

**DENISE ARAÚJO VIEIRA KRÖGER**

**ANÁLISE TÉRMICA TRANSIENTE DE ESTRUTURAS  
DE CONCRETO EXECUTADAS POR CAMADAS**

**CURITIBA**

**2001**

**DENISE ARAÚJO VIEIRA KRÜGER**

**ANÁLISE TÉRMICA TRANSIENTE DE ESTRUTURAS  
DE CONCRETO EXECUTADAS POR CAMADAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
à obtenção do grau de Mestre em Ciências.  
Programa de Pós-Graduação em Métodos  
Numéricos em Engenharia,  
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Roberto Dalledone Machado  
Co-orientador: Prof. Marcos Antonio Marino

CURITIBA  
2001

DENISE ARAÚJO VIEIRA KRÜGER

**ANÁLISE TÉRMICA TRANSIENTE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO  
EXECUTADAS POR CAMADAS**

Dissertação aprovada como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Ciências, com área de concentração em Mecânica Computacional, no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia da Universidade Federal do Paraná, pelos professores:

Orientador:



Prof. Roberto Dalledone Machado, D.Eng.

Setor de Tecnologia, UFPR

Co-orientador:



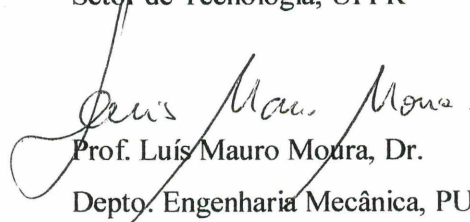
Prof. Marcos Antonio Marino, PhD.

Setor de Tecnologia, UFPR



Prof. Mildred Ballin Hecke, D.Sc.

Setor de Tecnologia, UFPR



Prof. Luís Mauro Moura, Dr.

Depto. Engenharia Mecânica, PUC – Paraná.

Curitiba, 25 de julho de 2001.

*Ao meu marido Cláudio e a meus filhos  
Ana Carolina e Renato,  
por todo seu amor, paciência e  
compreensão...*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação, em especial:

Ao professor e orientador Roberto Dalledone Machado, pela sua competente e exigente orientação, bem como ao seu incondicional apoio, incentivo e amizade em todas as etapas do curso e da execução deste trabalho, indicando-me sempre o caminho da perseverança.

Ao amigo e orientador Marcos Antonio Marino por toda sua ajuda e permanente incentivo e confiança.

Ao amigo José Marques Filho, cujo incentivo foi fundamental para a realização deste curso.

Aos professores, colegas e amigos do CESEC onde muito aprendi.

Aos colegas e amigos Joceli de Andrade, Joldmar F. Terres e Marcos Aberto Soares pela ajuda incondicional no levantamento e compilação dos dados e ilustrações.

Aos colegas e amigos Rosângela Garcia pela ajuda na formatação deste trabalho, Reinaldo Gabriel Faccin pelo apoio com os equipamentos computacionais, e Ana Lúcia Dal Pozzo Mendes e Sandra Mara Correa, sempre solícitas na obtenção das referências bibliográficas.

À Companhia Paranaense de Energia pela disponibilidade das informações necessárias para este trabalho e a possibilidade de meu aperfeiçoamento profissional.

Aos amigos Antônio Sérgio Guerra Gabínio, José Roberto da Silva Brito e Paulo Levis pela paciência, amizade e ensinamentos ao longo deste período.

À minha família, que de forma muito especial me ajudou e apoiou em todos os momentos e ao meu marido Cláudio e meus filhos Ana Carolina e Renato, pela interminável paciência, o constante apoio e estímulo que levaram a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

No presente trabalho é proposta uma sistemática de análise térmica transiente de estruturas executadas por camadas. Essa técnica permite determinar o campo de temperaturas em cada etapa do processo construtivo, levando-se em conta a influência térmica de uma camada sobre as demais e sobre a estrutura como um todo.

A solução numérica é baseada no Método dos Elementos Finitos, sendo as análises realizadas em regime transiente. Optou-se pela utilização de um *software* comercial, *ANSYS®/Multiphysics*, que possui muitos recursos disponíveis para pré e pós-processamento e uma extensa biblioteca de elementos. Desenvolveu-se rotina específica na linguagem *APDL (ANSYS® Parametric Design Language)* para implementação da metodologia proposta.

A técnica apresentada é geral e pode ser aplicada a qualquer tipo de estrutura executada por camadas. As simulações apresentadas foram direcionadas para estruturas de concreto, em particular para o caso de barragens de concreto compactado por rolo. São consideradas diversas hipóteses de execução da estrutura, alterando-se as condições de lançamento, tais como a espessura das camadas, temperaturas iniciais, condições ambientais e outros fatores.

Alguns exemplos são apresentados, visando a verificação da técnica proposta. Ao final, discute-se a influência de alguns parâmetros térmicos no sentido de minimizar os seus efeitos sobre a estrutura.

## ABSTRACT

In the present work, a new procedure for unsteady-state thermal analysis of layered structures is proposed. This technique allows for the determination of the temperature field at each step of the construction period, taking into account the thermal influence of each layer on the surrounding layers and on the structure as a whole.

The numerical solution is based on the Finite Elements Method (FEM). The commercially available software *ANSYS®/Multyphysics* is used to perform the thermal analyses under unsteady state conditions. The software has several features for pre- and post-processing, besides an extensive set of element types. A specific computer routine, written in APDL (*ANSYS®* Parametric Design Language), was also developed to implement the proposed methodology.

The technique here presented is general and it can be applied to any structure built in layers. However, the numerical simulations focused on concrete structures, particularly RCC (Rolled Compacted Concrete) dams. Several hypotheses related to the construction of the structure were taken into account, varying concrete pouring conditions such as layer thickness, initial temperatures, environment variables, and other factors.

Some examples are presented in order to verify the suggested procedure. Discussions about the influence of some thermal parameters and the minimization of their effects on the structure are also included.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	GENERALIDADES.....	1
1.2	ESTRUTURAS DE CONCRETO .....	3
1.3	OBJETIVO DESTE TRABALHO.....	5
<b>2</b>	<b>BARRAGENS EXECUTADAS EM CAMADAS .....</b>	<b>8</b>
2.1	HISTÓRICO.....	9
2.2	EFEITOS TÉRMICOS EM BARRAGENS.....	11
2.2.1	Distribuição de temperaturas .....	18
2.2.2	Métodos de cálculo da distribuição de temperaturas .....	21
<b>3</b>	<b>TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....</b>	<b>26</b>
3.1	CONDUÇÃO .....	26
3.1.1	Equações governantes.....	27
3.1.2	Condições iniciais e de contorno .....	32
3.1.3	Interface entre dois ou mais materiais .....	35
3.2	CONVECÇÃO .....	36
3.3	RADIAÇÃO.....	37
3.4	PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	39
<b>4</b>	<b>MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....</b>	<b>41</b>
4.1	FORMULAÇÃO BÁSICA .....	42
4.1.1	Discretização do contínuo.....	42

4.1.2 Seleção das funções de interpolação.....	45
4.1.3 Determinação das propriedades dos elementos .....	46
4.1.4 Definição das equações do sistema.....	47
4.1.5 Definição das condições de contorno .....	49
4.1.6 Resolução do sistema de equações .....	49
4.2 FORMULAÇÃO PARA TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	50
4.3 SISTEMÁTICA DA ANÁLISE COMPUTACIONAL .....	56
<b>5 METODOLOGIA .....</b>	<b>62</b>
5.1 UTILIZAÇÃO DO ANSYS®/MULTIPHYSICS .....	65
5.2 SEQÜÊNCIA DE ANÁLISE.....	67
5.3 APLICAÇÕES .....	71
5.3.1 Blocos de concreto.....	72
5.3.2 Viga de concreto da Casa de Força da Usina Hidrelétrica Serra da Mesa... 91	
5.3.3 Barragem da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias.....	109
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>143</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>147</b>

## **ANEXO 1 – ELEMENTOS**

## **ANEXO 2 – CURVA DE GERAÇÃO DE CALOR**

## **ANEXO 3 – DADOS DO CONTROLE TECNOLÓGICO DA BARRAGEM DE SALTO CAXIAS**

## **ANEXO 4 – UNIDADES**

## LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 – ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA E CURVA DE GERAÇÃO DE CALOR .....	73
TABELA 5.2 – RESULTADOS NODAIS - LINHA CENTRAL VERTICAL .....	91
TABELA 5.3 – ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA E CURVA DE GERAÇÃO DE CALOR .....	95
TABELA 5.4 – RESULTADOS DAS ANÁLISES EFETUADAS .....	108
TABELA 5.5 – ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA E CURVA DE GERAÇÃO DE CALOR .....	115
TABELA 5.6 – DADOS DE CONCRETAGEM DA BARRAGEM DE SALTO CAXIAS .....	119
TABELA 5.7 – IDENTIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DOS TERMÔMETROS...	120
TABELA 5.8 – RESULTADOS NODAIS NOS PONTOS DE INSTALAÇÃO DOS TERMÔMETROS .....	122
TABELA 5.9 – HIPÓTESES CONSTRUTIVAS .....	130
TABELA 5.10 – VALORES NODAIS – TERMÔMETROS 601 A 606.....	132
TABELA 5.11 – VALORES NODAIS – TERMÔMETROS 607 A 611.....	133
TABELA 5.12 – VALORES NODAIS – TERMÔMETROS 612 A 616.....	134

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Carregamentos em barragens de concreto - Cargas estáticas, térmicas e dinâmicas [Léger et al. (1993)].....	12
Figura 2.2 – Transferência de calor em barragens de concreto [Léger et al. (1993)]...	13
Figura 2.3 – Restrições externas – Barragem–fundação / maciço e blocos isolados [Léger et al. (1993)].....	14
Figura 2.4 – Processo para avaliação da distribuição de temperaturas e tensões em estruturas executadas por camadas .....	17
Figura 3.1 – Domínio e contorno sujeitos à condução de calor .....	27
Figura 3.2 – Paralelepípedo infinitesimal do contínuo em coordenadas cartesianas – Balanço de energia.....	28
Figura 3.3 – Domínio $\Omega$ sujeito às condições de contorno $\Gamma_1$ e $\Gamma_2$ .....	33
Figura 3.4 – Domínio e interface entre dois materiais .....	35
Figura 4.1 – Representação de uma discretização bidimensional .....	43
Figura 4.2 – Exemplos de elementos bidimensionais e tridimensionais .....	44
Figura 4.3 – Domínio e contorno sujeitos à transferência de calor .....	51
Figura 4.4 – Condições de contorno.....	54
Figura 4.5 – Método de Newton-Raphson: (a) Iteração intermediária; (b) Processo de solução .....	60
Figura 5.1 – Seqüência de passos da análise térmica .....	68
Figura 5.2 – Seqüência de análise: (a) Estrutura discretizada; (b) Execução da primeira camada; (c) Execução das camadas sucessivas .....	69

Figura 5.3 – Blocos de concreto .....	72
Figura 5.4 – BL-A1 – Temperaturas da camada após 110 horas – valor de temperatura máxima da camada .....	75
Figura 5.5 – BL-1 – Temperaturas da camada após 144 horas .....	76
Figura 5.6 – BL-A1 – Resultados nodais - linha central vertical – 144 horas.....	76
Figura 5.7 – BL-A2 – Primeira camada – temperatura de lançamento .....	79
Figura 5.8 – BL-A2 – Primeira camada – após 48 horas .....	79
Figura 5.9 - BL-A2 – Segunda camada – temperatura de lançamento .....	80
Figura 5.10 - BL-A2 – Primeira e segunda camadas – temperatura após 96 horas.....	80
Figura 5.11 - BL-A2 – Terceira camada – temperatura de lançamento .....	81
Figura 5.12 – BL-A2 – Temperaturas das camadas após 110 horas – valor de temperatura máxima das camadas .....	81
Figura 5.13 – BL-A2 – Temperaturas das camadas após 144 horas .....	82
Figura 5.14 – BL-A2 – Resultados nodais - elementos lineares (4 nós) - linha central vertical – 144 horas.....	82
Figura 5.15 – BL-A3 – Temperaturas das camadas após 136 horas – valor de temperatura máxima das camadas – elementos quadrangulares quadráticos.....	83
Figura 5.16 – BL-A3 – Temperaturas das camadas após 144 horas – elementos quadrangulares quadráticos.....	84
Figura 5.17 – BL-A3 – Resultados nodais - elementos quadráticos (8 nós) - linha central vertical – 144 horas – elementos quadrangulares quadráticos ....	84

Figura 5.18 – BL-A4 – Primeira camada – temperatura de lançamento .....	86
Figura 5.19 – BL-A4 – Primeira camada – após 48 horas .....	86
Figura 5.20 – BL-A4 – Segunda camada – temperatura de lançamento .....	87
Figura 5.21 – BL-A4 – Primeira e segunda camada – temperatura após 96 horas.....	87
Figura 5.22 – BL-A4 – Terceira camada – temperatura de lançamento.....	88
Figura 5.23 – BL-A4 – Temperaturas das camadas após 130 horas – valor de temperatura máxima das camadas .....	88
Figura 5.24 – BL-A4 – Temperaturas das camadas após 130 horas – detalhe da menor temperatura no instante de temperatura máxima das camadas .....	89
Figura 5.25 – BL-A4 – Temperaturas das camadas – após 144 horas .....	89
Figura 5.26 – BL-A4 – Resultados nodais - elementos lineares (4 nós) - linha central vertical – 144 horas.....	90
Figura 5.27 – Seção típica da viga de concreto .....	92
Figura 5.28 – Discretização da viga de concreto – Andrade (1997) .....	93
Figura 5.29 – Discretização da viga de concreto.....	94
Figura 5.30 – Curva de evolução adiabática.....	95
Figura 5.31 – Curva de geração de calor .....	96
Figura 5.32 – VH-00 – Temperaturas da camada após 108 horas.....	97
Figura 5.33 – VH-00 – Temperaturas da camada após 504 horas.....	97
Figura 5.34 – VH-00 – Resultados nodais após 504 horas.....	98
Figura 5.35 – VH-01 – Primeira camada – temperatura de lançamento .....	99

Figura 5.36 – VH-01 – Primeira camada após 72 horas.....	99
Figura 5.37 – VH-01 – Segunda camada – temperatura de lançamento .....	100
Figura 5.38 – VH-01 – Segunda camada após 336 horas.....	100
Figura 5.39 – VH-01 – Terceira camada – temperatura de lançamento .....	101
Figura 5.40 – VH-01 – Temperaturas das camadas após 504 horas.....	101
Figura 5.41 – VH-03 – Resultados nodais após 1512 horas.....	102
Figura 5.42 – VH-01B – Primeira camada após 72 horas .....	103
Figura 5.43 – VH-01C – Primeira camada após 72 horas .....	103
Figura 5.44 – VH-04 – Primeira camada após 72 horas.....	104
Figura 5.45 – VH-05 – Temperaturas das camadas após 252 horas.....	105
Figura 5.46 – VH-05 – Temperaturas das camadas após 336 horas.....	106
Figura 5.47 – VH-05 – Resultados nodais após 336 horas.....	106
Figura 5.48 – VH-08 – Temperaturas das camadas após 576 horas.....	107
Figura 5.49 – VH-08 – Temperaturas das camadas após 1008 horas.....	108
Figura 5.50 – Usina Hidrelétrica Salto Caxias – Arranjo geral .....	110
Figura 5.51 – Usina Hidrelétrica Salto Caxias – Vista aérea da barragem.....	110
Figura 5.52 – Galgamento de parte da barragem durante a construção.....	112
Figura 5.53 – Galgamento de parte da barragem durante a construção.....	112
Figura 5.54 – Bloco B-08 - Instrumentação .....	113
Figura 5.55 – Seção típica analisada e fases construtivas .....	114

Figura 5.56 – Curva de Elevação Adiabática .....	116
Figura 5.57 – Curva de Geração de Calor .....	116
Figura 5.58 – Barragem EL. 281,0 - Malha de elementos finitos .....	118
Figura 5.59 – Análise da barragem até a El. 267,70 – Camada 19.....	123
Figura 5.60 – Análise da barragem até a El. 267,70 – Detalhe de Montante .....	124
Figura 5.61 – Análise da barragem até a El. 267,70 – Detalhe de Jusante.....	124
Figura 5.62 – Análise da barragem até a El. 273,10 – Camada 37.....	125
Figura 5.63 – Análise da barragem até a El. 273,10 – Detalhe de Montante .....	125
Figura 5.64 – Análise da barragem até a El. 273,10 – Detalhe de Jusante.....	126
Figura 5.65 – Análise da barragem até a El. 278,80 – Camada 56.....	126
Figura 5.66 – Análise da barragem até a El. 278,80 – Detalhe de Montante .....	127
Figura 5.67 – Análise da barragem até a El. 278,80 – Detalhe de Jusante.....	127
Figura 5.68 – Análise da barragem até a El. 281,00 após 2604 horas.....	128
Figura 5.69 – Análise da barragem até a El. 281,00 após 1536 horas – Estrutura única.....	129
Figura 5.70 – Hipótese 8 – 768 horas.....	140
Figura 5.71 – Hipótese 8 – 768 horas – Detalhe de Montante .....	140
Figura 5.72 – Hipótese 8 – 768 horas – Detalhe de Jusante .....	141

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	-	absorvidade da superfície
$\alpha$	-	difusividade térmica do meio contínuo
$\beta$	-	coeficiente de expansão térmica
$\sigma$	-	constante de Stefan-Boltzmann
$\rho$	-	massa específica do meio contínuo
$\Gamma$	-	domínio do contorno analisado
$\varepsilon$	-	emissividade da superfície
$\varepsilon_1$	-	emissividade da superfície cinzenta
$\theta$	-	parâmetro de integração transiente ( $1/2 \leq \theta \leq 1$ )
$\mu$	-	viscosidade
$[B]$	-	matriz de interpolação do gradiente de temperatura
$[C]$	-	matriz de capacidade de calor
$[k_C]^e$	-	matriz de condutividade do elemento
$[k_R]^e$	-	matriz de rigidez do elemento
$[K]$	-	matriz de condutividade térmica
$[K_C]$	-	matriz de condutividade do sistema
$[K_R]$	-	matriz de rigidez do sistema
$[K_i^T]$	-	matriz de condutividade térmica
$[N]$	-	matriz de interpolação
$\{d\}^e$	-	vetor dos graus de liberdade nodais
$\{D\}$	-	vetor dos graus de liberdade nodais do sistema
$\{f\}^e$	-	vetor dos carregamentos nodais
$\{F\}$	-	vetor dos carregamentos nodais do sistema
$\{q\}^e$	-	vetor do fluxo de calor no elemento
$\{\dot{Q}\}$	-	vetor do fluxo de calor do sistema
$\{Q^a\}$	-	vetor taxa de calor suprida aos nós, inclusive o calor gerado nos elementos adjacentes a cada nó

- $\{Q_i^{nr}\}$  - vetor correspondente às cargas internas do elemento
- $\{\dot{T}_n\}$  - vetor taxa de variação da temperatura nodal ao longo do tempo
- $\{\dot{T}\}$  - vetor taxa de variação das temperaturas ao longo do tempo
- $\{T\}^e$  - vetor das temperaturas nodais no elemento
- $\{T\}$  - vetor das temperaturas nodais
- $\{T_n\}$  - valor do grau de liberdade (temperatura) nodal no tempo  $t_n$
- $\{T(t)\}$  - vetor das temperaturas nodais do elemento
- $A_I$  - área da superfície
- $c_v$  - calor específico para volume constante
- $d$  - energia solar difusa
- $f_\Gamma$  - função conhecida de coordenadas  $x_i$  e tempo  $t$
- $g_x, g_y, g_z$  - componentes da aceleração da gravidade
- $h_c$  - coeficiente convectivo, coeficiente de transferência de calor
- $H_i$  - radiação solar direta, radiação incidente na superfície  $i$  por unidade de tempo e área
- $K$  - condutividade térmica
- $k$  - coeficiente de condutividade térmica do meio
- $L_1, L_2, L_3$  - coordenadas normalizadas variando de 0,0 em um vértice a 1,0 na face oposta
- $n$  - número de elementos do sistema
- $\mathbf{n}$  - vetor unitário normal
- $N_i$  - funções de forma
- $p$  - pressão dinâmica
- $Q$  - taxa de geração de calor interno por unidade de volume
- $q_c''$  - fluxo de calor convectivo por unidade de área
- $q_{rs}''$  - fluxo de calor radiativo por unidade de área
- $q_{rsi}''$  - fluxo de calor radiativo em dada superfície  $i$
- $q_x'', q_y''$  e  $q_z''$  - componentes da taxa de transferência de calor por unidade de área
- $q_x, q_y$  e  $q_z$  - componentes do vetor fluxo de calor por unidade de área
- $s, t$  - coordenadas normalizadas variando de  $-1,0$  em um lado do elemento e  $+1,0$  no outro lado
- $T$  - temperatura do meio contínuo

- $T_0$  - temperatura de referência
- $T_e$  - temperatura externa
- $T_i(t)$  - valor da temperatura em cada nó
- $u$  - energia específica interna do contínuo
- $u, v, w$  - componentes de velocidade

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 GENERALIDADES

Em quase todas as áreas da engenharia são encontrados problemas da Mecânica do Contínuo que devem ser examinados sob o enfoque da térmico. São de grande importância aqueles cujo comportamento, desempenho, segurança e durabilidade sofrem influência de processos de natureza térmica.

Sempre que houver um gradiente de temperatura em um meio contínuo sólido ou fluido ocorre transferência de calor por condução, convecção ou por radiação. Algumas situações que envolvem uma ou mais destas formas de trocas de calor serão, a seguir, mencionadas a título de ilustração.

Uma análise detalhada da transferência de calor é necessária para a estimativa de custo, viabilidade e dimensões de equipamentos, tais como caldeiras, aquecedores, refrigeradores e trocadores de calor. O sucesso da operação de componentes de equipamentos como palhetas de turbinas e paredes de câmaras de combustão, entre outros, depende da possibilidade de resfriamento de certas partes metálicas, pela remoção contínua e rápida de calor das superfícies. No projeto de máquinas elétricas, transformadores e mancais, a análise de transferência de calor deve ser feita para evitar condições que possam causar superaquecimento e avarias nos equipamentos.

Conforme exemplificado em Kreith (1977), Özisik (1979) e Lewis et al. (1996), diversos processos industriais de fabricação de peças e equipamentos envolvem variações térmicas significativas, cujo conhecimento e controle são fundamentais para assegurar o cumprimento de requisitos técnicos e de qualidade. Sendo assim, na fundição de peças, deve-se analisar o processo de solidificação em moldes, de modo a avaliar a influência do resfriamento no material, nas tensões térmicas residuais e suas repercussões na peça acabada. Em processos de moldagem a alta pressão como, por exemplo, na injeção de peças plásticas, é freqüente a

necessidade de sistemas de refrigeração que assegurem a conformação da superfície final pretendida. Nestes casos, devem ser consideradas não só as variações de temperatura envolvidas, como também as variações das propriedades térmicas dos materiais com a temperatura.

Nos processos de fundição, a temperatura do material líquido é geralmente muito superior à temperatura do molde. Durante o processo, o calor é, portanto, transferido do material para o molde, resultando em gradientes de temperatura em ambos. Como consequência do gradiente de temperatura, são desenvolvidas tensões biaxiais na superfície do molde, podendo haver compressão durante a fase de aquecimento e tração na fase de resfriamento. Este fenômeno pode levar à fissuração da superfície do molde, limitando a sua vida útil, ou mesmo à ruptura. O material vazado (metais ou polímeros, por exemplo) inicia seu resfriamento à medida que entra em contato com o molde. Neste caso, a análise envolve não só as diferentes temperaturas iniciais, como também a transferência de calor, as condições de contorno e a extensão do molde [Miles et al. (1995), Nguyen e Prystay (1999)].

Na análise da segurança de reatores nucleares, bem como em modernas indústrias de aço, nas quais a taxa de produção e continuidade do processo de fabricação estão relacionadas às limitações de fissuras induzidas por tensões térmicas, a avaliação das variações térmicas é essencial para o cálculo das tensões resultantes e para a previsão da vida útil de componentes [Lewis et al. (1996)].

Diversos processos de fabricação (como moldagens metálicas e plásticas) ou de construção (como em estruturas de concreto) envolvem o lançamento e a deposição de materiais em camadas sucessivas. Usualmente, o material é lançado numa temperatura diferente da temperatura do meio circundante, que pode ser outro material (moldes, fundações de estruturas, camadas anteriormente executadas) ou o próprio meio ambiente. Isto causa um gradiente de temperatura cujo desenvolvimento pode gerar tensões térmicas indesejadas.

Estruturas de concreto massa, que envolvem grandes volumes de material e execução em etapas, são casos importantes que exigem análises térmicas e, por esse motivo, serão a seguir melhor estudadas.

## 1.2 ESTRUTURAS DE CONCRETO

A previsão dos níveis de tensão causados por efeitos térmicos é um dos principais fatores a serem avaliados para um adequado projeto de estruturas de concreto, seja em relação aos aspectos dos máximos níveis de tensões admissíveis, seja em relação à durabilidade das estruturas.

Processos para avaliação de estruturas de concreto sujeitas a cargas térmicas variáveis no tempo e espaço, como em pontes e barragens, são apresentados por Guelpa et al. (1973), Inoue (1990), Léger et al. (1993), Hinks (1995), Calvo et al. (1995), Saetta et al. (1995), Bouzoubaâ et al. (1997), Khatchourian et al. (1999) e, no caso de estruturas de concreto de alto desempenho por Calmon et al. (2000).

Diversas metodologias têm sido propostas para avaliar, por exemplo, o efeito de altas temperaturas em estruturas de concreto, como as que envolvem reatores nucleares, calculando-se as tensões resultantes de modo a prevenir a fissuração [Majumdar et al. (1994)] e a degradação térmica e conseqüente fissuração de tanques de armazenamento de material radioativo [Stuart et al. (1997)].

Processo térmico importante ocorre na execução de estruturas de concreto por camadas. Durante o lançamento e cura do concreto fresco, a hidratação do cimento incrementa substancialmente a temperatura interna do concreto, que se reduz ao longo do tempo, de acordo com as condições de contorno existentes. O gradiente térmico entre o interior da estrutura e a superfície provoca variações volumétricas não uniformes no concreto, gerando tensões de origem térmica. Quando estas tensões excedem as tensões limites do material, podem originar fissuras que induzirão a estrutura a desencadear um processo de deterioração [Bouzoubaâ et al. (1997)].

Barragens de concreto compactado com rolo (CCR) são barragens à gravidade nas quais o concreto é lançado e compactado por meio de equipamentos pesados usualmente utilizados em serviços de terraplanagem, devendo satisfazer as especificações de projeto do concreto massa convencional. O lançamento é feito em camadas extensas ao longo da seção longitudinal da barragem, e mais finas do que aquelas de concreto convencional. Este tipo de construção combina a menor seção transversal das barragens de concreto com as elevadas velocidades de lançamento das barragens de terra ou enrocamento.

O desenvolvimento desta nova tecnologia é resultante da necessidade de se projetar barragens de concreto que possam ser construídas de forma mais rápida e econômica do que aquelas construídas pelos métodos convencionais. Os requisitos de projeto, entretanto, não são diferentes das barragens convencionais: integridade, estanqueidade, durabilidade. A fissuração de origem térmica pode ser uma das responsáveis pela perda destes requisitos. Conforme salientado por Mehta e Monteiro (1994), a maior dificuldade é o cálculo da distribuição de temperaturas em estruturas de geometria complexa e a incorporação, nas análises térmicas, das etapas do processo construtivo. Um dos desafios do projeto é maximizar a espessura das camadas de lançamento de concreto, sem causar fissuras devido a tensões térmicas e também otimizar o intervalo de tempo entre a execução das camadas.

Durante as fases de construção, a medição e acompanhamento da evolução da temperatura em pontos estratégicos possibilita a comparação com as estimativas efetuadas durante a fase de projeto. Ocorrendo discrepância entre os valores previstos e medidos, que possam vir a causar danos à estrutura, a análise dos resultados permite a definição de medidas mitigadoras e de controles para que a variação térmica não seja prejudicial.

Desde a década de 80, com a conclusão da barragem de Willow Creek, nos Estados Unidos, a primeira grande barragem de concreto compactado com rolo, esta

técnica de projeto e construção tem se desenvolvido rapidamente, sendo empregada na construção de barragens em todos os continentes.

Segundo o levantamento apresentado no World Atlas & Industry Guide (2001), neste ano de 2001, estão em fase de construção vinte e duas barragens com altura superior a 60 m, em concreto compactado com rolo, sendo uma na África, dezesseis na Ásia, uma na Europa, uma na América do Norte e três na América do Sul. Ao todo estão sendo executadas trinta barragens deste tipo com alturas entre 18 m (R'mil, Tunísia) e 188 m (La Miel I, Colômbia), com volumes previstos de até 4.900.000 m<sup>3</sup> de CCR (Barragem de Tha Dan, Tailândia), tendo como finalidades, tanto a geração de energia, como o controle de cheias, irrigação, navegação, abastecimento de água e usos múltiplos.

### 1.3 OBJETIVO DESTE TRABALHO

A determinação exata da evolução de temperaturas em uma estrutura é dificultada principalmente pela complexidade e variabilidade dos fatores envolvidos, tais como propriedades térmicas do material, processo de execução e condições externas (ambientais, por exemplo).

O presente estudo tem por objetivo propor uma sistemática de análise de estruturas executadas por camadas, que permita fornecer a distribuição do campo de temperaturas considerando-se o comportamento térmico decorrente do processo de fabricação ou construção, levando-se em conta a influência térmica de uma camada sobre as demais e sobre a estrutura como um todo.

Foi adotado um tratamento numérico com base no Método dos Elementos Finitos para a avaliação dos problemas ao longo do tempo, ou seja, em regime transiente. O comportamento térmico é analisado desde a execução da primeira camada. Simula-se o lançamento das sucessivas camadas sob a influência das condições externas, bem como dessas com as camadas previamente executadas.

Optou-se por desenvolver a metodologia através de um software comercial, *ANSYS®/Multiphysics* (1994), buscando-se, dentre outros fatores, a otimização das análises tendo-se em vista os recursos disponíveis para a discretização das estruturas e definição de elementos, a capacidade de resolução numérica e a disponibilidade de interfaces gráficas.

Embora a metodologia proposta neste trabalho seja de caráter geral, para qualquer estrutura ou peça executada em camadas, o foco maior está voltado às estruturas de concreto, particularmente barragens de concreto compactado com rolo, cuja tecnologia está sendo largamente utilizada em todo o mundo. Esta metodologia procurou oferecer condições para a otimização de projetos, avaliando-se o comportamento térmico para seqüências de execução de camadas. Permite-se, desse modo, a redução de prazos e custos de execução da obra, mantendo os requisitos de desempenho, segurança e durabilidade.

O desenvolvimento da temperatura em uma estrutura de concreto e sua distribuição dependem, em linhas gerais, dos seguintes fatores: dimensões e geometria da estrutura, propriedades térmicas do concreto, condições de concretagem e condições ambientais. Tendo em vista a finalidade prática dos cálculos térmicos, permite-se que sejam consideradas diversas hipóteses de execução da estrutura, alterando-se as condições de lançamento, tais como a espessura de camadas de concretagem, intervalos de lançamento, temperaturas de lançamento do concreto fresco, condições ambientais e outros fatores.

Os estudos são tratados conforme a seguinte organização:

No Capítulo 2 são particularizadas as considerações sobre barragens executadas em camadas. Apresenta-se um histórico da evolução da tecnologia de barragens de concreto compactado com rolo. São avaliados os efeitos térmicos em barragens, carregamentos externos, internos e sua influência no comportamento das estruturas.

No Capítulo 3 são apresentados os principais fundamentos que regem a transferência de calor, descrevendo-se os três modos básicos que podem atuar na estrutura a ser analisada: condução, convecção e radiação. Apresentam-se as equações governantes da condução de calor e os processos de transferência de calor.

O Capítulo 4 apresenta a formulação básica do Método dos Elementos Finitos aplicada a problemas térmicos, descrevendo-se os procedimentos necessários para a resolução de um problema do Meio Contínuo. A formulação é particularizada para a transferência de calor e a sistemática computacional salienta os recursos disponíveis no programa *ANSYS®/Multiphysics* (versão 5.3).

O Capítulo 5 refere-se à metodologia proposta. São apresentadas considerações sobre a rotina computacional utilizada e a seqüência de análise térmica. Apresentam-se aplicações da metodologia para avaliação da distribuição de temperaturas em blocos de concreto superpostos, na execução de vigas de concreto e em parte da seção da barragem de concreto compactado com rolo de Salto Caxias.

O Capítulo 6 resume, discute e analisa os principais resultados e apresenta as conclusões do trabalho, com sugestões para futuros desenvolvimentos.

## 2 BARRAGENS EXECUTADAS EM CAMADAS

Conforme descrito por Mehta e Monteiro (1984), estruturas de concreto massa são aquelas de grande volume de material, tais como vigas, pilares, estacas de grandes obras, comportas, barragens, etc. que exigem meios especiais para combater a geração de calor e mudança de volume devido à retração com o resfriamento.

Em projetos e construções de barragens de concreto, é reconhecida a importância da elevação da temperatura do concreto devido ao calor de hidratação e à subsequente retração e fissuração que ocorre no resfriamento. A fissuração de origem térmica pode ser uma das responsáveis pelo comprometimento da estanqueidade e estabilidade estrutural da barragem.

Barragens de concreto compactado com rolo (CCR) são barragens à gravidade nas quais o concreto é lançado e compactado por meio de equipamentos pesados usualmente utilizados em serviços de terraplanagem.

A metodologia convencional de construção de barragens de concreto adota normalmente a divisão da estrutura em blocos, com juntas construtivas e de contração transversais e longitudinais, concretados em camadas espessas, da ordem de 2,50 m, lançadas a intervalos de tempo relativamente grandes, de 7 a 15 dias, e adensadas por vibradores de imersão. Utilizando-se a técnica de concreto compactado com rolo, o lançamento é feito em camadas extensas ao longo da seção longitudinal da barragem e com pequena espessura (30 a 100 cm), em intervalos de tempo menores. Este tipo de construção combina a menor seção transversal das barragens de concreto com elevadas velocidades de lançamento das barragens de terra ou enrocamento.

O desenvolvimento desta metodologia é resultante da necessidade de se projetar barragens de concreto que possam ser construídas de forma mais rápida e econômica, em relação àquelas construídas pelos métodos convencionais, mantendo-se os requisitos de projeto como integridade, estanqueidade, durabilidade.

O processo construtivo do CCR oferece duas vantagens básicas com relação ao controle térmico das estruturas:

- ◊ consumo de cimento menor, pela necessidade de se utilizar um concreto sem abatimento;
- ◊ lançamento do concreto em camadas de pouca espessuras.

Estes fatores reduzem o incremento de temperatura na estrutura e a susceptibilidade a fissuração.

## 2.1 HISTÓRICO

O concreto compactado com rolo foi utilizado primeiramente em 1960 no núcleo da ensecadeira da barragem de Shihmen, Taiwan. [Andriolo (1998)].

Em 1964 foi concluída na Lombardia, Itália, a barragem de Alpe Gera, com 174 m de altura e 1.700.000 m<sup>3</sup> de concreto. Também na Itália, na Província de Bolzano, foi construída entre 1962 e 1970 a barragem de Quaira della Miniera, com 83 m de altura e 610.000 m<sup>3</sup> de concreto [Visentini (1995)].

Entre 1974 e 1982, volume superior a 2 milhões de metros cúbicos de concreto compactado com rolo foi empregado na barragem de Tarbela, Paquistão, inicialmente para substituição de uma parede de proteção em enrocamento destruída após o colapso de um túnel durante o primeiro enchimento do reservatório, e, posteriormente, em reparos na bacia de dissipação, ensecadeiras e vertedouro. [Inoue (1990), Andriolo (1998)].

No Japão, os primeiros projetos foram as barragens de Shimajigawa, com 89 m de altura, a primeira barragem do mundo construída sob todos os preceitos do CCR, concluída em 1980 e Ohkawa, iniciada em 1979. A barragem de Myagase foi a primeira construída com altura superior a 150 metros, em 1991.

A viabilidade deste processo construtivo foi confirmada em 1982, com a barragem de Willow Creek no Oregon, Estados Unidos, com 52 m de altura e 330.000 m<sup>3</sup> de concreto, executada em 5 meses.

Em 1986 foi concluída a barragem de Kengkou, primeira em CCR na Província de Fujian, China, com 56,8 m de altura. A barragem de Puding com 75 m de altura, combina os critérios de barragem em arco com a metodologia do concreto compactado com rolo [Chengqian (1995)].

No Brasil, a primeira aplicação do concreto compactado com rolo foi efetuada em 1976 para a construção de piso nas instalações industriais do canteiro de obras da barragem de Itaipu. Em 1976, nesta mesma obra, foram empregados 26.000 m<sup>3</sup> de CCR na construção de uma rampa de acesso para as estruturas de desvio.

A barragem para irrigação de Saco de Nova Olinda, Paraíba, com 56 m de altura, 138.000 m<sup>3</sup> de concreto, concluída em 110 dias em 1986, foi a primeira obra de CCR projetada e construída na América Latina.

Em 1996, foi concluída no rio Jordão, Estado do Paraná, a barragem da Derivação do Rio Jordão, com altura máxima de 95 m e 570.000 m<sup>3</sup> de CCR, a mais alta deste tipo no Brasil. Também foi concluída em 1998 a barragem da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias, com 67 m de altura e 945.000 m<sup>3</sup> de CCR, a de maior volume de CCR do país. Em ambas, foram colocados instrumentos que permitissem o acompanhamento e avaliação de seu comportamento durante construção e ao longo da sua operação.

A tecnologia do concreto compactado com rolo tem sido empregada na construção de barragens ao redor do mundo, tanto em locais com clima ártico como tropical, sujeitos às variações sazonais de temperatura correspondentes. As barragens têm por finalidade a geração de energia, controle de cheias, irrigação, navegação, controle de poluentes, recreação, abastecimento de água, etc., tendo como ponto

comum a busca de um processo de construção simples e contínuo e mais econômico que as construções convencionais.

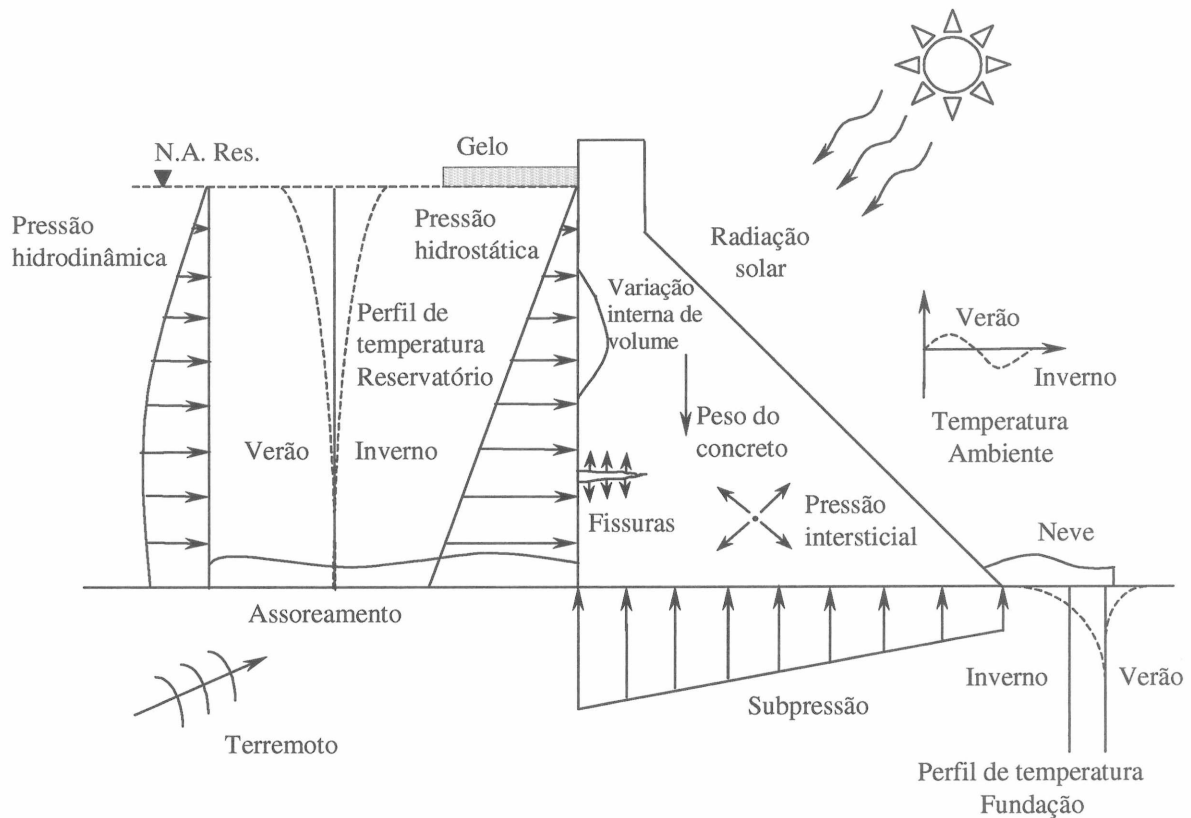
Segundo o levantamento apresentado no World Atlas & Industry Guide (2001), em 2001 estão em construção ao cerca de 30 barragens em concreto compactado com rolo, com alturas entre 18 e 188 m, com volumes previstos de CCR de até 4.900.000 m<sup>3</sup> (Barragem de Tha Dan – Tailândia).

## 2.2 EFEITOS TÉRMICOS EM BARRAGENS

As barragens de concreto a gravidade são estruturas de concreto massa sujeitas a vários fenômenos que causam fissuração. Segundo descrito por Bouzoubaâ et al. (1997), dificilmente se encontram barragens que não estejam afetadas por algum tipo de fissura. A maioria das fissuras mais graves, quando não causadas por efeitos dinâmicos, como terremotos, são decorrentes de efeitos térmicos.

Devem ser considerados os efeitos internos, como calor de hidratação e externos: efeitos da temperatura das fundações, do reservatório, do ar, bem como efeitos da radiação solar. Também deve ser levada em conta a ocorrência de neve e gelo, congelamento da superfície de reservatórios, bem como outros fenômenos que venham a influenciar a resposta térmica do sistema barragem-fundação-reservatório.

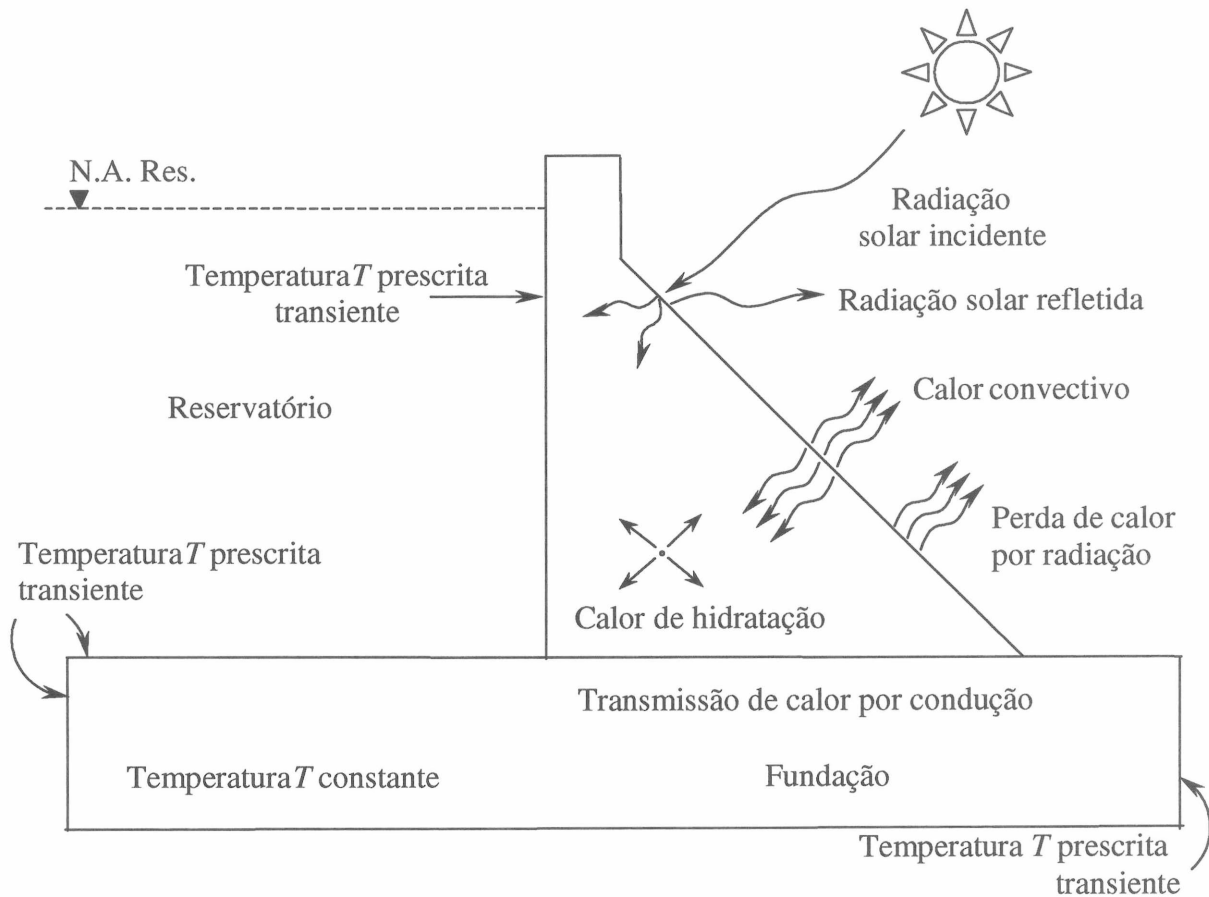
Na Figura 2.1 são indicados os principais carregamentos térmicos, estáticos e dinâmicos, que podem afetar o comportamento de uma barragem de concreto a gravidade convencional ou de concreto compactado com rolo.



**Figura 2.1 – Carregamentos em barragens de concreto - Cargas estáticas, térmicas e dinâmicas [Léger et al. (1993)]**

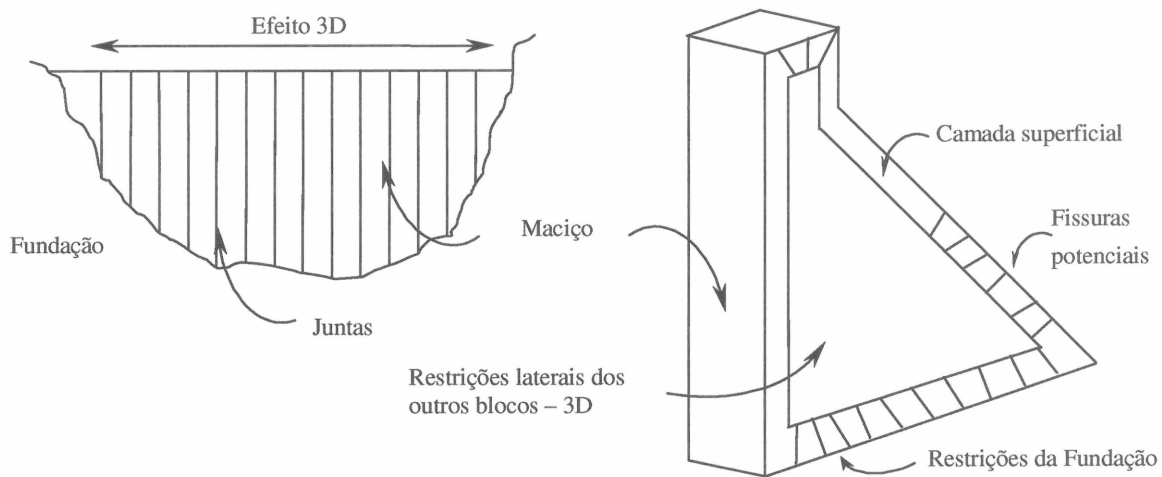
Os modos de transferência de calor e as condições de contorno que podem influenciar o sistema barragem-fundação-reservatório são mostrados na Figura 2.2.

Analisando estruturas de barragem com danos, observa-se a combinação de dois fenômenos: a expansão térmica do concreto na face de jusante e o acréscimo de temperatura devido ao calor de hidratação. Em geral, as fissuras provocadas por retração térmica, observadas nos paramentos de montante ou jusante de uma barragem, são de pequena profundidade. Podem, entretanto, agir como indutoras de novas fissuras através de toda seção transversal, quando ocorre o resfriamento total da estrutura.



**Figura 2.2 – Transferência de calor em barragens de concreto [Léger et al. (1993)]**

As flutuações de temperatura produzem variações volumétricas na barragem. Quando estas variações são restringidas, desenvolvem-se as tensões de origem térmica [Inoue (1990)]. As restrições da variação volumétrica podem ter origem externa e interna. Externamente a estrutura pode ser restringida pela fundação e por estruturas adjacentes, considerando-se os efeitos tridimensionais, como mostrado na Figura 2.3.



**Figura 2.3 – Restrições externas – Barragem-fundação / maciço e blocos isolados [Léger et al. (1993)]**

A restrição interna ocorre quando diferentes áreas do concreto têm variações de temperatura, gradientes térmicos e, portanto, diferentes variações volumétricas. Durante o lançamento e endurecimento do concreto fresco, o calor de hidratação inicialmente eleva a temperatura interna do concreto, que resfria com o passar do tempo. Esta variação térmica provoca uma variação volumétrica no concreto, a qual está relacionada ao gradiente térmico entre o centro da barragem e as superfícies, gerando tensões de origem térmica. As tensões térmicas também podem ser induzidas por variações de temperatura entre camadas de concretagem da estrutura. Quando estas tensões excedem a resistência à tração do concreto, ocorrem as fissuras, que podem levar à conseqüente deterioração da barragem.

As condições climáticas continuam a contribuir por danos nas barragens ao longo da vida útil, mesmo após os efeitos do calor de hidratação terem se dissipado, podendo vir a comprometer a segurança da estrutura.

Em geral, os estudos térmicos realizados no projeto de barragens, consistem nas análises das temperaturas e das subseqüentes tensões e/ou deformações, devidas à contração térmica do concreto durante o período de resfriamento, como resultado da dissipação do calor gerado pela hidratação do concreto.

Estes estudos devem ser efetuados de maneira criteriosa para que possam fornecer subsídios, por exemplo, para o controle de fissuração. Podem refletir diretamente em custos e cronograma de obras, bem como em definições de volume de cimento empregado, alturas de camada de concretagem, intervalos de lançamento entre camadas, bem como na adoção de sistemas de refrigeração do concreto.

Inúmeros são os estudos térmicos que têm sido realizados visando, entre outros, fatores tais como:

- ◊ avaliação da distribuição de temperaturas na estrutura [Nollet (1995); Salet (1995); Bouzoubaâ et al. (1997)];
- ◊ tensões e deformações resultantes na estrutura [Inoue (1990), Léger et al. (1993); Delorme (1995); Yamazumi (1995); Fradkina (1995); Giménez e Fernández (1995); Saetta et al. (1995)];
- ◊ definição do espaçamento apropriado para juntas de contração [Inoue (1990); Hinks (1995); Calvo et al. (1995)];
- ◊ otimização da temperatura de lançamento do concreto [Hinks (1995)];
- ◊ seleção de dosagens de concreto adequadas [Hinks (1995)];
- ◊ altura das camadas e intervalos de lançamento [Yamazumi (1995)];
- ◊ definição das características e propriedades do concreto (zoneamento) da barragem [Fedosov (1995)].

Além dos exemplos citados, diversos estudos têm sido desenvolvidos considerando a reação álcali-agregado do concreto. Trata-se de uma reação deletéria entre componentes do concreto que leva à formação de um precipitado gelatinoso expansivo, conduzindo a deformações excessivas do concreto que podem levar a um quadro de fissuração intenso nas estruturas. Para que ocorra a expansão do concreto há necessidade da existência de um mineral reativo, a disponibilidade de álcalis e a

existência de água intersticial. Como fatores secundários, pode-se listar a temperatura, a porosidade inicial do concreto e as tensões confinantes da estrutura [Silveira (1997)]. A velocidade das expansões do concreto pela reação álcali-agregado depende da temperatura do concreto. Quando os gradientes térmicos induzem tensões de compressão, a expansão causada pela reação química pode ser restringida. Ocorrendo fissuras de origem térmica, as propriedades do concreto são alteradas, podendo afetar a umidade relativa da estrutura e a própria distribuição de temperaturas, catalisando as reações expansivas [Pimenta et al. (1997) e Pappalardo (1998)].

A modelagem térmica por elementos finitos tem sido, portanto, parte de diversas simulações numéricas de barragens afetadas pela reação álcali-agregado, como apresentado em Léger et al. (1995), Lehtola et al. (1997), Pimenta et al. (1997), Pappalardo (1998) e Pauletti et al. (1999).

Na avaliação da segurança estrutural de uma barragem, os estudos térmicos podem ser divididos em duas etapas: cálculo das evoluções de temperaturas do concreto, através de análises estáticas ou transientes, e análises de tensões e/ou deformações térmicas resultantes nas estruturas.

A Figura 2.4 a seguir, ilustra o processo para a avaliação no tempo do campo de temperaturas e tensões em uma estrutura que seja executada por camadas, apresentando de forma sucinta os diversos fatores influentes.

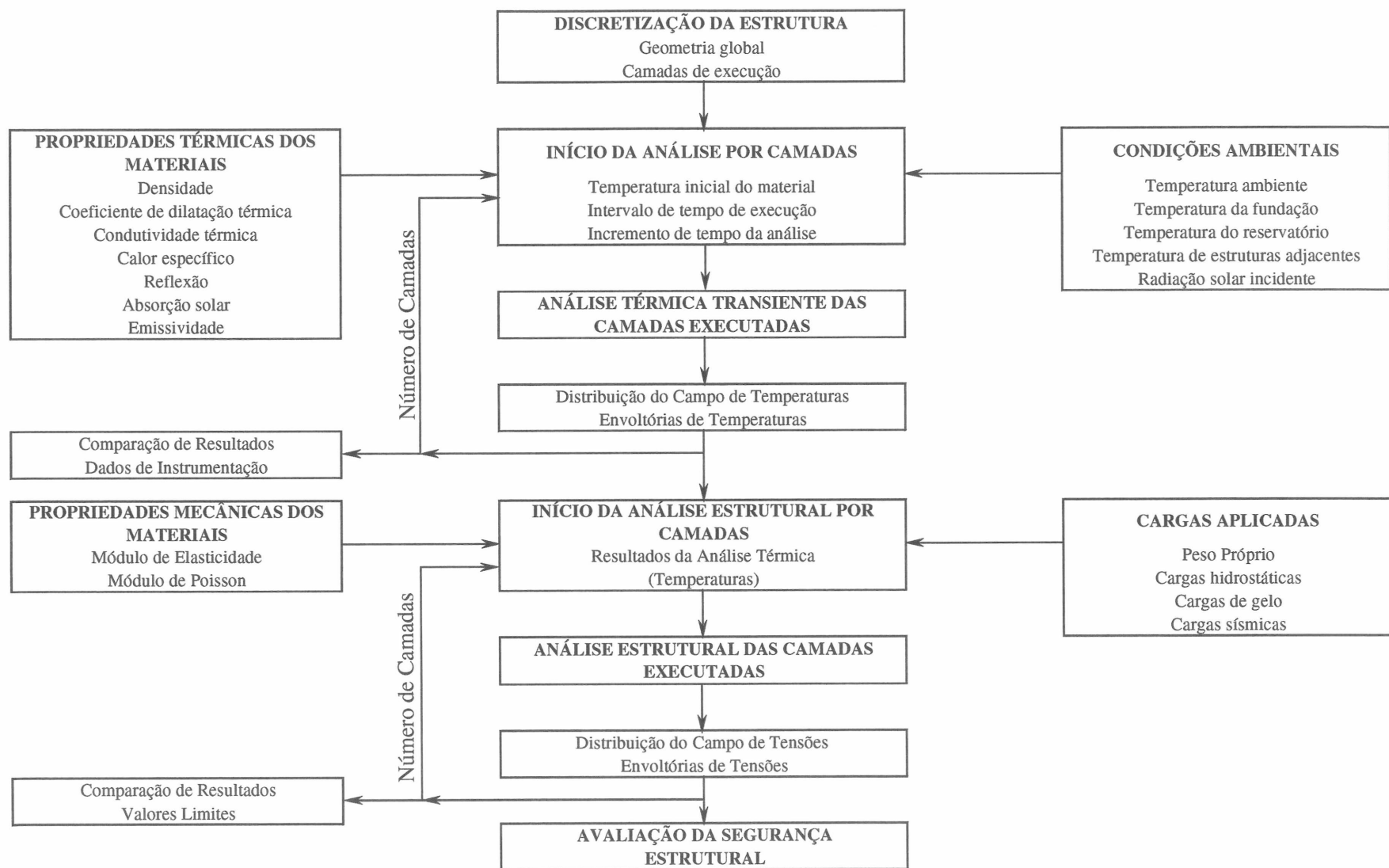


Figura 2.4 – Processo para avaliação da distribuição de temperaturas e tensões em estruturas executadas por camadas

### 2.2.1 Distribuição de temperaturas

Em uma estrutura de concreto massa, a determinação numérica das evoluções de temperatura é extremamente dificultada, principalmente devido à complexidade e variabilidade dos fatores envolvidos, tais como propriedades térmicas do material, que podem variar com a idade e com a temperatura, e condições ambientes, variáveis ao longo do tempo e de difícil previsão.

Considerando-se a finalidade prática dos cálculos térmicos, podem ser efetuadas estimativas da evolução das temperaturas com relativa precisão a partir da simulação de sua execução, camada por camada, desde o início do lançamento do concreto, até a estabilização das temperaturas em cada ponto da estrutura. São usualmente consideradas diversas hipóteses, alterando-se as condições de lançamento, tais como a altura de camadas de concretagem, intervalos de lançamento, temperaturas do concreto fresco, as condições ambientes, tempo de cura, de permanência de formas e demais fatores.

Como citado em Calmon et al. (2000), o desenvolvimento da temperatura em uma estrutura de concreto e sua distribuição, depende, em linhas gerais, dos seguintes fatores:

- ◇ dimensões e geometria da estrutura;
- ◇ propriedades térmicas do concreto: calor de hidratação, condutividade térmica, calor específico, etc.;
- ◇ condições de concretagem: temperatura inicial de concretagem, tipo de forma, proteções, etc.;
- ◇ condições ambientais: temperatura do ar, temperatura das estruturas adjacentes.

Para a realização dos cálculos de temperatura, é necessário o conhecimento de algumas das propriedades do material que, dependendo do método utilizado, pode ser a elevação adiabática de temperatura, a difusividade térmica, a condutividade térmica, o calor específico e a massa específica. Nas fases iniciais de projeto, quando normalmente não são ainda disponíveis resultados de ensaios de laboratório, essas propriedades podem ser estimadas com base nas características de materiais semelhantes.

Andrade (1997) sugere que a fixação definitiva das condições de lançamento do concreto e a definição final de eventuais medidas especiais para controle de fissuração térmica, sejam baseadas em estudos térmicos realizados com o emprego das propriedades reais do concreto, determinadas em ensaios de laboratório.

Uma das propriedades mais importantes para o cálculo térmico em uma estrutura é a elevação adiabática da temperatura do concreto, uma vez que está relacionada com a quantidade de calor gerada pelo concreto. É uma função da quantidade, composição e finura do cimento utilizado e da sua temperatura durante a hidratação.

Quando não se dispõe de resultados de ensaios em laboratório, pode-se estimar a curva de elevação adiabática, a partir de resultados de ensaios em outras dosagens de concreto, com a utilização de materiais iguais ou similares aos que serão utilizados. Andrade (1997) apresenta três metodologias para esta estimativa, cuja escolha deve ser criteriosa. No primeiro método, correlaciona-se a elevação adiabática unitária em dada idade obtida para outra dosagem ensaiada e o consumo equivalente de cimento. O segundo método correlaciona o calor específico e a massa específica do concreto já ensaiado. No terceiro método, a estimativa é efetuada a partir do calor de hidratação dos aglomerantes empregados, considerando-se o seu consumo na dosagem, o calor específico e a massa específica do concreto. A curva de elevação adiabática do concreto deve ser estimada até uma idade em que a geração de calor já tenha se estabilizado ou esteja próximo desta situação.

Outra propriedade importante do concreto para os estudos térmicos é a difusividade térmica, que se correlaciona com a velocidade com que ocorrem as trocas de calor através do concreto. Quanto maior a difusividade térmica, mais facilmente o calor mover-se-á através do concreto. Pode ser determinada através de ensaios em laboratório ou indiretamente através da relação entre a condutividade do material, seu calor específico e massa específica.

A condutividade térmica fornece o fluxo de calor transmitido através de uma área unitária de material, sob um gradiente de temperatura unitário. É influenciada pelas características mineralógicas do agregado e pelo conteúdo de umidade, massa específica e temperatura do concreto.

O calor específico é definido como a quantidade de calor necessária para elevar em um grau a temperatura de uma unidade de massa de um material. Segundo Inoue (1983), é uma das propriedades que influencia a capacidade de armazenamento de calor de um material.

Em estudos térmicos preliminares, a condutividade térmica e o calor específico do concreto podem ser estimados preliminarmente, com base na mineralogia dos agregados e na proporcionalidade das dosagens dos materiais.

O coeficiente de dilatação térmica é definido como a variação na unidade de comprimento por grau de temperatura. A deformação de uma estrutura por contração térmica é determinada tanto pela magnitude da queda de temperatura quanto pelo coeficiente linear de dilatação térmica do concreto, sendo este controlado principalmente pelo coeficiente de dilatação térmica do agregado [Inoue (1983), Andrade (1997)].

Além das propriedades do concreto, os estudos térmicos devem considerar a influência das temperaturas ambientes locais nas temperaturas do concreto fresco das estruturas, nas trocas de calor entre o concreto e o meio externo e na temperatura final do concreto.

A temperatura ambiente, além das possíveis oscilações diárias, varia de acordo com as diferentes estações do ano, bem como com as condições climáticas, tendo normalmente comportamentos cíclicos. Devido à dificuldade da consideração de todas as variações da temperatura ambiente, podem ser empregados valores médios para o período de análise. A adoção destes valores dependerá do tipo de estrutura a ser analisada, do período mais crítico da análise, se nas idades menores ou maiores do concreto, bem como das dimensões das estruturas, se de grandes dimensões ou esbeltas, e ainda se as análises serão de pontos no seu núcleo ou superficiais.

### **2.2.2 Métodos de cálculo da distribuição de temperaturas**

Há diversos métodos para a avaliação da variação de temperaturas no interior de estruturas, tais como o Método das Diferenças Finitas – MDF, o Método dos Elementos de Contorno – MEC e o Método dos Elementos Finitos – MEF. A complexidade geométrica das estruturas, bem como a variabilidade dos diversos fatores que influenciam a distribuição de temperaturas levam à necessidade de serem empregadas ferramentas numéricas para a solução de diversos problemas. Os processos são usualmente computacionais por requererem um grande volume de cálculo, de forma a simular as condições de lançamento e intervalos de tempo de análise.

Através da adoção de hipóteses simplificadoras, alguns processos de cálculo podem ser efetuados manualmente, porém ainda de forma trabalhosa. Simplificações adotadas na reprodução das condições de troca de calor através da superfície das estruturas podem tornar estes processos mais limitados e imprecisos.

Andrade (1997) apresenta os métodos de Schmidt e de Carlson, nos quais a estrutura é dividida em pequenos elementos de volume, calculando-se as temperaturas em cada elemento para diferentes intervalos de tempo. Nestes casos, a precisão dos resultados varia com as dimensões estabelecidas para os elementos de volume e os intervalos de tempo.

### 2.2.2.1 Método de Schmidt

O Método de Schmidt é desenvolvido a partir da equação de Fourier em termos de diferenças finitas. A estrutura é dividida em elementos de volume, determinando-se a temperatura de cada elemento após um intervalo de tempo como sendo a média aritmética das temperaturas dos elementos de volume adjacentes antes do intervalo de tempo, acrescida da elevação adiabática de temperatura do elemento considerado, durante o intervalo de tempo.

Para análises de fluxos unidirecionais, os cálculos podem ser efetuados por processo tabular, repetindo-se o equacionamento para os diferentes elementos de volume e intervalos de tempo. Esta análise pode ser efetuada para avaliar pontos no interior de estruturas de grandes dimensões, nas quais o fluxo de calor se propaga em uma direção predominante. Nos demais casos deve ser considerado fluxo bidirecional, sendo mais conveniente o emprego de outros métodos mais precisos, a serem abordados na seqüência. A avaliação tridimensional, apesar de refletir mais precisamente as condições de calor, não é usualmente utilizada devido aos resultados satisfatórios obtidos com a análise bidirecional.

### 2.2.2.2 Método de Carlson

Semelhante ao Método de Schmidt para o cálculo de problemas de fluxo unidirecional, o Método de Carlson considera um corpo sólido formado por diversos prismas independentes, com dimensão suficientemente pequena na direção do fluxo e área unitária na seção perpendicular à direção do fluxo. A dimensão ao longo do fluxo deve ser tal que se possa admitir que a temperatura no centro de cada prisma seja a temperatura média do mesmo e que o calor desenvolvido durante o intervalo de tempo considerado seja constante, sendo linear a variação de temperatura nesse intervalo de tempo.

Os cálculos das temperaturas podem ser efetuados por processo tabular ou computacional, resolvendo-se repetidamente o equacionamento proposto no método, para diversos intervalos de tempo.

### 2.2.2.3 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos – MEF, permite uma eficiente representação da distribuição de temperaturas em estruturas com geometria e condições de contorno complexas e com diversos materiais, bem como o acoplamento da análise de tensões resultantes.

Tem-se mostrado uma poderosa ferramenta nas análises de transferência de calor e de tensões, minimizando os esforços computacionais requeridos ao longo das modelagens. Permite simular com boa aproximação as trocas de calor através das superfícies das estruturas, representando o seu estado térmico e considerando fluxos de calor em uma, duas ou três direções, em estruturas de pequenas e grandes dimensões.

Em um grande número de barragens executadas com concreto compactado com rolo, as análises térmicas têm sido tratadas numericamente pelo Método dos Elementos Finitos. Quanto mais alta for a barragem, mais significativas são as tensões de tração na direção transversal, devido às maiores restrições existentes. Estas tensões podem gerar fissuras no sentido vertical, paralelas ao eixo longitudinal da barragem, com sérias implicações na estabilidade estrutural. Portanto, o projeto de barragens de CCR de grandes dimensões requer análises térmicas completas, de modo a avaliar a possível ocorrência de fissuras longitudinais, determinando o espaçamento econômico de juntas transversais [Andriolo (1998)].

A estrutura a ser analisada deve ser discretizada através de uma malha de elementos finitos. A malha deve representar realisticamente a geometria da estrutura em si, contemplando diferentes alturas de camada de concretagem a serem estudadas, fundações e estruturas adjacentes, permitindo a diferenciação dos materiais envolvidos

nas trocas de calor. Para as hipóteses a serem analisadas, devem ser estabelecidas as condições de transferência de calor no contorno da estrutura através da fixação de temperaturas e coeficientes de transferência superficial de calor. Esses coeficientes devem representar com a maior fidelidade possível, as condições de troca de calor envolvidas.

A fundação deve ser considerada na malha de elementos finitos em uma extensão tal que não afete a precisão dos cálculos de temperatura e nem aumente desnecessariamente a quantidade de cálculos e tempo de processamento.

Devem ser consideradas as condições de troca de calor entre o concreto e o meio ambiente, podendo envolver diferentes tipos e tempos de remoção de forma e cura, bem como sistemas de pós-refrigeração do concreto por meio de circulação de água através de tubos embutidos na estrutura [Wilson, (1968)].

#### 2.2.2.4 Método Inverso

O Método Inverso consiste em uma técnica desenvolvida para determinação de dados, parâmetros ou esforços em uma estrutura ou parte dela, a partir de valores de medições efetuadas por instrumentação pertinente.

Este método tem sido empregado em diversos problemas de condução de calor nos quais, por exemplo, a definição direta das condições de contorno ou a determinação das propriedades térmicas e físicas do meio são impraticáveis. Dentre as aplicações efetuadas pode-se incluir a previsão do fluxo de calor na superfície de um corpo em regime permanente ou transitório, das variações nas propriedades dos materiais e na geração interna de calor.

Podem ser empregadas diversas técnicas de resolução destes problemas, como citado em Nguyen e Prystay (1999), incluindo-se o Método Gradiente Conjugado, aplicado pelo autor na determinação da distribuição de temperatura no fluxo de polímeros em processos de extrusão e moldagens por injeção.

Prud'homme e Nguyen (1999) apresentam a utilização desta técnica em problemas relativos à determinação do fluxo de calor transiente aplicado em um ponto de um sólido, ao longo de um intervalo de tempo, a partir de valores de temperatura resultantes de medições de instrumentos instalados.

Em Khatchaturian et al. (1999), a aplicação do Método Inverso é efetuada para a determinação de cargas atuantes em uma estrutura a partir de valores de deformações horizontais e verticais obtidos através de sensores instalados na estrutura.

Conforme descrito no decorrer deste capítulo, a determinação numérica da evolução da temperatura e conseqüentes esforços em uma estrutura de concreto é extremamente dificultada pela complexidade e variabilidade dos fatores intervenientes, como as propriedades dos materiais e condições de execução. A partir de dados de instrumentos instalados em uma estrutura de concreto, tais como termômetros, o Método Inverso pode ser uma ferramenta adequada para a verificação de tensões e deformações resultantes. Uma importante aplicação poderia ser efetuada no caso da barragem da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias (tratado no presente estudo), utilizando-se para a determinação dos esforços resultantes, os dados obtidos a partir da instrumentação instalada.

Técnicas de Redes Neurais têm sido apresentadas para a análise inversa de parâmetros característicos do comportamento do concreto. Fairbairn et al. (1999a) apresenta esta técnica para retroanálise do comportamento elástico e viscoelástico do concreto da barragem de Funil, no Rio Paraíba, Rio de Janeiro.

Para modelagem da fissuração do concreto, Fairbairn et al. (1999b) apresenta a implementação de um modelo aplicando a teoria dos acoplamentos termo-químico-mecânicos, baseado no Método dos Elementos Finitos.

### 3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Entende-se por transferência de calor a transmissão de energia de uma região para outra, resultante de uma diferença de temperatura entre elas, [Kreith (1977), Özisik (1979), Bejan (1984), Incropera e Dewitt (1990, 1996), Bejan (1996) e Lewis et al. (1996)].

Para se analisar problemas de transferência de calor, devem ser consideradas as leis que governam os vários mecanismos envolvidos, levando-se em conta três modos básicos de transferência: condução, convecção e radiação.

A condução e a radiação são mecanismos que dependem essencialmente da existência de uma diferença de temperatura. A convecção, além da temperatura, depende também do transporte de massa.

A distribuição de temperaturas em um meio pode ser resultado do efeito combinado dos três modos de transferência de calor, de tal forma que não se pode isolar totalmente um dos outros. Em análises simplificadas é possível considerar somente o efeito dominante, tendo-se em mente que mudanças nas condições externas podem exigir que sejam avaliados os modos desprezados.

A seguir, para melhor entendimento do assunto, serão apresentados os modos de transferência de calor.

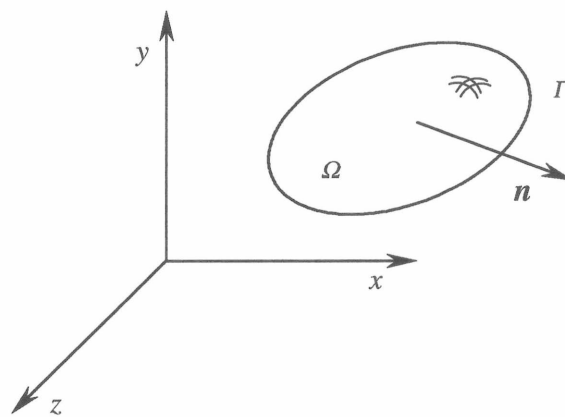
#### 3.1 CONDUÇÃO

Conforme descrito em Kreith (1977), Özisik (1979), Incropera e Dewitt (1990, 1996), Bejan (1996) e Lewis et al. (1996), a condução é o processo pelo qual o calor flui de uma região de temperatura mais alta para outra de temperatura mais baixa, dentro de um meio sólido, líquido ou gasoso, ou entre meios diferentes em contato físico direto. A energia é transmitida por meio do movimento cinético, pelo impacto

direto das moléculas (fluidos) ou por difusão de elétrons de movimento rápido das regiões de alta para as de baixa temperatura, como nos metais.

### 3.1.1 Equações governantes

A equação que governa a condução de calor em um meio contínuo foi proposta pelo francês J. B. J. Fourier, em 1822 [Kreith (1977) e Bejan (1996)] e pode ser estabelecida aplicando-se o princípio da conservação de energia sobre o volume  $\Omega$  do contínuo, limitado pelo contorno  $\Gamma$ , com vetor normal unitário  $\mathbf{n}$ , conforme mostrado na Figura 3.1.

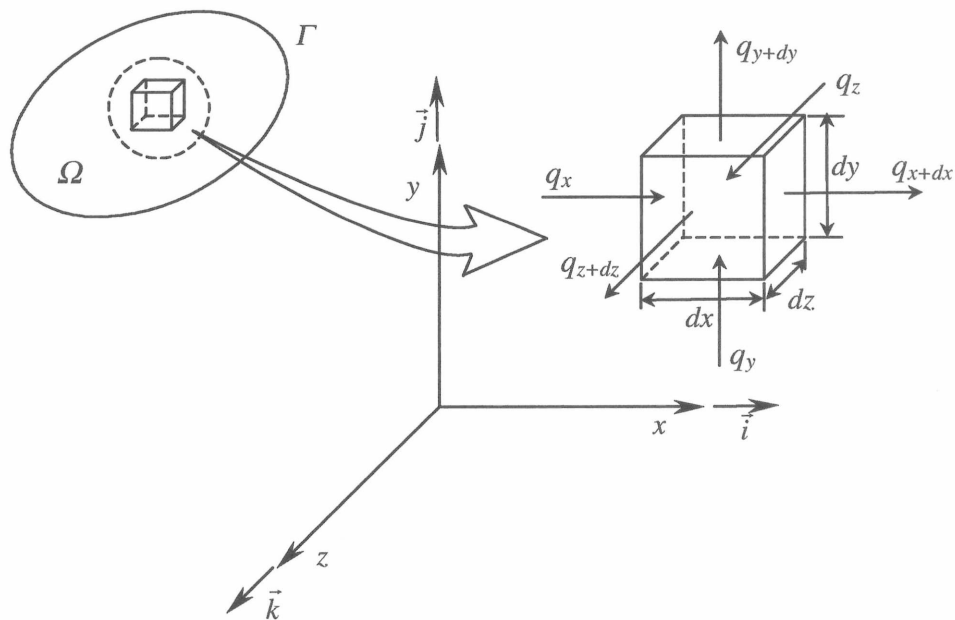


**Figura 3.1 – Domínio e contorno sujeitos à condução de calor**

Adotando-se o princípio da conservação de energia pode-se escrever que a taxa de variação do calor em  $\Omega$  é igual ao fluxo de calor de  $\Omega$  através de  $\Gamma$  mais a taxa de geração de calor interno a  $\Omega$  [Lewis et al. (1996), Mehta e Monteiro (1994) e Huebner et al. (1995)].

Considere-se um paralelepípedo infinitesimal do contínuo com lados  $dx$ ,  $dy$  e  $dz$ , paralelos respectivamente aos eixos coordenados cartesianos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , conforme mostrado na Figura 3.2 [Kreith (1977), Özisik (1979), Incropera e Dewitt (1990, 1996) e Bejan (1996)].

Supondo-se um campo de temperaturas  $T = T(x, y, z, t)$ , haverá uma variação de temperatura entre duas faces paralelas do elemento, e a transferência de calor ocorrerá através das superfícies do paralelepípedo. A quantidade de energia transferida para o meio por unidade de tempo pode ser obtida com base na Lei de Condução de Calor. Expressando-se a taxa de transferência de calor (fluxo de calor) por unidade de área, através das componentes perpendiculares às superfícies em  $x$ ,  $y$  e  $z$  do elemento, tem-se (Lei de Fourier):



**Figura 3.2 – Paralelepípedo infinitesimal do contínuo em coordenadas cartesianas – Balanço de energia**

$$\vec{q}'' = \vec{i}q_x'' + \vec{j}q_y'' + \vec{k}q_z'' \quad (3.1.1)$$

$$q_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.1.2)$$

$$q_y'' = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3.1.3)$$

$$q_z'' = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.1.4)$$

sendo:  $q''$  – taxa de transferência de calor (fluxo de calor) por unidade de área

$q_x''$  – taxa de transferência de calor (fluxo de calor) na direção  $x$  por unidade de área

$q_y''$  – taxa de transferência de calor (fluxo de calor) na direção  $y$  por unidade de área

$q_z''$  – taxa de transferência de calor (fluxo de calor) na direção  $z$  por unidade de área

$T$  – temperatura do meio contínuo

$k$  – coeficiente de condutividade térmica do meio contínuo

As taxas de condução de calor através das superfícies do paralelepípedo infinitesimal são os produtos dos fluxos de calor pelas respectivas áreas e podem ser expressas por:

$$q_x = q_x'' dydz = -k \frac{\partial T}{\partial x} dydz \quad (3.1.5)$$

$$q_y = q_y'' dx dz = -k \frac{\partial T}{\partial y} dx dz \quad (3.1.6)$$

$$q_z = q_z'' dx dy = -k \frac{\partial T}{\partial z} dx dy \quad (3.1.7)$$

onde:  $q_x, q_y, q_z$  – componentes do fluxo de calor normais às superfícies  $x, y, z$

O sinal negativo aparece como consequência da transferência de calor ser positiva sempre no sentido decrescente das temperaturas (segunda lei da termodinâmica) ou seja, o gradiente de temperatura é negativo na direção do fluxo de calor positivo.

O calor transmitido para fora do elemento pode ser escrito em uma expansão de primeira ordem de Fourier como sendo:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx = \left[ \left( -k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( -k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dy dz \quad (3.1.8)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy = \left[ \left( -k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy \right] dx dz \quad (3.1.9)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz = \left[ \left( -k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz \right] dx dy \quad (3.1.10)$$

A energia interna pode ser expressa como:

$$Q dx dy dz \quad (3.1.11)$$

sendo:  $Q$  – taxa de geração de calor interno (energia interna) por unidade de volume

A taxa de variação de calor no meio ao longo do tempo será:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} dx dy dz \quad (3.1.12)$$

sendo:  $u$  – energia específica interna do meio contínuo

$\rho$  – massa específica do meio contínuo

O calor específico do meio contínuo  $c$ , pode ser definido como a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura em uma unidade de massa de um certo material sólido em um grau:

$$c = \frac{du}{dT} \quad (3.1.13)$$

onde:  $c$  – calor específico do meio contínuo

Assim, tem-se que a taxa de variação de calor no elemento pode ser escrita como:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (3.1.14)$$

sendo:  $\rho c \frac{\partial T}{\partial t}$  – taxa de variação com o tempo da energia térmica interna do meio por unidade de volume

Aplicando-se ao paralelepípedo infinitesimal o princípio da conservação da energia tem-se que o calor que entra mais o calor gerado, menos o calor que sai, é igual à variação de calor no elemento.

$$(q_x + q_y + q_z) + Q dx dy dz - (q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz}) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (3.1.15)$$

Assim, compondo-se as equações (3.1.5) a (3.1.11) e (3.1.14) resulta que:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + Q dx dy dz = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (3.1.16)$$

Algumas situações particulares merecem destaque. Por exemplo, a equação da condução de calor para um meio anisotrópico, no qual a condutividade depende da direção  $k = k(x, y, z)$ , em um sistema não-estacionário, pode ser expressa como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1.17)$$

A difusividade térmica do meio,  $\alpha$ , é dada por:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (3.1.18)$$

Para um material no qual a condutividade  $k$  e a capacidade de calor específico  $\rho c$  sejam constantes, e o calor de geração independa do tempo, a equação do fluxo de condução de calor pode ser escrita como:

$$\nabla^2 T + \frac{Q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1.19)$$

onde  $\nabla^2$  é o operador Laplaciano, expresso em coordenadas Cartesianas como:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3.1.20)$$

Quando as propriedades térmicas são constantes ao longo do tempo e não há geração de calor no sistema, a equação (3.1.19) pode ser reduzida à equação de difusão:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1.21)$$

Com as propriedades térmicas constantes e regime permanente de condução de calor tem-se a equação de Poisson:

$$\nabla^2 T + \frac{Q}{k} = 0 \quad (3.1.22)$$

Para um sistema em regime permanente, com propriedades térmicas constantes e ausência de geração de calor, a equação fundamental da condução de calor pode ser simplificada para a equação de Laplace:

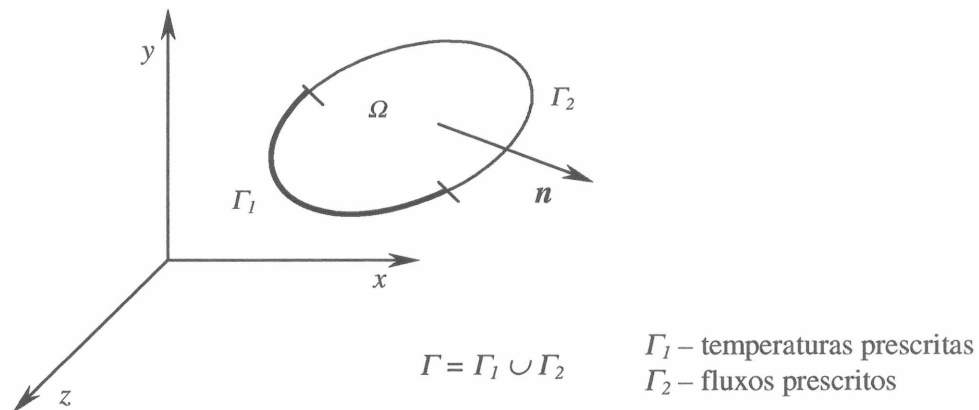
$$\nabla^2 T = 0 \quad (3.1.23)$$

### 3.1.2 Condições iniciais e de contorno

Para a determinação de solução única para a equação diferencial de Fourier, devem ser definidas as condições iniciais e condições de contorno adequadas, compatíveis com o problema físico a ser analisado.

As condições iniciais consistem em temperaturas aplicadas no meio contínuo no instante inicial. As condições de contorno podem ser de diferentes formas, lineares ou não-lineares, especificadas ao longo de todo o contorno do meio contínuo [Saetta et al. (1995), Huebner et al. (1995), Lewis et al. (1996)].

Seja o domínio arbitrário  $\Omega$ , limitado pela superfície de contorno  $\Gamma$ , sobre o qual se aplica a solução da equação de condução de calor. O contorno  $\Gamma$  pode estar sujeito a diferentes condições de contorno. Considere, por exemplo, que em uma porção  $\Gamma_1$ , hajam temperaturas prescritas e na porção  $\Gamma_2$ , os fluxos de calor sejam prescritos, tais que  $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$ , como mostrado na Figura 3.3.



**Figura 3.3 – Domínio  $\Omega$  sujeito às condições de contorno  $\Gamma_1$  e  $\Gamma_2$**

Para problemas que independem do tempo (regime permanente), a solução será única, desde que especificadas as condições de contorno apropriadas. Para a equação de condução de calor em regime permanente, uma condição deve ser determinada em cada ponto da superfície de contorno  $\Gamma$ .

As condições iniciais devem ser definidas considerando-se a distribuição da temperatura prescrita através do corpo, no tempo zero, como uma função de  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

$$T(x_i, t = 0) = T_0(x_i) \text{ em } t = 0 \quad (3.1.24)$$

onde:  $T$  – temperatura prescrita nas coordenadas  $x_i$  e tempo  $t$ .

A temperatura prescrita em uma porção do contorno do corpo é especificada como uma constante ou uma função das coordenadas e do tempo. Conhecida por condição de contorno essencial ou de Dirichlet, pode ser escrita como:

$$T(x_i, t) = f_{\Gamma}(x_i, t) \text{ em } x_i \in \Gamma_1 \quad (3.1.25)$$

Sendo:  $\Gamma_1$  – contorno analisado

$f_{\Gamma}$  – função conhecida de coordenadas  $x_i$  e tempo  $t$

A taxa de fluxo de calor ao longo de uma superfície é especificada como uma constante ou como uma função das coordenadas da superfície e do tempo. O fluxo de calor prescrito é um exemplo de uma condição de contorno de Neumann.

Para um corpo isotrópico, aplicando-se a lei de Fourier, o fluxo de calor por unidade de área pode ser escrito como abaixo:

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial n} = q''_c + q''_{rs} \text{ em } x_i \in \Gamma_2 \quad (3.1.26)$$

sendo:  $\frac{\partial T}{\partial n}$  – derivada direcional da temperatura na direção de  $\mathbf{n}$

$\mathbf{n}$  – vetor unitário normal

$q''_c$  – fluxo de calor convectivo por unidade de área

$q''_{rs}$  – fluxo de calor radiativo por unidade de área

O fluxo de calor convectivo entre a superfície e o meio ambiente depende da diferença de temperatura entre o ar e a superfície da estrutura e pode ser expresso pela Lei de Convecção de Newton [Saetta et al. (1995)]:

$$q''_c = h_c(T_e - T) \text{ em } x_i \in \Gamma_2 \quad (3.1.27)$$

sendo:  $h_c$  – coeficiente convectivo, coeficiente de transferência de calor

$T_e$  – temperatura externa

$T$  – temperatura da superfície do corpo

O coeficiente convectivo ou de filme, depende das características intrínsecas do meio ambiente, fluido e da superfície, bem como da velocidade do fluido, uma vez que a quantidade de calor transferida da superfície por efeitos convectivos é diretamente proporcional à velocidade própria do fluido que está em contato.

A quantidade de calor causada pela radiação solar direta ou difusa pode ser escrito como:

$$q''_{rs} = \sigma \varepsilon T^4 - \alpha \cdot H_i \quad (3.1.28)$$

Sendo:  $\sigma$  – constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67051 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

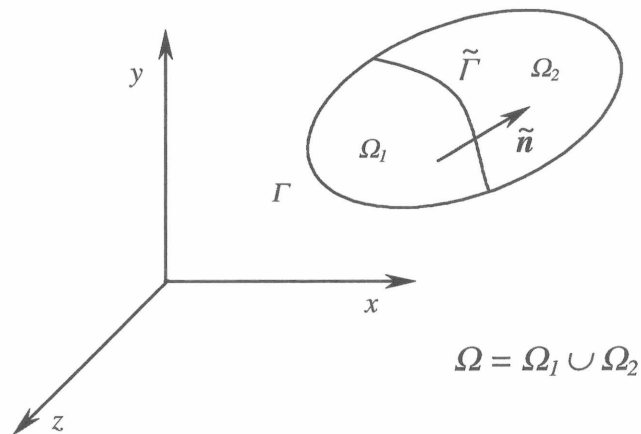
$\varepsilon$  – emissividade da superfície

$\alpha$  – absorvidade da superfície

$H_i$  – radiação solar direta

### 3.1.3 Interface entre dois ou mais materiais

Quando o domínio  $\Omega$  é composto de dois ou mais materiais, como mostrado na Figura 3.4, deve-se aplicar a continuidade das condições de contorno de temperatura e fluxo de calor ao longo da interface entre os materiais, para se garantir que a solução do problema seja única.



**Figura 3.4 – Domínio e interface entre dois materiais**

Considerando-se  $\tilde{\Gamma}$  a interface entre os dois materiais designados por  $\Omega_1$  e  $\Omega_2$ , com o vetor normal unitário  $\tilde{n}$  direcionado de uma região para outra, as condições de contorno podem ser escritas como:

$$T_1(x_i, t) = T_2(x_i, t) \text{ em } x_i \in \tilde{\Gamma} \quad (3.1.29)$$

$$\left( k \frac{\partial T}{\partial \tilde{n}} \right)_1 = \left( k \frac{\partial T}{\partial \tilde{n}} \right)_2 \text{ em } x_i \in \tilde{\Gamma} \quad (3.1.30)$$

## 3.2 CONVECÇÃO

A convecção é o processo de transporte de energia pela ação combinada da condução de calor, armazenamento de energia e movimento de massa. Funciona como mecanismo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um líquido ou um gás [Kreith (1977), Özisik (1979), Bejan (1984), Incropera e Dewitt (1990, 1996), Bejan (1996), e Lewis et al. (1996)].

O fenômeno da convecção se dá em etapas. Primeiramente, o calor flui por condução da superfície com temperatura mais elevada para as partículas adjacentes do fluido envolvente. A energia transferida aumenta a temperatura e a energia interna das partículas fluidas (difusão a nível microscópico). As partículas fluidas se movem para a região de menor temperatura do fluido, onde se misturam e transferem parte de sua energia para outras partículas fluidas (movimento a nível macroscópico). O fluxo é, portanto, de fluido e de energia. A energia é armazenada nas partículas fluidas e transportada como resultado do movimento de massa.

Esse mecanismo não depende meramente da diferença de temperatura, não coincidindo estritamente com a definição de transferência de calor. Entretanto, como é um transporte de energia que ocorre na direção do gradiente de temperatura, é também classificado como modo de transferência de calor.

De acordo com o modo de movimentação do fluxo, pode ser classificada como convecção natural e forçada. A convecção é dita natural ou livre quando o movimento é provocado pelas forças de empuxo atuantes no fluxo. A convecção forçada ocorre quando o movimento é induzido por algum agente externo, que pode ser, por exemplo, uma bomba, um ventilador ou um compressor.

### 3.3 RADIAÇÃO

A radiação é o processo pelo qual o calor é transmitido de um corpo com a temperatura elevada a outro de temperatura mais baixa, estando estes separados no espaço, mesmo que exista vácuo entre eles. Na transferência de calor são considerados os fenômenos que resultam da diferença de temperatura e que podem transportar energia através de um meio transparente ou do espaço, chamado calor radiante [Kreith (1977), Özisik (1979), Bejan (1984), Incropera e Dewitt (1990, 1996), e Bejan (1996)].

O movimento da energia radiante é semelhante à propagação de luz e pode ser descrito pela teoria das ondas. Quando as ondas de radiação incidem na superfície de um outro meio, parte é refletida e parte penetra no meio. A radiação que penetra através do meio pode ser parcialmente absorvida e a restante será transmitida pelo meio.

A transferência de calor por radiação torna-se mais significativa à medida que a temperatura do corpo aumenta. A quantidade de energia que deixa a superfície como calor radiante depende da temperatura absoluta e da natureza da superfície. Em problemas da engenharia que envolvem temperaturas próximas da atmosférica, o aquecimento radiante freqüentemente pode ser desprezado, não sendo considerado no presente trabalho.

Um irradiador ideal ou corpo negro, segundo Kreith (1977), é um corpo que emite e absorve, a qualquer temperatura, a máxima quantidade possível de radiação em qualquer comprimento de onda sem que ocorra a reflexão. Este é um conceito teórico, que define o padrão com o qual as características de radiação de outros meios são comparadas.

A energia radiante emitida por um corpo negro com temperatura acima do zero absoluto é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta, sendo dada por:

$$q_{rs} = \sigma A_1 T_1^4 \quad (3.3.1)$$

onde:  $A_f$  – área da superfície

$\sigma$  – constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67051 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

Os corpos reais não se comportam como irradiadores ideais, emitindo uma radiação inferior a dos corpos negros. São chamados de corpos cinzentos quando emitem, a uma temperatura igual à do corpo negro, uma fração constante da emissão do corpo negro. A taxa líquida de calor transferido por radiação, à temperatura  $T_1$ , para um corpo negro envolvente que esteja a uma temperatura  $T_2$  é:

$$q_r = \sigma A_f \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.3.2)$$

sendo:  $\varepsilon_1$  – emissividade da superfície cinzenta

Em muitos problemas de engenharia, conforme citado por Huebner et al. (1995), a radiação térmica entre superfícies não é substancialmente afetada pelo meio, que pode ser um gás, ar ou o vácuo. Frequentemente, assume-se que este meio não seja interveniente e as superfícies sejam idealizadas como corpos cinzas, emissores e refletores difusos da energia radiante.

Seja um corpo à temperatura  $T$  cercado por superfícies com temperatura uniforme  $T_e$ . O fluxo de calor devido à radiação por unidade de área pode ser dado por:

$$q''_{rs} = \varepsilon \sigma T^4 - \alpha \sigma T_e^4 \quad (3.3.3)$$

sendo:  $\varepsilon$  – emissividade da superfície

$\alpha$  – absorvidade da superfície

Segundo a Lei de Kirchhoff, para dado comprimento de onda, a emissividade e a absorvidade de uma superfície a dada temperatura são iguais:

$$\varepsilon = \alpha \quad (3.3.4)$$

Portanto, o fluxo de calor devido à radiação da superfície de um corpo pode ser expresso como:

$$q''_{rs} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_e^4) \quad (3.3.5)$$

Considerando-se a troca de calor de radiação entre superfícies, tem-se que:

$$q''_{rsi} = \varepsilon_i\sigma T_i^4 - \alpha_i H_i \quad (3.3.6)$$

sendo:  $q''_{rsi}$  – fluxo de calor radiativo em dada superfície  $i$

$H_i$  – radiação incidente na superfície  $i$  por unidade de tempo e área

### 3.4 PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Além dos modos de transferência de calor descritos anteriormente, deve ser considerado o processo como ocorre.

Quando o calor transmitido em um sistema não varia a cada instante, isto é, é constante, a temperatura em cada ponto do sistema também se altera e o regime é considerado permanente. Não há variação na energia interna.

O fluxo de calor em um sistema é considerado transitório ou não permanente quando a temperatura em vários pontos do sistema varia com o tempo, provocando uma alteração na energia interna. Ocorre, por exemplo, durante o período de aquecimento de fornalhas e caldeiras.

A transferência de calor periódica ou de regime quase permanente ocorre quando um sistema é submetido a variações cíclicas de temperatura. A temperatura de um ponto do sistema retorna periodicamente ao mesmo valor, com variações periódicas do calor transmitido e da energia armazenada por unidade de tempo. É o caso da variação da temperatura de um edifício durante períodos de vinte e quatro horas.

No presente estudo são consideradas as análises essencialmente transitórias, avaliando-se a variação térmica de estruturas que são executadas por camadas, que

podem estar sujeitas, de acordo com o comportamento do material, à geração interna de calor (no caso o concreto) e a transferência de calor.

Nestas estruturas construídas por etapas, cada camada possui uma temperatura inicial, intrínseca ao material. O processo de aquecimento é iniciado pela geração interna de calor e simultaneamente pela transferência de calor através das superfícies, conforme as condições de contorno estabelecidas. Na execução de uma nova camada, superpõe-se ao comportamento desta a interferência entre as camadas anteriores, que compõem o novo sistema, igualmente com geração interna e transferência de calor.

## 4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Quando um meio contínuo sofre diferentes níveis de temperatura é conveniente, e muitas vezes necessária, a análise da transferência de calor, determinando-se, usualmente, a distribuição de temperaturas no material, taxas de fluxo de calor e demais esforços que possam advir deste princípio.

Soluções analíticas são expressões matemáticas que fornecem os valores da variável de interesse em qualquer ponto de um meio contínuo. Em diversos problemas de engenharia, incluindo-se os de transferência de calor, soluções analíticas exatas somente podem ser obtidas em alguns casos simples com relação à geometria, propriedades dos materiais e condições de contorno. Para a resolução de problemas complexos, recorre-se a métodos numéricos que fornecem soluções aproximadas mas muitas vezes aceitáveis. Na maioria dos métodos numéricos, o campo das soluções aproxima os valores das variáveis de interesse somente em um número discreto de pontos do corpo. Este é o princípio que norteou a evolução do Método dos Elementos Finitos.

Conforme apresentado por Huebner et al. (1995), as idéias essenciais que originaram o Método dos Elementos Finitos (MEF) foram desenvolvidas tanto por matemáticos, quanto por físicos e engenheiros, visando a resolução de diferentes problemas do meio contínuo em suas respectivas áreas. Esta denominação foi primeiramente utilizada em 1960 por R. W. Clough na aplicação a problemas de elasticidade plana na engenharia aeronáutica. A partir de então, os engenheiros começaram a reconhecer a eficácia do método, estendendo sua aplicação aos problemas do meio contínuo descritos através da formulação variacional.

Um maior desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos ocorreu com o advento e evolução dos computadores [Zienkiewicz (1971)]. Embora originalmente direcionado a análises estruturais, devido à generalidade da teoria na qual está baseado, são possíveis suas aplicações em inúmeros campos da engenharia. Este

método apresenta flexibilidade para modelagens de geometrias complexas, permitindo a análise de diferentes tipos de materiais, com propriedades variáveis e representação de condições de contorno que melhor reproduzam o problema.

Em problemas da Mecânica do Contínuo as variáveis de campo (deslocamentos, tensões, pressões, temperatura, etc.) estão associadas a cada ponto genérico do corpo ou região de solução. Sendo o meio contínuo constituído por um número infinito de pontos, o número de incógnitas seria infinito. O processo de discretização por elementos finitos reduz o problema para um número finito de incógnitas, através da divisão do domínio de soluções em elementos, e expressando as variáveis de campo em termos de funções de aproximação em cada elemento. As funções de aproximação, também conhecidas como funções de interpolação, são definidas em pontos específicos chamados nós ou pontos nodais. Os nós fazem a interligação entre os elementos, embora alguns elementos possam ter nós adicionais em seu interior.

Em termos gerais, para a resolução de um problema utilizando-se o Método dos Elementos Finitos, devem ser observados os procedimentos descritos na seqüência.

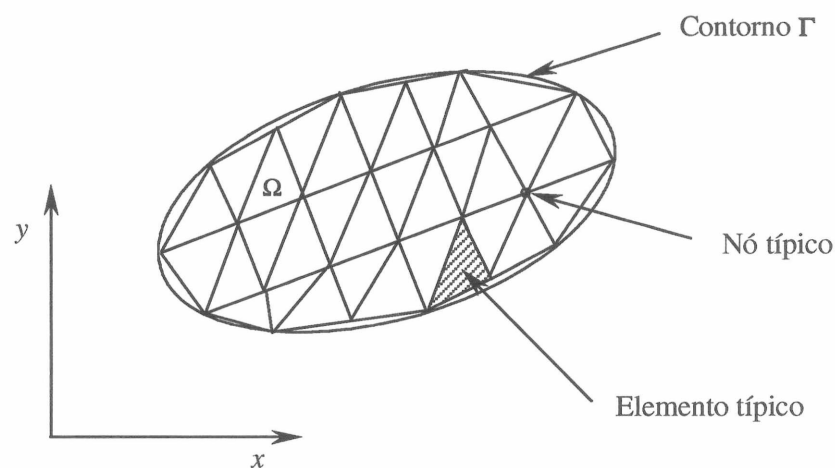
## 4.1 FORMULAÇÃO BÁSICA

### 4.1.1 Discretização do contínuo

A formulação do Método dos Elementos Finitos, conforme descrita, entre outros, por Zienkiewicz (1971), Desai e Abel (1972), Bathe e Wilson (1976), Becker et al. (1981), Cook et al. (1989), Huebner et al. (1995), Bathe (1996), e Lewis et al. (1996), é um processo de análise numérica para obtenção de soluções para diversos problemas da engenharia, através da discretização do contínuo. Tal discretização consiste na divisão do domínio contínuo em um número finito de elementos, interligados por pontos nodais.

Diversos tipos de elementos podem ser utilizados de modo a melhor reproduzir o problema. Os elementos variam em sua forma, número de pontos nodais, número de graus de liberdade e funções de interpolação, sendo possíveis combinações entre eles para um mesmo domínio.

Para análises bi-dimensionais podem ser utilizados elementos finitos triangulares, como exemplificado na Figura 4.1, quadrangulares (retangulares, trapezoidais, etc.) ou curvos. Em análises tridimensionais são comuns os cúbicos, prismáticos, tetraédricos, etc.

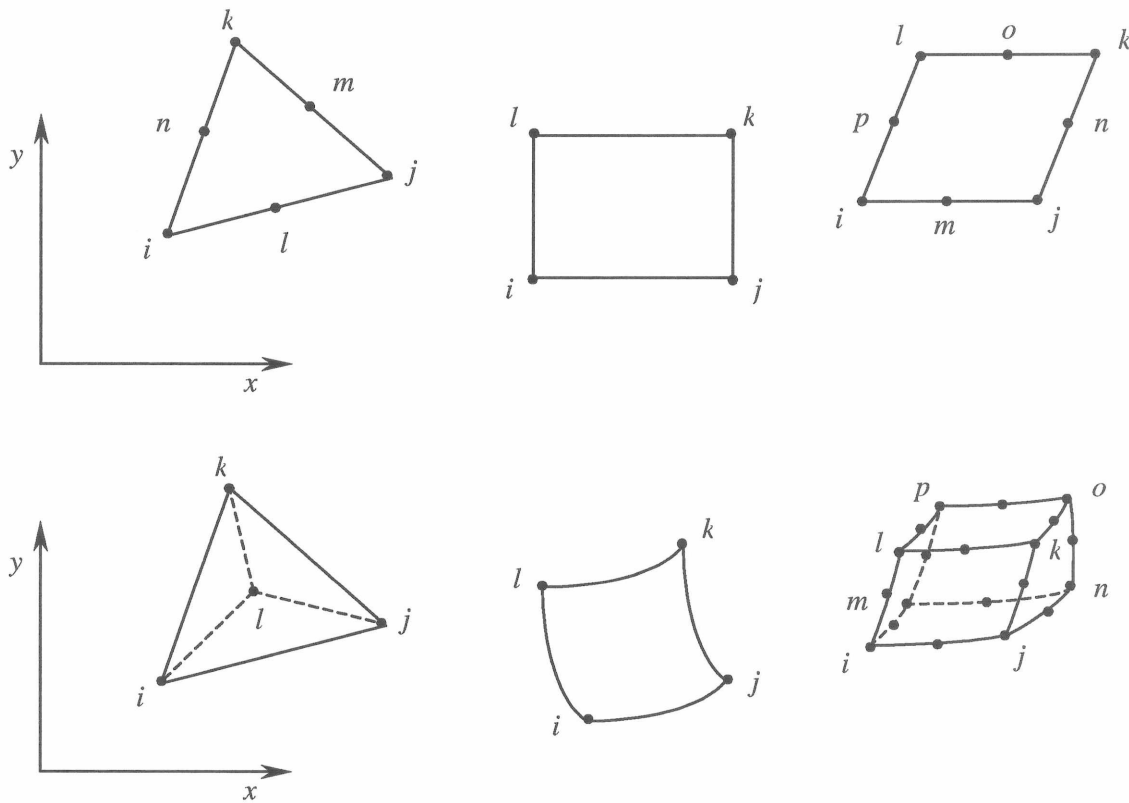


**Figura 4.1 – Representação de uma discretização bidimensional**

Os elementos podem ser lineares, quadráticos ou de ordem superior. Os elementos lineares possuem nós somente nos vértices dos elementos e consideram apenas variações lineares da variável de campo. Os elementos quadráticos possuem nós entre os vértices e admitem variações quadráticas. Nos elementos de ordem superior, são consideradas desde variações quadráticas até as de ordem superior.

Diversas formulações têm sido desenvolvidas para elementos planos, sólidos, de placas e cascas, elementos axissimétricos, isoparamétricos, harmônicos, lineares e quadráticos, visando a resolução de uma série de problemas nas áreas estrutural,

térmica, eletromagnética, fluidos, etc. A Figura 4.2 apresenta alguns exemplos de elementos bidimensionais e tridimensionais.



**Figura 4.2 – Exemplos de elementos bidimensionais e tridimensionais**

A aproximação entre o modelo físico e o matemático será tanto maior quanto maior for o número de nós e elementos definidos. O nível de refinamento deve ser tal que possa fornecer resultados satisfatórios sem esforços computacionais extraordinários que inviabilizem a análise.

Apesar da evolução na automação dos processos de análise, a escolha do tipo e do número de elementos com os quais o meio será subdividido precisa ser feita de forma criteriosa, de modo a se obter a representação mais precisa do fenômeno a ser verificado.

### 4.1.2 Seleção das funções de interpolação

Um dos fatores de maior importância nas análises por elementos finitos conforme apresentado por Cook et al. (1989), Huebner et al. (1995), é a seleção dos elementos e a definição de funções de interpolação apropriadas para cada elemento.

A variável de campo pode ser um escalar, um vetor ou tensor. As funções de interpolação descrevem como a variável de campo pode ser aproximada a partir dos valores nodais do elemento.

Define-se o grau de continuidade  $C^m$  de uma função quando a própria função e as suas derivadas até a ordem  $m$  forem contínuas.

Supondo-se que as funções referentes aos elementos possuam derivadas de ordem  $(m+1)$ , os seguintes critérios devem ser definidos para que haja convergência:

- ◊ critério de compatibilidade: as interfaces dos elementos devem possuir continuidade até a ordem  $m$ , isto é,  $C^m$ ;
- ◊ critérios de totalidade: elementos com grau de continuidade  $C^{m+1}$ .

Elementos cujas funções de interpolação satisfazem o primeiro critério são ditos compatíveis ou conformes, enquanto os que satisfazem o segundo critério são chamados completos.

Funções polinomiais são utilizadas devido a sua fácil integração e diferenciação. O grau do polinômio escolhido depende do número de nós dos elementos, do número e natureza das incógnitas em cada nó e dos requisitos de continuidade impostos nos nós e no contorno.

As funções de interpolação geram matrizes das funções de forma  $[N]$  sobre as quais os elementos finitos são formulados.

A variável de campo  $\phi$  é interpolada no elemento, através dos  $n$  valores nodais do elemento. Sendo  $\{\phi_e\}$  o vetor dos valores nodais de  $\phi$  tem-se:

$$\{\phi_e\} = \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \dots \\ \phi_n \end{Bmatrix} \quad (4.1.1)$$

$$\phi = [N]\{\phi_e\} \text{ ou seja,} \quad (4.1.2)$$

$$\phi = \sum_{i=1}^n N_i \phi_i \quad (4.1.3)$$

sendo:  $N_i$  – funções de forma

Para funções com continuidade  $C^0$  a função de forma  $N_i$  define a distribuição da variável de campo  $\phi$  dentro do elemento quando o  $i^{\text{ésimo}}$  grau de liberdade  $\phi_i$  possui valor unitário e os valores  $\phi$ 's dos demais nós são nulos.

### 4.1.3 Determinação das propriedades dos elementos

Após a definição da malha de elementos finitos, são determinadas as equações que expressam as propriedades dos elementos, através de uma matriz característica dos elementos.

Em análises de tensões, por exemplo, define-se a matriz de rigidez para a determinação das cargas nodais que, aplicadas ao sistema, estão associadas ao estado de deformação dos elementos. Para problemas relativos à transferência de calor, a determinação do fluxo de calor está associada ao campo de temperatura, através da matriz de condutividade.

Assim, problemas estruturais podem ter seus elementos equacionados como abaixo:

$$[k_R]^e \{d\}^e = \{f\}^e \quad (4.1.4)$$

sendo:  $[k_R]^e$  – matriz de rigidez do elemento  
 $\{d\}^e$  – vetor dos graus de liberdade nodais  
 $\{f\}^e$  – vetor dos carregamentos nodais

Analogamente, em problemas térmicos em regime permanente,

$$[k_C]^e \{T\}^e = \{q\}^e \quad (4.1.5)$$

sendo:  $[k_C]^e$  – matriz de condutividade do elemento  
 $\{T\}^e$  – vetor das temperaturas nodais no elemento  
 $\{q\}^e$  – vetor do fluxo de calor no elemento

Para a formulação das propriedades dos elementos podem ser empregados três diferentes métodos: método direto baseado no comportamento físico, limitado a elementos simples; método variacional, aplicado a problemas que possam ser expressos através do cálculo variacional envolvendo funcionais; método dos resíduos ponderados, para problemas que podem ser expressos através de equações diferenciais, sem formulações variacionais, tendo este último larga aplicação na transferência de calor e mecânica dos fluidos.

#### 4.1.4 Definição das equações do sistema

Para a determinação das propriedades do sistema como um todo devem ser combinadas e agrupadas as propriedades de cada elemento. Neste sentido, espalham-se as matrizes dos elementos na matriz global que expressa o comportamento de todo o sistema. As equações matriciais globais possuem a mesma forma das equações dos elementos individuais, contendo, entretanto, maior número de termos porque incluem todos os nós e graus de liberdade definidos do meio contínuo discretizado.

A base desta combinação reside no fato de que em um nó onde há conexão entre elementos, o valor da variável de campo é o mesmo para cada elemento conectado.

A matriz característica completa deve ser uma matriz quadrada  $n \times n$ , sendo  $n$  o número de graus de liberdade do sistema. Os coeficientes resultantes devem ser obtidos pela soma direta dos coeficientes dos elementos individuais. O mesmo princípio é válido para o vetor de ações externas, carregamentos nodais, fluxos de calor, etc.

Para análises estruturais e térmicas em regime permanente, como citadas anteriormente, o equacionamento poderia ser representado como mostrado a seguir:

$$[K_R]\{D\} = \{F\} \quad (4.1.6)$$

$$[K_R] = \sum_{e=1}^n [k]^e \quad (4.1.7)$$

$$\{F\} = \sum_{e=1}^n \{f\}^e \quad (4.1.8)$$

sendo:  $n$  – número de elementos do sistema

$[K_R]$  – matriz de rigidez do sistema

$\{D\}$  – vetor dos graus de liberdade nodais do sistema

$\{F\}$  – vetor dos carregamentos nodais do sistema

Analogamente,

$$[K_C]\{T\} = \{\dot{Q}\} \quad (4.1.9)$$

sendo:  $[K_C]$  – matriz de condutividade do sistema

$\{T\}$  – vetor das temperaturas nodais do sistema

$\{\dot{Q}\}$  – vetor do fluxo de calor do sistema

#### **4.1.5 Definição das condições de contorno**

As equações matriciais definidas para todo o sistema devem ser adaptadas para levar em consideração as condições de contorno que representem o problema físico. São introduzidos tanto os valores nodais prescritos, quanto valores prescritos nas faces dos elementos. Com a definição destes valores, que podem ser deslocamentos, temperaturas aplicadas, fluxos de calor, etc., são alterados a matriz característica global e vetor de ações externas.

#### **4.1.6 Resolução do sistema de equações**

Os valores nodais do problema são obtidos com a resolução do sistema de equações matriciais definido. Equações algébricas lineares ou não-lineares devem ser resolvidas para problemas em regime permanente. Para análises transientes nas quais os valores nodais são funções do tempo, o sistema deve ser de equações diferenciais [Huebner et al. (1995)].

Há essencialmente duas classes de métodos para a solução dos sistemas de equações de problemas em regime permanente: os métodos diretos e os indiretos. Nos métodos de solução direta o sistema de equações é resolvido com um número determinado de operações em função do problema. Conforme apresentado em Bathe e Wilson (1976), o método de eliminação de Gauss é um método de solução direta que pode ser utilizado com eficácia na solução de equações lineares em análises por elementos finitos, tendo como premissa a necessidade da matriz característica ser simétrica, positiva definida. Também podem ser empregados o método de fatorização de Choleski, método de solução frontal, ou ainda, os métodos da fatorização de Givens e de Householder. Nos métodos de solução indiretos, são obtidas soluções aproximadas através de sucessivas iterações. O número de iterações necessárias não é conhecido a priori, dependendo das dimensões do problema, do algoritmo de solução selecionado, dos critérios de convergência e do condicionamento numérico do

problema. Para análises em regime permanente pode ser aplicado o método de Gauss-Siedel.

Quando os problemas forem transientes, como em algumas análises dinâmicas, a solução do sistema de equações deve ser efetuada através de um procedimento incremental, passo-a-passo. Soluções aproximadas devem ser obtidas em intervalos de tempo discretos  $\Delta t$ . Para a solução aproximada no tempo  $t_i + \Delta t$  podem ser utilizados algoritmos de integração chamados explícitos, que se baseiam nas condições de equilíbrio no tempo  $t_i$ , como o método da diferença central. Adicionalmente, podem também ser empregados algoritmos implícitos, que usam as condições de equilíbrio no tempo  $t_i + \Delta t$ , tais como os métodos de integração de Houbold, Wilson  $\theta$  e Newmark.

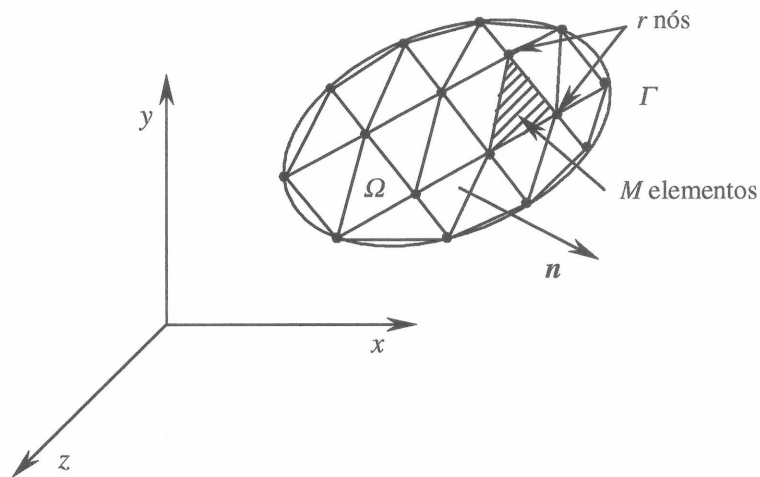
Diversos parâmetros complementares podem se definidos a partir a solução do sistema de equações, como tensões e deformações em função de deslocamentos nodais e fluxo de calor com base na distribuição de temperaturas.

## 4.2 FORMULAÇÃO PARA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O Método dos Elementos Finitos pode ser utilizado de forma eficiente na determinação da distribuição de temperaturas em estruturas com geometria e condições de contorno complexas [Inoue (1990), Léger et al. (1993), Mehta e Monteiro (1994), Saetta et al. (1995), Andrade (1997), Calmon et al. (2000)]. Como o MEF é um método genérico em relação à geometria, características do material e condições de contorno, permite a representação de estruturas de geometria complexa e arbitrária, podendo ser constituídas de materiais isotrópicos ou anisotrópicos. O mesmo modelo, ou seja, a mesma malha de elementos finitos, pode ser utilizado para as análises de transferência de calor e de tensões, minimizando os esforços computacionais requeridos ao longo da modelagem.

Com a utilização do MEF pode-se simular com fidelidade as trocas de calor através das superfícies das estruturas, representando o estado térmico superficial e internamente. Os cálculos computacionais permitem facilmente a consideração de fluxos de calor bidirecionais, em estruturas de pequenas e grandes dimensões.

Considere-se um corpo  $\Omega$  limitado por uma superfície  $\Gamma$ , com vetor unitário  $\mathbf{n}$ , sujeito à um fluxo transiente de calor, conforme mostrado na Figura 4.3. O domínio  $\Omega$  é dividido em  $M$  elementos de  $r$  nós cada.



**Figura 4.3 – Domínio e contorno sujeitos à transferência de calor**

No caso das análises térmicas, o objetivo é resolver a equação de transferência de calor, apresentada no Capítulo 3, considerando as condições inicial e de contorno necessárias. A equação de segunda ordem da condução de calor requer continuidade  $C^0$ . Assim, pode-se utilizar a temperatura como única incógnita. Conforme apresentado por Huebner et al. (1995), pelo processo usual, a temperatura e os gradientes de temperatura dentro de cada elemento podem ser expressos como:

$$T(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^r N_i(x, y, z) T_i(t) \quad (4.2.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^r \frac{\partial N_i}{\partial x}(x, y, z) T_i(t) \quad (4.2.2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^r \frac{\partial N_i}{\partial y}(x, y, z) T_i(t) \quad (4.2.3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^r \frac{\partial N_i}{\partial z}(x, y, z) T_i(t) \quad (4.2.4)$$

Em notação matricial tem-se:

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)]\{T(t)\} \text{ e} \quad (4.2.5)$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x}(x, y, z, t) \\ \frac{\partial T}{\partial y}(x, y, z, t) \\ \frac{\partial T}{\partial z}(x, y, z, t) \end{Bmatrix} = [B(x, y, z)]\{T(t)\} \quad (4.2.6)$$

sendo:  $T_i(t)$  – valor da temperatura em cada nó

$\{T(t)\}$  – vetor das temperaturas nodais do elemento

$[N]$  – matriz de interpolação ou das funções de forma

$[B]$  – matriz de interpolação do gradiente de temperatura

$$[N(x, y, z)] = [N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_r] \quad (4.2.7)$$

$$[B(x, y, z)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_r}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_r}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_r}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4.2.8)$$

A equação da condução de calor, expressão 3.1.17, pode ser escrita como:

$$-\left(\frac{\partial q_x''}{\partial x} + \frac{\partial q_y''}{\partial y} + \frac{\partial q_z''}{\partial z}\right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.2.9)$$

sendo  $q_x''$ ,  $q_y''$  e  $q_z''$  componentes da taxa de transferência de calor por unidade

de área.

A solução aproximada do problema pode ser obtida utilizando-se os métodos dos resíduos ponderados. As formulações destes métodos permitem que o erro ou resíduo devido às aproximações da solução seja minimizado, através da sua distribuição no domínio  $\Omega$  ou no contorno  $\Gamma$ , com o auxílio de uma função-peso ou função de ponderação. A partir da equação 4.2.9, pode-se determinar uma integral ponderada dos resíduos no domínio  $\Omega$ :

$$\int_{\Omega} \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - Q + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) N_i d\Omega = 0 \quad (4.2.10)$$

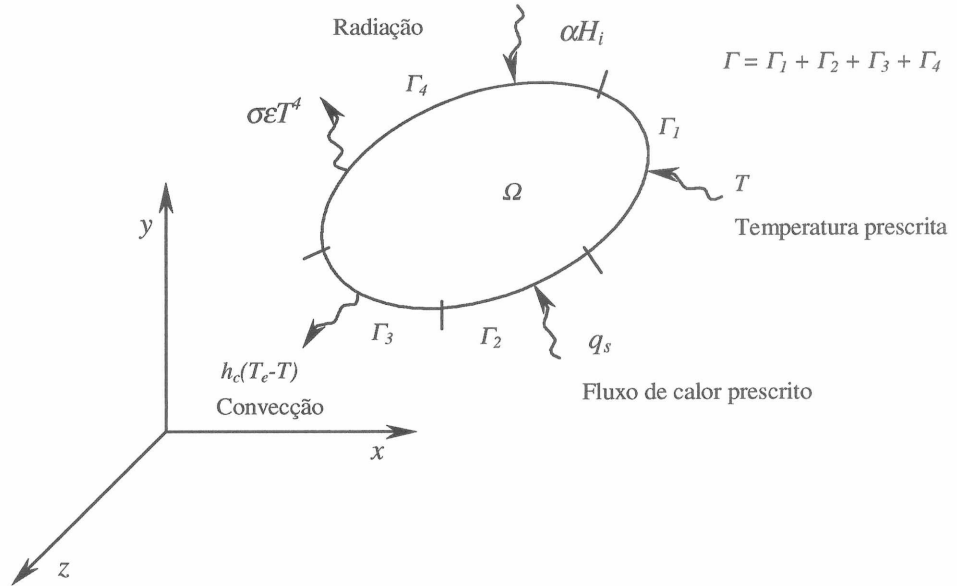
Transformando-se, pelo Teorema de Gauss, as integrais referentes a  $q_x$ ,  $q_y$  e  $q_z$  em integrais de superfície do fluxo de calor ao longo do contorno do elemento, tem-se:

$$\int_{\Omega} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} N_i d\Omega - \int_{\Omega} \left[ \frac{\partial N_i}{\partial x} \quad \frac{\partial N_i}{\partial y} \quad \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] \begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix} d\Omega = \int_{\Omega} Q N_i d\Omega - \int_{\Gamma} (q \cdot n) N_i d\Gamma \quad (4.2.11)$$

$i = 1, 2, \dots, r$

Considerando-se que sobre o contorno  $\Gamma$  estejam atuando as condições freqüentemente utilizadas (temperatura prescrita, fluxo de calor prescrita, convecção e radiação) conforme mostrado na Figura 4.4, subdividindo-o nas superfícies  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ ,  $\Gamma_3$  e  $\Gamma_4$ , tal que:

- $\Gamma_1$  – contorno com temperatura prescrita
- $\Gamma_2$  – contorno com fluxo de calor prescrita
- $\Gamma_3$  – contorno com convecção prescrita
- $\Gamma_4$  – contorno com radiação prescrita



**Figura 4.4 – Condições de contorno**

tem-se:

$$\int_{\Omega} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} N_i d\Omega - \int_{\Omega} \left[ \frac{\partial N_i}{\partial x} \quad \frac{\partial N_i}{\partial y} \quad \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] \begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix} d\Omega = \int_{\Omega} Q N_i d\Omega - \int_{\Gamma_1} (q \cdot n) N_i d\Gamma \quad (4.2.12)$$

$$+ \int_{\Gamma_2} q_s N_i d\Gamma - \int_{\Gamma_3} h_c (T_e - T) N_i d\Gamma - \int_{\Gamma_4} (\sigma \epsilon T^4 - a q_i) N_i d\Gamma \quad i = 1, 2, \dots, r$$

Escrevendo-se a equação de Fourier para um meio anisotrópico na forma matricial, tem-se:

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (4.2.13)$$

sendo [k] – matriz de condutividade térmica.

Os gradientes de temperatura podem ser expressos em termos de temperaturas nodais através da equação seguinte:

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix} = -[k][B]\{T\} \quad (4.2.14)$$

Desta forma, a formulação geral para análise térmica permanente não linear, em meio anisotrópico resulta:

$$[C]\left\{\frac{dT}{dt}\right\} + [[K] + [K_c]]\{T\} = \{R_T\} + \{R_Q\} + \{R_q\} + \{R_c\} + \{R_\sigma\} + \{R_r\} \quad (4.2.15)$$

na qual as matrizes e vetores definidos são:

$$\text{Matriz de capacitância} \quad [C] = \int_{\Omega} \rho c \{N\} \{N\}^T d\Omega \quad (4.2.16)$$

$$\text{Matriz de condutividade} \quad [K] = \int_{\Omega} [B]^T [k] [B] d\Omega \quad (4.2.17)$$

$$\text{Matriz de convecção} \quad [K_c] = \int_{\Gamma_3} h \{N\} \{N\}^T d\Gamma \quad (4.2.18)$$

$$\text{Vetor temperatura nodal prescrita} \quad \{R_T\} = - \int_{\Gamma_1} (q \cdot n) \{N\} d\Gamma \quad (4.2.19)$$

$$\text{Vetor calor de geração} \quad \{R_Q\} = \int_{\Omega} Q \{N\} d\Omega \quad (4.2.20)$$

$$\text{Vetor fluxo de calor} \quad \{R_q\} = \int_{\Gamma_2} q_s \{N\} d\Gamma \quad (4.2.21)$$

$$\text{Vetor convecção} \quad \{R_c\} = \int_{\Gamma_3} h_c T \{N\} d\Gamma \quad (4.2.22)$$

$$\text{Vetor de emissão térmica} \quad \{R_\sigma\} = - \int_{\Gamma_4} \sigma \epsilon T^4 \{N\} d\Gamma \quad (4.2.23)$$

$$\text{Vetor radiação solar direta} \quad \{R_r\} = \int_{\Gamma_4} \alpha H_i \{N\} d\Gamma \quad (4.2.24)$$

A formulação geral deverá ser considerada de acordo com o problema a ser analisado, seja em regime permanente, transiente, linear ou não-linear, conforme mostrado a seguir:

Análise térmica linear permanente:

$$[[K] + [K_c]]\{T\} = \{R_Q\} + \{R_q\} + \{R_c\} \quad (4.2.25)$$

Análise térmica linear transiente:

$$[C] \left\{ \frac{dT(t)}{dt} \right\} + [[K] + [K_c(t)]]\{T(t)\} = \{R_Q(t)\} + \{R_q(t)\} + \{R_c(t)\} \quad (4.2.26)$$

Análise térmica não-linear transiente:

$$[C(T)] \left\{ \frac{dT}{dt} \right\} + [[K(T)] + [K_c(T, t)]]\{T(t)\} = \{R_T(T, t)\} + \{R_Q(T, t)\} + \{R_q(T, t)\} + \{R_c(T, t)\} + \{R_\sigma(T, t)\} + \{R_r(T, t)\} \quad (4.2.27)$$

### 4.3 SISTEMÁTICA DA ANÁLISE COMPUTACIONAL

Os cálculos de temperatura se processam a partir da consideração do equilíbrio térmico em cada nó da malha de elementos finitos. A equação de Fourier para análises térmicas não-lineares transientes, expressão 4.2.27, pode ser representada em forma matricial, descrevendo-se o equilíbrio térmico como um sistema de equações diferenciais de primeira ordem, tal como se apresenta a seguir [Wilson (1968), Bathe e Wilson (1976), Andrade (1997), ANSYS®/Multiphysics (1994)]:

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q^a\} \quad (4.3.1)$$

sendo:  $[C]$  – matriz de capacidade de calor

$[K]$  – matriz de condutividade térmica

$\{T\}$  – vetor das temperaturas nodais

$\{\dot{T}\}$  – vetor taxa de variação das temperaturas ao longo do tempo

$\{Q^a\}$  – vetor taxa de calor suprida aos nós, inclusive o calor gerado nos elementos adjacentes a cada nó

A partir das temperaturas nodais, são calculadas as demais variáveis como o fluxo de calor nos elementos.

O método utilizado para a resolução de análises transientes depende dos graus de liberdade envolvidos. Podem ser utilizados dois métodos: Completo (*full*) e Reduzido (*reduced*).

O Método Completo utiliza as matrizes completas, sem redução. É o método mais adequado para reproduzir todos os tipos de não-linearidades que possam ser incluídas na análise. Permite a introdução de carregamentos em nós e elementos bem como deslocamentos e deformações prescritas. A maior desvantagem deste método é ser mais oneroso em termos computacionais.

O Método Reduzido condensa as dimensões do problema utilizando graus de liberdade principais e matrizes reduzidas. Calculam-se inicialmente os graus de liberdade principais e posteriormente é feita a expansão para o cálculo completo. É um método mais rápido e menos oneroso que o método completo. Entretanto, não permite a aplicação de carregamentos nos elementos como temperatura e pressão. O intervalo de tempo deve permanecer constante durante a análise transiente, portanto, não é permitida a definição automática de intervalos de tempo.

Em análises térmicas transientes, com sistema de equações de primeira ordem, é aplicável o Método Completo.

A solução da equação 4.3.1 pode ser efetuada com o emprego de um algoritmo de integração numérica direto, que relaciona os valores da variável de campo no instante  $t_n$ , com os valores da variável em um tempo  $t_n + \Delta t$  [Zienkiewicz (1971), Bathe e Wilson (1976), Becker et al. (1981), Cook et al. (1989), Huebner et al. (1995) e Lewis et al. (1996), ANSYS®/Multiphysics (1994)]. As equações de primeira ordem são representadas através de aproximações por diferenças finitas no intervalo de tempo. O processo empregado no programa ANSYS®/Multiphysics (1984) é chamado de Regra Trapezoidal Generalizada, ou Método da Aceleração Média, também

descrito, entre outros, por Cook et al. (1989), Huebner et al. (1995). Desse modo, pode-se obter:

$$\{T_{n+1}\} = \{T_n\} + (1-\theta)\Delta t \{\dot{T}_n\} + \theta\Delta t \{\dot{T}_{n+1}\} \quad (4.3.2)$$

sendo:  $\theta$  – parâmetro de integração transiente

$$\Delta t = t_{n+1} - t_n$$

$\{T_n\}$  – valor da temperatura nodal no tempo  $t_n$

$\{\dot{T}_n\}$  – vetor taxa de variação da temperatura nodal ao longo do tempo

A equação 4.3.1 no tempo  $t_{n+1}$  pode ser escrita como abaixo:

$$[C]\{\dot{T}_{n+1}\} + [K]\{T_{n+1}\} = \{Q^a\} \quad (4.3.3)$$

Substituindo a expressão de 4.3.2 tem-se:

$$\left( \frac{1}{\theta\Delta t} [C] + [K] \right) \{T_{n+1}\} = \{Q^a\} + [C] \left( \frac{1}{\theta\Delta t} \{T_n\} + \frac{1-\theta}{\theta} \{\dot{T}_{n+1}\} \right) \quad (4.3.4)$$

A equação 4.3.4 representa um algoritmo genérico que pode ser particularizado dependendo do valor do parâmetro de integração  $\theta$ . Adotando-se  $\theta = 0$ , o algoritmo é conhecido por Método de Euler Inverso. Se  $\theta = 1/2$ , refere-se ao Método de Crank-Nicolson. No Método de Galerkin,  $\theta = 2/3$ , e  $\theta = 1$  refere-se ao Método de Euler. Para  $\theta \geq 0$  tem-se um algoritmo dito implícito. Nos casos em que  $\theta \geq 1/2$  a solução das equações é dita incondicionalmente estável [Zienkiewicz (1971), Bathe e Wilson (1976), Becker et al. (1981), Cook et al. (1989), Huebner et al. (1995) e Lewis et al. (1996), ANSYS®/Multiphysics (1994)].

Para o emprego deste algoritmo no programa ANSYS®/Multiphysics procura-se selecionar o valor de  $\theta$  de modo que a estabilidade não seja um fator da seleção do intervalo de tempo. Fica limitada, portanto, a  $1/2 \leq \theta \leq 1$ , que corresponde a um método implícito incondicionalmente estável.

Vários métodos são disponíveis para a solução de equações simultâneas: Solução Frontal, Gradiente Conjugado de Jacobi (JCG), Gradiente Conjugado Incompleto de Cholesky (ICCG), Gradiente Conjugado Pré-Condicionado (PCG) e Solução Automática Iterativa (ITER).

O método padrão adotado no *ANSYS®/Multiphysics* é o de Solução Frontal, no qual a definição do sistema de equações e a solução ocorrem simultaneamente para cada elemento. Após o cálculo da matriz de cada elemento, o programa lê os graus de liberdade do primeiro elemento, eliminando os graus de liberdade que podem ser expressos em termos dos graus de liberdade anteriores, através do processo de eliminação de Gauss, escrevendo uma nova equação. Este processo é repetido para todos os elementos, até que todos os graus de liberdade tenham sido eliminados, completando a matriz triangularizada.

Determina-se o valor de  $\{T_{n+1}\}$  pela equação 4.3.4 e substitui-se o valor de  $\{\dot{T}_{n+1}\}$  na equação 4.3.2.

Quando as análises incluem não-linearidades, o processo de solução requer passos intermediários de modo a reproduzir corretamente a evolução dos carregamentos. Para tanto é necessária uma análise incremental passo-a-passo, ou seja, o vetor de carregamentos final é determinado aplicando-se carregamentos incrementais, através de um processo iterativo de solução.

O Método de Newton-Raphson é um processo iterativo para a solução aproximada de equações algébricas. [Zienkiewicz (1971), Cook et al. (1989)]. A convergência da solução ocorre se, e somente se, a solução para cada iteração é “próxima da solução exata”. Para as análises térmicas tem-se:

$$[K_i^T] \{\Delta T_i\} = \{Q^a\} - \{Q^{nr}\} \quad (4.3.5)$$

$$\{T_{i+1}\} = \{T_i\} + \{\Delta T_i\} \quad (4.3.6)$$

sendo:  $[K_i^T]$  – matriz de condutividade térmica

$i$  – número da iteração

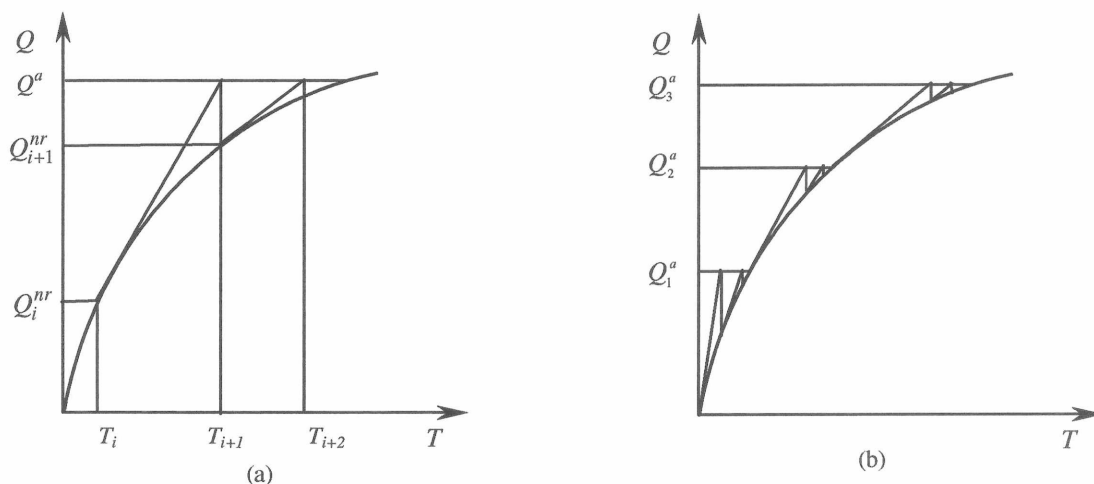
$\{Q_i^{nr}\}$  – vetor correspondente às cargas internas do elemento

Os valores de  $[K_i^T]$  e  $\{Q_i^{nr}\}$  são calculados com base em  $\{T_i\}$ . O lado direito da equação 4.3.5 é o resíduo ou vetor desbalanceado, ou seja, o quanto o sistema está fora de equilíbrio. A convergência será obtida quando o valor residual resultar menor que um valor de tolerância definido.

O processo iterativo, mostrado na Figura 4.5, constitui-se em:

- (1) assumir o valor inicial  $\{T_0\}$ , que pode ser o valor resultante das iterações de um passo de tempo anterior;
- (2) calcular a matriz tangente atualizada  $[K_i^T]$  e o vetor  $\{Q_i^{nr}\}$  para  $\{T_i\}$ ;
- (3) calcular  $\{\Delta T_i\}$ ; e
- (4) somar os valores de  $\{\Delta T_i\}$  e  $\{T_i\}$  de modo a se obter a próxima aproximação  $\{T_{i+1}\}$ .

Repetem-se os passos (2) a (4) até se obter a convergência da equação.



**Figura 4.5 – Método de Newton-Raphson: (a) Iteração intermediária; (b) Processo de solução**

Quando a matriz tangente é atualizada a cada iteração, o processo é chamado Newton-Raphson Completo. No processo de Newton-Raphson Modificado, a atualização para análises transientes é feita com menos frequência, na primeira ou segunda iteração de cada passo de tempo. No processo de Newton-Raphson de Rigidez Inicial, a matriz só é atualizada quando ocorrem mudanças nas características do sistema.

A sistemática de solução apresentada nestes estudos envolve o método completo de solução de equações, com o processo iterativo de Newton-Raphson Completo.

Para a discretização de problemas sujeitos a análises térmicas, o programa empregado apresenta uma biblioteca com cerca de 40 diferentes tipos de elementos. A escolha fica a critério do profissional que executa a análise e deve levar em conta as características do meio contínuo e da análise propriamente dita. São disponibilizados elementos sólidos bidimensionais, tridimensionais, elementos de ligação para radiação, para convecção, elementos de barra para condução, elementos de placa, elementos de campos acoplados (térmico/estrutural/fluido/elétrico) e elementos especiais.

Nas análises térmicas bidimensionais desenvolvidas neste trabalho, foram utilizados elementos quadrangulares lineares (4 nós) e quadrangulares quadráticos (8 nós), cujas características e formulação são apresentadas no Anexo 1.

## 5 METODOLOGIA

A determinação exata da evolução de temperaturas em uma estrutura é dificultada principalmente pela complexidade e variabilidade dos fatores envolvidos, tais como propriedades térmicas do material, processo de execução e condições externas.

A metodologia proposta no presente trabalho visa oferecer recursos para a otimização de projetos de estruturas executadas em camadas, através da avaliação numérica do comportamento térmico decorrente do processo de fabricação ou construção, levando-se em conta a influência térmica de uma camada sobre as demais e sobre a estrutura como um todo.

Enfocando-se as estruturas de concreto, conforme salientado por Mehta e Monteiro (1994), a maior dificuldade é calcular a distribuição de temperatura para uma geometria complexa e como incorporar na análise as etapas do processo construtivo. Um dos desafios de projeto é maximizar a espessura das camadas de lançamento de concreto, sem causar fissuras devido a tensões térmicas, e também otimizar o intervalo entre camadas, mantendo-se os aspectos relativos a integridade, estanqueidade, segurança e custo das estruturas.

Durante as fases de construção, a medição e acompanhamento da evolução da temperatura em pontos estratégicos possibilita a comparação com as estimativas efetuadas durante a fase de projeto. Ocorrendo discrepância entre os valores previstos e medidos, que possam vir a causar danos à estrutura, a análise dos resultados permite a definição de medidas de controle para que a variação térmica não seja prejudicial.

Devem ser considerados os diversos fatores que possam influenciar a variação térmica e a subsequente distribuição de tensões em estruturas de concreto. Andrade (1997), cita alguns destes fatores:

- ◊ condições climáticas durante a construção da estrutura;

- ◇ condições de exposição após a construção;
- ◇ variações sazonais da temperatura ambiente;
- ◇ temperatura de lançamento do concreto;
- ◇ temperatura de estabilização do concreto;
- ◇ tipos e quantidade de materiais empregados no concreto;
- ◇ propriedades do material;
- ◇ dimensões e formas da estrutura;
- ◇ existência e espaçamento de juntas de contração;
- ◇ tipos e tempo de permanência de formas empregadas;
- ◇ tipo e tempo de cura do concreto;
- ◇ utilização de pré ou pós-refrigeração do concreto;
- ◇ altura da camada de concretagem;
- ◇ intervalos de lançamento entre camadas de concretagem;
- ◇ temperatura e propriedades térmicas e elásticas da fundação;
- ◇ características da superfície de fundação, em especial a presença de descontinuidades.

Havendo dificuldades significativas na determinação precisa de todos estes fatores, diversas hipóteses simplificadoras podem ser consideradas nas análises, tais como:

- ◇ consideração de material isotrópico;
- ◇ consideração de análise linear;
- ◇ adoção de valores médios para propriedades térmicas do material, tais como massa específica, condutividade térmica, coeficiente de dilatação térmica e calor específico;
- ◇ temperatura ambiente média entre o lançamento das camadas;
- ◇ temperatura de lançamento média ao longo de toda camada executada;
- ◇ coeficiente de transferência de calor ou de filme constante para todas as camadas.

A geometria de uma estrutura pode ser complexa, como o caso de casas de força de usinas hidrelétricas que envolvem diversas formas com aberturas internas. Alguns problemas envolvem diferentes tipo de materiais como as rochas de fundação, a aplicação de concreto com diferentes características, argamassas de ligação entre camadas, blindagens metálicas, revestimentos de PVC, etc. Na fase de projeto, nem sempre as propriedades destes materiais são disponíveis. Nestes casos, são utilizados valores existentes em bibliografia ou estimados por correlação com materiais de estruturas semelhantes.

Quando uma estrutura é executada por camadas, para representar a seqüência construtiva, poderiam ser efetuadas  $n$  análises, com  $n$  malhas, onde  $n$  é o número de camadas da estrutura. Iniciar-se-ia a análise com uma malha de elementos finitos representando a primeira camada, bem como os carregamentos e condições de contorno iniciais. A partir dos resultados dessa análise, a malha seria incrementada com novos elementos para a camada subsequente, executando-se nova análise com os carregamentos e condições de contorno pertinentes. Este processo exigiria sucessivas discretizações, com a criação de uma nova malha para cada camada, tomando-se especial cuidado na transferência dos resultados de uma análise para outra. Para estruturas complexas e de maior porte, cuja discretização viesse a requerer um grande número de elementos, o trabalho e tempo despendido poderia dificultar e até inviabilizar as análises.

A metodologia proposta no presente trabalho contorna esta enorme dificuldade, permitindo que seja feita uma única malha de elementos finitos que discretiza a estrutura toda desde o início, camada a camada.

Na fase de projeto de uma estrutura, quando são efetuadas as análises térmicas, devem estar definidos, mesmo que de forma preliminar, tanto a sua geometria quanto os condicionantes aos quais deverá estar submetida. Isto permite que a estrutura seja discretizada como um todo e representada através de uma única malha de elementos finitos.

## 5.1 UTILIZAÇÃO DO ANSYS®/MULTIPHYSICS

Para as análises térmicas realizadas neste trabalho, optou-se pelo desenvolvimento de uma modelagem numérica com a utilização do ANSYS®/Multiphysics (1994) - versão 5.3, por ser um programa de análise estrutural comercial, empregado em inúmeras empresas, e com muitos recursos disponíveis para pré e pós-processamento.

Neste trabalho foi analisado o problema completo, sendo a estrutura discretizada em elementos finitos na sua forma final.

Para reproduzir a seqüência construtiva foram utilizados comandos específicos, disponíveis no ANSYS®/Multiphysics, que permitem simular a execução de cada camada.

A técnica denominada *Birth & Death* permite que os elementos de uma malha discretizada sejam “ativados” ou “desativados” a medida que necessário, através de comandos definidos. É uma característica que pode ser utilizada na análise de escavações, construções de túneis e simulações de estágios de construção. Com o uso destes comandos, quando os elementos são “desativados”, não são removidos da malha, permanecendo a sua representação gráfica. A desativação de um elemento consiste na multiplicação do seu respectivo valor na matriz de condutividade por um severo fator de redução, e na anulação dos valores dos carregamentos referentes ao elemento, tais como as temperaturas nodais.

Para o problema a ser analisado, definiu-se inicialmente, a malha de elementos finitos, discretizando o problema como um todo. Posteriormente, os elementos são desativados através do comando denominado *ekill*.

A medida que cada camada da estrutura é executada, são ativados os elementos correspondentes. Através do comando denominado *Birth*, os valores das propriedades e carregamentos do elemento passam a ser considerados na matriz de condutividade e vetores de carregamento. Ocorrendo, em algum caso específico, a

necessidade de desativar novamente algum elemento, pode-se utilizar o comando denominado *Death*.

Nas análises transientes, nas quais são definidos passos de carga (*load steps*), os elementos permanecem com sua definição de ativo ou inativo ao longo de todas as análises (*substeps*) efetuadas dentro de um mesmo passo de carga. À medida que se processam as análises e passa-se para passos de carga seguintes, os elementos são reativados de forma a reproduzir a seqüência construtiva.

Como os elementos a serem reativados devem possuir um carregamento específico, no caso temperatura, para se evitar instabilidade numérica e reduzir o número de equações a serem resolvidas, devem ser restringidos os nós desativados que não estão em contato com elementos ativos, anulando-se todos os graus de liberdades referentes.

A rotina computacional proposta foi escrita com a utilização dos comandos usuais e da linguagem específica do *ANSYS®/Multiphysics (APDL - ANSYS® Parametric Design Language)*. Esta linguagem permite a otimização de modelos, oferecendo uma série de recursos de definição de parâmetros, tabelas e laços (*looping*) para o desenvolvimento das análises. Entretanto, o modo iterativo do programa foi utilizado para obtenção de listagens e verificações de dados resultados.

A versão disponível do programa (*ANSYS®/Multiphysics 5.3*) possui vários comandos para a definição de temperaturas nodais. Uma das possibilidades é a definição de um carregamento inicial. Entretanto, esta condição somente é válida para o primeiro passo de carga, ou seja, a primeira resolução, não permitindo a definição de novas temperaturas para as demais camadas. Outra forma é a aplicação de temperatura como carregamento nodal, que mantém constante o valor especificado ao longo de toda análise, não reproduzindo as variações ao longo do tempo.

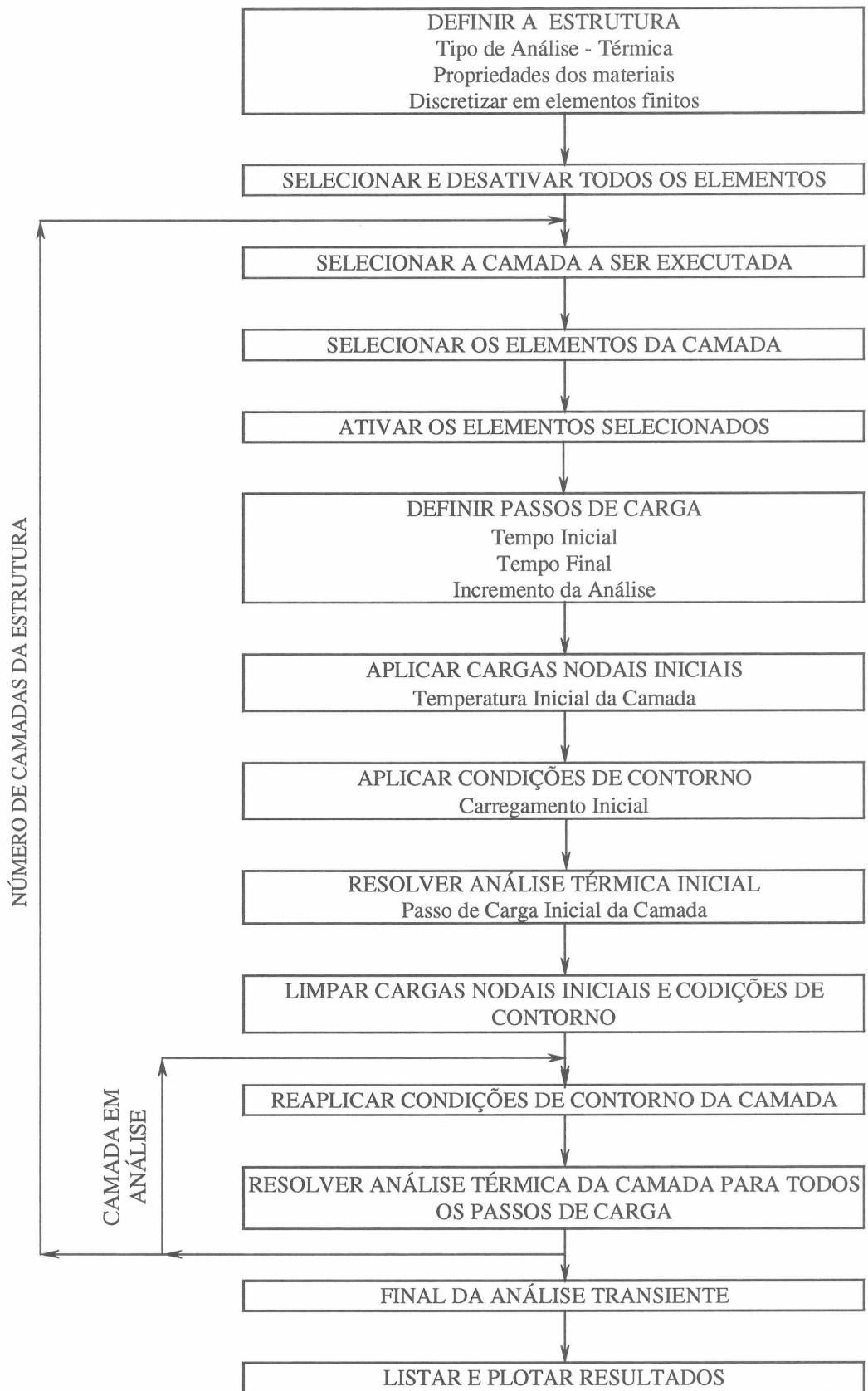
Como na análise por camadas pode haver uma temperatura inicial especificada para cada camada, faz-se primeiramente uma análise térmica com a temperatura inicial

definida como carga nodal na camada, para um intervalo de tempo de resolução infinitesimal. A partir da distribuição resultante de temperaturas desta primeira análise, é executada a análise transiente da camada propriamente dita.

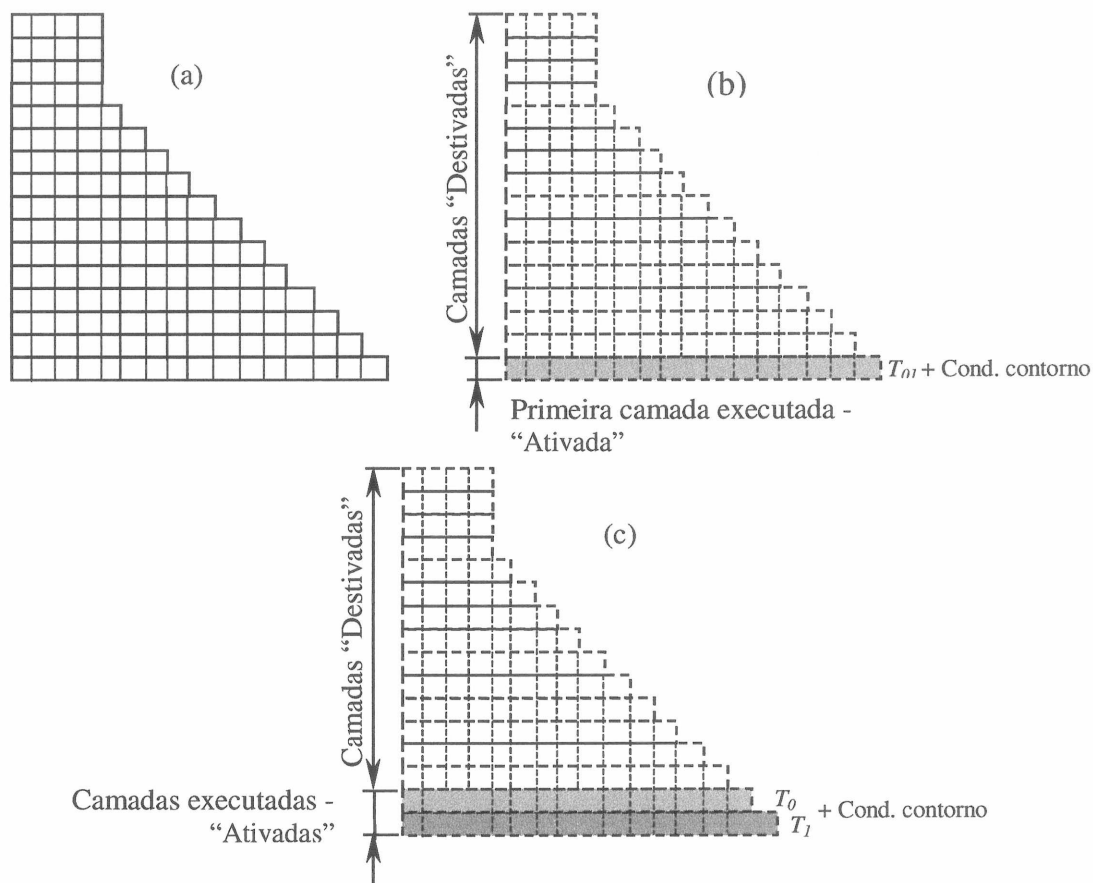
## 5.2 SEQÜÊNCIA DE ANÁLISE

Através de um modelo numérico bidimensional, as análises térmicas transientes de uma estrutura permitem representar a distribuição de temperaturas em cada instante de tempo, para cada camada, de forma seqüencial e independente, visando reproduzir a seqüência de construção. As camadas já construídas são avaliadas como a parte “ativada” da malha de elementos finitos discretizada, considerando-se as condições de contorno da estrutura, as quais seriam, por exemplo, a temperatura inicial, temperatura ambiente, convecção e calor de hidratação (reproduzido através da geração interna de calor).

A Figura 5.1 apresenta a seqüência de passos efetuados ao longo da análise, mostrada esquematicamente na Figura 5.2.



**Figura 5.1 – Sequência de passos da análise térmica**



**Figura 5.2 – Seqüência de análise: (a) Estrutura discretizada; (b) Execução da primeira camada; (c) Execução das camadas sucessivas**

Para as análises propostas neste trabalho devem ser processados os seguintes passos:

### DEFINIÇÕES BÁSICAS

1. Definir o tipo de análise a ser desenvolvida: térmica;
2. Definir o tipo de elemento (térmico) mais adequado à estrutura a ser analisada, tais como:
  - ◊ Triangular ou quadrangular;
  - ◊ Linear (4 nós), quadrático (6 ou 8 nós);
3. Determinar as propriedades dos materiais envolvidos na análise;
  - ◊ módulo de elasticidade;
  - ◊ massa específica;

- ◇ coeficiente de dilatação térmica;
  - ◇ condutividade térmica;
4. Gerar a malha de elementos finitos:
    - ◇ discretizar a estrutura;
    - ◇ definir as camadas;
    - ◇ definir os atributos e dimensões dos elementos (maior ou menor refino da malha);
    - ◇ gerar a malha propriamente dita;
  5. Definir as opções de análise do problema. Métodos usados neste trabalho:
    - ◇ Método de Newton-Raphson Completo – (*Full*);
    - ◇ Método de Solução Frontal (*Frontal Solver*);
  6. Definir os dados referentes à análise:
    - ◇ temperatura ambiente;
    - ◇ temperatura inicial da camada – temperatura de lançamento do material;
    - ◇ intervalo de tempo entre as camadas;
    - ◇ elevação adiabática do material – curva de geração de calor;
  7. Selecionar todos os elementos da malha;
  8. Desativar todos os elementos da malha – *ekill*;
  9. Definir o número de camadas a serem analisadas;

#### INÍCIO DA ANÁLISE TRANSIENTE

10. Ativar a camada executada:
  - ◇ selecionar a área correspondente à camada;
  - ◇ selecionar todos os elementos da camada;
  - ◇ ativar os elementos selecionados – *ealive*;
11. Definir o tempo de lançamento da camada – tempo de início da análise transiente;
12. Definir o intervalo de tempo entre as camadas e o incremento de tempo das análises;
13. Definir carregamento inicial através de tempo de análise infinitesimal;

14. Aplicar as condições de contorno e carregamentos:
  - ◊ temperatura inicial da camada ativada;
  - ◊ restringir os graus de liberdade dos nós inativos;
  - ◊ forças de superfície – fluxo de calor;
  - ◊ forças de superfície – convecção (coeficiente de filme e temperatura ambiente);
  - ◊ forças de corpo – calor de geração;
15. Resolver o problema para o carregamento inicial – Passo de carga inicial da camada;
16. Limpar as cargas nodais anteriores;
17. Reaplicar as condições de contorno – forças de superfície e forças de corpo;
18. Resolver o problema para os demais passos de carga definidos para a camada;
19. Repetir os passos 10 a 18 para o número de camadas da estrutura;

#### TÉRMINO DA ANÁLISE TRANSIENTE

#### ANÁLISE DOS RESULTADOS

20. Selecionar passos de carga e resultados a serem analisados;
21. Listar resultados nos nós e elementos selecionados;
22. Plotar resultados nos nós e elementos selecionados.

### 5.3 APLICAÇÕES

Para testar e validar a metodologia proposta foram efetuadas aplicações em problemas relativos a estruturas de concreto executadas por camadas.

Inicialmente foram considerados blocos quadrados superpostos, simulando-se a execução de camadas. Posteriormente, a metodologia foi empregada na execução de uma viga de concreto para apoio de ponte rolante da casa de força da Usina Hidrelétrica Serra da Mesa. A última avaliação apresentada visa reproduzir o lançamento das camadas de uma barragem de concreto compactado com rolo.

### 5.3.1 Blocos de concreto

As primeiras avaliações da metodologia proposta para determinação do campo de temperaturas de uma estrutura construída por camadas foram efetuadas com a simulação da execução de uma estrutura hipotética de blocos quadrados superpostos.

Considerou-se a construção de três blocos de concreto com 4,0 m de largura por 4,0 m de altura construídos um sobre o outro, conforme mostrado na Figura 5.3. Cada bloco executado corresponde a uma camada.

As dimensões adotadas são arbitrárias e não correspondem a dimensões usuais de estruturas de concreto. Estas medidas serviram para a discretização em uma malha de elementos finitos simétrica e com uma linha central de nós bem definida em cada camada para comparações de resultados, como será mostrado mais adiante. Entretanto, esta análise se justifica no intuito de se avaliar a eficiência da metodologia.

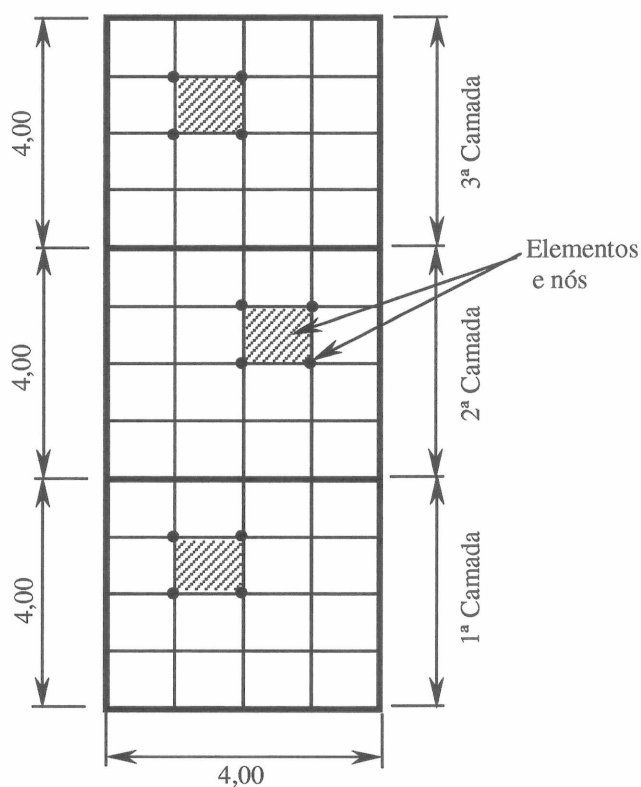


Figura 5.3 – Blocos de concreto

As propriedades térmicas utilizadas são as que seguem:

- ◇ Massa específica = 2388,00 kg/m<sup>3</sup>
- ◇ Calor específico = 1105,00 J/kg°C (1105,00 J/kgK)
- ◇ Condutividade térmica = 6445,93 J/mh°C (1,79W/mK)
- ◇ Coeficiente de dilatação térmica = 7,07.10<sup>-6</sup>/°C (7,07.10<sup>-6</sup>/K)
- ◇ Coeficiente de transferência de calor:  
Concreto-ar = 50232,00 J/m<sup>2</sup>h°C (12 kcal/mh°C = 13,95 W/mK)

Foi adotada a mesma temperatura inicial para todas as camadas, com valor superior à temperatura ambiente externa, para se ampliar os gradientes térmicos resultantes. Os valores adotados foram os seguintes:

- ◇ Temperatura inicial da camada = 45°C = 318,15 K
- ◇ Temperatura ambiente = 20°C = 293,15 K

A elevação adiabática de temperatura, mostrada na Tabela 5.1 foi transformada em uma curva de geração de calor através da equação de Fourier.

**TABELA 5.1 – ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA E CURVA DE GERAÇÃO DE CALOR**

Tempo		T (°C)	Q J/(m <sup>3</sup> h)
(dias)	(horas)		
0	0	0,00	1.125.216
1	24	8,06	643.772
2	48	11,78	296.679
3	72	13,57	176.318
5	120	15,30	65.195
7	168	16,15	37.956
10	240	16,82	14.253
14	336	17,30	10.769
20	480	17,67	4.646
28	672	17,92	591

No Anexo 2, é realizado um teste adiabático com um bloco hipotético onde se mostra a concordância dos resultados numéricos com os valores experimentais que definiram a curva de elevação adiabática de temperaturas.

Tendo em vista que o objetivo destas aplicações era avaliar a distribuição de temperatura ao longo das camadas, desprezou-se a interação com a fundação da estrutura.

As condições de contorno estabelecidas foram: fluxo de calor nulo na face inferior da primeira camada, representando o contato concreto-fundação, e convecção, representando a interface concreto-ar nas laterais e face superior da camada executada correspondente.

Os blocos foram discretizados utilizando-se elementos quadrangulares lineares (4 nós) com 1,0 m de lado, totalizando:

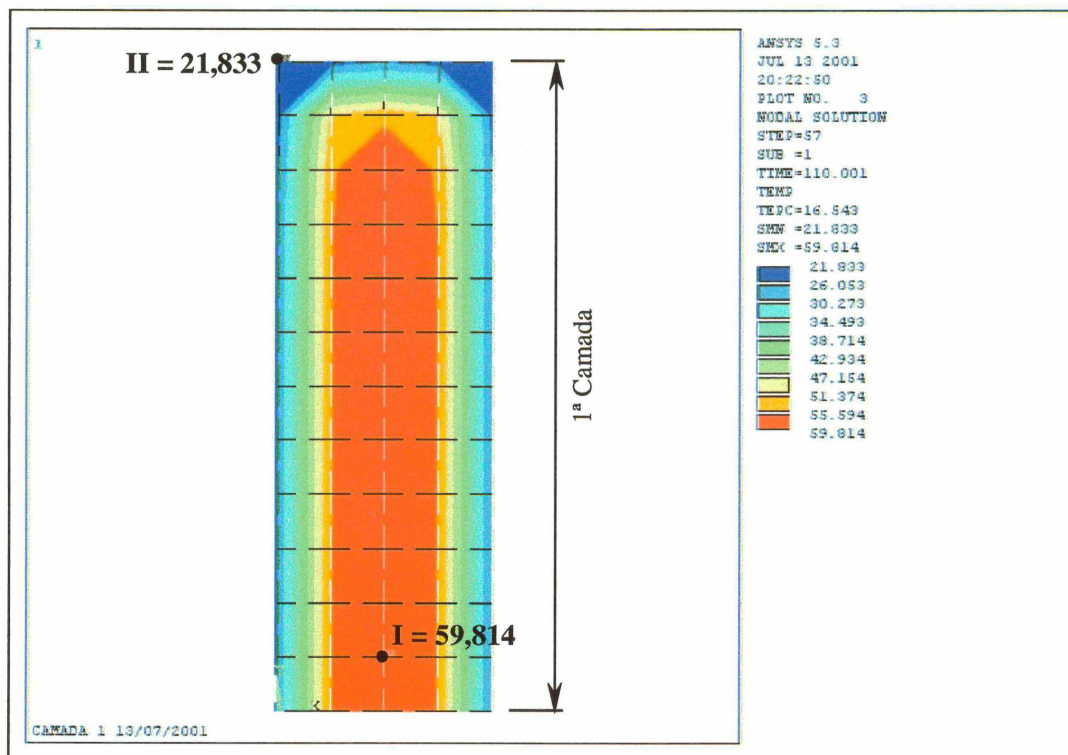
- ◊ número de áreas: 3;
- ◊ número de elementos: 48;
- ◊ número de nós: 65.

Para a primeira avaliação da distribuição de temperaturas considerou-se que os três blocos fossem construídos como uma estrutura única, em uma camada com a dimensão total, hipótese denominada BL-A1. A partir do lançamento do concreto, com a temperatura inicial de 45°C e as condições de contorno definidas, efetuou-se uma análise transiente ao longo de 144 horas.

Dadas as condições de contorno do problema em questão, com fluxo de calor nulo na face inferior e convecção nas faces superior e laterais das camadas, foram selecionados nós da linha central vertical dos blocos, a cada 2,00 m, como representativos da evolução térmica ao longo do tempo. Os valores de temperatura máxima destes nós são mostrados na Tabela 5.2. apresentada no final das análises.

Analisando-se os resultados obtidos, observou-se uma variação gradual e relativamente uniforme da temperatura na estrutura, com a dissipação do calor pelas superfícies laterais e superior. O valor máximo de temperatura ocorreu na linha central após 110 horas do lançamento, e foi de 59,81 °C no nó I, como mostrado na Figura 5.4. No mesmo instante, o valor de menor temperatura foi de 21,83 °C, no nó II. Com esta situação a diferença entre estes valores de temperatura, neste instante, foi de 37,98 °C.

Na Figura 5.5 está mostrada a distribuição de temperatura após 144 horas, indicando-se alguns nós da linha central escolhidos para comparações com as análises por camadas. A Figura 5.6 mostra a evolução da temperatura ao longo desta análise para os nós escolhidos.



**Figura 5.4 – BL-A1 – Temperaturas da camada após 110 horas – valor de temperatura máxima da camada**

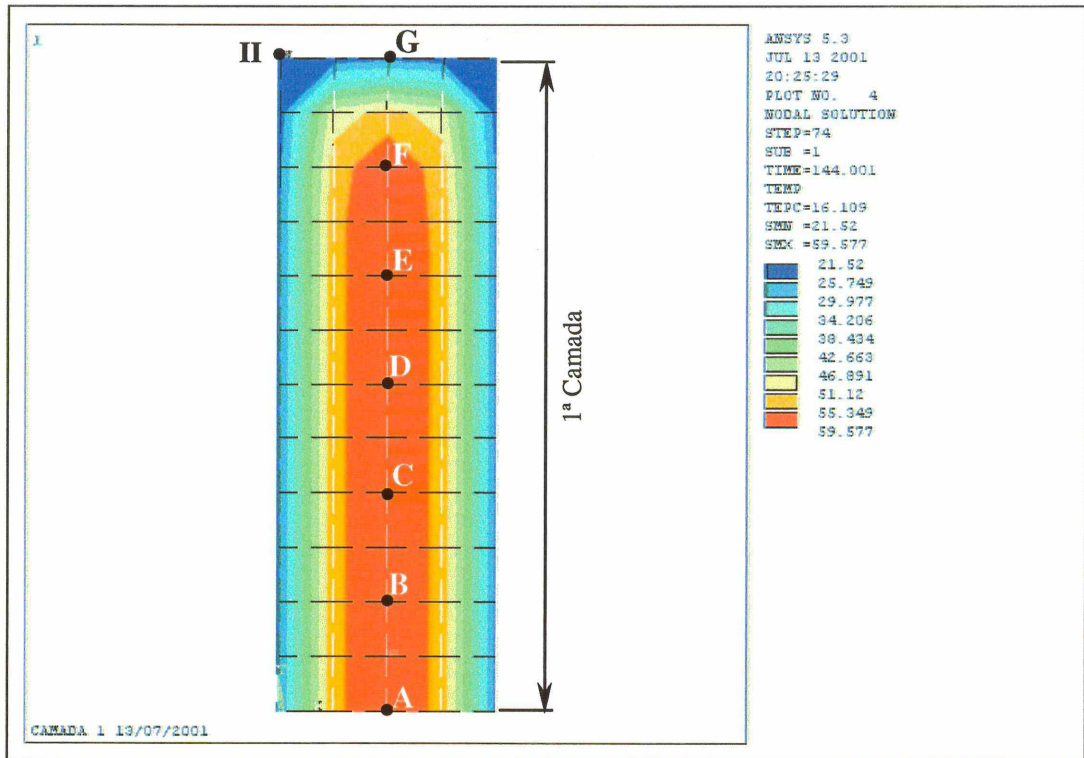


Figura 5.5 – BL-1 – Temperaturas da camada após 144 horas

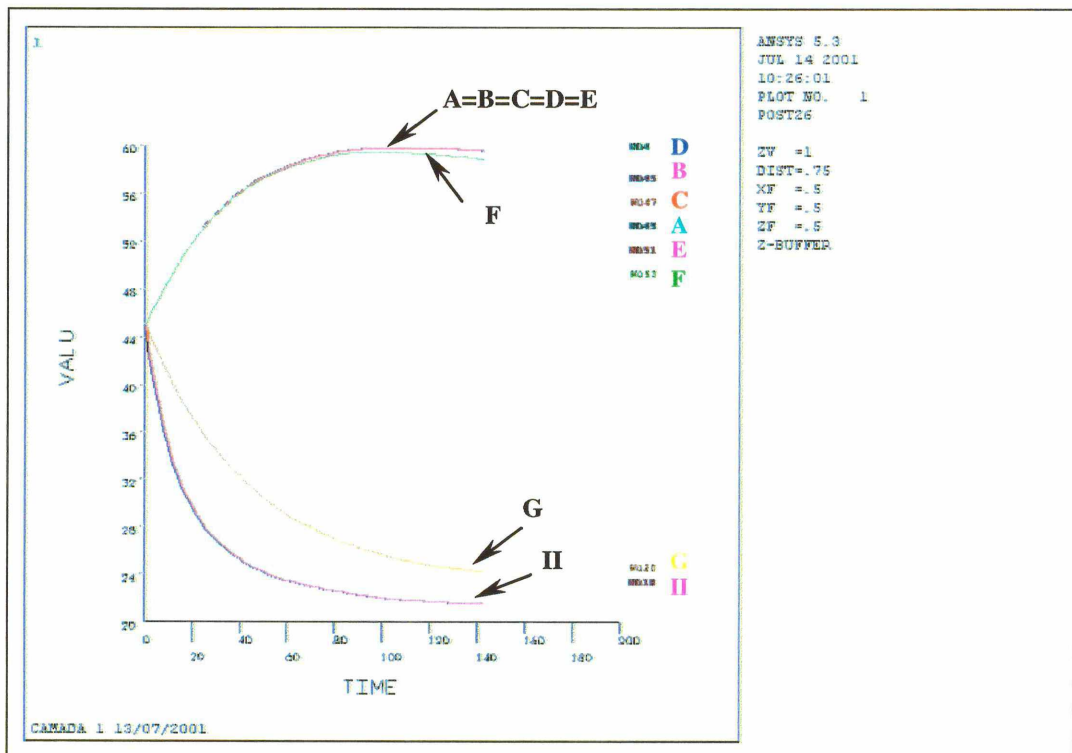


Figura 5.6 – BL-A1 – Resultados nodais - linha central vertical – 144 horas

Posteriormente, foi efetuada a análise considerando-se a execução das três camadas em seqüência, hipótese BL-A2. O intervalo de tempo entre o lançamento de cada camada foi considerado constante. Os valores adotados foram os seguintes:

- ◊ Temperatura inicial da camada = 45°C
- ◊ Temperatura ambiente = 20°C
- ◊ Intervalo de tempo entre as camadas = 48 horas
- ◊ Incremento de tempo da análise = 2 horas

Foi utilizada a mesma malha de elementos finitos com elementos quadrangulares lineares de 1,0 x 1,0 m. Cada camada era identificada como uma área. Para a solução do problema foram inicialmente ativados os nós dos elementos referentes à primeira área (primeira camada = primeiro bloco). Foram aplicados nos nós ativos carregamentos nodais, com o valor da temperatura inicial (45°C) e as condições de contorno do problema. Os nós inativos foram restringidos, ou seja, tiveram seus graus de liberdade anulados de modo a se evitar instabilidade numérica. Efetuou-se a primeira resolução do problema, com intervalo de tempo infinitesimal, definindo-se a distribuição de temperaturas inicial para os demais passos de carga da análise transiente da camada. A seguir foram efetuadas as sucessivas resoluções ao longo do tempo até o lançamento da próxima camada (48 horas), com o incremento de tempo definido (2 horas). Ao final do período estabelecido entre camadas, já se pode avaliar a distribuição do campo de temperaturas nesta camada.

Posteriormente foram ativados os elementos da segunda camada, restringindo-se os nós que permaneceram inativos (da terceira camada). Aplicaram-se a temperatura inicial e as condições de contorno desta nova camada. Efetuou-se novamente uma análise com intervalo de tempo infinitesimal, e foram repetidos os passos da análise da primeira camada. Obteve-se a nova distribuição de temperaturas que considerou, além das condições de contorno já definidas, a influência da primeira sobre a segunda camada.

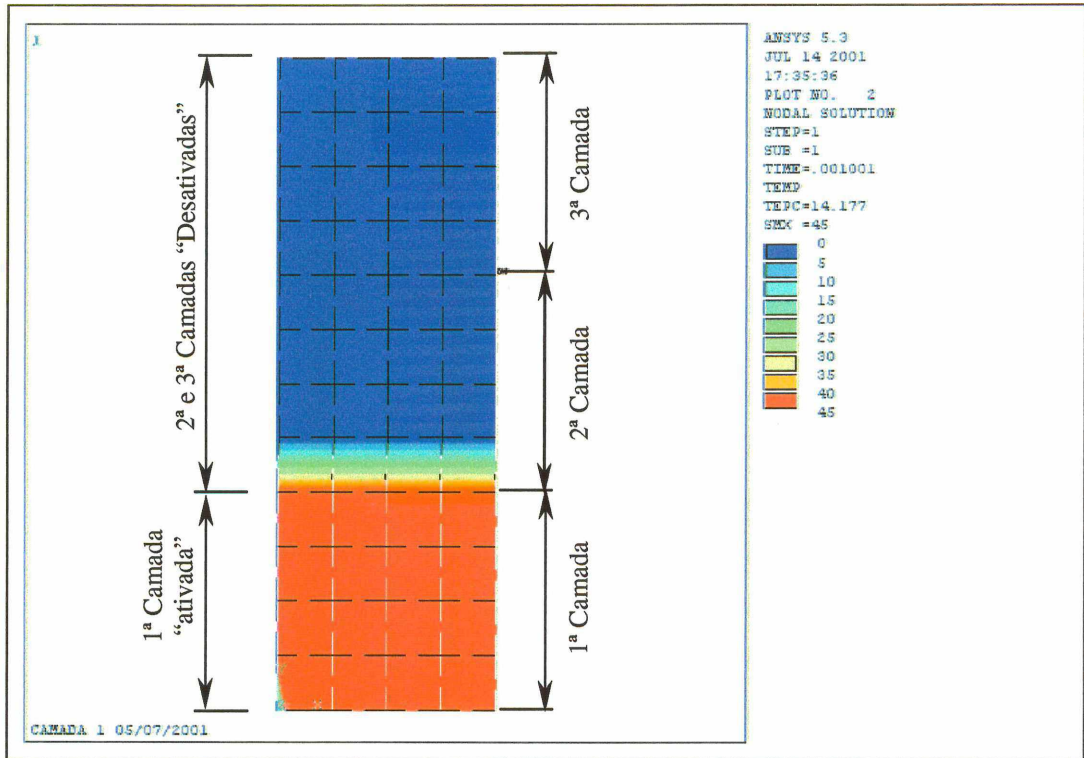
Os passos descritos foram repetidos para a terceira camada, até ser obtida a distribuição de temperaturas no tempo final desejado. Com a simulação da sobreposição das camadas observa-se que a distribuição da temperatura não é uniforme ao longo dos três blocos, como na situação anterior. Mostra a influência não só da transferência de calor com o meio ambiente como da temperatura de lançamento de uma camada sobre a outra.

As Figuras 5.7 a 5.13 apresentam a distribuição resultante de temperaturas nas camadas durante o lançamento do concreto em cada camada, e após decorridas 48, 96, 110 e 144 horas do início da concretagem. Nas figuras apresentadas, o valor nulo refere-se aos elementos desativados das camadas ainda não executadas, cuja representação gráfica permanece.

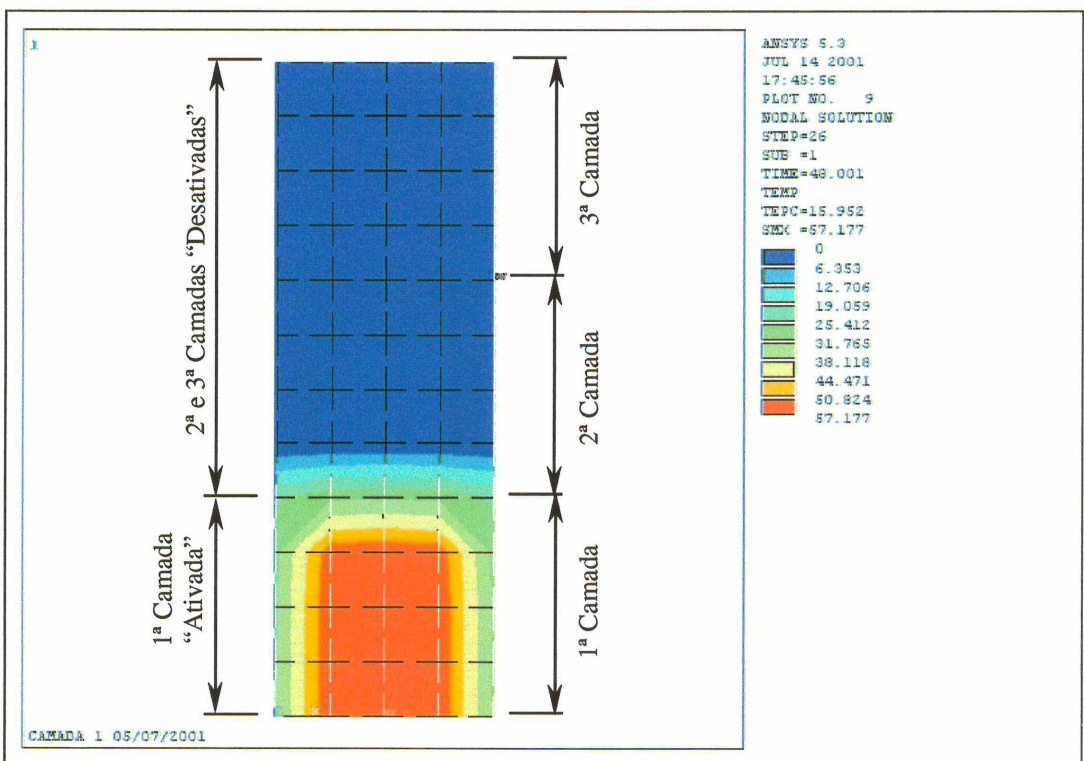
Nesta análise, o valor máximo resultou no nó inferior da linha central, nó “A”, com 59,81 °C, aproximadamente o mesmo valor resultante da primeira análise (BL-A1). Observou-se que o valor de menor temperatura neste instante foi de 25,18 °C e ocorreu na lateral da primeira camada. A diferença entre a temperatura máxima e a menor temperatura da estrutura neste mesmo instante, com simulação da execução das camadas, resultou 34,63 °C (Figura 5.12).

Concluiu-se que, mesmo obtendo-se valores muito próximos para a temperatura máxima nas duas análises efetuadas, a reprodução da execução das camadas resultou, para este instante, em uma diferença menor entre a temperaturas máxima e a menor temperatura na estrutura. Ao se identificar os pontos de temperatura máxima e mínima que resultaram nesta diferença nota-se, entretanto, que estes estão mais próximos entre si do que na primeira simulação. Isto indica que, se em uma fase de projeto de uma estrutura, as análises térmicas não levam em conta a seqüência construtiva, podem ser negligenciados gradientes térmicos e conseqüentes tensões significativas em pontos não esperados.

A Figura 5.14 mostra a evolução da temperatura ao longo desta análise para os nós da linha central escolhidos.



**Figura 5.7 – BL-A2 – Primeira camada – temperatura de lançamento**



**Figura 5.8 – BL-A2 – Primeira camada – após 48 horas**

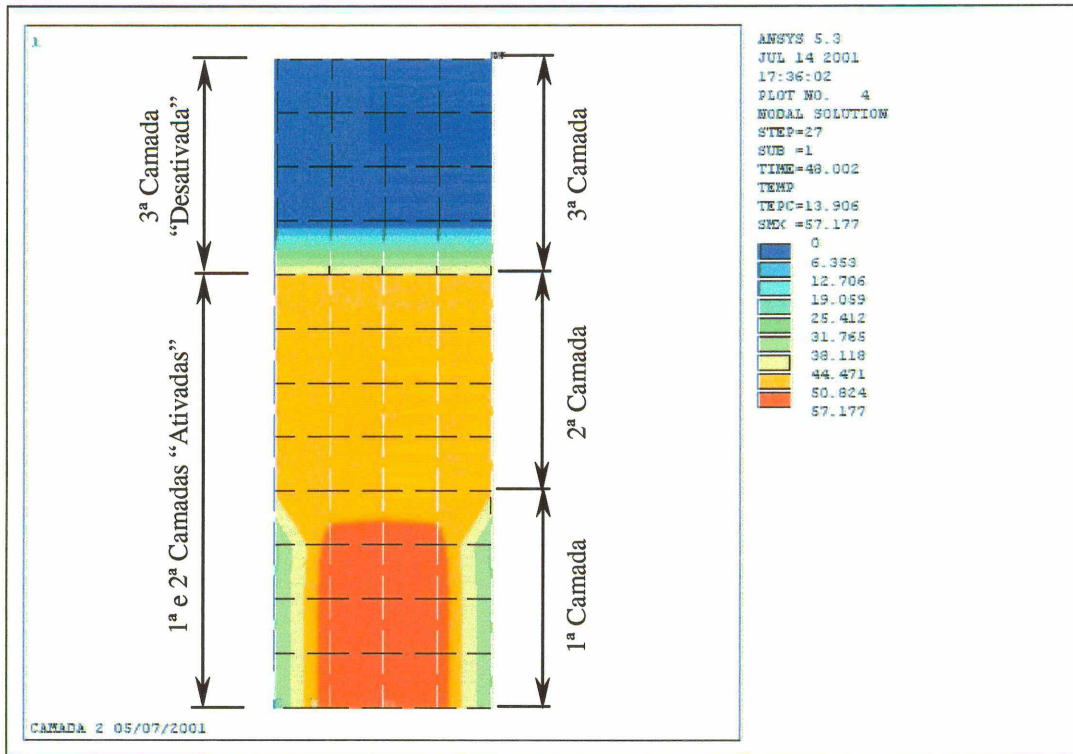


Figura 5.9 - BL-A2 – Segunda camada – temperatura de lançamento

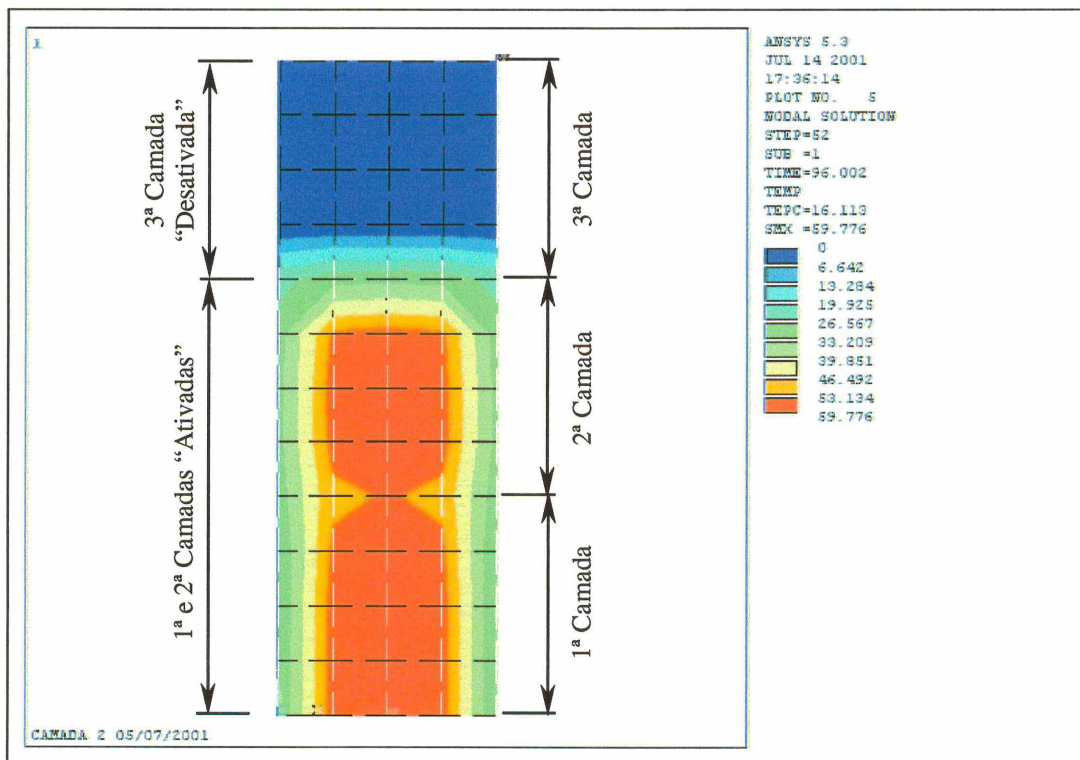


Figura 5.10 - BL-A2 – Primeira e segunda camadas – temperatura após 96 horas

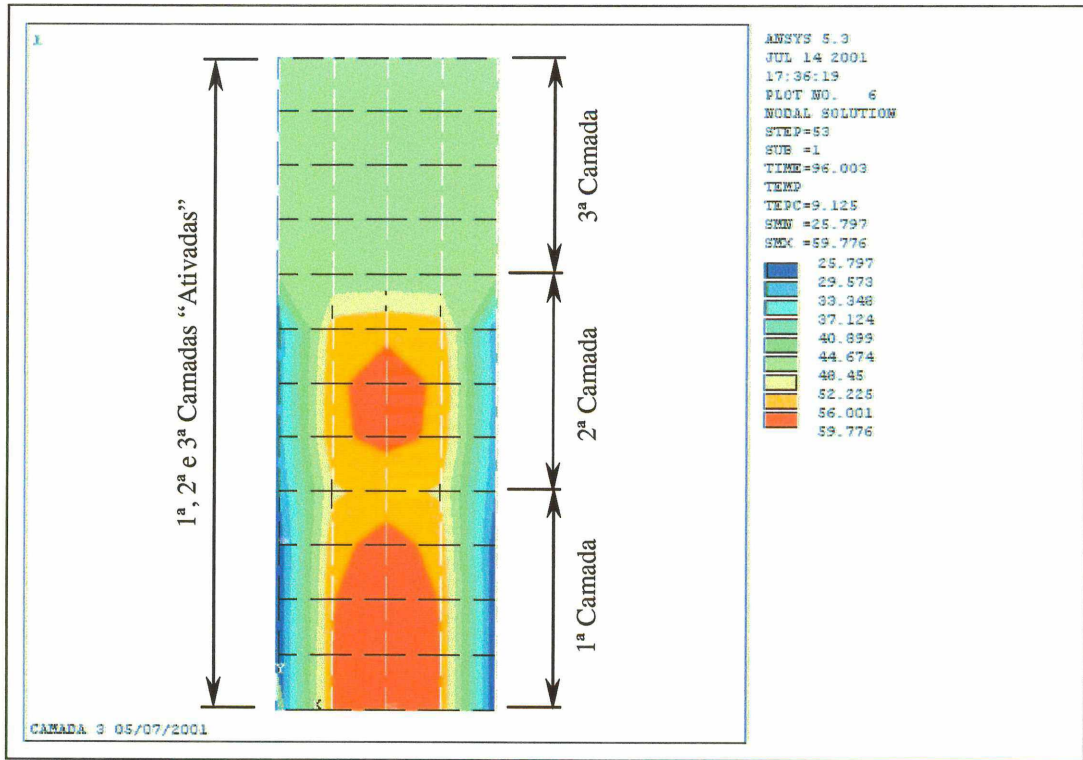


Figura 5.11 - BL-A2 – Terceira camada – temperatura de lançamento

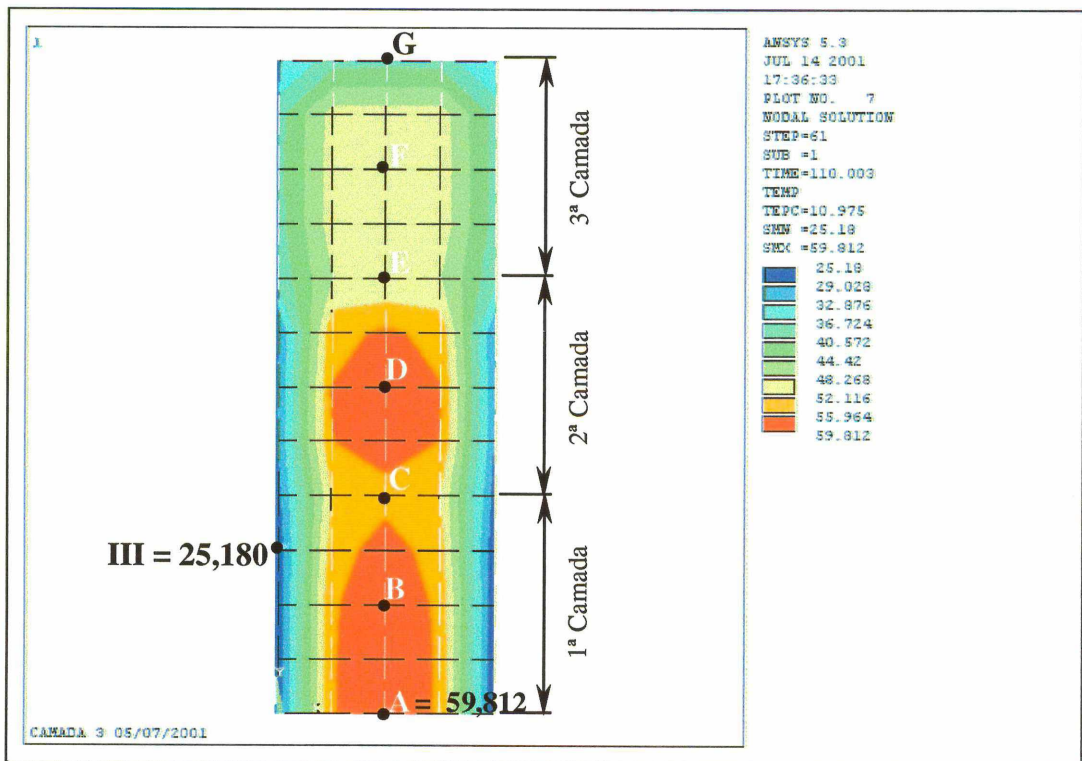


Figura 5.12 – BL-A2 – Temperaturas das camadas após 110 horas – valor de temperatura máxima das camadas

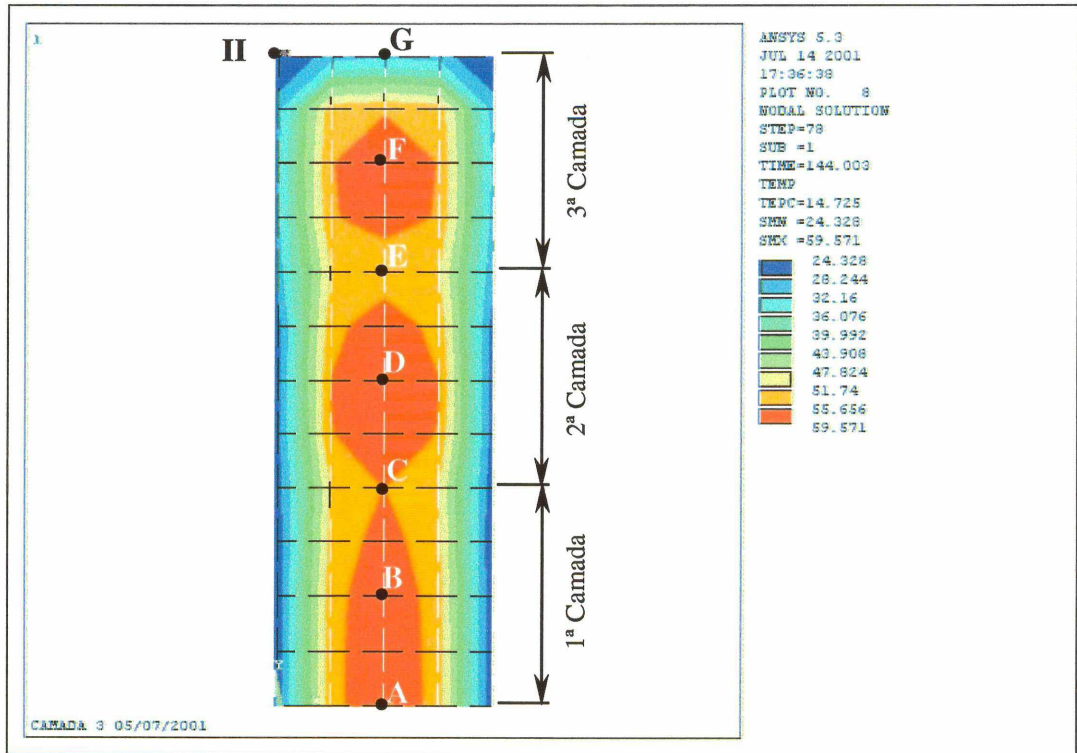


Figura 5.13 – BL-A2 – Temperaturas das camadas após 144 horas

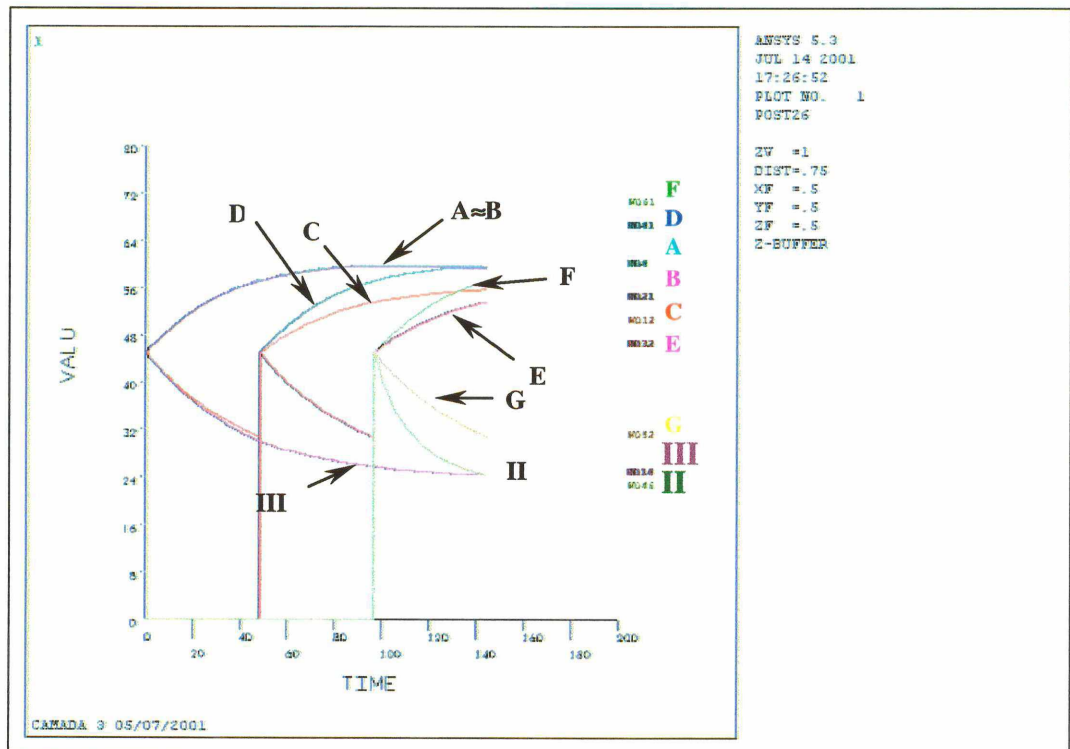


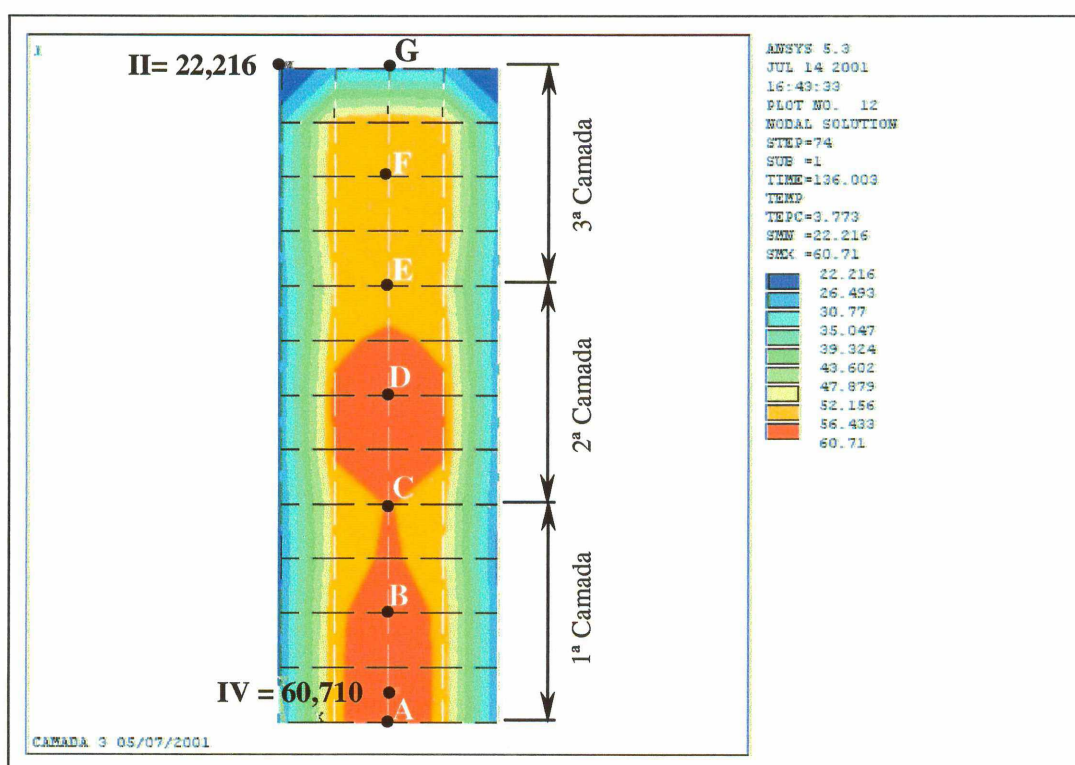
Figura 5.14 – BL-A2 – Resultados nodais - elementos lineares (4 nós) - linha central vertical – 144 horas

Como a malha adotada inicialmente era rudimentar, repete-se o mesmo procedimento de análise por camadas, com a substituição dos elementos quadrangulares lineares por elementos quadrangulares quadráticos (8 nós), com 1,0 m de lado. Esta hipótese foi denominada BL-A3.

O valor máximo resultante foi 60,71 °C no nó “IV” da linha central, mostrado na Figura 5.15. O valor mínimo neste instante foi de 22,22 °C, na lateral da terceira camada (nó “II”) e o gradiente máximo de temperatura resultou 38,49 °C.

Decorridas 144 horas do início da concretagem, a distribuição de temperaturas resultante nos blocos é a apresentada na Figura 5.16. Na Figura 5.17 está mostrada a evolução da temperatura para os nós da linha central, bem como dos nós “II” e “IV”.

Com os elementos quadráticos a distribuição de temperaturas apresentou uma variação mais gradual entre as camadas, não reproduzindo de forma acentuada o gradiente térmico detectado na análise da primeira camada com elementos lineares.



**Figura 5.15 – BL-A3 – Temperaturas das camadas após 136 horas – valor de temperatura máxima das camadas – elementos quadrangulares quadráticos**

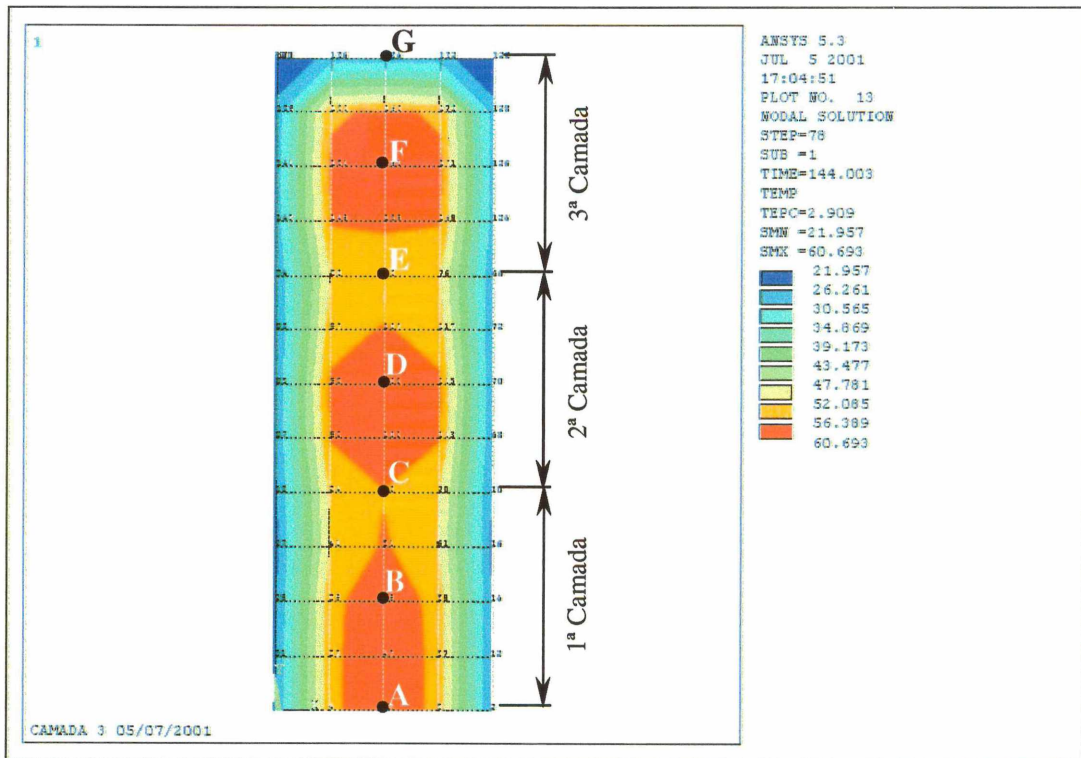


Figura 5.16 – BL-A3 – Temperaturas das camadas após 144 horas – elementos quadrangulares quadráticos

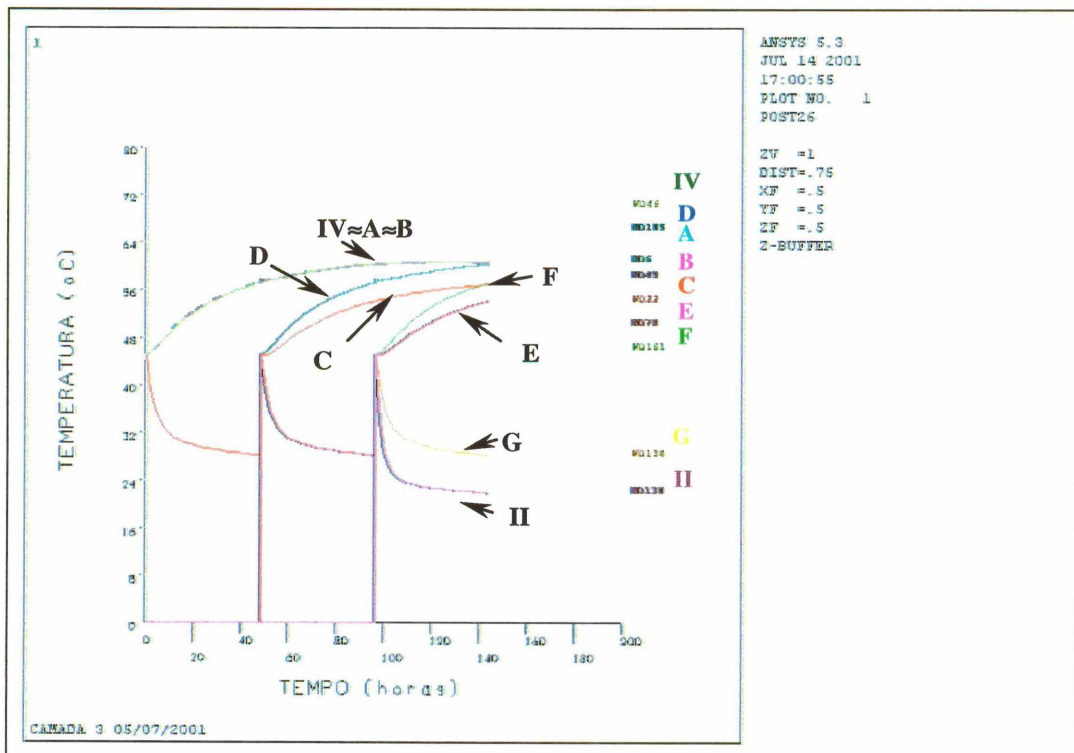


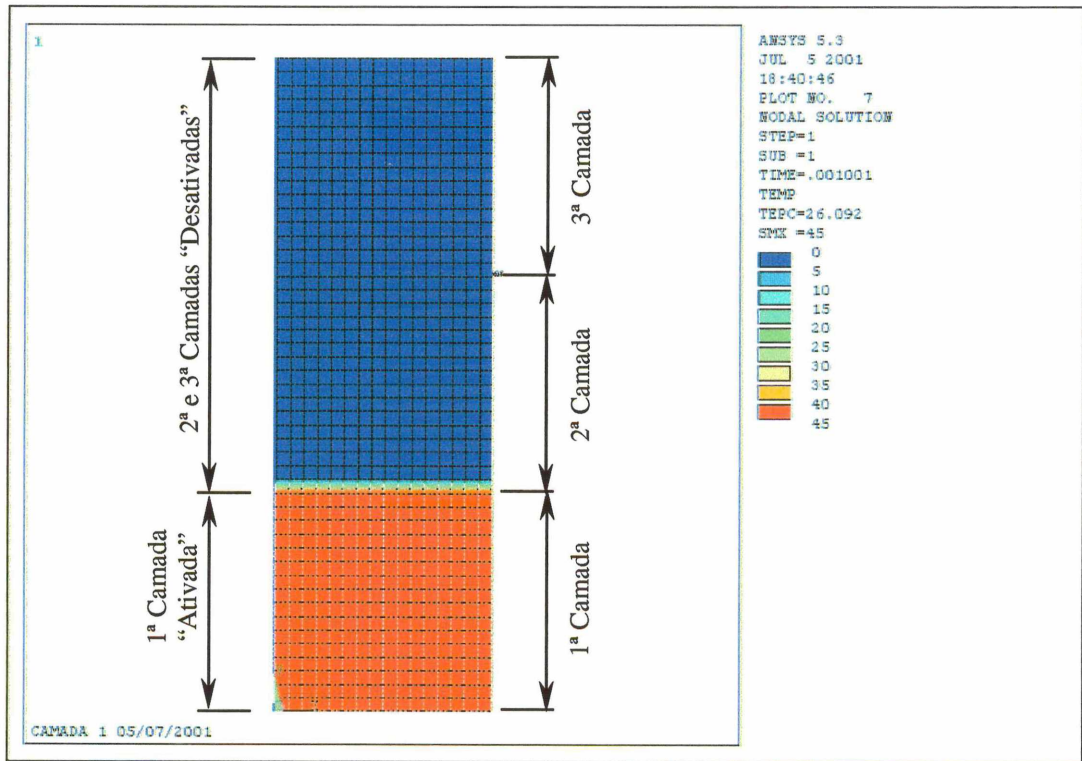
Figura 5.17 – BL-A3 – Resultados nodais - elementos quadráticos (8 nós) - linha central vertical – 144 horas – elementos quadrangulares quadráticos

Nas duas análises por camadas observa-se que os elementos da interface entre uma camada ativada (já executada) e outra inativa apresentam uma variação de temperatura não correspondente ao problema. Os nós da face ativada apresentam valores de temperatura variáveis a partir do lançamento da camada e correspondentes ao instante analisado. Já os nós da face inativa apresentam valores nulos.

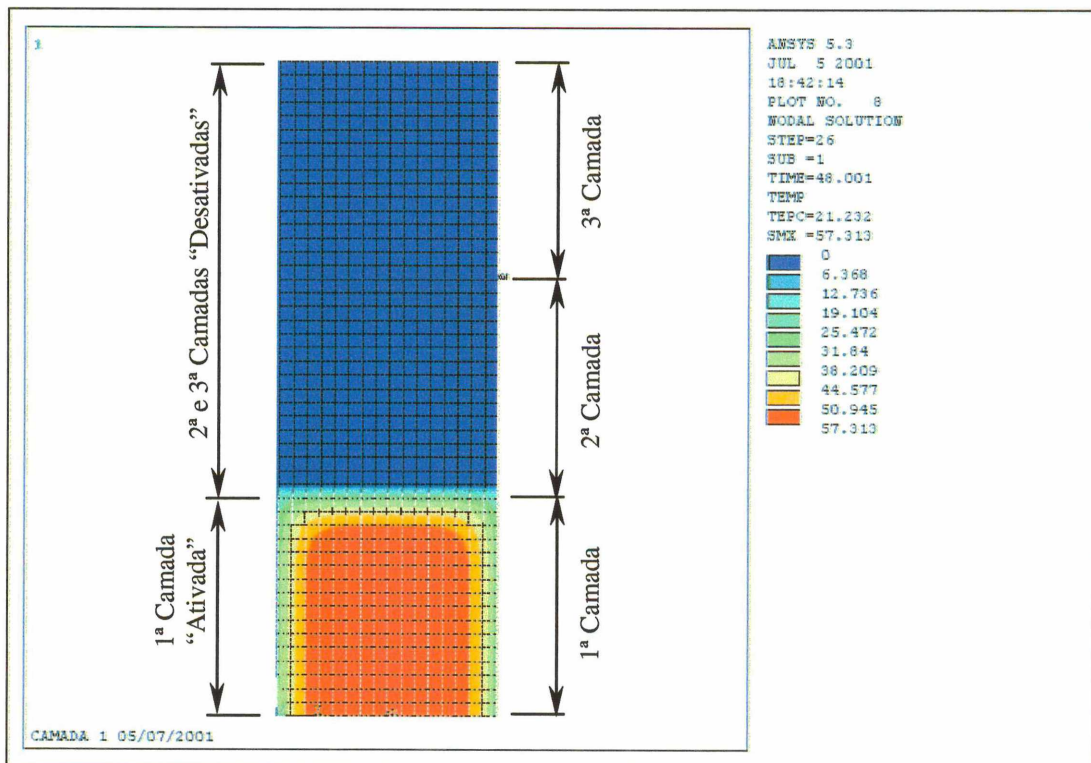
A representação gráfica do *ANSYS®/Multiphysics* faz uma interpolação linear entre os valores nodais dos elementos e, por isso, nos elementos de interface, há um graduação de cores que deve ser desconsiderada. Para avaliar este comportamento, e a influência da dimensão do elemento, foi gerada uma nova malha representando as três camadas com elementos lineares de 0,25 x 0,25 m (hipótese BL-A4).

Conforme mostrado nas Figuras 5.18 a 5.23 e Tabela 5.2, os valores de temperatura nodal resultantes não apresentaram diferenças significativas. A distribuição do campo de temperaturas resultantes apresentou variações mais regulares e graduais.

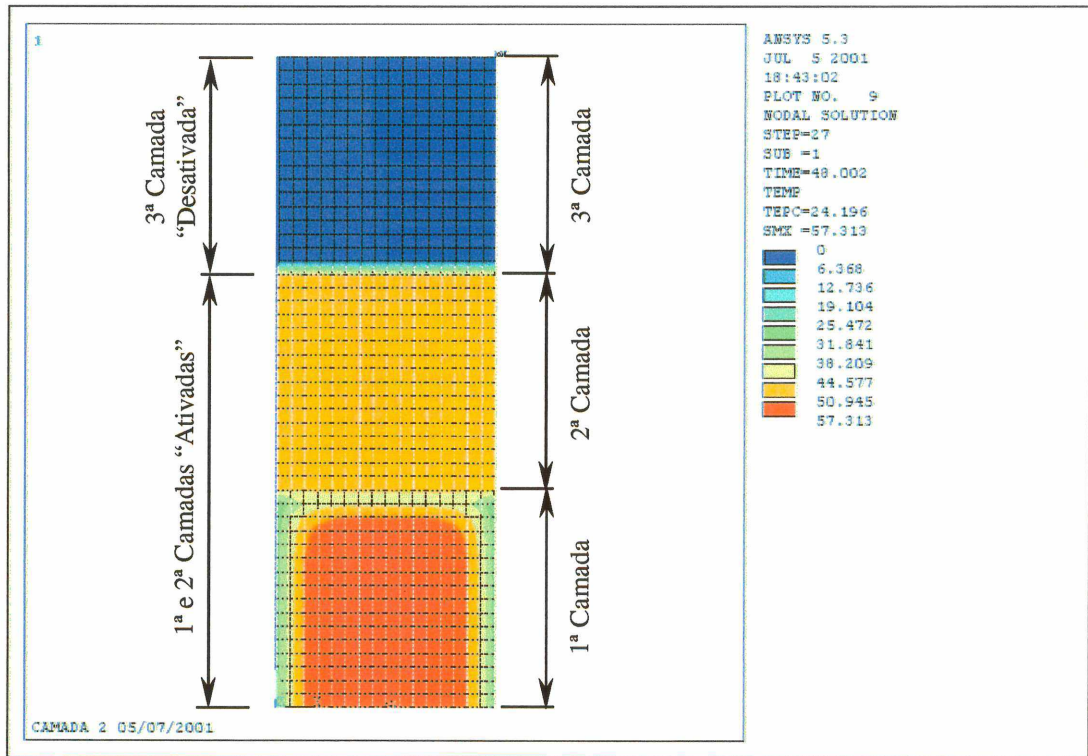
Nesta análise, o valor máximo de temperatura foi no nó “A”, 60,67 °C. A menor temperatura da estrutura neste instante foi de 25,19 °C na lateral da primeira camada resultando em uma diferença de temperatura de 34,48 °C (Figura 5.23).



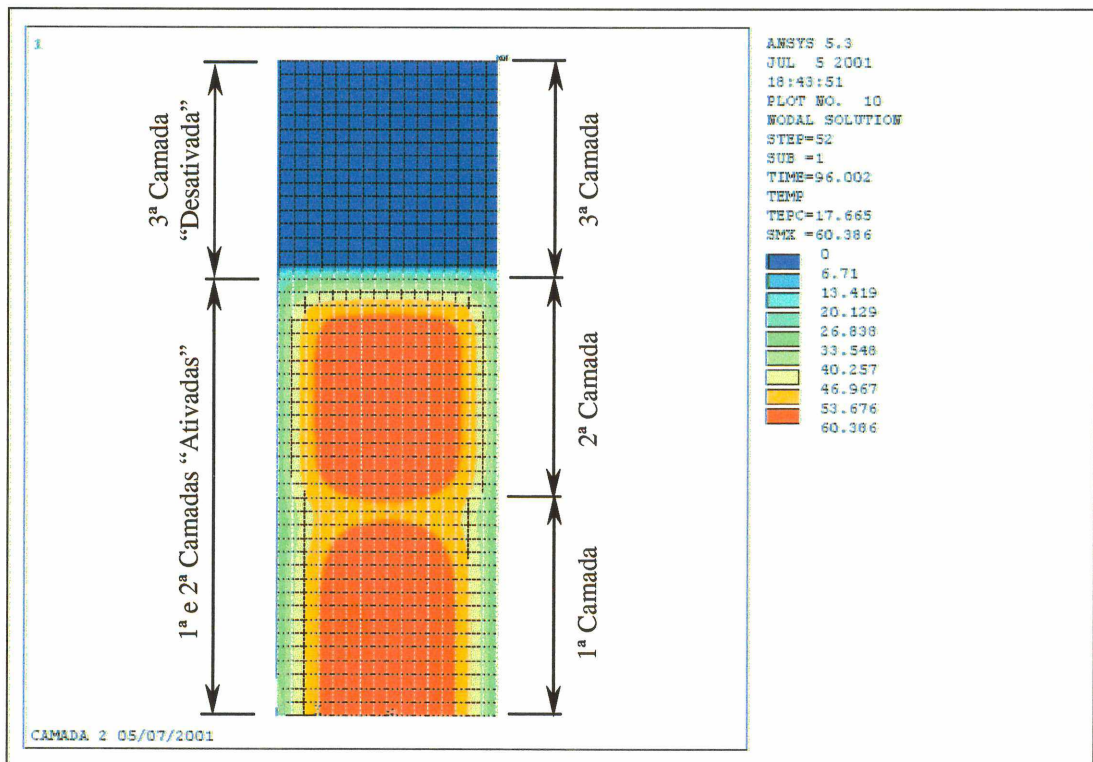
**Figura 5.18 – BL-A4 – Primeira camada – temperatura de lançamento**



**Figura 5.19 – BL-A4 – Primeira camada – após 48 horas**



**Figura 5.20 – BL-A4 – Segunda camada – temperatura de lançamento**



**Figura 5.21 – BL-A4 – Primeira e segunda camada – temperatura após 96 horas**

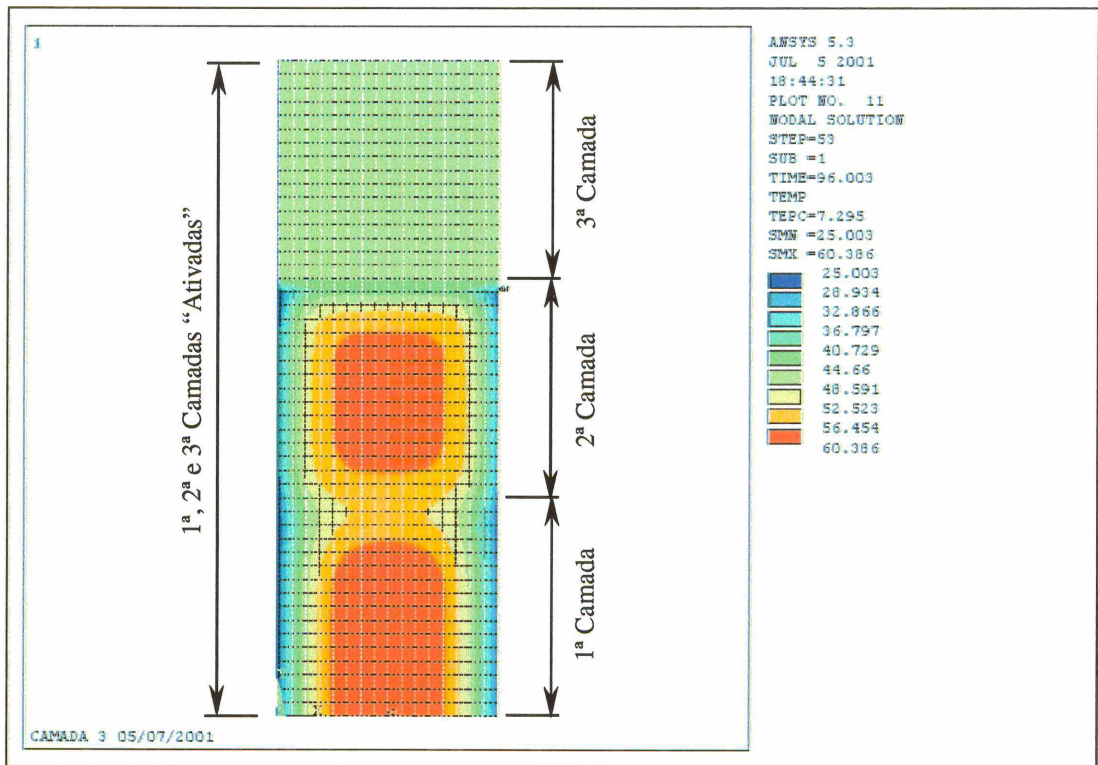


Figura 5.22 – BL-A4 – Terceira camada – temperatura de lançamento

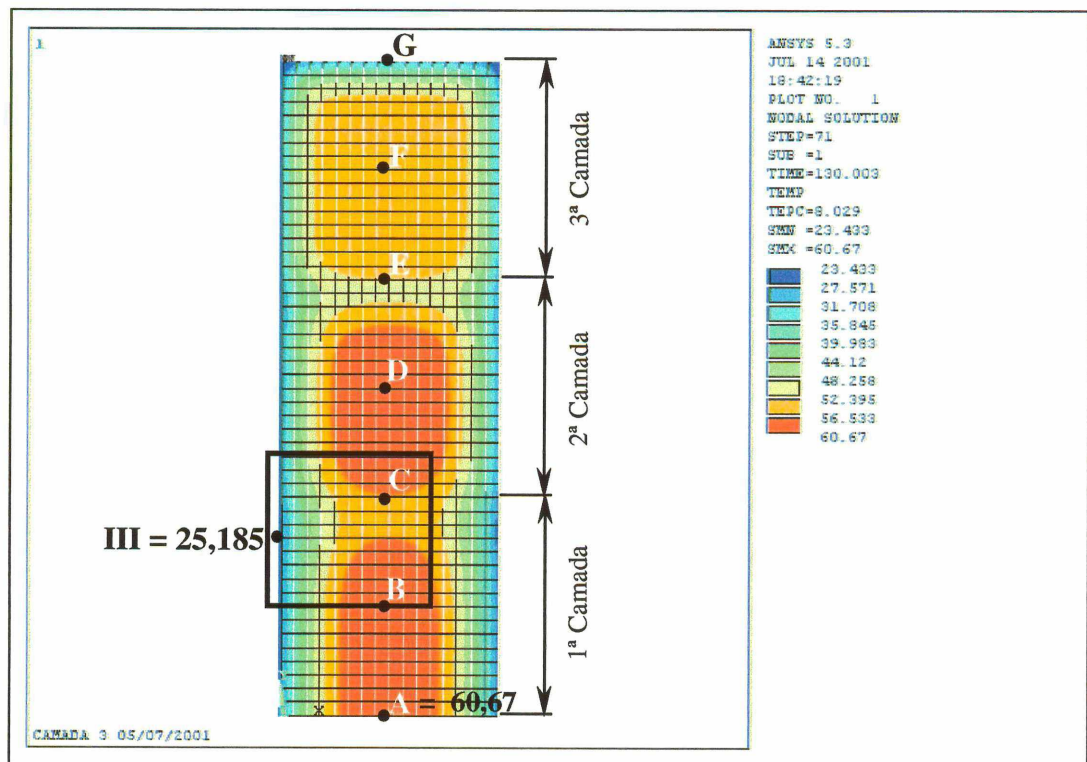


Figura 5.23 – BL-A4 – Temperaturas das camadas após 130 horas – valor de temperatura máxima das camadas

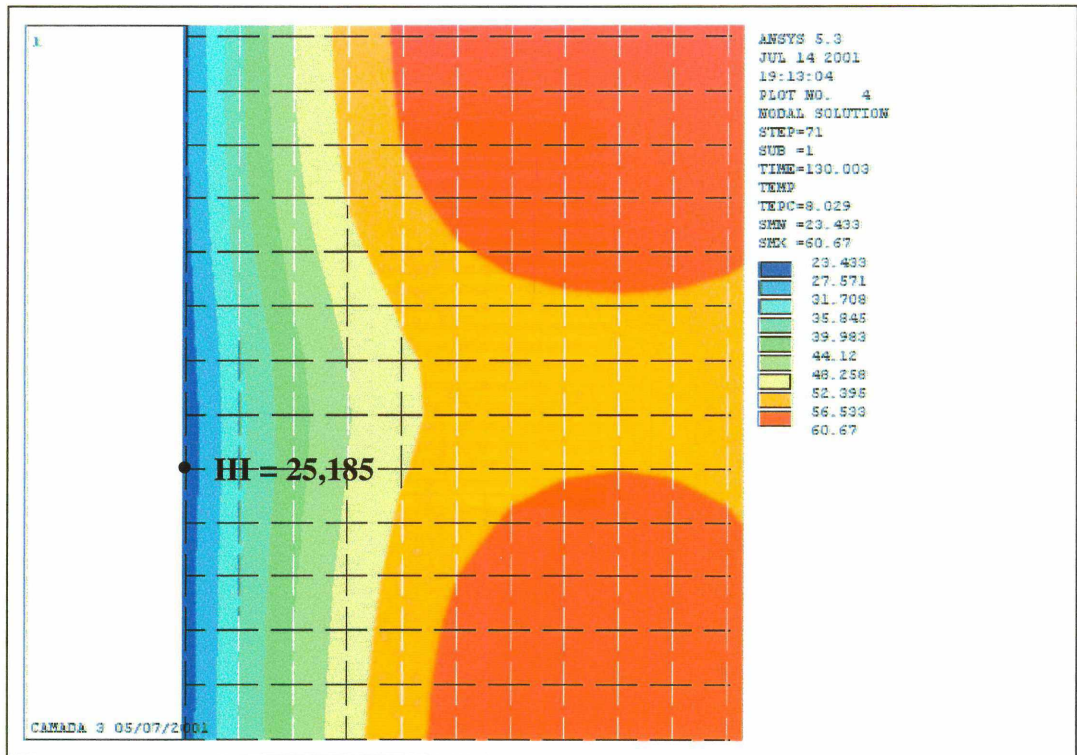


Figura 5.24 – BL-A4 – Temperaturas das camadas após 130 horas – detalhe da menor temperatura no instante de temperatura máxima das camadas

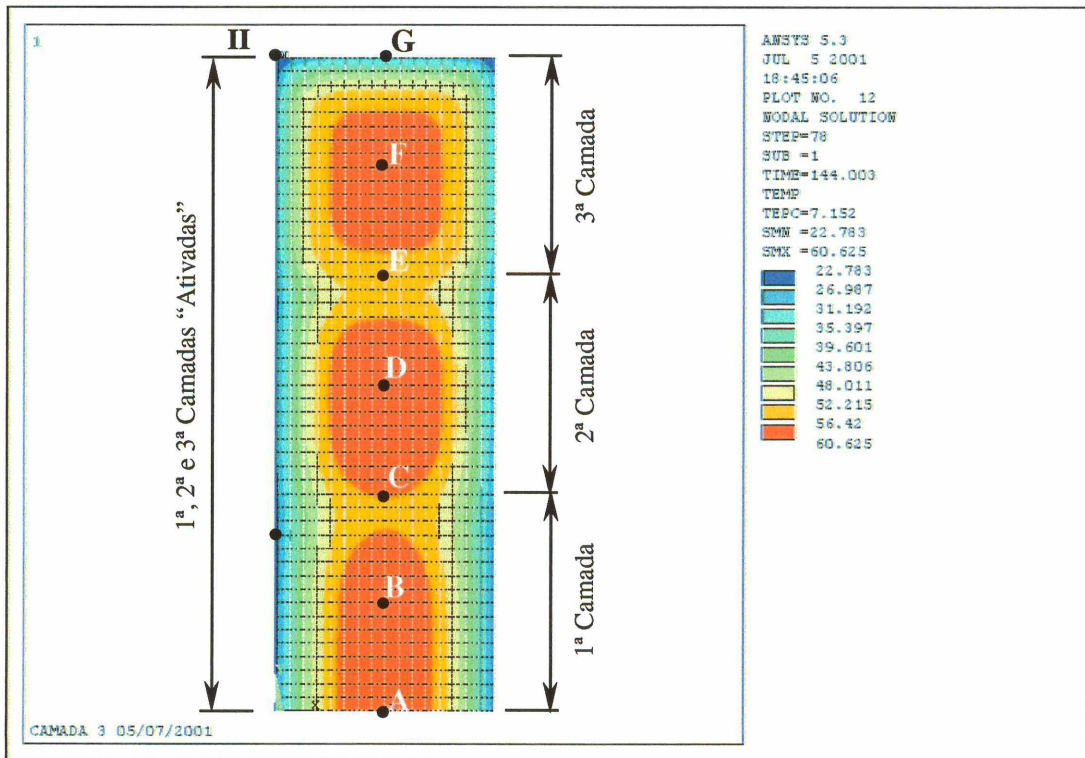
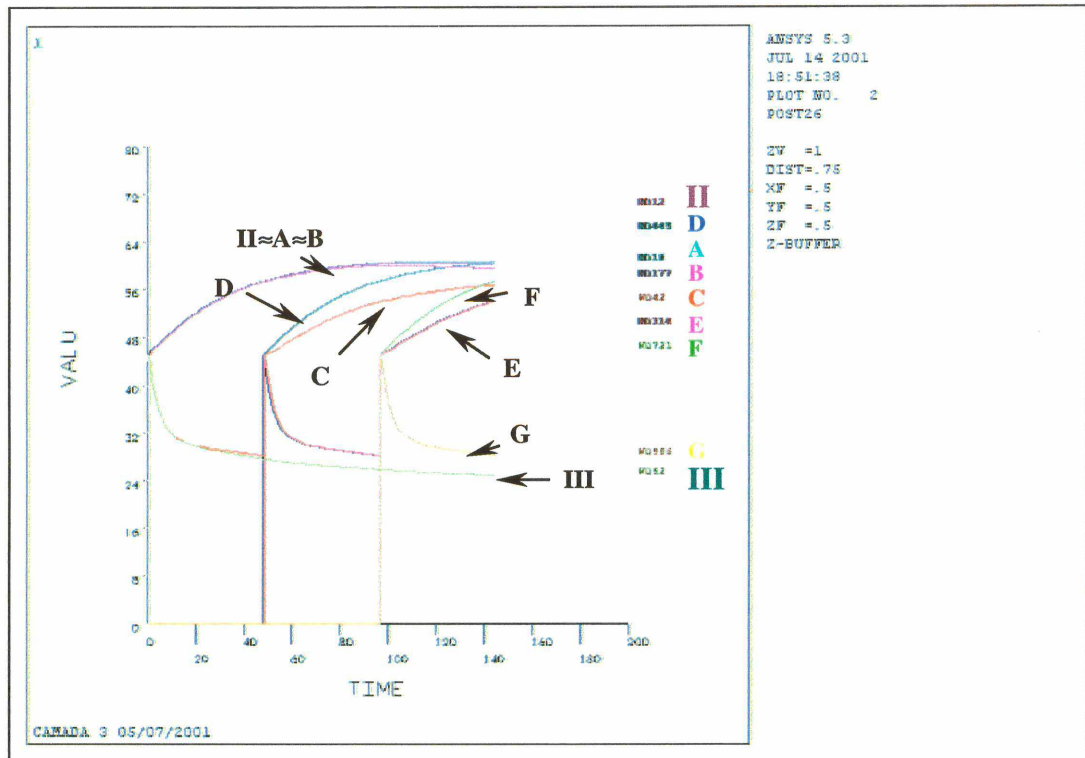


Figura 5.25 – BL-A4 – Temperaturas das camadas – após 144 horas



**Figura 5.26 – BL-A4 – Resultados nodais - elementos lineares (4 nós) - linha central vertical – 144 horas**

Na Tabela 5.2 são comparados os valores máximos da temperatura nos nós selecionados, e as diferenças entre o valor máximo e a menor temperatura na estrutura, no instante de temperatura máxima para as quatro análises efetuadas.

Com os resultados apresentados, percebe-se que a variação na distribuição da temperatura à medida que as camadas eram executadas foi representada adequadamente, de forma qualitativa. Esta distribuição mostrou-se mais regular e gradual com o refino da malha de elementos finitos, não havendo, para esses casos, variação significativa nos valores de temperatura nodal.

Comparando-se os valores da primeira análise, BL-A1, com uma única camada observa-se que a simulação da seqüência construtiva permite a avaliação da variação da temperatura no interior da estrutura. Pode ser identificada a influência de uma camada sobre a outra e gradientes de temperatura em pontos próximos às interfaces entre as camadas.

**TABELA 5.2 – RESULTADOS NODAIS - LINHA CENTRAL VERTICAL**

NÓ	Coordenadas nodais		BL-A1		BL-A2		BL-A3		BL-A4	
	X (m)	Y (m)	T <sub>máx.</sub> (°C)	t (horas)	T <sub>máx.</sub> (°C)	t (horas)	T <sub>máx.</sub> (°C)	t (horas)	T <sub>máx.</sub> (°C)	t (horas)
A	2,0	0,0	59,81	110	59,81	110	60,71	136	60,67	130
B	2,0	2,0	59,81	110	59,58	102	60,52	124	60,45	120
C	2,0	4,0	59,81	110	55,62	144	56,85	144	56,66	144
D	2,0	6,0	59,81	110	59,52	144	60,19	144	60,29	144
E	2,0	8,0	59,81	110	53,55	144	54,09	144	53,87	144
F	2,0	10,0	59,45	96	57,11	144	57,14	144	57,31	144
G	2,0	12,0	45,00	0	45,00	96	45,00	96	45,00	96
$\Delta T^*$ (°C)			37,98		34,63		38,49		34,49	

(\*) – Diferença entre a temperatura máxima e o menor valor de temperatura da estrutura no mesmo instante.

Este exemplo não salientou variações acentuadas de temperatura quando analisado por camadas. A técnica favorável da execução por camadas será destacada nos próximos exemplos.

### 5.3.2 Viga de concreto da Casa de Força da Usina Hidrelétrica Serra da Mesa

Para a avaliação da sistemática apresentada neste estudo, utilizou-se parcialmente o exemplo apresentado em Andrade (1997), no qual são analisadas através do Método dos Elementos Finitos as vigas de suporte das pontes rolantes da casa de força da Usina Hidrelétrica Serra da Mesa.

Tais vigas de concreto possuem cerca de 130 m de comprimento sendo, as vigas de jusante divididas em 16 módulos de comprimentos variáveis, através de 15 juntas de retração. A estrutura é atirantada no maciço rochoso da casa de força em caverna, com a geometria mostrada na Figura 5.27.

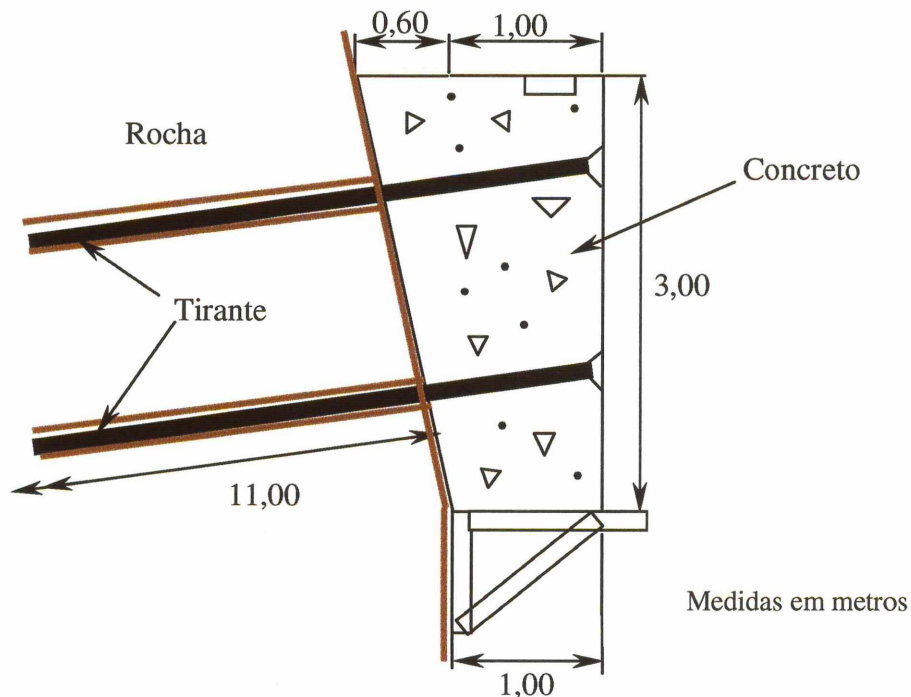
O caso em referência visa a análise térmica e de tensões para a otimização do intervalo de lançamento do concreto entre as camadas, a execução das injeções e

protensões, o cimbramento das estruturas e a avaliação de pós-refrigeração do concreto com a circulação de água através de tubos embutidos no concreto.

Em Andrade (1997) a análise foi efetuada também por camadas com programa computacional específico desenvolvido com base em Wilson (1968). No presente trabalho foram utilizados para comparação, somente os resultados da análise térmica da concretagem em camadas. Considerou-se o contato concreto-rocha com fluxo nulo de calor e nas outras superfícies transferência de calor por convecção, adotando-se parâmetros de contato concreto-madeira-ar.

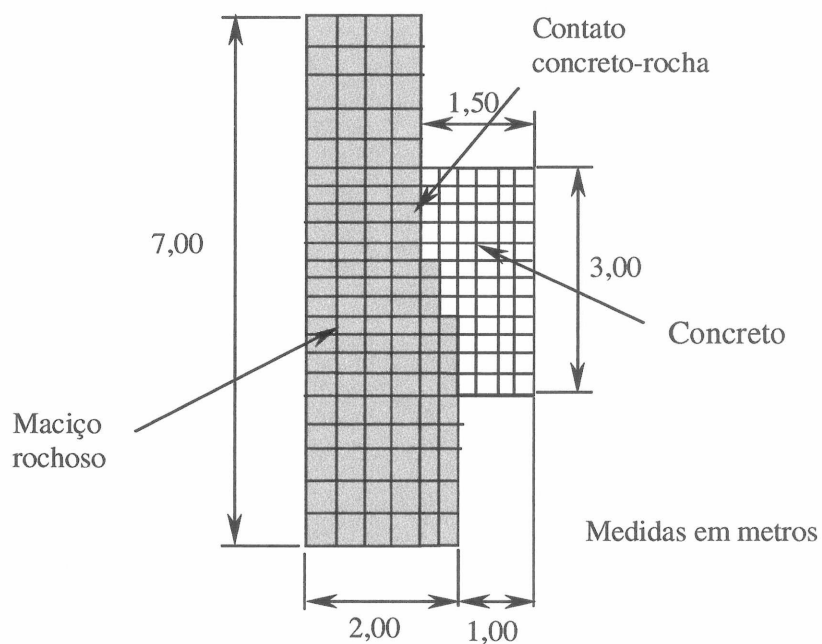
As propriedades térmicas do material adotadas nas análises são apresentados na seqüência.

- ◇ Massa específica =  $2295 \text{ kg/m}^3$
- ◇ Calor específico =  $1063 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  ( $1063 \text{ J/kgK}$ )
- ◇ Condutividade térmica =  $8172 \text{ J/mh}^\circ\text{C}$  ( $2,27 \text{ W/mK}$ )
- ◇ Coeficiente de dilatação térmica =  $12,5 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$  ( $12,5 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ )
- ◇ Coeficiente de transferência de calor:  
Concreto-forma de madeira =  $8374 \text{ J/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  ( $2 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} = 2,33 \text{ W/mK}$ )



**Figura 5.27 – Seção típica da viga de concreto**

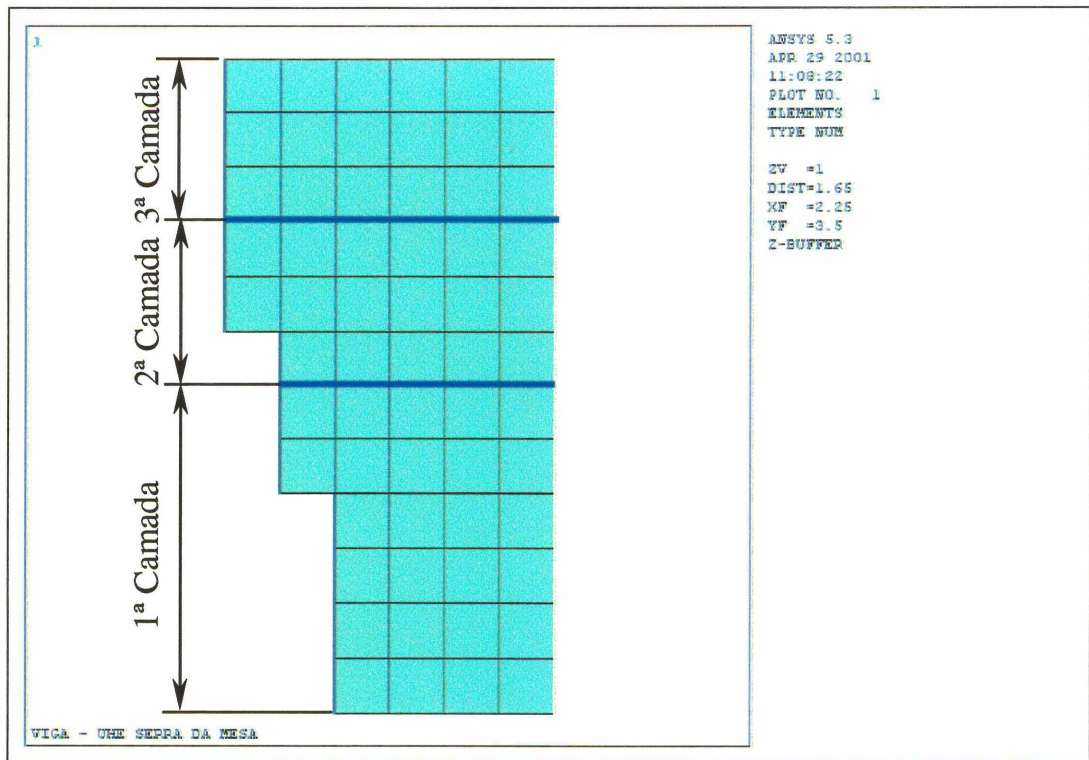
Para a análise apresentada em Andrade (1997), a seção típica da viga foi discretizada em elementos quadrangulares como mostrado na Figura 5.28.



**Figura 5.28 – Discretização da viga de concreto – Andrade (1997)**

Como o objetivo deste trabalho é avaliar a simulação da execução das camadas, e o fluxo de calor no contato-rocha foi considerado nulo, somente a estrutura de concreto foi discretizada em uma malha com elementos quadrangulares lineares (4 nós), mostrada na Figura 5.29.

A curva de evolução adiabática de temperatura do concreto foi transformada em uma curva de geração de calor utilizando-se a Lei de Fourier, conforme apresentado no Anexo 2 e mostrado na Tabela 5.3 e Figuras 5.30 e 5.31.

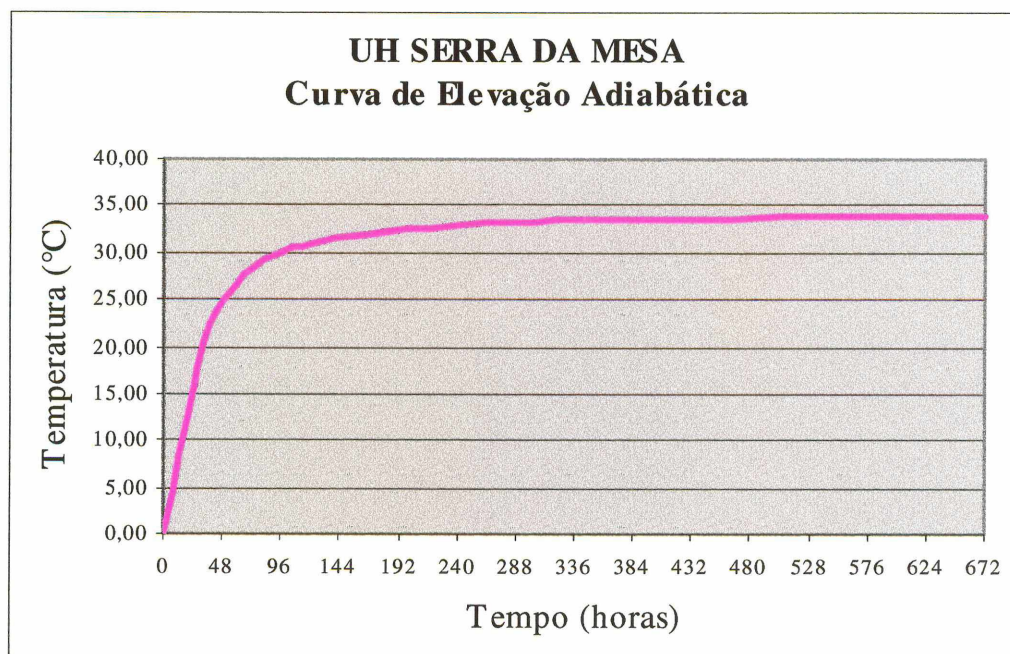


**Figura 5.29 – Discretização da viga de concreto**

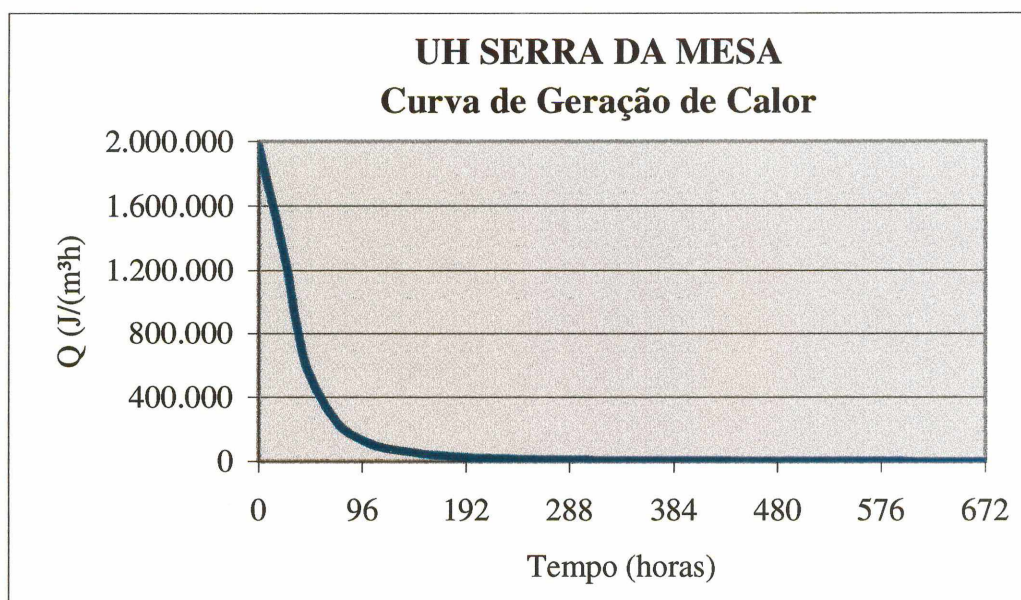
A temperatura ambiente considerada em todas as simulações foi de 25,5 °C, temperatura média na região, segundo Andrade, (1997).

**TABELA 5.3 – ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA E CURVA DE GERAÇÃO DE CALOR**

Tempo		T (°C)	Q J/(m <sup>3</sup> h)
(dias)	(horas)		
0	0	0,00	1.974.031
1	24	16,02	1.282.815
1,5	36	21,48	825.359
2	48	24,75	527.686
3	72	28,22	247.001
4	96	29,94	134.525
5	120	30,94	81.624
7	168	32,02	37.176
10	240	32,79	15.689
15	360	33,35	5.758
28	672	33,84	1.202



**Figura 5.30 – Curva de evolução adiabática**



**Figura 5.31 – Curva de geração de calor**

Analogamente aos blocos de concreto do primeiro exemplo, foi efetuada uma análise preliminar considerando-se que a viga fosse executada em uma única camada denominada hipótese VH-00. A temperatura de lançamento do concreto adotada foi de 27 °C, valor inicial estabelecido em Andrade (1997). Efetuou-se a análise transiente ao longo de 504 horas (21 dias), com incremento de tempo de 12 horas (*load step*).

A execução da estrutura em uma camada apresentou o valor máximo de temperatura de 55,77 °C no contato concreto-rocha, nó “I”, 108 horas após o lançamento do concreto. Neste instante, o menor valor de temperatura resultou 37,87 °C, na extremidade inferior direita da viga, nó “II” conforme mostrado na Figura 5.32, sendo 17,90 °C a diferença entre estes valores de temperatura. Na Figura 5.33 está mostrada a distribuição de temperaturas após 504 horas de análises e, na Figura 5.34, a evolução da temperatura nos nós selecionados.

Nesta situação de concretagem, a dissipação do calor ocorreu de forma gradual e relativamente uniforme nas superfícies que não estavam em contato com rocha.

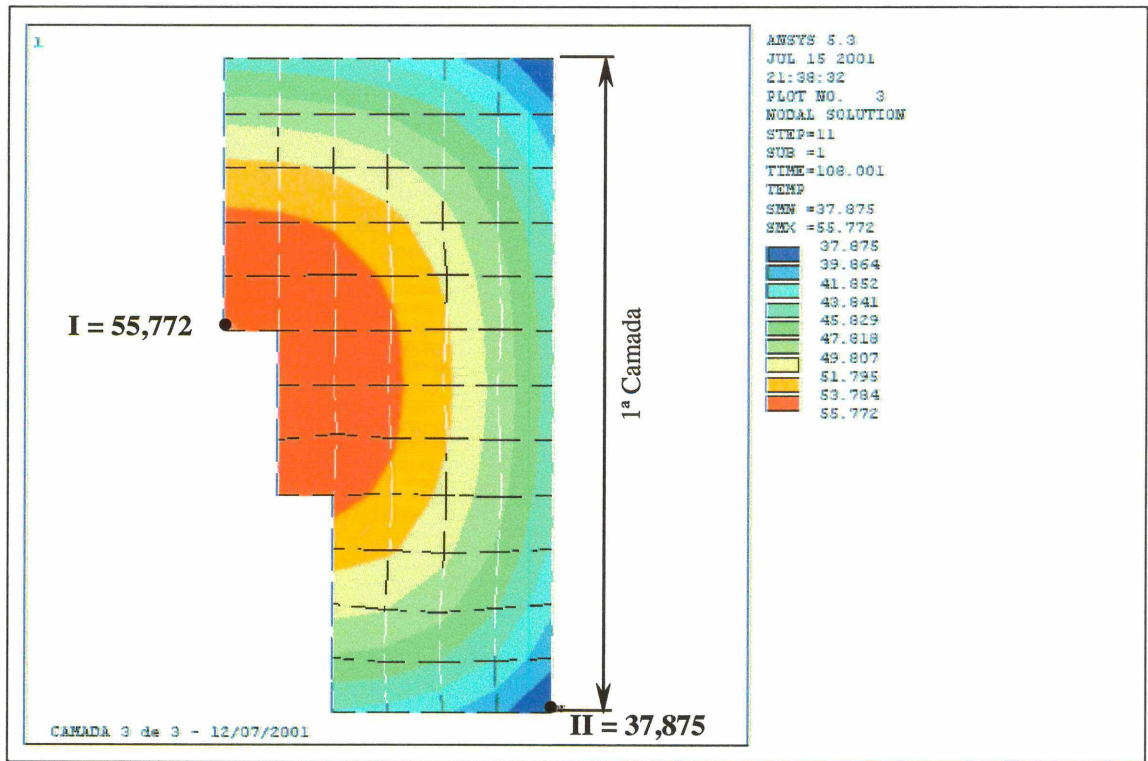


Figura 5.32 – VH-00 – Temperaturas da camada após 108 horas

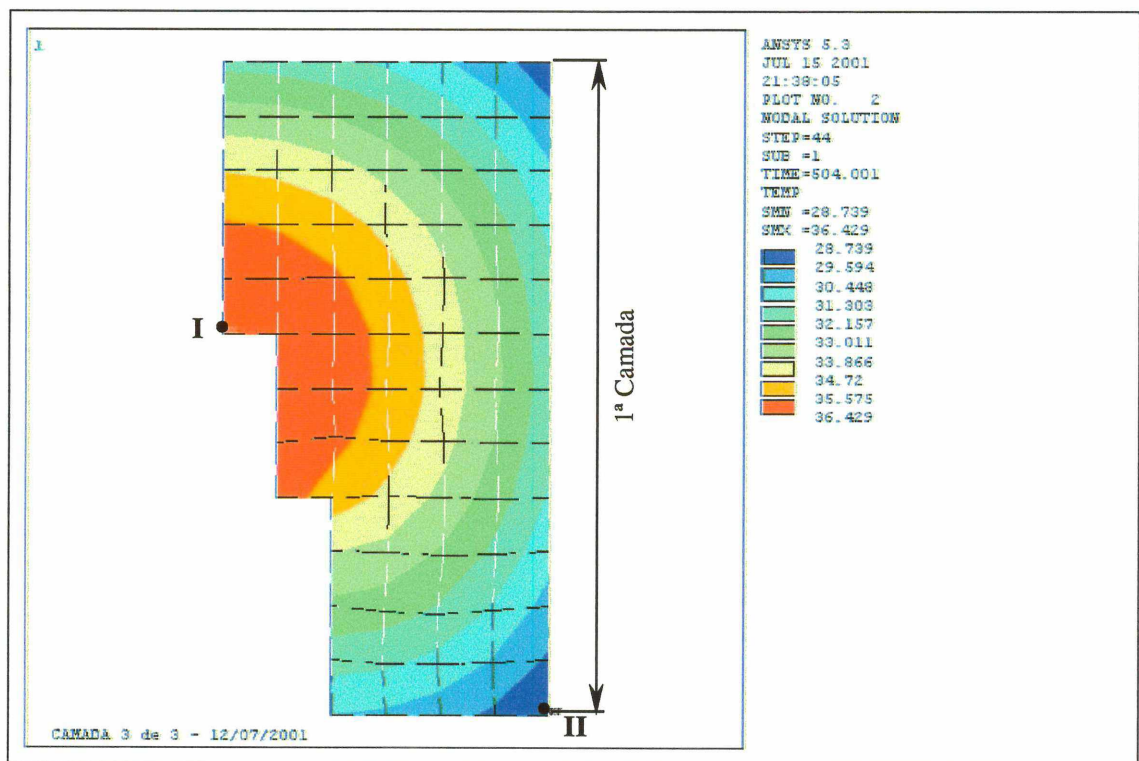
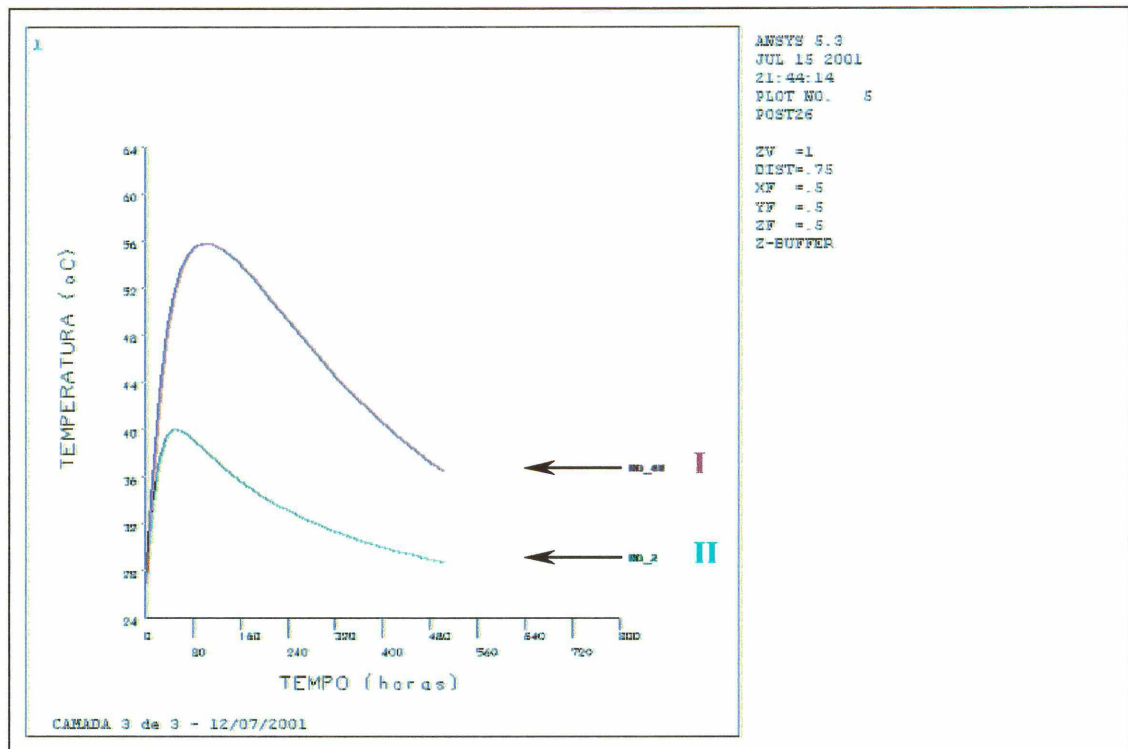


Figura 5.33 – VH-00 – Temperaturas da camada após 504 horas



**Figura 5.34 – VH-00 – Resultados nodais após 504 horas**

Para analisar a influência da seqüência construtiva foram estabelecidas algumas hipóteses de análise.

Inicialmente considerou-se o lançamento do concreto em três camadas, sendo a inferior com 1,5 m e as demais com 0,75 m de altura. Assumindo-se que o concreto fosse lançado com uma temperatura de 27 °C, foram realizadas três análises variando-se o intervalo de lançamento das camadas de 7, 14 e 21 dias, hipóteses VH-01, VH-02 e VH-03 respectivamente.

Com o intervalo de 7 dias (168 horas) entre camadas, a temperatura máxima de 51,74 °C foi atingida em 72 horas, no nó “I”, na primeira camada. Neste instante, a variação térmica resultante na estrutura foi de 12,28 °C comparando-se com o valor de 39,46 °C no nó “II”, conforme mostrado na Figura 5.36. As figuras 5.35 a 5.40 apresentam a distribuição da temperatura no lançamento de cada camada e decorridas 72, 336 e 504 horas (3,14 e 21 dias).

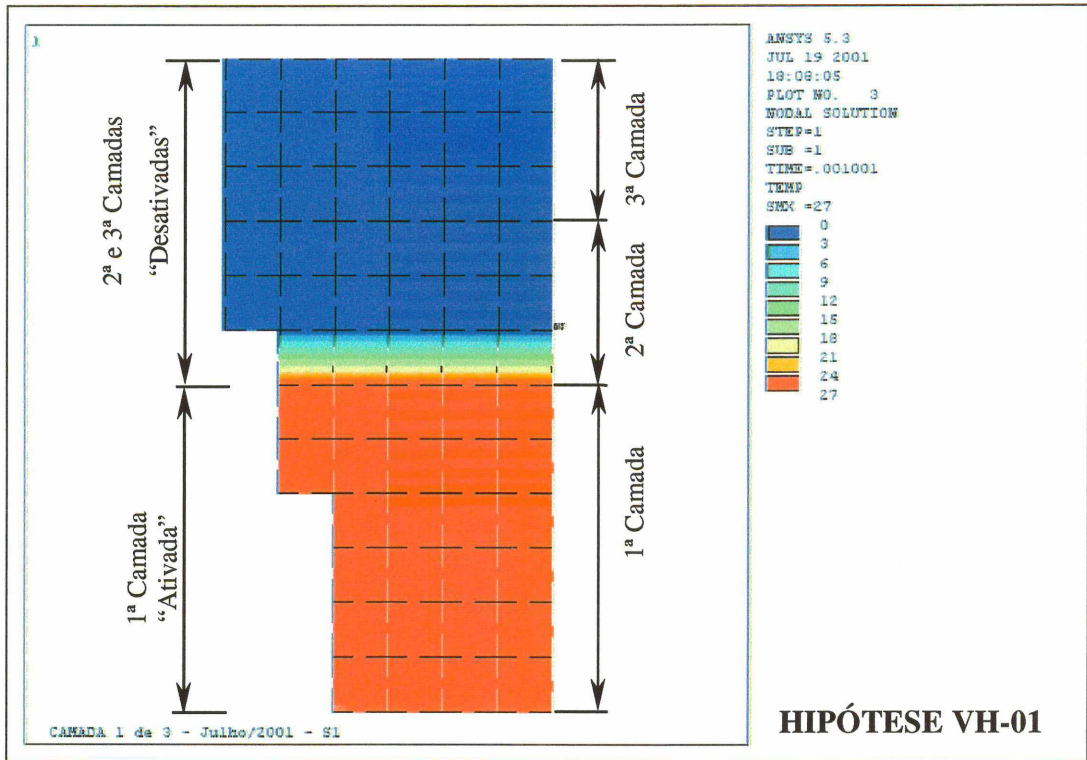


Figura 5.35 – VH-01 – Primeira camada – temperatura de lançamento

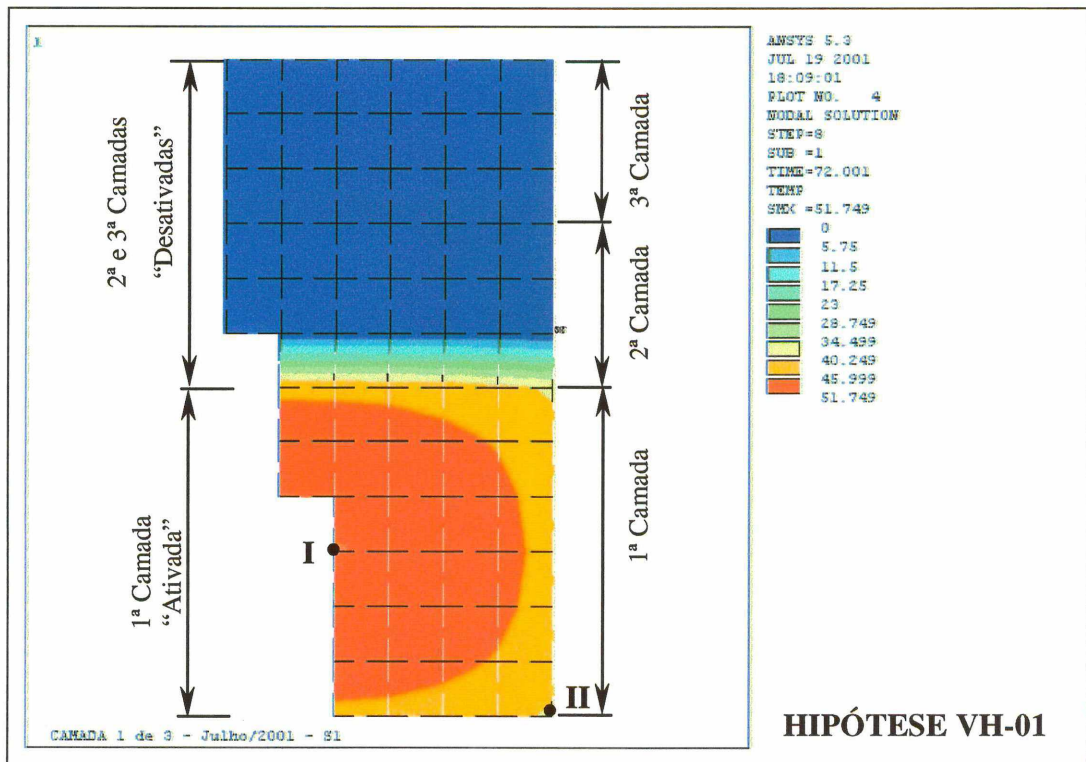


Figura 5.36 – VH-01 – Primeira camada após 72 horas

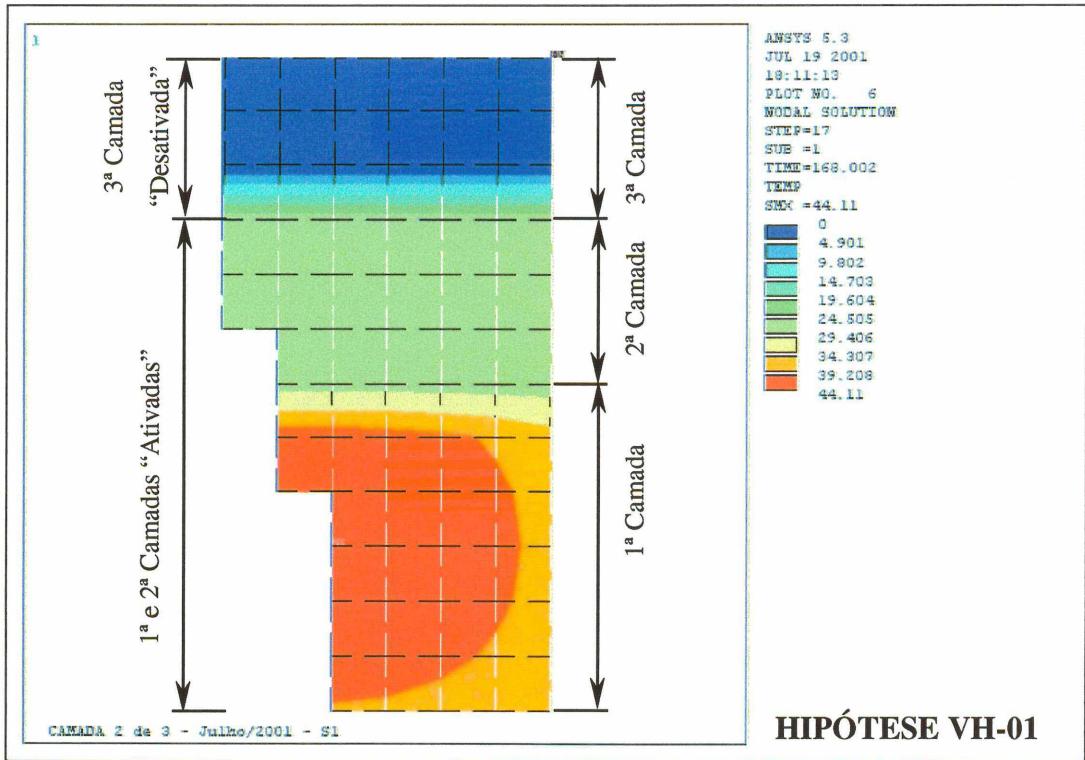


Figura 5.37 – VH-01 – Segunda camada – temperatura de lançamento

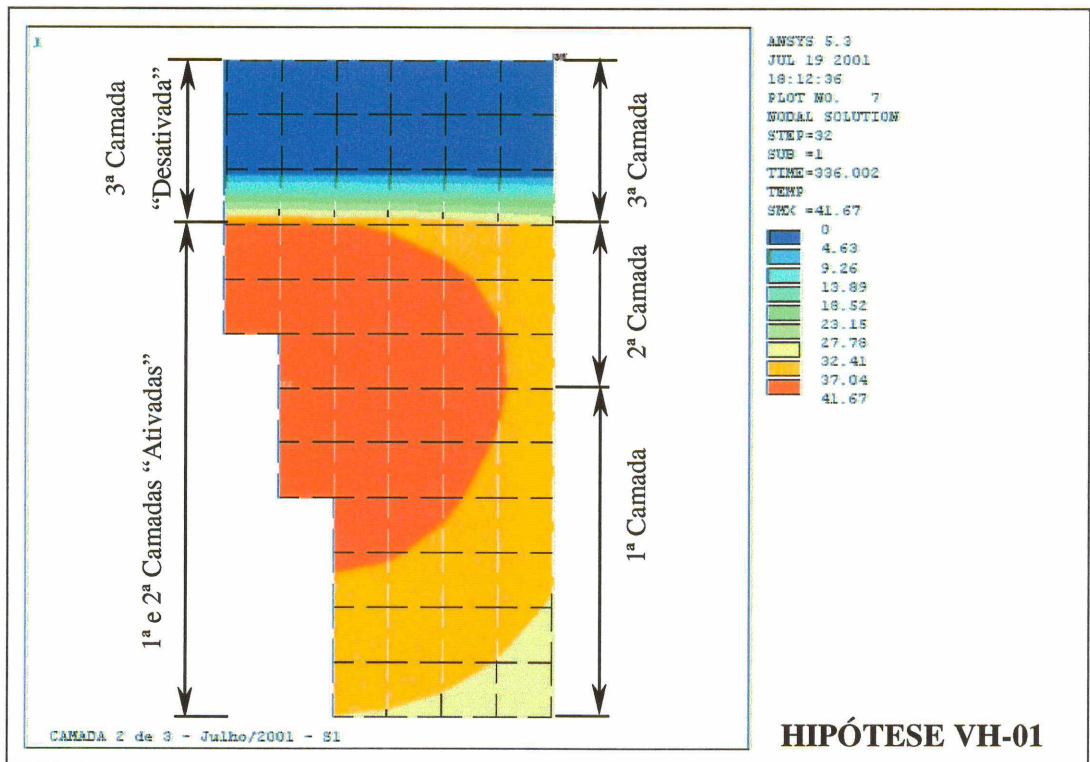


Figura 5.38 – VH-01 – Segunda camada após 336 horas

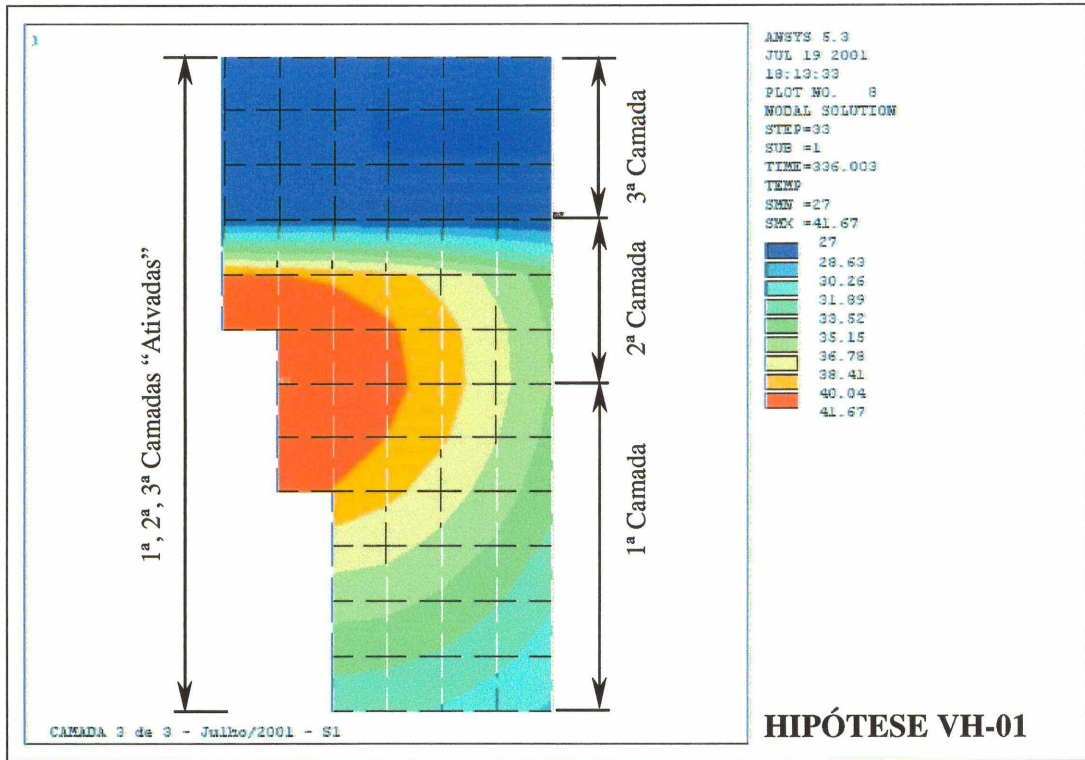


Figura 5.39 – VH-01 – Terceira camada – temperatura de lançamento

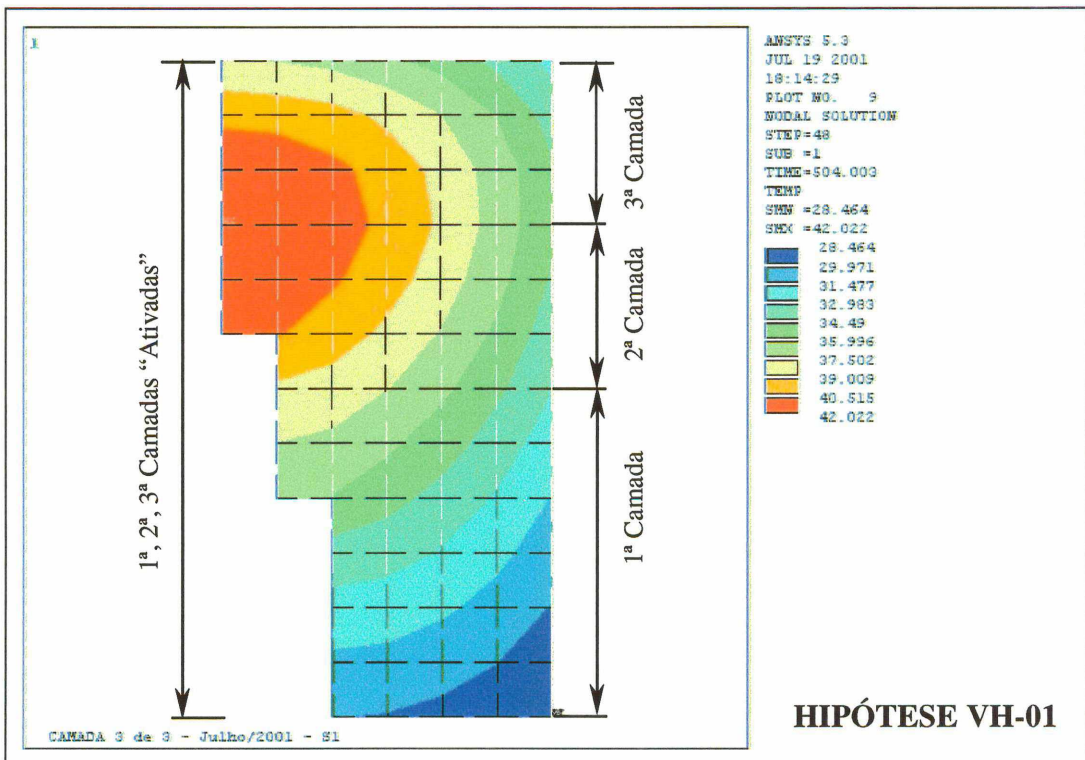
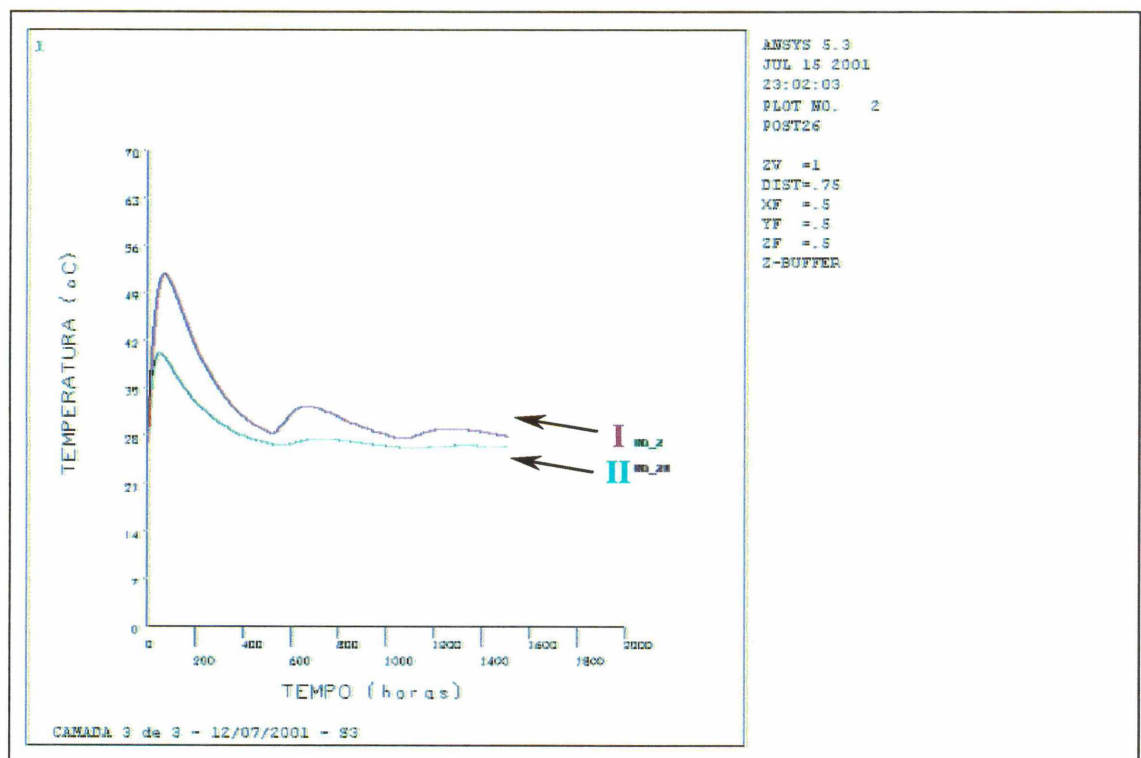


Figura 5.40 – VH-01 – Temperaturas das camadas após 504 horas

Com as simulações de execução das camadas em intervalos de 14 e 21 dias, a temperatura máxima resultante foi a mesma da análise anterior: 51,74 °C em 72 horas, na primeira camada, nó “I”. Os valores da variação térmica e da menor temperatura neste instante também foram os mesmos.

Observou-se, como esperado, uma maior dissipação do calor com o aumento do intervalo de tempo entre as camadas. A Figura 5.41 apresenta a evolução da temperatura nos nós “I” e “II” ao longo de 63 dias (1512 horas – hipótese VH-03)



**Figura 5.41 – VH-03 – Resultados nodais após 1512 horas**

Para verificar a influência da discretização, a hipótese VH-01, com malha de elementos quadrangulares lineares com 0,25 m de lado, foi reavaliada considerando-se elementos com 0,125 m (hipótese VH-01B) e 0,0625 m de lado (hipótese VH-01C). Analogamente às análises anteriores, as temperaturas máximas resultantes de 51,73 °C e 51,72 °C respectivamente, ocorreram na primeira camada, nó “I”, após 72 horas, conforme mostrado nas Figuras 5.42 e 5.43.

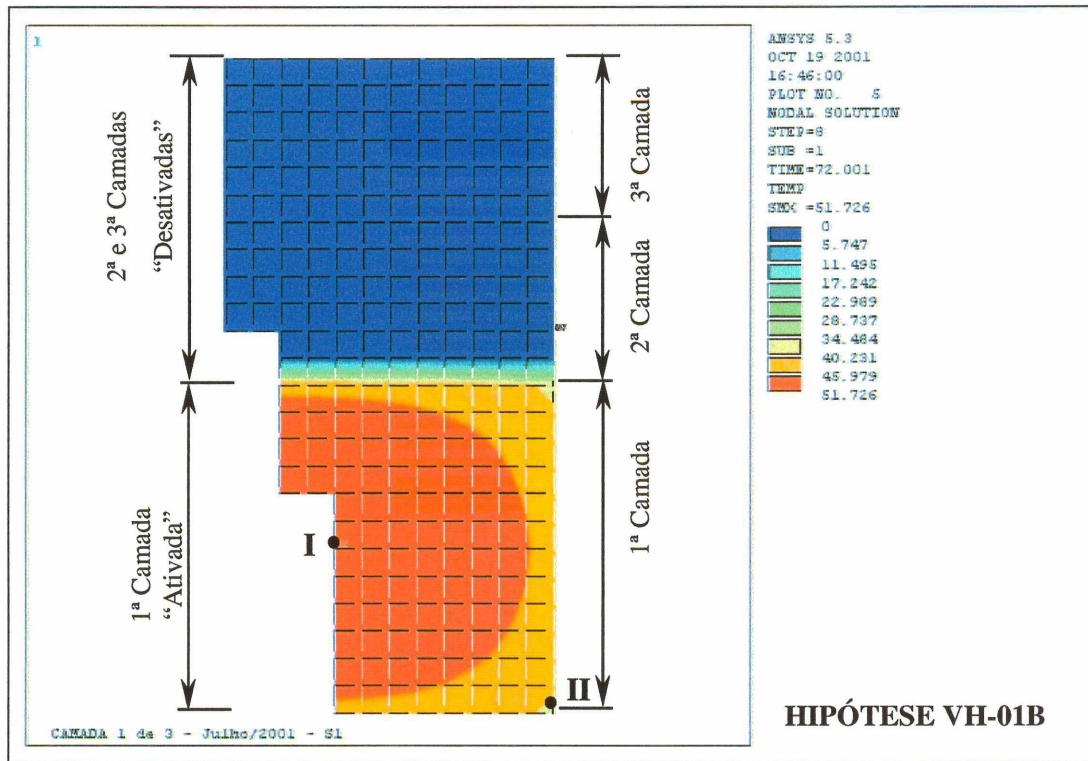


Figura 5.42 – VH-01B – Primeira camada após 72 horas

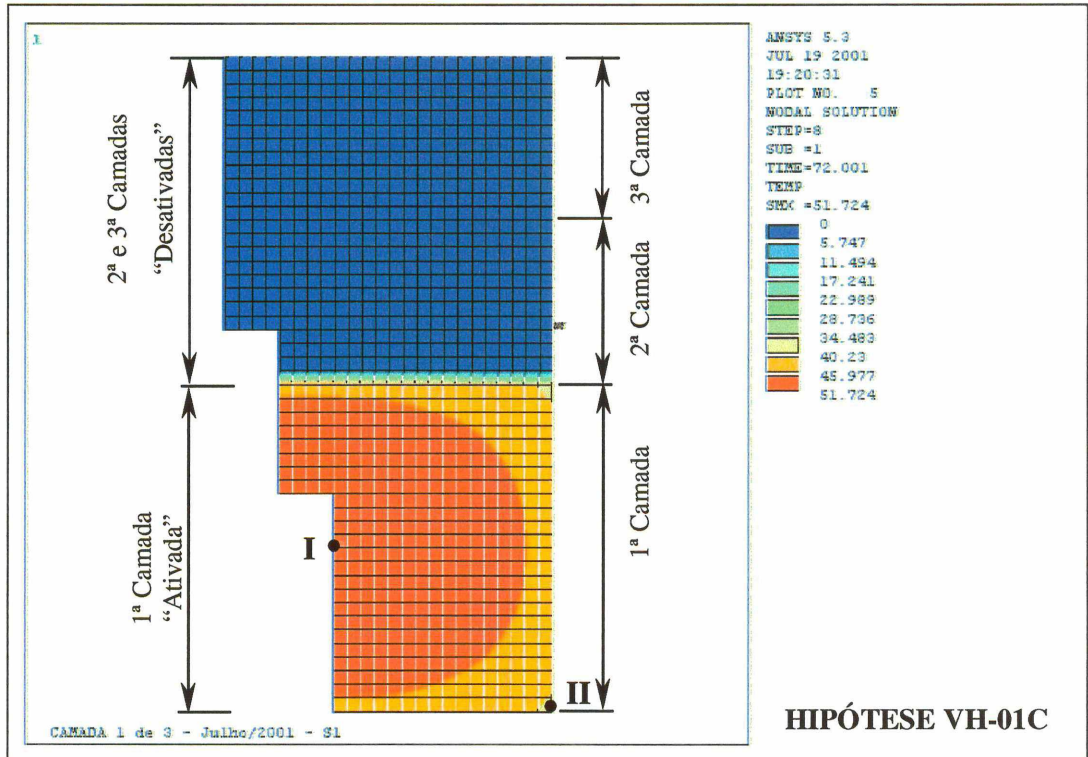
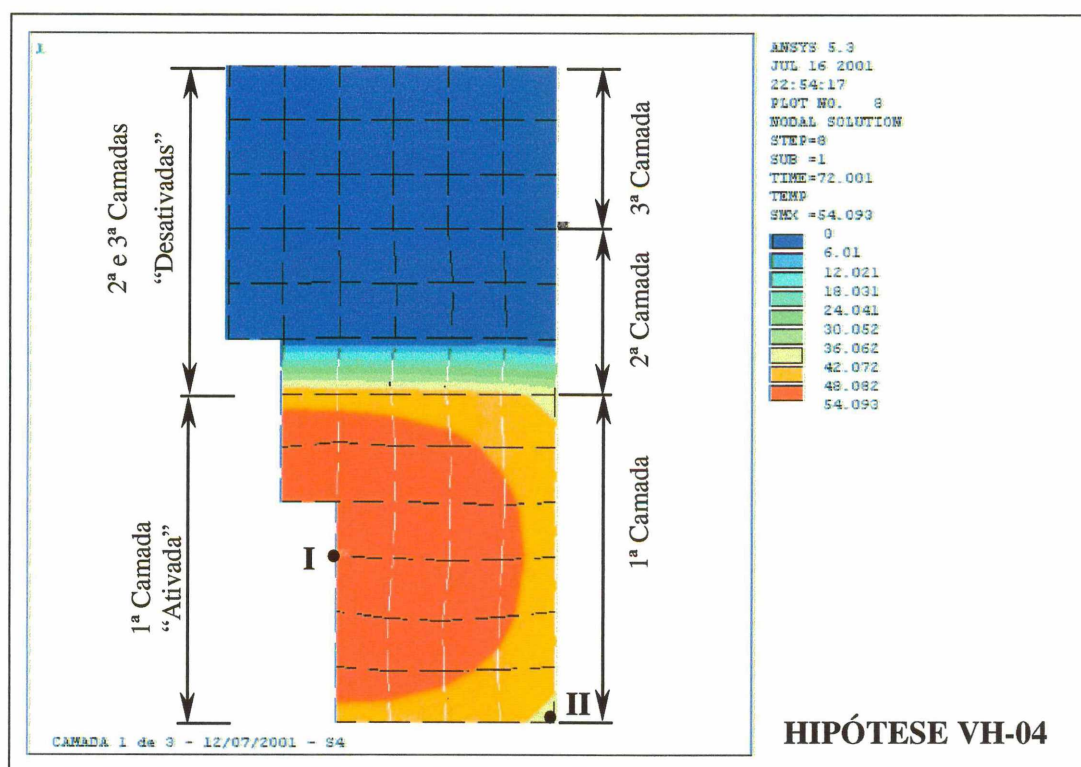


Figura 5.43 – VH-01C – Primeira camada após 72 horas

Na seqüência, como o refinamento da malha e o incremento de tempo não influenciaram significativamente os valores máximos de temperatura na estrutura, reviu-se a hipótese de execução com intervalo de 7 dias VH-01, alterando-se a temperatura de lançamento do concreto para 30 °C (hipótese VH-04).

Nesta condição, a temperatura máxima atingida foi de 54,10 °C em 72 horas, também na primeira camada, nó “I”. Com o valor mínimo de 40,60 °C (nó “II”) neste instante, mostrado na Figura 5.44, a variação térmica resultante na estrutura foi de 13,50 °C.



**Figura 5.44 – VH-04 – Primeira camada após 72 horas**

Posteriormente, foi avaliada a execução em duas camadas de 1,5 m. A hipótese VH-05 simulou o intervalo de lançamento do concreto em 7 dias. Nesta condição, o valor de temperatura máxima de 53,38 °C ocorreu na segunda camada (nó “III”), em 252 horas. Foi superior à temperatura máxima das análises VH-01 a VH-03

anteriores, com uma variação térmica de 22,13 °C sendo a menor temperatura no mesmo instante 31,25 °C (nó “II”).

Nas Figuras 5.45 a 5.47 são mostradas a distribuição de temperaturas após 252 horas (valor máximo), após 336 horas, bem como a evolução da temperatura nos nós selecionados ao longo da análise.

Aumentando-se o intervalo de tempo entre o lançamento das camadas para 14 dias (hipótese VH-06), a configuração com duas camadas apresentou um valor de temperatura máxima de 52,53 °C em 420 horas, valor inferior à análise VH-05. A menor temperatura no mesmo instante manteve-se no nó “II” (27,99 °C) e a variação térmica resultou 24,54 °C.

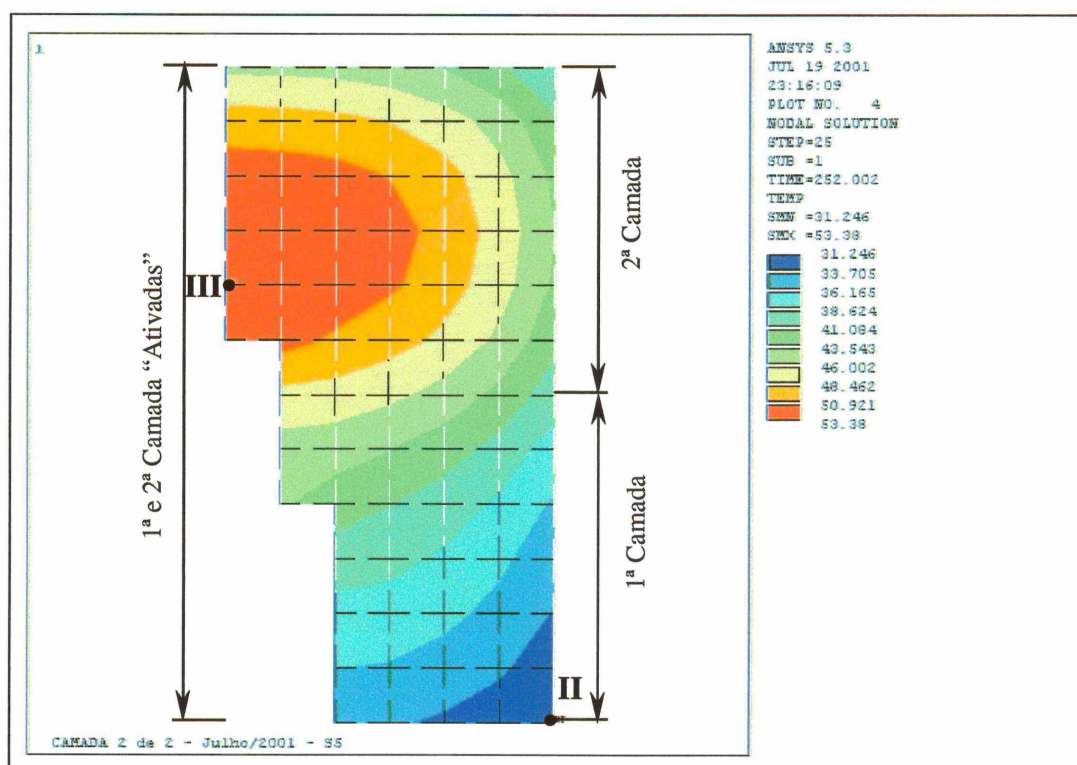


Figura 5.45 – VH-05 – Temperaturas das camadas após 252 horas

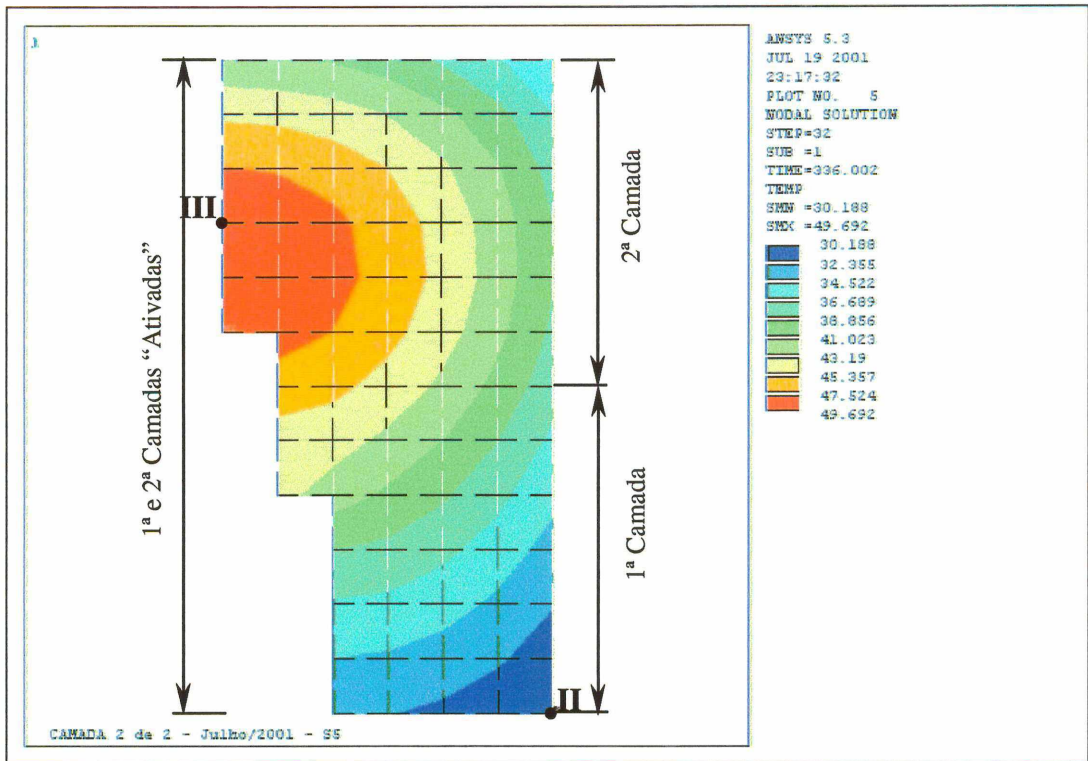


Figura 5.46 – VH-05 – Temperaturas das camadas após 336 horas

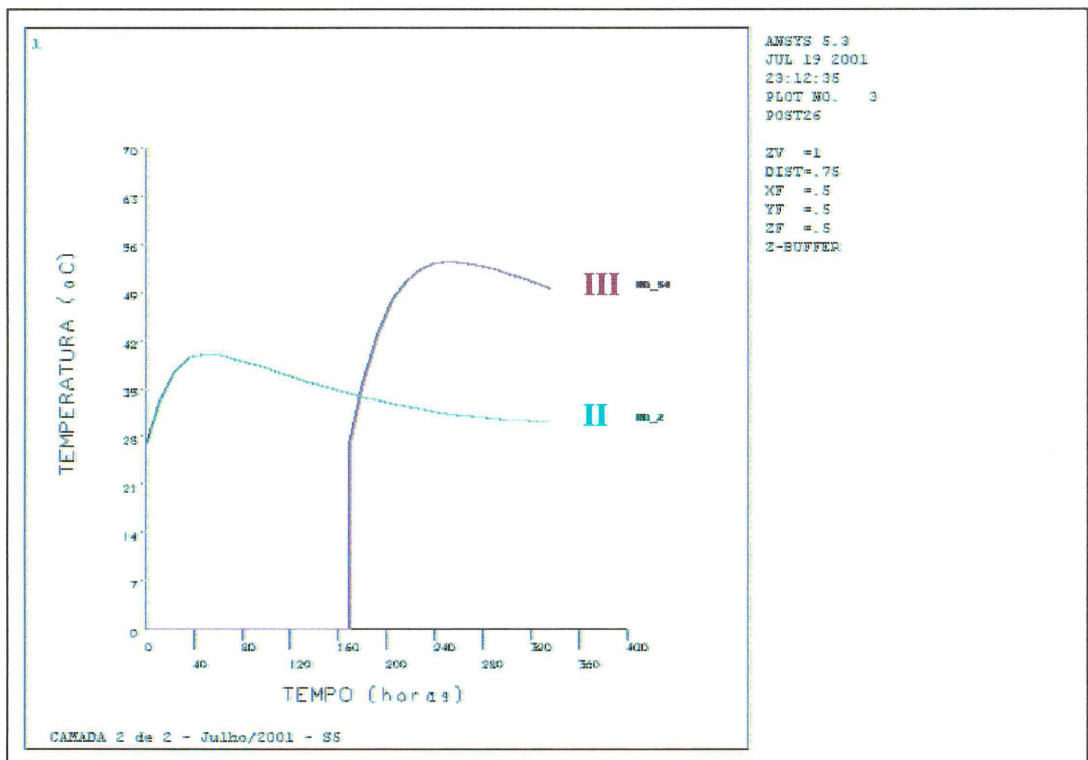
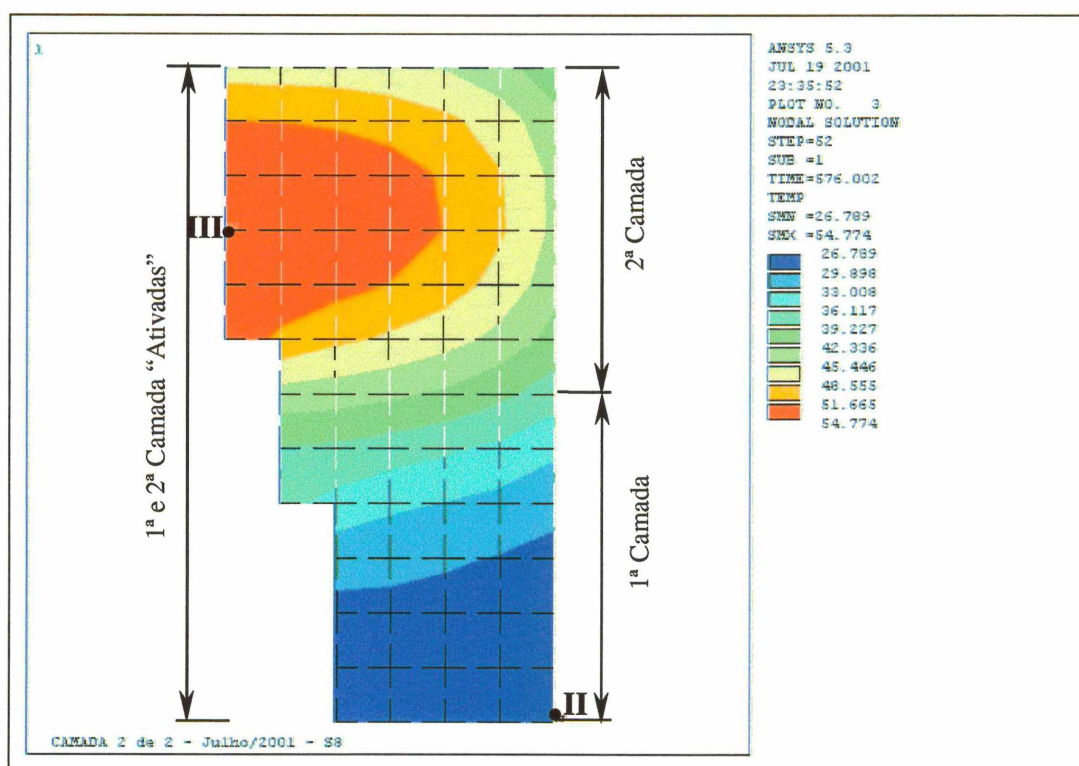


Figura 5.47 – VH-05 – Resultados nodais após 336 horas

Na hipótese VH-07 adotou-se o intervalo de 21 dias entre o lançamento das camadas e obteve-se a temperatura máxima de 52,24 °C após 420 horas e 26,67 °C no nó "II", resultando em uma variação térmica de 25,57 °C.

Para comparação de valores, considerou-se uma temperatura de lançamento de 30 °C e 21 dias entre a execução de cada camada (hipótese VH-08). Esta última análise apresentou os seguintes resultados, nos mesmos nós da análise VH-06: temperatura máxima de 54,77 °C em 576 horas (Figura 5.48); menor temperatura neste instante de 26,79 °C e uma variação térmica de 27,98 °C. Na Figura 5.49 são mostrados os valores da distribuição de temperaturas após 1008 horas.



**Figura 5.48 – VH-08 – Temperaturas das camadas após 576 horas**

A Tabela 5.4 apresenta os valores máximos de temperatura resultantes das análises efetuadas comparando-os com os valores apresentados em Andrade (1997) quando pertinente.

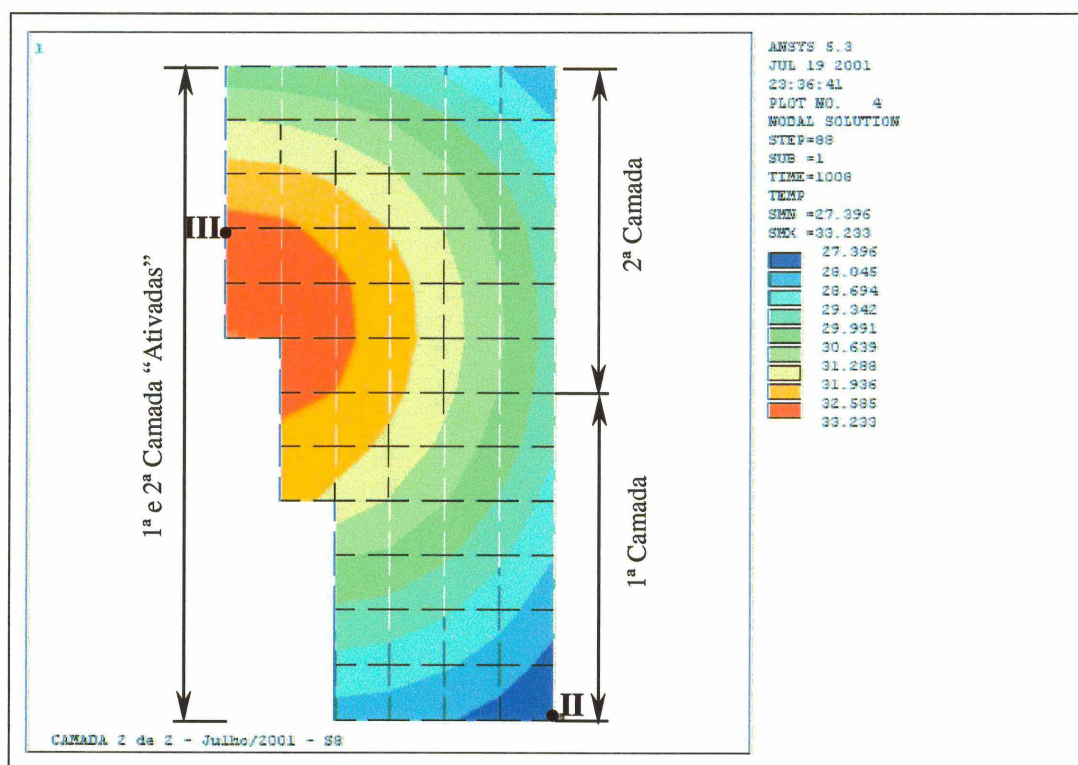


Figura 5.49 – VH-08 – Temperaturas das camadas após 1008 horas

TABELA 5.4 – RESULTADOS DAS ANÁLISES EFETUADAS

Hipótese	Altura da camada (m)			Intervalo de Lançamento (dias)		Temperatura (°C)			
	1ª Cam.	2ª Cam.	3ª Cam.	1ª/2ª Cam.	2ª/3ª Cam.	Concreto	Ambiente	Máx. de referência*	Máx. da análise
0	3,00	-	-	-	-	27	25,5	-	55,77
1	1,50	0,75	0,75	7	7	27	25,5	51,70	51,74
1B	1,50	0,75	0,75	7	7	27	25,5	51,70	51,74
1C	1,50	0,75	0,75	7	7	27	25,5	51,70	51,74
2	1,50	0,75	0,75	14	14	27	25,5	51,70	51,73
3	1,50	0,75	0,75	21	21	27	25,5	51,70	51,72
4	1,50	0,75	0,75	7	7	30	25,5	-	54,10
5	1,50	1,50	-	7	-	27	25,5	-	53,38
6	1,50	1,50	-	14	-	27	25,5	-	52,53
7	1,50	1,50	-	21	-	27	25,5	-	52,24
8	1,50	1,50	-	21	-	30	25,5	53,90	54,77

(\*) – Fonte: Andrade (1997)

Avaliando-se os resultados, pode-se concluir que a simulação das camadas construtivas apresentou valores de temperatura máxima próximos aos valores apresentados em Andrade (1997). Permitiu representar de forma adequada a variação de temperatura na estrutura a medida que está sendo executada e a definição de gradientes térmicos. A partir destes dados podem ser efetuadas análises de tensões na estrutura com a conseqüente otimização no lançamento das camadas e definição da necessidade ou não de refrigeração do concreto.

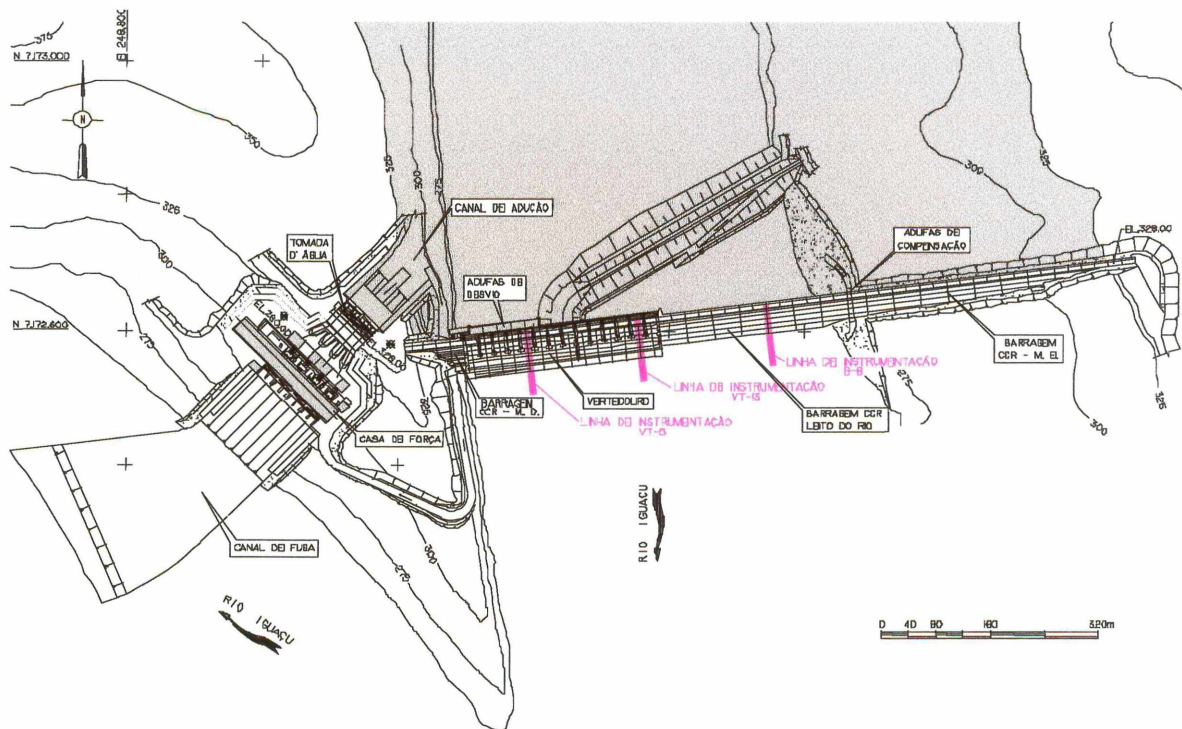
Para a reprodução das hipóteses acima, nas quais a malha de elementos finitos não foi muito refinada, a utilização da metodologia proposta neste trabalho permite que diversas alternativas para seqüência de construção sejam reproduzidas e avaliadas. Também permite a fácil alteração das propriedades do material e das condições de contorno empregadas no problema, fornecendo subsídios para as definições de projeto.

### **5.3.3 Barragem da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias**

A Usina Hidrelétrica Salto Caxias, de propriedade da Companhia Paranaense de Energia – COPEL, está localizada no rio Iguaçu, Estado do Paraná, a cerca de 600 km da capital Curitiba.

Com potência instalada de 1.240 MW, possui uma barragem a gravidade de concreto compactado com rolo, com 1.100 m de extensão e altura máxima de 67 m. A estrutura está dividida em blocos com juntas de contração a cada 40 m e juntas intermediárias a cada 20 m, parcialmente induzidas.

As Figuras 5.50 e 5.51 mostram o arranjo geral da usina e uma vista aérea da barragem concluída.



**Figura 5.50 – Usina Hidrelétrica Salto Caxias – Arranjo geral**



**Figura 5.51 – Usina Hidrelétrica Salto Caxias – Vista aérea da barragem**

O volume total de 945.600 m<sup>3</sup> de concreto compactado com rolo foi lançado, em camadas de 30 cm de altura, ao longo de um período de 28 meses. A média mensal de concretagem na barragem foi de 33.800 m<sup>3</sup>, com um máximo de 70.000 m<sup>3</sup> em abril de 1997.

Para o monitoramento das estruturas foram instalados 180 instrumentos automatizados sendo: 66 termômetros, 29 extensômetros de junta, 06 extensômetros múltiplos, 06 extensômetros triortogonais, 24 piezômetros de maciço, 29 piezômetros de fundação, 07 medidores de vazão, 03 pêndulos e 11 pinos de referência.

Os termômetros foram instalados em duas seções sendo uma no vertedouro, Bloco VT-13 com 25 termômetros, e a outra na barragem, Bloco B-08, com 41.

Devido às condições hidrológicas da região e visando otimizar o esquema de desvio do rio para a execução das estruturas, foi previsto um possível galgamento da barragem durante o período de construção. Para tanto, os blocos situados no leito do rio, Blocos 05 a 11, foram construídos até uma elevação intermediária na qual a passagem de água sobre a barragem já executada não produzisse danos significativos à obra. Durante a fase de construção, um período de vazões excepcionalmente altas no rio Iguaçu, provocou diversos galgamentos da barragem, sendo que o maior deles ocorreu em outubro de 1997, com uma vazão de 5.500 m<sup>3</sup>/s passando sobre os blocos centrais da barragem, como mostrado nas Figuras 5.52 e 5.53.

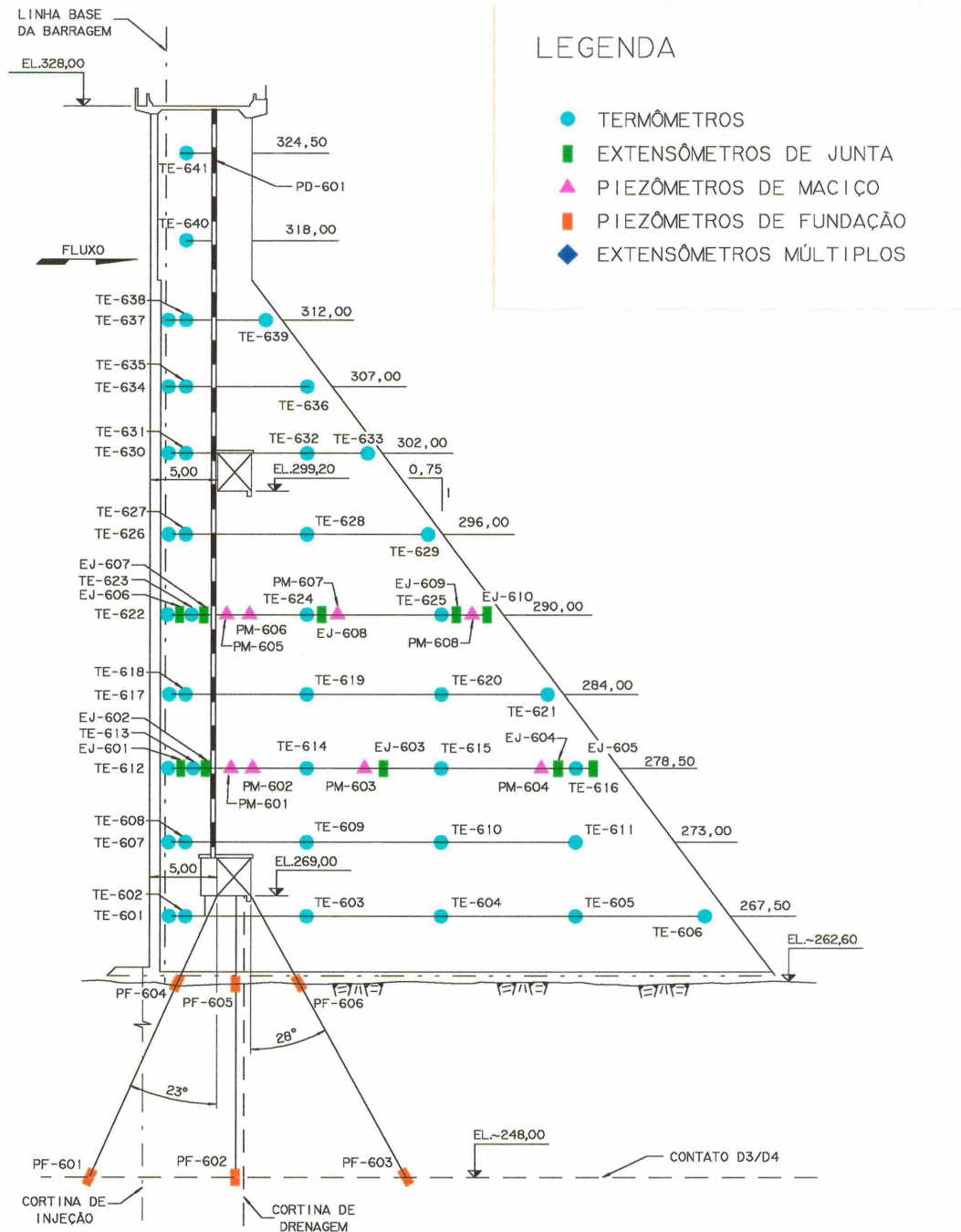
Para exemplificar a sistemática proposta no presente estudo, foi utilizada parte da seção transversal instrumentada da barragem, Bloco B-08, mostrada na Figura 5.54.



**Figura 5.52 – Galgamento de parte da barragem durante a construção**



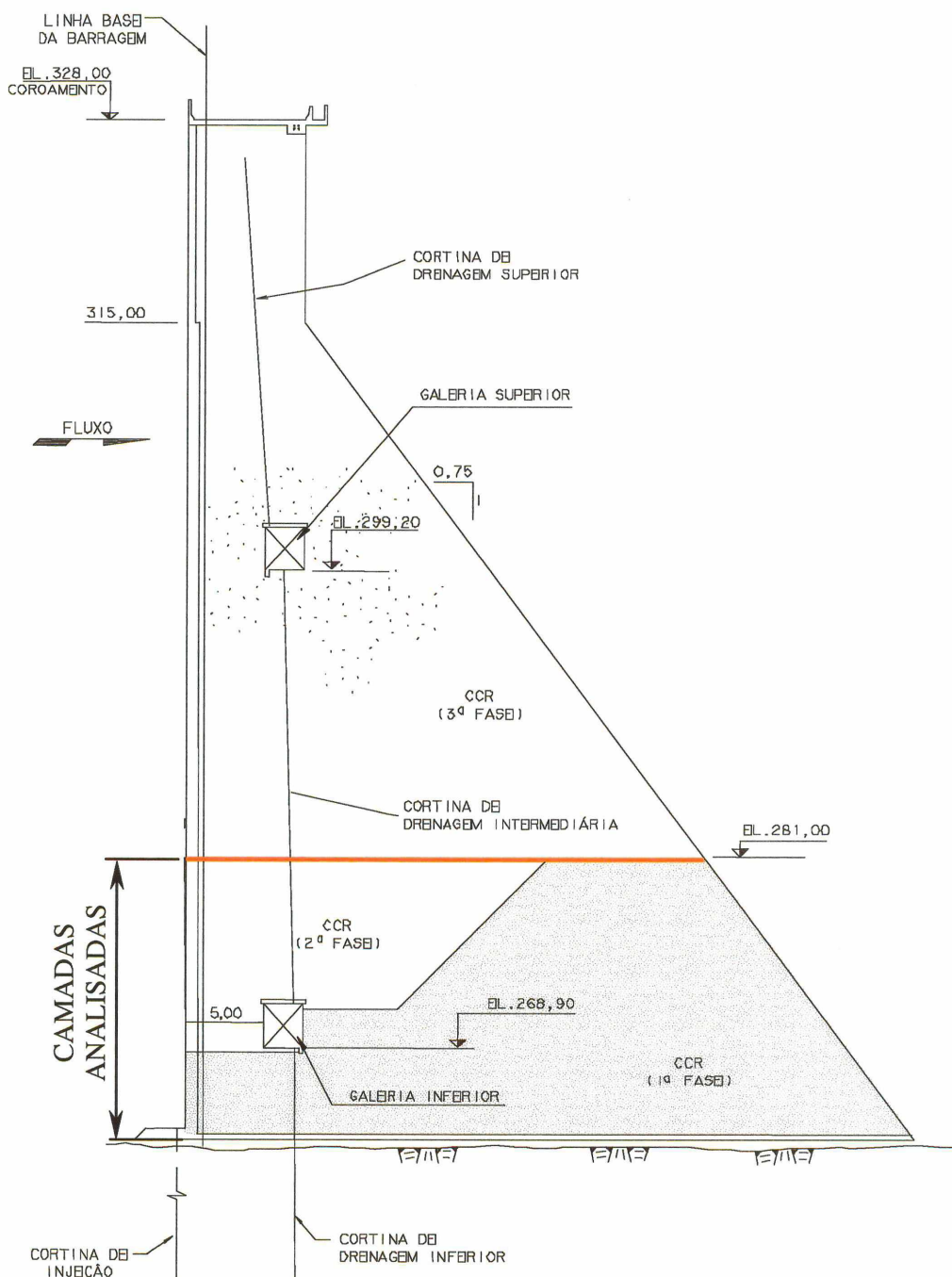
**Figura 5.53 – Galgamento de parte da barragem durante a construção**



**Figura 5.54 – Bloco B-08 - Instrumentação**

Para facilitar a logística de construção, a barragem foi executada em três fases de lançamento de CCR, de acordo com a Figura 5.55. Como as camadas eram extensas longitudinalmente, englobando em geral mais de um bloco, os planos de construção também previram degraus ao longo da extensão da barragem. Os Blocos 05 a 11 foram

executados até a El. 281,00 m (1ª e 2ª fases) para permitir o galgamento da barragem conforme mencionado anteriormente.



**Figura 5.55 – Seção típica analisada e fases construtivas**

As propriedades térmicas características do concreto lançado na barragem foram determinadas na época da construção, a partir de amostras dos materiais a serem

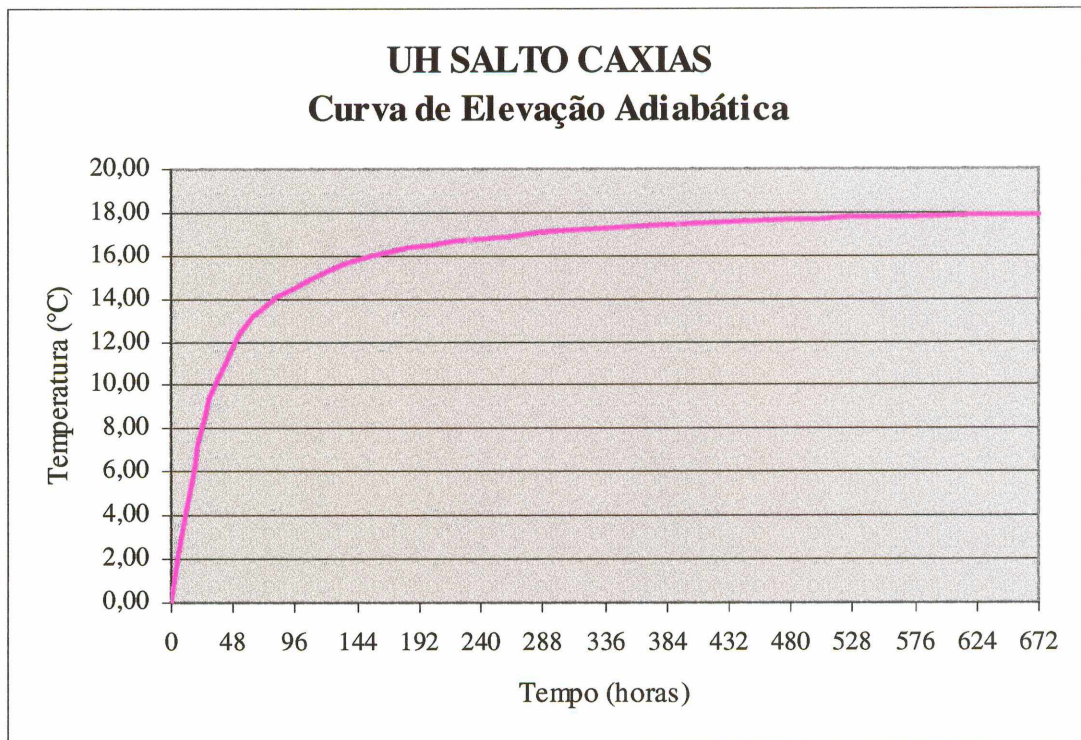
empregados, através de ensaios realizados nos laboratórios do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de FURNAS, em Goiânia e estão apresentadas na seqüência:

- ◇ Massa específica = 2388 kg/m<sup>3</sup>
- ◇ Calor específico = 1105 J/kg°C (1105,00 J/kgK)
- ◇ Condutividade térmica = 6445,93 J/mh°C (1,79W/mK)
- ◇ Coeficiente de dilatação térmica = 7,07.10<sup>-6</sup>/°C(7,07.10<sup>-6</sup>/K)
- ◇ Coeficiente de transferência de calor:  
     Concreto-ar = 50232,00 J/m<sup>2</sup>h°C (12 kcal/mh°C = 13,95 W/mK)

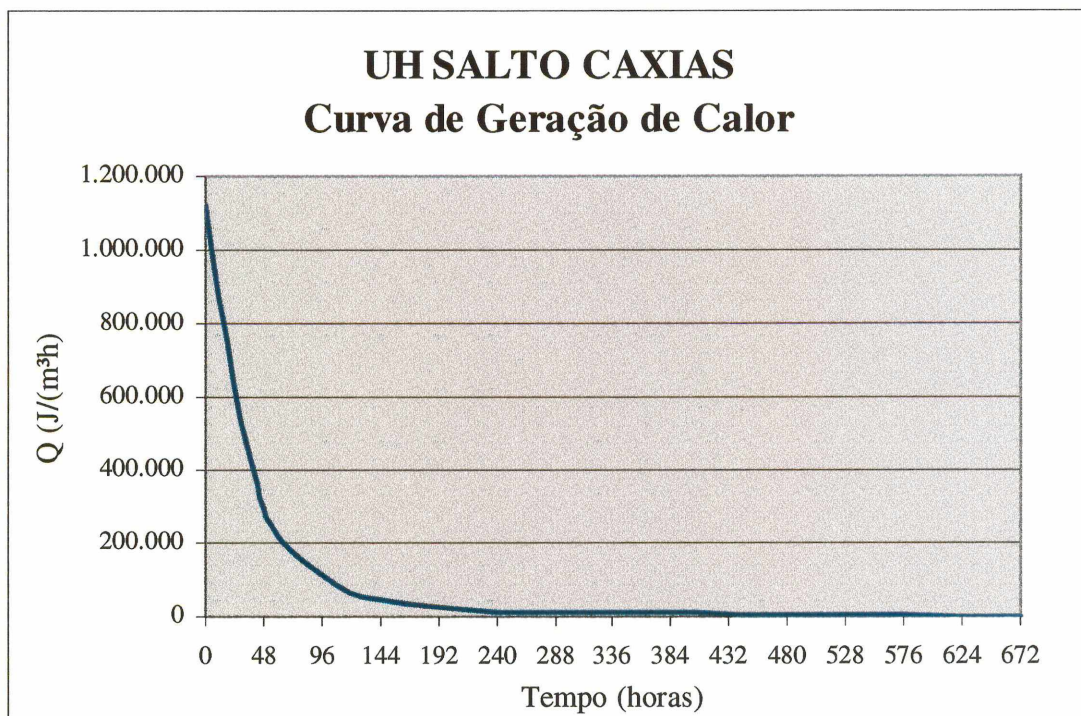
A elevação adiabática de temperatura resultante dos ensaios foi transformada em uma curva de geração de calor através da equação de Fourier, como mostrado na Tabela 5.5, Figuras 5.56 e 5.57 e apresentado no Anexo 2.

**TABELA 5.5 – ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA E CURVA DE GERAÇÃO DE CALOR**

Tempo		T (°C)	Q J/(m <sup>3</sup> h)
(dias)	(horas)		
0	0	0,00	1.125.084
1	24	8,06	647.776
2	48	11,78	170.467
3	72	13,57	150.260
5	120	15,30	64.089
7	168	16,15	34.614
10	240	16,82	17.410
14	336	17,30	8.893
20	480	17,67	4.287
28	672	17,92	2.128



**Figura 5.56 – Curva de Elevação Adiabática**



**Figura 5.57 – Curva de Geração de Calor**

Devido à dinâmica da obra, os parâmetros característicos do material lançado e da seqüência construtiva não foram registrados durante a construção da barragem para todas as camadas do bloco em análise. Foram cedidos para este trabalho e estão mostrados no Anexo 3, dados do controle tecnológico da obra referentes à:

- ◊ traços do concreto lançado;
- ◊ datas de concretagem das camadas;
- ◊ elevação das camadas;
- ◊ temperatura ambiente nas datas de concretagem;
- ◊ temperatura de lançamento do concreto (CCR – na central de concreto)
- ◊ registros dos termômetros instalados.

Verificando-se os dados registrados durante a execução da barragem, juntamente com resultados de ensaios efetuados no laboratório de materiais da obra, constataram-se divergências de valores. Foram constatadas, por exemplo, diferenças significativas entre a temperatura do concreto medida na central de concretagem e a temperatura de lançamento nas camadas. Também variaram as propriedades do próprio material. Os dados foram compilados de modo a fornecer uma consistência adequada para a análise numérica, adotando-se valores médios para preenchimentos de falhas nos registros, quando necessário.

Como o intuito desta análise era avaliar a metodologia para definição da distribuição de temperaturas considerando a execução das camadas, não foram contempladas na discretização as diferentes fases de lançamento do CCR mostradas na Figura 5.55. Também não foram consideradas as aberturas das galerias de drenagem. Assumiu-se que as camadas fossem lançadas continuamente ao longo de toda sua extensão transversal, desconsiderando-se também o efeito tridimensional dos degraus no sentido longitudinal da barragem.

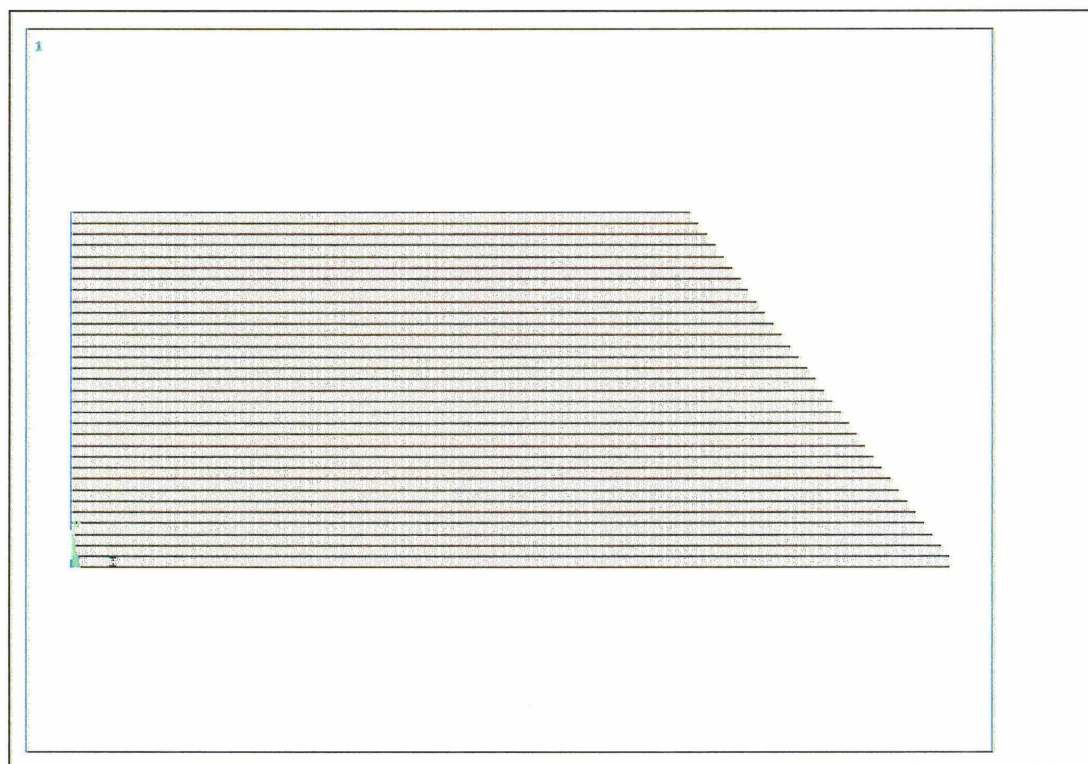
Embora tenham havido variações térmicas ao longo do tempo, foi adotada uma temperatura ambiente média para cada camada executada, mantendo-se a temperatura inicial de lançamento constante em todos os pontos. Assumiu-se, como

simplificação do problema, propriedades do material constantes ao longo de toda análise. Os parâmetros adotados para a análise são mostrados na Tabela 5.6.

Devido a restrições de capacidade computacional dos equipamentos disponíveis, as análises efetuadas neste trabalho foram bidimensionais limitadas ao trecho até a El. 281,00 m da barragem, que corresponde à primeira e segunda fase executada.

Cada camada da barragem executada nesta etapa foi representada através de uma área retangular. Foi adotada uma malha de elementos finitos quadrangulares lineares (4 nós), mostrada na Figura 5.58, com as seguintes características:

- ◊ número de áreas: 64;
- ◊ número de nós: 11.699;
- ◊ número de elementos: 11.424.



**Figura 5.58 – Barragem EL. 281,0 - Malha de elementos finitos**

**TABELA 5.6 – DADOS DE CONCRETAGEM DA BARRAGEM DE  
SALTO CAXIAS**

CAMADA	COTA FUNDO (m)	ALTURA (m)	COTA TOPO (m)	TEMPERATURA (°C)		TEMPO DE LANÇAMENTO (horas)	TEMPO ACUMULADO (horas)
				AMBIENTE	CONCRETO		
1	262,0	0,3	262,3	22	25,1	75	75
2	262,3	0,3	262,6	23	26,3	95	170
3	262,6	0,3	262,9	23	25,7	21	191
4	262,9	0,3	263,2	23	25,7	24	215
5	263,2	0,3	263,5	23	25,8	24	239
6	263,5	0,3	263,8	24	27,2	117	356
7	263,8	0,3	264,1	30	30,8	39	395
8	264,1	0,3	264,4	30	30,8	14	409
9	264,4	0,3	264,7	25	27,4	14	423
10	264,7	0,3	265,0	26	26,5	85	508
11	265,0	0,3	265,3	20	26,4	15	523
12	265,3	0,3	265,6	26	27,3	17	540
13	265,6	0,3	265,9	22	25,3	27	567
14	265,9	0,3	266,2	28	26,7	17	584
15	266,2	0,3	266,5	20	24,7	12	596
16	266,5	0,3	266,8	28	29,4	62	658
17	266,8	0,3	267,1	23	27,4	15	673
18	267,1	0,3	267,4	23	26,4	24	697
19	267,4	0,3	267,7	23	23,9	42	739
20	267,7	0,3	268,0	22	25,8	24	763
21	268,0	0,3	268,3	21	27,1	52	815
22	268,3	0,3	268,6	27	25,1	38	852
23	268,6	0,3	268,9	22	25,1	27	879
24	268,9	0,3	269,2	22	25,2	28	907
25	269,2	0,3	269,5	19	25,4	17	924
26	269,5	0,3	269,8	27	27,8	64	988
27	269,8	0,3	270,1	23	23,7	57	1045
28	270,1	0,3	270,4	27	27,1	13	1058
29	270,4	0,3	270,7	24	22,3	21	1079
30	270,7	0,3	271,0	23	24,3	5	1084
31	271,0	0,3	271,3	25	27,0	18	1102
32	271,3	0,3	271,6	20	22,0	11	1113
33	271,6	0,3	271,9	22	26,1	24	1136
34	271,9	0,3	272,2	27	27,3	59	1195
35	272,2	0,3	272,5	27	26,4	95	1290
36	272,5	0,3	272,8	20	22,2	62	1351
37	272,8	0,3	273,1	21	25,0	23	1374
38	273,1	0,3	273,4	26	24,7	14	1388
39	273,4	0,3	273,7	20	24,4	25	1412
40	273,7	0,3	274,0	26	24,4	13	1425
41	274,0	0,3	274,3	21	21,1	38	1463
42	274,3	0,3	274,6	15	16,5	36	1499
43	274,6	0,3	274,9	22	22,6	12	1511
44	274,9	0,3	275,2	14	21,5	21	1532
45	275,2	0,3	275,5	21	19,1	60	1592
46	275,5	0,3	275,8	32	25,1	11	1603
47	275,8	0,3	276,1	28	24,8	61	1664
48	276,1	0,3	276,4	22	20,8	13	1677
49	276,4	0,3	276,7	22	21,6	82	1759
50	276,7	0,3	277,0	24	23,5	105	1864
51	277,0	0,3	277,3	23	24,4	104	1968
52	277,3	0,3	277,6	23	23,1	48	2015
53	277,6	0,3	277,9	23	24,2	76	2091
54	277,9	0,3	278,2	28	23,7	44	2135
55	278,2	0,3	278,5	25	22,8	103	2238
56	278,5	0,3	278,8	25	22,4	99	2337
57	278,8	0,3	279,1	29	26,2	31	2368
58	279,1	0,3	279,4	26	23,2	44	2412
59	279,4	0,3	279,7	25	17,6	37	2449
60	279,7	0,3	280,0	21	20,2	28	2477
61	280,0	0,3	280,3	23	16,4	20	2497
62	280,3	0,3	280,6	24	21,1	44	2541
63	280,6	0,3	280,9	22	20,4	58	2599

Como neste trabalho o objetivo é a avaliação da distribuição de temperaturas na construção em etapas, a interação estrutura-fundação foi negligenciada. As condições de contorno estabelecidas foram de fluxo de calor nulo no contato concreto fundação e transferência de calor por convecção nas faces laterais e superior da estrutura.

Foi efetuada primeiramente, uma análise transiente simulando a seqüência de construção da barragem até a El. 281,00 m, adotando-se os tempos de lançamento das camadas registrados na obra, totalizando cerca de 2600 horas, com intervalo de tempo das análises de 12 horas.

A Tabela 5.7 apresenta a locação dos termômetros instalados nesta etapa.

**TABELA 5.7 – IDENTIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DOS TERMÔMETROS**

Cota da Fundação        262,0 m  
 Altura das camadas        0,3 m

TERMÔMETRO*	X (m)	Cota do fundo da camada (m)	Altura até a camada (m)	Nº da Camada
T601	0,65	267,7	5,7	19
T602	1,85	267,7	5,7	19
T603	10,85	267,7	5,7	19
T604	20,85	267,7	5,7	19
T605	30,85	267,7	5,7	19
T606	40,35	267,7	5,7	19
T607	0,65	273,1	11,1	37
T608	1,85	273,1	11,1	37
T609	10,85	273,1	11,1	37
T610	20,85	273,1	11,1	37
T611	30,85	273,1	11,1	37
T612	0,65	278,8	16,8	56
T613	1,85	278,8	16,8	56
T614	10,85	278,8	16,8	56
T615	20,85	278,8	16,8	56
T616	30,85	278,8	16,8	56

(\*) - Denominações de projeto

Para ser possível a comparação dos valores lidos na obra com os valores da simulação efetuada neste trabalho, foram identificados os nós da malha situados o mais próximo das coordenadas de cada termômetro, mostrada na Figura 5.54.

O processo de instalação dos termômetros na barragem exigiu cuidados específicos com concretagens e proteções especiais dos instrumentos. Analisando-se os dados específicos das instalações dos termômetros observou-se que, tanto os valores referentes à temperatura de lançamento do concreto quanto os valores da temperatura ambiente, diferiam significativamente dos valores dos registros para o lançamento das camadas nas quais foram instaladas.

Como pode ser observado nos dados do Anexo 3, existem incoerências nos registros de temperaturas de lançamento do concreto e temperatura ambiente, nas datas de instalação dos termômetros. Estas diferenças não foram reproduzidas nas análises.

Efetuada a análise transiente ao longo do período definido, foram destacados os valores de temperatura máxima atingidos nos nós referentes à localização dos termômetros. Estes foram comparados com os valores máximos lidos ao longo da primeira etapa, como mostrado na Tabela 5.8.

Como não foram consideradas neste trabalho as fases de lançamento do CCR, mostradas na Figura 5.55, os valores obtidos nas análises para os pontos referentes aos termômetros instalados na 1ª fase apresentaram diferenças mais significativas com relação aos valores lidos. O procedimento de leitura dos termômetros não seguiu o rigor científico necessário para uma análise numérica mais precisa. Assim sendo, os valores de temperatura dos termômetros foram utilizados apenas para comparações qualitativas da seqüência de análise proposta.

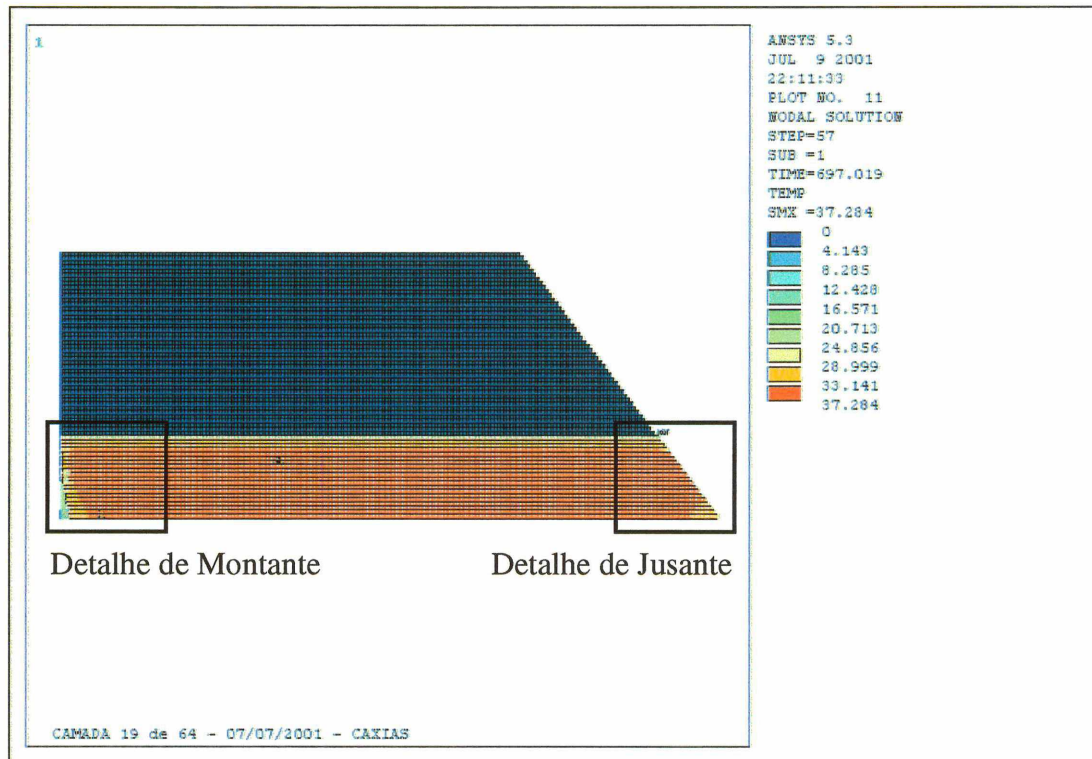
**TABELA 5.8 – RESULTADOS NODAIS NOS PONTOS DE INSTALAÇÃO DOS TERMÔMETROS**

TERMÔMETRO		T máx. análise (°C)	T máx. lida Salto Caxias (°C)
Elevação 267,70	T601	36,36	38,58
	T602	36,69	40,94
	T603	38,13	43,35
	T604	38,29	43,19
	T605	38,29	44,11
	T606	38,52	39,42
Elevação 273,1	T607	34,25	30,52
	T608	34,56	30,81
	T609	36,20	34,89
	T610	36,43	43,68
	T611	36,50	43,87
Elevação 278,8	T612	34,18	34,39
	T613	34,34	35,61
	T614	34,76	37,96
	T615	34,81	38,71
	T616	34,85	39,39

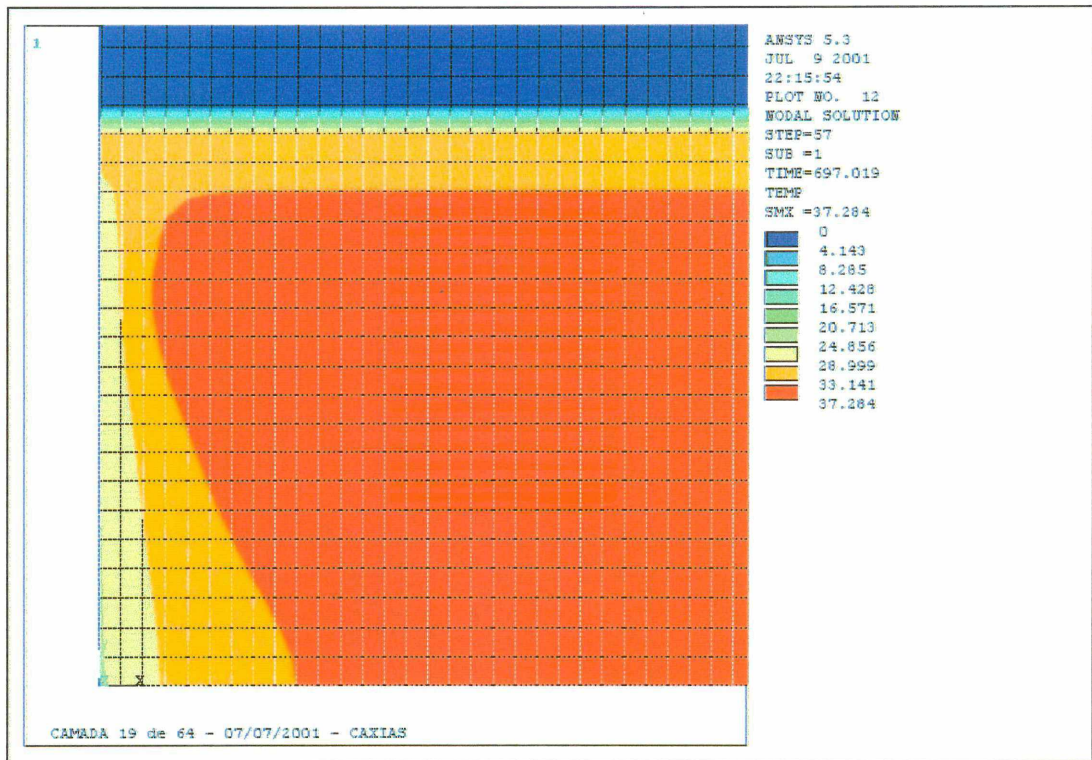
Analisando os valores obtidos conclui-se que com a metodologia proposta para a análise da seqüência construtiva, a evolução da temperatura foi reproduzida de forma adequada qualitativamente. Entretanto, considerando-se os diversos fatores e simplificações apresentados, os valores lidos nos instrumentos não foram plenamente reproduzidos na modelagem, apresentando variações de 0,2 a 7,4 °C.

As Figuras 5.59 a 5.67 apresentam a distribuição das temperaturas nos períodos referentes à execução das camadas instrumentadas, camadas 19, 37 e 56 respectivamente. A Figura 5.68 mostra a distribuição das temperaturas após 2604 horas. Os valores nulos indicados nas figuras referem-se às camadas ainda não executadas (“desativadas”).

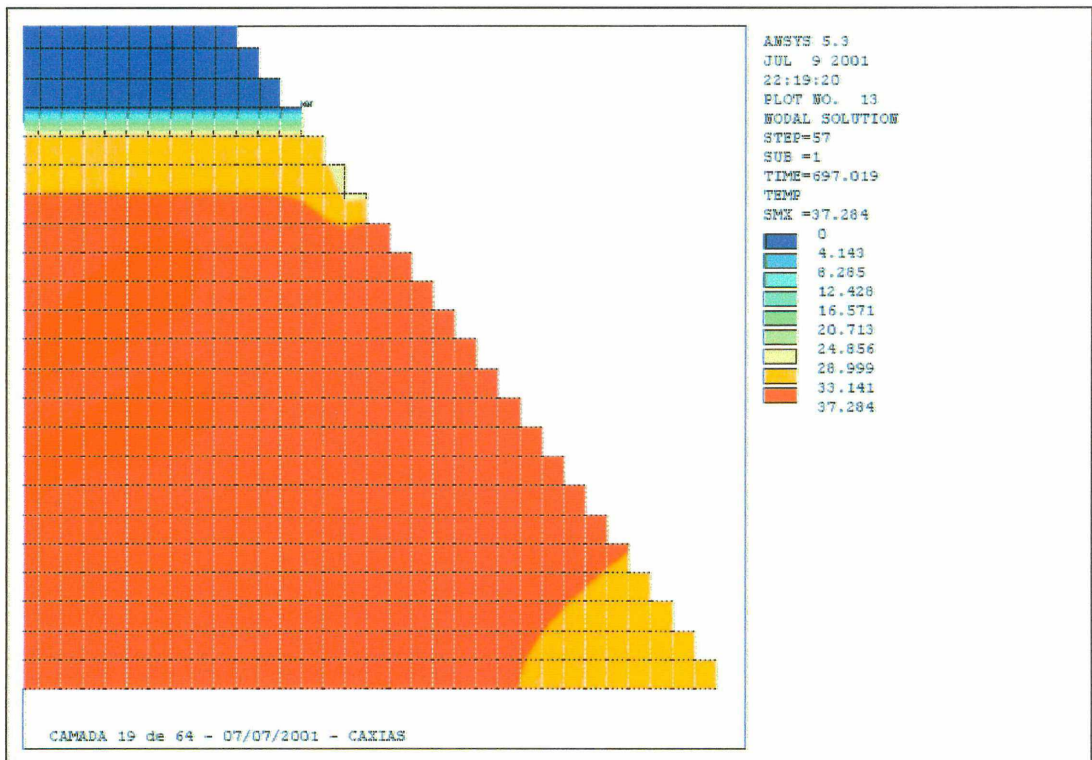
Observando-se os dados de temperatura inicial e temperatura ambiente, verifica-se que em diversas camadas estes valores estavam muito próximos. Houve inclusive situações em que a temperatura ambiente registrada era maior que a temperatura anotada como sendo do lançamento o concreto. Esta influência da temperatura externa pode ser observada junto aos degraus da barragem, uma vez que se reflete na dissipação do calor para o meio ambiente.



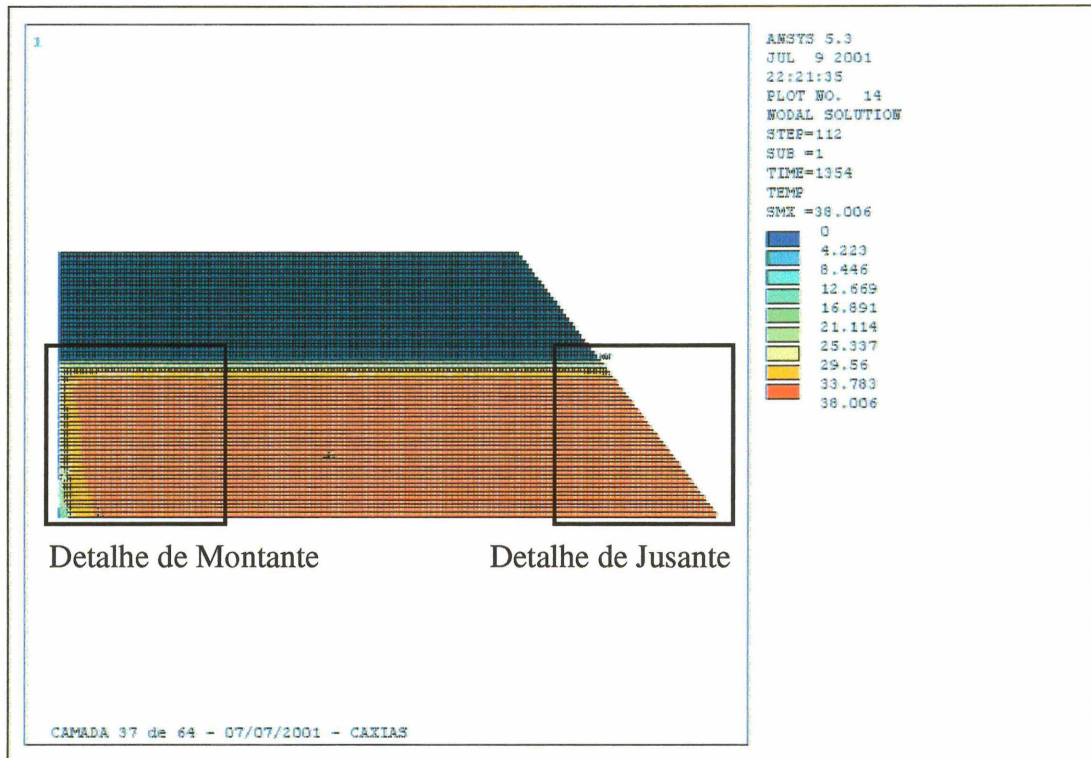
**Figura 5.59 – Análise da barragem até a El. 267,70 – Camada 19**



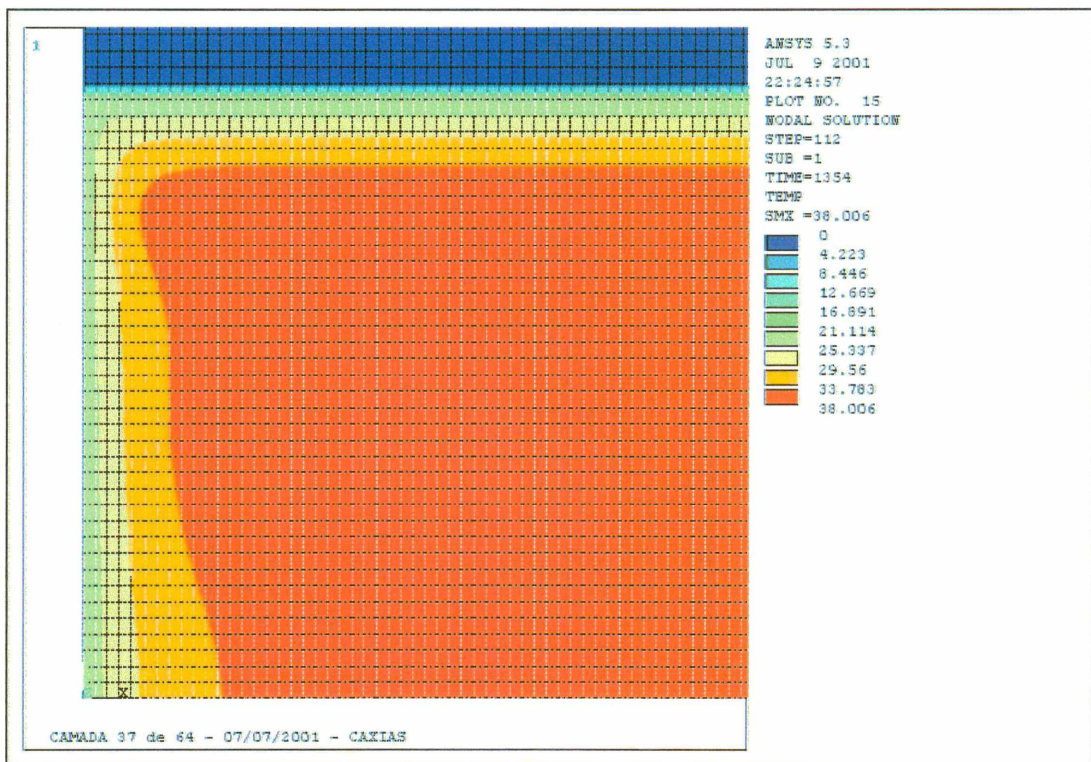
**Figura 5.60 – Análise da barragem até a El. 267,70 – Detalhe de Montante**



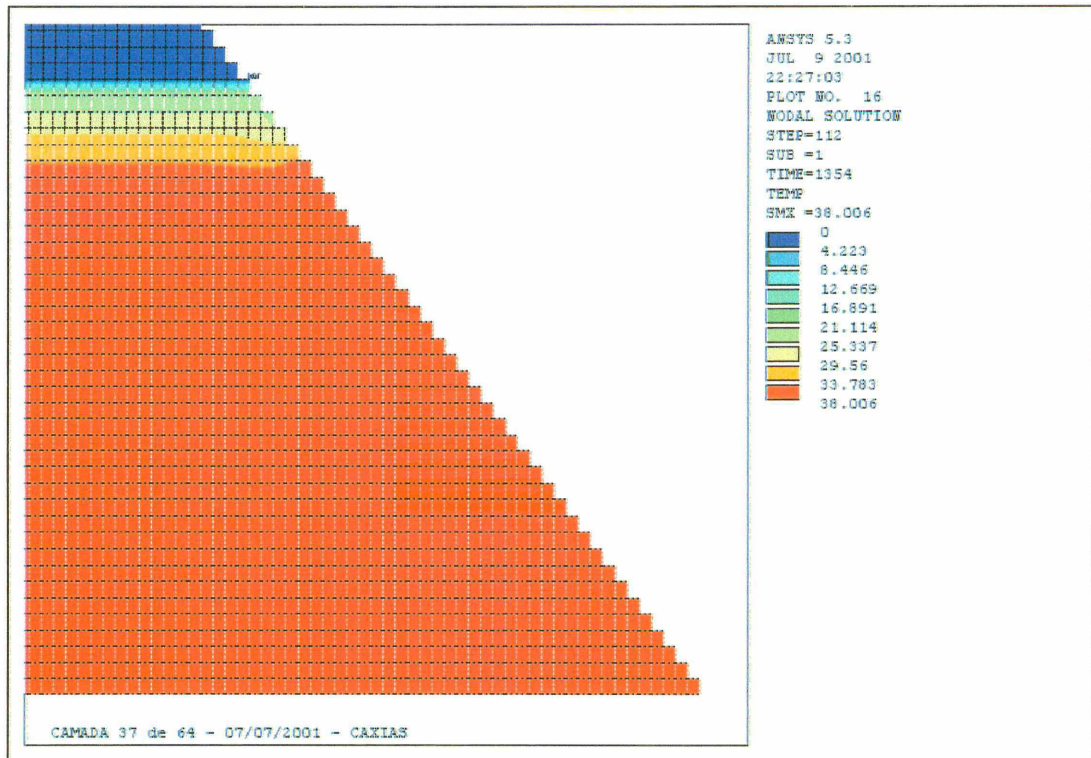
**Figura 5.61 – Análise da barragem até a El. 267,70 – Detalhe de Jusante**



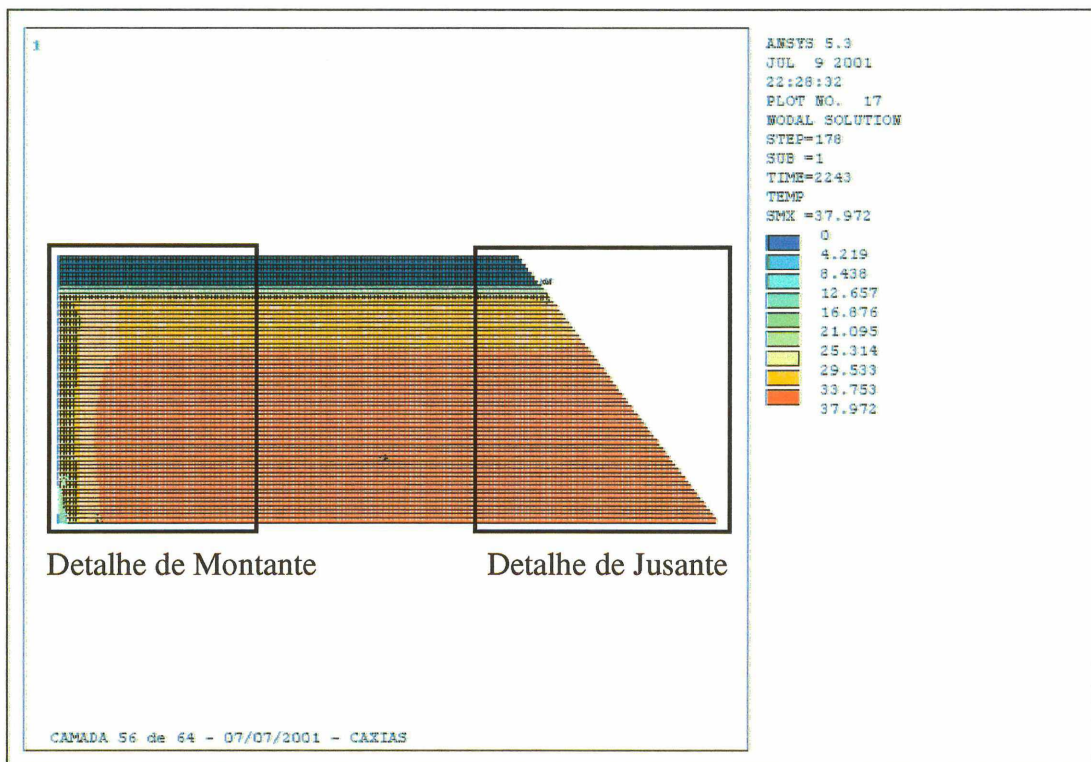
**Figura 5.62 – Análise da barragem até a El. 273,10 – Camada 37**



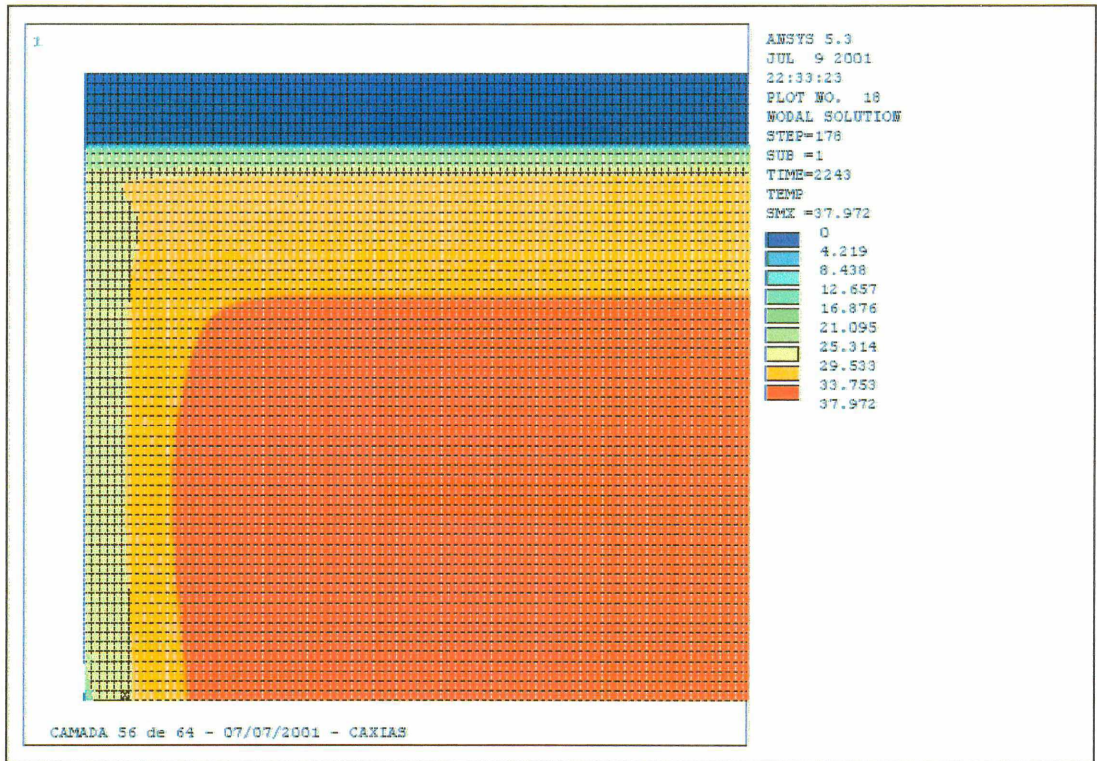
**Figura 5.63 – Análise da barragem até a El. 273,10 – Detalhe de Montante**



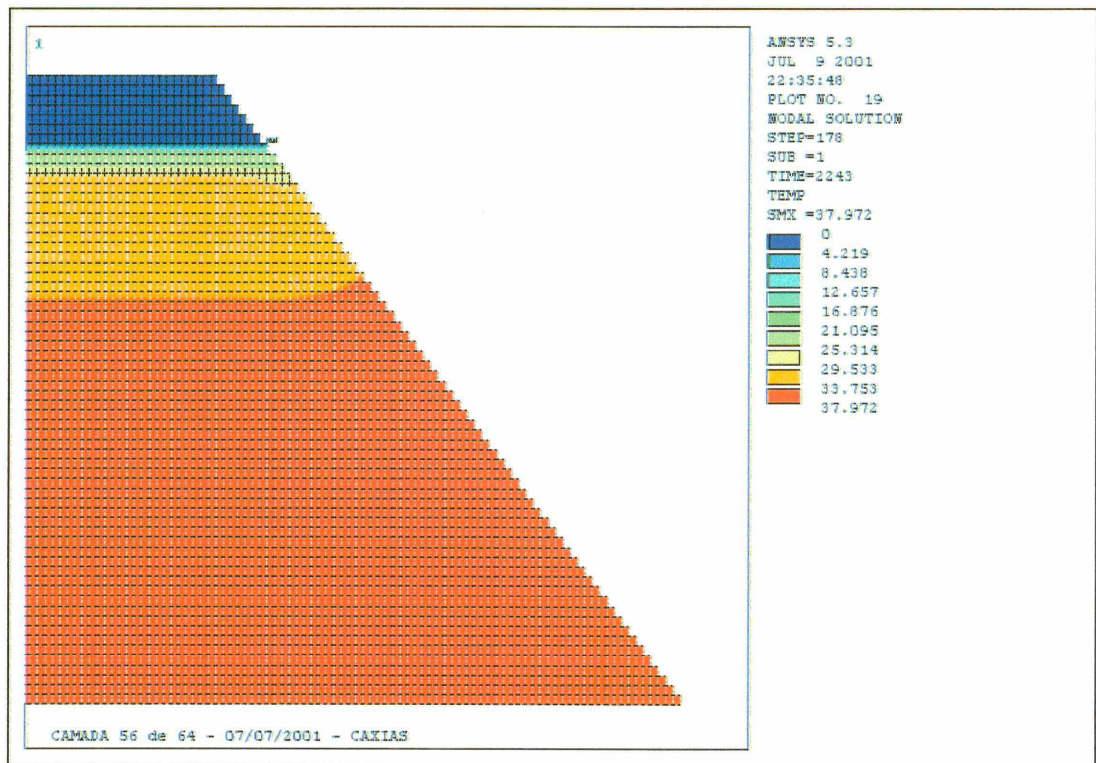
**Figura 5.64 – Análise da barragem até a El. 273,10 – Detalhe de Jusante**



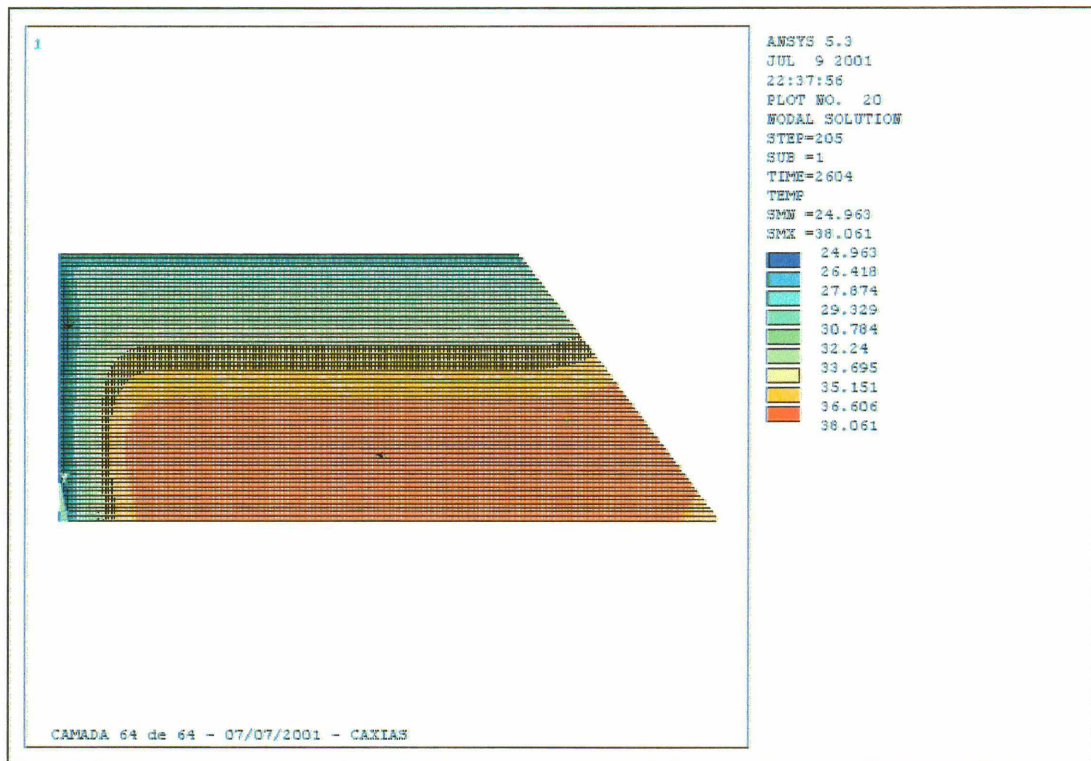
**Figura 5.65 – Análise da barragem até a El. 278,80 – Camada 56**



**Figura 5.66 – Análise da barragem até a El. 278,80 – Detalhe de Montante**



**Figura 5.67 – Análise da barragem até a El. 278,80 – Detalhe de Jusante**



**Figura 5.68 – Análise da barragem até a El. 281,00 após 2604 horas**

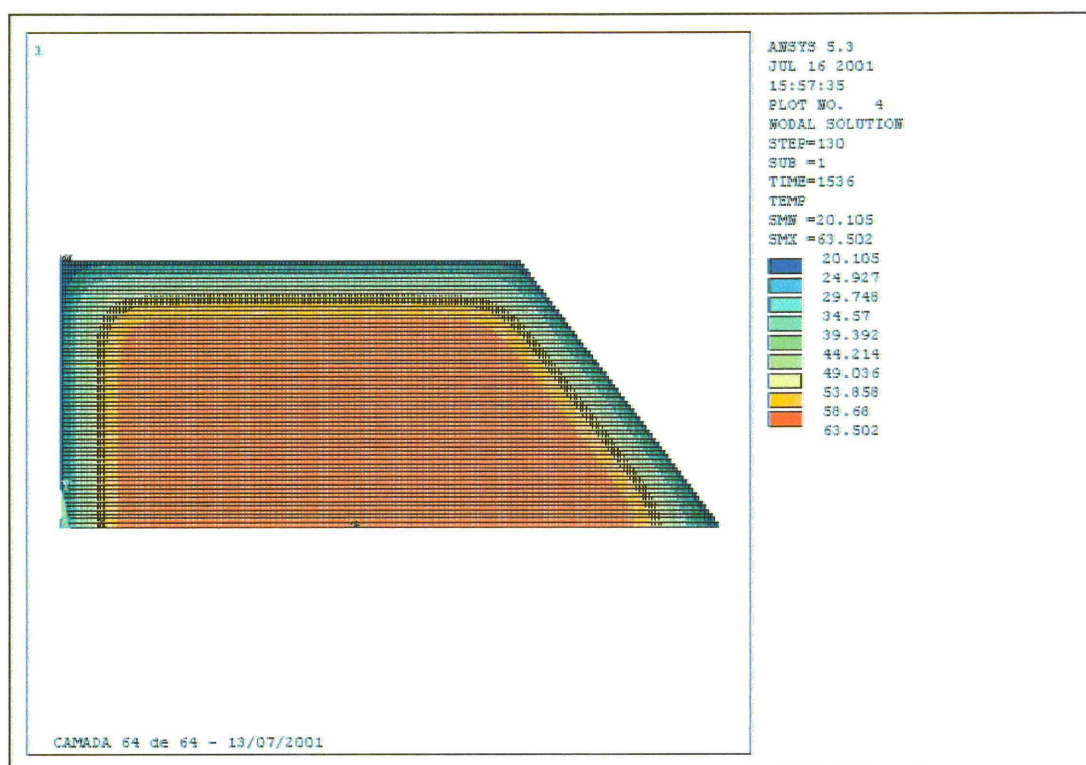
Para avaliar variações na distribuição de temperaturas na estrutura executada por camadas, foram simuladas algumas hipóteses construtivas, considerando-se diferentes situações de temperatura de lançamento do concreto, temperatura ambiente e espessura das camadas de concretagem.

Com o intuito de melhor avaliar a influência de diferentes temperaturas de lançamento, foram adotados neste trabalho valores de 35°C e 45°C, superiores aos usualmente empregados em obras de concreto compactado com rolo, para aumentar o gradiente térmico entre a estrutura e o meio ambiente. O intervalo de tempo entre o lançamento das camadas foi considerado constante para todas as camadas.

A primeira hipótese considerada foi a avaliação da barragem como uma estrutura única até a El. 281,00, sem considerar as etapas construtivas, processo usualmente empregado na fase de projeto.

Adotando-se as condições de contorno para a barragem de Salto Caxias (fluxo de calor nulo no contato concreto-fundação e convecção nas faces laterais e superior), efetuou-se uma análise transiente ao longo de 1536 horas. Este período corresponde ao lançamento de uma camada a cada 24 horas. Foram consideradas camadas de 0,30 m, temperatura de lançamento do concreto de 45 °C e temperatura ambiente de 20 °C.

A distribuição de temperaturas ocorreu de forma gradual tanto junto aos degraus da estrutura como nas faces de montante e superior das camadas, com dissipação do calor conforme mostrado na Figura 5.69.



**Figura 5.69 – Análise da barragem até a El. 281,00 após 1536 horas –  
Estrutura única**

Na continuidade, o problema é reavaliado levando-se em conta as etapas de construção. Esta alternativa foi denominada hipótese H1.

Para verificar a influência da temperatura de lançamento no problema, esta foi reduzida para 35 °C na hipótese H2.

Com a hipóteses H3 procurou-se avaliar a influência da temperatura externa, alterada para 30 °C, também adotada para a hipótese H6.

As hipóteses H4 e H5 foram efetuadas para se checar influência da alteração na espessura da camada, que passou a ser 0,60 m. Para o lançamento de uma camada de 0,60 m, com o dobro da altura inicial (0,30 m), foi considerado o dobro do tempo (48 horas). Posteriormente este valor foi reduzido para 24 horas (hipótese H7), supondo-se que houvesse maior capacidade produtiva na construção.

A redução do tempo de execução para 12 horas foi considerada para a camada de menor espessura (hipótese H8).

As hipóteses simuladas estão apresentadas na Tabela 5.9:

**TABELA 5.9 – HIPÓTESES CONSTRUTIVAS**

HIPÓTESE	ESPESSURA DA CAMADA (m)	TEMPERATURA AMBIENTE	TEMPERATURA DE LANÇAMENTO	INTERVALO DE TEMPO ENTRE LANÇAMENTOS
H0*	0,30	20°C	45°C	24 horas
H1	0,30	20°C	45°C	24 horas
H2	0,30	20°C	35°C	24 horas
H3	0,30	30°C	35°C	24 horas
H4	0,60	20°C	45°C	48 horas
H5	0,60	20°C	35°C	48 horas
H6	0,60	30°C	35°C	48 horas
H7	0,60	30°C	35°C	24 horas
H8	0,30	30°C	35°C	12 horas

(\*) – Análise da estrutura sem considerar a execução das camadas.

Nas Tabelas 5.10 a 5.12 são apresentados os valores dos resultados nodais das análises transientes, nos nós correspondentes às locações aproximadas aos termômetros T601 a T616, para períodos de análise referentes 9 dias (216 horas), 18 dias (432 horas), 36 dias (864 horas) e 64 dias (1536 horas). Estes períodos correspondem ao lançamento das camadas referentes aos nós selecionados.

Para melhor visualização dos resultados e comparação das hipóteses de construção, foram escolhidos os nós correspondentes a dois termômetros situados na primeira camada com instrumentos (El.267,7): o termômetro T601, situado próximo à face de montante da barragem, e o termômetro T603, mais central.

A comparação entre as hipóteses é apresentada através de gráficos mostrando a evolução da temperatura nos pontos considerados, de acordo com os fatores que afetaram a estrutura. Adotou-se a nomenclatura apresentada a seguir para facilitar a tabulação das hipóteses e resultados nos respectivos pontos:

H – hipótese

EC – espessura da camada (m)

TA – temperatura ambiente (°C)

TL – temperatura de lançamento (°C)

IT – intervalo de tempo entre o lançamento das camadas (horas)

**TABELA 5.10 – VALORES NODAIS – TERMÔMETROS 601 A 606**

Elevação 267,7			T601	T602	T603	T604	T605	T606
9 dias	216 horas	H7	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
		H8	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
18 dias	432 horas	H0	38,43	55,15	62,54	62,54	62,54	58,14
		H1	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00
		H2	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
		H3	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
		H4	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00
		H5	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
		H6	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
		H7	38,28	46,33	47,13	47,13	47,13	47,05
32 dias	768 horas	H8	41,55	47,66	48,47	48,47	48,47	48,44
		H7	35,42	44,35	48,24	48,24	48,24	47,97
36 dias	864 horas	H8	37,88	45,43	49,62	49,62	49,62	49,50
		H0	33,38	48,44	63,02	63,02	63,02	52,19
		H1	33,82	45,74	50,74	50,74	50,74	50,20
		H2	30,62	39,66	43,38	43,38	43,38	43,03
		H3	37,43	43,58	46,02	46,02	46,02	45,87
		H4	30,63	46,68	51,91	51,91	51,91	50,93
		H5	31,59	41,34	44,46	44,46	44,46	44,00
64 dias	1.536 horas	H6	35,30	42,96	45,31	45,31	45,31	45,48
		H0	30,28	42,92	63,50	63,50	63,49	46,51
		H1	28,86	39,15	51,37	51,37	51,37	50,40
		H2	26,83	34,73	44,01	44,01	44,01	43,41
		H3	34,81	40,31	46,65	46,65	46,65	46,41
		H4	26,69	39,85	52,54	52,54	52,54	50,93
		H5	29,19	37,35	45,10	45,10	45,10	44,32
H6	33,37	39,88	45,95	45,95	45,95	45,43		

**TABELA 5.11 – VALORES NODAIS – TERMÔMETROS 607 A 611**

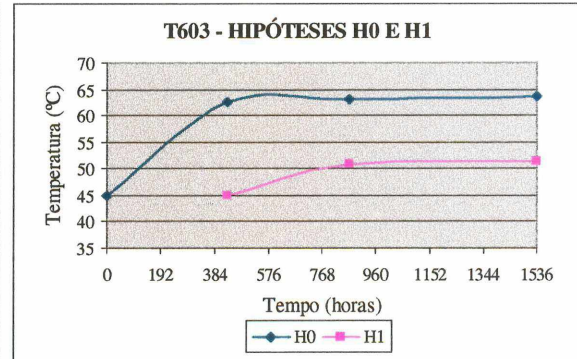
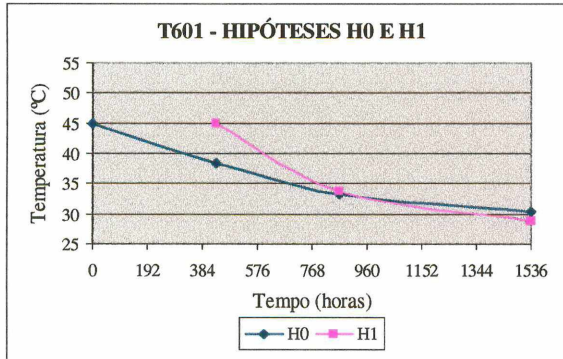
Elevação 273,1		T607	T608	T609	T610	T611	
18 dias	432 horas	H0	38,43	55,15	62,54	62,54	62,54
		H1	-	-	-	-	-
		H2	-	-	-	-	-
		H3	-	-	-	-	-
		H4	-	-	-	-	-
		H5	-	-	-	-	-
		H6	-	-	-	-	-
		H7	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
		H8	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
32 dias	768 horas	H7	36,87	45,86	47,78	47,78	47,78
		H8	39,81	47,10	49,15	49,15	49,15
36 dias	864 horas	HO	33,38	48,44	63,01	63,01	62,96
		H1	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00
		H2	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
		H3	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
		H4	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00
		H5	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
		H6	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
64 dias	1.536 horas	HO	30,25	42,86	63,39	63,39	62,79
		H1	31,21	42,79	51,07	51,07	51,07
		H2	28,63	37,47	43,71	43,71	43,71
		H3	36,05	42,15	46,35	46,35	46,35
		H4	28,52	43,61	52,23	52,23	52,23
		H5	34,25	41,61	45,62	45,62	45,62
		H6	34,25	41,61	45,62	45,62	45,62

**TABELA 5.12 – VALORES NODAIS – TERMÔMETROS 612 A 616**

Elevação 278,8			T612	T613	T614	T615	T616
18 dias	432 horas	H0	37,07	52,51	59,29	59,29	58,76
		H1	-	-	-	-	-
		H2	-	-	-	-	-
		H3	-	-	-	-	-
		H4	-	-	-	-	-
		H5	-	-	-	-	-
		H6	-	-	-	-	-
32 dias	768 horas	H7	40,18	45,29	45,42	45,42	45,42
		H8	43,37	46,54	46,65	46,65	46,65
36 dias	864 horas	H0	30,60	42,50	53,95	53,95	51,97
		H1	-	-	-	-	-
		H2	-	-	-	-	-
		H3	-	-	-	-	-
		H4	-	-	-	-	-
		H5	-	-	-	-	-
		H6	-	-	-	-	-
64 dias	1.536 horas	H0	26,75	35,01	48,36	48,36	44,96
		H1	38,48	48,33	49,83	49,83	49,83
		H2	34,08	41,38	42,47	42,47	42,47
		H3	39,69	44,43	45,11	45,11	45,11
		H4	34,71	49,43	51,06	51,06	51,06
		H5	37,19	43,77	44,45	44,45	44,45
		H6	37,19	43,77	44,45	44,45	44,45

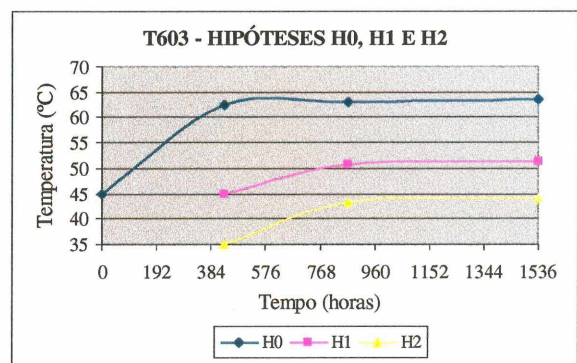
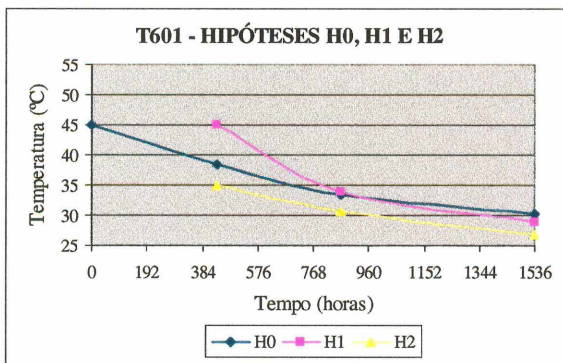
**a) Influência da seqüência construtiva por camadas:**

H	EC	TA	TL	IT	Obs.
0	0,30	20	45	24	Estr. única
1					Por camadas



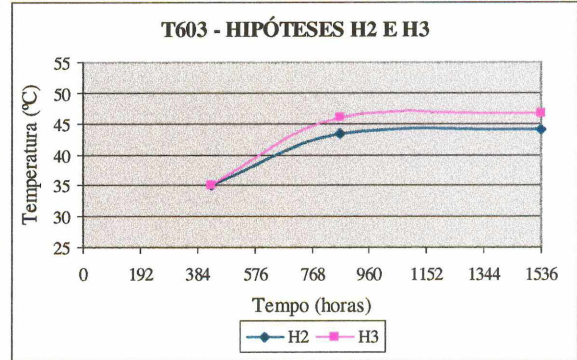
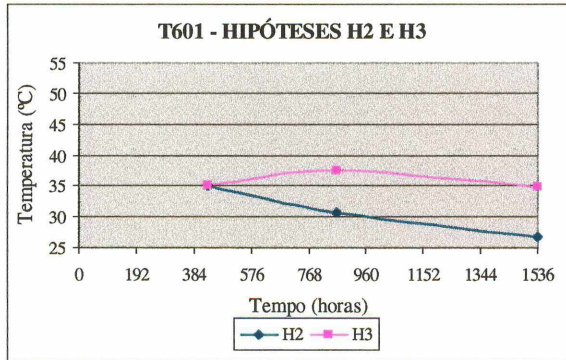
**b) Influência da temperatura de lançamento do concreto:**

H	AC	TA	TL	IT	Obs.
0	0,30	20	45	24	Estr. única
1					Por camadas
2			35		

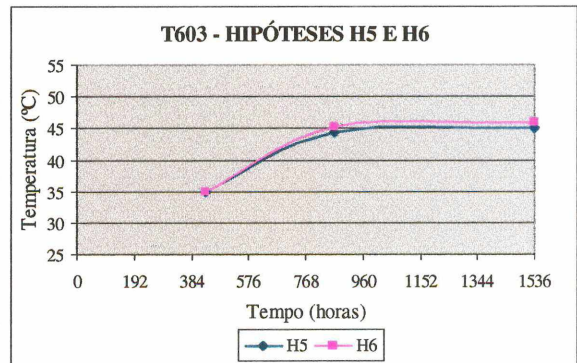
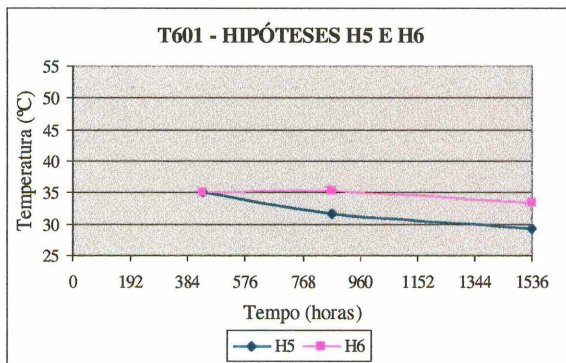


**c) Influência da temperatura ambiente:**

H	EC	TA	TL	IT	Obs.
2	0,30	20	35	24	Por camadas
3		30			

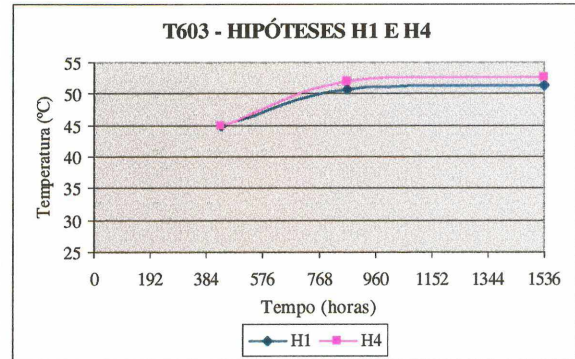
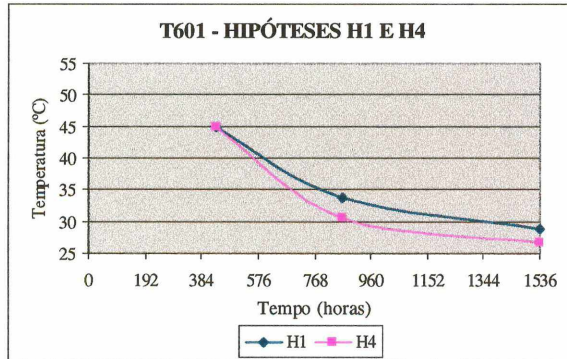


H	EC	TA	TL	IT	Obs.
5	0,60	20	35	24	Por camadas
6		30			

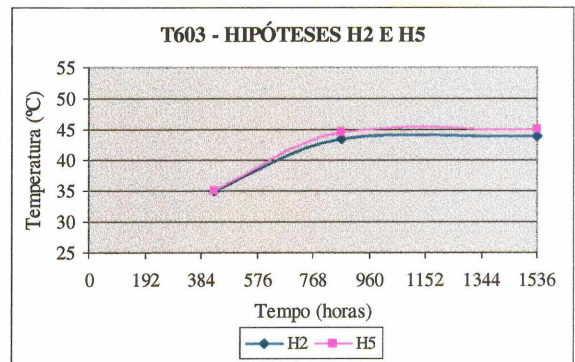
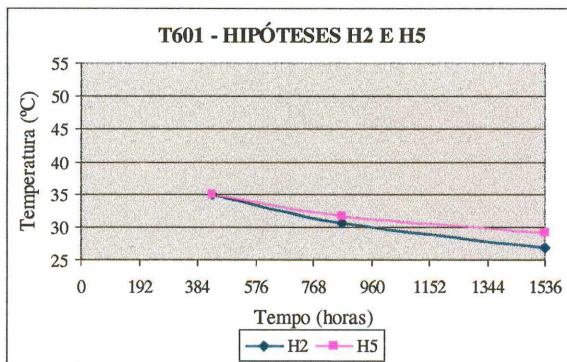


**d) Influência da espessura da camada:**

H	EC	TA	TL	IT	Obs.
1	0,30	20	45	24	Por camadas
4	0,60			48	

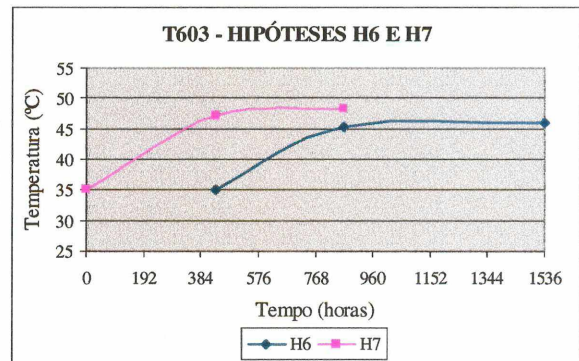
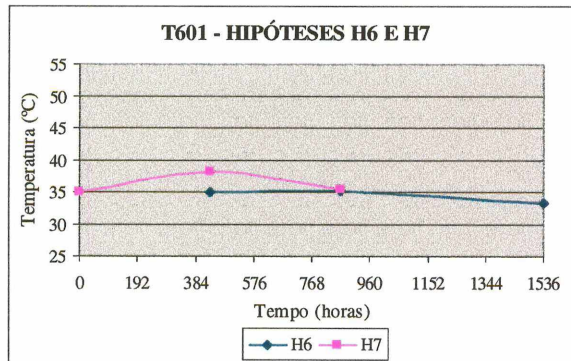


H	EC	TA	TL	IT	Obs.
2	0,30	20	35	24	Por camadas
5	0,60			48	

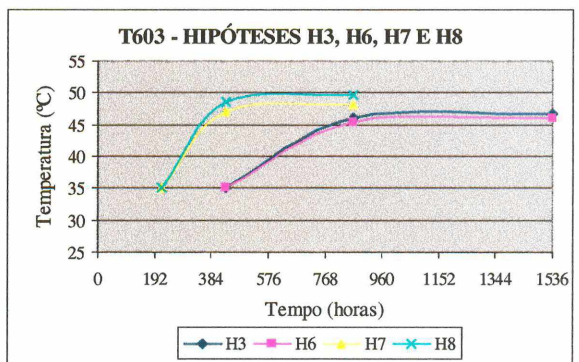
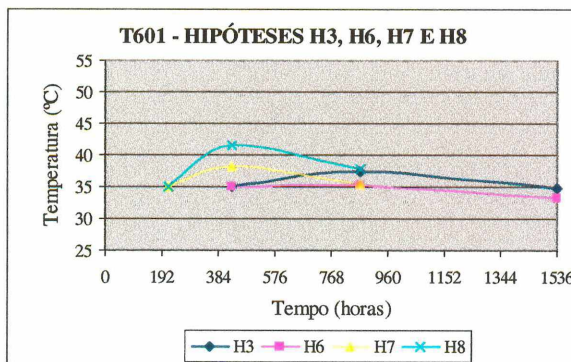


e) **Influência do intervalo de tempo de lançamento da camada:**

H	AC	TA	TL	IT	Obs.
6	0,60	30	35	48	Por camadas
7				24	



H	EC	TA	TL	IT	Obs.
3	0,30	30	35	24	Por camadas
6	0,60			48	
7	0,60			24	
8	0,30			12	



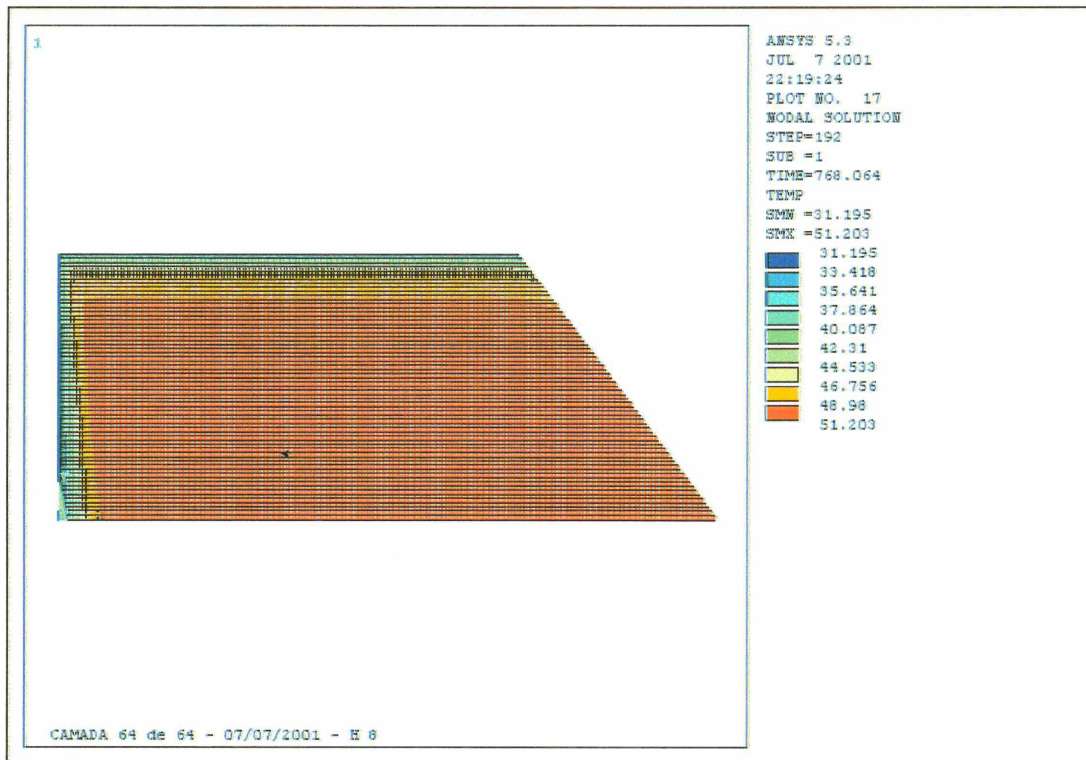
A comparação entre os resultados da estrutura executada como um todo, e da análise levando em conta as camadas mostrou uma variação significativa no gradiente térmico da estrutura. Desconsiderando-se as etapas construtivas não é reproduzida a transferência de calor para o meio ambiente que ocorre entre o lançamento das

camadas. Assim, a influência da geração de calor interno pode ser superestimada, bem como gradientes térmicos utilizados em análises estruturais.

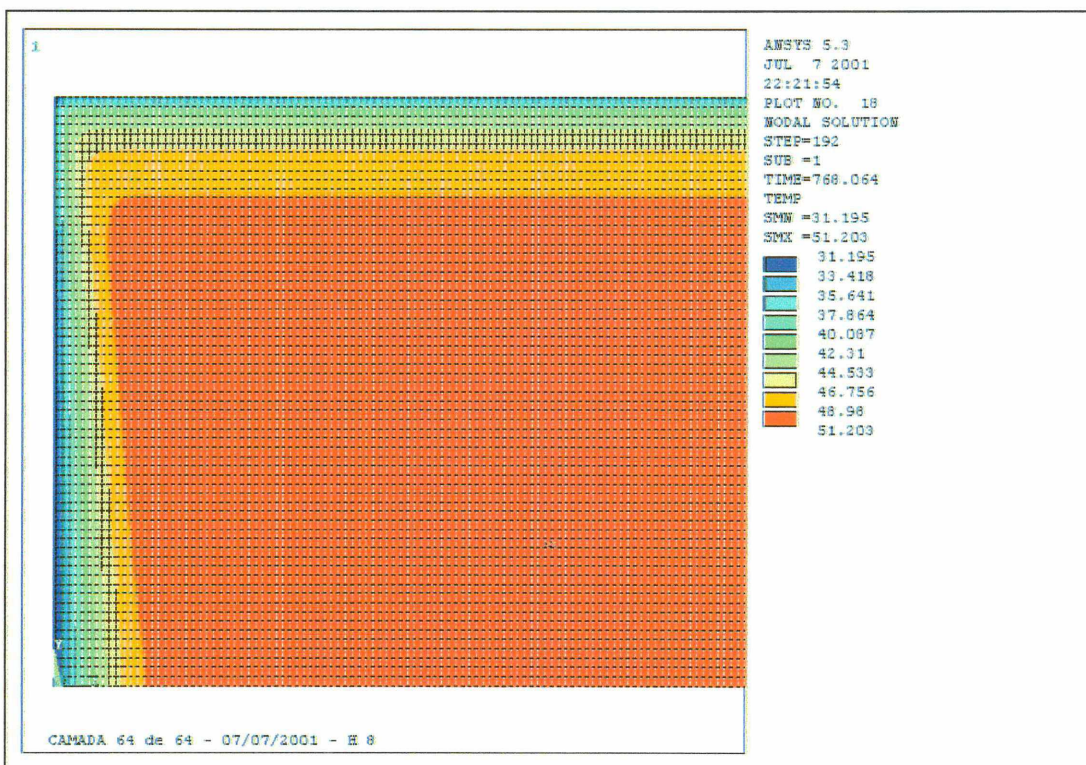
Observa-se que o ponto correspondente ao termômetro localizado próximo à face de montante da barragem (T601) indica uma maior influência do meio ambiente e conseqüentemente dos parâmetros relativos à transferência de calor por convecção. O ponto de análise no corpo da estrutura (T603) mostra a influência da geração de calor interno nas sucessivas camadas no corpo da estrutura, com as maiores elevações de temperatura.

A redução no intervalo de tempo entre o lançamento das camadas de mesma espessura resultou em uma elevação do gradiente térmico na estrutura. Esta influência mostrou-se maior quanto mais próximo da face, onde a dissipação do calor para o meio ambiente seria mais acentuada.

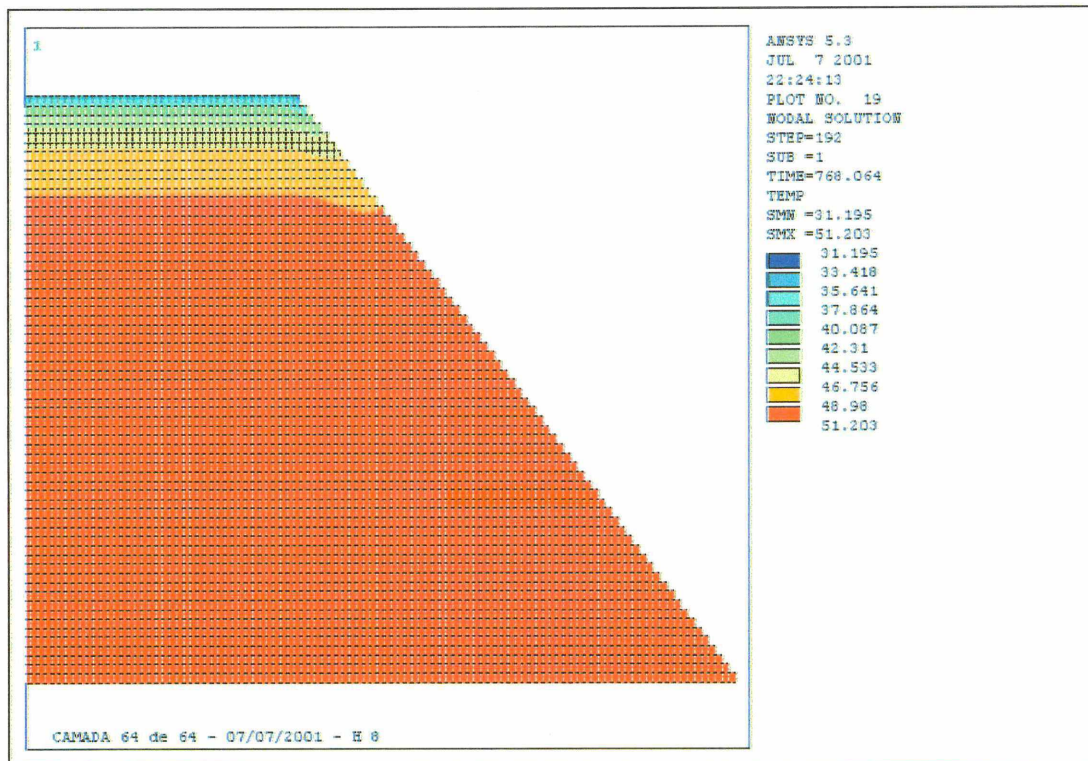
A Hipótese 8, que simulou a execução de camadas de 0,30 m a cada 12 horas com temperatura de lançamento do concreto de 35°C e temperatura ambiente próxima a esta, de 30°C, foi a que apresentou a maior elevação térmica, com um incremento de aproximadamente 15°C. Nas Figuras 5.70 a 5.72 é mostrada a distribuição de temperaturas resultante, decorridas 768 horas (32 dias) do início do lançamento das camadas.



**Figura 5.70 – Hipótese 8 – 768 horas**



**Figura 5.71 – Hipótese 8 – 768 horas – Detalhe de Montante**



**Figura 5.72 – Hipótese 8 – 768 horas – Detalhe de Jusante**

Com as diversas alternativas mostradas, pode-se constatar que a sistemática de análise proposta se constitui em uma ferramenta adequada para a avaliação da distribuição de temperaturas em estruturas.

No caso da barragem avaliada, a discretização das camadas exige um razoável esforço computacional. Para cada hipótese apresentada, que envolveu apenas parte da estrutura (11.699 nós e 11.424 elementos), foram despendidas em torno de 3 horas de processamento em um equipamento padrão Pentium 350Hz. A discretização de toda a estrutura, não utilizada neste trabalho resultou em uma malha de elementos finitos com aproximadamente 23.500 nós e 23.000 elementos, necessitando uma capacidade computacional superior.

Assim, uma das limitações existentes não seria o número de camadas da estrutura e sim a capacidade de processamento dos equipamentos disponíveis para as análises.

Uma vez que a sistemática desenvolvida é totalmente genérica, um fator importante para se proceder a análises adequadas é a definição das propriedades dos materiais envolvidos. Cuidados especiais devem ser tomados em relação à curva de elevação adiabática, de difícil determinação, e a curva de geração de calor correspondente.

Com relação às seqüências construtivas, as hipóteses apresentadas mostraram a importância da definição dos condicionantes ambientais, bem como dos planos construtivos. Alterações significativas e não previstas, tanto na temperatura inicial quanto na temperatura externa podem resultar em gradientes térmicos que resultem efeitos indesejados.

As simulações efetuadas mostram que esta sistemática pode fornecer importantes subsídios para uma avaliação criteriosa de projeto das estruturas bem como permite seu acompanhamento durante a fase de execução.

## 6 CONCLUSÕES

A avaliação do comportamento térmico de uma estrutura é de fundamental importância quando fenômenos de natureza térmica podem comprometer seus requisitos de desempenho, segurança e durabilidade. Ao longo deste trabalho foram apresentados os principais fundamentos que regem este comportamento térmico, descrevendo-se de maneira geral os fatores condicionantes e intervenientes.

Os principais modos de transferência de calor foram descritos, identificando-se as equações referentes à condução de calor e apresentando-se a formulação básica para a análise numérica.

Foi proposta uma sistemática de avaliação de problemas de natureza térmica ao longo do tempo, ou seja, em regime transiente. Adotou-se um tratamento numérico baseado no Método dos Elementos Finitos. A sua formulação básica é detalhada com o foco na transferência de calor.

Para o desenvolvimento da metodologia foi utilizado o programa de análise estrutural comercial, *ANSYS®/Multiphysics*, que possui recursos disponíveis para pré e pós-processamento, permitindo a otimização das análises.

A reprodução da seqüência construtiva foi possível compondo-se a análise térmica de um problema ao longo do tempo com a utilização de um processo específico para ativar e desativar elementos de uma malha, uma vez que sejam representativos do problema.

Através da técnica Birth & Death elementos referentes às camadas são considerados ativos perante a malha de elemento finitos a medida que estas sejam executadas.

Devido à complexidade dos problemas envolvidos ao longo do tempo, a utilização dos recursos iterativos do programa torna a análise mais trabalhosa, com

maior esforço computacional. Assim, a rotina computacional foi escrita com a linguagem específica do *ANSYS®/Multiphysics (APDL - ANSYS® Parametric Design Language)*.

A seqüência de análise é geral, podendo ser aplicada a qualquer tipo de estrutura executada por camadas. Para tanto, é necessária a discretização da estrutura com a definição das camadas e condições de contorno pertinentes.

Enfocando-se as estruturas de concreto, mais precisamente as barragens, a sistemática apresentada mostrou-se eficiente em reproduzir o campo de temperaturas em estruturas executadas por camadas. Permitiu a avaliação, ao longo do tempo, do comportamento de cada camada, sob a influência da temperatura de lançamento, das condições de contorno de fluxo de calor, convecção, temperatura ambiente externa e da geração de calor interna.

Os resultados apresentados demonstraram a importância de se determinar, da forma mais precisa possível, os parâmetros do material, principalmente no que se refere às suas propriedades térmicas tais como condutividade térmica, o calor específico e a curva de elevação adiabática de temperatura, para a determinação da curva de geração de calor correspondente.

Conforme salientado anteriormente, uma das maiores dificuldades no projeto de estruturas de concreto é a determinação do campo de temperaturas para uma geometria complexa, incorporando na análise as etapas do processo construtivo, levando-se em conta a influência térmica de uma camada sobre as demais e sobre a estrutura como um todo.

A metodologia proposta mostra-se uma ferramenta muito útil para a avaliação de estruturas executadas por camadas, particularmente para projetos de concreto massa como barragens de concreto compactado com rolo. Permite, de modo eficiente, a avaliação de diversos fatores que podem se mostrar significativos na redução de prazos

e custos de construção, bem como na melhoria da qualidade e desempenho da estrutura. Dentre outros, podem ser destacados os seguintes fatores:

- ◊ variações nas propriedades intrínsecas dos materiais, reproduzindo composições diversas;
- ◊ variações climáticas;
- ◊ diferentes espessuras de camadas de concretagem;
- ◊ diferentes tempos de lançamento entre as camadas;
- ◊ diferentes condições de transferência de calor, reproduzindo processos de cura do concreto;
- ◊ interrupções de concretagem e resfriamento, como no caso de galgamento das estruturas;
- ◊ diferentes seqüências construtivas.

Com a avaliação de diversas hipóteses, pode-se definir o campo de temperaturas mais apropriado para o problema em questão. A partir destes resultados podem ser efetuadas análises do campo de tensões termo-elásticas, determinando-se o comportamento estrutural correspondente.

Como conseqüência, fornece subsídios para maximizar a espessura das camadas de lançamento, sem causar fissuras de origem térmica, otimizar o intervalo de tempo entre as camadas, definir a necessidade ou não de sistemas de refrigeração do concreto.

Conclui-se esta é uma metodologia viável, oferecendo condições para a otimização de projetos, com a avaliação da seqüência construtiva.

Em continuidade à sistemática proposta, sugere-se abaixo algumas linhas para pesquisa futura:

- ◇ avaliação do comportamento térmico da execução de estruturas em camadas com diferentes materiais (isotrópicos ou anisotrópicos), como os compósitos;
- ◇ avaliação do campo de tensões resultantes das variações térmicas, a partir do campo de distribuições de temperaturas já definido e com a substituição, na malha de elementos finitos, dos elementos sólidos térmicos por elementos estruturais. Esta análise é muito importante para a definição dos máximos níveis de tensão admissíveis na estrutura, de modo a se evitar fissuras que comprometam os requisitos de projeto;
- ◇ avaliação da distribuição do campo de temperaturas de estruturas executadas por camadas tridimensionais.
- ◇ avaliação do campo de tensões resultantes de variações térmicas em estruturas executadas por camadas tridimensionais;
- ◇ avaliação da distribuição de temperaturas pelo Método Inverso, a partir dos dados de instrumentação;
- ◇ avaliação do posicionamento de juntas de dilatação entre blocos de concretagem;
- ◇ avaliação de estruturas de concreto de alto desempenho.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADRE, W. P., (editor). **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo**, - Ensaios e propriedades. Equipe de FURNAS – Laboratório de Concreto. Ed. Pini, 1997.
- ANDRIOLO, F. R. **The use of roller compacted concrete**. Oficina de Textos, 1998
- ANSYS®/Multiphysics, ANSYS Inc. Company, 1994
- ARAÚJO, J. M. de; AWRUCH, A. M. **Probabilistic finite element analysis of concrete gravity dams**. Advances in Engineering Software. Vol. 29 N<sup>o</sup> 2 p. 97-104. 1998.
- ARAUJO, J.M.; AWRUCH, A.M. **An objective cracking criterion for the analysis of concrete dams**. Computers and Structures. Vol: 59 Iss: 4 p. 751-756. Elsevier. 1996.
- AYARI, M. L.; ZHANG P.; YE, Z. **Finite element planar stress analysis**. International Journal of Solids Structures. Vol. 33 N<sup>o</sup> 29 p. 4365-4378. 1996.
- BATHE, K. J. **Finite element procedures**. Prentice-Hall, Inc. 1996.
- BATHE, K. J.; WILSON, E. L. **Numerical methods in finite element analysis**. Prentice-Hall, Inc. 1976.
- BECKER, E. B.; CAREY, G. F.; ODEN, J. T. **Finite elements – An introduction – Volume I**. Prentice-Hall, Inc.1981.
- BEJAN, A. **Convection heat transfer**. John Wiley & Son. 1984.
- BEJAN, A. **Transferência de calor**. Editora Edgard Blücher Ltda. 1996.
- BOURANTA, K.; MALEGIANNAKIS, G. A.; KRÖPLIN, B. **Thermo-electro-mechanical coupling problems solved by FE-formulation**. International Journal for Computer-Aided Engineering and Software, Vol. 15 N<sup>o</sup> 7 p. 804-828. 1998.

- BOUZOUBAÂ, N.; LACHEMI, M.; MIAO, B.; AİTCIN, P. C. **Thermal damage of mass concrete: experimental and numerical studies and numerical studies on effect of external temperature variations.** Canadian Journal of Civil Engineering. Nº 24 p. 647-657. 1997.
- CALMON, J. L.; SILVA, C. J. da; MIRAMBELL, E. **Análise térmica bidimensional em regime transiente pelo Método dos Elementos Finitos. aplicação às estruturas de concreto de alto desempenho.** IV Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo. 2000.
- CALVO, J. B., SUDÓN, J. F. S., PFEIFFER, M. G. M. **Thermal analysis of RCC dams. Methodology. Application to Cenza Dam,** International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain. 1995.
- CHANTASIRIWAN, S. **Inverse heat conduction problem of determining time-dependent heat transfer coefficient.** International Journal of Heat and Mass Transfer 42. 1999.
- CHENGQIAN, LI; CHUSHENG, C. **New development on application and study of RCC on Panjiakou water control project.** International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain. 1995.
- COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E. **Concepts and applications of finite element analysis.** John Wiley & Sons; Third Edition. 1989.
- DELORME, F. **RCC laboratory tests: experience acquired in the past ten years and new developments.** International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain. 1995.
- DESAI, C. S.; ABEL, J. F. **Introduction to the Finite Element Method – a numerical method for engineering analysis.** Von Nostrand Reinhold Company. 1972.
- FAIRBAIRN, E. M. R.; ALVES, J. L. D.; FERREIRA, I. A. **Implementação do modelo de acoplamentos do MEF: simulação do uso do concreto projetado na execução de túneis.** Computation Methods in Engineering, 1999 (a).
- FAIRBAIRN, E. M. R.; GOULART, E.; COUTINHO, A. L. G. A.; EBECHEN, N. F. F.; VIANA, D. M.; GUEDES, Q. M. **Aplicações de Redes Neurais e do MEF para a retroanálise do concreto em barragens.** Computation Methods in Engineering, 1999 (b).

- FEDOSSOV, V. E. **Roller compacted concrete and horizontal construction joints strength**. International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain. 1995.
- FRADKINA, N. I. **Computer aided research of RCC dam thermal stress state (formulation of the problem. Mathematical model. Results of analysis)**. International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain. 1995.
- GAWIN, D.; SCHREFLER, B. A. **Thermo-hydro-mechanical analysis of partially saturated porous materials**. Engineering Computations. Vol. 13 No. 7. p. 113-141. 1996.
- GIMÉNEZ, E. C., FERNÁNDEZ, J. C. L. **Prediction of the thermal state of dams using models application to Algar Dam (Valencia – Spain)** International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain. 1995.
- GUELPA, D. F. V.; TAGLIATELLA, E. P.; BON JR., W. **Cálculo de tensões de origem térmica considerando-se a construção incremental em grandes maciços de concreto** IX Seminário Nacional de Grandes Barragens, Rio de Janeiro. 1973.
- HETNARSKI, R. B. **Mechanical and mathematical methods - thermal stress I / II**. Elsevier Science Publishers B. V. 1986.
- HINKS, J. L. **Thermal analysis for RCC dams**. International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain. 1995.
- HOLMAN, J. P. **Heat transfer**. McGraw-Hill Book Company, Sixth Edition, 1986.
- HUEBNER, K. H.; THORNTON, E. A.; BYROM, T. G.; R. D. **The Finite Element Method for engineers**. John Wiley & Sons; Third Edition. 1995.
- HYDROPOWER & DAMS **World atlas & industry guide**. The International Journal N<sup>o</sup>. 1. p. 3-5, 9-37. 2001.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. John Wiley & Sons; Third Edition. 1990.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Introduction to heat transfer**. John Wiley & Sons; Third Edition. 1996.

- INOUE, G. **Medidas preventivas de controle da temperatura que induz fissuração no concreto massa.** Dissertação apresentada à Escola Politécnica da USP para obtenção do título de Mestre em Engenharia. São Paulo. 1983.
- INOUE, G. **Determinação das tensões de origem térmica para indução de juntas de contração em barragens de concreto compactado a rolo.** Tese apresentada à Escola Politécnica da USP para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. São Paulo. 1990.
- KALJEVIC, I.; PATNAIK, S. N.; HOPKINS, D. A. **Development of finite elements for two-dimensional structural analysis using the integrated force method.** Computers and Structures. Vol: 59 Iss: 4 p. 691-706. Elsevier.1996.
- KHATCHATOURIAN, O. A.; BORGES, P. A. P.; AQUINO D., A. F. **Modelagem e simulação do estado tenso e térmico em corpos elásticos.** Computational Methods In Engineering, 1999.
- KIM, Y.; LEE, J.; YOO, B. **An analysis of stress intensity factor for thermal transient problems based on green's function.** Engineering Fracture Mechanics. Vol. 49 N<sup>o</sup> 3 p. 393-403. 1994.
- KREITH, F. **Princípios da Transmissão de Calor,** Editora Edgard Blücher, 1977.
- LÉGER, P.; VENTURELLI, J.; BHATTACHARJEE, S. S. **Seasonal temperature and stress distributions in concrete gravity dams.** part 1: modelling, part 2: behaviour. Canadian Journal of Civil Engineering. N. 20 p. 999-1029. 1993.
- LÉGER, P.; TINAWI, R.; MOUZER, N. **Numerical simulation of concrete expansion in concrete dams affected by alkali – aggregate reaction: state-of-the-art.** Canadian Journal of Civil Engineering. N. 22 p. 692-713. 1995.
- LEHTOLA, R.; VAZ, L. E.; VARGAS JR. E.A.; GUEDES, Q. M. **Modelos numéricos para a simulação de concreto massa.** Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, Goiânia, 1997.
- LEWIS, R. W.; MORGAN, K.; THOMAS, H. R.; SEETHARAMU, K. N. **The Finite Element Method in heat transfer analysis.** John Wiley & Sons. 1996.

- LYONS, L.P.; KENT, A. J.; BELL, A. P.; CROOK, A. J. L. **Recent developments in the Lusas finite element system.** Computers and Structures. Vol. 41 N<sup>o</sup> 6 p. 1273-1280. 1991.
- MACHADO, H. A.; ORLANDE, H. R. B. **Inverse analysis for estimating the timewise and spacewise variation of the wall heat flux in a parallel plate channel.** International Journal for Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. Vol. 7 N<sup>o</sup> 7 p. 696-710. 1997.
- MAJUMDAR, P.; GUPTA, A.; MARCHERTAS A. **Stress analysis of heated concrete using finite elements.** Nuclear Engineering and Design. N<sup>o</sup> 147 p. 287-298. 1994.
- MALVERN, L. E. **Introduction to the mechanics of a continuous medium.** Prentice-Hall. 1969.
- MAO, M.; TAYLOR, C. A. **Non-linear seismic cracking analysis of medium-height concrete gravity dams.** Computers and Structures. Vol. 64 N<sup>o</sup> 5/6 p. 1197-1204. 1997.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1<sup>a</sup> Edição, Ed. Pini, São Paulo. 1994.
- MILES, M. P.; FOURMENT, L.; CHENOT, J. L. **Finite element calculation of thermal coupling between workpiece and tools in forging.** Engineering Computations. Vol. 12. p. 687-705. 1995.
- NGUYEN, K., T.; PRYSTAY, M. **An inverse method for estimation of the initial temperature profile and its evaluation in polymer processing.** International Journal of Heat and Mass Transfer, 42, Elsevier Science Ltda. 1999.
- NOLLET. M. J. **General aspect of design a thermal analysis of RCC Lac Robertson Dam.** International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain. 1995.
- ORLOWSKI, E. A. G.; GAMBALE, E. A.; CARMO, J. B.M.; MARQUES FILHO, J.; ANDRADE, W. P. **Comportamento e análise térmica do concreto compactado com rolo da UHE Salto Caxias.** 41<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Salvador. 1999.

- ÖZISIK, M. N. **Transferência de calor**, Ed. McGraw-Hill Latinoamericana S.A., Bogotá, Colombia, 1979.
- PAPPALARDO JR., A. **Uma metodologia para modelagem matemática de barragens de concreto afetadas pela reação álcali-agregado**, Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1998.
- PAULETTI, R. M. O.; PIMENTA, P. M.; PAPPALARDO JR., A. **A new procedure for the long-term evaluation of structural effects due to alkali-aggregate reaction**, Computational Methods in Engineering, 1999.
- PIMENTA, P. M., PAULETTI, R. M. O.; PAPPALARDO JR. A. **Uma proposta de metodologia de acompanhamento por modelagem matemática de barragens de concreto afetadas por reação álcali-agregado**. Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, Goiânia, 1997.
- PROULX, J.; PAULTRE, P. **Experimental and numerical investigation of dam-reservoir-foundation interaction for a large gravity dam**. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 24, p. 90-105, 1997.
- PRUD'HOMME, M.; NGUYEN, T. H. **Fourier analysis of conjugate gradient method applied to inverse heat conduction problems**. International Journal of Heat and Mass Transfer 42, Elsevier Science Ltda. 1999.
- SAETTA, A; SCOTTA, R.; VITALIANI, R. **Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal loads**. Journal of Structural Engineering. Vol. 121, N. 3 p. 446-457. 1995.
- SALETE, E.; LANCHÁ, J. C.; MARCO, C. **Sensibility of thermal transient analysis of dams on the convection coefficient**. International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain. 1995.
- SASAKI, T.; MORIKAWA, S. **Thermo-mechanical consolidation coupling analysis on jointed rock mass by the Finite Element Method**. Engineering Computations. Vol.13 Nº 7, p. 70-86. 1996.
- SILVEIRA, J. F. A. **A expansão do concreto em barragens afetadas pela RAA e a importância das tensões confinantes**. Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, Goiânia, 1997

- STUART, R.; SHIPLEY, L.; GHOSE, A.; HIREMATH, M. **Thermal degradation of the concrete roof of high-level waste storage tank.** Computers and Structures. Vol: 64 N<sup>o</sup> 5/6 p. 959-972. 1997.
- VISENTINI, G. **Italian experience in roller compacted concrete dams.** International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain. 1995.
- VON GRABE, W.; TWORUSCHKA, H. **An interface algorithm for nonlinear reliability analysis of reinforced concrete structures using Adina.** Computers and Structures. Vol: 64 N<sup>o</sup> 5/6 p. 949-958. 1997.
- WICKSTÖM. **Structures analysis of francis turbine runner using Adina.** Computers and Structures. Vol: 64 N<sup>o</sup> 5/6 p. 1087-1095. 1997.
- WILSON, E. L. **The determination of temperatures within mass concrete structures.** Structural Engineering and Structural Mechanics Report N<sup>o</sup>UCB/SESM - 68/17 p. 2. University of California, Berkeley. USA.1968.
- YAMAZUMI, A.; HARITA, K.; JIKAN, S.; KIDO, K. **A study of thermal control on RCD dam.** International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain. 1995.
- YE, Z. **A new finite element formulation for planar elastic deformation.** International Journal for Numerical Methods in Engineering. Vol. 40, p. 2579-2591. 1997.
- ZIENKIEWICZ; O. C. **The Finite Element Method in engineering science.** McGraw-Hill Book Company. 1971.

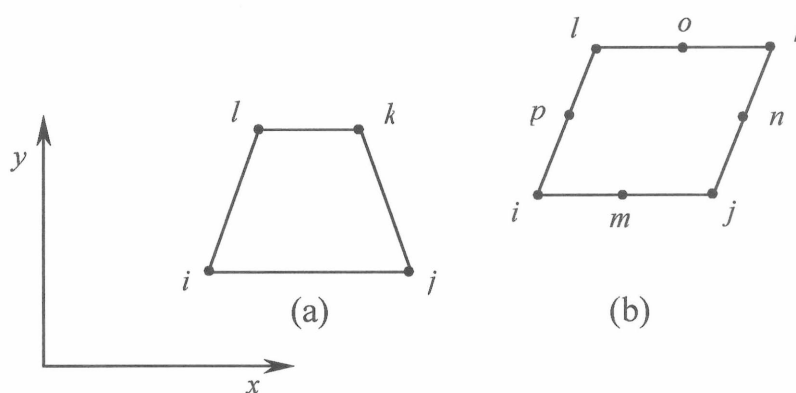
## ANEXO 1 - ELEMENTOS

A metodologia proposta no presente trabalho foi desenvolvida através do software comercial, *ANSYS®/Multiphysics* (1994) – versão 5.3.

Esta opção deveu-se, entre outros fatores, à possibilidade de otimizar as análises das estruturas com a utilização dos recursos disponíveis para a discretização e definição de elementos, a capacidade de resolução numérica e a disponibilidade de interfaces gráficas.

Para a discretização de problemas sujeitos a análises térmicas, o programa empregado apresenta uma biblioteca com cerca de 40 diferentes tipos de elementos. São disponibilizados elementos sólidos bidimensionais, tridimensionais, elementos de ligação para radiação, para convecção, elementos de barra para condução, elementos de placa, elementos de campos acoplados (térmico/estrutural/fluido/elétrico) e elementos especiais.

Nas análises térmicas bidimensionais desenvolvidas neste trabalho, foram utilizados elementos quadrangulares lineares (4 nós) e quadrangulares quadráticos (8 nós), mostradas na Figura A1.1



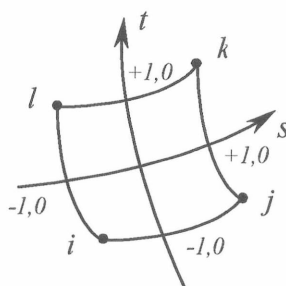
**Figura A1.1 – Elementos bidimensionais: (a) quadrangular linear (4 nós) e (b) quadrangular quadrático (8 nós)**

## A1.1 ELEMENTO SÓLIDO QUADRANGULAR LINEAR (4 NÓS)

O elemento mostrado na Figura A1.1 (a), denominado PLANE55, é aplicável em análises bidimensionais estáticas ou transientes, bem como em fluxos de calor em transporte de massa. Possui um grau de liberdade, a temperatura, em cada nó. As propriedades térmicas consideradas são a condutividade térmica, massa específica, calor específico, entalpia e viscosidade.

Valores de convecção e fluxo de calor podem ser aplicados como forças de superfície nas faces do elemento. Taxas de calor de geração podem ser aplicadas como forças de corpo nos nós.

A função de forma definida para este elemento, mostrado na Figura corresponde a [Becker et al. (1981), *ANSYS®/Multiphysics* (1994)]:



**Figura A1.2 – Localização dos nós para a definição da função de forma**

$$T = \frac{1}{4} [T_i(1-s)(1-t) + T_j(1+s)(1-t) + T_k(1+s)(1+t) + T_l(1-s)(1+t)] \quad (\text{A1.1})$$

sendo:  $T_i, T_j, T_k, T_l$  – temperaturas nodais (nós  $i, j, k, l$ )

$s, t$  – coordenadas normalizadas variando de  $-1,0$  em um lado do elemento e  $+1,0$  no outro lado

## A1.2 ELEMENTO SÓLIDO QUADRANGULAR QUADRÁTICO (8 NÓS)

O elemento chamado de PLANE77, mostrado na Figura A1.1(b), corresponde a um elemento de maior ordem que o quadrangular linear, aplicável também em análises bidimensionais estáticas ou transientes, adequado para modelagem de contornos curvos. Possui um grau de liberdade, a temperatura, em cada nó. As propriedades térmicas consideradas são a condutividade térmica, massa específica, calor específico e entalpia.

Valores de convecção e fluxo de calor podem ser aplicados como forças de superfície nas faces do elemento. Taxas de calor de geração podem ser aplicadas como forças de corpo nos nós.

A função de forma definida para este elemento corresponde a:

$$T = \frac{1}{4} \left[ \begin{array}{l} T_i(1-s)(1-t)(-s-t-1) + T_j(1+s)(1-t)(s-t-1) + T_k(1+s)(1+t)(s+t-1) + \\ T_l(1-s)(1+t)(-s+t-1) \end{array} \right] + \frac{1}{2} \left[ \begin{array}{l} T_m(1-s^2)(1-t) + T_n(1+s)(1-t^2) + T_o(1-s^2)(1+t) + T_p(1-s)(1-t^2) \end{array} \right] \quad (\text{A1.2})$$

sendo:  $T_i, T_j, T_k, T_l, T_m, T_n, T_o, T_p$ , – temperaturas nodais

$s, t$  – coordenadas normalizadas variando de  $-1,0$  em um lado do elemento e  $+1,0$  no outro lado.

## ANEXO 2 – CURVA DE GERAÇÃO DE CALOR

Nas análises térmicas de uma estrutura, um dos fatores de influência é a evolução adiabática de temperaturas do material. Na implementação da metodologia proposta neste trabalho, utilizando o programa *ANSYS®/Multiphysics*, é necessário que esta elevação seja considerada como uma geração de calor na estrutura.

Assim, utilizando-se a equação de Fourier, a curva de elevação adiabática de temperaturas é transformada em uma curva de geração de calor.

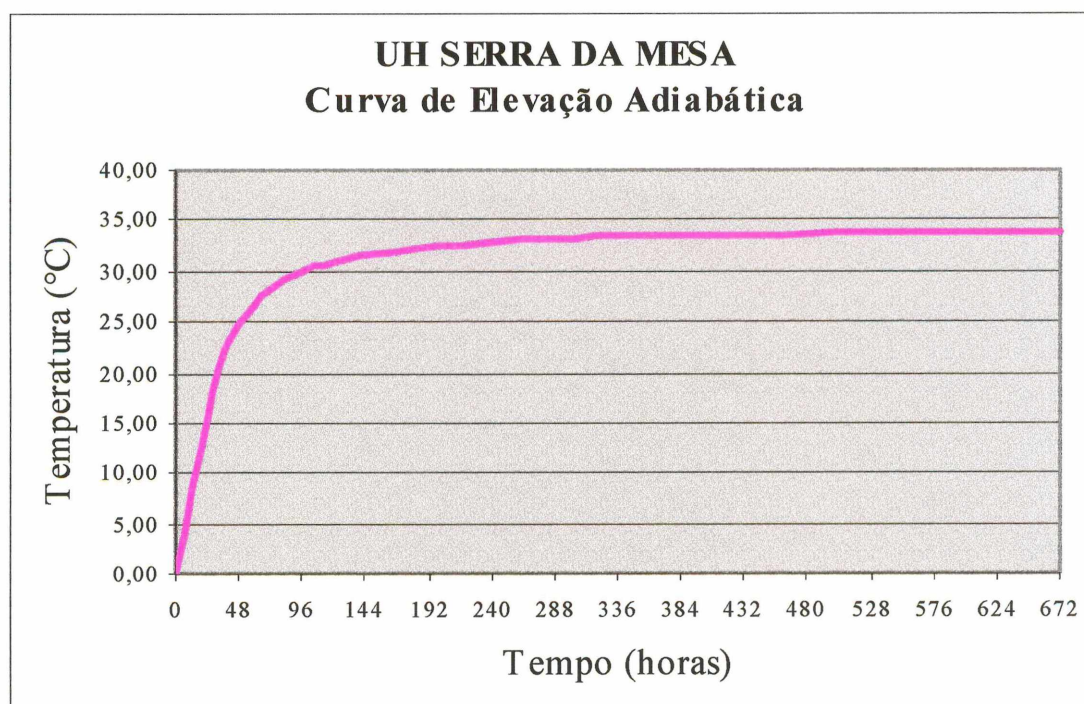
Apresenta-se na seqüência, a curva gerada para o exemplo apresentado no Capítulo 5, com os dados da barragem da Usina Hidrelétrica Serra da Mesa.

As propriedades térmicas características do material adotado são apresentadas na seqüência. Na Tabela A2.1 e Figura A2.1 está apresentada a curva de elevação adiabática.

- ◇ Massa específica =  $2295 \text{ kg/m}^3$
- ◇ Calor específico =  $1063 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  ( $1063 \text{ J/kgK}$ )
- ◇ Condutividade térmica =  $8172 \text{ J/mh}^\circ\text{C}$  ( $2,27 \text{ W/mK}$ )
- ◇ Coeficiente de dilatação térmica =  $12,5 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$  ( $12,5 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ )
- ◇ Coeficiente de transferência de calor:  
Concreto-forma de madeira =  $8374 \text{ J/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  ( $2 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} = 2,33 \text{ W/mK}$ )

**TABELA A2.1 – CURVA DE ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA**

Tempo		Temperatura (°C)
Dias	Horas	
0	0	0
1	24	16,02
1,5	36	21,48
2	48	24,75
3	72	28,22
4	96	29,94
5	120	30,94
7	168	32,02
10	240	32,79
15	360	33,35
28	672	33,84



**Figura A2.1 – Curva de elevação adiabática**

Para a utilização da equação de Fourier, foram ajustados polinômios do segundo grau no trecho inicial da curva correspondente a 24 horas, e uma função não-linear para o trecho restante, obtendo-se os valores a seguir apresentados.

Equação de Fourier:

$$Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{A2.1})$$

Polinômio ajustado à curva de elevação adiabática:

$$T = at^2 + bt + c \quad (\text{A2.2})$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 2at + b \quad (\text{A2.3})$$

sendo:

$$a = 8,10\text{E-}08$$

$$b = 0,80916667$$

$$c = -0,005902778$$

Ajuste não linear:

$$T = \frac{ab + ct^d}{b + t^d} \quad (\text{A2.4})$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{(b + t^d)(dct^{d-1}) - (ab + ct^d)(dt^{d-1})}{(b + t^d)^2} \quad (\text{A2.5})$$

sendo:  $a = -0,007326247$

$$b = 147,4827900$$

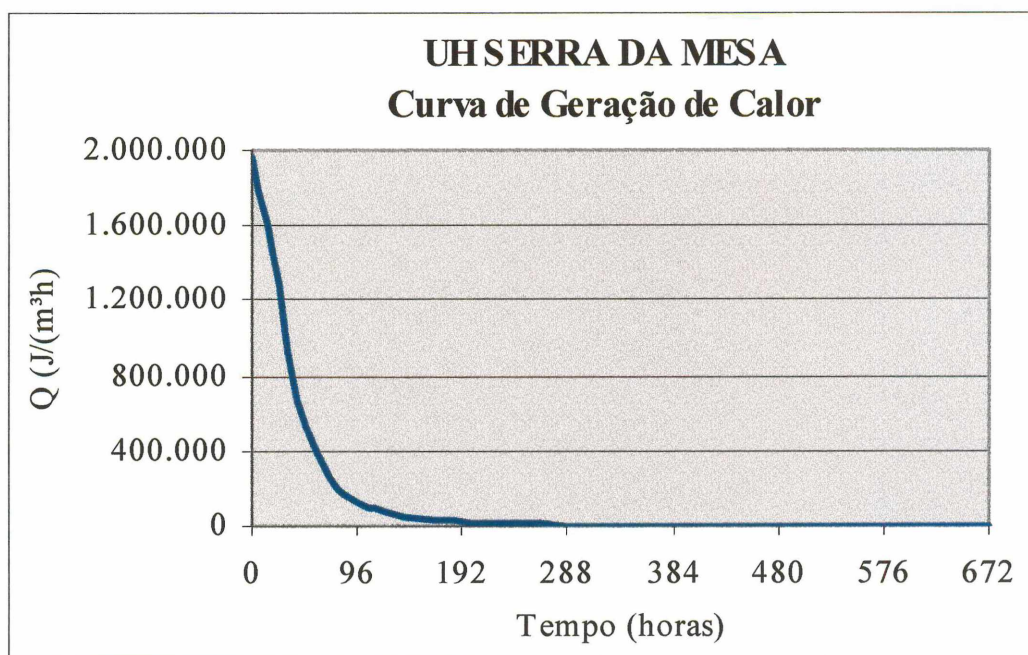
$$c = 33,8817380$$

$$d = 1,5425894$$

**TABELA A2.2 – CURVA DE GERAÇÃO DE CALOR**

Tempo		Temperatura (°C)	$\frac{\partial T}{\partial t}$	Q (J/m <sup>3</sup> h)
Dias	Horas			
0	0	0	0,8092	1.974.031
1	24	16,02	0,5258	1.282.815
1,5	36	21,48	0,3383	825.359
2	48	24,75	0,2163	527.686
3	72	28,22	0,1012	247.001
4	96	29,94	0,0551	134.525
5	120	30,94	0,0335	81.624
7	168	32,02	0,0152	37.176
10	240	32,79	0,0064	15.689
15	360	33,35	0,0024	5.758
28	672	33,84	0,0005	1.202

Adotou-se para verificação da curva de geração de calor um bloco quadrado com 1,0 m de lado, discretizado em elementos quadrangulares lineares de 0,10 m de lado. A curva de curva de geração de calor resultante é mostrada na Figura A2.2.



**Figura A2.2 – Curva de geração de calor**

Simulou-se a geração de calor adiabática na estrutura discretizada, resultando os valores mostrados na Tabela A2.3:

**TABELA A2.3 – CURVA DE ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA RESULTANTE**

<b>t</b>	<b>Temperatura</b>	<b>T ANSYS</b>	<b>T -TANSYS</b>
<b>(horas)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	0,00	0,00
<b>24</b>	<b>16,02</b>	16,02	0,00
<b>36</b>	<b>21,48</b>	21,20	-0,28
<b>48</b>	<b>24,75</b>	24,53	-0,22
<b>72</b>	<b>28,22</b>	28,34	0,12
<b>96</b>	<b>29,94</b>	30,22	0,28
<b>120</b>	<b>30,94</b>	31,28	0,34
<b>168</b>	<b>32,02</b>	32,45	0,43
<b>240</b>	<b>32,79</b>	33,23	0,44
<b>360</b>	<b>33,35</b>	33,76	0,41
<b>672</b>	<b>33,84</b>	34,20	0,36

A Figura A2.3 mostra o bloco discretizado e a Figura A2.4 a curva de elevação adiabática resultante do *ANSYS®/Multiphysics*.

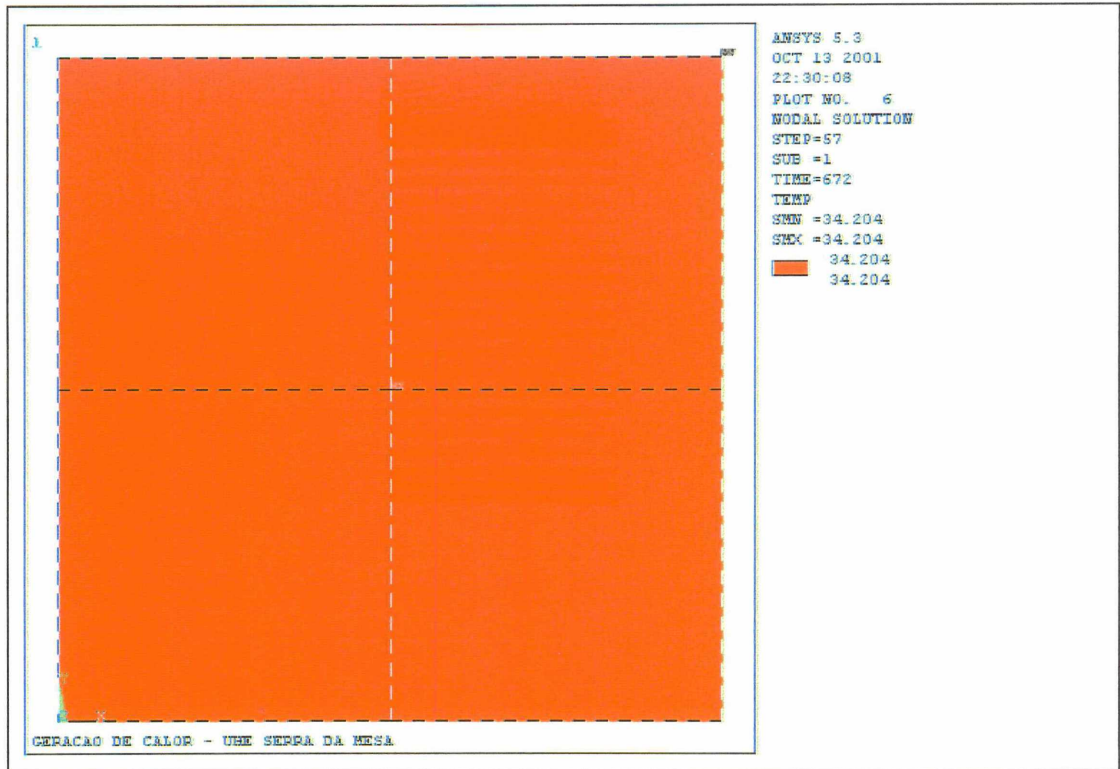


Figura A2.3 – Bloco teste – Curva de geração de calor

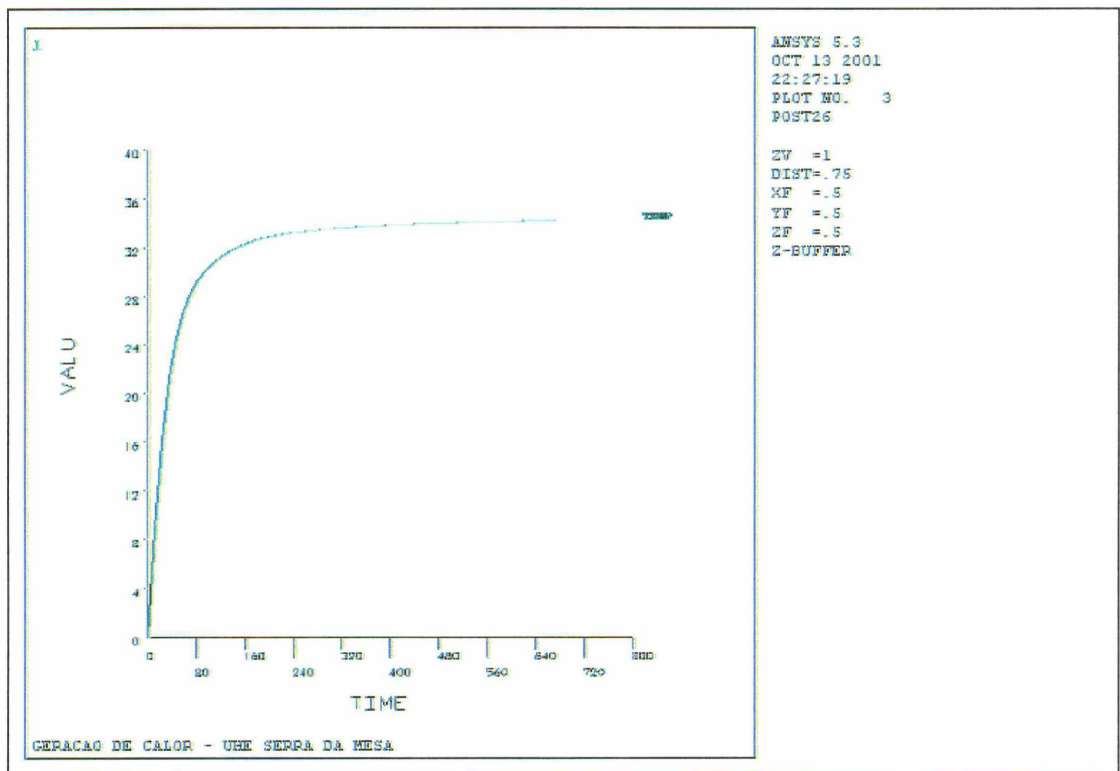


Figura A2.4 – Curva de evolução adiabática – ANSYS®/Multiphysics

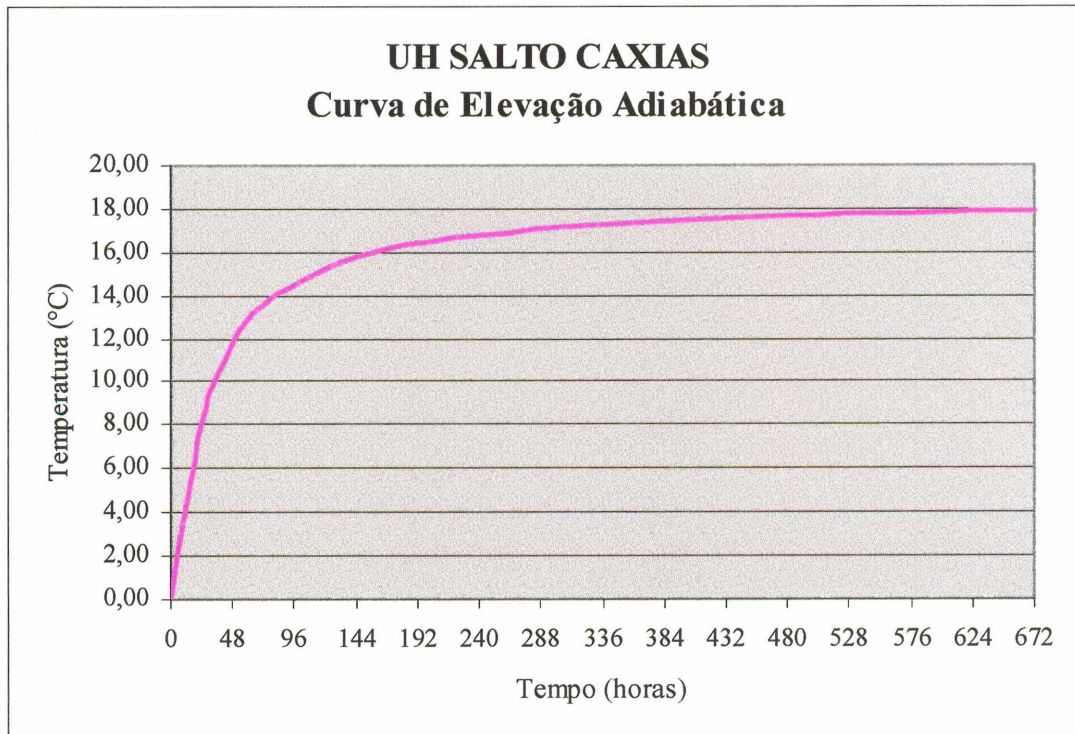
A seguir apresenta-se um teste da curva gerada para o exemplo apresentado no Capítulo 5, com os dados da barragem da Usina Hidrelétrica Salto Caxias.

As propriedades térmicas características do concreto, incluindo-se a curva de elevação adiabática apresentada na Tabela A2.4 e Figura A2.5, foram determinadas a partir de amostras dos materiais a serem empregados, através de ensaios realizados nos laboratórios do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de FURNAS, em Goiânia e são as que seguem:

- ◇ Massa específica =  $2388 \text{ kg/m}^3$
- ◇ Calor específico =  $1105 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  ( $1105,00 \text{ J/kgK}$ )
- ◇ Condutividade térmica =  $6445,93 \text{ J/mh}^\circ\text{C}$  ( $1,79 \text{ W/mK}$ )
- ◇ Coeficiente de dilatação térmica =  $7,07 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  ( $7,07 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ )
- ◇ Coeficiente de transferência de calor:  
Concreto-ar =  $50232,00 \text{ J/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  ( $12 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} = 13,95 \text{ W/mK}$ )

**TABELA A2.4 – CURVA DE ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA**

Tempo		Temperatura (°C)
Dias	Horas	
0	0	0
1	24	8,06
2	48	11,78
3	72	13,57
5	120	15,30
7	168	16,15
10	240	16,82
14	336	17,30
20	480	17,67
28	672	17,92



**Figura A2.5 – Curva de elevação adiabática**

Para a utilização da equação de Fourier foram ajustados polinômios do segundo grau, obtendo-se os valores a seguir apresentados.

Equação de Fourier:

$$Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{A2.6})$$

Polinômios ajustados à curva de elevação adiabática:

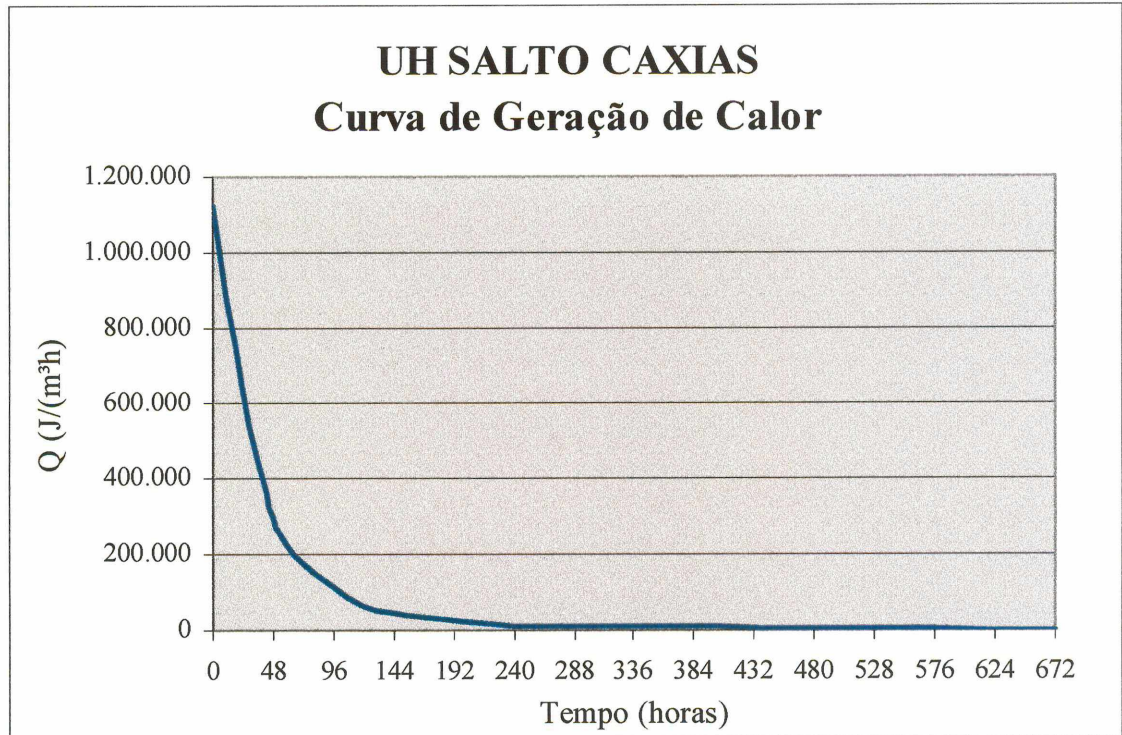
$$T = at^2 + bt + c \quad (\text{A2.7})$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 2at + b \quad (\text{A2.8})$$

**TABELA A2.5 – CURVA DE GERAÇÃO DE CALOR**

Tempo		Temperatura (°C)	$\frac{\partial T}{\partial t}$	Q (J/m <sup>3</sup> h)
Dias	Horas			
0	0	0	0,4263	1.125.216
1	24	8,06	0,2439	643.772
2	48	11,78	0,1124	296.679
3	72	13,57	0,0668	176.318
5	120	15,30	0,0247	65.195
7	168	16,15	0,0144	37.956
10	240	16,82	0,0054	14.253
14	336	17,30	0,0041	10.769
20	480	17,67	0,0018	4.646
28	672	17,92	0,0002	591

A curva de curva de geração de calor resultante é mostrada na Figura A2.6.



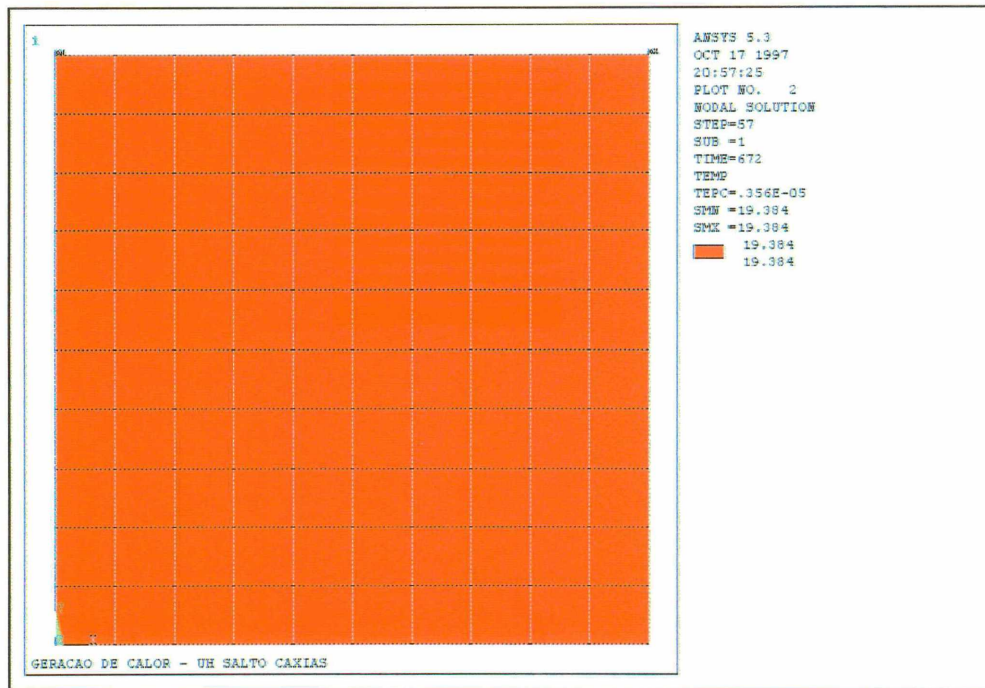
**Figura A2.6 – Curva de geração de calor**

Simulou-se a geração de calor adiabática na estrutura discretizada, resultando os valores mostrados na Tabela A2.6:

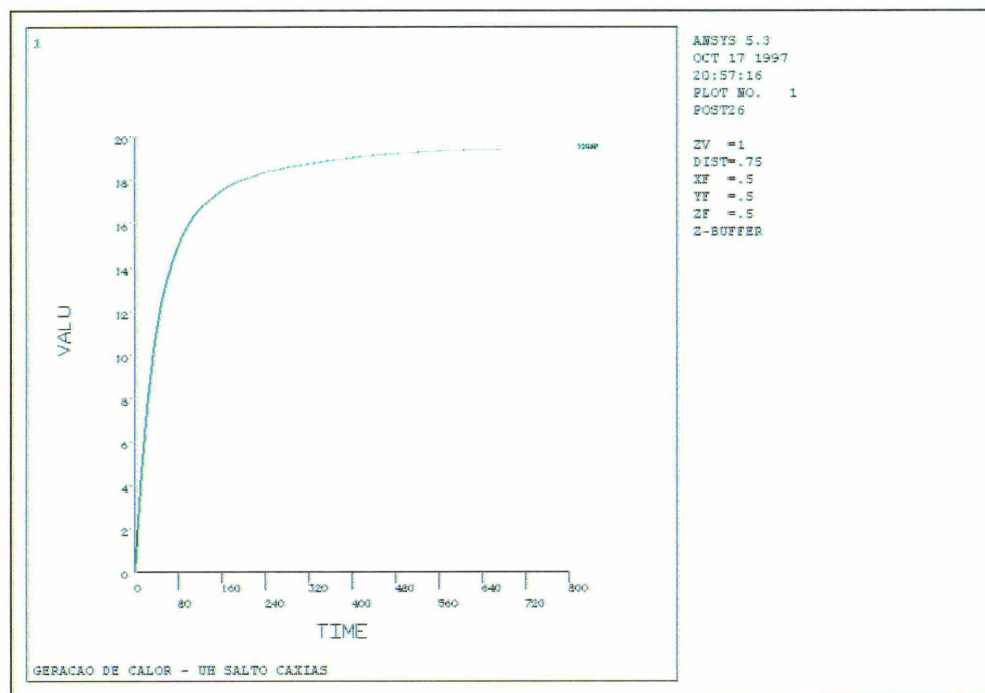
**TABELA A2.6 – CURVA DE ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA RESULTANTE**

<b>t (horas)</b>	<b>Tempertura °C</b>	<b>T ANSYS °C</b>	<b>T - T ANSYS °C</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	0.00	0.00
<b>24</b>	<b>8.06</b>	8.04	-0.02
<b>48</b>	<b>11.78</b>	12.32	0.54
<b>72</b>	<b>13.57</b>	14.47	0.90
<b>120</b>	<b>15.30</b>	16.67	1.37
<b>168</b>	<b>16.15</b>	17.61	1.46
<b>240</b>	<b>16.82</b>	18.32	1.50
<b>336</b>	<b>17.30</b>	18.77	1.47
<b>480</b>	<b>17.67</b>	19.19	1.52
<b>672</b>	<b>17.92</b>	19.38	1.46

A Figura A2.7 mostra o bloco discretizado e a Figura A2.8 a curva de elevação adiabática resultante do *ANSYS®/Multiphysics*.



**Figura A2.7 – Bloco teste – Curva de geração de calor**



**Figura A2.8 – Curva de evolução adiabática – *ANSYS®/Multiphysics***

Posteriormente, foi ajustado um polinômio do segundo grau no trecho inicial da curva, correspondente a 24 horas, e uma função não-linear para o trecho restante, obtendo-se para a curva de elevação adiabática de temperatura valores mais próximos dos obtidos nos ensaiados de laboratório, conforme a seguir apresentados.

Polinômio:

$$T = at^2 + bt + c \quad (\text{A2.9})$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 2at + b \quad (\text{A2.10})$$

sendo:

$$a = 4,66\text{E-}08$$

$$b = 0,42625$$

$$c = -0,003767361$$

Ajuste não linear:

$$T = \frac{ab + ct^d}{b + t^d} \quad (\text{A2.11})$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{(b + t^d)(dct^{d-1}) - (ab + ct^d)(dt^{d-1})}{(b + t^d)^2} \quad (\text{A2.12})$$

sendo:  $a = -0,0053170$

$$b = 49,4787500$$

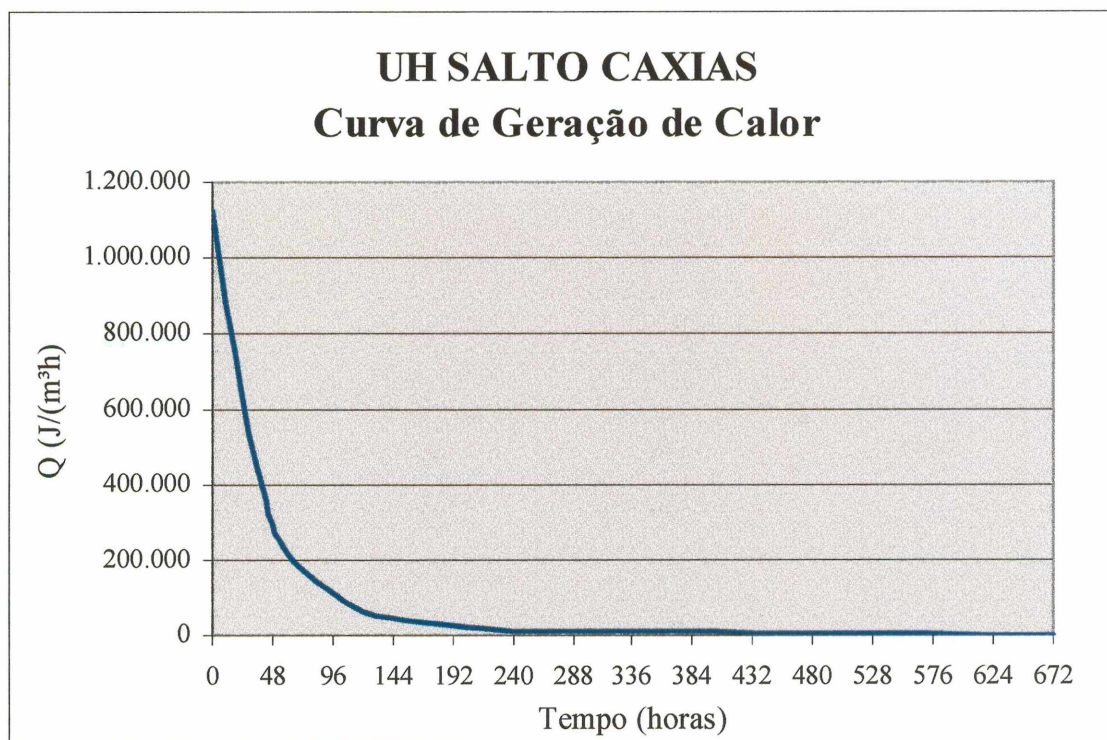
$$c = 18,3533580$$

$$d = 1,1542648$$

**TABELA A2.7 – CURVA DE GERAÇÃO DE CALOR – AJUSTE NÃO-LINEAR**

Tempo		Temperatura (°C)	$\frac{\partial T}{\partial t}$	Q (J/m <sup>3</sup> h)
Dias	Horas			
0	0	0	0,4263	1.125.084
1	24	8,06	0,2454	647.776
2	48	11,78	0,0646	170.467
3	72	13,57	0,0569	150.260
5	120	15,30	0,0243	64.089
7	168	16,15	0,0131	34.614
10	240	16,82	0,0066	17.410
14	336	17,30	0,0034	8.893
20	480	17,67	0,0016	4.287
28	672	17,92	0,0008	2.128

A curva de curva de geração de calor resultante é mostrada na Figura A2.9.



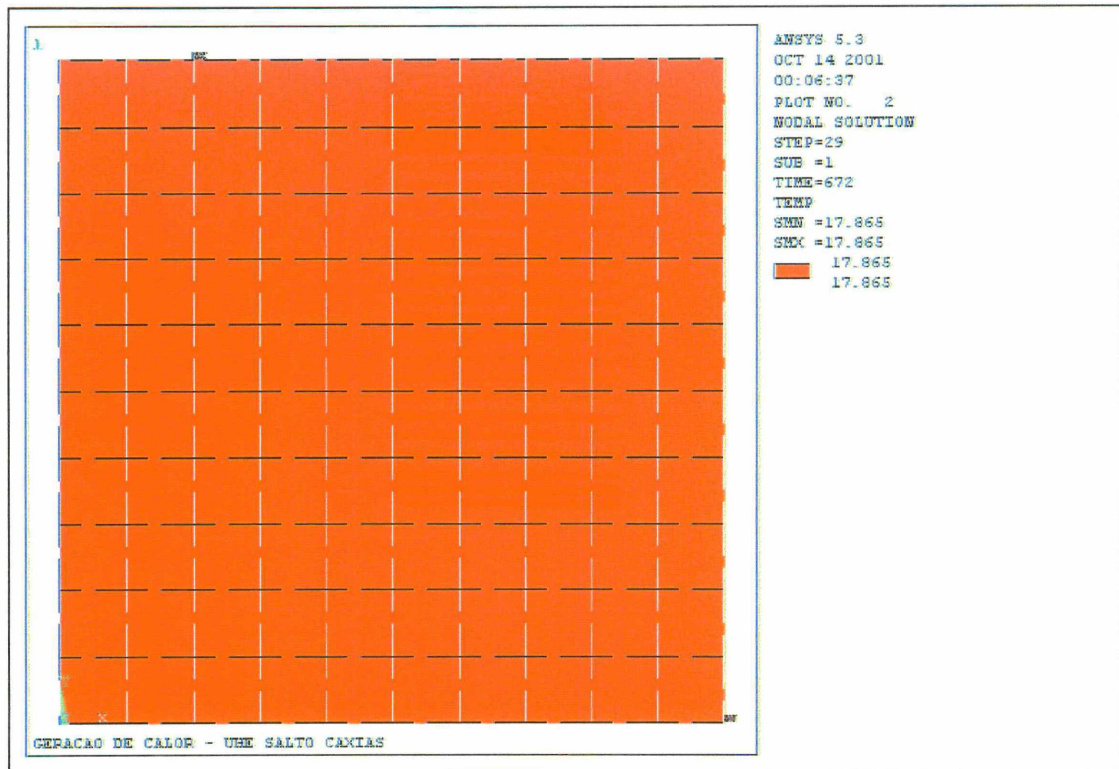
**Figura A2.9 – Curva de geração de calor – Ajuste não-linear**

Simulou-se a geração de calor adiabática discretizando-se um bloco quadrado com 1,0 m de lado em elementos quadrangulares lineares de 0,10 m de lado, resultando os valores mostrados na Tabela A2.8:

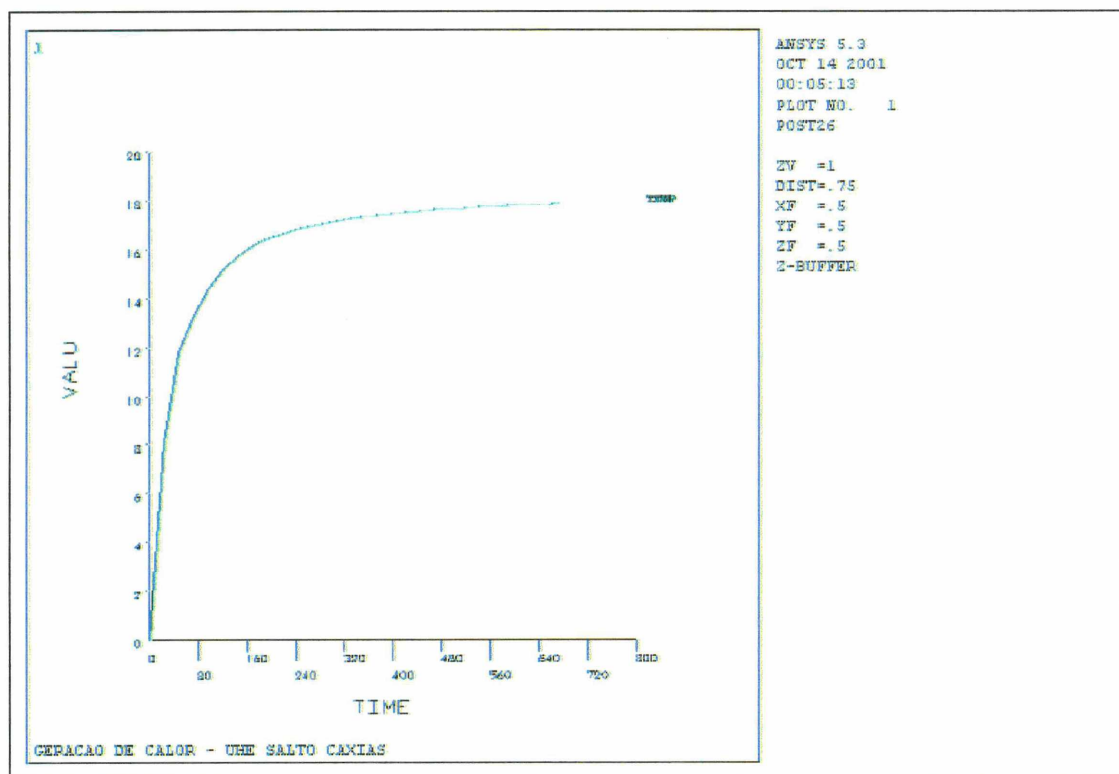
**TABELA A2.8 – CURVA DE ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA RESULTANTE – AJUSTE NÃO-LINEAR**

<b>t (horas)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>T ANSYS (°C)</b>	<b>T - T ANSYS (°C)</b>
<b>0</b>	<b>0,00</b>	0,00	0,00
<b>24</b>	<b>8,06</b>	8,06	0,00
<b>48</b>	<b>11,78</b>	11,78	0,00
<b>72</b>	<b>13,57</b>	13,24	-0,33
<b>120</b>	<b>15,30</b>	15,19	-0,11
<b>168</b>	<b>16,15</b>	16,08	-0,07
<b>240</b>	<b>16,82</b>	16,79	-0,03
<b>336</b>	<b>17,30</b>	17,27	-0,03
<b>480</b>	<b>17,67</b>	17,63	-0,04
<b>672</b>	<b>17,92</b>	17,87	-0,05

A Figura A2.10 mostra o bloco discretizado e a Figura A2.11 a curva de elevação adiabática resultante do *ANSYS®/Multiphysics*.



**Figura A2.10 – Bloco teste – Curva de geração de calor –Ajuste não-linear**



**Figura A2.11 – Curva de evolução adiabática – ANSYS®/Multiphysics – Ajuste não-linear**

## ANEXO 3 – DADOS DO CONTROLE TECNOLÓGICO DA BARRAGEM DE SALTO CAXIAS

### RESULTADOS DO CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

Propriedades dos materiais - Massa Específica

N.º de amostras : 734

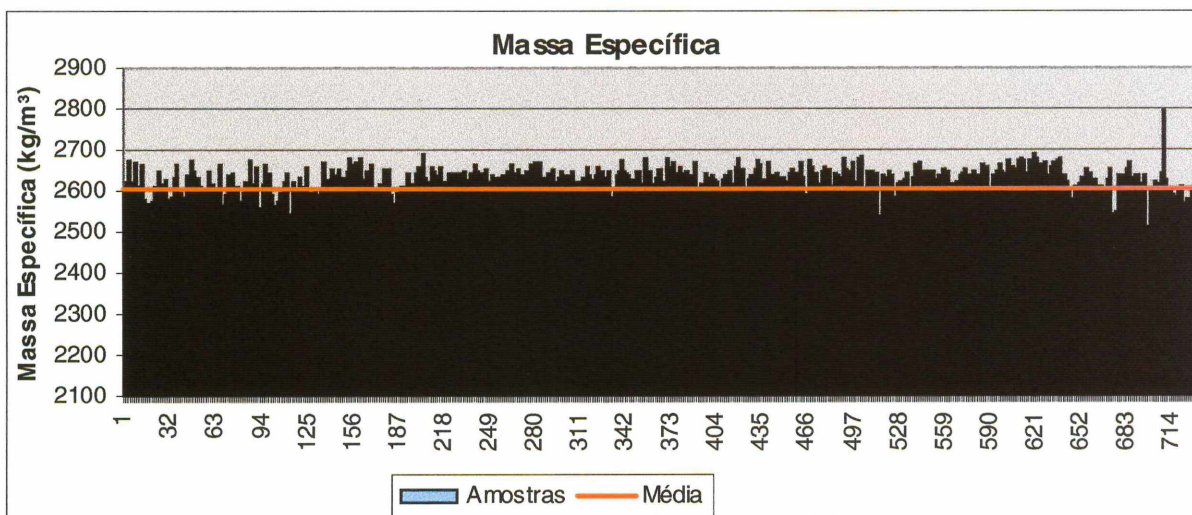
Média : 2605,96 kg/m<sup>3</sup>

Desvio Padrão : 48,24 kg/m<sup>3</sup>

Coef. de Var. : 1,85 %

Máxima : 2674,00 kg/m<sup>3</sup>

Mínima : 2179,00 kg/m<sup>3</sup>



## TERMÔMETROS - Barragem B8

Dados das instalações dos instrumentos

TERMÔM.	TE-601	TE-602	TE-603	TE-604	TE-605	TE-606
EL. INST.	267,70	267,70	267,70	267,70	267,70	267,70
REGIÃO	MONT.	MONT.	CENT.	CENT.	CENT.	JUS.
DATA INST.	15/03/97	15/03/97	15/03/97	15/03/97	15/03/97	15/03/97
TEMPERAT.	°C	°C	°C	°C	°C	°C
AMB.LANÇAM.	30,6	29,6	28,5	30,4	32,0	32,3
CONC.LANÇAM.	31,3	31,8	30,3	29,6	29,4	29,2
DIA 02/02/99	24,41	26,47	32,23	36,18	34,37	32,46
MÉDIA	29,99	32,13	36,53	39,26	38,92	31,80
DESVIO	4,87	4,71	4,07	2,61	3,63	4,68
MÁXIMA	38,58	40,94	43,35	43,19	44,11	39,42
MÍMINA	23,66	25,80	32,23	36,08	34,37	22,80
DIF. MX-MN	14,92	15,14	11,12	7,11	9,74	16,62

TERMÔM.	TE-607	TE-608	TE-609	TE-610	TE-611
EL. INST.	273,10	273,10	273,10	273,10	273,10
REGIÃO	MONT.	MONT.	CENT.	CENT.	CENT.
DATA INST.	27/05/97	27/05/97	27/05/97	02/04/97	02/04/97
TEMPERAT.	°C	°C	°C	°C	°C
AMB.LANÇAM.	19,1	19,6	18,7	29,9	30,7
CONC.LANÇAM.	20,4	20,5	21,1	27,4	28,8
DIA 02/02/99	25,04	26,59	33,64	37,66	32,48
MÉDIA	27,09	28,93	33,18	40,20	37,77
DESVIO	2,16	1,60	1,55	2,25	4,63
MÁXIMA	30,52	30,81	34,89	43,68	43,87
MÍMINA	24,41	26,14	27,36	37,66	32,39
DIF. MX-MN	6,11	4,67	7,53	6,02	11,48

TERMÔM.	TE-612	TE-613	TE-614	TE-615	TE-616
EL. INST.	278,80	278,80	278,80	278,80	278,80
REGIÃO	MONT.	MONT.	CENT.	CENT.	JUS.
DATA INST.	19/06/97	19/06/97	19/06/97	23/04/97	23/04/97
TEMPERAT.	°C	°C	°C	°C	°C
AMB.LANÇAM.	21,6	20,9	21,0	22,2	22,7
CONC.LANÇAM.	23,9	23,4	24,3	26,3	27,9
DIA 02/02/99	26,54	28,58	37,93	38,13	31,82
MÉDIA	29,17	30,98	35,44	35,16	29,92
DESVIO	2,63	2,36	2,47	3,50	3,80
MÁXIMA	34,39	35,61	37,96	38,71	39,39
MÍMINA	26,46	28,58	27,92	27,46	22,86
DIF. MX-MN	7,93	7,03	10,04	11,25	16,53

<b>TERMÔM.</b>	<b>TE-617</b>	<b>TE-618</b>	<b>TE-619</b>	<b>TE-620</b>	<b>TE-621</b>
<b>EL. INST.</b>	284,20	284,20	284,20	284,20	284,20
<b>REGIÃO</b>	MONT.	MONT.	CENT.	CENT.	JUS.
<b>DATA INST.</b>	21/01/98	21/01/98	21/01/98	21/01/98	21/01/98
<b>TEMPERAT.</b>	°C	°C	°C	°C	°C
<b>AMB.LANÇAM.</b>	35,5	36,0	34,6	35,3	35,1
<b>CONC.LANÇAM.</b>	30,8	31,2	30,6	31,2	31,6
<b>DIA 02/02/99</b>	28,97	32,23	44,13	38,86	34,24
<b>MÉDIA</b>	34,16	37,62	45,07	41,80	31,94
<b>DESVIO</b>	5,83	5,83	0,87	2,71	4,56
<b>MÁXIMA</b>	43,86	46,32	46,40	45,43	44,79
<b>MÍMINA</b>	28,88	32,23	42,18	38,86	20,25
<b>DIF. MX-MN</b>	14,98	14,09	4,22	6,57	24,54

<b>TERMÔM.</b>	<b>TE-622</b>	<b>TE-623</b>	<b>TE-624</b>	<b>TE-625</b>
<b>EL. INST.</b>	290,20	290,20	290,20	290,20
<b>REGIÃO</b>	MONT.	MONT.	CENT.	JUS.
<b>DATA INST.</b>	05/02/98	05/02/98	05/02/98	05/02/98
<b>TEMPERAT.</b>	°C	°C	°C	°C
<b>AMB.LANÇAM.</b>	25,4	25,7	24,2	24,9
<b>CONC.LANÇAM.</b>	26,3	27,0	27,3	27,3
<b>DIA 02/02/99</b>	29,61	33,75	45,03	35,48
<b>MÉDIA</b>	34,54	38,37	45,51	38,20
<b>DESVIO</b>	5,80	5,00	1,80	4,57
<b>MÁXIMA</b>	43,57	45,78	47,72	45,15
<b>MÍMINA</b>	29,34	30,68	34,00	33,42
<b>DIF. MX-MN</b>	14,23	15,10	13,72	11,73

<b>TERMÔM.</b>	<b>TE-626</b>	<b>TE-627</b>	<b>TE-628</b>	<b>TE-629</b>
<b>EL. INST.</b>	296,20	296,20	296,20	296,20
<b>REGIÃO</b>	MONT.	MONT.	CENT.	JUS.
<b>DATA INST.</b>	21/02/98	21/02/98	21/02/98	21/02/98
<b>TEMPERAT.</b>	°C	°C	°C	°C
<b>AMB.LANÇAM.</b>	24,2	24,8	24,7	25,1
<b>CONC.LANÇAM.</b>	29,9	29,1	30,5	30,5
<b>DIA 02/02/99</b>	28,60	31,13	41,03	34,21
<b>MÉDIA</b>	32,80	35,90	44,02	33,78
<b>DESVIO</b>	5,96	5,96	2,23	4,75
<b>MÁXIMA</b>	43,94	46,01	47,19	43,35
<b>MÍMINA</b>	28,44	31,13	41,03	25,31
<b>DIF. MX-MN</b>	15,50	14,88	6,16	18,04

TERMÔM.	TE-630	TE-631	TE-632	TE-633
EL. INST.	302,80	302,80	302,80	302,80
REGIÃO	MONT.	MONT.	CENT.	JUS.
DATA INST.	25/03/98	25/03/98	25/03/98	25/03/98
TEMPERAT.	°C	°C	°C	°C
AMB.LANÇAM.	22,2	29,1	25,7	30,8
CONC.LANÇAM.	17,0	28,7	29,3	29,8
DIA 02/02/99	26,10	28,66	33,17	
MÉDIA	28,18	32,45	35,64	29,76
DESVIO	3,21	4,78	3,43	4,53
MÁXIMA	35,37	41,30	41,29	37,26
MÍMINA	20,82	28,66	32,98	21,47
DIF. MX-MN	14,55	12,64	8,31	15,79

TERMÔM.	TE-634	TE-635	TE-636	TE-637
EL. INST.	307,00	307,00	307,00	312,10
REGIÃO	MONT.	MONT.	JUS.	MONT.
DATA INST.	14/04/98	14/04/98	14/04/98	06/05/98
TEMPERAT.	°C	°C	°C	°C
AMB.LANÇAM.	28,2	28,3	28,8	28,3
CONC.LANÇAM.	30,4	29,6	29,5	26,5
DIA 02/02/99	28,21	29,56	31,56	27,63
MÉDIA	30,88	33,22	30,98	30,48
DESVIO	4,07	4,43	2,99	3,59
MÁXIMA	41,41	42,07	38,78	36,44
MÍMINA	28,17	29,56	25,90	27,51
DIF. MX-MN	13,24	12,51	12,88	8,93

TERMÔM.	TE-638	TE-639	TE-640	TE-641	RESUMO
EL. INST.	312,10	312,10	318,70	325,00	
REGIÃO	MONT.	JUS.	CENT.	CENT.	
DATA INST.	06/05/98	06/05/98	23/05/98	06/06/98	
TEMPERAT.	°C	°C	°C	°C	°C
AMB.LANÇAM.	28,2	29,9	31,7	36,3	30,57
CONC.LANÇAM.	26,7	26,5	25,7	26,0	30,27
DIA 02/02/99	28,47		29,04	30,16	31,02
MÉDIA	31,99	30,65	31,15	30,07	34,77
DESVIO	4,04	2,87	3,35	2,13	3,98
MÁXIMA	38,46	36,00	37,85	35,83	44,11
MÍMINA	28,47	25,89	28,71	27,16	22,80
DIF. MX-MN	9,99	10,11	9,14	8,67	21,31

### Tabela de temperaturas ambiente e produção de concreto-barragem leito do rio - B8

Data da última concretagem - considerando-se sequência do B5 para B8

DATA	BLOCO	CAMADA	TEMPERATURA		COTA FUNDO	COTA TOPO	TRAÇO	TERMÔMETRO	TE-601	TE-602	TE-603	TE-604	TE-605	TE-606	TE-607
			AMBIENTE	CONCRETO											
31/01/97	B06 a B07	6	22,5	22,6	262,9	263,2	J2e6								
12/02/97	B08	A a E	24,0	24,5			J2e6								
16/02/97	B09/ B08	3	22,0	25,1	262,0	262,3	J2e6								
20/02/97	B06 a B08	4	23,0	26,3	262,3	262,6	J2e6								
20/02/97	B06 a B08	5	23,0	25,7	262,6	262,9	J2e6								
22/02/97	B06 a B09	7	23,0	25,8	263,2	263,5	J2e6								
27/02/97	B05 a B08	8	24,0	27,2	263,5	263,8	J2e6								
28/02/97	B05 a B08	9	30,0	30,8	263,8	264,1	J2e6								
01/03/97	B05 a B08	11	25,0	27,4	264,4	264,7	J2e6								
05/03/97	B05 a B08	12	26,0	26,5	264,7	265,0	J2e6								
06/03/97	B05 a B08	13	20,0	26,4	265,0	265,3	J2e6								
06/03/97	B05 a B08	14	26,0	27,3	265,3	265,6	J2e6								
07/03/97	B05 a B08	15	22,0	25,3	265,6	265,9	J2e6								
08/03/97	B05 a B08	16	27,5	26,7	265,9	266,2	J2e6								
09/03/97	B05 a B08	17	20,0	24,7	266,2	266,5	J2e6								
11/03/97	B05 a B08	18	28,0	29,4	266,5	266,8	J2e6								
12/03/97	B05 a B08	19	23,0	27,4	266,8	267,1	J2e6								
13/03/97	B05 a B08	20	23,0	26,4	267,1	267,4	J2e6								
14/03/97	B05 a B08	21	23,0	23,9	267,4	267,7	J2e6								
15/03/97	B05 a B08	22	22,0	25,8	267,7	268,0	J2e6	601 a 606	38,28	40,94	39,55	38,86	39,01	39,35	
18/03/97	B05 a B08	23	21,0	27,1	268,0	268,3	J2e6		36,57	36,83	35,90	36,08	35,45	36,65	
19/03/97	B05 a B08	24	26,5	25,1	268,3	268,6	J2e6		36,76	37,29	36,60	36,67	36,56	36,95	
20/03/97	B05 a B08	25	22,0	25,1	268,6	268,9	J2e6		37,63	38,18	37,45	37,46	37,43	38,03	
21/03/97	B05 a B08	25/191	20,0	23,4			J2e6		38,23	38,58	38,10	38,10	38,19	38,48	
22/03/97	B05 a B08	26	22,0	25,2	268,9	269,2	J2e6		38,52	39,24	38,58	38,54	38,73	38,71	
22/03/97	B05 a B08	27		25,4	269,2	269,5	J2e6		38,52	39,24	38,58	38,54	38,73	38,71	
24/03/97	B05 a B08	28	27,0	27,8	269,5	269,8	J2e6		38,55	39,43	39,24	39,16	39,45	38,85	
25/03/97	B05 a B08	29	23,0	23,7	269,8	270,1	J2e6		38,33	39,31	39,62	39,50	39,83	38,83	
25/03/97	B05 a B08	30	27,0	27,1	270,1	270,4	J2e6		38,33	39,31	39,62	39,50	39,83	38,83	
25/03/97	B05 a B08	31	24,0	22,3	270,4	270,7	J2e6		38,33	39,31	39,62	39,50	39,83	38,83	
26/03/97	B05 a B08	32	23,0	24,3	270,7	271,0	J2e6		38,08	39,14	39,92	39,80	40,16	38,78	
26/03/97	B05 a B08	33	25,0	27,0	271,0	271,3	J2e6		38,08	39,14	39,92	39,80	40,16	38,78	
27/03/97	B05 a B08	34	20,0	22,0	271,3	271,6	J2e6		37,82	39,00	40,19	40,06	40,45	38,75	
27/03/97	B05 a B11	35	22,4	26,1	271,6	271,9	J2e6		37,82	39,00	40,19	40,06	40,45	38,75	
29/03/97	B05 a B11	36	27,0	27,3	271,9	272,2	J2e6		37,31	38,69	40,61	40,50	40,92	38,71	
31/03/97	B05 a B11	37	26,5	26,4	272,2	272,5	J2e6		36,78	38,26	40,95	40,85	41,28	38,68	
01/04/97	B05 a B11	38	20,4	22,2	272,5	272,8	J2e6		36,45	39,88	41,90	41,46	42,14	39,42	
02/04/97	B05 a B11	39	21,0	25,0	272,8	273,1	J2e6		36,13	39,07	42,03	41,52	42,25	39,33	
02/04/97	B05 a B11	40	26,0	24,7	273,1	273,4	J2e6	610, 611	36,13	39,07	42,03	41,52	42,25	39,33	
03/04/97	B05 a B11	41	20,0	24,4	273,4	273,7	J2e6		35,76	38,72	42,16	41,65	42,39	39,24	
03/04/97	B05 a B11	42	25,5	24,4	273,7	274,0	J2e6		35,76	38,72	42,16	41,65	42,39	39,24	

### Tabela de temperaturas ambiente e produção de concreto-barragem leito do rio - B8

Data da última concretagem - considerando-se sequência do B5 para B8

DATA	BLOCO	CAMADA	TEMPERATURA		COTA FUNDO	COTA TOPO	TRAÇO	TERMÔMETRO	TE-601	TE-602	TE-603	TE-604	TE-605	TE-606	TE-607
			AMBIENTE	CONCRETO											
04/04/97	B05 a B11	43	21,0	21,1	274,0	274,3	J2e6		35,43	38,43	42,30	41,79	42,53	39,15	
05/04/97	B05 a B11	44	14,6	16,5	274,3	274,6	J2e6		35,20	38,25	42,42	41,91	42,66	39,07	
05/04/97	B05 a B11	45	22,0	22,6	274,6	274,9	J2e6		35,20	38,25	42,42	41,91	42,66	39,07	
06/04/97	B05 a B11	46	14,0	21,5	274,9	275,2	J2e6		34,82	37,85	42,52	42,01	42,77	38,96	
08/04/97	B05 a B11	47	21,0	19,1	275,2	275,5	J2e6		33,79	36,69	42,74	42,22	42,98	38,69	
08/04/97	B05 a B11	48	32,0	25,1	275,5	275,8	J2e6		33,79	36,69	42,74	42,22	42,98	38,69	
10/04/97	B05 a B11	49	28,0	24,8	275,8	276,1	J2e6		33,12	35,95	42,90	42,39	43,16	38,34	
11/04/97	B05 a B10	51		21,6	276,4	276,7	J2e6		32,94	35,70	42,97	42,47	43,24	38,13	
15/04/97	B05 a B11	52	24,0	23,5	276,7	277,0	J2e6		32,57	35,13	43,20	42,72	43,51	37,33	
15/04/97	B05 a B15	53	23,0	24,4	277,0	277,3	J2e6		32,57	35,13	43,20	42,72	43,51	37,33	
17/04/97	B05 a B15	54	23,0	23,1	277,3	277,6	J2e6		32,64	35,06	43,27	42,83	43,61	37,00	
19/04/97	B05 a B15	55	23,0	24,2	277,6	277,9	J2e6		32,80	35,07	43,32	42,90	43,71	36,71	
19/04/97	B05 a B15	56	28,0	23,7	277,9	278,2	J2e6		32,80	35,07	43,32	42,90	43,71	36,71	
23/04/97	B05 a B15	57	25,0	22,8	278,2	278,5	J2e6								
23/04/97	B05 a B15	58		22,4	278,5	278,8	J2e6								
24/04/97	B05 a B15	59	29,0	26,2	278,8	279,1	J2e6	615, 616							
25/04/97	B05 a B15	60	26,0	23,2	279,1	279,4	J2e6		32,62	34,73	43,33	43,07	43,91	36,06	
26/04/97	B05 a B15	61		17,6	279,4	279,7	J2e6								
26/04/97	B05 a B15	62		20,2	279,7	280,0	J2e6								
27/04/97	B05 a B15	63		16,4	280,0	280,3	J2e6								
28/04/97	B05 a B15	64	24,0	21,1	280,3	280,6	J2e8								
29/04/97	B05 a B15	65	22,0	20,4	280,6	280,9	J2e8		32,05	34,08	43,25	43,13	43,99	35,53	
03/05/97	B05 a B11	25	19,0	20,6	268,6	268,9	J2e6								
06/05/97	B05 a B11	27	19,0	22,3	269,2	269,5	J2e6		31,56	33,77	42,99	43,18	44,08	34,24	
07/05/97	B05 a B11	28	21,6	24,8	269,5	269,8	J2e6								
10/05/97	B05 a B11	30	20,2	22,1	270,1	270,4	J2e6								
13/05/97	B05 a B11	32	26,0	24,2	270,7	271,0	J2e6								
16/05/97	B05 a B11	34	19,9	21,6	271,3	271,6	J2e6		33,55	35,63	42,49	43,18	44,11	33,11	
23/05/97	B05 a B11	35	17,0	17,2	271,6	271,9	J2e6		33,47	36,10	42,09	43,15	44,10	32,58	
23/05/97	B05 a B11	36	20,0	19,6	271,9	272,2	J2e6		33,47	36,10	42,09	43,15	44,10	32,58	
26/05/97	B05 a B11	37	22,5	17,1	272,2	272,5	J2e6								
28/05/97	B05 a B11	40	15,0	19,6	273,1	273,4	J2e6	607 a 609	32,96	35,51	41,79	43,11	44,07	31,07	27,18
31/05/97	B05 a B11	42	20,0	19,1	273,7	274,0	J2e6								28,79
03/06/97	B05 a B11	43	16,8	19,7	274,0	274,3	J2e6								30,49
06/06/97	B05 a B11	45	16,0	20,6	274,6	274,9	J2e6								30,44
06/06/97	B05 a B11	46	18,0	19,4	274,9	275,2	J2e6								30,44
08/06/97	B05 a B11	48	6,0	19,5	275,5	275,8	J2e6								30,52
10/06/97	B05 a B11	49	9,0	18,3	275,8	276,1	J2e6								30,50
10/06/97	B05 a B11	50	22,0	20,8	276,1	276,4	J2e6								30,50
12/06/97	B05 a B11	51		21,0	276,4	276,7	J2e6								30,42
12/06/97	B05 a B11	52		22,8	276,7	277,0	J2e6								30,42

### Tabela de temperaturas ambiente e produção de concreto-barragem leito do rio - B8

Data da última concretagem - considerando-se sequência do B5 para B8

DATA	BLOCO	CAMADA	TEMPERATURA		COTA FUNDO	COTA TOPO	TRAÇO	TERMÔMETRO	TE-601	TE-602	TE-603	TE-604	TE-605	TE-606	TE-607
			AMBIENTE	CONCRETO											
13/06/97	B05 a B11	54	23,2	24,1	277,3	277,6	J2e6								30,35
17/06/97	B05 a B11	55	10,8	21,1	277,6	277,9	J2e6								30,06
17/06/97	B05 a B11	56		20,9	277,9	278,2	J2e6								30,06
18/06/97	B05 a B11	57	11,5	20,5	278,2	278,5	J2e6		29,77	32,60	40,47	42,90	43,88	27,22	30,00
19/06/97	B05 a B11	58	16,0	22,3	278,5	278,8	J2e6								29,90
20/06/97	B05 a B11	59	18,0	24,0	278,8	279,1	J2e6	612 a 614							29,82
21/06/97	B05 a B11	60		22,5	279,1	279,4	J2e6								29,74
24/06/97	B05 a B11	61		23,0	279,4	279,7	J2e6								29,51
24/06/97	B05 a B11	62	21,0	23,4	279,7	280,0	J2e6								29,51
25/06/97	B05 a B11	63	23,0	24,4	280,0	280,3	J2e6		29,10	31,86	40,05	42,83	43,83	27,28	29,46
27/06/97	B05 a B11	64	23,0	21,9	280,3	280,6	J2e8								29,38
27/06/97	B05 a B11	65	12,8	19,6	280,6	280,9	J2e8								29,38
22/12/97	B05 a B11	66	34,0	27,6	280,9	281,2	J2e9								
23/12/97	B05 a B11	67	30,0	27,0	281,2	281,5	J2e9								
02/01/98	B05 a B11	67		25,9	281,2	281,5	J2e9								
05/01/98	B05 a B11	69	35,0	27,8	281,8	282,1	J2e9								
06/01/98	B05 a B11	70		27,2	282,1	282,4	J2e9								
08/01/98	B05 a B11	71		25,2	282,4	282,7	J2e6		25,71	28,25	35,44	39,94	39,69	33,32	28,05
08/01/98	B05 a B11	72		24,6	282,7	283,0	J2e9		25,71	28,25	35,44	39,94	39,69	33,32	28,05
09/01/98	B05 a B11	73		23,5	283,0	283,3	J2e6								
10/01/98	B05 a B11	74		25,4	283,3	283,6	J2e9								
21/01/98	B05 a B09	76	28,0	27,8	283,9	284,2	J2e9								
22/01/98	B05 a B09	77	25,0	26,7	284,2	284,5	J2e9	617 a 621	25,90	28,38	35,31	39,78	39,40	32,13	28,74
22/01/98	B05 a B09	78	35,0	27,4	284,5	284,8	J2e9		25,90	28,38	35,31	39,78	39,40	32,13	28,74
23/01/98	B05 a B09	79	25,0	26,2	284,8	285,1	J2e9								
23/01/98	B05 a B09	80	28,0	28,0	285,1	285,4	J2e9								
24/01/98	B05 a B09	81	24,0	28,0	285,4	285,7	J2e9								
26/01/98	B05 a B09	82	33,0	29,4	285,7	286,0	J2e9								
27/01/98	B05 a B09	83	22,0	24,9	286,0	286,3	J2e6								
27/01/98	B05 a B10	84	33,0	29,4	286,3	286,6	J2e9								
28/01/98	B05 a B10	85	23,0	23,0	286,6	286,9	J2e9								
28/01/98	B05 a B10	86	34,0	29,3	286,9	287,2	J2e9								
28/01/98	B05 a B10	87	25,0	26,1	287,2	287,5	J2e9								
29/01/98	B05 a B10	88	23,0	23,7	287,5	287,8	J2e9								
29/01/98	B05 a B10	89	33,0	30,9	287,8	288,1	J2e9								
30/01/98	B05 a B10	90	23,0	26,0	288,1	288,4	J2e9								
31/01/98	B05 a B10	91	24,0	28,1	288,4	288,7	J2e6								
02/02/98	B05 a B10	92	25,0	25,0	288,7	289,0	J2e9								
03/02/98	B05 a B10	93	24,0	24,9	289,0	289,3	J2e9								
03/02/98	B05 a B10	94		26,4	289,3	289,6	J2e9								
04/02/98	B05 a B10	95	24,0	25,8	289,6	289,9	J2e9								

### Tabela de temperaturas ambiente e produção de concreto-barragem leito do rio - B8

Data da última concretagem - considerando-se sequência do B5 para B8

DATA	BLOCO	CAMADA	TEMPERATURA		COTA FUNDO	COTA TOPO	TRAÇO	TERMÔMETRO	TE-601	TE-602	TE-603	TE-604	TE-605	TE-606	TE-607
			AMBIENTE	CONCRETO											
05/02/98	B05 a B10	96	24,0	25,0	289,9	290,2	J2e9								
06/02/98	B05 a B10	97	22,0	26,0	290,2	290,5	J2e9	622 a 625							
07/02/98	B05 a B10	98	26,0	26,7	290,5	290,8	J2e9								
08/02/98	B05 a B10	99	22,0	24,7	290,8	291,1	J2e6								
09/02/98	B05 a B11	100	29,0	26,2	291,1	291,4	J2e9								
11/02/98	B05 a B11	101		23,2	291,4	291,7	J2e6								
11/02/98	B05 a B11	102	25,0	25,5	291,7	292,0	J2e9								
12/02/98	B05 a B11	103		24,0	292,0	292,3	J2e6		26,38	28,66	35,15	39,52	39,02	31,24	29,14
12/02/98	B05 a B11	104		25,9	292,3	292,6	J2e9		26,38	28,66	35,15	39,52	39,02	31,24	29,14
13/02/98	B05 a B11	105		24,0	292,6	292,9	J2e6								
14/02/98	B05 a B11	106		24,8	292,9	293,2	J2e6								
14/02/98	B05 a B11	107	22,0	24,9	293,2	293,5	J2e6								
14/02/98	B05 a B11	108		27,6	293,5	293,8	J2e9								
16/02/98	B05 a B11	109		28,3	293,8	294,1	J2e9								
17/02/98	B05 a B11	110	23,0	25,6	294,1	294,4	J2e6								
17/02/98	B05 a B12	111		28,8	294,4	294,7	J2e9								
18/02/98	B05 a B12	112	24,0	26,1	294,7	295,0	J2e6		26,59	28,69	35,11	39,45	38,92	31,03	28,99
18/02/98	B05 a B12	113		28,1	295,0	295,3	J2e9		26,59	28,69	35,11	39,45	38,92	31,03	28,99
20/02/98	B05 a B12	114		28,0	295,3	295,6	J2e9								
20/02/98	B05 a B12	115	25,0	23,7	295,6	295,9	J2e9								
21/02/98	B05 a B12	116		295,9	296,2	J2e6									
21/02/98	B05 a B12	117	24,0	24,2	296,2	296,5	J2e6	626 a 629							
22/02/98	B05 a B12	118	24,0	25,8	296,5	296,8	J2e6								
23/02/98	B05 a B13	119		25,9	296,8	297,1	J2e9								
26/02/98	B05 a B13	120	28,0	27,8	297,1	297,4	J2e6								
27/02/98	B05 a B13	121		27,9	297,4	297,7	J2e6								
01/03/98	B05 a B13	122		25,4	297,7	298,0	J2e6								
02/03/98	B05 a B13	123		28,6	298,0	298,3	J2e6								
03/03/98	B05 a B13	124		24,6	298,3	298,6	J2e6								
04/03/98	B05 a B13	125	23,0	25,0	298,6	298,9	J2e6		26,95	28,91	35,01	39,28	38,68	30,80	29,00
04/03/98	B05 a B13	126		30,3	298,9	299,2	J2e9		26,95	28,91	35,01	39,28	38,68	30,80	29,00
09/03/98	B05 a B13	127	30,0	28,6	299,2	299,5	J2e9								
	B05 a B13	128	33,0	27,6	299,5	299,8	J2e9								
10/03/98	B05 a B13	129		27,7	299,8	300,1	J2e9								
11/03/98	B05 a B13	130	27,0	24,0	300,1	300,4	J2e6		27,09	28,98	34,96	39,21	38,58	30,81	29,11
12/03/98	B05 a B13	131		27,4	300,4	300,7	J2e9								
13/03/98	B05 a B13	132		27,8	300,7	301,0	J2e6								
14/03/98	B05 a B13	133	27,0	27,3	301,0	301,3	J2e9								
16/03/98	B05 a B13	134		26,4	301,3	301,6	J2e9								
20/03/98	B05 a B13	135	21,0	24,6	301,6	301,9	J2e9								
21/03/98	B05 a B14	136	21,0	23,9	301,9	302,2	J2e6								

### Tabela de temperaturas ambiente e produção de concreto-barragem leito do rio - B8

Data da última concretagem - considerando-se sequência do B5 para B8

DATA	BLOCO	CAMADA	TEMPERATURA		COTA FUNDO	COTA TOPO	TRAÇO	TERMÔMETRO	TE-601	TE-602	TE-603	TE-604	TE-605	TE-606	TE-607
			AMBIENTE	CONCRETO											
24/03/98	B05 a B14	137	26,0	25,2	302,2	302,5	J2e9								
25/03/98	B05 a B14	138	24,0	25,2	302,5	302,8	J2e9								
26/03/98	B05 a B14	139		24,4	302,8	303,1	J2e6	630 a 633	27,29	29,11	34,85	39,04	38,36	29,69	29,29
26/03/98	B05 a B14	140	27,0	23,5	303,1	303,4	J2e9		27,29	29,11	34,85	39,04	38,36	29,69	29,29
27/03/98	B05 a B14	141		24,6	303,4	303,7	J2e6								
27/03/98	B05 a B14	142	29,0	25,9	303,7	304,0	J2e6								
28/03/98	B05 a B14	143	24,0	25,7	304,0	304,3	J2e6								
30/03/98	B05 a B14	144		26,5	304,3	304,6	J2e6								
07/04/98	B05 a B14	145	26,0	24,4	304,6	304,9	J2e6								
08/04/98	B05 a B14	146		22,6	304,9	305,2	J2e6		27,37	29,17	34,76	38,89	38,17	28,14	28,88
09/04/98	B05 a B14	147		25,0	305,2	305,5	J2e6								
09/04/98	B05 a B14	148	27,0	25,4	305,5	305,8	J2e6								
10/04/98	B05 a B14	149	22,0	25,2	305,8	306,1	J2e6								
13/04/98	B05 a B14	150	32,0	26,8	306,1	306,4	J2e6		27,28	29,13	34,74	38,84	38,11	28,11	28,65
14/04/98	B05 a B14	151	23,0	26,9	306,4	306,7	J2e9								
14/04/98	B05 a B14	152		23,9	306,7	307,0	J2e9								
15/04/98	B05 a B15	153	24,0	25,3	307,0	307,3	J2e6	634 a 636							
17/04/98	B05 a B15	154		25,6	307,3	307,6	J2e6								
17/04/98	B05 a B15	155	23,0	23,7	307,6	307,9	J2e6								
18/04/98	B05 a B15	156		24,3	307,9	308,2	J2e6								
18/04/98	B05 a B15	157	18,0	23,3	308,2	308,5	J2e6								
19/04/98	B05 a B15	158	17,0	22,0	308,5	308,8	J2e6								
19/04/98	B05 a B15	159		24,2	308,8	309,1	J2e6								
20/04/98	B05 a B15	160	21,0	24,6	309,1	309,4	J2e6								
21/04/98	B05 a B15	161		22,6	309,4	309,7	J2e6								
21/04/98	B05 a B15	162	31,0		309,7	310,0	J2e9								
22/04/98	B05 a B15	163	22,0	24,4	310,0	310,3	J2e6								
22/04/98	B05 a B15	164		26,0	310,3	310,6	J2e9								
23/04/98	B05 a B15	165	24,0	24,6	310,6	310,9	J2e6								
05/05/98	B05 a B16	167	23,0	23,0	311,2	311,5	J2e6								
06/05/98	B05 a B16	168		21,2	311,5	311,8	J2e6								
06/05/98	B05 a B16	169	23,0	22,4	311,8	312,1	J2e6								
07/05/98	B05 a B16	170	18,0	22,5	312,1	312,4	J2e6	637 a 639							
07/05/98	B05 a B16	171	24,0	23,0	312,4	312,7	J2e6								
08/05/98	B05 a B16	172	21,0	20,8	312,7	313,0	J2e6								
08/05/98	B05 a B16	173	25,0	22,7			J2e9								
09/05/98	B05 a B16	174	26,0	22,5	313,3	313,6	J2e6								
09/05/98	B05 a B16	175	25,0	22,9			J2e9								
10/05/98	B05 a B17	176	19,0	21,4	313,9	314,2	J2e6								
11/05/98	B05 a B17	177		23,6	314,2	314,5	J2e6								
12/05/98	B05 a B17	178	18,0	23,1	314,5	314,8	J2e6								

### Tabela de temperaturas ambiente e produção de concreto-barragem leito do rio - B8

Data da última concretagem - considerando-se sequência do B5 para B8

DATA	BLOCO	CAMADA	TEMPERATURA		COTA FUNDO	COTA TOPO	TRAÇO	TERMÔMETRO	TE-601	TE-602	TE-603	TE-604	TE-605	TE-606	TE-607	
			AMBIENTE	CONCRETO												
12/05/98	B05 a B17	179		24,4	314,8	315,1	J2e6									
14/05/98	B05 a B17	180		23,1	315,1	315,4	J2e6									
16/05/98	B05 a B17	180 a 182	16,0	21,7	315,1	316,0	J2e6									
18/05/98	B05 a B17	183 a 185	21,0	22,1	316,0	316,9	J2e6									
20/05/98	B05 a B17	186 a 188	25,0	23,5	316,9	317,8	J2e6									
23/05/98	B05 a B17	188 a 191		22,2	317,8	318,7	J2e6									
25/05/98	B05 a B18	192 a 194	20,0	22,9	318,7	319,6	J2e6	640								
27/05/98	B05 a B18	195 a 197	16,0	20,6	319,6	320,5	J2e6									
29/05/98	B05 a B18	198 a 200		23,6	320,5	321,4	J2e6									
31/05/98	B05 a B18	201 a 203		19,7	321,4	322,3	J2e6									
02/06/98	B05 a B18	204 a 206	19,0	21,0	322,3	323,2	J2e6									
04/06/98	B05 a B18	207 a 209		20,2	323,2	324,1	J2e6		25,49	27,61	34,30	38,27	37,46	23,55	26,04	
05/06/98	B05 a B18	210 A 212		20,1	324,1	325,0	J2e6									
08/06/98	B05 a B19	213 A 215		22,9	325,0	325,9	J2e6	641								
10/06/98	B05 a B19	216 a 219		20,3	325,9	327,1	J2e6									
12/06/98	B05 a B19	216 a 218		20,7	325,9	326,8	J2e6									
13/06/98	B05 a B19	216 a 218	14,0	19,4	325,9	326,8	J2e6									
13/06/98	B05 a B19	216 a 221	15,0	21,8	325,9	327,4	J2e6									



DATA	TE-608	TE-609	TE-610	TE-611	TE-612	TE-613	TE-614	TE-615	TE-616	TE-617	TE-618	TE-619	TE-620	TE-621	TE-622	TE-623	TE-624	TE-625
04/04/97			40,33	40,01														
05/04/97			41,09	40,85														
05/04/97			41,09	40,85														
06/04/97			41,48	41,32														
08/04/97			41,84	41,75														
08/04/97			41,84	41,75														
10/04/97			42,04	41,98														
11/04/97			42,15	42,11														
15/04/97			42,52	42,53														
15/04/97			42,52	42,53														
17/04/97			42,70	42,72														
19/04/97			42,83	42,89														
19/04/97			42,83	42,89														
23/04/97			43,11	43,18														
23/04/97			43,11	43,18														
24/04/97			43,16	43,24				35,73	36,13									
25/04/97			43,21	43,29				37,98	38,51									
26/04/97			43,25	43,34				37,77	39,39									
26/04/97			43,25	43,34				37,77	39,39									
27/04/97			43,30	43,38				36,94	39,25									
28/04/97			43,35	43,42				36,11	39,08									
29/04/97			43,38	43,48				35,47	38,76									
03/05/97			43,50	43,61				33,96	36,97									
06/05/97			43,58	43,69				33,59	35,74									
07/05/97			43,59	43,71				33,53	35,41									
10/05/97								32,71	34,58									
13/05/97																		
16/05/97			43,68	43,84				31,73	32,90									
23/05/97			43,67	43,87				30,74	31,62									
23/05/97			43,67	43,87				30,74	31,62									
26/05/97								29,49	30,74									
28/05/97	26,24	27,72						29,38	30,02									
31/05/97	28,63	28,26																
03/06/97	30,58	30,26	43,53	43,82				29,30	28,70									
06/06/97	30,62	30,30	43,48	43,80				28,34	28,27									
06/06/97	30,62	30,30	43,48	43,80				28,34	28,27									
08/06/97	30,72	30,55																
10/06/97	30,77	30,79						27,55	27,56									
10/06/97	30,77	30,79						27,55	27,56									
12/06/97	30,79	31,02																
12/06/97	30,79	31,02																

DATA	TE-608	TE-609	TE-610	TE-611	TE-612	TE-613	TE-614	TE-615	TE-616	TE-617	TE-618	TE-619	TE-620	TE-621	TE-622	TE-623	TE-624	TE-625
13/06/97	30,80	31,15						27,64	26,88									
17/06/97	30,80	31,59						27,55	26,71									
17/06/97	30,80	31,59						27,55	26,71									
18/06/97	30,79	31,67	43,20	43,62														
19/06/97	30,77	31,78			29,24	28,82	27,92											
20/06/97	30,75	31,86			33,91	33,88	33,00	27,46	26,28									
21/06/97	30,71	31,94			33,64	33,73	32,81											
24/06/97	30,61	32,15			33,73	34,07	32,63	28,15	26,34									
24/06/97	30,61	32,15			33,73	34,07	32,63	28,15	26,34									
25/06/97	30,58	32,23	42,99	43,48	33,55	33,95	32,52											
27/06/97	30,51	32,37			33,84	34,33	33,01	29,05	26,89									
27/06/97	30,51	32,37			33,84	34,33	33,01	29,05	26,89									
22/12/97																		
23/12/97																		
02/01/98																		
05/01/98																		
06/01/98																		
08/01/98	28,34	34,50	39,78	37,61	30,92	31,41	33,74	34,87	32,75									
08/01/98	28,34	34,50	39,78	37,61	30,92	31,41	33,74	34,87	32,75									
09/01/98																		
10/01/98																		
21/01/98																		
22/01/98	28,81	34,43	39,62	37,46	30,57	31,68	33,93	35,10	31,64	41,53	43,73	42,18	40,54	44,28				
22/01/98	28,81	34,43	39,62	37,46	30,57	31,68	33,93	35,10	31,64	41,53	43,73	42,18	40,54	44,28				
23/01/98										43,86	46,12	44,48	42,95	44,79				
23/01/98										43,86	46,12	44,48	42,95	44,79				
24/01/98										43,71	45,93	44,41	43,31	42,40				
26/01/98										43,58	45,83	44,55	43,48	39,41				
27/01/98										43,64	45,94	44,77	43,68	38,60				
27/01/98										43,64	45,94	44,77	43,68	38,60				
28/01/98										43,66	46,03	44,97	43,88	38,26				
28/01/98										43,66	46,03	44,97	43,88	38,26				
28/01/98										43,66	46,03	44,97	43,88	38,26				
29/01/98										43,66	46,11	45,12	44,04	37,95				
29/01/98										43,66	46,11	45,12	44,04	37,95				
30/01/98										43,62	46,16	45,21	44,16	37,51				
31/01/98																		
02/02/98										43,41	46,27	45,52	44,46	35,18				
03/02/98																		
03/02/98																		
04/02/98																		

DATA	TE-608	TE-609	TE-610	TE-611	TE-612	TE-613	TE-614	TE-615	TE-616	TE-617	TE-618	TE-619	TE-620	TE-621	TE-622	TE-623	TE-624	TE-625
05/02/98										43,14	46,31	45,72	44,55	34,31	29,34	30,68	34,00	34,16
06/02/98										43,03	46,32	45,79	44,73	33,77	39,30	39,35	38,74	38,32
07/02/98										42,90	46,31	45,85	44,80	34,61	43,24	43,14	42,04	41,75
08/02/98																		
09/02/98										42,62	46,24	45,96	44,91	33,72	43,24	43,67	42,33	42,51
11/02/98										42,33	46,12	46,07	45,01	33,60	43,43	44,08	42,72	42,70
11/02/98										42,33	46,12	46,07	45,01	33,60	43,43	44,08	42,72	42,70
12/02/98	29,39	34,36	39,42	37,31	30,63	31,92	34,52	35,71	31,08	42,20	46,06	46,13	45,05	33,46	43,56	44,34	43,01	42,90
12/02/98	29,39	34,36	39,42	37,31	30,63	31,92	34,52	35,71	31,08	42,20	46,06	46,13	45,05	33,46	43,56	44,34	43,01	42,90
13/02/98										42,06	45,98	46,17	45,09	33,24	43,57	44,51	43,21	43,06
14/02/98										41,88	45,85	46,20	45,13	32,37	43,52	44,66	43,44	43,25
14/02/98										41,88	45,85	46,20	45,13	32,37	43,52	44,66	43,44	43,25
14/02/98										41,88	45,85	46,20	45,13	32,37	43,52	44,66	43,44	43,25
16/02/98										41,60	45,67	46,24	45,19	32,67	43,39	44,92	43,76	43,53
17/02/98										41,40	45,53	46,27	45,23	32,49	43,30	45,10	44,00	43,73
17/02/98										41,40	45,53	46,27	45,23	32,49	43,30	45,10	44,00	43,73
18/02/98	29,47	34,34	39,36	37,25	30,51	31,95	34,69	35,90	30,76	41,28	45,45	46,28	45,24	32,72	43,25	45,21	44,12	43,85
18/02/98	29,47	34,34	39,36	37,25	30,51	31,95	34,69	35,90	30,76	41,28	45,45	46,28	45,24	32,72	43,25	45,21	44,12	43,85
20/02/98																		
20/02/98																		
21/02/98										40,85	45,10	46,33	45,31	32,85	43,03	45,57	44,63	44,29
21/02/98										40,85	45,10	46,33	45,31	32,85	43,03	45,57	44,63	44,29
22/02/98																		
23/02/98										40,60	44,83	46,36	45,34	32,93	42,90	45,68	44,90	44,53
26/02/98										40,26	44,41	46,37	45,38	33,10	42,70	45,76	45,27	44,81
27/02/98										40,11	44,25	46,37	45,39	32,78	42,61	45,78	45,40	44,90
01/03/98																		
02/03/98															42,41	45,75	45,66	45,04
03/03/98										39,75	43,78	46,40	45,42	30,97	42,30	45,73	45,76	45,09
04/03/98	29,57	34,31	39,23	37,15	30,72	32,01	35,06	36,31	30,58	39,65	43,65	46,40	45,42	31,11	42,21	45,70	45,84	45,12
04/03/98	29,57	34,31	39,23	37,15	30,72	32,01	35,06	36,31	30,58	39,65	43,65	46,40	45,42	31,11	42,21	45,70	45,84	45,12
09/03/98															41,77	45,46	46,17	45,15
10/03/98										39,14	42,90	46,37	45,42	32,06	41,71	45,40	46,23	45,14
11/03/98	29,60	34,30	39,17	37,09	30,91	32,04	35,22	36,49	30,58	39,10	42,82	46,36	45,43	32,00	41,65	45,36	46,27	45,13
12/03/98																		
13/03/98																		
14/03/98																		
16/03/98																		
20/03/98																		
21/03/98										38,20	41,87	46,29	45,38	29,21	40,66	44,73	46,70	44,83

DATA	TE-608	TE-609	TE-610	TE-611	TE-612	TE-613	TE-614	TE-615	TE-616	TE-617	TE-618	TE-619	TE-620	TE-621	TE-622	TE-623	TE-624	TE-625
24/03/98																		
25/03/98																		
26/03/98	29,77	34,27	39,06	36,95	30,74	32,14	35,57	36,86	29,61	37,63	41,43	46,25	45,35	29,09	40,03	44,40	46,86	44,60
26/03/98	29,77	34,27	39,06	36,95	30,74	32,14	35,57	36,86	29,61	37,63	41,43	46,25	45,35	29,09	40,03	44,40	46,86	44,60
27/03/98																		
27/03/98																		
28/03/98																		
30/03/98																		
07/04/98																		
08/04/98			38,96	36,83	30,33	32,15	35,84	37,17	28,23	36,38	40,54	46,12	45,24	26,29	38,60	43,47	47,19	43,81
09/04/98										36,26	40,45	46,11	45,23	26,30	38,46	43,40	47,21	43,74
09/04/98										36,26	40,45	46,11	45,23	26,30	38,46	43,40	47,21	43,74
10/04/98																		
13/04/98	29,70	34,25	38,93	36,77	30,12	32,08	35,94	37,26	28,11	36,22	40,11	46,08	45,18	28,17	38,01	43,09	47,27	43,48
14/04/98																		
14/04/98																		
15/04/98																		
17/04/98																		
17/04/98																		
18/04/98																		
18/04/98																		
19/04/98																		
19/04/98																		
20/04/98																		
21/04/98																		
21/04/98																		
22/04/98																		
22/04/98																		
23/04/98																		
05/05/98																		
06/05/98																		
06/05/98																		
07/05/98																		
07/05/98																		
08/05/98																		
08/05/98																		
09/05/98																		
09/05/98																		
10/05/98																		
11/05/98																		
12/05/98																		

DATA	TE-608	TE-609	TE-610	TE-611	TE-612	TE-613	TE-614	TE-615	TE-616	TE-617	TE-618	TE-619	TE-620	TE-621	TE-622	TE-623	TE-624	TE-625
12/05/98																		
14/05/98																		
16/05/98																		
18/05/98																		
20/05/98																		
23/05/98																		
25/05/98																		
27/05/98																		
29/05/98																		
31/05/98																		
02/06/98																		
04/06/98	27,53	34,16	38,63	36,01	28,70	30,84	36,82	38,14	23,92	32,81	36,34	45,66	44,18	23,08	34,20	39,07	47,72	39,62
05/06/98																		
08/06/98																		
10/06/98																		
12/06/98																		
13/06/98																		
13/06/98																		

DATA	TE-626	TE-627	TE-628	TE-629	TE-630	TE-631	TE-632	TE-633	TE-634	TE-635	TE-636	TE-637	TE-638	TE-639	TE-640	TE-641	temp. amb.
31/01/97																	
12/02/97																	
16/02/97																	
20/02/97																	
20/02/97																	
22/02/97																	
27/02/97																	
28/02/97																	
01/03/97																	
05/03/97																	
06/03/97																	
06/03/97																	
07/03/97																	
08/03/97																	
09/03/97																	
11/03/97																	
12/03/97																	
13/03/97																	
14/03/97																	
15/03/97																	22,65
18/03/97																	23,33
19/03/97																	23,00
20/03/97																	21,00
21/03/97																	24,35
22/03/97																	25,12
22/03/97																	25,12
24/03/97																	22,76
25/03/97																	24,90
25/03/97																	24,90
25/03/97																	24,90
26/03/97																	25,13
26/03/97																	25,13
27/03/97																	23,58
27/03/97																	23,58
29/03/97																	23,19
31/03/97																	23,77
01/04/97																	21,88
02/04/97																	21,52
02/04/97																	21,52
03/04/97																	22,50
03/04/97																	22,50

DATA	TE-626	TE-627	TE-628	TE-629	TE-630	TE-631	TE-632	TE-633	TE-634	TE-635	TE-636	TE-637	TE-638	TE-639	TE-640	TE-641	temp. amb.
04/04/97																	14,96
05/04/97																	15,13
05/04/97																	15,13
06/04/97																	19,54
08/04/97																	20,38
08/04/97																	20,38
10/04/97																	20,25
11/04/97																	21,91
15/04/97																	23,43
15/04/97																	23,43
17/04/97																	23,12
19/04/97																	24,26
19/04/97																	24,26
23/04/97																	22,08
23/04/97																	22,08
24/04/97																	23,63
25/04/97																	18,37
26/04/97																	15,77
26/04/97																	15,77
27/04/97																	15,38
28/04/97																	18,10
29/04/97																	16,19
03/05/97																	21,65
06/05/97																	17,50
07/05/97																	21,33
10/05/97																	21,04
13/05/97																	19,17
16/05/97																	19,93
23/05/97																	12,91
23/05/97																	12,91
26/05/97																	15,46
28/05/97																	13,92
31/05/97																	17,00
03/06/97																	16,29
06/06/97																	18,86
06/06/97																	18,86
08/06/97																	8,84
10/06/97																	14,11
10/06/97																	14,11
12/06/97																	20,00
12/06/97																	20,00

DATA	TE-626	TE-627	TE-628	TE-629	TE-630	TE-631	TE-632	TE-633	TE-634	TE-635	TE-636	TE-637	TE-638	TE-639	TE-640	TE-641	temp. amb.
13/06/97																	21,52
17/06/97																	14,44
17/06/97																	14,44
18/06/97																	11,00
19/06/97																	17,04
20/06/97																	20,63
21/06/97																	23,72
24/06/97																	17,83
24/06/97																	17,83
25/06/97																	22,42
27/06/97																	15,82
27/06/97																	15,82
22/12/97																	30,65
23/12/97																	25,83
02/01/98																	27,00
05/01/98																	31,44
06/01/98																	27,91
08/01/98																	24,67
08/01/98																	24,67
09/01/98																	27,14
10/01/98																	27,93
21/01/98																	28,73
22/01/98																	27,11
22/01/98																	27,11
23/01/98																	24,95
23/01/98																	24,95
24/01/98																	25,61
26/01/98																	25,45
27/01/98																	29,21
27/01/98																	29,21
28/01/98																	29,44
28/01/98																	29,44
28/01/98																	29,44
29/01/98																	28,00
29/01/98																	28,00
30/01/98																	25,83
31/01/98																	24,43
02/02/98																	25,47
03/02/98																	25,00
03/02/98																	25,00
04/02/98																	23,57

DATA	TE-626	TE-627	TE-628	TE-629	TE-630	TE-631	TE-632	TE-633	TE-634	TE-635	TE-636	TE-637	TE-638	TE-639	TE-640	TE-641	temp. amb.
05/02/98																	23,04
06/02/98																	26,81
07/02/98																	23,94
08/02/98																	25,38
09/02/98																	27,77
11/02/98																	22,53
11/02/98																	22,53
12/02/98																	24,00
12/02/98																	24,00
13/02/98																	24,10
14/02/98																	25,88
14/02/98																	25,88
14/02/98																	25,88
16/02/98																	26,05
17/02/98																	26,08
17/02/98																	26,08
18/02/98																	25,89
18/02/98																	25,89
20/02/98																	25,38
20/02/98																	25,38
21/02/98	41,71	43,79	45,06	42,38													25,89
21/02/98	41,71	43,79	45,06	42,38													25,89
22/02/98																	
23/02/98	42,03	43,86	43,09	40,80													28,23
26/02/98	43,88	45,38	45,42	43,35													25,56
27/02/98	43,94	45,70	45,75	43,20													24,64
01/03/98																	23,42
02/03/98	43,76	45,83	45,91	42,54													23,53
03/03/98	43,68	45,93	46,03	42,17													24,55
04/03/98	43,57	45,97	46,12	41,82													27,14
04/03/98	43,57	45,97	46,12	41,82													27,14
09/03/98	42,85	45,98	46,30	40,56													30,66
10/03/98	42,73	45,97	46,33	40,38													26,73
11/03/98	42,65	45,96	46,35	40,26													25,50
12/03/98																	25,48
13/03/98																	23,88
14/03/98																	22,90
16/03/98																	22,74
20/03/98																	23,00
21/03/98	41,31	45,58	46,74	37,98													22,85

DATA	TE-626	TE-627	TE-628	TE-629	TE-630	TE-631	TE-632	TE-633	TE-634	TE-635	TE-636	TE-637	TE-638	TE-639	TE-640	TE-641	temp. amb.
24/03/98																	24,27
25/03/98					20,82												21,38
26/03/98	40,59	45,25	46,88	37,10	32,99	36,06	36,61	37,26									17,86
26/03/98	40,59	45,25	46,88	37,10	32,99	36,06	36,61	37,26									17,86
27/03/98					34,57	38,00	37,67	37,24									22,48
27/03/98					34,57	38,00	37,67	37,24									22,48
28/03/98					35,37	39,09	38,62	36,07									21,57
30/03/98					35,23	40,24	39,44	34,43									23,78
07/04/98																	21,00
08/04/98	38,86	43,85	47,11	34,45	32,29	41,30	41,13	30,19									19,70
09/04/98	38,71	43,74	47,12	34,27	31,91	41,20	41,21	29,99									22,80
09/04/98	38,71	43,74	47,12	34,27	31,91	41,20	41,21	29,99									22,80
10/04/98																	22,00
13/04/98	38,19	43,37	47,16	34,01	33,17	40,60	41,29	31,06									28,50
14/04/98					33,48	40,78	41,28	31,16									24,40
14/04/98					33,48	40,78	41,28	31,16									24,40
15/04/98					33,47	40,25	41,27	31,16	41,07	40,14	37,42						22,50
17/04/98					32,41	39,92	41,25	30,46	40,52	40,78	37,11						20,40
17/04/98					32,41	39,92	41,25	30,46	40,52	40,78	37,11						20,40
18/04/98					32,01	39,80	41,24	30,08	39,47	39,82	36,84						17,00
18/04/98					32,01	39,80	41,24	30,08	39,47	39,82	36,84						17,00
19/04/98																	17,60
19/04/98																	17,60
20/04/98					31,24	39,57	41,23	28,43	39,71	40,80	38,00						18,90
21/04/98					31,32	39,46	41,22	27,82	39,80	41,19	38,34						22,10
21/04/98					31,32	39,46	41,22	27,82	39,80	41,19	38,34						22,10
22/04/98																	23,10
22/04/98																	23,10
23/04/98					31,99	39,23	41,22	28,22	39,79	41,81	38,58						21,40
05/05/98																	18,20
06/05/98					29,84	37,93	41,22	25,34	38,47	41,73	36,47						18,00
06/05/98					29,84	37,93	41,22	25,34	38,47	41,73	36,47						18,00
07/05/98												30,36	30,51	31,53			16,80
07/05/98												30,36	30,51	31,53			16,80
08/05/98												33,89	34,49	35,56			18,00
08/05/98												33,89	34,49	35,56			18,00
09/05/98												34,78	35,33	36,00			18,70
09/05/98												34,78	35,33	36,00			18,70
10/05/98																	18,20
11/05/98												35,64	36,29	35,55			21,10
12/05/98												35,95	36,66	34,91			20,70

DATA	TE-626	TE-627	TE-628	TE-629	TE-630	TE-631	TE-632	TE-633	TE-634	TE-635	TE-636	TE-637	TE-638	TE-639	TE-640	TE-641	temp. amb.
12/05/98												35,95	36,66	34,91			20,70
14/05/98																	19,80
16/05/98												36,44	37,49	33,06			15,50
18/05/98									36,67	41,18	33,79	36,43	37,78	32,28			17,90
20/05/98																	19,50
23/05/98					29,47	36,32	40,84	23,90	35,74	40,71	32,85	36,11	38,25	30,62	31,72		20,90
25/05/98									35,56	40,54	32,57	36,03	38,36	30,41	31,60		24,30
27/05/98									35,42	40,31	32,30	35,98	38,44	30,25	33,13		16,50
29/05/98												35,95	38,46	30,02	34,73		18,60
31/05/98																	16,10
02/06/98									34,78	39,67	31,55	35,62	38,38	29,14	36,18		14,87
04/06/98	33,66	38,13	47,02	27,55	27,55	35,52	40,32	21,47	34,51	39,47	31,20	35,42	38,32	28,54	36,67		16,80
05/06/98																	17,78
08/06/98												34,99	38,13	27,37	37,34	29,59	20,50
10/06/98												34,85	38,04	27,33	37,54	33,89	17,20
12/06/98					28,86	34,95	39,93	22,41	33,84	38,72	29,90	34,76	37,92	27,20	37,70	34,93	18,22
13/06/98																35,04	16,76
13/06/98																35,04	16,76



Curitiba, 20 de dezembro de 2001

À COPEL Amec

At.: Nelson Toniatti

Ref.: Contrato celebrado entre a COPEL Amec e a Deminvest Empreendimento e Participações S.A. em 13.09.2001.

Na continuidade dos serviços descritos no Contrato supra citado e conforme estabelecem as Cláusulas Primeira e Sexta do mesmo, a DEMINVEST Empreendimento e Participações S. A., autoriza a COPEL Amec a proceder os Estudos de Inventário dos rios Goioerê, no estado do Paraná e Correntes, no estado de Santa Catarina.

Os serviços ora autorizados correspondem a alínea (b), item 1.1, da Cláusula Primeira do contrato celebrado entre as partes.

Atenciosamente,

Rodrigo Teixeira Demeterco  
Diretor

### Tabela de temperaturas ambiente e produção de concreto-barragem leito do rio - B8

Data da última concretagem - considerando-se sequência do B5 para B8

DATA	BLOCO	CAMADA	TEMPERATURA		COTA FUNDO	COTA TOPO	TRAÇO	TERMÔMETRO	TE-601	TE-602	TE-603	TE-604	TE-605	TE-606	TE-607
			AMBIENTE	CONCRETO											
31/01/97	B06 a B07	6	22,5	22,6	262,9	263,2	J2e6								
12/02/97	B08	A a E	24,0	24,5			J2e6								
16/02/97	B09/ B08	3	22,0	25,1	262,0	262,3	J2e6								
20/02/97	B06 a B08	4	23,0	26,3	262,3	262,6	J2e6								
20/02/97	B06 a B08	5	23,0	25,7	262,6	262,9	J2e6								
22/02/97	B06 a B09	7	23,0	25,8	263,2	263,5	J2e6								
27/02/97	B05 a B08	8	24,0	27,2	263,5	263,8	J2e6								
28/02/97	B05 a B08	9	30,0	30,8	263,8	264,1	J2e6								
01/03/97	B05 a B08	11	25,0	27,4	264,4	264,7	J2e6								
05/03/97	B05 a B08	12	26,0	26,5	264,7	265,0	J2e6								
06/03/97	B05 a B08	13	20,0	26,4	265,0	265,3	J2e6								
06/03/97	B05 a B08	14	26,0	27,3	265,3	265,6	J2e6								
07/03/97	B05 a B08	15	22,0	25,3	265,6	265,9	J2e6								
08/03/97	B05 a B08	16	27,5	26,7	265,9	266,2	J2e6								
09/03/97	B05 a B08	17	20,0	24,7	266,2	266,5	J2e6								
11/03/97	B05 a B08	18	28,0	29,4	266,5	266,8	J2e6								
12/03/97	B05 a B08	19	23,0	27,4	266,8	267,1	J2e6								
13/03/97	B05 a B08	20	23,0	26,4	267,1	267,4	J2e6								
14/03/97	B05 a B08	21	23,0	23,9	267,4	267,7	J2e6								
15/03/97	B05 a B08	22	22,0	25,8	267,7	268,0	J2e6	601 a 606	38,28	40,94	39,55	38,86	39,01	39,35	
18/03/97	B05 a B08	23	21,0	27,1	268,0	268,3	J2e6		36,57	36,83	35,90	36,08	35,45	36,65	
19/03/97	B05 a B08	24	26,5	25,1	268,3	268,6	J2e6		36,76	37,29	36,60	36,67	36,56	36,95	
20/03/97	B05 a B08	25	22,0	25,1	268,6	268,9	J2e6		37,63	38,18	37,45	37,46	37,43	38,03	
21/03/97	B05 a B08	25/191	20,0	23,4			J2e6		38,23	38,58	38,10	38,10	38,19	38,48	
22/03/97	B05 a B08	26	22,0	25,2	268,9	269,2	J2e6		38,52	39,24	38,58	38,54	38,73	38,71	
22/03/97	B05 a B08	27		25,4	269,2	269,5	J2e6		38,52	39,24	38,58	38,54	38,73	38,71	
24/03/97	B05 a B08	28	27,0	27,8	269,5	269,8	J2e6		38,55	39,43	39,24	39,16	39,45	38,85	
25/03/97	B05 a B08	29	23,0	23,7	269,8	270,1	J2e6		38,33	39,31	39,62	39,50	39,83	38,83	
25/03/97	B05 a B08	30	27,0	27,1	270,1	270,4	J2e6		38,33	39,31	39,62	39,50	39,83	38,83	
25/03/97	B05 a B08	31	24,0	22,3	270,4	270,7	J2e6		38,33	39,31	39,62	39,50	39,83	38,83	
26/03/97	B05 a B08	32	23,0	24,3	270,7	271,0	J2e6		38,08	39,14	39,92	39,80	40,16	38,78	
26/03/97	B05 a B08	33	25,0	27,0	271,0	271,3	J2e6		38,08	39,14	39,92	39,80	40,16	38,78	
27/03/97	B05 a B08	34	20,0	22,0	271,3	271,6	J2e6		37,82	39,00	40,19	40,06	40,45	38,75	
27/03/97	B05 a B11	35	22,4	26,1	271,6	271,9	J2e6		37,82	39,00	40,19	40,06	40,45	38,75	
29/03/97	B05 a B11	36	27,0	27,3	271,9	272,2	J2e6		37,31	38,69	40,61	40,50	40,92	38,71	
31/03/97	B05 a B11	37	26,5	26,4	272,2	272,5	J2e6		36,78	38,26	40,95	40,85	41,28	38,68	
01/04/97	B05 a B11	38	20,4	22,2	272,5	272,8	J2e6		36,45	39,88	41,90	41,46	42,14	39,42	
02/04/97	B05 a B11	39	21,0	25,0	272,8	273,1	J2e6		36,13	39,07	42,03	41,52	42,25	39,33	

### Tabela de temperaturas ambiente e produção de concreto-barragem leito do rio - B8

Data da última concretagem - considerando-se sequência do B5 para B8

DATA	BLOCO	CAMADA	TEMPERATURA		COTA FUNDO	COTA TOPO	TRAÇO	TERMÔMETRO	TE-601	TE-602	TE-603	TE-604	TE-605	TE-606	TE-607
			AMBIENTE	CONCRETO											
02/04/97	B05 a B11	40	26,0	24,7	273,1	273,4	J2e6	<b>610, 611</b>	36,13	39,07	42,03	41,52	42,25	39,33	
03/04/97	B05 a B11	41	20,0	24,4	273,4	273,7	J2e6		35,76	38,72	42,16	41,65	42,39	39,24	
03/04/97	B05 a B11	42	25,5	24,4	273,7	274,0	J2e6		35,76	38,72	42,16	41,65	42,39	39,24	
04/04/97	B05 a B11	43	21,0	21,1	274,0	274,3	J2e6		35,43	38,43	42,30	41,79	42,53	39,15	
05/04/97	B05 a B11	44	14,6	16,5	274,3	274,6	J2e6		35,20	38,25	42,42	41,91	42,66	39,07	
05/04/97	B05 a B11	45	22,0	22,6	274,6	274,9	J2e6		35,20	38,25	42,42	41,91	42,66	39,07	
06/04/97	B05 a B11	46	14,0	21,5	274,9	275,2	J2e6		34,82	37,85	42,52	42,01	42,77	38,96	
08/04/97	B05 a B11	47	21,0	19,1	275,2	275,5	J2e6		33,79	36,69	42,74	42,22	42,98	38,69	
08/04/97	B05 a B11	48	32,0	25,1	275,5	275,8	J2e6		33,79	36,69	42,74	42,22	42,98	38,69	
10/04/97	B05 a B11	49	28,0	24,8	275,8	276,1	J2e6		33,12	35,95	42,90	42,39	43,16	38,34	
11/04/97	B05 a B10	51		21,6	276,4	276,7	J2e6		32,94	35,70	42,97	42,47	43,24	38,13	
15/04/97	B05 a B11	52	24,0	23,5	276,7	277,0	J2e6		32,57	35,13	43,20	42,72	43,51	37,33	
15/04/97	B05 a B15	53	23,0	24,4	277,0	277,3	J2e6		32,57	35,13	43,20	42,72	43,51	37,33	
17/04/97	B05 a B15	54	23,0	23,1	277,3	277,6	J2e6		32,64	35,06	43,27	42,83	43,61	37,00	
19/04/97	B05 a B15	55	23,0	24,2	277,6	277,9	J2e6		32,80	35,07	43,32	42,90	43,71	36,71	
19/04/97	B05 a B15	56	28,0	23,7	277,9	278,2	J2e6		32,80	35,07	43,32	42,90	43,71	36,71	
23/04/97	B05 a B15	57	25,0	22,8	278,2	278,5	J2e6								
23/04/97	B05 a B15	58		22,4	278,5	278,8	J2e6								
24/04/97	B05 a B15	59	29,0	26,2	278,8	279,1	J2e6	<b>615, 616</b>							
25/04/97	B05 a B15	60	26,0	23,2	279,1	279,4	J2e6		32,62	34,73	43,33	43,07	43,91	36,06	
26/04/97	B05 a B15	61		17,6	279,4	279,7	J2e6								
26/04/97	B05 a B15	62		20,2	279,7	280,0	J2e6								
27/04/97	B05 a B15	63		16,4	280,0	280,3	J2e6								
28/04/97	B05 a B15	64	24,0	21,1	280,3	280,6	J2e8								
29/04/97	B05 a B15	65	22,0	20,4	280,6	280,9	J2e8		32,05	34,08	43,25	43,13	43,99	35,53	
03/05/97	<b>B05 a B11</b>	<b>25</b>	<b>19,0</b>	<b>20,6</b>	<b>268,6</b>	<b>268,9</b>	<b>J2e6</b>								
06/05/97	<b>B05 a B11</b>	<b>27</b>	<b>19,0</b>	<b>22,3</b>	269,2	269,5	<b>J2e6</b>		31,56	33,77	42,99	43,18	44,08	34,24	
07/05/97	<b>B05 a B11</b>	<b>28</b>	<b>21,6</b>	<b>24,8</b>	<b>269,5</b>	<b>269,8</b>	<b>J2e6</b>								
10/05/97	<b>B05 a B11</b>	<b>30</b>	<b>20,2</b>	<b>22,1</b>	<b>270,1</b>	<b>270,4</b>	<b>J2e6</b>								
13/05/97	<b>B05 a B11</b>	<b>32</b>	<b>26,0</b>	<b>24,2</b>	<b>270,7</b>	<b>271,0</b>	<b>J2e6</b>								
16/05/97	<b>B05 a B11</b>	<b>34</b>	<b>19,9</b>	<b>21,6</b>	<b>271,3</b>	<b>271,6</b>	<b>J2e6</b>		33,55	35,63	42,49	43,18	44,11	33,11	
23/05/97	<b>B05 a B11</b>	<b>35</b>	<b>17,0</b>	<b>17,2</b>	<b>271,6</b>	<b>271,9</b>	<b>J2e6</b>		33,47	36,10	42,09	43,15	44,10	32,58	
23/05/97	<b>B05 a B11</b>	<b>36</b>	<b>20,0</b>	<b>19,6</b>	<b>271,9</b>	<b>272,2</b>	<b>J2e6</b>		33,47	36,10	42,09	43,15	44,10	32,58	
26/05/97	<b>B05 a B11</b>	<b>37</b>	<b>22,5</b>	<b>17,1</b>	<b>272,2</b>	<b>272,5</b>	<b>J2e6</b>								
28/05/97	<b>B05 a B11</b>	<b>40</b>	<b>15,0</b>	<b>19,6</b>	<b>273,1</b>	<b>273,4</b>	<b>J2e6</b>	<b>607 a 609</b>	32,96	35,51	41,79	43,11	44,07	31,07	<b>27,18</b>
31/05/97	<b>B05 a B11</b>	<b>42</b>	<b>20,0</b>	<b>19,1</b>	<b>273,7</b>	<b>274,0</b>	<b>J2e6</b>								28,79
03/06/97	<b>B05 a B11</b>	<b>43</b>	<b>16,8</b>	<b>19,7</b>	<b>274,0</b>	<b>274,3</b>	<b>J2e6</b>								30,49
06/06/97	<b>B05 a B11</b>	<b>45</b>	<b>16,0</b>	<b>20,6</b>	<b>274,6</b>	<b>274,9</b>	<b>J2e6</b>								30,44

### Tabela de temperaturas ambiente e produção de concreto-barragem leito do rio - B8

Data da última concretagem - considerando-se sequência do B5 para B8

DATA	BLOCO	CAMADA	TEMPERATURA		COTA FUNDO	COTA TOPO	TRAÇO	TERMÔMETRO	TE-601	TE-602	TE-603	TE-604	TE-605	TE-606	TE-607
			AMBIENTE	CONCRETO											
06/06/97	B05 a B11	46	18,0	19,4	274,9	275,2	J2e6								30,44
08/06/97	B05 a B11	48	6,0	19,5	275,5	275,8	J2e6								30,52
10/06/97	B05 a B11	49	9,0	18,3	275,8	276,1	J2e6								30,50
10/06/97	B05 a B11	50	22,0	20,8	276,1	276,4	J2e6								30,50
12/06/97	B05 a B11	51		21,0	276,4	276,7	J2e6								30,42
12/06/97	B05 a B11	52		22,8	276,7	277,0	J2e6								30,42
13/06/97	B05 a B11	54	23,2	24,1	277,3	277,6	J2e6								30,35
17/06/97	B05 a B11	55	10,8	21,1	277,6	277,9	J2e6								30,06
17/06/97	B05 a B11	56		20,9	277,9	278,2	J2e6								30,06
18/06/97	B05 a B11	57	11,5	20,5	278,2	278,5	J2e6		29,77	32,60	40,47	42,90	43,88	27,22	30,00
19/06/97	B05 a B11	58	16,0	22,3	278,5	278,8	J2e6								29,90
20/06/97	B05 a B11	59	18,0	24,0	278,8	279,1	J2e6	612 a 614							29,82
21/06/97	B05 a B11	60		22,5	279,1	279,4	J2e6								29,74
24/06/97	B05 a B11	61		23,0	279,4	279,7	J2e6								29,51
24/06/97	B05 a B11	62	21,0	23,4	279,7	280,0	J2e6								29,51
25/06/97	B05 a B11	63	23,0	24,4	280,0	280,3	J2e6		29,10	31,86	40,05	42,83	43,83	27,28	29,46
27/06/97	B05 a B11	64	23,0	21,9	280,3	280,6	J2e8								29,38
27/06/97	B05 a B11	65	12,8	19,6	280,6	280,9	J2e8								29,38
22/12/97	B05 a B11	66	34,0	27,6	280,9	281,2	J2e9								
23/12/97	B05 a B11	67	30,0	27,0	281,2	281,5	J2e9								
02/01/98	B05 a B11	67		25,9	281,2	281,5	J2e9								
05/01/98	B05 a B11	69	35,0	27,8	281,8	282,1	J2e9								
06/01/98	B05 a B11	70		27,2	282,1	282,4	J2e9								
08/01/98	B05 a B11	71		25,2	282,4	282,7	J2e6		25,71	28,25	35,44	39,94	39,69	33,32	28,05
08/01/98	B05 a B11	72		24,6	282,7	283,0	J2e9		25,71	28,25	35,44	39,94	39,69	33,32	28,05
09/01/98	B05 a B11	73		23,5	283,0	283,3	J2e6								
10/01/98	B05 a B11	74		25,4	283,3	283,6	J2e9								
21/01/98	B05 a B09	76	28,0	27,8	283,9	284,2	J2e9								
22/01/98	B05 a B09	77	25,0	26,7	284,2	284,5	J2e9	617 a 621	25,90	28,38	35,31	39,78	39,40	32,13	28,74
22/01/98	B05 a B09	78	35,0	27,4	284,5	284,8	J2e9		25,90	28,38	35,31	39,78	39,40	32,13	28,74
23/01/98	B05 a B09	79	25,0	26,2	284,8	285,1	J2e9								
23/01/98	B05 a B09	80	28,0	28,0	285,1	285,4	J2e9								
24/01/98	B05 a B09	81	24,0	28,0	285,4	285,7	J2e9								
26/01/98	B05 a B09	82	33,0	29,4	285,7	286,0	J2e9								
27/01/98	B05 a B09	83	22,0	24,9	286,0	286,3	J2e6								
27/01/98	B05 a B10	84	33,0	29,4	286,3	286,6	J2e9								
28/01/98	B05 a B10	85	23,0	23,0	286,6	286,9	J2e9								
28/01/98	B05 a B10	86	34,0	29,3	286,9	287,2	J2e9								

### Tabela de temperaturas ambiente e produção de concreto-barragem leito do rio - B8

Data da última concretagem - considerando-se sequência do B5 para B8

DATA	BLOCO	CAMADA	TEMPERATURA		COTA FUNDO	COTA TOPO	TRAÇO	TERMÔMETRO	TE-601	TE-602	TE-603	TE-604	TE-605	TE-606	TE-607
			AMBIENTE	CONCRETO											
28/01/98	B05 a B10	87	25,0	26,1	287,2	287,5	J2e9								
29/01/98	B05 a B10	88	23,0	23,7	287,5	287,8	J2e9								
29/01/98	B05 a B10	89	33,0	30,9	287,8	288,1	J2e9								
30/01/98	B05 a B10	90	23,0	26,0	288,1	288,4	J2e9								
31/01/98	B05 a B10	91	24,0	28,1	288,4	288,7	J2e6								
02/02/98	B05 a B10	92	25,0	25,0	288,7	289,0	J2e9								
03/02/98	B05 a B10	93	24,0	24,9	289,0	289,3	J2e9								
03/02/98	B05 a B10	94		26,4	289,3	289,6	J2e9								
04/02/98	B05 a B10	95	24,0	25,8	289,6	289,9	J2e9								
05/02/98	B05 a B10	96	24,0	25,0	289,9	290,2	J2e9								
06/02/98	B05 a B10	97	22,0	26,0	290,2	290,5	J2e9	622 a 625							
07/02/98	B05 a B10	98	26,0	26,7	290,5	290,8	J2e9								
08/02/98	B05 a B10	99	22,0	24,7	290,8	291,1	J2e6								
09/02/98	B05 a B11	100	29,0	26,2	291,1	291,4	J2e9								
11/02/98	B05 a B11	101		23,2	291,4	291,7	J2e6								
11/02/98	B05 a B11	102	25,0	25,5	291,7	292,0	J2e9								
12/02/98	B05 a B11	103		24,0	292,0	292,3	J2e6		26,38	28,66	35,15	39,52	39,02	31,24	29,14
12/02/98	B05 a B11	104		25,9	292,3	292,6	J2e9		26,38	28,66	35,15	39,52	39,02	31,24	29,14
13/02/98	B05 a B11	105		24,0	292,6	292,9	J2e6								
14/02/98	B05 a B11	106		24,8	292,9	293,2	J2e6								
14/02/98	B05 a B11	107	22,0	24,9	293,2	293,5	J2e6								
14/02/98	B05 a B11	108		27,6	293,5	293,8	J2e9								
16/02/98	B05 a B11	109		28,3	293,8	294,1	J2e9								
17/02/98	B05 a B11	110	23,0	25,6	294,1	294,4	J2e6								
17/02/98	B05 a B12	111		28,8	294,4	294,7	J2e9								
18/02/98	B05 a B12	112	24,0	26,1	294,7	295,0	J2e6		26,59	28,69	35,11	39,45	38,92	31,03	28,99
18/02/98	B05 a B12	113		28,1	295,0	295,3	J2e9		26,59	28,69	35,11	39,45	38,92	31,03	28,99
20/02/98	B05 a B12	114		28,0	295,3	295,6	J2e9								
20/02/98	B05 a B12	115	25,0	23,7	295,6	295,9	J2e9								
21/02/98	B05 a B12	116			295,9	296,2	J2e6								
21/02/98	B05 a B12	117	24,0	24,2	296,2	296,5	J2e6	626 a 629							
22/02/98	B05 a B12	118	24,0	25,8	296,5	296,8	J2e6								
23/02/98	B05 a B13	119		25,9	296,8	297,1	J2e9								
26/02/98	B05 a B13	120	28,0	27,8	297,1	297,4	J2e6								
27/02/98	B05 a B13	121		27,9	297,4	297,7	J2e6								
01/03/98	B05 a B13	122		25,4	297,7	298,0	J2e6								
02/03/98	B05 a B13	123		28,6	298,0	298,3	J2e6								
03/03/98	B05 a B13	124		24,6	298,3	298,6	J2e6								

### Tabela de temperaturas ambiente e produção de concreto-barragem leito do rio - B8

Data da última concretagem - considerando-se sequência do B5 para B8

DATA	BLOCO	CAMADA	TEMPERATURA		COTA FUNDO	COTA TOPO	TRAÇO	TERMÔMETRO	TE-601	TE-602	TE-603	TE-604	TE-605	TE-606	TE-607
			AMBIENTE	CONCRETO											
04/03/98	B05 a B13	125	23,0	25,0	298,6	298,9	J2e6		26,95	28,91	35,01	39,28	38,68	30,80	29,00
04/03/98	B05 a B13	126		30,3	298,9	299,2	J2e9		26,95	28,91	35,01	39,28	38,68	30,80	29,00
09/03/98	B05 à B13	127	30,0	28,6	299,2	299,5	J2e9								
	B05 a B13	128	33,0	27,6	299,5	299,8	J2e9								
10/03/98	B05 a B13	129		27,7	299,8	300,1	J2e9								
11/03/98	B05 a B13	130	27,0	24,0	300,1	300,4	J2e6		27,09	28,98	34,96	39,21	38,58	30,81	29,11
12/03/98	B05 a B13	131		27,4	300,4	300,7	J2e9								
13/03/98	B05 a B13	132		27,8	300,7	301,0	J2e6								
14/03/98	B05 a B13	133	27,0	27,3	301,0	301,3	J2e9								
16/03/98	B05 a B13	134		26,4	301,3	301,6	J2e9								
20/03/98	B05 a B13	135	21,0	24,6	301,6	301,9	J2e9								
21/03/98	B05 a B14	136	21,0	23,9	301,9	302,2	J2e6								
24/03/98	B05 a B14	137	26,0	25,2	302,2	302,5	J2e9								
25/03/98	B05 a B14	138	24,0	25,2	302,5	302,8	J2e9								
26/03/98	B05 a B14	139		24,4	302,8	303,1	J2e6	630 a 633	27,29	29,11	34,85	39,04	38,36	29,69	29,29
26/03/98	B05 a B14	140	27,0	23,5	303,1	303,4	J2e9		27,29	29,11	34,85	39,04	38,36	29,69	29,29
27/03/98	B05 a B14	141		24,6	303,4	303,7	J2e6								
27/03/98	B05 a B14	142	29,0	25,9	303,7	304,0	J2e6								
28/03/98	B05 a B14	143	24,0	25,7	304,0	304,3	J2e6								
30/03/98	B05 a B14	144		26,5	304,3	304,6	J2e6								
07/04/98	B05 a B14	145	26,0	24,4	304,6	304,9	J2e6								
08/04/98	B05 a B14	146		22,6	304,9	305,2	J2e6		27,37	29,17	34,76	38,89	38,17	28,14	28,88
09/04/98	B05 a B14	147		25,0	305,2	305,5	J2e6								
09/04/98	B05 a B14	148	27,0	25,4	305,5	305,8	J2e6								
10/04/98	B05 a B14	149	22,0	25,2	305,8	306,1	J2e6								
13/04/98	B05 a B14	150	32,0	26,8	306,1	306,4	J2e6		27,28	29,13	34,74	38,84	38,11	28,11	28,65
14/04/98	B05 a B14	151	23,0	26,9	306,4	306,7	J2e9								
14/04/98	B05 a B14	152		23,9	306,7	307,0	J2e9								
15/04/98	B05 a B15	153	24,0	25,3	307,0	307,3	J2e6	634 a 636							
17/04/98	B05 a B15	154		25,6	307,3	307,6	J2e6								
17/04/98	B05 a B15	155	23,0	23,7	307,6	307,9	J2e6								
18/04/98	B05 a B15	156		24,3	307,9	308,2	J2e6								
18/04/98	B05 a B15	157	18,0	23,3	308,2	308,5	J2e6								
19/04/98	B05 a B15	158	17,0	22,0	308,5	308,8	J2e6								
19/04/98	B05 a B15	159		24,2	308,8	309,1	J2e6								
20/04/98	B05 a B15	160	21,0	24,6	309,1	309,4	J2e6								
21/04/98	B05 a B15	161		22,6	309,4	309,7	J2e6								
21/04/98	B05 a B15	162	31,0		309,7	310,0	J2e9								

### Tabela de temperaturas ambiente e produção de concreto-barragem leito do rio - B8

Data da última concretagem - considerando-se sequência do B5 para B8

DATA	BLOCO	CAMADA	TEMPERATURA		COTA FUNDO	COTA TOPO	TRAÇO	TERMÔMETRO	TE-601	TE-602	TE-603	TE-604	TE-605	TE-606	TE-607
			AMBIENTE	CONCRETO											
22/04/98	B05 a B15	163	22,0	24,4	310,0	310,3	J2e6								
22/04/98	B05 a B15	164		26,0	310,3	310,6	J2e9								
23/04/98	B05 a B15	165	24,0	24,6	310,6	310,9	J2e6								
05/05/98	B05 a B16	167	23,0	23,0	311,2	311,5	J2e6								
06/05/98	B05 a B16	168		21,2	311,5	311,8	J2e6								
06/05/98	B05 a B16	169	23,0	22,4	311,8	312,1	J2e6								
07/05/98	B05 a B16	170	18,0	22,5	312,1	312,4	J2e6	637 a 639							
07/05/98	B05 a B16	171	24,0	23,0	312,4	312,7	J2e6								
08/05/98	B05 a B16	172	21,0	20,8	312,7	313,0	J2e6								
08/05/98	B05 a B16	173	25,0	22,7			J2e9								
09/05/98	B05 a B16	174	26,0	22,5	313,3	313,6	J2e6								
09/05/98	B05 a B16	175	25,0	22,9			J2e9								
10/05/98	B05 a B17	176	19,0	21,4	313,9	314,2	J2e6								
11/05/98	B05 a B17	177		23,6	314,2	314,5	J2e6								
12/05/98	B05 a B17	178	18,0	23,1	314,5	314,8	J2e6								
12/05/98	B05 a B17	179		24,4	314,8	315,1	J2e6								
14/05/98	B05 a B17	180		23,1	315,1	315,4	J2e6								
16/05/98	B05 a B17	180 a 182	16,0	21,7	315,1	316,0	J2e6								
18/05/98	B05 a B17	183 a 185	21,0	22,1	316,0	316,9	J2e6								
20/05/98	B05 a B17	186 a 188	25,0	23,5	316,9	317,8	J2e6								
23/05/98	B05 a B17	188 a 191		22,2	317,8	318,7	J2e6								
25/05/98	B05 a B18	192 a 194	20,0	22,9	318,7	319,6	J2e6	640							
27/05/98	B05 a B18	195 a 197	16,0	20,6	319,6	320,5	J2e6								
29/05/98	B05 a B18	198 a 200		23,6	320,5	321,4	J2e6								
31/05/98	B05 a B18	201 a 203		19,7	321,4	322,3	J2e6								
02/06/98	B05 a B18	204 a 206	19,0	21,0	322,3	323,2	J2e6								
04/06/98	B05 a B18	207 a 209		20,2	323,2	324,1	J2e6		25,49	27,61	34,30	38,27	37,46	23,55	26,04
05/06/98	B05 a B18	210 A 212		20,1	324,1	325,0	J2e6								
08/06/98	B05 a B19	213 A 215		22,9	325,0	325,9	J2e6	641							
10/06/98	B05 a B19	216 a 219		20,3	325,9	327,1	J2e6								
12/06/98	B05 a B19	216 a 218		20,7	325,9	326,8	J2e6								
13/06/98	B05 a B19	216 a 218	14,0	19,4	325,9	326,8	J2e6								
13/06/98	B05 a B19	216 a 221	15,0	21,8	325,9	327,4	J2e6								

DATA	TE-608	TE-609	TE-610	TE-611	TE-612	TE-613	TE-614	TE-615	TE-616	TE-617	TE-618	TE-619	TE-620	TE-621	TE-622	TE-623	TE-624	TE-625
31/01/97																		
12/02/97																		
16/02/97																		
20/02/97																		
20/02/97																		
22/02/97																		
27/02/97																		
28/02/97																		
01/03/97																		
05/03/97																		
06/03/97																		
06/03/97																		
07/03/97																		
08/03/97																		
09/03/97																		
11/03/97																		
12/03/97																		
13/03/97																		
14/03/97																		
15/03/97																		
18/03/97																		
19/03/97																		
20/03/97																		
21/03/97																		
22/03/97																		
22/03/97																		
24/03/97																		
25/03/97																		
25/03/97																		
25/03/97																		
26/03/97																		
26/03/97																		
27/03/97																		
27/03/97																		
29/03/97																		
31/03/97																		
01/04/97																		
02/04/97																		

DATA	TE-608	TE-609	TE-610	TE-611	TE-612	TE-613	TE-614	TE-615	TE-616	TE-617	TE-618	TE-619	TE-620	TE-621	TE-622	TE-623	TE-624	TE-625
02/04/97																		
03/04/97			38,96	38,56														
03/04/97			38,96	38,56														
04/04/97			40,33	40,01														
05/04/97			41,09	40,85														
05/04/97			41,09	40,85														
06/04/97			41,48	41,32														
08/04/97			41,84	41,75														
08/04/97			41,84	41,75														
10/04/97			42,04	41,98														
11/04/97			42,15	42,11														
15/04/97			42,52	42,53														
15/04/97			42,52	42,53														
17/04/97			42,70	42,72														
19/04/97			42,83	42,89														
19/04/97			42,83	42,89														
23/04/97			43,11	43,18														
23/04/97			43,11	43,18														
24/04/97			43,16	43,24				35,73	36,13									
25/04/97			43,21	43,29				37,98	38,51									
26/04/97			43,25	43,34				37,77	39,39									
26/04/97			43,25	43,34				37,77	39,39									
27/04/97			43,30	43,38				36,94	39,25									
28/04/97			43,35	43,42				36,11	39,08									
29/04/97			43,38	43,48				35,47	38,76									
03/05/97			43,50	43,61				33,96	36,97									
06/05/97			43,58	43,69				33,59	35,74									
07/05/97			43,59	43,71				33,53	35,41									
10/05/97								32,71	34,58									
13/05/97																		
16/05/97			43,68	43,84				31,73	32,90									
23/05/97			43,67	43,87				30,74	31,62									
23/05/97			43,67	43,87				30,74	31,62									
26/05/97								29,49	30,74									
28/05/97	26,24	27,72						29,38	30,02									
31/05/97	28,63	28,26																
03/06/97	30,58	30,26	43,53	43,82				29,30	28,70									
06/06/97	30,62	30,30	43,48	43,80				28,34	28,27									

DATA	TE-608	TE-609	TE-610	TE-611	TE-612	TE-613	TE-614	TE-615	TE-616	TE-617	TE-618	TE-619	TE-620	TE-621	TE-622	TE-623	TE-624	TE-625
06/06/97	30,62	30,30	43,48	43,80				28,34	28,27									
08/06/97	30,72	30,55																
10/06/97	30,77	30,79						27,55	27,56									
10/06/97	30,77	30,79						27,55	27,56									
12/06/97	30,79	31,02																
12/06/97	30,79	31,02																
13/06/97	30,80	31,15						27,64	26,88									
17/06/97	30,80	31,59						27,55	26,71									
17/06/97	30,80	31,59						27,55	26,71									
18/06/97	30,79	31,67	43,20	43,62														
19/06/97	30,77	31,78			29,24	28,82	27,92											
20/06/97	30,75	31,86			33,91	33,88	33,00	27,46	26,28									
21/06/97	30,71	31,94			33,64	33,73	32,81											
24/06/97	30,61	32,15			33,73	34,07	32,63	28,15	26,34									
24/06/97	30,61	32,15			33,73	34,07	32,63	28,15	26,34									
25/06/97	30,58	32,23	42,99	43,48	33,55	33,95	32,52											
27/06/97	30,51	32,37			33,84	34,33	33,01	29,05	26,89									
27/06/97	30,51	32,37			33,84	34,33	33,01	29,05	26,89									
22/12/97																		
23/12/97																		
02/01/98																		
05/01/98																		
06/01/98																		
08/01/98	28,34	34,50	39,78	37,61	30,92	31,41	33,74	34,87	32,75									
08/01/98	28,34	34,50	39,78	37,61	30,92	31,41	33,74	34,87	32,75									
09/01/98																		
10/01/98																		
21/01/98																		
22/01/98	28,81	34,43	39,62	37,46	30,57	31,68	33,93	35,10	31,64	41,53	43,73	42,18	40,54	44,28				
22/01/98	28,81	34,43	39,62	37,46	30,57	31,68	33,93	35,10	31,64	41,53	43,73	42,18	40,54	44,28				
23/01/98										43,86	46,12	44,48	42,95	44,79				
23/01/98										43,86	46,12	44,48	42,95	44,79				
24/01/98										43,71	45,93	44,41	43,31	42,40				
26/01/98										43,58	45,83	44,55	43,48	39,41				
27/01/98										43,64	45,94	44,77	43,68	38,60				
27/01/98										43,64	45,94	44,77	43,68	38,60				
28/01/98										43,66	46,03	44,97	43,88	38,26				
28/01/98										43,66	46,03	44,97	43,88	38,26				

DATA	TE-608	TE-609	TE-610	TE-611	TE-612	TE-613	TE-614	TE-615	TE-616	TE-617	TE-618	TE-619	TE-620	TE-621	TE-622	TE-623	TE-624	TE-625
28/01/98										43,66	46,03	44,97	43,88	38,26				
29/01/98										43,66	46,11	45,12	44,04	37,95				
29/01/98										43,66	46,11	45,12	44,04	37,95				
30/01/98										43,62	46,16	45,21	44,16	37,51				
31/01/98																		
02/02/98										43,41	46,27	45,52	44,46	35,18				
03/02/98																		
03/02/98																		
04/02/98																		
05/02/98										43,14	46,31	45,72	44,55	34,31	29,34	30,68	34,00	34,16
06/02/98										43,03	46,32	45,79	44,73	33,77	39,30	39,35	38,74	38,32
07/02/98										42,90	46,31	45,85	44,80	34,61	43,24	43,14	42,04	41,75
08/02/98																		
09/02/98										42,62	46,24	45,96	44,91	33,72	43,24	43,67	42,33	42,51
11/02/98										42,33	46,12	46,07	45,01	33,60	43,43	44,08	42,72	42,70
11/02/98										42,33	46,12	46,07	45,01	33,60	43,43	44,08	42,72	42,70
12/02/98	29,39	34,36	39,42	37,31	30,63	31,92	34,52	35,71	31,08	42,20	46,06	46,13	45,05	33,46	43,56	44,34	43,01	42,90
12/02/98	29,39	34,36	39,42	37,31	30,63	31,92	34,52	35,71	31,08	42,20	46,06	46,13	45,05	33,46	43,56	44,34	43,01	42,90
13/02/98										42,06	45,98	46,17	45,09	33,24	43,57	44,51	43,21	43,06
14/02/98										41,88	45,85	46,20	45,13	32,37	43,52	44,66	43,44	43,25
14/02/98										41,88	45,85	46,20	45,13	32,37	43,52	44,66	43,44	43,25
14/02/98										41,88	45,85	46,20	45,13	32,37	43,52	44,66	43,44	43,25
16/02/98										41,60	45,67	46,24	45,19	32,67	43,39	44,92	43,76	43,53
17/02/98										41,40	45,53	46,27	45,23	32,49	43,30	45,10	44,00	43,73
17/02/98										41,40	45,53	46,27	45,23	32,49	43,30	45,10	44,00	43,73
18/02/98	29,47	34,34	39,36	37,25	30,51	31,95	34,69	35,90	30,76	41,28	45,45	46,28	45,24	32,72	43,25	45,21	44,12	43,85
18/02/98	29,47	34,34	39,36	37,25	30,51	31,95	34,69	35,90	30,76	41,28	45,45	46,28	45,24	32,72	43,25	45,21	44,12	43,85
20/02/98																		
20/02/98																		
21/02/98										40,85	45,10	46,33	45,31	32,85	43,03	45,57	44,63	44,29
21/02/98										40,85	45,10	46,33	45,31	32,85	43,03	45,57	44,63	44,29
22/02/98																		
23/02/98										40,60	44,83	46,36	45,34	32,93	42,90	45,68	44,90	44,53
26/02/98										40,26	44,41	46,37	45,38	33,10	42,70	45,76	45,27	44,81
27/02/98										40,11	44,25	46,37	45,39	32,78	42,61	45,78	45,40	44,90
01/03/98																		
02/03/98															42,41	45,75	45,66	45,04
03/03/98										39,75	43,78	46,40	45,42	30,97	42,30	45,73	45,76	45,09

DATA	TE-608	TE-609	TE-610	TE-611	TE-612	TE-613	TE-614	TE-615	TE-616	TE-617	TE-618	TE-619	TE-620	TE-621	TE-622	TE-623	TE-624	TE-625
04/03/98	29,57	34,31	39,23	37,15	30,72	32,01	35,06	36,31	30,58	39,65	43,65	46,40	45,42	31,11	42,21	45,70	45,84	45,12
04/03/98	29,57	34,31	39,23	37,15	30,72	32,01	35,06	36,31	30,58	39,65	43,65	46,40	45,42	31,11	42,21	45,70	45,84	45,12
09/03/98															41,77	45,46	46,17	45,15
10/03/98										39,14	42,90	46,37	45,42	32,06	41,71	45,40	46,23	45,14
11/03/98	29,60	34,30	39,17	37,09	30,91	32,04	35,22	36,49	30,58	39,10	42,82	46,36	45,43	32,00	41,65	45,36	46,27	45,13
12/03/98																		
13/03/98																		
14/03/98																		
16/03/98																		
20/03/98																		
21/03/98										38,20	41,87	46,29	45,38	29,21	40,66	44,73	46,70	44,83
24/03/98																		
25/03/98																		
26/03/98	29,77	34,27	39,06	36,95	30,74	32,14	35,57	36,86	29,61	37,63	41,43	46,25	45,35	29,09	40,03	44,40	46,86	44,60
26/03/98	29,77	34,27	39,06	36,95	30,74	32,14	35,57	36,86	29,61	37,63	41,43	46,25	45,35	29,09	40,03	44,40	46,86	44,60
27/03/98																		
27/03/98																		
28/03/98																		
30/03/98																		
07/04/98																		
08/04/98			38,96	36,83	30,33	32,15	35,84	37,17	28,23	36,38	40,54	46,12	45,24	26,29	38,60	43,47	47,19	43,81
09/04/98										36,26	40,45	46,11	45,23	26,30	38,46	43,40	47,21	43,74
09/04/98										36,26	40,45	46,11	45,23	26,30	38,46	43,40	47,21	43,74
10/04/98																		
13/04/98	29,70	34,25	38,93	36,77	30,12	32,08	35,94	37,26	28,11	36,22	40,11	46,08	45,18	28,17	38,01	43,09	47,27	43,48
14/04/98																		
14/04/98																		
15/04/98																		
17/04/98																		
17/04/98																		
18/04/98																		
18/04/98																		
19/04/98																		
19/04/98																		
20/04/98																		
21/04/98																		
21/04/98																		

DATA	TE-608	TE-609	TE-610	TE-611	TE-612	TE-613	TE-614	TE-615	TE-616	TE-617	TE-618	TE-619	TE-620	TE-621	TE-622	TE-623	TE-624	TE-625
22/04/98																		
22/04/98																		
23/04/98																		
05/05/98																		
06/05/98																		
06/05/98																		
07/05/98																		
07/05/98																		
08/05/98																		
08/05/98																		
09/05/98																		
09/05/98																		
10/05/98																		
11/05/98																		
12/05/98																		
12/05/98																		
14/05/98																		
16/05/98																		
18/05/98																		
20/05/98																		
23/05/98																		
25/05/98																		
27/05/98																		
29/05/98																		
31/05/98																		
02/06/98																		
04/06/98	27,53	34,16	38,63	36,01	28,70	30,84	36,82	38,14	23,92	32,81	36,34	45,66	44,18	23,08	34,20	39,07	47,72	39,62
05/06/98																		
08/06/98																		
10/06/98																		
12/06/98																		
13/06/98																		
13/06/98																		

DATA	TE-626	TE-627	TE-628	TE-629	TE-630	TE-631	TE-632	TE-633	TE-634	TE-635	TE-636	TE-637	TE-638	TE-639	TE-640	TE-641	temp. amb.
31/01/97																	
12/02/97																	
16/02/97																	
20/02/97																	
20/02/97																	
22/02/97																	
27/02/97																	
28/02/97																	
01/03/97																	
05/03/97																	
06/03/97																	
06/03/97																	
07/03/97																	
08/03/97																	
09/03/97																	
11/03/97																	
12/03/97																	
13/03/97																	
14/03/97																	
15/03/97																	22,65
18/03/97																	23,33
19/03/97																	23,00
20/03/97																	21,00
21/03/97																	24,35
22/03/97																	25,12
22/03/97																	25,12
24/03/97																	22,76
25/03/97																	24,90
25/03/97																	24,90
25/03/97																	24,90
26/03/97																	25,13
26/03/97																	25,13
27/03/97																	23,58
27/03/97																	23,58
29/03/97																	23,19
31/03/97																	23,77
01/04/97																	21,88
02/04/97																	21,52

DATA	TE-626	TE-627	TE-628	TE-629	TE-630	TE-631	TE-632	TE-633	TE-634	TE-635	TE-636	TE-637	TE-638	TE-639	TE-640	TE-641	temp. amb.
02/04/97																	21,52
03/04/97																	22,50
03/04/97																	22,50
04/04/97																	14,96
05/04/97																	15,13
05/04/97																	15,13
06/04/97																	19,54
08/04/97																	20,38
08/04/97																	20,38
10/04/97																	20,25
11/04/97																	21,91
15/04/97																	23,43
15/04/97																	23,43
17/04/97																	23,12
19/04/97																	24,26
19/04/97																	24,26
23/04/97																	22,08
23/04/97																	22,08
24/04/97																	23,63
25/04/97																	18,37
26/04/97																	15,77
26/04/97																	15,77
27/04/97																	15,38
28/04/97																	18,10
29/04/97																	16,19
03/05/97																	21,65
06/05/97																	17,50
07/05/97																	21,33
10/05/97																	21,04
13/05/97																	19,17
16/05/97																	19,93
23/05/97																	12,91
23/05/97																	12,91
26/05/97																	15,46
28/05/97																	13,92
31/05/97																	17,00
03/06/97																	16,29
06/06/97																	18,86

DATA	TE-626	TE-627	TE-628	TE-629	TE-630	TE-631	TE-632	TE-633	TE-634	TE-635	TE-636	TE-637	TE-638	TE-639	TE-640	TE-641	temp. amb.
06/06/97																	18,86
08/06/97																	8,84
10/06/97																	14,11
10/06/97																	14,11
12/06/97																	20,00
12/06/97																	20,00
13/06/97																	21,52
17/06/97																	14,44
17/06/97																	14,44
18/06/97																	11,00
19/06/97																	17,04
20/06/97																	20,63
21/06/97																	23,72
24/06/97																	17,83
24/06/97																	17,83
25/06/97																	22,42
27/06/97																	15,82
27/06/97																	15,82
22/12/97																	30,65
23/12/97																	25,83
02/01/98																	27,00
05/01/98																	31,44
06/01/98																	27,91
08/01/98																	24,67
08/01/98																	24,67
09/01/98																	27,14
10/01/98																	27,93
21/01/98																	28,73
22/01/98																	27,11
22/01/98																	27,11
23/01/98																	24,95
23/01/98																	24,95
24/01/98																	25,61
26/01/98																	25,45
27/01/98																	29,21
27/01/98																	29,21
28/01/98																	29,44
28/01/98																	29,44

DATA	TE-626	TE-627	TE-628	TE-629	TE-630	TE-631	TE-632	TE-633	TE-634	TE-635	TE-636	TE-637	TE-638	TE-639	TE-640	TE-641	temp. amb.
28/01/98																	29,44
29/01/98																	28,00
29/01/98																	28,00
30/01/98																	25,83
31/01/98																	24,43
02/02/98																	25,47
03/02/98																	25,00
03/02/98																	25,00
04/02/98																	23,57
05/02/98																	23,04
06/02/98																	26,81
07/02/98																	23,94
08/02/98																	25,38
09/02/98																	27,77
11/02/98																	22,53
11/02/98																	22,53
12/02/98																	24,00
12/02/98																	24,00
13/02/98																	24,10
14/02/98																	25,88
14/02/98																	25,88
14/02/98																	25,88
16/02/98																	26,05
17/02/98																	26,08
17/02/98																	26,08
18/02/98																	25,89
18/02/98																	25,89
20/02/98																	25,38
20/02/98																	25,38
21/02/98	41,71	43,79	45,06	42,38													25,89
21/02/98	41,71	43,79	45,06	42,38													25,89
22/02/98																	
23/02/98	42,03	43,86	43,09	40,80													28,23
26/02/98	43,88	45,38	45,42	43,35													25,56
27/02/98	43,94	45,70	45,75	43,20													24,64
01/03/98																	23,42
02/03/98	43,76	45,83	45,91	42,54													23,53
03/03/98	43,68	45,93	46,03	42,17													24,55

DATA	TE-626	TE-627	TE-628	TE-629	TE-630	TE-631	TE-632	TE-633	TE-634	TE-635	TE-636	TE-637	TE-638	TE-639	TE-640	TE-641	temp. amb.
04/03/98	43,57	45,97	46,12	41,82													27,14
04/03/98	43,57	45,97	46,12	41,82													27,14
09/03/98	42,85	45,98	46,30	40,56													30,66
10/03/98	42,73	45,97	46,33	40,38													26,73
11/03/98	42,65	45,96	46,35	40,26													25,50
12/03/98																	25,48
13/03/98																	23,88
14/03/98																	22,90
16/03/98																	22,74
20/03/98																	23,00
21/03/98	41,31	45,58	46,74	37,98													22,85
24/03/98																	24,27
25/03/98					20,82												21,38
26/03/98	40,59	45,25	46,88	37,10	32,99	36,06	36,61	37,26									17,86
26/03/98	40,59	45,25	46,88	37,10	32,99	36,06	36,61	37,26									17,86
27/03/98					34,57	38,00	37,67	37,24									22,48
27/03/98					34,57	38,00	37,67	37,24									22,48
28/03/98					35,37	39,09	38,62	36,07									21,57
30/03/98					35,23	40,24	39,44	34,43									23,78
07/04/98																	21,00
08/04/98	38,86	43,85	47,11	34,45	32,29	41,30	41,13	30,19									19,70
09/04/98	38,71	43,74	47,12	34,27	31,91	41,20	41,21	29,99									22,80
09/04/98	38,71	43,74	47,12	34,27	31,91	41,20	41,21	29,99									22,80
10/04/98																	22,00
13/04/98	38,19	43,37	47,16	34,01	33,17	40,60	41,29	31,06									28,50
14/04/98					33,48	40,78	41,28	31,16									24,40
14/04/98					33,48	40,78	41,28	31,16									24,40
15/04/98					33,47	40,25	41,27	31,16	41,07	40,14	37,42						22,50
17/04/98					32,41	39,92	41,25	30,46	40,52	40,78	37,11						20,40
17/04/98					32,41	39,92	41,25	30,46	40,52	40,78	37,11						20,40
18/04/98					32,01	39,80	41,24	30,08	39,47	39,82	36,84						17,00
18/04/98					32,01	39,80	41,24	30,08	39,47	39,82	36,84						17,00
19/04/98																	17,60
19/04/98																	17,60
20/04/98					31,24	39,57	41,23	28,43	39,71	40,80	38,00						18,90
21/04/98					31,32	39,46	41,22	27,82	39,80	41,19	38,34						22,10
21/04/98					31,32	39,46	41,22	27,82	39,80	41,19	38,34						22,10

DATA	TE-626	TE-627	TE-628	TE-629	TE-630	TE-631	TE-632	TE-633	TE-634	TE-635	TE-636	TE-637	TE-638	TE-639	TE-640	TE-641	temp. amb.
22/04/98																	23,10
22/04/98																	23,10
23/04/98					31,99	39,23	41,22	28,22	39,79	41,81	38,58						21,40
05/05/98																	18,20
06/05/98					29,84	37,93	41,22	25,34	38,47	41,73	36,47						18,00
06/05/98					29,84	37,93	41,22	25,34	38,47	41,73	36,47						18,00
07/05/98												30,36	30,51	31,53			16,80
07/05/98												30,36	30,51	31,53			16,80
08/05/98												33,89	34,49	35,56			18,00
08/05/98												33,89	34,49	35,56			18,00
09/05/98												34,78	35,33	36,00			18,70
09/05/98												34,78	35,33	36,00			18,70
10/05/98																	18,20
11/05/98												35,64	36,29	35,55			21,10
12/05/98												35,95	36,66	34,91			20,70
12/05/98												35,95	36,66	34,91			20,70
14/05/98																	19,80
16/05/98												36,44	37,49	33,06			15,50
18/05/98									36,67	41,18	33,79	36,43	37,78	32,28			17,90
20/05/98																	19,50
23/05/98					29,47	36,32	40,84	23,90	35,74	40,71	32,85	36,11	38,25	30,62	31,72		20,90
25/05/98									35,56	40,54	32,57	36,03	38,36	30,41	31,60		24,30
27/05/98									35,42	40,31	32,30	35,98	38,44	30,25	33,13		16,50
29/05/98												35,95	38,46	30,02	34,73		18,60
31/05/98																	16,10
02/06/98									34,78	39,67	31,55	35,62	38,38	29,14	36,18		14,87
04/06/98	33,66	38,13	47,02	27,55	27,55	35,52	40,32	21,47	34,51	39,47	31,20	35,42	38,32	28,54	36,67		16,80
05/06/98																	17,78
08/06/98												34,99	38,13	27,37	37,34	29,59	20,50
10/06/98												34,85	38,04	27,33	37,54	33,89	17,20
12/06/98					28,86	34,95	39,93	22,41	33,84	38,72	29,90	34,76	37,92	27,20	37,70	34,93	18,22
13/06/98																35,04	16,76
13/06/98																35,04	16,76

## **ANEXO 4 – UNIDADES**

### **ENERGIA**

1 J	0,2389 cal
1 cal	4,186 J

### **POTÊNCIA**

1 W	1 J/s = 0,2389 cal/s
-----	----------------------

### **DIFERENÇA DE TEMPERATURA**

$\Delta T$ °C	$\Delta T$ K
---------------	--------------

### **TEMPERATURA**

T K	T °C + 273,15
-----	---------------