre a temperatura ambiente e a superfície de recebimento do concreto, quanto maior a temperatura da superfície de recebimento, maior será o gradiente térmico. Assim, é possível afirmar que é desejável que as temperaturas do concreto, da superfície de recebimento e do ambiente estejam próximas.

Quanto à mudança geométrica, observou-se que a mudança apenas da superfície tem pouca significância em relação ao valor máximo obtido. Porém, o ponto de valor máximo depende da geometria. Para a mudança da espessura e largura de concretagem, notou-se que há um grande aumento para dimensões até 2 m, após esse valor há um aumento com menor velocidade.

O método da construção em camadas mostrou que quanto maior a espessura da camada e quanto menor o tempo do intervalo de lançamento do concreto, maior será a temperatura

atingida pelo concreto, sendo que o tempo possui maior influência que a espessura da camada. Dessa forma é ideal uma construção em camadas e com um bom intervalo de tempo entre as construções.

Nos estudos de caso pode-se verificar que o software ANSYS é um meio rápido e prático de se obter as isotermas de temperatura para qualquer estrutura. Isso implica que as estruturas podem ser analisadas antes mesmo da construção, viabilizando assim estratégias de redução de tensões devido aos efeitos térmicos.

De forma geral, pode-se concluir que o ANSYS responde bem aos problemas térmicos, fornecendo respostas mais rápidas que análises de campo ou experimentais, podendo ser utilizado como meio de prevenção de riscos.

Para o concreto massa é ideal um concreto que apresente um traço com uma maior condutividade térmica, densidade e calor específico. É recomendado que o concreto apresente baixa temperatura de lançamento e que esta temperatura esteja próxima da temperatura ambiente e da superfície de recebimento. O método de construção em camadas também é uma boa estratégia para redução do gradiente térmico, assim como o intervalo de tempo de lançamento dessas camadas.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Fazer a análise de tensões devido aos efeitos térmicos;
- Estudar os parâmetros e sua influência térmica experimentalmente, em laboratório;
- Estudar os traços de concreto massa que correspondem a menores gerações de calor de hidratação;
- Analisar os efeitos térmicos em três dimensões;
- Utilizar outros softwares na análise do efeito térmico;
- Aplicar o estudo a uma estrutura real de grandes dimensões, por exemplo, em uma barragem a ser construída, como é o caso de Belo Monte;
- Estudo do efeito térmico em estruturas em utilização, como por exemplo, em uma barragem em funcionamento, ou seja, com efeitos da água sobre a estrutura;
- Estudo da confiabilidade em função das incertezas nos parâmetros empregados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS. **Modeling and Meshing Guide**. Canonsburg: ANSYS, INC, 2004.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Cement and Concrete Terminology**. ACI 318 Farmington Hills, 2005.

ALBUQUERQUE, A. C.; **Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu**. 259 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre: 2009.

ALVES FILHO, A.; **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2000. 320 p.

ANDRADE, W. P. (Ed.); **Concretos: Massa, estrutural, projetado e compactado com rolo**. São Paulo: Pini, 1997. 1 v.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro: 1991.

_____ **NBR 5736: Cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro: 1991.

_____ **NBR 6118: Projeto e execução de obras de concreto armado**. Rio de Janeiro: 2007.

_____ **NBR 12818: Concreto - Determinação da difusividade térmica**. Rio de Janeiro: 1993.

AZENHA, M. A. D.; **Comportamento do betão nas primeiras idades. Fenomenologia e análise termo-mecânica**. 248 f. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP. Porto: 2004.

AZENHA, M. A. D.; **Numerical Simulation of The Structural Behaviour of Concrete Since Its Early Ages**. 379 f. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP. Porto: 2009.

AZENHA, M. A. D.; CRUZ, J. S.; CAMÕES, A.; FERREIRA, R. M.; **Numerical Simulation of the Structural Behaviour of Concrete Tetrapods Subject to Imposed Deformations and Applied Loads**. Congress on Numerical Methods in Engineering. Coimbra. Junho: 2011.

BASTOS, P. S. S.; **Concretos especiais**. Notas de aula. Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru, 2011.

BHATTI, M. A.; **Fundamental Finite Element Analysis and Applications**. United States of America: John Wiley & Sons, INC: 2005.

BRASIL. Presidência da República. Lei n. 12.334 de 20 de set. de 2010. **Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens**. Brasília: Síntese, 2010.

CALMON, J. L. **Estudio térmico y tensional en estructuras masivas de hormigón. Aplicacion a las presas durante la etapa de construcción**. Tese de Doutorado. Universidade Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona: 1995.

CARVALHO, A. G.; **Energia de Ativação dos Concretos: Experimentação e Modelagem**. 144 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro: 2002.

CASTRO, J.; MARTINS, J. G. **Reabilitação: Patologia do Betão Reparação e Reforço de Estruturas**. 1ª ed. Porto, Universidade do Porto: 2006.

CHOKTAWEEKARN, P.; TANGTERMSIRIKUL, S.; **Effect of aggregate type, casting, thickness, and curing condition on restrained strain of mass concrete.** Songklanakarin J. Sci. Technol. Thailand: 2010.

Comitê Brasileiro de Grandes Barragens. **Barragens no Brasil.** São Paulo 1982. 279 p.

Comitê Internacional de Grandes Barragens. **Barragens e a Água no Mundo.** Paraná: Texto Faz Comunicação S/S Ltda, 2008. Título original: Dams & The World's Water.

CREAGER, William Pitcher; HINDS, Julian; JUSTIN, Joel de Witt. **Engineering for Dams.** New York: J Wiley 1964. 3 v. :

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de Inspeção de Obras de Arte Especiais.** Ministério dos Transportes; Brasília: 1994.

ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras S.A.; **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas.** Ministério de Minas e Energia; Brasília: 2000.

ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras S.A.; **Um novo conceito em hidrelétricas.** Ministério de Minas e Energia; Brasília: 2011.

FAIRBAIRN, E. M. R.; SILVOSO, M. M.; FILHO, R. D. T.; ALVES, J. L. D.; EBECKEN, N. F. F.; **Optimization of mass concrete construction using genetic algorithms.** Rio de Janeiro. Elsevier: 2003.

FARIA, E. F.; **Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados.** 145 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio De Janeiro – COOPE/UFRJ. Rio de Janeiro: 2004.

GADJA, J.; VANGEEM M.; **Controlling Temperatures in Mass Concrete.** Concrete International. January, 2002.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa.** 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INOUE, G.; **Medidas Preventivas de Controle de Temperatura que Induz Fissuração no Concreto Massa**. Boletim Técnico N° 7; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP; São Paulo: 1986.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS; **The Specification and Quality Control of Concrete for Dams**. Paris: 2009.

KAVAMURA, E. E.; **Estudo do comportamento termo-estrutural bidimensional de barragens de concreto utilizando o Método dos Elementos Finitos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba: 2005.

KHAN, M. I.; **Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models**. Building and Environment. February, 2001.

KRÜGER, D. A. V.; **Análise térmica transiente de estruturas de concreto executadas por camadas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba: 2001.

KRÜGER, D. A. V.; KAVAMURA, E. E.; CARVALHO, N. F.; HECKE, M. B.; MACHADO, R. D.; LACERDA, L. A.. Thermo-mechanical analysis of Roller Compacted Concrete Dams. **Roller Compacted Concrete Dams**. Holanda, p. 625-632. 2003.

LIU, J.; QIAO, L; LI, P.; DAI, C.; **Laboratory Test and Numerical Simulation of Time-Dependent Thermomechanical Behavior of the Three-Gorges Dam**; Journal of Materials in Civil Engineering. February, 2010.

MAEKAWA, K., CHAUBE, R. AND KISHI, T.; **Modeling of Concrete Performance, Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport**. 1ª ed. London: E & FN Spon, 1999.

MARQUES FILHO, J. M.; **Maciços experimentais de laboratório de concreto compactado com rolo aplicado às barragens**. 278 f. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre: 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

Mistério dos transportes. Disponível em: <<http://www2.transportes.gov.br/bit/hidroviass/barragens/tucurui.htm>>. Acesso em: Abril 2011.

MOAVENI, S. **Finite Element Analyses: Theory and Application with ANSYS**. New Jersey: Editora Prentice-Hall, 1999.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

PEDROSO, J. L. **Barragens de Concreto: Aspectos Gerais e Fundamentos do Cálculo de Tensões e da Estabilidade Baseado no Método de Gravidade**. Apostila do Curso de Barragens de Concreto. Universidade de Brasília - UnB, Brasília, 2002.

PEDROSO, J. L. **Preparação dos blocos de fundação da Ponte Juscelino Kubistchek para concretagem**. 2000. 1 fotografia.

PINTO, R. C. A., **The Effect of Curing Temperatures on the Development of Mechanical Properties of Fresh and Hardened High-strength Silica Fume Mixtures – A Maturity Approach**. Tese de Ph.D. Universidade Cornell. Ithaca: 1997.

SANTOS, S. B. **Uma Contribuição ao Estudo do Comportamento Termomecânico de Estruturas Maciças de Concreto. Modelagem Viscoelástica Linear e Aplicações**. 287 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória: 2004.

SILVA, E. C. N; BUIOCHI, F. **Introdução ao Método de Elementos Finitos (MEF)**. Notas de aula do curso Mecânica Computacional. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

SILVA, M. T. Q. S.; **Análise térmica transiente e de tensões em estruturas executadas em camadas**. . Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba: 2003.

SILVA, S.; **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. Notas de aula. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Foz do Iguaçu: 2009.

SILVEIRA, A. F.; **As variações de temperatura nas barragens**. Lisboa: Lab Nac Eng Civ, 1961. 437 p.

SILVOSO, M. M.; **MODELAGEM NUMÉRICA DO CONCRETO A POUCAS IDADES**. 83 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro: 2002.

SKUMAUTZ, J. R. **Beurteilung der Stabilität von Rissen in Massenbeton – Materialprüfmethode mittels Verwendung des Penny- Shaped-Crack**. 2006. 196 f. Dissertação – Faculdade de Física – Universidade Técnica de Viena. Áustria: 2006.

TOWNSEND, C. L.; **Control of Cracking in Mass Concrete Structures**. Monografia de Engenharia. The United States: Bureau of Reclamation, 1981.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **El Método de los Elementos Finitos**. 4ª Ed. Barcelona: CIMNE, 1994.

APÊNDICES

APÊNDICE A - PROGRAMAÇÃO NO ANSYS

Nesta seção, apresenta-se como será feita a preparação do modelo computacional no ANSYS, para a construção em camadas de um bloco de 5 m x 5 m com as seguintes propriedades:

- $k = 1,79 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$;
- $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$;
- $c = 1000 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$;
- $\alpha = 7.07 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$;
- $h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$;
- Temperatura da face inferior 25°C , demais faces 20°C ;
- Temperatura inicial do concreto massa: 45°C ;

Nesse estudo foram utilizadas três camadas, sendo duas camadas de 2 m e uma de 1 m, com intervalo de lançamento de dois dias para concretagem. Este é um exemplo que contempla a modelagem, a discretização da malha de elementos finitos utilizando todos os parâmetros térmicos citados e trabalhando também com a construção em camadas. Este apêndice tem o intuito de facilitar o trabalho de futuros pesquisadores, ajudando-os a avançar mais rapidamente nas pesquisas. Os resultados encontrados são mostrados na figura A.1 e a programação é apresentada logo a seguir.

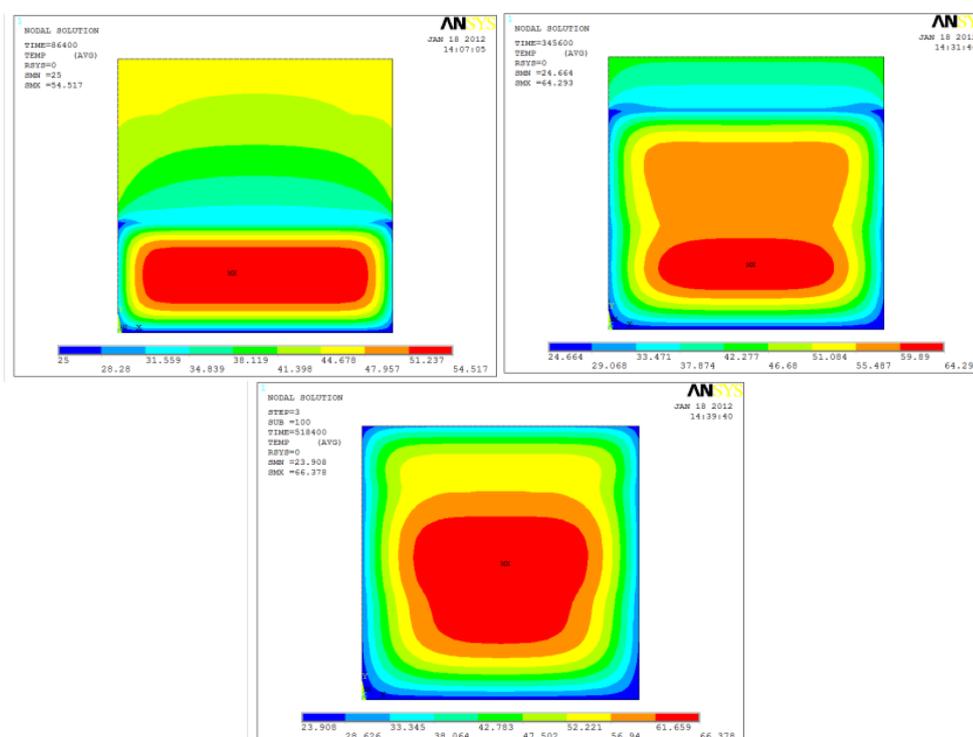


Figura A.1 – Isotermas de temperatura para concretagem com intervalos de 2 dias e em 3 camadas.

PROGRAMAÇÃO

!*

/PREP7

! DEFINIR GEOMETRIA

Início da modelagem

K, 1, 0, 0

K, 2, 5, 0

K, 5, 0, 2

K, 6, 5, 2

K, 9, 0, 4

K, 10, 5, 4

K, 11, 0, 5

K, 12, 5, 5

Definição de pontos

L, 1, 2

L, 2, 6

L, 6, 5

L, 5, 1

L, 6, 10

L, 10, 9

L, 9, 5

L, 10, 12

L, 12, 11

L, 11, 9

Criação de linhas

A, 1, 2, 6, 5

A, 5, 6, 10, 9

A, 9, 10, 12, 11

Criação de áreas

! PROPRIEDADES E MESH

ET, 1, PLANE55

MP, DENS, 1, 2300

MP, C, 1, 1000

MP, KXX, 1, 1.79

MP, ALPX, 1, 7.07E-6

MP, HF, 1, 10

ESIZE, 0.1

AMESH,ALL

FINISH

/SOLU

Definição do tipo de elemento;

Definição das propriedades utilizadas;

Definição da malha utilizada.

ANTYPE, 4

TIME, Taux

NROPT, FULL

EQSLV,FRONT, ,0,

LUMPM, 0

NSUBST, 100

NEQIT, 1000

AUTOTS, OFF

LNSRCH, ON

OUTRES, ALL, ALL

KBC, 1

/REPLOT,RESIZE

FINISH

/SOLU

Definição de análise transiente;

Número de subpassos;

Definição do tempo

IC,ALL,TEMP,45, → Temperatura inicial do concreto.

DL,1, ,TEMP,25,0 → Definição da temperatura da linha 1.

EKILL,all → Desativa todos os elementos.

Taux=172800

h=2

tcam1=260

tcam2=120.756

tcam3=51.576

Definição de variáveis.

*DO,a,1,3,1 →

Número de subpassos.

TIME,taux

*IF,a,EQ,1,THEN

LSEL,u,LOC,y,0,0.1

SFL,ALL,CONV,10, ,20,

NSEL,S,LOC,Y,(a-1)*h,a*h

ESLN,S,1

EALIVE,ALL

BFE,ALL,HGEN,,tcam1

Condição para o primeiro subpasso:

- Define condições de contorno;
- Ativa os elementos da primeira camada;
- Implementa a geração de calor para essa camada;
- Parte para o próximo passo.

OBS: Os outros subpassos são semelhantes.

*ENDIF

*IF,a,EQ,2,THEN

SFL,3,CONV,0, ,0,

LSEL,u,LOC,y,0,2.1

SFL,ALL,CONV,10, ,20,

NSEL,S,LOC,Y,(a-1)*h,a*h

ESLN,S,1

EALIVE, ALL

BFE,ALL,HGEN,,tcam1

NSEL,S,LOC,Y,(a-2)*h,(a-1)*h

ESLN,S,1

BFE,ALL,HGEN,,tcam2

*ENDIF

*IF,a,EQ,3,THEN

SFL,6,CONV,0, ,0,

LSEL,u,LOC,y,0,4.1

SFL,ALL,CONV,10, ,20,

NSEL,S,LOC,Y,(a-1)*h,a*h

ESLN,S,1

EALIVE,ALL

BFE,ALL,HGEN,,tcam1

NSEL,S,LOC,Y,(a-2)*h,(a-1)*h

ESLN,S,1

BFE,ALL,HGEN,,tcam2

NSEL,S,LOC,Y,(a-3)*h,(a-2)*h

ESLN,S,1

BFE,ALL,HGEN,,tcam3

*ENDIF

ALLSEL,ALL

/STATUS,SOLU

SOLVE

Taux=Taux+172800

*ENDDO



Solução para todos os elementos selecionados.



Implementação do tempo.



Fim do laço.

APÊNDICE B - ANÁLISES DAS EQUAÇÕES UTILIZADAS

Para a equação B.1, equação do calor de hidratação, a análise foi realizada conforme as informações obtidas por Liu et al. (2010) no acompanhamento da construção da barragem Três Gargantas na China. Os dados utilizados estão na tabela B.1 e os resultados obtidos neste trabalho são apresentados na figura B.1. Ressalta-se que R15 indica um concreto com resistência 15 MPa e assim sucessivamente. Ao mudar a resistência do concreto, altera-se também a quantidade de cimento utilizado e, conseqüentemente, os parâmetros utilizados, assim como a temperatura do concreto.

$$\dot{q} = q_i \left(1 - e^{-\alpha t^\beta}\right) \quad (\text{B.1})$$

Em que:

\dot{q} = calor de hidratação;

q_i, α, β = constantes obtidas experimentalmente, dependes da composição do cimento; sendo que q_i é o calor inicial do concreto.

Tabela B.1 - Coeficientes da equação 14 de aumento da temperatura adiabática dos concretos usados na represa de Três Gargantas Liu et al. (2010).

Concreto	q_i (°C)	α	β
R15	19,51	0,0900	0,1287
R20	21,31	0,2282	0,977
R25	23,51	0,3190	0,849
R30	27,83	0,3542	0,908

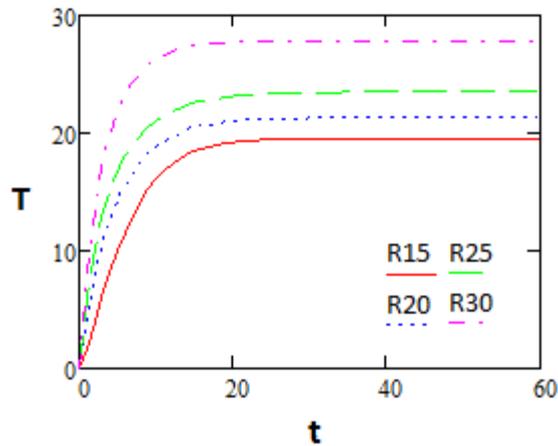


Figura B.1 - Elevação da temperatura – T (°C) em função do tempo – t (dias) para diferentes resistências do concreto.

Para análise da Equação de Fourier, equação B.2, serão observados os termos da equação isoladamente. No primeiro caso tem-se a condição $\nabla^2 T = 0$, ou seja, há a transferência de calor no estado estático, sem a dependência do tempo. A figura B.2 a mostra uma placa de concreto submetida a temperaturas de 100°C na sua lateral esquerda e 500°C na parte superior por condução, e sofrendo também convecção na lateral direita com uma temperatura de 200°C e coeficiente de convecção de 10 W/m²°C. A parte inferior está isolada termicamente, ou seja, não tem influências de temperaturas externas. Em B.2 b tem-se as isotermas de temperatura obtidas pelo software ANSYS para as temperaturas aplicadas.

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{c\rho}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{B.2})$$

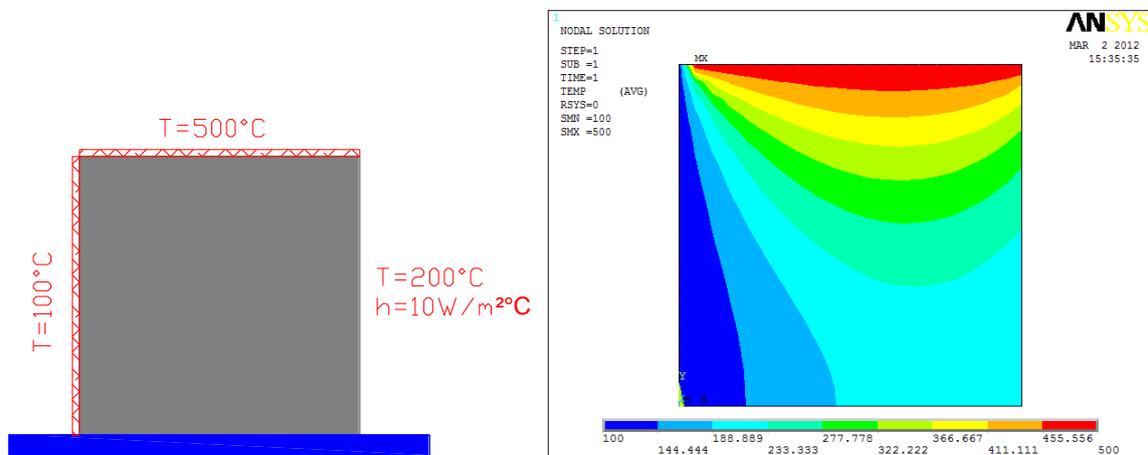


Figura B.2 - a) Modelo estudado; b) Isotermas de temperatura para o modelo.

Na figura B.3 apresenta-se uma placa de concreto submetida às temperaturas de 100°C na parte inferior e de 500°C na parte superior. Neste caso foi feita uma análise transiente, ou seja, a temperatura variando com o tempo. Dessa forma, a equação B.2 é estudada apenas sem a geração de calor assumindo a seguinte forma: $\nabla^2 T = \frac{c\rho}{k} \frac{\partial T}{\partial t}$. Foram adotados condutividade térmica (k) igual a 3,6 W/m.K, calor específico (c) igual a 1,26 kJ/kg.K, massa específica (ρ) igual a 2500 kg/m³ e um tempo (t) de 300 s.

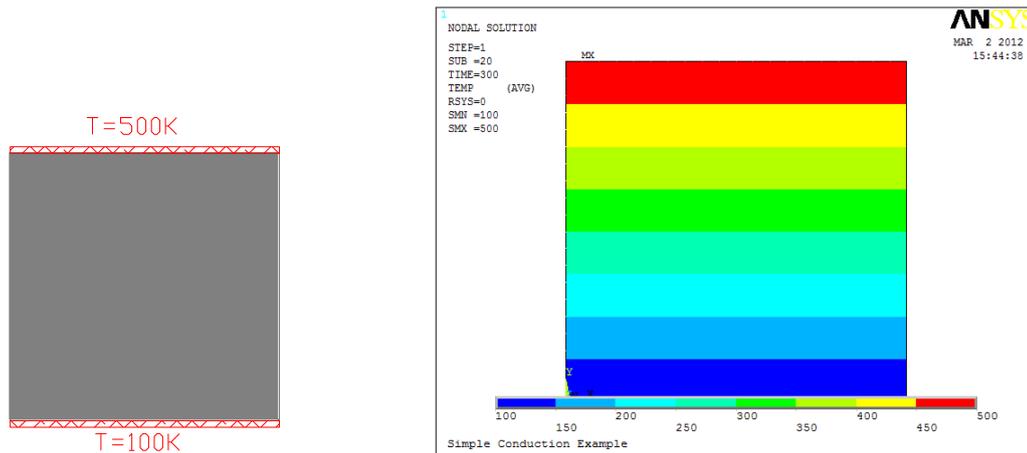


Figura B.3 - a) Modelo estudado; b) Isotermas de temperatura para o modelo.

Utilizando os mesmos dados da figura B.3 e aplicando agora a equação completa, ou seja, com geração de calor, observa-se que as temperaturas máximas e mínimas permanecem inalterados, no entanto, mudam-se as configurações das isothermas de temperatura, como mostra a figura B.4.

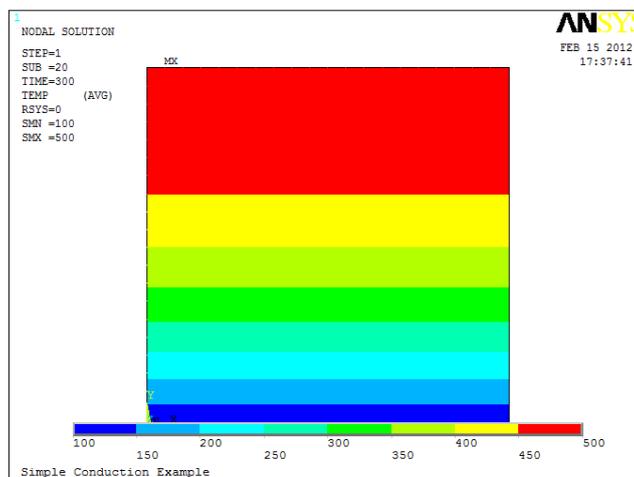


Figura B.4 - Isotermas de temperatura para o modelo.

APÊNDICE C - ANÁLISE DOS PARÂMETROS UTILIZADOS NAS EQUAÇÕES

Para um melhor entendimento da influência dos parâmetros (calor específico, massa específica, condutividade térmica e coeficiente de convecção) utilizados na Equação de Fourier para os efeitos térmicos do concreto, estudou-se um bloco de concreto de 5 m x 5 m, com uma malha de 0,10 m, 2601 nós e 2500 elementos no ANSYS. A figura C.1 mostra a malha de elementos finitos para o bloco em estudo.

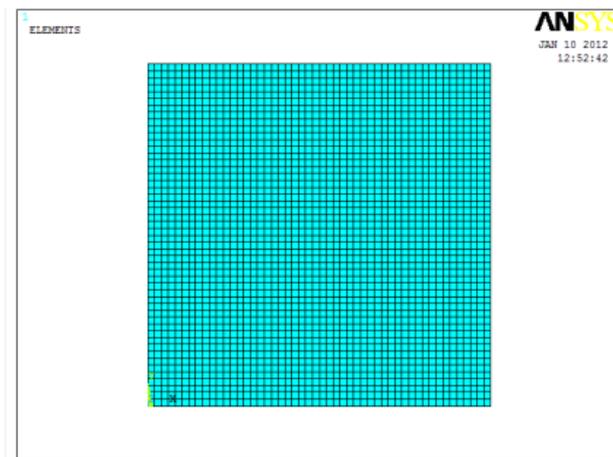


Figura C.1 – malha de elementos finitos para o bloco em estudo, dimensões = 5 m x 5 m.

É importante ressaltar que os parâmetros foram analisados admitindo-se os valores máximos e mínimos admitidos para o concreto. Sendo que estes foram aproximados para valores inteiros; para o número inteiro imediatamente inferior no caso dos valores mínimos; e para o número inteiro imediatamente superior, no caso do valor máximo.

Outra observação importante é que para esse estudo os parâmetros foram considerados variando isoladamente, ou seja, sem a dependência dos outros parâmetros. No entanto, sabe-se que alterando-se o traço do concreto, normalmente, haverá a alteração de todos os parâmetros e não de apenas um como está sendo verificado.

Com o intuito de esclarecer as dependências desses parâmetros, a tabela C.1 mostra a relação de dependência dos mesmos.

Tabela C.1 – Definição dos parâmetros.

PARÂMETRO	DEFINIÇÃO	DEPENDÊNCIA
Condutividade térmica (k) = $\left(\frac{W}{m.K}\right)$	Capacidade do material conduzir calor.	<ul style="list-style-type: none"> • Composição do concreto; • Teor de umidade; • Características mineralógicas do agregado; • Densidade e temperatura do concreto; • Não sofre influência do tipo de cimento utilizado.
Densidade ou massa específica (ρ) = $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	É a relação entre a massa de um corpo sobre o volume que esse mesmo corpo ocupa.	<ul style="list-style-type: none"> • Teor de água e de finos; • Agregados utilizados; • Índice de vazios; • Temperatura do concreto.
Calor específico (c) = $\left(\frac{J}{mK}\right)$	Corresponde à quantidade de calor necessária para elevar em um grau a temperatura de uma unidade de massa.	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura; • Massa específica do concreto; • Teor de umidade; • Dimensão máxima característica do agregado graúdo.
Coefficiente de convecção (h) = $\left(\frac{W}{m^2 \cdot c}\right)$	Capacidade de transferência de calor entre um meio sólido e um fluido.	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade do vento; • Geometria da superfície em contato com o fluido; • Propriedades do fluido

Andrade et al. (1997) definiu a condutividade termica de acordo com a equação C.1:

$$k = h^2 \cdot c \cdot \rho \quad \text{Equação C.1}$$

Em que:

- h^2 = difusividade térmica;

Calmon (1995) *apud* Santos (2004) estabeleceu as relações contidas na tabela C.2 para a relação do coeficiente de convecção.

Tabela C.2 - Fórmulas empíricas para calcular o coeficiente de transferência de calor por convecção (ar-superfície) segundo distintos autores. CALMON (1995) *apud* SANTOS (2004).

AUTORES	COEFICIENTE DE CONVECÇÃO
ZICHNER (1982)	$h_c = 3,95 \cdot v_v + 5,58 \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$
CEB (1985)	$h_c = 4,0 \cdot v_v + 5,60 \quad \text{para } v_v \leq 5 \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$ $h_c = 7,15 \cdot v_v^{0,78} \quad \text{para } v_v > 5 \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$
KEHLBECK (1975)	$h_c = 3,83 \cdot v_v + 4,67^{(1)} \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$ $h_c = 3,83 \cdot v_v + 3,67^{(2)} \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$ $h_c = 3,83 \cdot v_v + 2,17^{(3)} \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$ $h_c = 3,50 \quad (4) \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$
KORNFELD (1936)	$h_c = 3,6 \cdot v_v + 5,3 \quad \text{para } v_v \leq 5 \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$ $h_c = 6,47 \cdot v_v^{0,78} \quad \text{para } v_v > 5 \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$
<p>Notas: Superfície: superior (1), externa lateral (2), inferior (3), interior de células (4). $v_v = \text{velocidade do vento}$</p>	

Para a análise dos parâmetros da equação de Fourier, as isotermas de temperatura foram analisadas após dois, quatro e seis dias de concretagem. Para todos os casos, as variáveis que correspondem a cada propriedade estão relacionadas abaixo:

- Condutividade térmica = k;
- Densidade = ρ ;
- Calor específico = c;

- Coeficiente de convecção = h;
- Diferença de temperatura em percentagem = $\Delta(\%)$.

Para a análise foram admitidos temperatura ambiente de 20°C, temperatura na face inferior do bloco de 25°C e temperatura de lançamento do concreto de 45°C. Na análise dos parâmetros, os resultados encontram-se nas figuras de C.2 a C.9 e nas tabelas de C.3 a C.6. Vale salientar que o nó de temperatura máxima está indicado como o ponto preto da figura.

C.1 Condutividade térmica

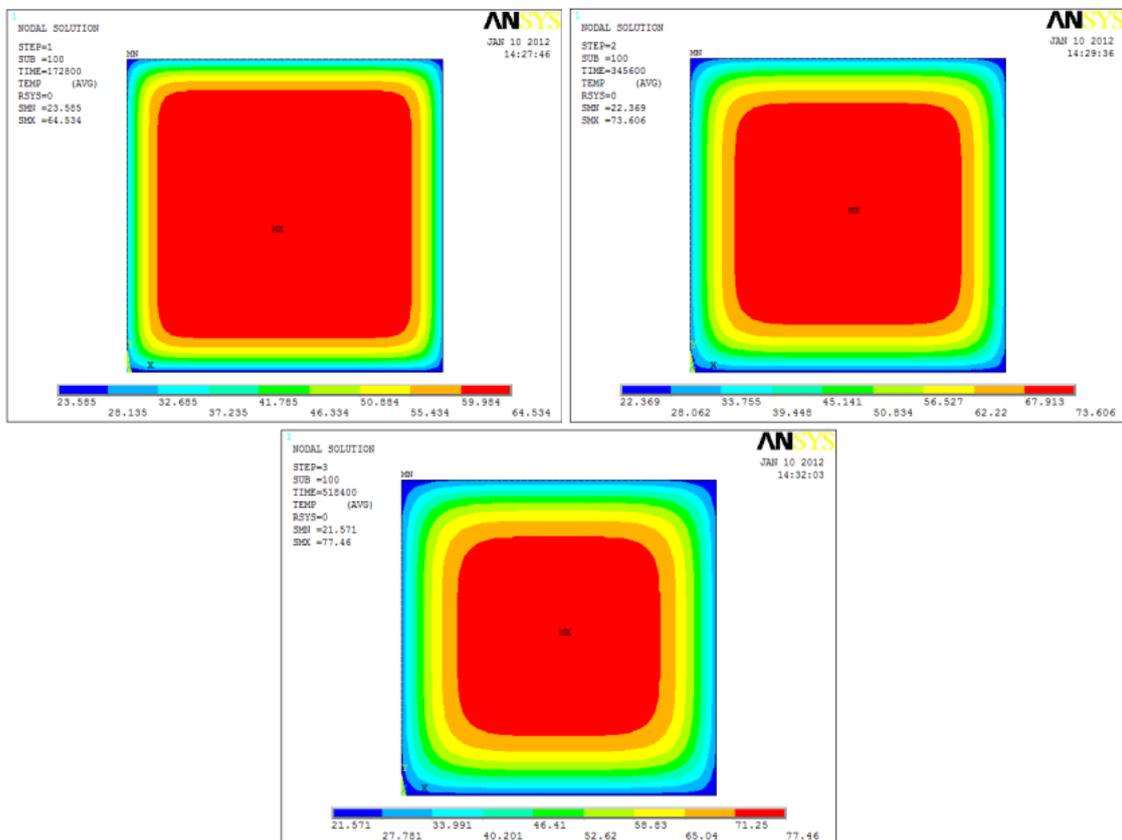


Figura C.2 – Isotermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com $k = 1$ W/m.°C.

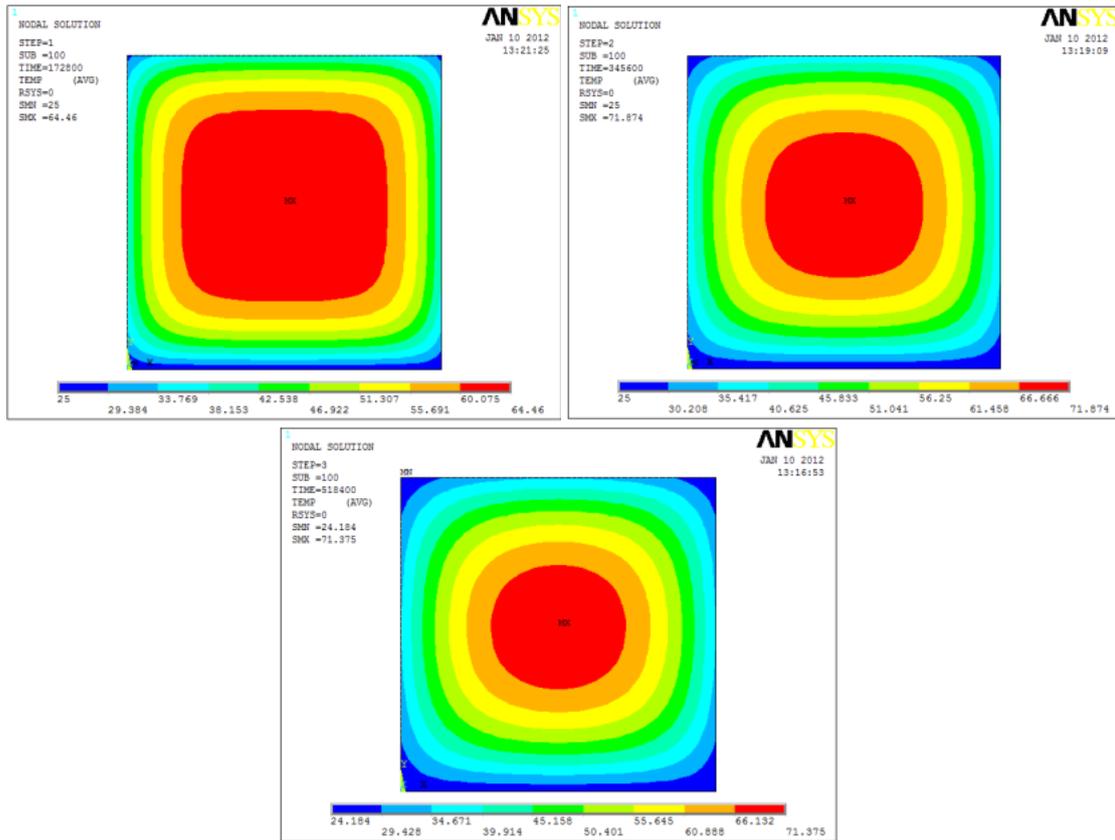


Figura C.3 – Isotermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com $k = 4 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$.

Tabela C.3 – Resultados para diferentes valores de k .

PROPRIEDADES	TEMPERATURA MÁXIMA; NÓ		
	2 DIAS	4 DIAS	6 DIAS
$k = 1 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$			
$\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$	64.534°C	73.606°C	77.460°C
$c = 1000 \text{ J/g}\cdot\text{°C}$	Nó = 1401	Nó = 1401	Nó = 1401
$h = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$			
$k = 4 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$			
$\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$	64.460°C	71.874°C	71.375°C
$c = 1000 \text{ J/g}\cdot\text{°C}$	Nó = 1402	Nó = 1402	Nó = 1402
$h = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$			
$\Delta(\%)$	0,11	2,41	8,52

Observa-se que quanto menor a condutividade térmica do concreto, maior será a temperatura máxima atingida. Isso pode ser explicado pelo fato de que com uma menor

condutividade térmica, maior será a dificuldade de dissipação do calor gerado internamente nesse corpo. Nota-se também que o parâmetro ‘tempo’ influencia diretamente nestas isotermas. Com o tempo, observa-se que a região que apresenta temperatura máxima, ou valores próximos, diminui.

C.2 Densidade

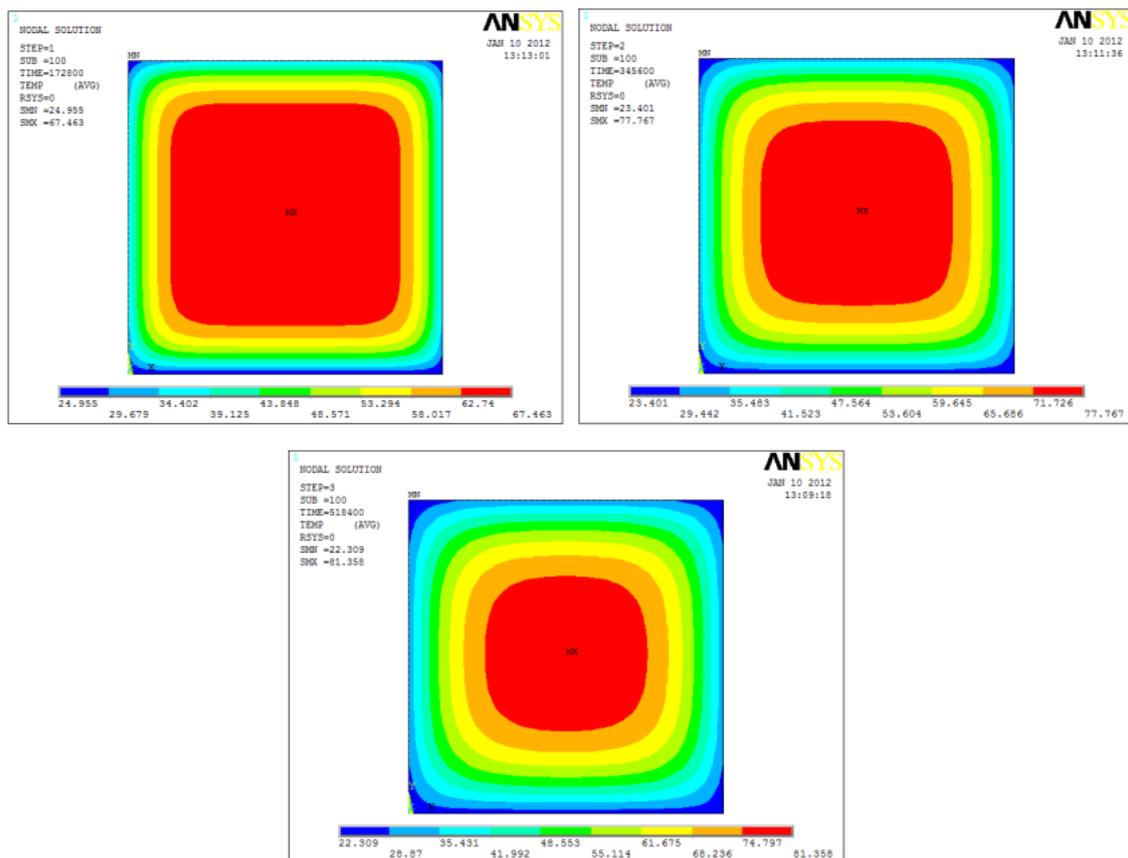


Figura C.4 – Isotermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$.

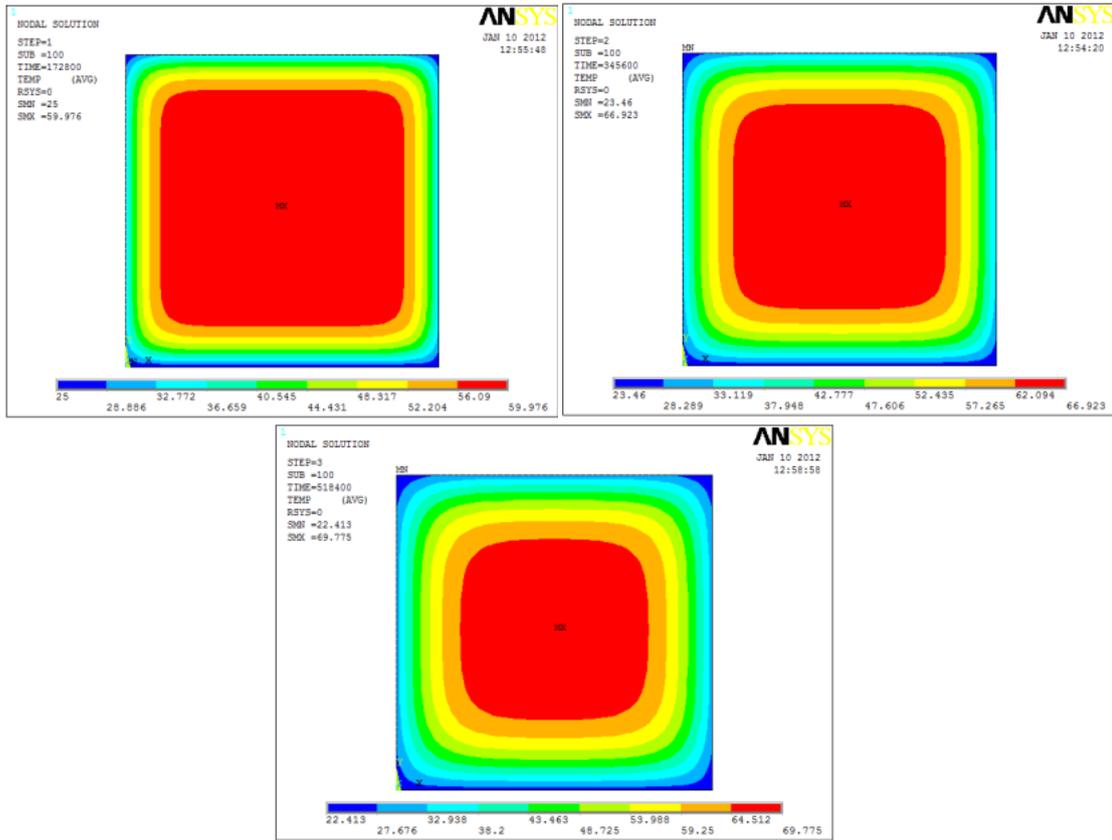


Figura C.5 – Isotermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com $\rho = 3000 \text{ kg/m}^3$.

Tabela C.4 – Resultados para diferentes valores de ρ .

PROPRIEDADES	TEMPERATURA MÁXIMA; NÓ		
	2 DIAS	4 DIAS	6 DIAS
$k = 1,79 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ $c = 1000 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ $h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	67.463°C	77.767°C	81.358°C
	Nó = 1401	Nó = 1401	Nó = 1401
$k = 1,79 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ $\rho = 3000 \text{ kg/m}^3$ $c = 1000 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ $h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	59.976°C	66.923°C	69.775°C
	Nó = 1401	Nó = 1401	Nó = 1401
$\Delta(\%)$	12,48	16,20	16,60

Com a redução da massa específica tem-se o aumento de temperatura. Sabe-se que a massa específica é a relação entre a massa de um corpo sobre o volume que esse mesmo corpo ocupa; e que a redução da relação água/cimento na mistura aumenta sua massa específica. Dessa forma, pode-se afirmar que para uma menor massa específica, têm-se uma maior porosidade, fato que dificulta a dissipação interna de calor.

C.3 Calor específico

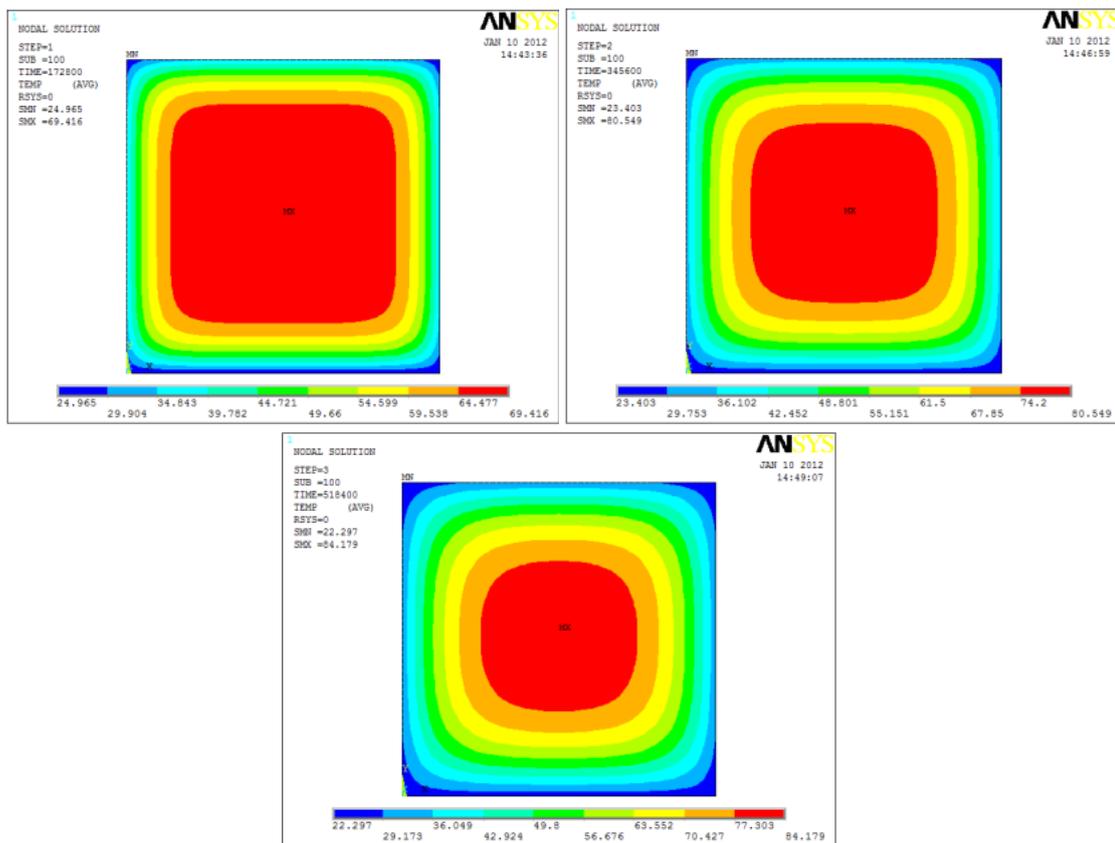


Figura C.6 – Isothermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com $c = 800$ J/g°C.

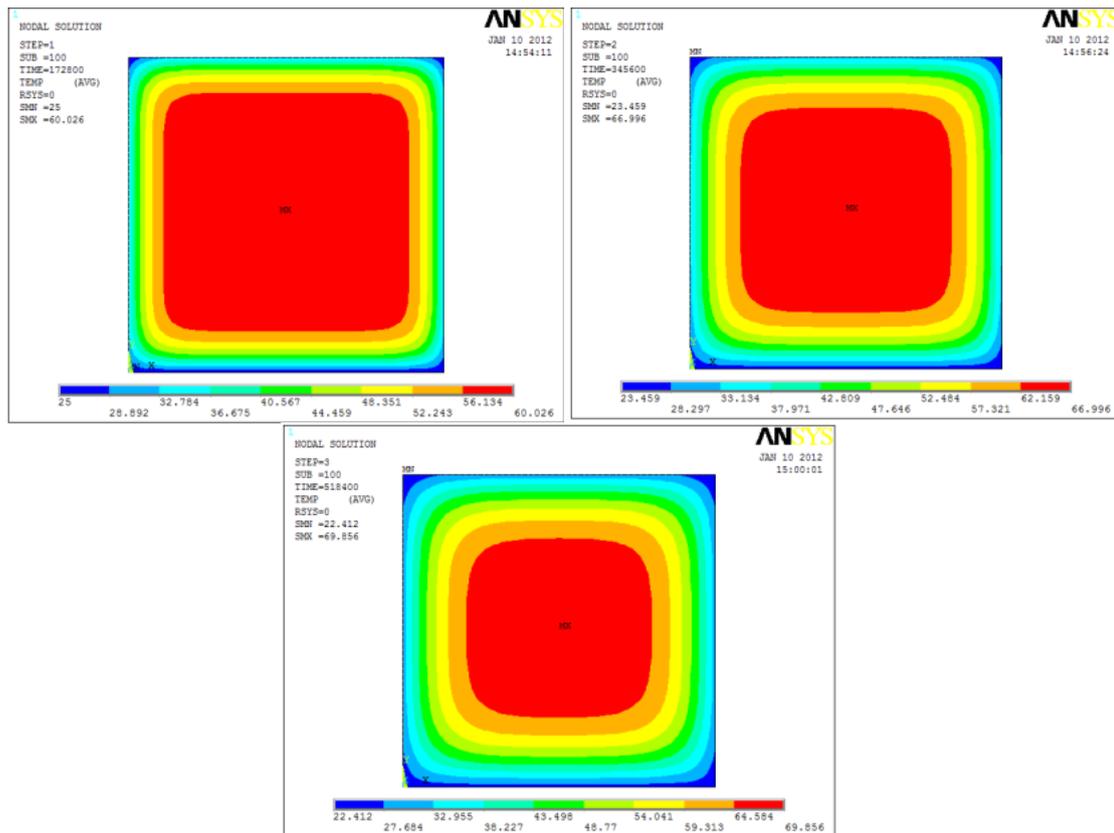


Figura C.7 – Isotermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com $c = 1300$ J/g $^{\circ}$ C.

Tabela C.5 – Resultados para diferentes valores de c .

PROPRIEDADES	TEMPERATURA MÁXIMA; NÓ		
	2 DIAS	4 DIAS	6 DIAS
$k = 1,79$ W/m. $^{\circ}$ C $\rho = 2300$ kg/m 3 $c = 800$ J/g. $^{\circ}$ C $h = 10$ W/m 2 . $^{\circ}$ C	69.416 $^{\circ}$ C Nó = 1401	80.549 $^{\circ}$ C Nó = 1401	84.179 $^{\circ}$ C Nó = 1402
$k = 1,79$ W/m. $^{\circ}$ C $\rho = 2300$ kg/m 3 $c = 1300$ J/g. $^{\circ}$ C $h = 10$ W/m 2 . $^{\circ}$ C	60.026 $^{\circ}$ C Nó = 1401	66.996 $^{\circ}$ C Nó = 1401	69.856 $^{\circ}$ C Nó = 1401
$\Delta(\%)$	15,64	20,23	20,50

Sabe-se que o calor específico corresponde à quantidade de calor necessária para elevar em um grau a temperatura de uma unidade de massa; e que atinge um valor máximo para o

concreto saturado. Observa-se que para um menor valor de calor específico, têm-se maiores temperaturas, ou seja, uma quantidade menor de calor é necessária para que haja elevação de temperatura. No entanto, para um maior valor de calor específico, as isotermas de temperatura máxima apresentam-se maiores que para o caso com menor calor específico.

C.4 Coeficiente de convecção

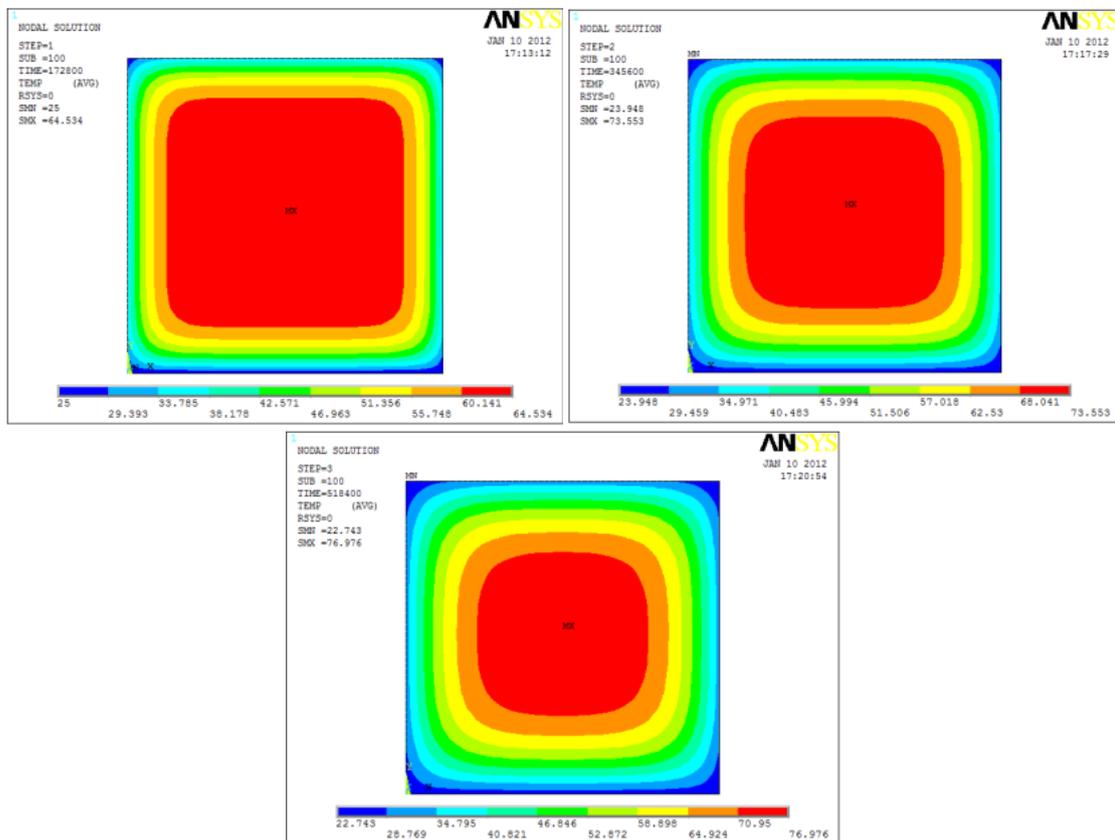


Figura C.8 – Isotermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com $9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

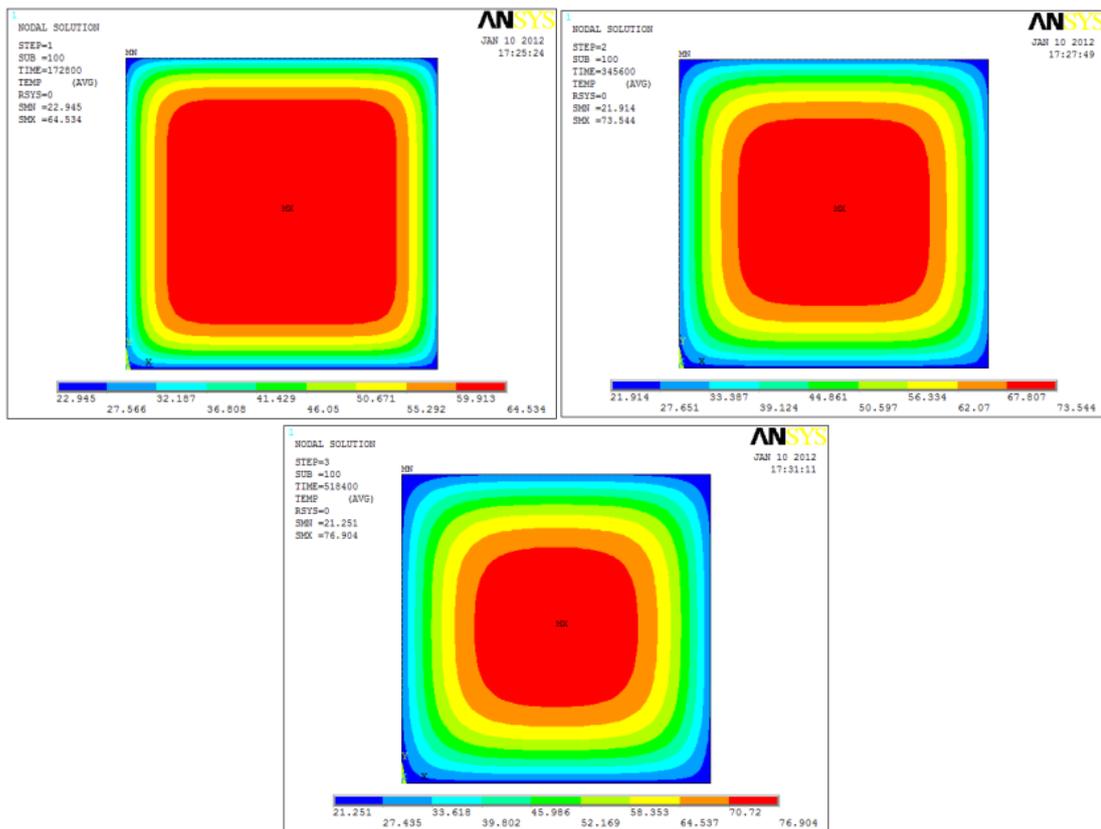


Figura C.9 – Isotermas de temperatura para 2, 4 e 6 dias de concretagem, com $15 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$.

Tabela C.6 – Resultados para diferentes valores de h .

PROPRIEDADES	TEMPERATURA MÁXIMA; NÓ		
	2 DIAS	4 DIAS	6 DIAS
$k = 1,79 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ $c = 1000 \text{ J/g}\cdot^\circ\text{C}$ $h = 9 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$	64.534°C Nó = 1402	73.553°C Nó = 1402	76.976°C Nó = 1402
$k = 1,79 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ $c = 1000 \text{ J/g}\cdot^\circ\text{C}$ $h = 15 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$	64.534°C Nó = 1401	73.544°C Nó = 1401	76.904°C Nó = 1401
$\Delta(\%)$	0,0	0,01	0,09

Para o coeficiente de convecção é notável que este tem pouca ou nenhuma influência sobre a temperatura final. Uma provável causa disto é devido aos valores máximos e mínimos serem muito próximos.

APÊNDICE D - ANÁLISE DAS CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Outro ponto importante para ser analisado é a variação das condições iniciais e de contorno. Nesse estudo foram utilizadas as seguintes propriedades para o concreto massa:

- $k = 1,79 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
- $d = 2300 \text{ kg/m}^3$
- $c = 1000 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$
- $\alpha = 7.07 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- $h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

D.1 Condições Iniciais

Inicialmente, foram verificadas as variações das condições iniciais de lançamento do concreto. Para isso, utilizou-se como temperatura nas laterais do bloco de 20°C e para as temperaturas de lançamento do concreto foram utilizados 20°C , 30°C , 40°C e 45°C . Os resultados obtidos encontram-se na figura D.1 e na tabela D.1.

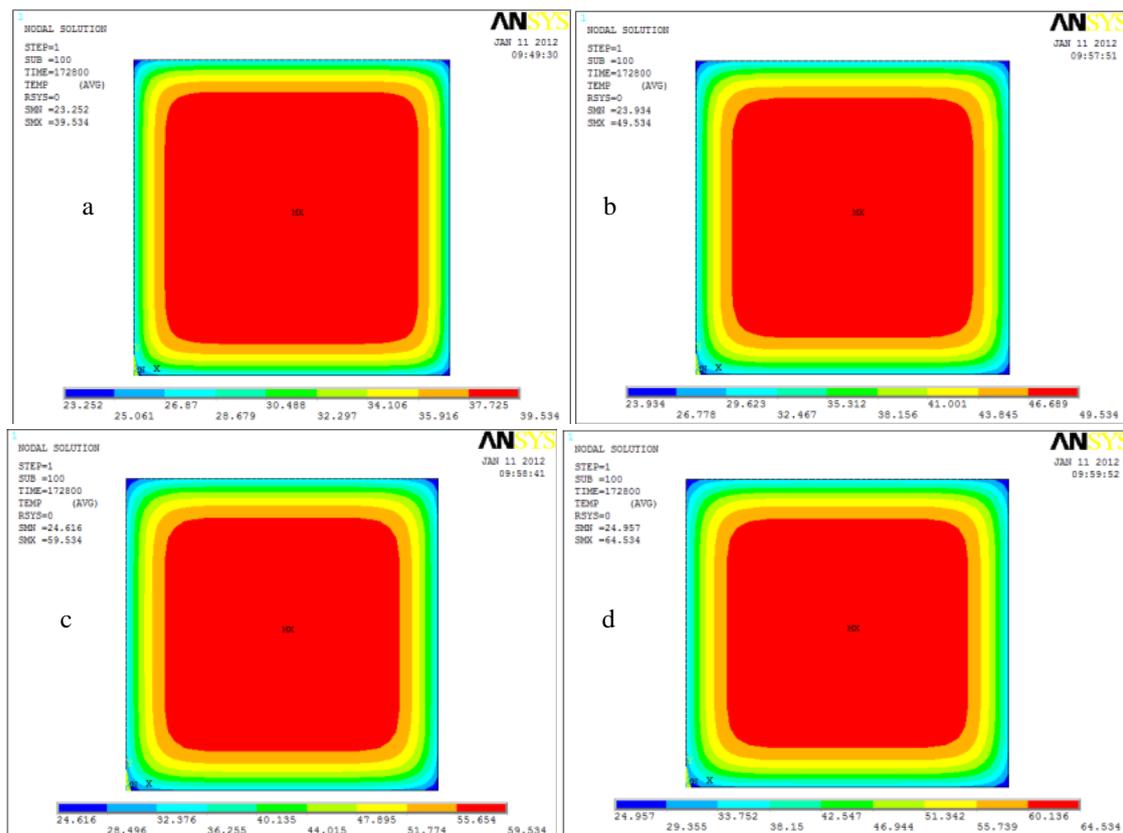


Figura D.1 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem e temperatura de lançamento do concreto de a) 20°C ; b) 30°C ; c) 40°C ; d) 45°C .

Tabela D.1 – Resultados encontrados para diferentes condições iniciais.

TEMPERATURA DE LANÇAMENTO DO CONCRETO	DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS DE LANÇAMENTO	TEMPERATURA MÁXIMA; NÓ	DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS MÁXIMAS
20°C	-	39.534°C Nó = 1402	-
30°C	10°C	49.534°C Nó = 1401	10°C
40°C	10°C	59.534°C Nó = 1401	10°C
45°C	5°C	64.534°C Nó = 1401	5°C

É possível notar que a temperatura máxima atingida é diretamente proporcional à temperatura de lançamento do concreto. Quanto maior a temperatura de lançamento, maior será a temperatura final atingida pelo concreto.

D.2 Condições de Contorno

Para a análise das condições de contorno, foram utilizadas as mesmas propriedades utilizadas nas condições iniciais, porém com a temperatura de lançamento do concreto fixa de 30°C. As condições de contorno foram modificadas como mostradas na tabela D.2 e figura D.3. A referida tabela mostra também o gradiente térmico para cada situação adotada. Este gradiente mostra a diferença entre as temperaturas máximas e mínimas atingidas. A figura D.2 mostra a geometria utilizada, sendo que F1 = face 1; F2 = face 2; F3 = face 3 e F4 = face 4.

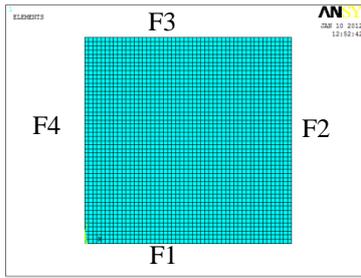


Figura D.2 – Faces do bloco para análise das condições de contorno.

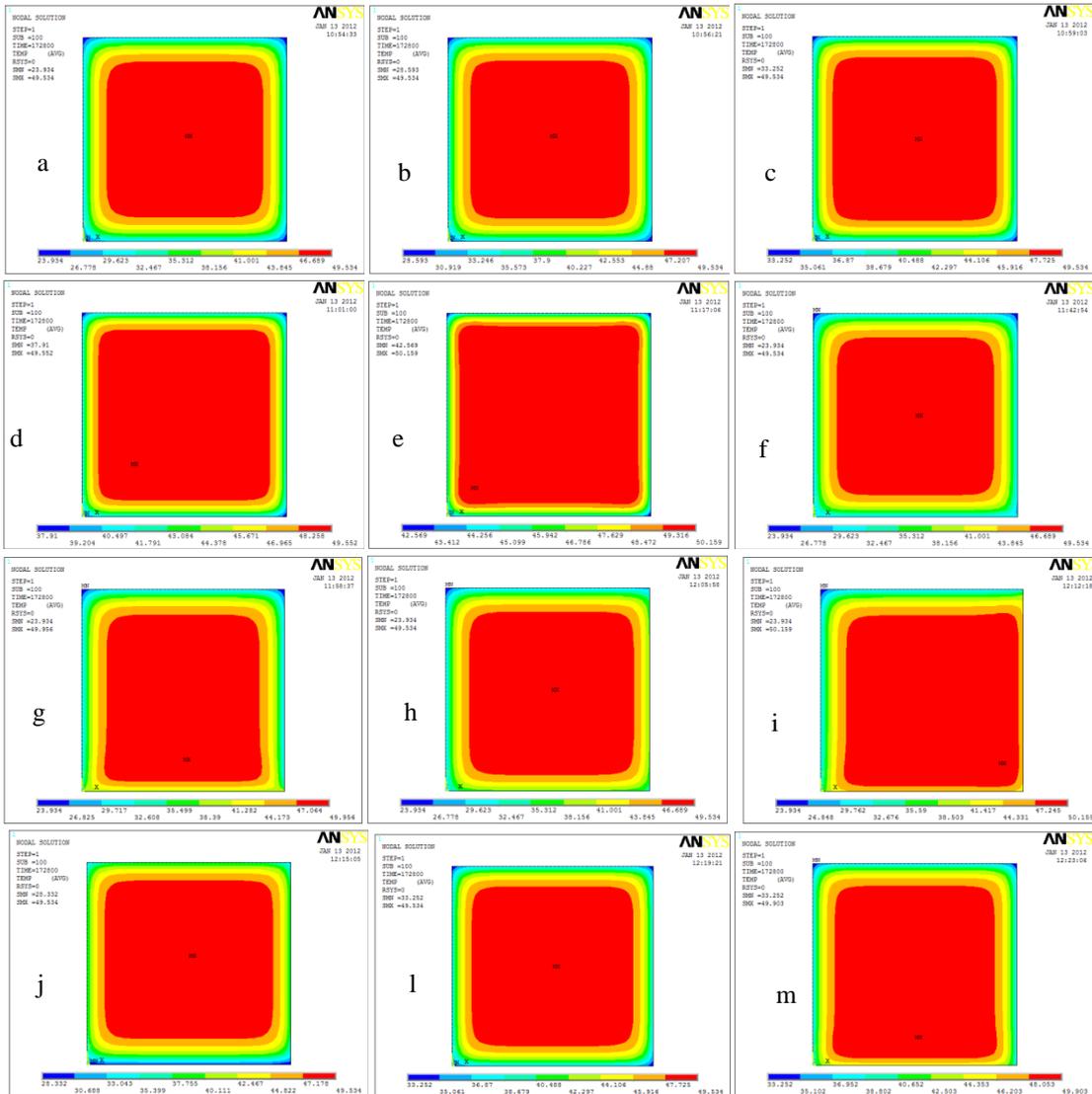


Figura D.3 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem e condições de contorno para os casos de “a” a “m”, conforme a tabela 5.9.

Tabela D.2 – Resultados encontrados para diferentes condições de contorno.

CASO	TEMPERATURA DAS FACES	TEMPERATURA MÁXIMA; NÓ	GRADIENTE DE TEMPERATURA
a	F1 = 20°C F2 = 20°C F3 = 20°C F4 = 20°C	49.534°C Nó = 1401	25.600°C
b	F1 = 25°C F2 = 25°C F3 = 25°C F4 = 25°C	49.534°C Nó = 1401	22.941°C
c	F1 = 30°C F2 = 30°C F3 = 30°C F4 = 30°C	49.534°C Nó = 1401	16.282°C
d	F1 = 35°C F2 = 35°C F3 = 35°C F4 = 35°C	49.552°C Nó = 751	11.642°C
e	F1 = 40°C F2 = 40°C F3 = 40°C F4 = 40°C	50.159°C Nó = 451	7.590°C
f	F1 = 30°C F2 = 20°C F3 = 20°C F4 = 20°C	49.534°C Nó = 1401	25.600°C
g	F1 = 40°C F2 = 20°C F3 = 20°C F4 = 20°C	49.956°C Nó = 1383	26.022°C
h	F1 = 30°C F2 = 30°C	49.534°C Nó = 1449	25.600°C

	F3 = 20°C F4 = 20°C		
i	F1 = 40°C F2 = 40°C F3 = 20°C F4 = 20°C	50.159°C Nó = 2313	26.225°C
j	F1 = 20°C F2 = 30°C F3 = 30°C F4 = 30°C	49.534°C Nó = 1402	21.202°C
l	F1 = 30°C F2 = 30°C F3 = 30°C F4 = 30°C	49.534°C Nó = 1402	16.282°C
m	F1 = 40°C F2 = 30°C F3 = 30°C F4 = 30°C	49.903°C Nó = 1382	16.651°C

Os casos de ‘a’ até ‘e’ mostram as temperaturas máximas atingidas na situação de todas as faces estarem com a mesma temperatura. Nesta situação observa-se que quanto mais próxima a temperatura de lançamento da temperatura ambiente, menor será o gradiente térmico e, conseqüentemente, menor os risco de fissuração, por exemplo. Percebe-se também que a temperatura do contorno influencia na temperatura máxima e no ponto onde se encontra essa temperatura.

Nos casos ‘f’ e ‘g’, foi alterada a temperatura da face *F1*. Verifica-se que no caso de temperatura maior para esta face, houve também maior gradiente térmico. Observa-se também que para *F1* com temperatura maior que o lançamento do concreto, a máxima temperatura atingida ficou próxima a esta superfície. Logo, é possível afirmar que quando existir diferença entre temperatura ambiente e a superfície de recebimento do concreto, quanto maior a temperatura da superfície de recebimento, maior será o gradiente térmico. O mesmo fato ocorre para os casos ‘h’ e ‘i’ com duas faces com temperaturas maiores.

Os casos 'j', 'l' e 'm', mostram análises semelhantes às realizadas anteriormente. O maior gradiente de temperatura encontrado foi para o caso em que se tem maior diferença entre a temperatura de lançamento e as condições de contorno. A condição 'j', que tem a superfície de recebimento do concreto resfriada, em relação às demais, apresentou o maior gradiente.

APÊNDICE E - ANÁLISE DA VARIAÇÃO GEOMÉTRICA

Para o estudo das variações geométricas a análise foi realizada para dois dias de concretagem e as propriedades adotadas para o concreto massa foram:

- $k = 1,79 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$;
- $d = 2300 \text{ kg/m}^3$;
- $c = 1000 \text{ J/g}\cdot\text{°C}$;
- $\alpha = 7.07 \times 10^{-6}/\text{°C}$;
- $h = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$;
- Temperatura da face inferior 25°C , demais faces 20°C ;
- Temperatura inicial do concreto massa: 45°C ;

Foram realizados três tipos de análises geométricas:

1. Inicialmente modificou-se a dimensão da superfície, mantendo a base constante, os resultados são mostrados na tabela E.1 e na figura E.1 de 'a' a 'g';
2. Houve alteração da altura de concretagem conforme tabela E.2 e figura E.2 de 'a' a 'o';
3. E foi alterada a base mantendo altura constante como mostra a tabela E.3 e a figura E.3 de 'a' a 'f'.

Caso 1:

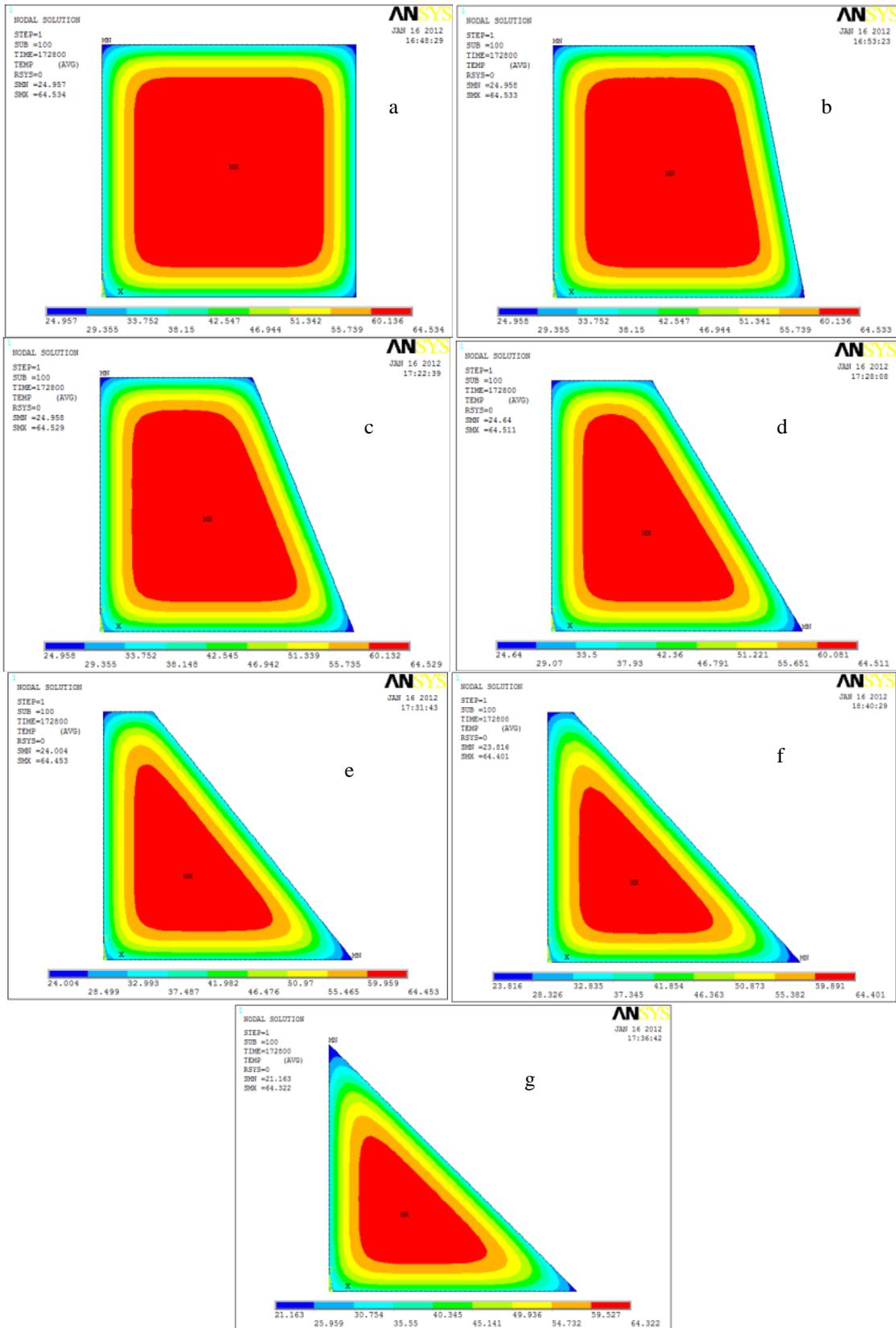


Figura E.1 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem e condições de contorno para os casos de “a” a “g”, conforme a tabela 5.10.

Tabela E.1 - Resultados encontrados para diferentes superfícies.

BASE (m)	SUPERFÍCIE (m)	TEMPERATURA MÁXIMA; NÓ	$\Delta(\%)$
5	5	64.534°C Nó = 1401	-
5	4	64.533°C Nó = 215	0
5	3	64.529°C Nó = 237	0.01
5	2	64.511°C Nó = 198	0.03
5	1	64.453°C Nó = 197	0.09
5	0.5	64.401°C Nó = 190	0.08
5	0	64.322°C Nó = 191	0.12

Para mudança da geometria da superfície, os valores de temperatura máxima sofrem poucas variações. Alteram-se os nós onde ocorre a temperatura máxima e as isothermas, que acompanham a geometria do problema.

Caso 2:

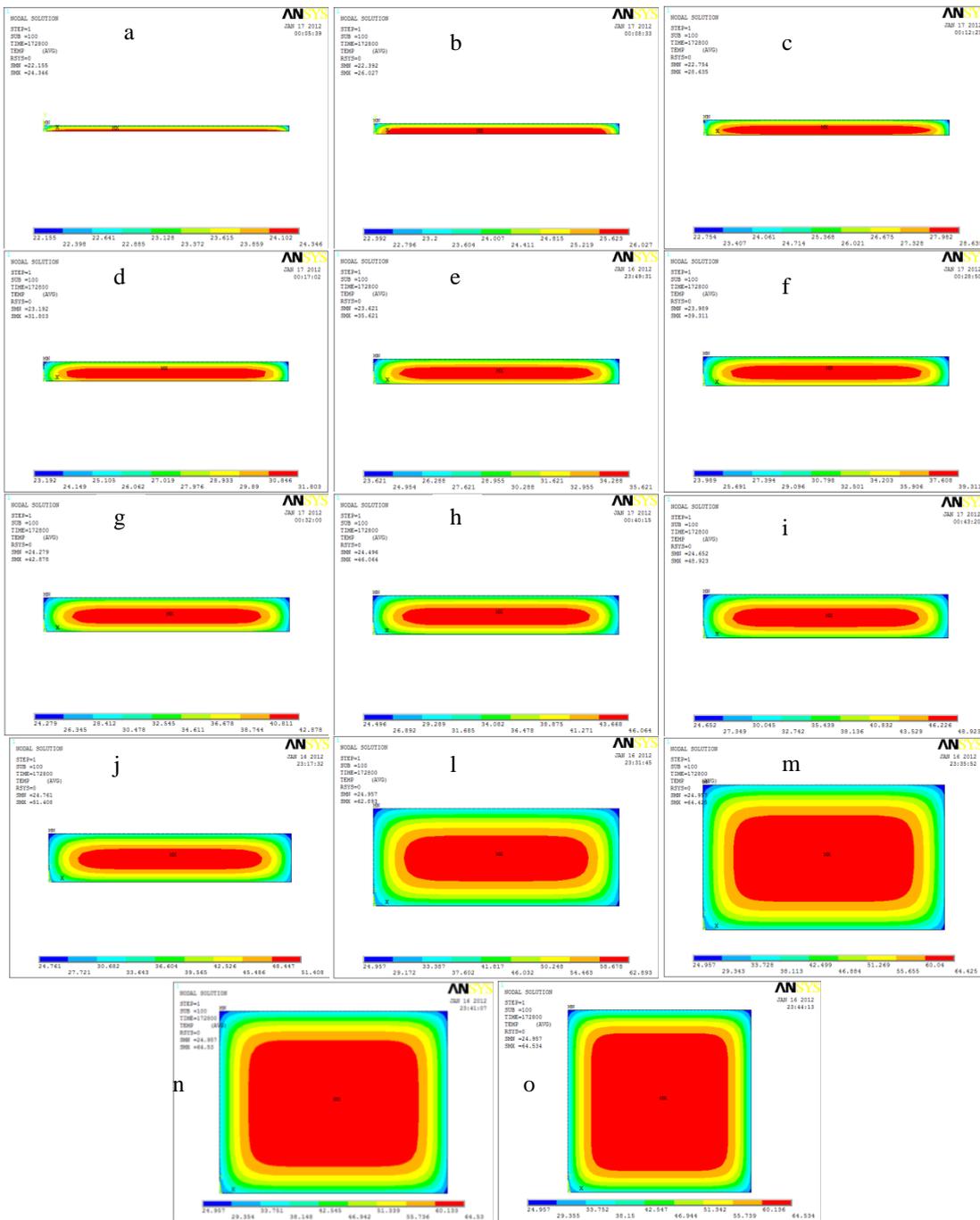


Figura E.2 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem e condições de contorno para os casos de “a” a “o”, conforme a tabela 5.11.

Tabela E.2 - Resultados encontrados para diferentes alturas de concretagem.

BASE (m)	ALTURA (m)	TEMPERATURA MÁXIMA; NÓ	Δ (%)
5	0.1	24.346°C Nó = 27	-
5	0.2	26.027°C Nó = 27	6.90
5	0.3	28.635°C Nó = 155	10.02
5	0.4	31.803°C Nó = 182	11.06
5	0.5	35.621°C Nó = 208	12.00
5	0.6	39.311°C Nó = 235	10,36
5	0.7	42.878°C Nó = 261	9.07
5	0.8	46.064°C Nó = 288	7.43
5	0.9	48.923°C Nó = 314	6.20
5	1	51.408°C Nó = 341	5.08
5	2	62.893°C Nó = 606	22.34
5	3	64.425°C Nó = 871	2.44
5	4	64.530°C Nó = 1136	0.16
5	5	64.534°C Nó = 1401	0.00

Inicialmente foram verificadas as alturas a cada 10 cm até atingir 1 m, chegando neste valor, as alturas foram verificadas a cada metro. Até a altura de 30 cm a temperatura está próxima a temperatura máxima do contorno. À medida que a altura aumenta, passa a haver um maior aumento de temperatura, o que demonstra uma maior influência da geração interna de calor. Grandes variações ocorrem até 2 m de altura, após essa geometria, há um crescimento muito pequeno do valor final da temperatura, em alguns casos, até insignificante.

Caso 3:

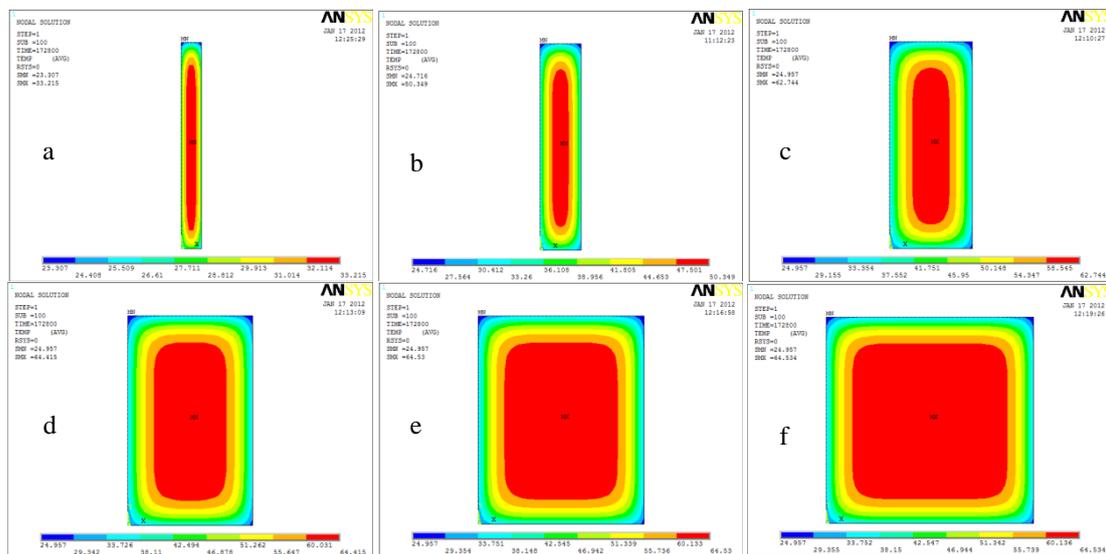


Figura E.3 - Isotermas de temperatura para 2 dias de concretagem e condições de contorno para os casos de “a” a “f”, conforme a tabela 5.12

Tabela E.3 - Resultados encontrados para diferentes larguras.

BASE (m)	ALTURA (m)	TEMPERATURA MÁXIMA; NÓ	Δ (%)
0.5	5	33.215°C Nó = 233	-
1	5	50.349°C Nó = 341	51.58
2	5	62.744°C Nó = 606	24.62
3	5	64.415°C Nó = 871	2.66
4	5	64.530°C Nó = 1136	0.18
5	5	64.534°C Nó = 1401	0.01

Os resultados aqui apresentados são semelhantes ao estudo anterior, ou seja, a variação térmica quanto à geometria é mais significativa para espessuras até 2 m. Em situações com variação de geometria acima desse valor, o aumento de temperatura é muito pequeno.